



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK KİREMİT TOZUNUN RİJİT YOL KAPLAMA İNŞASINDA
KULLANILABİLİRLİĞİ**

Seher DALĞIÇ

**Haziran-2025
BATMAN**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK KİREMİT TOZUNUN RİJİT YOL KAPLAMA İNŞASINDA
KULLANILABİLİRLİĞİ**

Seher DALĞIÇ

**Danışman
Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ**

**2. Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mahmut DURMAZ**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hakan ÇOBAN Dr. Öğr. Üyesi Murat BATAN

**Haziran-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Seher DALĞIÇ tarafından hazırlanan “Atık Kiremit Tozunun Rijit Yol Kaplama İnşasında Kullanılabilirliği” adlı tez çalışması 19/06/2025 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

2. Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mahmut DURMAZ

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.

Seher DALĞIÇ
19/06/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK KİREMIT TOZUNUN RİJİT YOL KAPLAMA İNŞASINDA KULLANILABİLİRLİĞİ

Seher DALĞIÇ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

2025, 88 Sayfa

Bu araştırma içerisinde öncelikli amaç atık kiremit tozlarının beton yol kaplama inşası için kullanılabilirliği ve ekonomi açısından uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Yapılan tez araştırma kapsamında kiremit tozu, silis dumanı, çimento, çelik lif, agrega ve süperakışkanlaştırıcı temin edilip dört farklı beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlar Referans Pudra Beton (RFB), Referans Lifli Pudra Beton (RLFB), Kiremit tozlu Pudra Beton (KPB) ve Kiremit tozlu Lifli Pudra Beton (KLFB) olarak oluşturulmuştur. Ortaya çıkan numunelere 4 gün 20°C su+ 2 gün 180°C etüv kürü, 7 gün 20°C su kürü ve 28 gün 20°C su kürü olmak üzere üç farklı kür işlemi uygulanmıştır. Kür işlemleri bittikten sonra numunelere basınç deneyi, eğilme deneyi, aşınma (bohme) deneyi ve donma-çözünme deneyi uygulanmıştır. Ayrıca bu deneylerin doğruluğunu güçlendirmek için UPV deneyi, SEM-EDX analizi, XRD analizi, FT-IR analizi ve ayrıca yapışma deneyi yapılmıştır. Araştırma deneyleri Siirt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında yapılmıştır. Daha sonra mikro deneyler ise Munzur Üniversitesi Laboratuvarına gönderilip yapılmıştır. Yapılan bütün deneyler sonucunda kiremit tozunun beton yolda kullanılabilirliği ispatlanmış olup ek olarak da referans olarak alınan betondan çok daha dayanıklı ve mukavemeti yüksek bir beton yol olabileceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kiremit Tozu, Pudra Beton, Lifli Kiremit tozu, Rijit Yol, SEM-EDX, XRD

ABSTRACT

MASTER THESIS

THE FEASIBILITY OF USING CRUSHED STONE POWDER IN THE CONSTRUCTION OF RYEGRASS PAVEMENT

Seher DALĞIÇ

Batman University Graduate Education Institute

Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

2025, 88 Pages

The primary purpose of this research is to investigate whether waste tile dust can be used for the construction of concrete pavements and whether it is suitable in terms of economy. Within the scope of the thesis research, tile dust, silica fume, cement, steel fibre, aggregate and superplasticiser were obtained and four different concretes were produced. These were Reference Powdered Concrete (RFB), Reference Fibre Powdered Concrete (RLFB), Tile Powdered Powdered Concrete (KPB) and Tile Powdered Fibre Powdered Concrete (KLFB). Three different curing processes were applied to the resulting specimens: 4 days 20°C water + 2 days 180°C oven curing, 7 days 20°C water curing and 28 days 20°C water curing. After curing, the specimens were subjected to compression test, bending test, abrasion (Bohme) test and freeze-thaw test. In addition, UPV test, SEM-EDX analysis, XRD analysis, FT-IR analysis and also adhesion test were performed to strengthen the accuracy of these tests. The research experiments were carried out at Siirt University Civil Engineering Construction Laboratory. Then micro experiments were sent to Munzur University Laboratory and carried out. As a result of all the experiments, it has been proved that tile dust can be used in concrete road and in addition, it is seen that it can be a much more durable and high strength concrete road than the concrete taken as a reference.

Keywords: Tile Powder, Powdered Concrete, Fibrous Tile powder, Rigid Road, SEM-EDX, XRD

ÖN SÖZ

Bu kapsamlı ve titizlikle hazırlanmış tez çalışması çerçevesinde birincil amaç, karayolu altyapısı için beton yol için uygulanabilir bir katkı maddesi olarak Kiremit tozunun potansiyel faydasının kapsamlı bir şekilde araştırılmasıyla elde edilen yol inşaatına uygun çığır açan sert bir malzeme tasarlamaktır ve aynı zamanda inşaat ülke ekonomisi üzerinde önemli bir etki yaratmayı amaçlamaktadır. Bu iddialı ve çok yönlü hedefin peşinden koşmanın arkasındaki temel mantık, ülkemizde bulunan bol doğal kaynakların bulunması yatmaktadır, böylece atık madde olarak kabul edilebilecek şeylerin önemli ekonomik varlıklara dönüştürülmesini kolaylaştırırken, ekonomik olarak uygulanabilir yol inşaatı için yeni bir beton malzeme üretirken ve bu vizyonu yürütürken, ulusumuzun eğitilmiş işgücünün beceri ve uzmanlığından yararlanarak bilimsel bilgideki ilerlemeleri teşvik eder ve Atık azaltma ve verimli kaynak kullanımı taahhüdü tarafından yönlendirilen ekonomik tasarruflar. Bu titiz ve sistematik araştırma girişimi, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün saygın rehberliği ve koordinasyonu altında yürütülmüştür ve böylesine anlamlı ve etkili bir projenin başarılı bir şekilde uygulanması ve gerçekleştirilmesi için gerekli olan kurumsal desteğin ve işbirlikçi çabaların eleştirel doğasını vurgulamaktadır. Nihayetinde, bu çalışmanın beklenen sonuçlarının, inşaat endüstrisinin alanının çok ötesine uzanan, ulusal ekonomideki sürdürülebilir kalkınmanın daha geniş parametrelerini etkileyen ve böylece altyapı gelişiminin geleceği için çok önemli olan malzeme bilimi ve mühendislik uygulamaları alanlarında önemli bir ilerlemeyi temsil eden önemli etkilere sahip olması beklenmektedir.

Bu vesileyle tüm akademik yolculuğum boyunca bana paha biçilmez ve sarsılmaz destek sağlayan, geniş bilgi birikimi ve zengin mesleki tecrübesi ile bana ustaca rehberlik eden kıymetli danışmanım Doç. Dr. Abdulrezzak Bakış'a derin şükranlarımı sunmak istiyorum. Ayrıca, iyimser ve cesaret verici tavrıyla karşılaştığım zorlukları sürekli hafiflettiği için çeşitli zorlukları daha kolay ve yüksek motivasyonla aşmamı sağlayan sarsılmaz ikinci danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Mahmut Durmaz'a içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Son olarak da başta babam olmak üzere değerli aileme verdikleri destek ve emekleri için teşekkürlerimi iletmek isterim.

Seher DALĞIÇ
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Karayolu Kaplama Türleri	2
1.2. Kaplama Kalınlığını ve Tipini Etkileyen Unsurlar	2
1.2.1. Malzeme kalitesi ve karışım tasarımı	2
1.2.2. Trafik yükü ve hacmi	3
1.2.3. İklim ve çevresel koşullar	3
1.2.4. Taban ve alt taban katmanları	3
1.2.5. Yapısal tasarım ve mühendislik hesaplamaları	3
1.2.6. Bağlantı koşulları	4
1.3. Rijit ve Esnek Kaplamaların Karşılaştırılması	4
1.4. Dünyadan Ülkemize Ulaşan Beton Yol Tarihi	6
1.5. Reaktif Pudra Beton	13
1.6. Reaktif pudra beton üretim yöntemleri	15
1.7. Reaktif pudra beton karışımlarının oranları	16
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	18
3. MATERYAL VE METOT	25
3.1. Materyal	26
3.1.1. Malzemeler	26
3.1.1.1. Çimento	26
3.1.1.2. Kiremit tozu içeriği ve özellikleri	28
3.1.1.3. Silis dumanı	28
3.1.1.4. Süperakışkanlaştırıcı	29
3.1.1.5. Kullanılan su	30
3.1.1.6. Kullanılan çelik lif ve özellikleri	30
3.1.1.7. Referans olarak alınan Reaktif Pudra Beton (RPB) üretimi	31
3.1.2. Karışım oranları	31
3.1.2.1. Lifsiz ideal reaktif pudra beton karışım oranları	31
3.1.2.2. İdeal lifli reaktif pudra beton karışım oranları	33
3.1.2.2. Kiremit tozlu lifsiz Reaktif Pudra Beton (KPB) üretimi	34
3.1.2.4. Kiremit tozlu lifli Reaktif Pudra Beton (KLPB) karışım oranları	35
3.1.2.5. Numune hazırlanması	36

3.1.2.6. Referans lifsiz Reaktif Pudra Beton (RFB) karışım oranları	36
3.1.2.7. Referans lifli Reaktif Pudra Beton (RLFB) karışım oranları	36
3.2. Metot	37
3.2.1. Beton numunelerine uygulanan kür çalışmaları	37
3.2.2. Beton Numunelerinde Basınç Deneyleri	38
3.2.3. Beton numunelerinde eğilme deneyleri	39
3.2.4. Beton numunelerinde aşınma (böhme) deneyleri	41
3.2.5. Donma – Çözünme deneyi.....	43
3.2.6. UPV (Ultrasonik Ses Hızı) deneyi.....	44
3.2.7. Yapışma (Pull of Tester) deneyi	45
3.2.8. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)-EDX analizleri	47
3.2.9. XRD (X- Işını Kırınım Metodu) analizleri	49
3.2.10. FT-IR (Fourier dönüşümlü kızılötesi) analizleri.....	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
4.1. Eğilme ve Basınç Deneyleri	52
4.1.1. Lifli ve Lifsiz elde edilen beton numunelerinin eğilme ve basınç değerleri	52
4.1.1.1. Referans olarak alınan lifli ve lifsiz betonun basınç ve eğilme deney sonuçları.....	52
4.1.1.2. Kiremit tozlu lifli ve lifsiz beton numunelerinin eğilme ve basınç deney sonuçları.....	53
4.2. Aşınma (Böhme) Deney Sonuçları	53
4.3. Donma – Çözünme Deney Sonuçları.....	54
4.3.1. Lifli ve lifsiz beton numunelerinin dönme – çözünme deney sonuçları.....	54
4.4. UPV (Ultrasonik Ses Hızı) Deney Sonuçları.....	55
4.4.1. Lifli ve lifsiz beton numunelerinin UPV deneyleri	55
4.4.1.1. Referans olarak alınan lifli ve lifsiz betonun UPV deney sonuçları.....	56
4.4.1.2. Kiremit tozlu lifli ve lifsiz betonun UPV deney sonuçları	56
4.5. Yapışma (Pull of Tester) Deney Sonuçları	57
4.6. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizleri	57
4.7. EDX (Enerji dağılımlı X-Işını) Analizleri	60
4.8. XRD Analizleri	64
4.9. FT-IR Analizleri	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR	74
EKLER	84
EK-1. Resimler	84

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Beton yollarının kullanımının metodolojik sıralamasının özeti	7
Çizelge 1.2. Reaktif pudra beton, normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı betonların karşılaştırılması	15
Çizelge 1.3. Reaktif pudra beton içerisinde kullanılan malzemeler ve miktarları	16
Çizelge 1.4. RPB numuneleri karışım miktarları	17
Çizelge 1.5. RPB numunelerinde deney sonuçları	17
Çizelge 3.1. CEM I 42,5 N fiziksel ve mekanik özellikleri	27
Çizelge 3.2. Silis dumanı, Çimento (CEM I 42,5 N), Kiremit tozu kimyasal özellikleri	29
Çizelge 3.3. Süperakışkanlaştırıcı teknik özellikleri	30
Çizelge 3.4. Çelik lif özellikleri	31
Çizelge 3.5. RPB200 betonlarının çimentoya göre karışım ölçüleri	32
Çizelge 3.6. İdeal lifsiz beton karışım değerleri	33
Çizelge 3.7. İdeal lifli reaktif pudra beton karışım değerleri (Richard, 1995)	34
Çizelge 3.8. KPB VE KLPB karışım değerleri	36
Çizelge 3.9. Referans lifli Reaktif Pudra Beton (RLFB) ve Referans lifsiz Reaktif Pudra Beton (RFB) karışım değerleri	37
Çizelge 4.1. Referans Betonun Basınç ve Eğilme Sonuçları	52
Çizelge 4.2. Kiremit Tozlu Beton Eğilme ve Basınç Deney Sonuçları	53
Çizelge 4.3. Lifli ve Lifsiz Beton Numunelerinin Aşınma (Böhme) Deney Sonuçları ..	53
Çizelge 4.4. Lifli ve Lifsiz Beton Numunelerinin Donma – Çözünme Deney Sonuçları	54
Çizelge 4.5. Lifli ve Lifsiz Beton Numunelerinin UPV Deney Sonuçları	56
Çizelge 4.6. Kiremit Tozlu Lifli ve Lifsiz Beton Numunelerinin UPV Deney Sonuçları	56
Çizelge 4.7. Kiremit Tozlu Beton Numunelerinin Yapışma Deney Sonuçları	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. a) Adana-Mavi Bulvar (1986, 2x2 şerit), b) Adana-Turgut Özal Bulvarı (1986-1987, 2x3 şerit), c) Adana-Adnan Menderes Bulvarı (1987, 2x2 şerit), d) Adana-Özdemir Sabancı Bulvarı (1994, 2x2 şerit)	9
Şekil 1.2. Adana- İncirlik hava üssü çevre güvenlik yolu beton dökümü (Çetin, 2009b)	10
Şekil 1.3. Afyon -Emirdağ yol yapımının başlaması (Nalbantoğlu, 1961)	11
Şekil 1.4. Afyonkarahisar İscehisar beton yol başlangıcına ait görüntü	11
Şekil 1.5. Hasdal Kemerburgaz beton yol görüntüsü	12
Şekil 1.6. Hasdal Kemerburgaz beton yol çalışmasının en kesiti (Arık, 2022a).....	12
Şekil 3.1. Çimento	27
Şekil 3.2. Kiremit tozu.....	28
Şekil 3.3. Silis dumanı	28
Şekil 3.4. Süperakışkanlaştırıcı	30
Şekil 3.5. Çelik lif.....	31
Şekil 3.6. Beton Basınç makinesi ve uygulanması	39
Şekil 3.7. Eğilme deneyine ait görüntü.....	41
Şekil 3.8. Aşınma (Böhme) deneyi görünümü	42
Şekil 3.9. Donma-çözünme deneyinin yapılışı	43
Şekil 3.10. UPV (Ultrasonik Ses Hızı) ölçüm aleti	44
Şekil 3.11. UPV (Ultrasonik Ses Hızı) ölçüm örneği.....	45
Şekil 3.12. Yapışma deneyi aleti ve yapışma deneyine ait örnek.....	46
Şekil 3.13. SEM-EDX deney cihazı	47
Şekil 3.14. Karışım partiküllerinin (a) CEM I 42.5 N Çimento EDX (b) CEM I 42.5 N Çimento 10.00 KX büyütmeledeki morfolojisi (c) Silis dumanı EDX (d) Silis Dumanı 10.00 Kx büyütmeledeki morfolojisi (e) Kiremit Tozu EDX (f) Kiremit Tozu 5.00 Kx büyütmeledeki morfolojisi.....	48
Şekil 3.15. XRD deney cihazı	50
Şekil 3.16. XRD faz analizleri.....	50
Şekil 3.17. FT-IR Analizleri Cihazı.....	51
Şekil 4.1. RFB, KPB, RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin SEM görüntüleri 10.00 KX büyütme ile a) RFB (Referans Lifsiz Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), b) KPB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), c) RLFB (Referans Lifli Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), d) KLPB (Kiremit Tozlu Lifli Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü).....	58
Şekil 4.2. RFB, KPB, RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin SEM görüntüleri 10.00 KX büyütme ile a) RFB (Referans Lifsiz Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü b) KPB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü, c) RLFB (Referans Lifli Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü, d) KLPB (Kiremit Tozlu Lifli Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü.	59
Şekil 4.3. RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin SEM görüntüleri 100 ve 200µm KX büyütme ile a) RB (Referans Lifsiz Pudra Beton) b) KLPB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton).....	60
Şekil 4.4. RFB, KPB, RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin EDX görüntüleri a) RFB (Referans Lifsiz Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), b) RLFB (Referans Lifli Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C	

standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), c) KPB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), d) KLPB (Kiremit Tozlu Lifli Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü).....	62
Şekil 4.5. RFB, KPB, RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin EDX görüntüleri	
a) RFB (Referans Lifsiz Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü b) RLFB (Referans Lifli Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü, c) KPB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü, d) KLPB (Kiremit Tozlu Lifli Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü.....	63
Şekil 4.6. XRD faz analizleri (a) KLPB-K (b) KLPB (c) RFB-K (d) RFB (▲)	
Portlandit, (◆) kuvars, (▼) kalsit, (/) Etrenjit	64
Şekil 4.7. RFB, RFB-K, KLPB, KLPB-K FT-IR analizi	65
Şekil Ek-1.1. Malzemelerin karıştırılmasına ait görüntü	84
Şekil Ek 1.2. Harcın döküldüğü numune kalıpları	85
Şekil Ek 1.3. Numunelerin kalıplara konulması	85
Şekil Ek 1.4. Numunelerin suda ve etüvde olan görüntüleri.....	86
Şekil Ek 1.5. UPV deneyine ait görüntü	86
Şekil Ek 1.6. Basınç deneyine ait bir görüntü	87
Şekil Ek 1.7. Eğilme deneyine ait bir görüntü	87
Şekil Ek 1.8. Aşınma (Böhme) deneyine ait bir görüntü	88
Şekil Ek 1.9. Donma-Çözünme deneyine ait bir görüntü	88
Şekil Ek 1.10. Yapışma deneyine ait bir görüntü.....	88

KISALTMALAR

ABD: Amerika Birleşik Devletleri
KGM: Karayolları Genel Müdürlüğü
TÇMB: Türkiye Çimento Üreticileri Birliği
RPB: Reaktif Pudra Beton
NDB: Normal Dayanımlı Beton
YDB: Yüksek Dayanımlı Beton
RPC: Reaktif Toz Betonu
CCTDB: Çelik Tel Takviyeli Betonu
YPB: Yüksek Performanslı Beton
GGBS: Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
PPC: Pomza Tozu Betonu
UHPC: Ultra Yüksek Performanslı Bir Beton
BFRPC: Bazalt Lifli RPC
PRPC: Düz RPC
SFRPC: Çelik Lifli RPC
UCS: Sınırlandırılmamış Sıkıştırma Testleri
UPV: Ultrasonik Ses Hızı
SEM: Taramalı Elektron Mikroskopu
EDX: Enerji dağılımlı X-Işını
XRD: X-Işını Kırınım
FTIR: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
XRF: X-ışınları Floresans spektroskopisi
KPB: Kiremit Tozlu Reaktif Pudra Beton
KLPB: Kiremit Tozlu Lifli Reaktif Pudra Beton
RFB: Referans Lifsiz Reaktif Pudra Beton
RLFB: Referans Lifli Reaktif Pudra Beton

1. GİRİŞ

Ulaşım, bireylerin ya da malların mekânsal konum değişimlerini sağlayan; bu süreci zamansal ve mekânsal etkinlik temelinde optimize etmeyi amaçlayan bir sistemler bütünüdür. Bu sistem, toplumsal, ekonomik ve çevresel ihtiyaçları gözeterek hareketliliği düzenler (Güngör, 2024). Ulusların ilerlemesini değerlendirmek için önemli bir ölçüt, ulaşım altyapılarının bütünüdür (Arpacık, 2024). Bununla birlikte, bir ülkenin ulaşım sektörünün büyümesini teşvik etmek ve hareketliliğin verimliliğini artırmak için, kara, deniz, hava ve demiryolu gibi tüm ulaşım modlarının ulusun bir uyum içinde çalışması zorunludur (Abaklıoğlu, 2019). Sadece böyle bir uyum sayesinde ülke genelinde hızlı, güvenilir, erişilebilir ve uygun maliyetli bir ulaşım sistemi kurulabilir (Yıldızgöz, 2022)

Uygun bir karayolunun tasarımında can ve mal güvenliğinin sağlanması, yolcu konforu ve yol üst yapısının uzun ömürlü olması öncelikli gereksinimler olarak belirlenmelidir (Yan & Dai, 2015). Bir ülkenin ulaşım altyapısının yeterliliği ve yüksek standartlara sahip olması, o ülkenin gelişmişlik düzeyinin önemli göstergelerinden biridir. Gelişmiş ülkelerle karşılaştırıldığında, Türkiye’de son yıllarda ağır taşıt trafiğinde önemli bir artış yaşanmasına rağmen, mevcut ulaşım ağı bu artışı karşılamakta yetersiz kalmaktadır (Sönmez vd., 2025). Özellikle ağır vasıtaların oluşturduğu yüksek tekerlek yükleri, yol üstyapılarının deformasyonu ve erken bozulması üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, artan yük taşıma kapasitesi dikkate alınarak altyapının güçlendirilmesi ve daha dayanıklı üstyapı tasarımlarının uygulanması gerekmektedir (Almoamar, 2024).

Karayolu altyapısı, tamamlanmış bir yol kesitinde tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasında kalan bölgeyi ifade eder. Altyapı; dolgu kesimlerinde dışarıdan getirilen uygun nitelikteki toprakla, yarma kesimlerinde ise mevcut doğal zeminle oluşturulan bir toprak gövdesi niteliğindedir. Ancak yalnızca doğal veya dolgu zeminiyle sınırlı değildir. Yarma alanlarında yapılan kazı işlemlerinin ardından, istenilen yüzey düzlüğünü ve taşıma gücünü sağlamak amacıyla serilip sıkıştırılan toprak malzemeler de altyapının bir parçası kabul edilir. Bu sayede, yol üstyapısına dengeli bir yük dağılımı sağlanmış olur (Kozak, 2011).

Karayolu üstyapısı; doğal zemini istenilen kotlara getirmek ve üzerinde motorlu araçların istenilen hız, güvenlik ve konfor şartlarında hareketini sağlamak amacıyla, önceden belirlenmiş geometrik standartlara göre belirlenen güzergâh boyunca inşa edilen yapıların tamamı karayolu üst yapısını oluşturmaktadır (Berberoğlu, 2011).

1.1. Karayolu Kaplama Türleri

Karayolu üstyapıları; esnek ve rijit olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Esnek üstyapı; kaplama, temel ve alt temel tabakasından oluşur (Karahacıoğlu vd., 2020). Yüksek standart yollardaki kaplama tabakası aşınma ve bağlayıcıdan oluşan iki tabaka şeklinde bitümlü karışımı olarak, düşük standartlı yollarda ise tek veya çift kat sathi kaplama olarak yapılırlar (B. Kaya, 2011)

Rijit üst yapı; Çimento betonu ile yapılan kaplama türüdür. Orta ve ağır trafik yoğunluğuna sahip şehir içi yollarda kullanılan kaliteli bir kaplama türüdür (Mardani-Aghabaglou vd., 2019)

Beton, yol kaplaması olarak kullanıldığında, taşıma kapasitesi yüksek bir üst yapı elemanı olarak davranır ve üzerine gelen yükleri alt tabakalara etkin bir biçimde yayarak zemindeki aşırı deformasyonları önler (Dergisi & 2011). Beton, sağlam ve sert bir malzeme olması sayesinde yapıların yük taşıma kapasitesine katkı sağlar. Ancak çekme kuvvetlerine karşı yeterince dirençli değildir. Bu nedenle, özellikle çatlama veya eğilme gibi durumlarda, betondaki gerilmeyle meydana gelen şekil değiştirme arasındaki ilişki doğrusal olmaz. Bu da betonun büyük gerilmelere karşı esneklik gösteremediği anlamına gelir (Kutlu, 2024).

1.2. Kaplama Kalınlığını ve Tipini Etkileyen Unsurlar

1.2.1. Malzeme kalitesi ve karışım tasarımı

Beton ve asfalt karışımlarının kalitesi, yol kaplamalarının performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Beton için karışımı oluşturan çimento, agrega (kum ve çakıl) ile suyun oranları belirleyicidir. Özellikle yüksek dayanımlı beton elde edebilmek için düşük su-çimento oranı tercih edilir; bu, betonun mukavemetini ve dayanıklılığını artırır (Taha, 2024). Asfalt kaplamalarda ise bağlayıcı asfaltın viskozitesi ve kullanılan agregaların uygun büyüklükte olması, kaplamanın uzun ömürlü ve deformasyona karşı

dirençli olmasında önemli rol oynar. Ayrıca, polimer modifikasyonlu asfaltlar kullanılarak asfaltın esnekliği ve çatlama direnci artırılabilir. Hem beton hem de asfalt için doğru malzeme seçimi ve uygun oranlarda karışım tasarımı, kaliteli ve uzun ömürlü yol kaplamalarının anahtarıdır (Tanyıldızı, 2022).

1.2.2. Trafik yükü ve hacmi

Bir yolun kaplama kalınlığı belirlenirken, üzerinden geçecek araçların sayısı ve ağırlığı dikkate alınır. Trafik hacmi arttıkça ve ağır araç kullanımı yoğunlaştıkça, kaplamanın daha güçlü ve kalın olması gerekir (Almoamar, 2024).

1.2.3. İklim ve çevresel koşullar

Sıcak havalarda asfalt, ısının etkisiyle yumuşar ve bu durum yüzeyde çatlakların oluşmasına zemin hazırlar. Özellikle sıcak iklim bölgelerinde asfalt yüzeyler, trafik yüküyle birleşince zamanla şekil değiştirebilir. Buna karşın, soğuk bölgelerde beton kaplamalar daha avantajlıdır çünkü donma ve çözülme döngülerine karşı daha dirençlidir. Yağış miktarının fazla olduğu bölgelerde, suyun yüzeyde birikmesini engelleyen iyi tasarlanmış bir drenaj sistemi oldukça önemlidir; bu sayede yol kaplamalarının ömrü uzar. Ayrıca, güneşten gelen UV ışınları asfaltın yapısal özelliklerini bozarak zamanla yüzeyin çatlamasına neden olabilir (Ladignon vd., 2021).

1.2.4. Taban ve alt taban katmanları

Taban ve alt taban katmanlarının kalınlığı ve malzeme türü, kaplama özelliklerini etkiler (E. Kaya, 2024). Daha kalın ve sağlam taban katmanları, kaplamanın daha ince olabilmesine imkân tanınabilir. İyi sıkıştırılmış bir alt taban, yük taşıma kapasitesini artırır ve deformasyonu azaltır (Ay, 2014). Geoteknik malzemeler, alt tabanın dayanıklılığını artırmak için kullanılabilir. Su geçirimsiz tabakalar, alt tabanın su ile zayıflamasını engeller (Şimşek, 2005).

1.2.5. Yapısal tasarım ve mühendislik hesaplamaları

Yol kaplamalarının tasarım sürecinde çeşitli mühendislik yazılımları ve simülasyon araçları kullanılarak, kaplamanın performansı ve dayanıklılığı artırılabilir. Bu araçlar sayesinde farklı katman kalınlıkları, malzeme özellikleri, trafik yükleri ve çevresel etkiler sanal ortamda test edilerek en uygun tasarım elde edilir. Özellikle asfalt kaplamalarda, üst tabakanın kalınlığı yolun kullanım amacına göre değişiklik gösterir. Genellikle 8 ile 14 cm arasında bir kalınlık önerilir (Odası vd., 2011).

1.2.6. Bağlantı koşulları

Asfalt kaplamalarda katmanlar arasındaki bağlantı durumu, çatlama dayanımını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Asfalt emülsiyonları ve bitümlü bağlayıcılar, bu katmanlar arasında yeterli yapışma sağlayarak kaplamanın yapısal bütünlüğünü güçlendirir (Özcanan vd., 2014). Zayıf katman bağlantısı, gerilme birikimine yol açarak yüzeyde erken çatlamalara neden olabilir. Özellikle termal çatlaklar, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan genleşme ve büzülme hareketleri sonucu oluşur (Lisans & Hacıoğlu, 2013). Bu tür çatlamaların önlenmesi için, sıcaklık farklarına karşı direnç gösterebilecek termal uyumlu bağlayıcıların tercih edilmesi önerilmektedir. Uygun bağlayıcı seçimi ve katmanlar arası iyi bir aderans, asfalt kaplamaların servis ömrünü uzatırken çatlama eğilimini de önemli ölçüde azaltır (Yetim, 2019).

1.3. Rijit ve Esnek Kaplamaların Karşılaştırılması

1. Beton olan kaplama türleri, asfalt olan kaplama türlerine göre daha dayanıklı olduğu görülür, çünkü asfalt olan kaplama, yüksek hava sıcaklıklarına maruz kaldığında kolayca çatlayabilir. Beton ise daha sert ve dayanıklı olmasına rağmen, asfalt kadar esnek değildir (Köse, 2015).

2. Kaliteli bir beton yol, yaklaşık 40 yıl dayanabilir. Buna karşılık asfalt yolların ömrü genelde 10 yıl civarındadır. Bu fark, özellikle yolun yüzeyinde zamanla oluşan bozulmalarda kendini gösterir. Yolun ne kadar dayanacağı; üzerinden geçen araçların ağırlığı, kullanılan malzemenin kalitesi, yapım sistemi ve hava koşulları gibi birçok etkene bağlıdır (Varlier, 2014).

3. Beton yolların en öne çıkan avantajı, üstün dayanıklılıklarına bağlı olarak sundukları uzun hizmet ömrüdür. Yıllardır beton yol teknolojisinin yaygın olarak uygulandığı Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan çeşitli araştırmalara göre, bir beton

yolun ortalama ömrü yaklaşık 34 yıl olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, asfalt kaplamaların fiziksel ömrü ortalama 17 yıl ile sınırlıdır (Balav, 2021).

4. Beton yol kaplamalarının serim hızı, ortalama olarak saatte 70 m² civarındadır. Buna karşılık, asfalt kaplamalar çok daha hızlı uygulanabilmekte olup saatte yaklaşık 171,30 m² serim kapasitesine sahiptir. Bu yönüyle asfalt, kısa süreli uygulamalar için avantaj sağlar. Ancak hizmet ömrü açısından değerlendirildiğinde, beton yollar asfalt kaplamalara kıyasla çok daha uzun ömürlüdür (Özirmek, 2019).

5. Beton yollar genelde sağlamdır ve kolay bozulmaz. Ama bozulursa, tüm yolun kırılıp yeniden yapılması gerekir. Bu işlem hem uzun sürer hem de pahalıdır. Asfalt yollar daha çabuk bozulabilir. Fakat onarımı daha kolaydır. Bozulan yere sadece yama yapılabilir. Ayrıca eski asfaltın üstüne yeni bir kat asfalt dökülebilir. Bu da zaman ve maliyet açısından avantaj sağlar (Kaygusuz, 2018).

6. Beton yolların kullanıma açılabilmesi için betonun sertleşip dayanıklı hale gelmesi gerekir. Bu süreç genellikle 7 gün, bazen de 28 gün sürebilir. Bu süre boyunca yolun tamamen ya da yarı yarıya trafiğe kapatılması gerekebilir ve bu da ekstra maliyetler yaratır. Oysa asfalt kaplamalarda, asfaltın kuruması sadece birkaç saat sürer. Bu yüzden asfalt yollar, yapım veya onarım sonrası çok daha kısa sürede trafiğe açılabilir. Bu durum, beton yolların yapım ve onarımında yaşanan trafik kapatma ve maliyet sorunlarını azaltır. (Paglia vd., 2022).

7. Esnek kaplamaların yapımında, üst yüzeyine bakıldığında kuru olması ve hava sıcaklığının genellikle 15 °C'nin üzerinde olması gerekmektedir. Bu çevresel şartların sağlanamadığı durumlarda esnek kaplama uygulamaları zorlaşmakta, inşaat süresi ise kısıtlı bir zaman dilimine sıkışmaktadır. Buna karşılık, rijit kaplamalar (beton yollar) çevresel koşullardan daha az etkilenmektedir. Don olayı ve yağış gibi aşırı hava koşulları bulunmadığı sürece, rijit kaplamaların inşası yılın daha uzun bir bölümünde sürdürülebilir. Bu özellik, rijit kaplamalara daha geniş bir inşaat mevsimi avantajı sağlamaktadır (Taşkınsu, 2019).

8. Açık renkli sert kaplamalar gece ışığı yansıtarak daha görünür olur. Ancak gündüz güneş altında parlama yaparak gözleri rahatsız edebilirler. Buna karşılık, koyu renkli esnek kaplamalar ışığı daha fazla emer ve gece daha az görünür olurlar. Gündüz ise daha az parlayarak sürücülere daha rahat bir görüş sağlarlar (Yeğinobalı, 2009).

9. Kaliteli yol kaplamaları sadece yakıt ekonomisine ve bakım maliyetlerine olumlu etki yapmakla kalmaz, aynı zamanda sürüş deneyimini de iyileştirir. Düşük

kaliteli veya hasarlı kaplamalar ise yuvarlanma direncini artırarak aracın daha fazla güç harcamasına yol açar ve bu da maliyetleri yükseltir (Yamanlar, 2012)

10. Rijit (beton) ve esnek (asfalt) kaplamalar kuru koşullarda benzer seviyede kayma direnci sağlayabilirler. Ancak yağışlı havalarda durum değişir; özellikle sıcak bitümlü karışım içeren beton asfalt kaplamalar, ıslak zeminde kayma direncinin daha düşük olmasına sebep olabilir. Bu durum, sürüş güvenliği ve kontrolü açısından önemli bir etkidir. Yağmur sonrası yol tutuşu zayıflayabilir ve sürücülerin daha dikkatli olması gerekir. Ayrıca, kaplamanın yüzey yapısı ve malzeme özellikleri, kayma direncini ve sürüş konforunu doğrudan etkileyen faktörler arasında yer alır (Ladignon vd., 2021).

1.4. Dünyadan Ülkemize Ulaşan Beton Yol Tarihi

Beton yolların tarihi, 19. Yüzyılın sonlarına kadar uzanmakta ve ilk örnekleri Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya ve Avrupa’da görülmektedir (Ayyıldız, 2021). ABD’deki ilk beton yol, 1891 yılında Ohio’da inşa edilen Court Avenue’dur. Bu yol, George Barthelme tarafından “çamur ve tozdan arındırılmış ilk yol” vaadiyle yapılan bir öncü projeye oluşturulmuştur ve 133 yılı aşkın süredir hizmet vermektedir. Günümüzde ABD’deki beton yol ağı 270.000 km’yi aşmış olup, bu altyapının temelleri yaklaşık 100 yıl önce atılan projelere dayanmaktadır (Doç & Kömürlü, 2024)

Avustralya, beton yol teknolojisini uygulayan öncü ülkelerden biridir. Ülkedeki ilk beton yol projesi, 1928 yılında Melbourne kentinde inşa edilen Victoria Parade olmuştur. Bu proje, beton yolların dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü test etmek amacıyla hayata geçirilmiş; inşaat sürecinde dönemin en gelişmiş mühendislik teknikleri kullanılmıştır (Yamanlar, 2012). Proje kapsamında elde edilen sonuçlar, betonun yüksek mukavemet kapasitesini ve zorlu koşullara karşı direncini açıkça ortaya koymuştur. Victoria Parade, aradan geçen neredeyse bir asra rağmen bugün hâlâ kullanılmakta olup, beton yolların uzun hizmet ömrüne sahip olabileceğinin etkileyici bir kanıtı niteliğindedir. Bu öncü uygulama, Avustralya’da beton yol yapımının yaygınlaşmasına öncülük etmiş ve ülkenin modern altyapı projelerinde betonun tercih edilmesine zemin hazırlamıştır (Arman, 2020).

Almanya’daki ilk beton yol, 1888 yılında, günümüzde Polonya sınırları içerisinde yer alan Wrocław kentinde inşa edilmiştir. 1920’li yıllarda beton otoyolların inşasına başlanması, Alman mühendisliğinin ileri düzey uygulamaları için bir dönüm noktası olmuştur (Abdulai, 2023). Özellikle İkinci Dünya Savaşı sırasında ağır askeri yükler

altında dahi işlevini sürdüren bu yollar, betonun yüksek mukavemetini ve uzun hizmet ömrünü somut şekilde ortaya koymuştur. Beton yol yapımında uzun yıllara dayanan bilgi birikimi ve mühendislik deneyimi sayesinde, günümüzde Almanya otoyollarında çift katmanlı beton yol teknolojisi (two-layer concrete pavement) uygulanmaktadır. Bu teknoloji, hem düşük gürültü seviyeleri hem de yüksek sürüş konforu sunan beton yol yüzeylerinin inşa edilmesine olanak tanımaktadır (C. Öztürk, 2022).

Avrupa’da beton yol teknolojisine öncülük eden ülkelerden biri Belçika’dır. 1925 yılında inşa edilen ilk beton yol, herhangi bir büyük yenileme çalışmasına ihtiyaç duymadan 78 yıl boyunca hizmet vermiştir. Bu örnek, beton yolların uzun ömürlü, dayanıklı ve düşük bakım gerektiren yapısını somut biçimde ortaya koymuş ve sonraki uygulamalara temel oluşturmuştur. Bu olumlu sonuçların etkisiyle Belçika’da 1950 yılında ilk kez Sürekli Donatılı Beton Yol tipi tercih edilmiştir (Kadioğlu, 2022). 1970’li yıllardan itibaren ise ülkenin otoyolları büyük ölçüde bu yol tipiyle inşa edilmiştir. Günümüzde, bu yollar 70 yılı aşan servis ömrüyle halen etkin bir şekilde hizmet vermeye devam etmektedir (Güner, 2004).

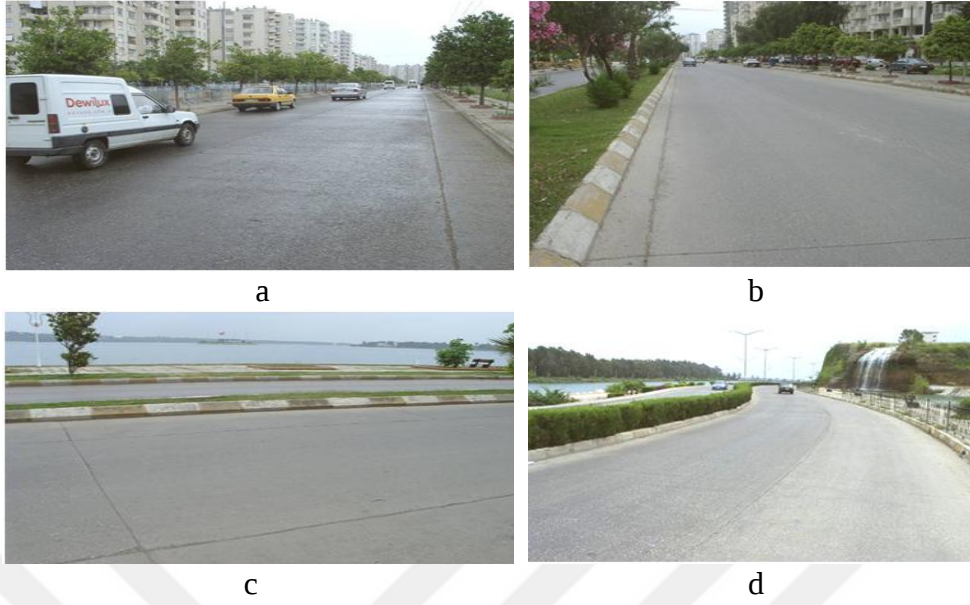
Çizelge 1.1. Beton yollarının kullanımının metodolojik sıralamasının özeti (Arık, 2022a)

Tarih	Durumu
M.Ö 1. Yy	Romalılar, yollarını yaparken volkanik kül ve kireç karışımıyla hazırladıkları, çimentoya benzeyen özel bir harç kullanıyorlardı.
1865	İskoçlar, beton malzeme kullanarak yol inşa etme konusunda ilk kez tecrübe kazandılar.
1880	Avustralya, modern beton yol inşaat teknolojilerinin öncüsü olarak bu alandaki ilk uygulamayı hayata geçirmiştir.
1891	ABD’nin Ohio eyaletinde yapılan ilk beton yol, hâlâ aktif olarak kullanılmaktadır.
1913	Amerika Birleşik Devletleri’nin Güney Bölgesi’nde yer alan Arkansas eyaletinde, ilk beton otoyol inşa edilmiştir.
1914	ABD’de beton yol altyapısında belirli bir doygunluğa ulaşılmasının (yaklaşık 3500 km) ardından, yol inşaatında maliyet ve zaman avantajı sağlayan Silindirle Sıkıştırılan Beton (RCC) yöntemine geçiş yapılmıştır.
1924	Fransa’da beton yol inşaatı projeleri başlatılmıştır.
1930	Almanya’da 4000 km beton otoyol inşaatının başlamasının ardından, Belçika, İsviçre ve diğer Avrupa ülkelerinde beton yol teknolojilerinin yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmalar başlamıştır.
1960-1970	Kanada ve ABD’de beton yol inşaatı yaygınlaşmış olup, ABD’de toplamda 70.000 kilometre uzunluğunda beton yol ağının kurulması sağlanmıştır.

1990	Beton teknolojisinin evrimiyle birlikte, beton yol inşaatında inovatif gelişmeler sağlanmaktadır. Fiber katkılarının betona dahil edilmesi, uygulama metodolojilerindeki iyileştirmeler ve sıvı-kuru tutarlılık kontrolü, bu ilerlemelerin başlıca bileşenlerindendir.
------	--

Küresel ölçekte en kapsamlı karayolu ağına sahip olan Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) kırsal ve kentsel yol altyapısına ilişkin veriler, üstyapının durumuna ilişkin olarak çizelge 1.1'de sunulmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki karayolu ağının önemli bir kısmı, belirtilmemiş bir yol üst yapısı sınıflandırması ile tanımlanmaktadır. Üstyapı tiplerine göre kategorize edilen ayırt edilebilir yol ağlarının analizi, genel yol ağının %6'sının beton yollardan oluştuğunu göstermektedir. Beton yolların kompozit yol kategorisinde yer aldığı düşünüldüğünde bu rakamlar yüzde 18'e yükseliyor. Daha kritik bir görüş, önemli araç trafiğini barındıran eyaletler arası otoyollar boyunca sağlam ve kompozit yolların toplam kullanımının yaklaşık %50'ye yükselmesidir. Amerika Birleşik Devletleri'nin küresel olarak en önde gelen bitüm üreticisi olduğu gerçeği ışığında, asfalt yollara tercih edilen beton yollara olan eğimin giderek daha belirgin hale geldiği sonucuna varılabilir (Oktay, 2009).

Türkiye'de karayolu üst yapı tiplerinin analizi, Ocak 2016 itibariyle Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) yetki sınırları dahilinde bulunan ve eyalet ile il yolları kategorisinde yer alan toplam 66.437 km yol ağını kapsamaktadır. Bu yol ağının yaklaşık %29'u asfalt kaplama ile, %65'i ise sathi kaplama ile karakterizedir. Kalan yol türleri arasında stabilize, asfalt ve mühürsüz yüzeyler yer almaktadır. (Arık, 2022).



Şekil 1.1. a) Adana-Mavi Bulvar (1986, 2x2 şerit), b) Adana-Turgut Özal Bulvarı (1986-1987, 2x3 şerit), c) Adana-Adnan Menderes Bulvarı (1987, 2x2 şerit), d) Adana- Özdemir Sabancı Bulvarı (1994, 2x2 şerit)

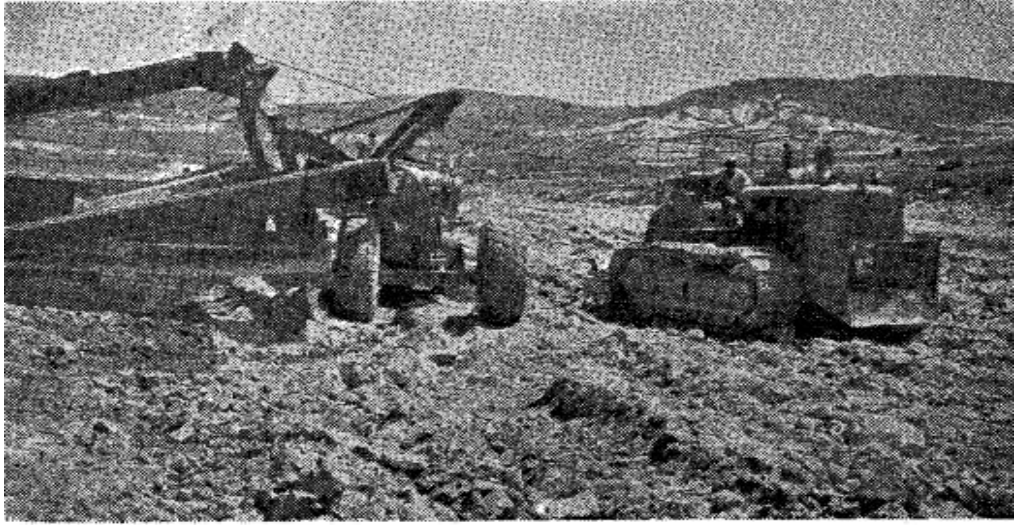
1985 ile 1990 yılları arasında Adana Büyükşehir Belediyesi tarafından başlatılan Yeni Adana Projesi, planlı kentleşme vizyonunun bir parçası olarak beton kaplamalı yolların yaygınlaştırılmasını hedeflemiştir (Peker & Demirkan, 2020). Bu kapsamda, çok sayıda cadde beton otoyol teknolojisi kullanılarak inşa edilmiş ve şehir içi ulaşımında modern bir altyapı oluşturulmuştur. Günümüze kadar herhangi bir bakım veya onarım gerektirmeksizin hizmet vermeye devam eden bu yollar, beton kaplamaların uzun ömürlü ve dayanıklı yapısını kanıtlar niteliktedir. Yüksek operasyonel etkinliklerini koruyan bu caddeler, halen işlevselliğini sürdürebilmekte ve gelecekte de etkin kullanım vadetmektedir. Başta Adana Büyükşehir Belediyesi olmak üzere, bölgedeki diğer yerel yönetimler de bu başarılı uygulamadan ilham alarak beton yolların geliştirilmesine yönelik yeni projeler hazırlamakta ve stratejik planlar oluşturmaktadır. Aşağıda, Adana Büyükşehir Belediyesi tarafından 1985–1990 yılları arasında inşa edilen beton yolların günümüzdeki çağdaş görsel temsilleri sunulmaktadır (Apaydın, 2018).



Şekil 1.2. Adana- İncirlik hava üssü çevre güvenlik yolu beton dökümü (Çetin, 2009b)

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) yetki alanındaki karayollarında açılış uygulaması ilk olarak 2004 yılında, Afyon Emirdağ ayrım karayolunda gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama, Türkiye Çimento Üreticileri Birliği (TÇMB) ile KGM arasında yapılan protokol kapsamında, yaklaşık 2 kilometre uzunluğunda bir güzergahta uygulanmıştır. Şekil 1.1'de a numaralı resimde, yol başlangıcının uygulama biçimi gösterilmektedir (Taşkınısu, 2019)

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ile Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) arasında 2005 yılında imzalanan iş birliği protokolü kapsamında, Türkiye'deki ilk deneysel beton yol uygulaması Afyonkarahisar İscehisar'da gerçekleştirilmiştir. Devlet Caddesi boyunca inşa edilen bu yol, tek yönlü olarak döşenmiş ve beton yol teknolojisinin ülke şartlarına uygunluğu test edilmiştir (Şekil 1.1, b). Bu uygulamanın ardından, aynı protokol çerçevesinde Hasdal–Kemerburgaz Devlet Yolu üzerinde yer alan 40+000 ile 43+500 kilometre işaretleri arasında, toplamda 3.500 metre uzunluğunda tek yönlü beton yol yapımı 2007 yılında tamamlanmıştır (Şekil 1.3, c). Bu kesimde beton kaplamanın gradyanı %2, tabaka kalınlığı ise 32 santimetre olarak belirlenmiştir. Yolun enkesit detayı Şekil 1.4, d'de sunulmaktadır. 2009 yılında ise Milli Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) iş birliğiyle Ordu–Ulubey Devlet Yolu boyunca, 2.000 metre uzunluğunda bor katkılı çimento kullanılarak yenilikçi bir beton yol uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama, alternatif bağlayıcı katkılarla beton yol performansının artırılmasına yönelik önemli bir adım olmuştur. Son olarak, 2010 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolları Şehir Kavşağı'nda toplam 2.000 metre uzunluğunda beton yol inşaatını üstlenerek uygulamayı yaygınlaştırma sürecini sürdürmüştür. Bu projeler, Türkiye'de beton yol teknolojisine geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması açısından dönüm noktaları olarak değerlendirilmektedir (Bolat, 2018).



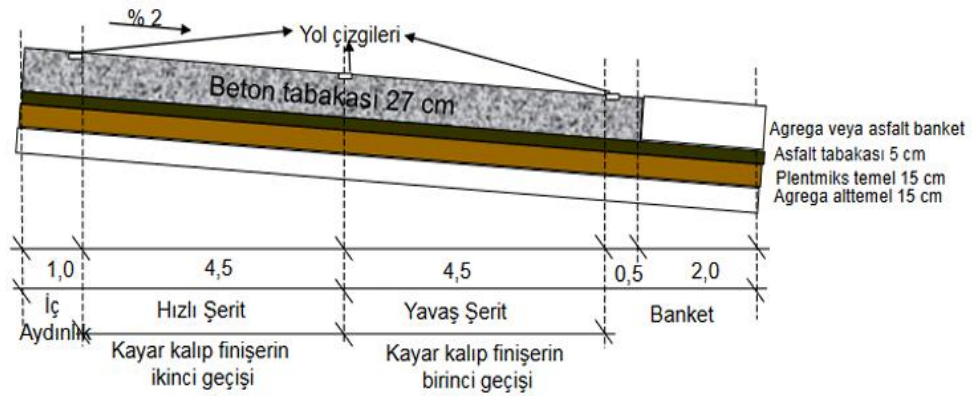
Şekil 1.3. Afyon -Emirdağ yol yapımının başlaması (Nalbantoğlu, 1961)



Şekil 1.4. Afyonkarahisar İncehisar beton yol başlangıcına ait görüntü



Şekil 1.5. Hasdal Kemberburgaz beton yol görüntüsü



Şekil 1.6. Hasdal Kemberburgaz beton yol çalışmasının en kesiti (Arık, 2022a)

Türkiye'nin ilk beton karayolu, Türk Çimento Müstahsilleri Birliği'nin finansal katkılarıyla ve yerel bir inşaat firmasının yürüttüğü başarılı çalışmalar sonucunda tamamlanmıştır. Beton yolun ilk yatırım maliyetinin asfalt yol ile karşılaştırılabilir düzeyde olması, beton yol uygulamalarının Türkiye için ekonomik ve uygulanabilir olduğunu ortaya koymuştur (Şengün, 2017). Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından bölünmüş yolun diğer bölümünün asfalt beton ile yapılacağı duyurulmuştur. Bu uygulama, çimento betonu ve asfalt betonu yolların aynı çevresel ve işletme koşulları altında değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır (Yeğinoğlu, 2009)

1950'deki kuruluşundan bugüne kadar KGM yalnızca asfalt yollar inşa etmiştir. KGM personeli ve yol inşaat firmaları asfalta alışık olduklarından, beton yol inşası gibi yeni bir teknolojiye karşı biraz çekingenlik ve kararsızlık göstermişlerdir. Bu psikolojik etkinin yanı sıra, beton yolun asfalt yoldan daha pahalı olduğu yanılgısı, bugüne kadar

Türkiye'de beton yolların yapımını engellemiştir. Afyon'da beton yol yapımı tamamlanıp test edildikten sonra, beton yolların özellikle ağır trafik yüküne maruz kalan, zayıf zemin koşullarına sahip ve sıcak iklim bölgelerinde tercih edilmesi beklenmektedir (Ecevit, 2007).

Sonuç itibarıyla, Afyon'da gerçekleştirilen ilk beton karayolu projesi, Türkiye'nin inşaat mühendisliği alanındaki kayda değer gelişmelerinin başlangıcını temsil etmektedir (Yetim, 2019)

1.5. Reaktif Pudra Beton

Beton, çimento, katkı maddeleri, su ve çeşitli boyutlardaki agregaların homojen olarak harmanlanmasıyla meydana gelen bir kompozittir. Başlangıçta plastik kıvamda olan bu malzeme, hidrasyon süreciyle sertleşerek mekanik mukavemeti yüksek bir yapı malzemesine dönüşür (Asmara, 2024). Reaktif Pudra Beton (RPB), beton sınıflandırmaları arasında en yüksek eğilme ve basınç dayanımlarına sahip ultra yüksek performanslı bir betondur. Bu beton, çimento, kuvars kumu, kuvars tozu, çelik lifler, süperakışkanlaştırıcılar, su, silis dumanı ve özel kür teknikleri kullanılarak elde edilir. RPB konsepti ilk olarak Cheyrezy ve Richard tarafından geliştirilmiştir. Isıl işlem ve üretim yöntemlerindeki farklılıklar nedeniyle, RPB 200 ve RPB 800 olmak üzere iki farklı ürün varyantı mevcuttur (Sanjuán, 2021). RPB 200, betonun yüksek sıkıştırıcı özellikleri nedeniyle bu isimle tanımlanmıştır. RPB 800 ise hem basınç hem de çekme dayanımı açısından üstün performans göstermesi sebebiyle bu şekilde adlandırılmıştır (Richard, 1995).

“Reaktiflik” terimi, puzolanik reaksiyonun sıcak kürle desteklenerek tekrar tetiklenmesini belirtir. “Pudra” ifadesi, RPB'nin bileşenlerinin ince toz formunda olmasına işaret ederken, “beton” terimi, malzemenin çimento bazlı bir yapı malzemesi olduğunu vurgulamaktadır (İpek vd., 2014.). Basınç dayanımındaki gelişmeler sonucunda daha dayanıklı ve verimli betonlar elde edilmiştir. 1960'lı yıllarda beton basınç dayanımı 14-26 MPa iken, 1970'lerde 41-51 MPa aralığına yükselmiştir. Bu artış, su/çimento oranının azalmasıyla ilişkilidir. 1950'lerde 0,60-0,70 arasında olan s/ç oranı, 1970'lerde akışkanlaştırıcıların kullanımı ile 0,40-0,55 aralığına gerilemiş; 1980'de ise süperakışkanlaştırıcıların geliştirilmesiyle bu oran 0,25'e kadar düşürülmüştür (Topçu vd., 2021a). Reaktif Pudra Betonun dayanım performansını yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırsak iki ile dört kat arasında daha fazla dayanım gösterdiğini görmekteyiz.

RPB, fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesiyle oluşan, sunek, hayli az geçirimsizliği olan en yüksek değerlerde dayanım sağlayan kompozit bir beton olduğu gösterilmektedir (Sanjuán, 2021).

Beton içerisinde gözle fark edilmesi zor olan mikroskobik boşlukları azaltmak amacıyla kuvars kumu ve kuvars pudrasının birlikte kullanılması, betonun çok ince agregalarla daha yoğun bir yapı kazanmasını sağlar. Bu sayede betonun eğilme ve basınç dayanımlarında önemli artışlar gözlemlenir. Reaktif Pudra Beton'da iri agrega yerine daha küçük çaplı tanelerin tercih edilmesi, boşluk oranını azaltarak porozitenin düşmesine katkı sağlar. Böylece, çözünme ve donma-çözülme döngülerine karşı dayanıklılık önemli ölçüde artar (Şahinoğlu, 2010). Reaktif Pudra Beton (RPB), çok ince agregalar ve onlardan da daha ince olan silis dumanının birlikte kullanılması sayesinde, agrega-çimento matrisi arasındaki bağın güçlenmesine ve malzemenin mekanik özelliklerinin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Bu etkileşim, betonun genel dayanımının artmasına neden olur (Dallaire, Aitcin ve Lachemi 1998). Silis dumanı, Reaktif Pudra Betonu (RPB) üretiminde genellikle %20 ila %30 oranında kullanılırken, tipik karışım oranı %25 civarındadır. Bu katkı maddesi, özellikle basınç dayanımını artırma amacıyla tercih edilmektedir. Ancak, silis dumanı oranı %30'un üzerine çıktığında, karışımın iç yapısında dengesizlikler oluşabilir ve bu durum mekanik dayanımda düşüşe neden olabilir. Bu nedenle, optimum performans için silis dumanı miktarının dikkatle kontrol edilmesi gereklidir (Fakhri, 2016).

Düşük buhar basıncında (yaklaşık 90 °C) uygulanan RPB işlemi sonucunda malzeme katılaşmaya başlar. Bu aşamada, içeriğinde bulunan silis dumanı puzolanik özellik göstererek hidrasyon tepkimelerini önemli ölçüde hızlandırır ve yüksek oranda hidrat yapıları oluşur. Katılaşma sürecinin etkisiyle, RPB'ye uygulanan sıcaklık kürleri %60–70 oranında daha yüksek mekanik dayanım sağlar. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde, 50 MPa başlangıç basıncı ve 400 °C sıcaklık altında kürlenmiş numunelerin, sonunda 500 MPa seviyesine ulaşan basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir (Richard & Cheyrez 1995).

Yapılan çalışmalar genel olarak göstermektedir ki, Reaktif Pudra Betonlar (RPB), geleneksel betonlarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde üstün mekanik özellikler sergilemektedir. Ortalama değerlere göre, RPB'nin eğilme dayanımı normal betona kıyasla yaklaşık 31 kat, basınç dayanımı 12,5 kat, elastisite modülü 2,7 kat ve kırılma enerjisi ise yaklaşık 227 kat daha yüksektir. Bu veriler doğrultusunda, RPB'nin

klasik betonlara göre çok daha yüksek performanslı ve dayanıklı bir yapı malzemesi olduğu sonucuna varılmaktadır (Deniz, 2011).

Çizelge 1.2. Reaktif pudra beton, normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı betonların karşılaştırılması (Bakış, 2015; Taşdemir, 2004)

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınc Dayanımı (MPa)	20-65	65-115	200-800
Eğilme Dayanımı (MPa)	5-9	6-10	50-140
Kırılma Enerjisi(j/m ²)	105-125	100-130	10000-40000
Elastisite Modülü (GPa)	21-35	35-40	60-75

RPB, Normal Beton (NDB) ve Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) ile karşılaştırıldığında, Çizelge 1.2’de görüldüğü üzere 2 ila 4 kat daha yüksek dayanım göstermektedir. RPB, neredeyse geçirimsizliği olmayan, iyi yapılandırılmış fiziksel ve mekanik özelliklere sahip, ayrıca sünekliği yüksek çok dayanıklı bir kompozit malzemedir (Dallaire, 1998). Reaktif Pudra Beton’un (RPB) yüksek dayanım göstermesinin temel nedenleri, çok düşük su/çimento oranına sahip olması, yüksek oranda silis dumanı içermesi ve çelik lif takviyesi ile mikroyapısının güçlendirilmesidir. Bu bileşenlerin sinerjik etkisi, RPB’nin hem basınç hem de eğilme dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır (Taşdemir, 2010)

Silis dumanı, çimentodan daha ince yapısıyla beton karışımında boşlukları doldurarak yoğun ve dayanıklı bir yapı oluşturur (Filiz, 2022). Liflerin çevresindeki ara yüzeyleri güçlendirir ve gerilme aktarımını artırır. Betonun dayanımı arttıkça gevreklik de artar; bu durum çelik liflerin varlığıyla ilişkilidir. Çelik lifler, bu kırılma eğilimi dengeleyerek çatlak kontrolüne katkı sağlar (Yalçınkaya). Çelik liflerin Reaktif Pudra Betonuna (RPB) eklenmesi, çekme dayanımı ve sünekliği artırır. Bu nedenle, sünekliği iyileştirmek amacıyla RPB karışımlarında çelik lifler tercih edilir. Genellikle 3 mm’den daha kısa kesilmiş lifler, agrega yerine geçerek beton içinde homojen şekilde dağılır. Bu katkı, basınç dayanımında artış sağlarken, aynı zamanda kırılma enerjisinde bir miktar azalma ile sonuçlanabilir (İpek, 2009).

1.6. Reaktif pudra beton üretim yöntemleri

- İlk olarak, priz sürecinde kalıp içerisinde uygulanan sıkıştırma işlemi, betonun eğilme ve basınç dayanımının oluşmasını sağlar.
- Priz tamamlandıktan sonra ise çeşitli ısıtma işlemleri (standart kür, kombine kür, otoklav kür) uygulanarak betonun mukavemeti daha da güçlendirir
- Beton karışımına çelik lif eklenmesi, hem basınç hem de eğilme dayanımını artırmak için yaygın bir yöntemdir.
- İri agregalar kullanılan karışımlarda, dayanımı artırmak amacıyla iri agregalar yerine daha ince agregalar tercih edilmektedir. (Bakış, Hattatoğlu, Bayrak, 2017).

1.7. Reaktif pudra beton karışımlarının oranları

Reaktif Pudra Beton karışım tasarımıyla ilgili olarak meydana gelen bu çalışmada ve literatürdeki diğer çalışmalarda, bilindik ya da bilinmedik kaynaklarda kabul edilmiş belirli bir standart bulunamamıştır. Bu durum, RPB karışım tasarımlarının genellikle deneysel yaklaşımlara dayandığını göstermektedir (Alazzawı, 2024).

Çizelge 1.3. Reaktif pudra beton içerisinde kullanılan malzemeler ve miktarları (Topçu, 2021)

Kullanılan ürünler	Miktarı (kg/m ³)
Çimento	769
Silis dumanı	177
Kırılmış kuvars kumu (pudra)	300
Kum	845
Süperakışkanlaştırıcı	15
Çelik lif	135
Su	147
Toplam	2388

Reaktif pudra betonun hazırlanmasında, geleneksel beton üretiminde kullanılan vibrasyon ve karıştırma işlemleri uygulanmaktadır. Ancak, karışım suyunun eklenme ve karıştırılma sürecine özel dikkat gösterilmelidir. Çizelge 1.3'te belirtilen malzemeler kullanılarak reaktif pudra betonu üretilir. Öncelikle, agregalar ve bağlayıcı malzemeler yaklaşık 3 dakika kuru olarak karıştırılır. Ardından, karışım suyunun ve süperakışkanlaştırıcının yarısı betona eklenir ve 5 dakika boyunca karıştırmaya devam

edilir. Son olarak, kalan su ve süperakışkanlaştırıcı ilave edilerek tekrar 5 dakika karıştırılır. Bu aşamalı karıştırma yöntemi sayesinde karışımın topaklanması engellenir ve betonun kalıba dökülmesi sırasında homojen ve akışkan bir yapı sağlanır.

Reaktif pudra beton, 90 °C’de düşük buhar basınç kürü uygulanarak priz yapar. Bu işlem sonrası, silis dumanının pozolanik reaksiyon etkinliği artar ve daha güçlü bir hidrat yapısı oluşur. Uygulanan sıcaklık kürü, priz sonrası beton dayanımını %60-70 oranında artırarak, kürü uygulanmayan betonlara kıyasla çok daha yüksek performans sağlar. Kanada’nın Quebec bölgesinde, RPB kullanılarak inşa edilen bir köprüde 200 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu karışıma ait malzeme türleri ve miktarları, Çizelge 1.4’te detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 1.4. RPB numuneleri karışım miktarları

Kullanılan ürünler	Miktarı (kg/m³)
Çimento	982
Silis dumanı	225
Kum (600-150 µm)	490
Kuvars unu (4 µm)	380
Süperakışkanlaştırıcı	20
Çelik tel (6mm)	320
Su	185
Toplam	2602

Çizelge 1.5’deki malzeme oranları kullanılarak Düzgün (2004) çalışmasında elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Çizelge 1.5. RPB numunelerinde deney sonuçları

Deney numunesi	Eğilme dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)
Deney 1	59,76	215,4
Deney 2	64,68	254,3
Deney 3	53,89	217,4

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bamigboye (2021) çalışmasında, inşaat sektöründeki yol yüzeylerinin inşa edilmesi ve iyileştirilmesi süreçlerinde, bitüm, kireç, çimento gibi endüstriyel malzemelerle birlikte yenilenemeyen doğal agregaların kullanımı ve bu kullanımın çevre üzerinde zararlı etkileri tartışılmaktadır. Bu süreçlerin sürdürülemez olması ve aşırı katı atık üretimi, araştırmacıları, bu atıkları alternatif malzemeler olarak kullanmaya yönelik çözümler aramaya itmiştir. Makale, atık malzemelerin esnek ve sert kaplama sistemlerinde yeniden kullanılmasının çevresel ve ekonomik etkilerini inceleyen son araştırmaları sunmakta, bu malzemelerin yararlarını ve dezavantajlarını ele almaktadır. Atık malzemelerin kullanımı, doğal agregalara olan talebi azaltarak yaşam döngüsü etkilerini ve maliyetleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak, inşaat sektöründe bu geri dönüşüm metodolojilerinin etkin bir şekilde uygulanmasını engelleyen zorluklar da mevcuttur ve çözüm önerileri sunulmaktadır (Bamigboye vd. 2021).

Kinay (2020) araştırmasında, dört farklı sert yol kaplama betonu türü sentezlenmiştir: çelik elyafsız bazalt beton, çelik elyaf içeren bazalt beton, çelik elyafsız bazalt toz beton ve çelik elyaf ile güçlendirilmiş bazalt toz beton. Beton formülasyonunda kullanılan su-bağlayıcı oranı 0,44 olarak belirlenmiş ve bazalt agregalar ile çelik lifler kullanılmıştır. Beton örnekleri, 28 gün boyunca hava, su ve kombine kürleme rejimlerine tabi tutulmuştur. Araştırma bulgularına göre çelik elyafsız bazalt toz beton, 28 günlük hava kürlemesinin ardından 46.7 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Su kürlemesinde bu değer 59.8 MPa' ya çıkmıştır. Kombine kürleme ile bu değer 80.7 MPa' ya kadar artmıştır. Çelik elyaf içeren bazalt toz beton, 28 günlük hava kürlemesinde 50.4 MPa, su kürlemesinde de aynı değeri (50.4 MPa) gösterirken, kombine kürleme ile bu değer 88.8 MPa' ya ulaşmıştır. Sonuç olarak, en yüksek basınç dayanımına ulaşan kürleme yöntemi kombine kürleme olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, bazalt toz betonlarının, beton yol döşeme inşaatı için uygun bir alternatif malzeme olabileceğini göstermektedir (Kinay, 2020).

Brintha & Sakthieswaran, (2023) araştırmasında, geri dönüştürülmüş atıkların ve endüstriyel yan ürünlerin inşaat malzemelerinde kullanılması yoluyla doğal kaynakların korunması ve çevresel sorunların yönetilmesi açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

Çalışmada, cüruf tozu ve ince öğütülmüş geri dönüştürülmüş beton atıkları kullanılarak reaktif toz betonun (RPC) işlenebilirlik ve mukavemet özellikleri incelenmiştir. Cüruf tozu, çimento yerine, geri dönüştürülmüş beton atıkları ise kuvars kumu yerine kısmi ikame olarak kullanılmıştır. Testlerde, geri dönüştürülmüş beton atığının farklı oranlarının (%0, 5, 10, 15, 20, 25, 30) ve %20 sabit cüruf tozu ilavesinin etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca, 28 günlük kürleme süresinin ardından numunelerin su emilimi de değerlendirilmiştir. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş beton atığı oranı arttıkça su emiliminin arttığını ve işlenebilirliğin azaldığını göstermiştir. Bu durum, geri dönüştürülmüş beton atıklarının gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. RPC'nin mukavemet özellikleri, geri dönüştürülmüş beton atığı ile %15 kuvars kumunun ikamesi ile en iyi performansı sergilemiştir. Ayrıca, düşük su-çimento oranı ve çelik elyaf eklenmesi, RPC'nin mukavemet gelişimi ve dayanıklılığında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bulgular, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımıyla çevresel sürdürülebilirliği artırırken, betonun mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır (Brintha & Sakthieswaran, 2023).

Karakurt (2016) araştırmasında, çelik tel takviyeli betonun (CCTDB) yol mühendisliğindeki kullanımını incelemektedir. Çelik elyaf katkıları, betonun darbe direnci, tokluk, çatlama mukavemeti ve kavitasyon direnci gibi eksikliklerini gidermekte önemli rol oynar. Çelik elyaf takviyeli beton kaplamalar, geleneksel kaplamalara kıyasla maliyet avantajı, kolay uygulama ve üstün teknik özellikleri nedeniyle modern yol ve köprü yapımında tercih edilmektedir. Araştırmada, TS802 ve TS 10515 standartlarına uygun olarak üç farklı agrega kategorisi ve maksimum 22 mm tane çapı kullanılarak iki farklı beton karışımı üretilmiştir. Karışımlarda 390 kg/m³ çimento dozu ile 0.45 ve 0.53 su/çimento oranları belirlenmiş ve farklı çelik tel miktarları eklenmiştir. Lif katkısı arttıkça betonun çökmesi azalmış ve işlenebilirliği düşmüştür. Çelik lifler, özellikle 30 kg/m³ lif içeren betonlarda eğilme dayanımını %130, basınç dayanımını ise %108 artırmıştır. Ayrıca su/çimento oranı düştükçe eğilme dayanımındaki artış da daha belirgin olmuştur. Lif katkısı sayesinde betonun kırılma davranışı değişmiş ve ani kırılma yerine çatlamlar daha kontrollü gerçekleşmiştir (Karakurt Hasan, 2016).

Nochaiya, Wongkeo, Chaipanich (2010) yaptıkları çalışmada Portland çimentosu-uçucu karışımlarının normal kıvamı, priz süresi, işlenebilirliği ve basınç dayanımı sonuçları raporlanır. Silika duman sistemleri. Sonuçlar, normal kıvam için suyun artan Silika duman içeriğiyle birlikte artması, başlangıç ayar süresinde ise bir azalma olduğu durumlarda. Çökme riski taşıyan işlenebilirliğin, silika duman içerik (içerik çeşitleri

karışımlarla karşı sınıflandırmalarla silika duman). Ancak, çökme değerlerindeki azalmaya rağmen, Portland çimentosu-uçucu külün işlenebilirliğinin azalmasına dikkat edilmelidir. Silika duman betonun çoğu durumda Portland çimentosu kontrol betonundan daha yüksek kaldığı görülmüştür. Ayrıca, silika dumanı Uçucu ile betonun basınç değerlerinin erken dönemlerinde (28 gün önce) %145'e kadar artış ve en yüksek seviyede tutulduğu görüldü. Silika dumanı %10 ağırlık oranlarında azaldı. Ayrıca, taramalı elektron mikroskobu parçacıklarının gözenekli külün silika dumanı çok daha yoğun bir mikro yapının nedeni oldu ve bu basınçta artışa yol açtı (Nochaiya vd., 2010).

TURAN-SAM (2023) çalışmasında, atık kiremit tozunun Metal Matrisli Kompozitlerde takviye olarak potansiyel kullanımını ve SiC ve Al₂O₃ ile uyumluluğunu araştırmaktadır. Matris malzemesi olarak havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Al6061 alaşımı seçilmiştir. Kompozitler, çeşitli ağırlık oranlarında 22-59 µm parçacık boyutlarına sahip takviyeler kullanılarak üretilmiştir: Tekli takviye için %1, %3 ve %5; ikili hibrit kompozitler için %4, %6 ve %8; üçlü hibrit kompozitler için %7, %9 ve %11. Kompozitler iki aşamalı karıştırılmalı döküm yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Kompozitlerin aşınma miktarı, bir tür kuru sürtünme aşınma testi olan Pin on Disk yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Karo tozu takviyeli kompozitler başarıyla üretilmiştir. Karo tozu takviyesi, diğer takviye elemanları gibi, kompozitlerin aşınma direncini artırmıştır (Turan-sam & 2023).

Ambika vd. (2021) son yıllarda, Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) ve Yüksek Performanslı Beton (YPB), bina projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu beton türleri, geleneksel beton karışımlarından farklı olarak, daha yüksek basınç dayanımları (120-150 MPa) sağlayabilmektedir. Bu yoğunluk seviyelerinde iri agregalar, betonun en zayıf halkası haline geldiği için çıkarılmış ve dayanıklılığı artırmak amacıyla Reaktif Toz Beton (RPC) geliştirilmiştir. Bu makale, GGBS bazlı Reaktif Toz Betonun (RPC) geliştirilmesini incelemektedir. RPC'nin performansını artırmak için uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS), kuvars tozu ve silika dumanı gibi dört farklı mineral katkı kullanılmıştır. Ayrıca, betonun mekanik dayanımını artırmak amacıyla mikro çelik lifler eklenmiştir. Numuneler dökülerek mekanik özellikleri ve dayanıklılığı analiz edilmiştir. Çalışma, RPC'nin üstün özelliklerini ortaya koyarak, yüksek performans gerektiren inşaat projelerinde kullanım potansiyelini değerlendirmektedir. (Ambika vd., 2021).

Ahmed vd. (2018) yaptığı çalışmanın amacı hem maliyeti düşürmek hem de beton kaplamaların sürdürülebilir gelişimini sağlamaktır. Metal döküm endüstrisi ve fayans

endüstrisinde üretilen döküm kumu ve fayans tozu, nehir kumu yerine kullanılabilir. Bu malzemeler, beton karışımlarında farklı oranlarda (%10, %20, %30, %40 ve %50) doğal kum yerine kullanılmıştır ve betonun basınç ve eğilme dayanımı açısından geleneksel beton ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, %20 oranında döküm kumu ve %10 oranında fayans tozu ikamesi yapılan betonun, geleneksel betona göre daha yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Talaimari MOR'dan Kalpona Sinema Salonuna kadar olan bir yol için yapılan beton kaplama tasarımında, alternatif malzemelerle yapılan betonun kaplama kalınlığının ve yapım maliyetinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür (Ahmed vd., 2018).

Adil vd. (2020) çalışmasında, silis dumanının geçirimli beton üzerindeki etkilerini incelemektedir. Araştırmada, silis dumanının işlenebilirlik, sıkıştırma ve nihai performans üzerindeki rolü değerlendirilmiştir. Farklı oranlarda silis dumanı içeren macun karışımları hazırlanarak, Portland çimentosunun %10'una kadar silis dumanı ile değiştirilmiş ve zaman içinde test edilmiştir. İlk incelemeler, pürüzsüz nehir çakılı agregası kullanılarak ve sabit bir sıkıştırma enerjisi uygulanarak yapılmıştır. Sonuçlar, işlenebilirlikteki değişikliklerin boşluk içeriği üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, pürüzsüz nehir çakılı ve pürüzlü kireçtaşı iri agregası kullanılarak, %20 sabit boşluk içeriğine sahip numuneler üretilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, silis dumanının %5 oranında kullanılması, işlenebilirlik, mukavemet ve dayanıklılık açısından en iyi performansı sağlamıştır. Bu bulgu, geçirimli betonun performansını artırmada silis dumanının optimal kullanım miktarını belirlemeye yönelik önemli bir katkı sunmaktadır. (Adil vd., 2020).

Mangi vd. (2022) günümüzde atık malzemelerin inşaatte geri dönüşümü, çevreye olan zararlı etkileri azaltmak için çok önemli bir konu olarak kabul ediliyor. Şehirlerin sürekli olarak gelişmesiyle, doğal kaynakların tükenmesini önlemek ve çimento üretiminden kaynaklanan karbon salınımlarını azaltmak amacıyla araştırmacılar, çimento ve agregaların (kum, çakıl gibi) yerini kısmen alabilecek atık malzemeler kullanmaya başladılar. Bu derleme makalesinde, mermer ve seramik karo atıklarının beton üretiminde geri dönüştürülmesine yönelik yapılan araştırmalar özetlenmiştir. Betonun fiziksel, taze hal ve dayanım özellikleri incelenmiş ve bu atıkların kullanılmasıyla üretilen betonun en azından geleneksel beton kadar iyi performans gösterebileceği veya daha iyi sonuçlar verebileceği tespit edilmiştir (Mangi vd., 2022).

Galiya Rakhimoval (2023) artan trafik yoğunluğu ve motorlu taşıt kullanımı, daha dayanıklı yol kaplamalarının inşa edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, çimento

beton yollar, asfalt yollara kıyasla birçok avantaja sahiptir. Kazakistan Cumhuriyeti'nde yol kalitesinin iyileştirilmesi gerekliliği göz önüne alındığında, beton yolların dayanıklılığını artırmak için kimyasal katkı maddeleri ve özel dolgu malzemeleri kullanımı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, metakaolin, wollastonit ve süperakışkanlaştırıcı gibi modern katkıların beton dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre: Süperakışkanlaştırıcı ve metakaolinin (%15 çimento ağırlığında) kullanımı, betonun basınç dayanımını 40,45 MPa'dan 54,7 MPa'ya yükseltmiştir. Wollastonit katkısı, beton mukavemetinde %40'a kadar artış sağlamıştır. Elektroliz ile arıtılmış suyun kullanımı, mukavemeti 1,5 kat artırmıştır. Bu bulgular, çimento beton yolların daha uzun ömürlü ve dayanıklı hale getirilmesi için önemli katkılar sunmaktadır. Özellikle gelişmiş dolgu malzemeleri ve kimyasal katkılar, betonun mikro yapısını iyileştirerek gözenekliliğini azaltmakta ve dayanıklılığı artırmaktadır (Galiya, 2023).

Hattatoğlu ve Bakış (2017) çalışmalarında Pomza agregası ile oluşturulan reaktif toz beton karışım oranlarının incelenmesi, rijit üstyapı beton yol kaplaması ve bina yapımında uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, lifli ve lifsiz beton numunelerinde doğal pomza agregası, 0,1-0,6 mm boyutlarında rotor değirmende kırılarak kullanılmıştır. Elde edilen bu betona "pomza tozu betonu" (PPC) adı verilmiştir. Üretilen PPC numuneleri farklı kür yöntemlerine tabi tutulmuştur: 7 gün 20°C standart su kürü, 28 gün 20°C standart kür ve 9 farklı tip kombine kür uygulanmıştır. Kombine kürler, farklı sürelerde ve sıcaklıklarda uygulanarak PPC numunelerinin dayanıklılığı test edilmiştir. Test sonuçları, PPC numunelerinin en yüksek basınç ve eğilme dayanımlarının kombine kürlerden sonra elde edildiğini göstermiştir. Standart su kürü olarak 20°C'de 3 gün + kurutma fırınında 180°C'de 2 gün süreyle uygulanan kür, PPC numunelerinin en iyi performansı göstermesini sağlamıştır. Lif içermeyen PPC numunelerinin en yüksek basınç dayanımı 47,27 MPa, en yüksek eğilme dayanımı ise 5,23 MPa olarak bulunmuştur. Lifli PPC numunelerinde ise en yüksek basınç dayanımı 51,12 MPa, eğilme dayanımı ise 6,57 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, pomza agregası kullanılarak üretilen reaktif toz betonun rijit üstyapı beton yol kaplaması ve bina yapımında başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir (Hattatoglu & Bakis, 2017).

Sanjuán (2021) araştırmasında Reaktif toz beton (RPC), yıllar önce Bouygues tarafından güçlü, dayanıklı ve sürdürülebilir yapılar inşa etmek amacıyla geliştirilen ultra yüksek performanslı bir betondur (UHPC). RPC, yüksek performanslı betondan (UHPC) bazı açılardan farklıdır. Örneğin, RPC daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı, daha

yüksek tokluk, daha düşük gözeneklilik ve daha düşük geçirgenlik gösterir. Silika dumanı, özellikle lif-matris arayüzey özelliklerini geliştirerek lif çekme enerjisini artırır. Bu makale, RPC üzerine yapılan literatürü gözden geçirir ve RPC ile UHPC'yi karşılaştırır. Bazı RPC potansiyel uygulamaları çıkarılabilir. Örneğin, yaya köprüleri ve yapısal onarım uygulamaları. Hava geçirgenliği, porozite, su emme, karbonatlaşma oranı, korozyon oranı ve dirençlilik üzerine yapılan deneysel ölçümler, RPC'nin UHPC'ye göre daha iyi performans gösterdiğini kanıtlar. Ayrıca, bu ultra yüksek performanslı betonlar, süreksiz, kısa liflerle takviye edildiğinde daha iyi çekme gerilmesi sertleştirme performansı sergilerler. Bu şekilde, RPC'nin sahip olduğu yüksek performans özellikleri, inşaat sektöründe önemli avantajlar sunar (Sanjuán, 2021).

Topçu ve Sarıkaya (2021) son yıllarda hem Türkiye'de hem de dünya genelinde yüksek dayanımlı betonlara olan ihtiyaç artmıştır. Betonun dayanım ve dayanıklılık beklentisi zamanla artarak, daha gerçekçi projelendirme ilkeleri ve gelişmiş yöntemlerin kullanıldığı bir döneme geçiş yapılmıştır. Reaktif pudra beton (RPB), çok ince agregaların ve düşük su-çimento oranının kullanıldığı, lif takviyeli, silis dumanı-çimento karışımıyla karakterize edilen bir betondur. Bu beton, 200 ile 800 MPa arasında basınç dayanımına sahiptir ve kompozit malzemenin kırılma özelliklerini artırmak için lifler eklenir. RPB, ultra yüksek dayanım ve mükemmel dayanıklılığı ile öne çıkar. Bu çalışmada, RPB'nin üretim teknikleri ve özellikleri üzerine bir literatür taraması yapılmıştır. RPB'nin üstün özellikleri, mühendislik yapılarında dayanıklı ve güçlü çözümler sunmaktadır. Bu beton türü, modern inşaat projelerinde önemli bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Topçu & Sarıkaya, 2021).

Stone vd. (2020) çalışmasında, süperakışkanlaştırıcılar ve çimento arasındaki karmaşık etkileşimleri inceliyor. Pozitif yüklü trikalsiyum alüminat (C3A) bileşeni, sıradan Portland çimentosunda bulunan sülfat (alçıtaşı) ve süperakışkanlaştırıcılarla reaksiyona girer. Ancak, bu etkileşimlerin tamamı hala tam olarak anlaşılmamıştır. Çalışmada, Marsh koni testi kullanılarak alçıtaşı, ince kum tozu ve uçucu kül varlığında süperakışkanlaştırıcılar arasındaki uyumluluk sorunları belirlenmiştir. Sonuçlar, çimento üretim sürecinde kullanılan alçıtaşının, özellikle betonun akış süresini etkilediğini ve C3A ile süperakışkanlaştırıcıların etkileşime girdiğini göstermiştir. Daha fazla alçı eklenmesi, aynı etkiyi elde etmek için daha fazla süperakışkanlaştırıcı gerektirmiştir. Uçucu kül örneğinde ise, partikül boyutu ve şeklinin süperakışkanlaştırıcıların etkinliğinde rol oynadığı bulunmuştur. Beton karışımının akışkanlığını artırmak için

uçucu kül kullanıldığında, süperakışkanlaştırıcı, uçucu kül olmadan elde edilen akışkanlıkta aynı önemli iyileşmeyi sağlamamıştır (Stone vd., 2020).

Liv vd. (2020) bu makale, bazalt liflerinin reaktif toz beton (RPC) üzerindeki etkilerini inceliyor. Çalışmada, bazalt lifli RPC (BFRPC), düz RPC (PRPC) ve çelik lifli RPC (SFRPC) karşılaştırılıyor. Farklı bazalt lif içeriğine sahip BFRPC'nin mekanik özellikleri ve donma-çözülme dayanıklılığı test ediliyor. Sonuçlar, bazalt lif içeriği arttıkça RPC'nin mekanik özelliklerinin ve donma-çözülme direncinin arttığını gösteriyor. Ayrıca, klorür-tuz donma-çözülme döngüsünün, tatlı su donma-çözülme döngüsüne göre RPC'ye daha fazla zarar verdiği tespit edilmiş. Bu bulgular, bazalt liflerinin RPC'nin performansını ve dayanıklılığını artırmak için etkili bir katkı maddesi olduğunu gösteriyor (Li vd., 2020).

Saini vd. (2020) bu çalışmanın amacı, Kurukshetra alkalin toprakları üzerine inşa edilen kaplamaların yük taşıma kapasitesini kiremit tozu ile artırmaktır. Pehowa-Kurukshetra yolundan alınan toprak örnekleri, %2-12 arasında değişen kiremit tozu dozajları ile teste tabi tutulmuştur. Test sonuçları, kiremit tozu eklenmesiyle maksimum kuru yoğunluğun azaldığını ve optimum nem içeriğinin arttığını göstermiştir. Alkali zeminin mukavemet özelliklerini değerlendirmek için Kaliforniya taşıma oranı testi (CBR) ve sınırlandırılmamış sıkıştırma testleri (UCS) yapılmıştır. Batık durumdaki kimyasal testler, Karnal Haryana'daki CSSRI laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kiremit tozunun toprağın performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu nedenle, iyileştirilmiş toprak, inşaat işlerinde esnek kaplamalar için iyi bir alt temel olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım, alkali toprakların taşıma kapasitesini artırarak inşaat projelerinde daha dayanıklı ve güvenilir alt temeller sağlanmasına yardımcı olabilir (Saini vd., 2020).

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada atık kiremit tozunun beton yolda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Üç farklı beton çeşidi numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler lifli ve lifsiz olarak iki tür üretilmiştir. Lifli ve lifsiz numune olarak “atık kiremit tozu” 0-1 mm arasında olan malzeme kullanılmıştır. Bu yapılan lifsiz ve lifli numunelere 3 farklı kür işlemi uygulanmıştır. Uygulanan kür işlemleri ilk olarak kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü + 2 gün 180 °C etüv kürü), 7 gün 20 °C standart su kürü, 28 gün 20°C standart su kürü işlemleridir. Lifli olan numunede D=0,55 mm, L=30 mm çelik lif kullanılmıştır.

Geleneksel olarak, beton yol kaplamalarının yapımında kalker agregası kullanan C30/37 normal mukavemetli beton kullanılır. Sonuç olarak, normal mukavemetli beton alanında sınıflandırılan kırılmış kireçtaşı agregası içeren C30/37 betonu da kontrol numunesi olarak imal edilmiştir. Tüm beton numuneleri, 7 ila 28 gün arasında değişen bir süre boyunca hem standart su kürleme hem de 20°C'de termal işlemden oluşan çift kürleme rejimine tabi tutuldu. Kürleme işleminden sonra, beton numunelerinin Basınç ve Eğilme mukavemetleri ayrıca Donma-Çözünme, Aşınma (Böhme) deneyleri yapılarak sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen beton kaplama örnekleri, yüksek basınç ve eğilme mukavemetleri sergiledi. Bu çalışma, yalnızca yerel kaynaklı malzemelerden üretilen yeni beton yol yüzeylerinin yeniliğiyle sonuçlandı. Yol inşaatı çabalarında asfalt kaplamalar yerine beton kaldırımların kullanılmasını savunarak ülke ekonomisine önemli bir katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Bu araştırma çalışmasında beton üretiminde kullanılan reaktif pudra beton (RPB) karışım oranları titizlikle değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir. RPB'de kullanılan suyun bağlayıcıya özgül oranı tipik olarak oldukça düşük 0,12 ila 0,15 arasında değişir, bu da benzersiz bileşiminin ve özelliklerinin göstergesidir (Karabulut, 2006). Bu özel çalışmada, RPB ile ilişkili karıştırma oranlarını kapsamlı bir şekilde dikkate alarak yeni beton türleri yenilikçi bir şekilde geliştirilmiştir. Bu çalışmada formüle edilen beton tiplerini geleneksel RPB'den ayıran temel ayrım, kullanılan su-bağlayıcı oranının değişiminde yatmaktadır. RPB'deki geleneksel su-bağlayıcı oranı gerçekten de 0,12 ile 0,15 arasında olsa da optimum işlenebilirlik ve işlenebilirliği sağlamak amacıyla, bu çalışmada tüm beton numune çeşitlerinde benimsenen su-bağlayıcı oranı, 0.40'lık daha

yönetilebilir bir seviyeye ayarlanmıştır. RPB'nin son derece düşük su-bağlayıcı oranı özelliği göz önüne alındığında, bu tür betonun yerinde üretimi önemli zorluklar yaratmaktadır. Buna karşılık, bu çalışmada kullanılan 0,40 su bağlayıcı oranı, malzemenin işlenebilirlik ve kullanım kolaylığı açısından daha basit bir şekilde uygulanmasını ve işlenmesini kolaylaştırır. Bu araştırmanın bir parçası olarak yapılan ön deneyler, taze beton karışımının işlenebilirliğinin 0.30'luk bir su-bağlayıcı oranında etkili bir şekilde kendini göstermeye başladığını göstermiştir. Yol betonu kaplama üretimi alanında, bu çalışma sırasında geliştirilen yeni formüle edilmiş beton türleri için su-bağlayıcı oranı 0,30 ila 0,45 aralığında ayarlanabilir ve korunabilir. Su-bağlayıcı oranındaki bir artışın, betonun hem basınç dayanımında hem de bükülme mukavemetinde karşılık gelen bir azalmaya yol açabileceğini kabul etmek zorunludur. Basınç testi yapmak amacıyla kullanılan küp kalıplarının boyutları 15x15x15 cm olarak standartlaştırılmıştır. Daha sonra eğilme testleri için prizma kalıplarının boyutları 4x4x16 cm olarak belirlendi. Donma-çözünme deneyi için de küp kalıpların boyutları 10x10x10 cm olarak kullanılmıştır. Ayrıca Aşınma (Böhme) deneyi yapmak amacıyla kullanılan küp kalıpların boyutları 7x7x7 cm olarak kullanılmıştır. Bu deneylere ek olarak kiremit tozundan yapılan harç ile yapışma deneyi yapılmıştır. Ayrıca yapılan bütün numunelere UPV (Ultrasonik Ses Hızı) deneyi yani ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ölçülmüştür. Daha sonra mikro deneyler olarak SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), XRD (X-Işını Kırınım), FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) analizleri yapılarak sonuçları tartışılmıştır. Bu araştırma sırasında üretilen betonlar, bugüne kadar patent başvurusu yapılmamış öncü beton türlerini temsil etmektedir. Bu yenilikçi beton türleri, bu çalışmada üstlenilen kapsamlı tez çalışmasının bir parçası olarak sentezlenmiş ve üretilmiştir. Bu araştırma yoluyla elde edilecek sonuçlara dayanarak, bu yeni beton tipleriyle ilişkili mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve ilerlemesine yönelik devam eden çabalar yönlendirilecektir.

3.1. Materyal

3.1.1. Malzemeler

3.1.1.1. Çimento

Bu araştırmada, tüm beton eşitlerinde TS EN 197-1 standartlarında belirtilen şartlara uygun olarak CEM I 42.5 N sınıflandırmasına sahip imento kullanılmıştır. Kullanılan imento Limak Kurtalan imento fabrikasından sağlanmıştır. şekil 3.1' de imento görüntüsü verilmiştir. CEM I 42,5 N imentosu, Portland imentosu türlerinden biridir ve yüksek dayanım özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır. Özellikle yüksek dayanım gerektiren beton yapılarında (köprüler, yüksek binalar, prefabrik yapılar vb.) kullanılır. Deneyde kullanılan çimentonun kimyasal zellikleri X-ışınları Floresans (XRF) spektroskopisi yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yaptırılmıştır. CEM I 42.5 N Portland imentosunun kimyasal özellikleri izelge 3.2'de verilmiştir. Fiziksel ve mekanik özellikleri izelge 3.1'de detaylandırılmıştır. Bu bilgiler, çimentonun performansını değerlendirmeye yardımcı olarak inşaat projelerinde daha bilinçli malzeme seçimi ve uygulamasını kolaylaştırmayı amaçlamaktadır.



şekil 3.1. Çimento

Çizelge 3.1. CEM I 42,5 N fiziksel ve mekanik zellikleri

Fiziksel ve Mekanik zellikler	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,13
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3067
Priz Başı (dk.)	153
Priz Sonu (dk.)	206
Basınç Dayanımı 7 Gün (MPa)	38,9
Basınç Dayanımı 28 Gün (MPa)	52,2

3.1.1.2. Kiremit tozu içeriği ve özellikleri

Bu araştırmada kullanılan kiremit tozu GRİ ART Sanatsal Tasarım İnş. Dek. San. ve Tic. Ltd. şti. tarafından temin edilmiştir. TS EN 998-1 standartlarına uygun olan 0,1mm olan kiremit tozunun görüntüsü şekil 3.2’de verilmiştir. Kiremit tozunun kimyasal analizleri Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yapılarak Çizelge 3.2’te verilmiştir.



Şekil 3.2. Kiremit tozu

3.1.1.3. Silis dumanı

Silis dumanı, Kompozit Pazarı A.ř tarafından temin edilmiştir. TS EN 197-1 standartlarına uygun olup ve Şekil 3.3’te kullanılan silis dumanı verilmiştir. Silis dumanının kimyasal özelliklerinin analizi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yaptırılıp Çizelge 3.2’te verilmiştir.



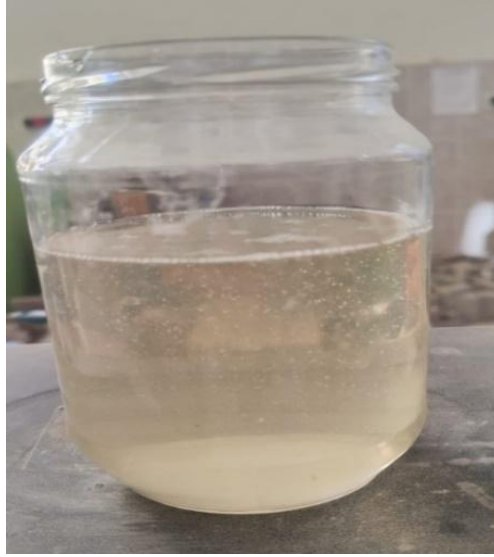
Şekil 3.3. Silis dumanı

Çizelge 3.2. Silis dumanı, Çimento (CEM I 42,5 N), Kiremit tozu kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellik (%)	Silis Dumanı	Çimento (CEM I 42,5 N)	Kiremit Tozu
Na ₂ O	2,866	0,23	1,271
MgO	14,88	-	5,036
Al ₂ O ₃	0,53	4,71	13,424
SiO ₂	74,682	20,63	40,264
P ₂ O ₅	0,06	-	0,324
SO ₃	1,323	2,98	0,741
Cl ⁻	0,174	0,04	0,2
K ₂ O	2,216	0,91	1,822
CaO	0,628	63,64	12,299
MnO	0,065	-	0,271
Fe ₂ O ₃	0,454	3,41	21,035
Cr ₂ O ₃	1,468	-	0,129
F	0,291	-	-
ZnO	0,337	-	0,03
PbO	0,026	-	-
Kızdırma Kaybı	-	1,25	-
TiO ₂	-	-	3,001
Co ₃ O ₄	-	-	0,054
NiO.	-	-	0,068
CuO	-	-	0,068
ZnO	-	-	0,03
SrO	-	-	0,072
ZrO ₂	-	-	0,062
BaO	-	-	0,053

3.1.1.4. Süperakışkanlaştırıcı

Bu çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcı Kompozit Pazarı A.Ş tarafından temin edilmiştir. TS EN 934-2 standartlarına uygun olan kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcılar betonun işlenebilirliğini artıran ve su ihtiyacını azaltan kimyasal katkılardır. Çizelge 3.3'te teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.4. Süperakışkanlaştırıcı

Çizelge 3.3. Süperakışkanlaştırıcı teknik özellikleri

Teknik özellikleri	
Malzemenin Görünümü	Açık- sarı
Kullanılan Tür	Polikarboksilat
pH	$5,00 \pm 3$
Yoğunluk	$1.07 \pm 0.5 \text{ kg/L}$
Klor İyon İçeriği (%)	0,3
Alkali İçeriği (%)	≤ 9

3.1.1.5. Kullanılan su

Siirt Üniversitesi yapı malzemesi laboratuvarında olan Siirt merkez şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.1.6. Kullanılan çelik lif ve özellikleri

Yapılan deney numunelerinde kullanılan çelik lifin uzunluğu 30 mm ve çapı 0,55mm olarak görünümü şekil 3.5’te verilmiştir. Tezimde kullanılan çelik lifler Kemerli Metal Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi'nden tedarik edilerek, kullanılan çelik lifin fiziksel özelliklerinin açıklanarak Çizelge 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Çelik lif

Çizelge 3.4. Çelik lif özellikleri

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

3.1.1.7. Referans olarak alınan Reaktif Pudra Beton (RPB) üretimi

CEM I 42,5 N Portland çimentosu olan TS EN 197-1 standartlarına uygun olarak bulunan TSE ISO 9001:2018 yönetimine sahip Limak Kurtalan Çimento fabrikasından alınarak kontrol numunesinde kullanılmıştır. Ayrıca 0-4 mm arasında, 4-8 mm ve 8-16 mm çaplarında olacak şekilde elekten geçirilerek kırmataş kalker agregası kullanılmış olup Siirt merkez şebeke suyuyla karışım hazırlanarak elde edilmiştir.

3.1.2. Karışım oranları

3.1.2.1. Lifsiz ideal reaktif pudra beton karışım oranları

Reaktif Toz Betonların formülasyonu ile ilgili bu çalışmanın parametreleri kapsamında yürütülen araştırmalarda yerli veya uluslararası standartlar tespit edilmemiştir. Yoğun bir yapısal konfigürasyon elde etmek için karışımı oluşturan granüler bileşenleri ölçmek için karıştırma ile ilgili çeşitli teorik çerçeveler kullanılmıştır (Bakis, 2019). Bu teoriler Mooney'in süspansiyon viskozite modeli sayesinde türetilmiştir (Youness vd., 2022). Mooney'in modeli örnek alınarak meydana gelen RPB200 karışım oranları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. RPB200 betonlarının çimentoya göre karışım ölçüleri (Richard, 1995)

Malzemeler	RPB200			
	Lifli		Lifsiz	
Portland çimentosu (CEM I 42,5 N)	1	1	1	1
Silis dumanı	0,25	0,25	0,25	0,25
Süperakışkanlaştırıcı	0,016	0,016	0,016	0,016
Kuvars (150- 600 µm)	1,1	-	1,1	-
Kiremit Tozu	-	1,10	-	1,10
Çelik tel (L=12mm)	0,175	0,175	-	-
Su	0,17	0,55	0,15	0,55
Toplam	2,711	3,091	2,516	2,916

Bir birimde belirtilen bileşenlerin oranları ışığında, Çizelge 3.5'de verilen değerler göz önüne alınarak hesaplamaları basitleştirmek amacıyla karışımın toplam ağırlığı ile çimento miktarı arasındaki ilişki denklem (3.1) 'de ifade edilmiştir.

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

RPB karışımının 1 m³ kütleinin 2400 kg olarak belirlenmesi durumunda, bu karışıma dahil edilmesi gereken çimento miktarının 2400/2.516 oranından türetilen yaklaşık 954 kg olduğu tahmin edilmektedir. Çimento miktarı 954 kg olarak belirlendikten sonra, karışımında kullanılacak gerekli malzeme miktarları öngörülen karışım oranlarına göre belirlenir (Karabulut, 2006). Çizelge 3.5'de, birim başına belirtilen karışım oranları dikkate alındığında, lifli RPB'nin çimento kütleinin %25'ini oluşturduğu, üretimde kullanılan silis dumanının ağırlıkça çimento kütleinin %110'una

karşılık geldiği, süper akışkanlaştırıcının ağırlıkça %1,6 olduğu ve karışım suyunun çimento kütlelerinin %15'i oranında hazırlanarak karışımı oluşturduğu görülmektedir (Topçu vd., 2021b). Bu değerler, optimum RPB karışım oranının belirlenmesine hizmet etmektedir (Bakis vd., 2019). Bu oran 1 m³ kompozit malzemede kullanılmak üzere belirlenmiştir.

Çizelge 3.6. İdeal lifsiz beton karışım değerleri (Bakış, 2015)

Malzemeler	Miktar (kg/m ³)
Portland çimentosu (CEM I 42,5 N)	954
Silis dumanı	238
Süperakışkanlaştırıcı	15
Kuvars (0,15 – 0,6 mm)	1050
Su	143
Toplam	2400

3.1.2.2. İdeal lifli reaktif pudra beton karışım oranları

Karışım oranlarına dayanarak, kullanılan çimento miktarı ile toplam karışım ağırlığı arasındaki ilişkinin matematiksel denklemi (3.2) ile sistematik bir şekilde değiştirilmiştir. Bu, daha sonraki hesaplamaların daha kolay ve daha verimli olmasını sağlar.

$$1 \text{ m}^3 \text{ RPB Karışım Ağırlığı (kg)} = 2,711 \times 1 \text{ m}^3 \text{ RPB Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.2)$$

Bir metreküp RPB karışımı 2400 kilogram ağırlığa sahipse, bu formülasyona dahil edilecek gerekli çimento miktarı, Denklem (3.2) 'de belirtildiği gibi 2400 ila 2.711 oranından türetilen yaklaşık 885 kilogram olacaktır. Çimento miktarının 885 kilogram olduğu belirlendikten sonra, karışıma dahil edilecek ilave bileşenlerin oranları, sonraki karıştırma oranlarına göre belirlenir (Bakış, 2015;Richard, 1995). Çizelge 3.7'de bir birime dayalı sağlanan karıştırma oranları dikkate alınarak, RPB'nin imalatı, toplam miktarın %25'inin silika dumanından oluştuğunu, kum içeriğinin çimento miktarına göre ağırlıkça %110 olarak belirlendiğini, süperakışkanlaştırıcının çimento miktarının

ağırlıkça %1,6'sını oluşturduğunu, karıştırma suyunun çimentonun ağırlıkça %17'ini oluşturduğunu ve çelik lifleri çimentonun ağırlıkça %17,5 oranında dahil edilmesini gerektirir (Bakis, 2019). Bu belirtilen değerler, optimal lifli RPB karışım oranlarını aydınlatmak için kullanıldı. Bir metreküp karışımda 885 kilogram çimento kullanımına karşılık gelen ideal lifli RPB karışım oranları Çizelge 3.7'te belirtilmiştir. Optimal lifli RPB numuneleri, 0.13'lük bir su-bağlayıcı oranı ve 0.25'lik bir silika dumanı/çimento oranı sergiler (Bakış, 2015).

Çizelge 3.7. İdeal lifli reaktif pudra beton karışım değerleri (Richard, 1995)

Malzemeler	Miktar (kg/m ³)
Portland çimentosu (CEM I 42,5 N)	885
Silis dumanı	221
Süperakışkanlaştırıcı	975
Kuvars (0,15– 0,6 mm)	14
Çelik Lif ((D=0,55 mm, L=30 mm)	155
Su	150
Toplam	2400

3.1.2.2. Kiremit tozlu lifsiz Reaktif Pudra Beton (KPB) üretimi

Bir birim içinde tanımlanan spesifik karıştırma oranları dikkate alındığında, karışımın kümülatif ağırlığı ile kullanılan çimento miktarı arasında kurulan ilişki, hesaplama sürecini geliştirmeyi amaçlayan matematiksel bir ifadeye metodik olarak yeniden formüle edilmiştir ve denklem 3.3'de sunulmuştur, böylelikle en yüksek inşaat çalışmaları için gerekli olan miktarların belirlenmesinde hem hassasiyeti hem de etkinliği artırır.

$$1\text{m}^3 \text{ Beton Karışım Ağırlığı (kg)} = 2,916 \times 1 \text{ m}^3 \text{ Betondaki Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.3)$$

Bu çalışmada, ilk ürün olarak kiremit tozu kullanılarak lifsiz beton için yenilikçi karışım oranları formüle edilmiştir. 1 metreküp betonun ağırlığı 2400 kg olarak belirlenmiş ve bu hacme 823 kg çimento eklenmesi gerektiği hesaplanmıştır. Karışımdaki

diğer bileşenlerin miktarları belirlenirken Lifsiz kiremit tozu betonun (KPB) 0.44 su/bağlayıcı oranı ile karakterize edilen sentezi, ağırlıkça %25 silisli dumanlı çimento, %110'u kadar Kiremit tozu, %1,6 süperakışkanlaştırıcı kullanımlı çimentoyu ve %55 karışım suyunu içermektedir. Üç farklı kütleme metodolojisi için üç numuneyi kapsayan toplam dokuz basınç numunesi, dokuz eğilme numunesi, dokuz donma-çözünme numunesi ve dokuz aşınma numunesi üretilecektir. Kiremit tozlu reaktif pudra beton (KPB) karışım değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir. Lifsiz KPB betonu için su/bağlayıcı oranı 0,44 olarak tutulurken, silika dumanı/çimento oranı 0,25 olarak belirlenmiştir (Bakış, 2015).

3.1.2.4. Kiremit tozlu lifli Reaktif Pudra Beton (KLPB) karışım oranları

Karışım oranlarına göre kullanılan çimento miktarı ile toplam karışım ağırlığı arasındaki ilişkinin matematiksel denklemi (3.4) sistematik olarak değiştirilmiştir. Daha sonraki hesaplamalar bu nedenle daha kolay ve daha verimli olur.

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

Bir metreküp RPB karışımı 2400 kilogram ağırlığa sahipse, bu formülasyona dahil edilecek gerekli çimento miktarı, Denklem (3.4) 'de belirtildiği gibi 2400 ila 3,091 oranından türetilen yaklaşık 776 kilogram olacaktır. Bu çalışmada, Kiremit tozu katkılı lifli reaktif pudra beton için 0.44 su/bağlayıcı oranı elde etmek için yeni karışım oranları tasarlanmıştır. 0.44 su/bağlayıcı oranına sahip kiremit tozlu lifli reaktif pudra betonun (KLPB) formülasyonunda, bileşim şunları içerir: %25 ağırlıkça bir birim çimentoya dayalı ağırlıkça silis dumanı çimentosu, çimentonun %110'u olacak şekilde kiremit tozu, %1,6 çimento ağırlığına göre ağırlıkça süperakışkanlaştırıcı, çimento ağırlığına göre ağırlıkça %17,5 çelik lif ve çimento kütlesine göre ağırlıkça %55 karışım suyu katılarak oluşturulur. Üç farklı kütleme metodolojisinin her biri için 3 numune ve 9 eğilme numunesi, 9 basınç numunesi, aşınma numunesi ve 9 donma-çözülme numunesi üretilecektir. KLPB karışımının özellikleri Çizelge 3.8'de açıklanmıştır.

Kiremit tozlu reaktif pudra betonunun (KLPB) su/bağlayıcı oranı 0.44 ve silis dumanı/çimento oranı 0,25 olarak belirlenmiştir.

3.1.2.5. Numune hazırlanması

Bu çalışmada hazırlanan numuneler Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği yapı laboratuvarında hazırlanmıştır. 1 m³ beton karışım ağırlığına göre oranları belirlenen İdeal lifsiz pudra beton ve ideal lifli pudra beton karışım oranları kullanılarak, Kiremit Tozlu Lifsiz Reaktif Pudra Beton (KPB) numuneleri, Kiremit Tozlu Lifli Reaktif Pudra Beton (KLFB) numuneleri hazırlanmıştır. Çizelge 3.8’te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.8. KPB VE KLFB karışım değerleri (Richard, 1995)

Malzemeler	KPB	KLFB
Portland çimentosu (CEM I 42,5 N)	954	776
Silis dumanı	238	194
Süperakışkanlaştırıcı	15	13
Kiremit Tozu (0,15– 0,6 mm)	1050	854
Çelik Lif ((D=0,55 mm, L=30 mm)	0	136
Su	143	427
Toplam	2400	2400

3.1.2.6. Referans lifsiz Reaktif Pudra Beton (RFB) karışım oranları

Referans olarak alınan Lifsiz Reaktif Pudra Beton (RFB) karışım oranları Çizelge 3.9’da verilmiştir. Bu beton numunesinden 3 farklı kür olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler her biri 9 tane olmak üzere basınç numuneleri, eğilme numunelere, aşınma numuneleri ve donma-çözülme numuneleridir.

3.1.2.7. Referans lifli Reaktif Pudra Beton (RLFB) karışım oranları

Referans olarak alınan Lifli Reaktif Pudra Beton (RLFB) karışım oranları Çizelge 3.9’da verilmiştir. Bu beton numunesinden 3 farklı kür olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler her biri 9 tane olmak üzere basınç numuneleri, eğilme numunelere, aşınma numuneleri ve donma-çözülme numuneleridir

Çizelge 3.9. Referans lifli Reaktif Pudra Beton (RLFB) ve Referans lifsiz Reaktif Pudra Beton (RFB) karışım değerleri (Sümeýra, 2020)

Malzemeler	RLFB	RFB
Portland çimentosu (CEM I 42,5 N)	423	423
Kırmataş agregası (0-4mm)	761	824
Kırmataş agregası (4mm-8mm)	364	394
Kırmataş agregası (8mm-16mm)	530	573
Çelik Lif ((D=0,55 mm, L=30 mm)	136	0
Su	186	186
Toplam	2400	2400

3.2. Metot

3.2.1. Beton numunelerine uygulanan kür çalışmaları

Betonun belirlenen mukavemet ve uzun ömürlülüğü elde etmesi için uygun şekilde yerleştirilmesi ve korunması zorunludur. Betonun bakımı olarak kabul edilen kürleme, beton üretim sürecindeki en önemli aşamayı temsil eder. Kürleme, betonun sertleşme ve mukavemet gelişimi süresince nem kaybına ve çevresel bozulmaya karşı korunması olarak tanımlanır. Tüm beton numune çeşitlerinde üç farklı kürleme yöntemi yapılacaktır:

1. 7 gün süren 20°C olacak Standart su kürü
2. 28 gün süren 20°C olacak Standart su kürü
3. 4 gün süren 20°C olacak Standart su kürü uygulandıktan sonra 2 gün sürecek olan 180°C olan etüve koyularak kombine kür işlemi uygulanır.

Literatür araştırmalarında kombine kürleme metodolojileri için evrensel olarak kabul edilmiş bir standart bulunmamaktadır. Araştırmacılar, beton numuneler üzerinde dokuz farklı kombine kürleme çalışmalarını kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, basınç ve eğilme mukavemeti açısından en yüksek değerleri veren kombine kürleme tekniğinin; 20 °C’de yedi günlük standart su kürlemesiyle başlayan, ardından 90 °C’de iki gün süren sıcak su bulamacı uygulaması ve son olarak 180 °C’de iki günlük fırın işlemi ile elde edildiğini göstermektedir (Sanjuán & Andrade, 2021).

Beton yapım aşamasında numunelerin bütünlüğünü korumak için kritik priz aşamasında basınç uygulanmaması gerektiği üzerinde durulmaktadır. Numuneler, özenli bir şekilde çıkarıldıktan sonra üç farklı kürleme işlemine tabi tutulmaktadır. Kürleme tamamlandıktan sonra TS EN 12390-3:2010 standartlarına uygun sıkıştırma testleri yapılarak sonuçların güvenilirliği sağlanmaktadır. Ayrıca, basınç dayanımının yanında donma-çözülme direnci, UPV deneyi, aşınma (Böhme), eğilme dayanımı ve yapışma deneyi testleriyle de ek değerlendirmeler yapılmaktadır. Yapılan araştırma tamamen yerel kaynaklı malzemeler kullanarak dört yeni beton kaplama türü üretimini hedeflemekte ve beton yol altyapısının sürdürülebilirliğini artırmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, mevcut literatüre önemli katkılar sunmayı hedeflemektedir. Ek olarak, XRD, SEM- EDX ve FTIR analizleri bileşiklerin iç yapılarını ve element düzeyinde ve sertleşme sonrasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar nedeniyle ara yüzeylerdeki yapışmayı daha iyi anlamak için kullanılmıştır.

3.2.2. Beton Numunelerinde Basınç Deneyleri

Rijit üstyapı beton kaplamaları için tanımlanan şartnameler dahilinde, betonun minimum basınç dayanımının 28 MPa olarak belirlenmesi zorunludur (Karabulut, 2006) Bu tez kapsamında TS EN 12390-3 (2010) standardına uygun olarak basınç dayanımı değerlendirmeleri yapılmıştır. Her tasarım grubundan üç numune test edilmiş ve basınç dayanımı denklem 3.5'te verilen değerler bulunur ve daha sonra ortalamaları alınarak saptanmıştır.

$$F_a = P / D_b \quad (3.5)$$

Denkleminde;

F_a : Basınç Dayanım Değeri (Mpa ya da N/mm^2)

P : Numunenin basınç altındaki en büyük yükü (N)

D_b : Yüke maruz kalan yüzey alan (mm^2)

YKM-CM106 ASTM'ye uygun olarak basınç dayanımını belirlemek için $0,6N/mm^2/sn$ yüke sahip beton pres makinesi Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Daha sonra lifli beton olarak 18 tane numune hazırlanmıştır. Lifsiz beton olarak da kontrol numuneleri ile birlikte 18 tane $15*15*15$ kalıplar olarak beton basınç numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 3.6. Beton Basınç makinesi ve uygulanması

Basınç deney numuneleri 24 saat boyunca kalıpta bekletildikten sonra çıkarılır daha sonrasında kür işlemlerine tabi tutulup her bir numunenin ayrı ayrı basınç deneyi yapılarak basınç değerleri bulunur. Bu çalışmada yapılan mikro deneyler dışında yapılan bütün deneyler Siirt Üniversitesi Kezer yerleşkesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında yapılmıştır.

3.2.3. Beton numunelerinde eğilme deneyleri

Sert kaldırım yüzeylerinde hem basınç hem de bükülme gerilmeleri araç yüklerinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Betonun basınç dayanımı önemli ölçüde yükselirken, bükülme mukavemeti nispeten azalmıştır. Sert kaplama uygulamalarında, özellikle derzlerden yoksun ve sürekli takviye ile karakterize edilenlerde bükülme mukavemetini artırmak için, betonarme matris içine takviyenin dahil edilmesi esastır. ASTM C109 standardına göre, yükleme hızı 0,04 MPa/s ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$) ile 0,06 MPa/s ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$) arasında değişen tek tip bir stres artışı oranı elde etmek için kalibre edilir.

Yapılan tüm deneyler boyunca, sabit stres buna göre modüle edilerek artış hızı 0.05 MPa/s'de tutuldu.

$$P_e = 3 \cdot X \cdot Y / 2 \cdot z_1 \cdot z_2^2 \quad (3.6)$$

Denkleminde;

P_e : Eğilme değeri (MPa),

X : En yüksek yük (N),

Y : Mesnetler arasındaki uzunluk (mm),

z_1 : Deney numunesinin yatay olan uzunluğu (mm),

z_2 : Deney numunesinin düşey olan uzunluğu (mm) olarak alınmıştır.

Eğilme değeri, TS EN 12390-5 (2010)'da verilmiş olup denklem (3.5) ile bulunmaktadır. Beton eğilme numuneleri 4*4*16 cm olan kalıplarda hazırlanmıştır. Numunelerde su kaybının olmaması için üstü nemli bezle örtülmüştür. 9 tane Lifli Kiremit Tozlu Beton (KLPB), 9 tane Lifsiz Kiremit Tozlu Beton (KPB) ve kontrol numunesi olan 9 tane RFB ve RLFB numunesi hazırlanmıştır. Eğilme değerleri ölçmek için ASTM C109 standartlarına uygun YKM-CM106 makinesi kullanılmıştır (ASTM C109, 2022). Numunelere ve kullanılan makineye ait fotoğraflar Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Eğilme deneyine ait görüntü

3.2.4. Beton numunelerinde aşınma (böhme) deneyleri

Böhme aşınma testi, standart aşındırıcı toz saçılma aşındırma diski üzerindeki numunenin 0,06 N/mm² basınca maruz kaldığında elde edilen aşınma değeri olarak karakterize edilir ve sonuç olarak döner tamburdaki numunenin her biri 22 devir içeren 16 döngü sonrasında 352 devir geçirmiş olmaktadır (Ali & Mohammed, 2018). Aşınma deneyi için 7*7*7 numune kalıpları kullanılmıştır. 9 tane lifli, 9 tane lifsiz olacak şekilde kiremit tozlu reaktif pudra beton aşınma numuneleri hazırlanmıştır.

DeneySEL prosedür için gerekli aparat ve aletler, bir disk aşınma (sürtünme) şeridi ile birlikte dönen bir disk, test numunesinin yerleştirildiği muhafaza hücresi, bir tartım mekanizması ve ekipmanın dönüşünü kolaylaştırmak için tasarlanmış ve 22 devirden sonra çalışmayı durduran bir motor içerir. Böhme aşınma kaybı test cihazı, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi korunumdan (kristalize Al₂O₃) oluşan aşındırıcı zımpara tozu dağıtan bir cihazdan oluşur. Bu deney protokolü EN 14157'de (2004) belirtilen

yönergelere sıkı sıkıya bağlıdır. Numunenin ağırlığı 0,1 gram hassasiyetle titizlikle ölçülür. Sürtünme şeridi üzerine 20 gram aşındırıcı zımpara tozu eşit miktarda dağıtılır. Numune daha sonra numune tutucunun içine yerleştirilir ve numunenin temas yüzeyinin Newton cinsinden belirli bir yüke maruz kalması sağlanır. Aşınma diskinin dönme hareketinin başlatılması, cihazın etkinleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Diskin dönme fazı boyunca, sürtünme şeridinden çıkan aşındırıcı partiküller disk üzerinde etkin bir şekilde toplanır. Disk 22 devri tamamladıktan sonra otomatik olarak durur. Ardından hem disk hem de temas yüzeyi uygun bir yöntemle temizlenir. Bunu takiben, sürtünme şeridine tekrar 20 gram aşındırıcı zımpara tozu uygulanır. Numune 90 derecelik bir açıyla yönlendirilir ve belirlenen numune yuvasına yerleştirilir, ardından cihaz yeniden etkinleştirilir. Bu prosedür toplam 16 döngü tamamlanana kadar sistematik olarak tekrarlanır. Sonuç olarak, tüm deney dizisi tamamlandığında toplam 352 döngü gerçekleştirilmiş olur (Ali & Mohammed, 2018).



Şekil 3.8. Aşınma (Böhme) deneyi görünümü

$$\Delta V = (m_i - m_s) / \rho \quad (3.7)$$

m_i : Numunenin ilk ağırlığı (gr)

m_s : Numunenin son ağırlığı (gr)

ρ : Numunenin yoğunluğu (gr/ cm³)

ΔV : Numunenin aşınma (böhme) kaybı (cm³/50cm²)

Denklem 3.7’de görüldüğü gibi her bir numuneye 16 döngü uygulandıktan sonra denklem uygulanarak aşınma kaybı hesaplanır.

3.2.5. Donma – Çözünme deneyi

Donma-çözülme döngüleri, betonun dayanıklılığını ve yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyen temel faktörlerden biridir. Süreç, kılcal boşluklardaki suyun donarak yaklaşık %8 oranında genişmesi ve bu sırada oluşan hidrolik basınç nedeniyle tetiklenir. Bu etkileşim, betonun bozulmasına yol açar ve dayanıklılığını zayıflatır. Bu dinamik, ilgili mekanizmaların anlaşılmasını ve betonun bu çevresel zorluklara karşı direncini artırmak amacıyla yeni araştırma ve önlemlerin geliştirilmesini teşvik eder (Arık, 2022). Böylelikle bu çalışmada da 10*10*10 ölçü kalıplarına sahip numuneler olmak üzere 9 tane lifli, 9 tane lifsiz ayrıca kontrol numunesi de 9 lifli ve lifsiz olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler TS EN 1338 standartlara uygun olarak, yapı malzemelerinde donma ve çözünme direncinin belirlenmesinde kullanılır. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi Donma-Çözünme Kabini kullanıcı tanımlı 16 adıma kadar olan yazılıma sahiptir. Programın her bir adımında, zaman 999 dakikaya kadar ayarlanabilmektedir. Kabinin çalışma sıcaklık aralığı -30°C / +65°C'dir. Ama bu deneyde yapılan numuneler TS 699 standartlarına göre önce -20 °C'de soğutulurak 2 saat kalmış, ardından 20 °C sıcaklıktaki suya daldırılıp burada da 2 saat bekletilmiştir. Bu işlem, toplamda 25 kere tekrarlanacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Her döngü sonunda numuneler fiziksel değişiklikler açısından incelenmiş ve her biri 25 kere tekrarlandıktan sonra basınç dayanımları ölçülerek başlangıç değerleriyle karşılaştırılmıştır. Amaç, malzemenin dayanıklılığını ve performansını değerlendirmektir (Ünal & Uygunoglu, 2003).



Şekil 3.9. Donma-çözünme deneyinin yapılışı

3.2.6. UPV (Ultrasonik Ses Hızı) deneyi

Ultrasonik ses dağılma hızı TS EN 12504-4 ve ASTM C-597-02 standartlarına uygun yapılmıştır (Alakara, 2022). Ultrasonik testlerle yeterli hassasiyetle herhangi bir betonun basınç dayanımını belirlemek zor olsa da ultrasonik dalga hızı, betonda bulunan boşluk ve yoğunluk miktarı ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, ultrasonik dalga hızı ile beton kalitesi arasında genel bir ilişki kurulabilmektedir (Toklu vd., 2022). Ultrasonik ses yayılma hızı deneyindeki amaç, beton ve kaya numunelerindeki boşlukları, çatlakları ya da bunlar dışında oluşan hasarları tespit etmek için ve ayrıca kontrol amaçlıdır (Doğruyol vd., 2024)

Ultrasonik Ses Hızı deneyi (UPV) Deneyinin uygulanması bu çalışmada eğilme, basınç, donma-çözünme ve aşınma (böhme) deneylerinin yapıldığı her bir numuneye uygulanmıştır. Kür çalışmalarında yapılan her 3 numunenin ortalaması alınmıştır. Bu deney sensörler karşılıklı gelecek şekilde ayarlanıp jel sürülüp ölçüm yapılmıştır. Şekil 3.10'da gösterilen makine ile ölçüm sağlanmıştır. Ölçüme ait bir görüntüde şekil 3.11'de verilmiştir. Bu deney Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği yapı laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. UPV (Ultrasonik Ses Hızı) ölçüm aleti



Şekil 3.11. UPV (Ultrasonik Ses Hızı) ölçüm örneği

$$V = L/t \quad (3.8)$$

V: Ultrasonik Ses Hızı (km/sn)

L: Ölçü değeri (km)

t: sesin geçiş süresi (sn)

Denklem (3.8) verildiği bütün numunelerin Ultrasonik Ses Hızı hesaplanmaktadır.

3.2.7. Yapışma (Pull of Tester) deneyi

Bu deney ASTM D4541 standartlarına uygun yapılmaktadır. Pull of Tester olarak bilinen (pro-ceq dy-216) test cihazı ile yapılmaktadır. Çekme yapışma değerlendirmesi olarak kabul edilen Çekme Testi, çelik yüzeylere ve çeşitli diğer yüzey malzemelerine titizlikle uygulanan koruyucu kaplamalarla ilişkili kaplama uygulama süreçlerinin titiz değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılır ve böylece hem yeni inşaat çalışmaları bağlamında hem de önceden var olan yapısal çerçevelerin onarımı ve bakımı bağlamında kaplamanın uygunluğunun ve etkinliğinin kapsamlı bir şekilde belirlenmesine olanak tanır (Ayata vd., 2022).

Yapışma deneyi ilk olarak 6 beton numunesi titizlikle toz ve kir kalmayacak şekilde temizlendikten sonra üzerine KPB harcı 2 cm olacak şekilde yapılarak dökülmüştür. Daha sonra 24 saat oda sıcaklığında bekletilip suya konulur ve kür işlemleri

olan 3 numunesi 7 gün bekletilir 3 numunesi de 28 gün bekletildikten sonra çıkarılır ve deney yapılır.

Bu deneyde yapıştırıcı olarak FC-345 beton yapıştırıcısı kullanılmıştır. 20 mm olan çekme silindirleri uygun bir şekilde yapıştırılır ve oda sıcaklığında kuruyana kadar bekletilir. Kuruduktan sonra şekil 3.12’de görüldüğü gibi deney ekipmanı yerleştirilerek çekme silindiriyle ayarlanarak çalıştırılır ve yapışma direnci kuvvetini verir.

$$F = 4 P / \pi . r^2 \quad (3.9)$$

F: Yapışma direnci (MPa)

P: Kopma sırasında ortaya çıkan kuvvet (N)

r: Çekme silindirinin çapı (mm)

Yapışma direnci denklem 3.8’te görüldüğü gibi hesaplanır.



Şekil 3.12. Yapışma deneyi aleti ve yapışma deneyine ait örnek

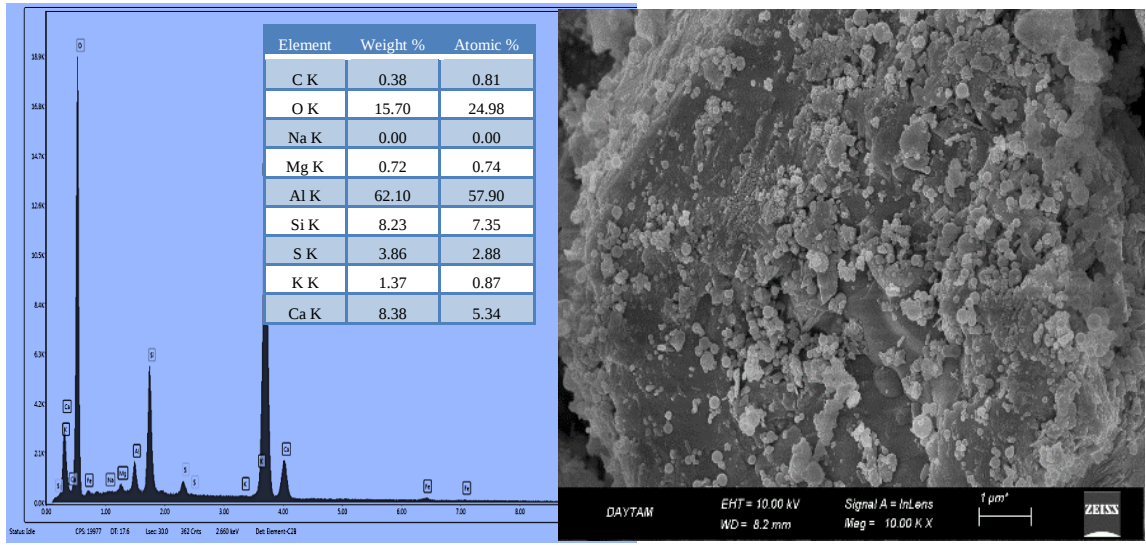
3.2.8. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)-EDX analizleri

Yaygın olan SEM olarak adlandırılan taramalı elektron mikroskobu, bir numunenin yüzeyi boyunca odaklanmış bir elektron ışınının titizlikle taranması yoluyla oldukça ayrıntılı görüntüler üretebilen sofistike bir elektron mikroskobu biçimini temsil eder. Elektronlar, numune materyali içinde bulunan çeşitli atomlarla etkileşime girdikçe, her biri yüzey topografyası ile ilgili kritik bilgilerin yanı sıra incelenen numunenin bileşim özelliklerini içeren çeşitli farklı sinyaller üretirler. Yayılan bu sinyaller daha sonra özel dedektörler tarafından yakalanır ve daha sonra bu bilgiyi bir bilgisayar ekranına iletir ve böylece numunenin yüzey morfolojisinin ince ayrıntılarını ortaya çıkaran karmaşık görüntülerin üretilmesine ve görselleştirilmesine izin verir (Merghes vd., 2023). Ek olarak, yaygın olarak EDX analizi olarak bilinen enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi, numune içinde bulunan elementel bileşimlerin kesin olarak belirlenmesini kolaylaştıran ve böylece malzeme özellikleri ve özellikleri hakkında paha biçilmez bir fikir sağlayan analitik bir teknik olarak kullanılır (Krishnan & Rajkumar, 2024). Gelişmiş görüntüleme teknikleri ve element analizinin bu kombinasyonu, araştırmacıların ve bilim adamlarının mikroskobik düzeyde materyallerle ilgili kapsamlı çalışmalar yapmalarını sağlar, böylece yapısal ve bileşimsel nüansları hakkındaki anlayışımızı geliştirir. Sonuçta, taramalı elektron mikroskobunun EDX analizi ile entegrasyonu, malzeme bilimi, nanoteknoloji ve diğer çeşitli bilimsel disiplinlere önemli ölçüde katkıda bulunan güçlü bir metodolojik yaklaşımı temsil eder (Aydınalp & Işık, 2024).

Bu çalışmada yapılan Taramalı Elektron mikroskobu ve EDX analizlerinin yapılacağı cihaz Siirt Üniversitesinde olmadığı için numuneler Munzur Üniversitesine gönderilip İnşaat Mühendisliği laboratuvarında şekil 3.13’de verilen cihazla yapılmıştır.

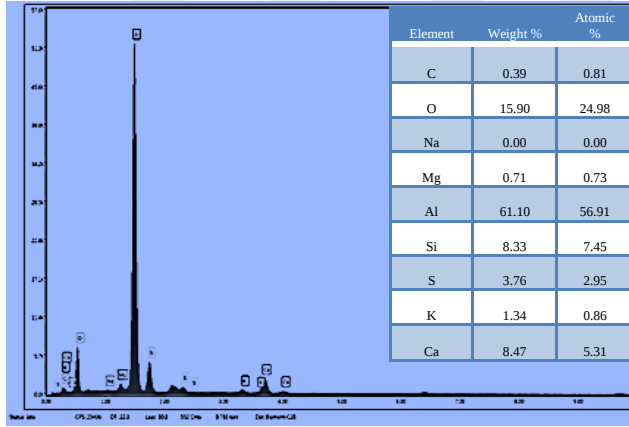


Şekil 3.13. SEM-EDX deney cihazı



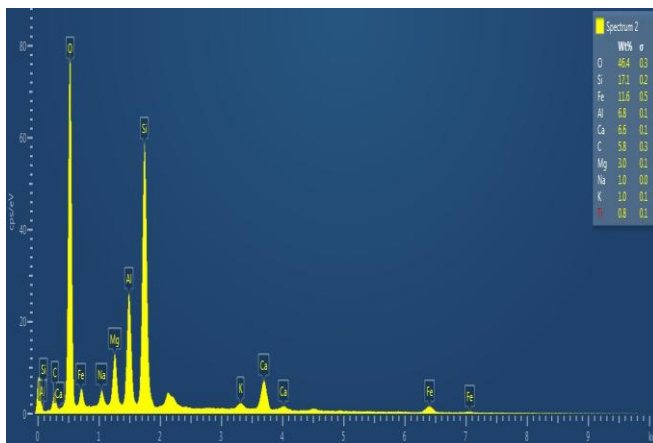
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Şekil 3.14. Karışım partiküllerinin (a) CEM I 42.5 N Çimento EDX (b) CEM I 42.5 N Çimento 10.00 KX büyütmelerdeki morfolojisi (c) Silis dumanı EDX (d) Silis Dumanı 10.00 Kx büyütmelerdeki morfolojisi (e) Kiremit Tozu EDX (f) Kiremit Tozu 5.00 Kx büyütmelerdeki morfolojisi

Şekil 3.14’de verilen a ile gösterilen görüntüde CEM I 42,5 N çimentosunun EDX analizinde ortaya çıkan Ca, Si, O, Mg, K, Na, Fe, Al elementleri gösterilmiştir ve b olan görüntüde de CEM I 42,5 N çimento tanelerinin morfolojisi SEM şeklinde gösterilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak silis dumanının morfolojisi incelenmiştir. Silis dumanı partiküllerinin gözenekli bir yapıya sahip ince, düzensiz agregalar gibi olduğu görülmüştür Şekil 20’de verilen d) olan görüntüde Silis dumanı partikülleri 20 m²/g yüzey alanına ve ortalama 0,37 µm partikül çapına sahiptir (Farjad, 2024).

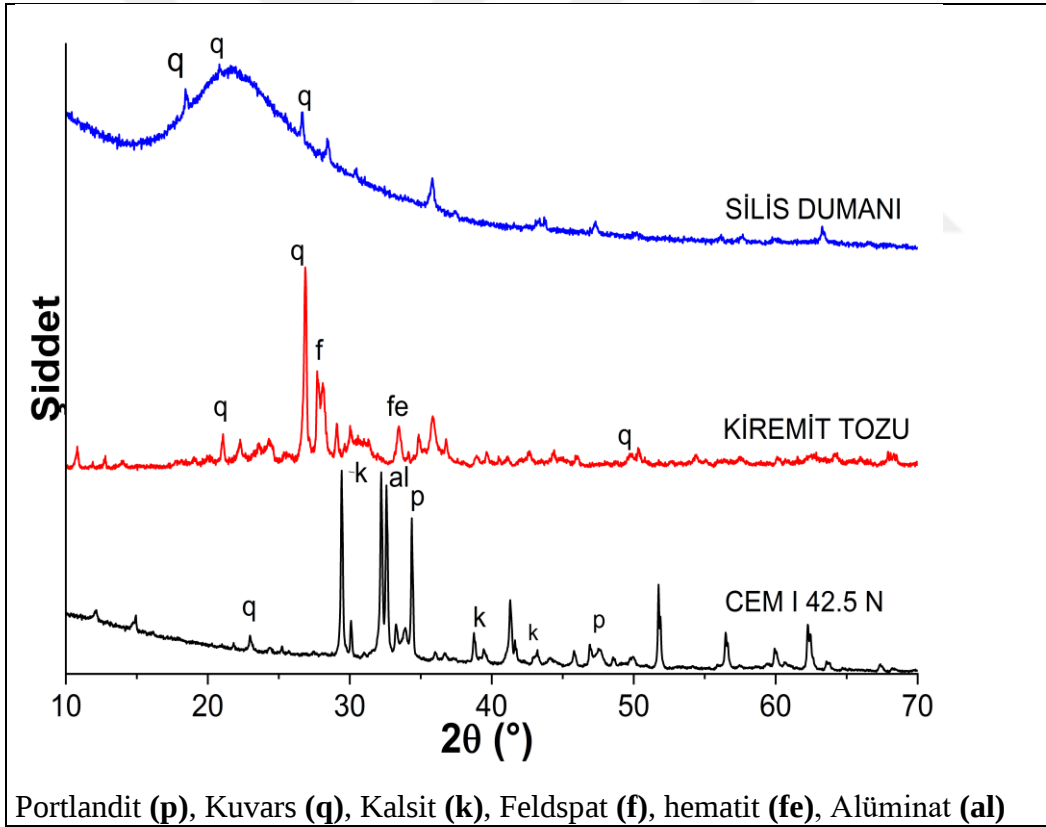
3.2.9. XRD (X- Işını Kırınım Metodu) analizleri

X-ışını kırınım deneyleri, katıların yapısal özelliklerini iki farklı kategoriye ayırabilir: kristal ve amorf formlar. Kristal bir katı, düzensiz bir atomik konfigürasyon ile karakterize edilen amorf bir katının aksine sistematik bir atom düzenlemesi ile tanımlanır. Kristal bir yapı sergileyen malzemelerin X-ışını kırınımı (XRD) modeli, keskin ve iyi tanımlanmış tepe noktaları ile karakterize edilir (Krishnan & Rajkumar, 2024). XRD kırınım modelinde keskin tepelerin varlığı, kristal bir fazın oluşumunu gösterir. Malzemelerin yapısal, manyetik, optik, mekanik ve elektriksel özelliklerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için, her bileşime karşılık gelen kristal boyutunu belirlemek zorunludur. Kristal boyutu, X-ışınlarını düzgün bir şekilde kıran bölgelerin boyutlarını ölçer. Polikristal agregaların oluşumu nedeniyle, parçacıkların kristal boyutu ile geometrik boyutları arasında genellikle bir tutarsızlık vardır. Sonuç olarak, kristal boyutu Bragg zirvesini etkiler, bu da tepe genişliği ve yoğunluğunda bir artışa ve ayrıca 2θ tepesinin konumunda bir kaymaya neden olur. XRD, kristalit yapısı ve kristal boyutu dahil olmak üzere malzeme özelliklerinin karakterizasyonu için temel bir teknik olarak hizmet eder (Nasiri vd., 2023).

Bu çalışmada yapılan X-ışını kırınım analizlerinin yapılacağı cihaz Siirt Üniversitesinde olmadığı için numuneler Munzur Üniversitesine gönderilip İnşaat Mühendisliği laboratuvarında şekil 3.15’de verilen cihazla yapılmıştır.



Şekil 3.15. XRD deney cihazı



Şekil 3.16. XRD faz analizleri

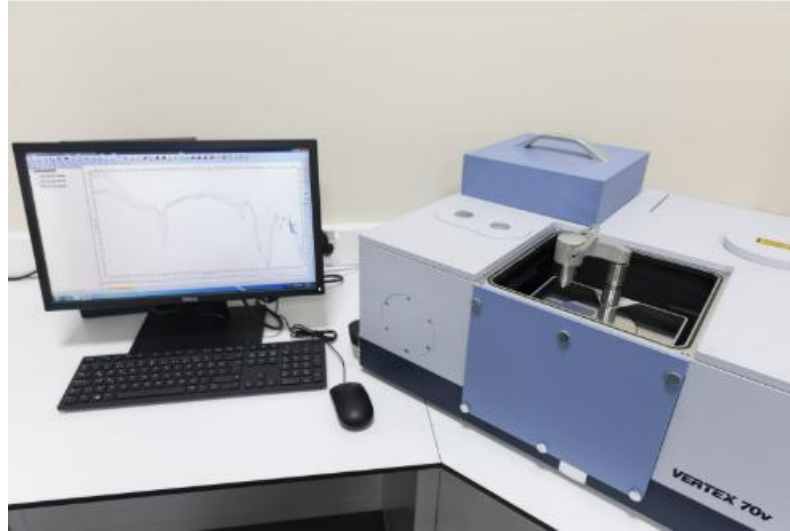
Şekil 3.16’da XRD grafiğinde görüldüğü üzere CEM I 42.5 N çimentosunda $2\theta \approx 33.3^\circ$ alüminat (C_3A), $2\theta \approx 29.4^\circ$, $2\theta \approx 39.4^\circ$, $2\theta \approx 43^\circ$ kalsit ($CaCO_3$), $2\theta \approx 34.5^\circ$ $2\theta \approx 18^\circ$, $2\theta \approx 47.1^\circ$ portlandit (CH), $2\theta \approx 20.8^\circ$, $2\theta \approx 26.6^\circ$, $2\theta \approx 50.1^\circ$ (SiO_2) ortaya çıkmıştır. Silis

dumanının XRD toz modellerini $2\theta \approx 22^\circ$, $2\theta \approx 23^\circ$ amorf SiO₂'nin güçlü geniş pikleri görülmekte (Aktürk, 2021), ayrıca kiremit tozunda $2\theta \approx 27^\circ$, $2\theta \approx 30^\circ$ feldspat, $2\theta \approx 33^\circ$, $2\theta \approx 54^\circ$ hematit (Fe₂O₃) bulunur (Akkurt vd., 2011).

3.2.10. FT-IR (Fourier dönüşümlü kızılötesi) analizleri

Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopik Tekniği kapsamlı araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Her türün moleküler hareketi dipol momentinde bir varyasyona neden olduğundan, Moleküler Yapı için bir karakterizasyon ve teşhis aracı görevi görür. Moleküler dinamiğin birincil uygulaması ve FT-IR analizlerinin önemli bir katma değerli yönü, jeolojik numuneler içindeki minerallerin tanımlanmasıdır (Gao vd., 2023). FT-IR spektroskopisi ile bir mineralin doğru karakterizasyonunu garanti etmek için, spektral veriler 4000-400 cm⁻¹ aralığında elde edilmelidir (Jiang vd., 2021). Bu kapsama genişliği, ilgili titreşim-aktif kızılötesi sinyallerin çoğunun dahil edilmesini kolaylaştırır (Krishnan & Rajkumar, 2024).

Bu çalışmada hazırlanan numunelere FT-IR analizleri yapılmıştır. Bu analizler Siirt Üniversitesinde bu analizi yapacak cihaz olmadığı için numuneler Munzur Üniversitesine gönderilip İnşaat Mühendisliği laboratuvarında yapılmıştır.



Şekil 3.17. FT-IR Analizleri Cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Eğilme ve Basınç Deneyleri

4.1.1. Lifli ve Lifsiz elde edilen beton numunelerinin eğilme ve basınç değerleri

Bu çalışmada 4 çeşit farklı beton oluşturulmuştur. Hazırlanan basınç beton numunelerinin slump değeri 6 cm olarak ortaya çıkmıştır. Hazırlanan basınç numuneleri 15*15*15 cm olan küplere döküldükten sonra 25 kere olacak şekilde şişlendi. Şişlendikten sonra numunelerde boşluk oluşmaması için sarsma makinası kullanılmıştır. Daha sonra 24 saat oda koşullarında bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılıp 3 farklı kür çeşidine tabii tutulmuştur. Bu kür çeşitleri 28 gün 20°C su kürü, 7 gün 20°C su kürü ve kombine kür (4 gün 20°C su kürü + 2 gün 180°C etüv) olarak uygulanmıştır. Eğilme deneyleri için de 4*4*16 cm olan kalıplar kullanılarak sarsma makinasında sıkıştırma yapıldı aynı şekilde oda sıcaklığında 24 saat nemli bir bez üzerlerinde olacak şekilde bırakılıp kurumaya bırakıldı. Daha sonra hazır hale gelen Lifli Referans Beton (RLFB) 9 numune, Lifsiz Referans Beton (RFB) 9 numune, Kiremit Tozlu Lifli Beton (KLPB) 9 numune, Kiremit Tozlu Lifsiz Beton (KPB) 9 numune hazırlanıp kür çeşitlerine tabii tutulduktan sonra eğilme ve basınç deneyleri bulunmuştur.

4.1.1.1. Referans olarak alınan lifli ve lifsiz betonun basınç ve eğilme deney sonuçları

Hazırlanan numuneler basınç ve eğilme deneylerine tabii tutularak ortaya çıkan deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Referans Betonun Basınç ve Eğilme Sonuçları

Kür Çeşidi/Dayanımı	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	
	RFB (Lifsiz)	RLFB (Lifli)	RFB (Lifsiz)	RLFB (Lifli)
7 günlük (20 °C su kürü)	37,71	38,93	4,47	4,83
28 günlük (20 °C su kürü)	42,23	46,13	4,92	5,67

Kombine kür (4 gün 20 °C su havuzu + 2 gün 180 °C etüv)	47,55	50,82	5,63	7,72
---	-------	-------	------	------

4.1.1.2. Kiremit tozlu lifli ve lifsiz beton numunelerinin eğilme ve basınç deney sonuçları

Hazırlanan kiremit tozlu beton numuneler kür işlemlerine tabii tutulduktan sonra deney yapılmıştır. Çizelge 4.2’de deney sonuçları çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kiremit Tozlu Beton Eğilme ve Basınç Deney Sonuçları

Kür Çeşidi/Dayanımı	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	
	KPB (Lifsiz)	KLPB (Lifli)	KPB (Lifsiz)	KLPB (Lifli)
7 günlük (20°C su kürü)	60,74	65,73	4,61	8,74
28 günlük (20°C su kürü)	63,20	68,74	5,45	9,12
Kombine kür (4 gün 20 °C su havuzu + 2 gün 180 °C etüv)	79,94	82,61	6,13	13,68

4.2. Aşınma (Böhme) Deney Sonuçları

Hazırlanan kiremit tozlu beton numuneler kür işlemlerine tabii tutulduktan sonra deney yapılmıştır. Çizelge 4.3’de deney sonuçları çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 4.3. Lifli ve Lifsiz Beton Numunelerinin Aşınma (Böhme) Deney Sonuçları

Beton Tipi	Kür Tipi	Deney Öncesi Ağırlık (g)	Deney Sonrası Ağırlık (g)	Yoğunluk (ρ) (g/cm ³)	Kütle Kaybı (Δm) (g)	Aşınma (ΔV) (Cm ³ /50 cm ²)	Şartname Limiti
RFB	7 Gün Standart Su Kürü	817,76	791,7	1,72	26,06	15,15	≤18
	28 Gün Standart Su Kürü	807,13	783,2	1,72	23,93	13,91	≤18

	Kombine Kür	812,66	794,4	1,78	18,26	10,2 6	≤18
RLFB	7 Gün Standart Su Kürü	804,3	779,5	1,73	24,8	14,3 3	≤18
	28 Gün Standart Su Kürü	806,5	786,13	1,74	20,37	11,7 1	≤18
	Kombine Kür	800,53	782,93	1,89	17,6	9,31	≤18
KPB	7 Gün Standart Su Kürü	697,6	680,2	1,87	17,4	9,30	≤18
	28 Gün Standart Su Kürü	675,8	664,33	1,96	11,47	5,85	≤18
	Kombine Kür	626,8	615,86	1,97	10,94	5,55	≤18
KLPB	7 Gün Standart Su Kürü	653,8	666,53	1,97	12,73	6,46	≤18
	28 Gün Standart Su Kürü	686	679,4	1,88	8,6	4,57	≤18
	Kombine Kür	660,13	653,4	1,933	6,73	3,48	≤18

4.3. Donma – Çözünme Deney Sonuçları

4.3.1. Lifli ve lifsiz beton numunelerinin donma – çözünme deney sonuçları

Ortaya çıkan beton numuneleri donma – çözünme deneyine tabii tutularak deney sonuçları bulunmuştur. Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Lifli ve Lifsiz Beton Numunelerinin Donma – Çözünme Deney Sonuçları

Beton Tipi	Kür Tipi	Deney Öncesi Ağırlık (g)	Deney Sonrası Ağırlık (g)	Yüzey Alanı, A (mm²)	Kütle Kaybı, M (kg)	Birim Alan Başına Kütle Kaybı, I	Deney Sonrası Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
-------------------	-----------------	---------------------------------	----------------------------------	--	----------------------------	---	---

RFB	7 Gün Standart Su Kürü	2295,5	2275,3	10000	0,0202	2,02	30,86
	28 Gün Standart Su Kürü	2288,06	2270	10000	0,01806	1,81	42,40
	Kombine Kür	2292,4	2126,0	10000	0,1664	16,64	44,89
RLFB	7 Gün Standart Su Kürü	2315,13	2289,93	10000	0,0252	2,52	39,32
	28 Gün Standart Su Kürü	2279,67	2238,1	10000	0,0416	4,16	43,59
	Kombine Kür	2307,6	2136,07	10000	0,1715	17,15	46,46
KPB	7 Gün Standart Su Kürü	1911,8	1903,8	10000	0,008	0,8	56,6
	28 Gün Standart Su Kürü	1964,4	1958,2	10000	0,0062	0,62	66,78
	Kombine Kür	1885,2	1875,8	10000	0,0094	0,94	70,94
KLFB	7 Gün Standart Su Kürü	1960,8	1954,4	10000	0,0064	0,64	61,51
	28 Gün Standart Su Kürü	2051,4	2041,8	10000	0,0096	0,96	70,39
	Kombine Kür	1989,6	1978,8	10000	0,0078	0,78	77,2

4.4. UPV (Ultrasonik Ses Hızı) Deney Sonuçları

4.4.1. Lifli ve liffsiz beton numunelerinin UPV deneyleri

4.4.1.1. Referans olarak alınan lifli ve lifsiz betonun UPV deney sonuçları

Hazırlanan referans beton numuneler kür işlemlerine tabii tutulduktan sonra UPV deneyi yapılmıştır. Çizelge 4.5’de deney sonuçları çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 4.5. Lifli ve Lifsiz Beton Numunelerinin UPV Deney Sonuçları

Kür Çeşidi/Dayanımı	Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (km/s)	
	RFB (Lifsiz)	RLFB (Lifli)
7 günlük (20 °C su kürü)	3788	3820
28 günlük (20 °C su kürü)	3851	3937
Kombine kür (4 gün 20 °C su havuzu + 2 gün 180 °C etüv)	3921	3984

4.4.1.2. Kiremit tozlu lifli ve lifsiz betonun UPV deney sonuçları

Hazırlanan kiremit tozlu beton numuneler kür işlemlerine tabii tutulduktan sonra UPV deneyi yapılmıştır. Çizelge 4.6’da deney sonuçları çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 4.6. Kiremit Tozlu Lifli ve Lifsiz Beton Numunelerinin UPV Deney Sonuçları

Kür Çeşidi/Dayanımı	Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (km/s)	
	KPB (Lifsiz)	KLPB (Lifli)
7 günlük (20 °C su kürü)	3937	4367
28 günlük (20 °C su kürü)	4516	4566
Kombine kür (4 gün 20 °C su havuzu + 2 gün 180 °C etüv)	4545	4698

Ultrasonik dalgalarının yayılma hızı gözeneklilik, çatlaklar ve düşük kaliteli malzemelerden dolayı deney sonuçları düşük çıkabilir. Bu sayede basınç dayanımı ile orantılıdır. Basınç değeri arttıkça UPV deney sonuçları da artmaktadır.

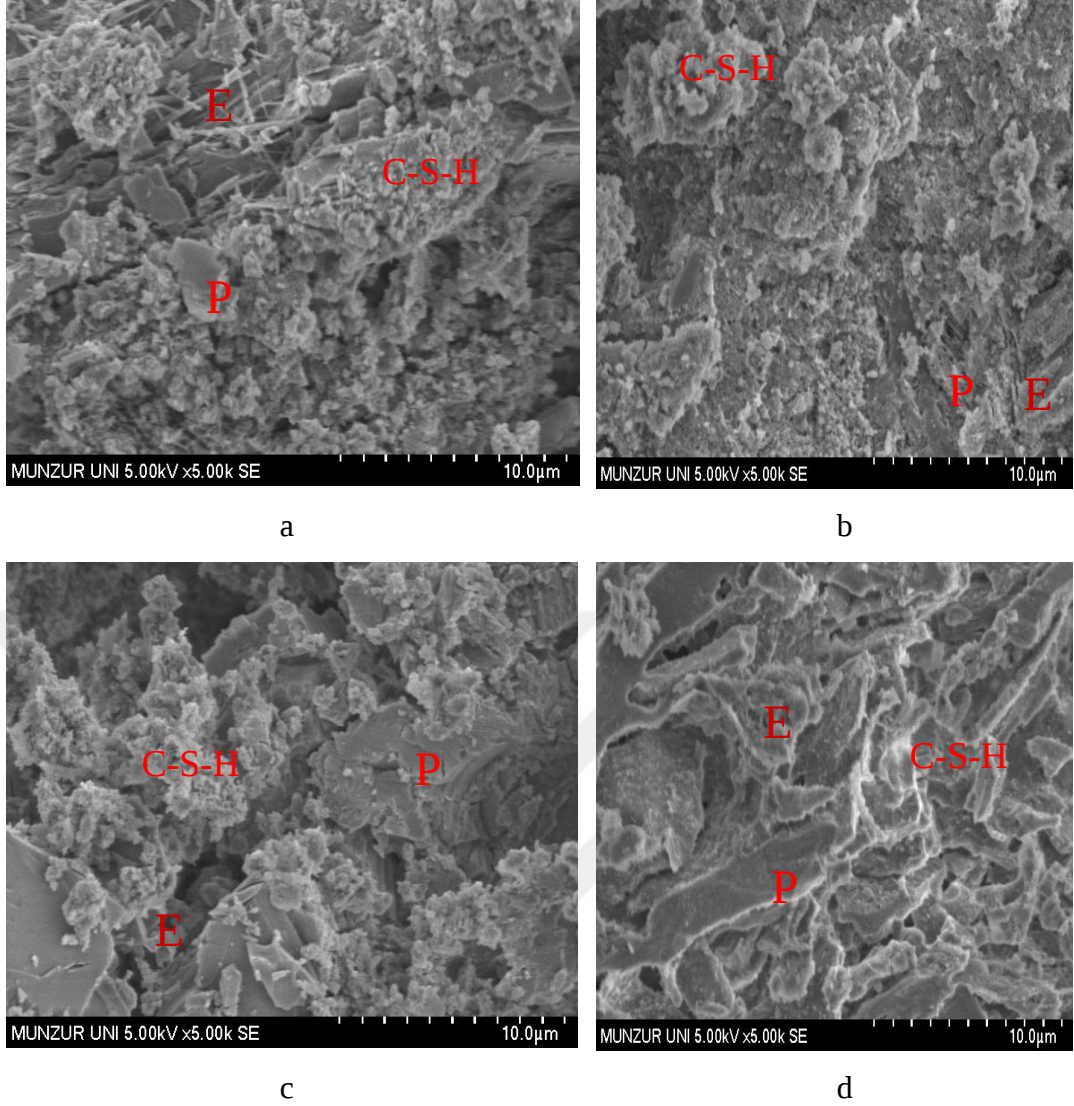
4.5. Yapışma (Pull of Tester) Deney Sonuçları

Normal C30/37 betonu üzerine kiremit tozlu harç hazırlanarak 2 cm olacak şekilde beton üzerine serildi. Daha sonra 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra suya konuldu. Daha sonra 7 Gün 20°C Standart Su Kürü ve 28 Gün 20°C Standart Su Kürü olmak üzere numunelere iki kür işlemi yapıldı. Daha sonra TS EN 1542 standardına göre A/B kopma şekli olarak yapışma deneyine tabii tutuldu sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Kiremit Tozlu Beton Numunelerinin Yapışma Deney Sonuçları

Kür Çeşidi	Yapışma Dayanımı (MPa)	Kopma Şekli	Değerlendirme
7 Gün 20°C Standart Su Kürü	1,37 MPa	A/B %100	Yapışma Dayanımı yüksektir.
28 Gün 20°C Standart Su Kürü	2,69 MPa	A/B %100	

4.6. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizleri



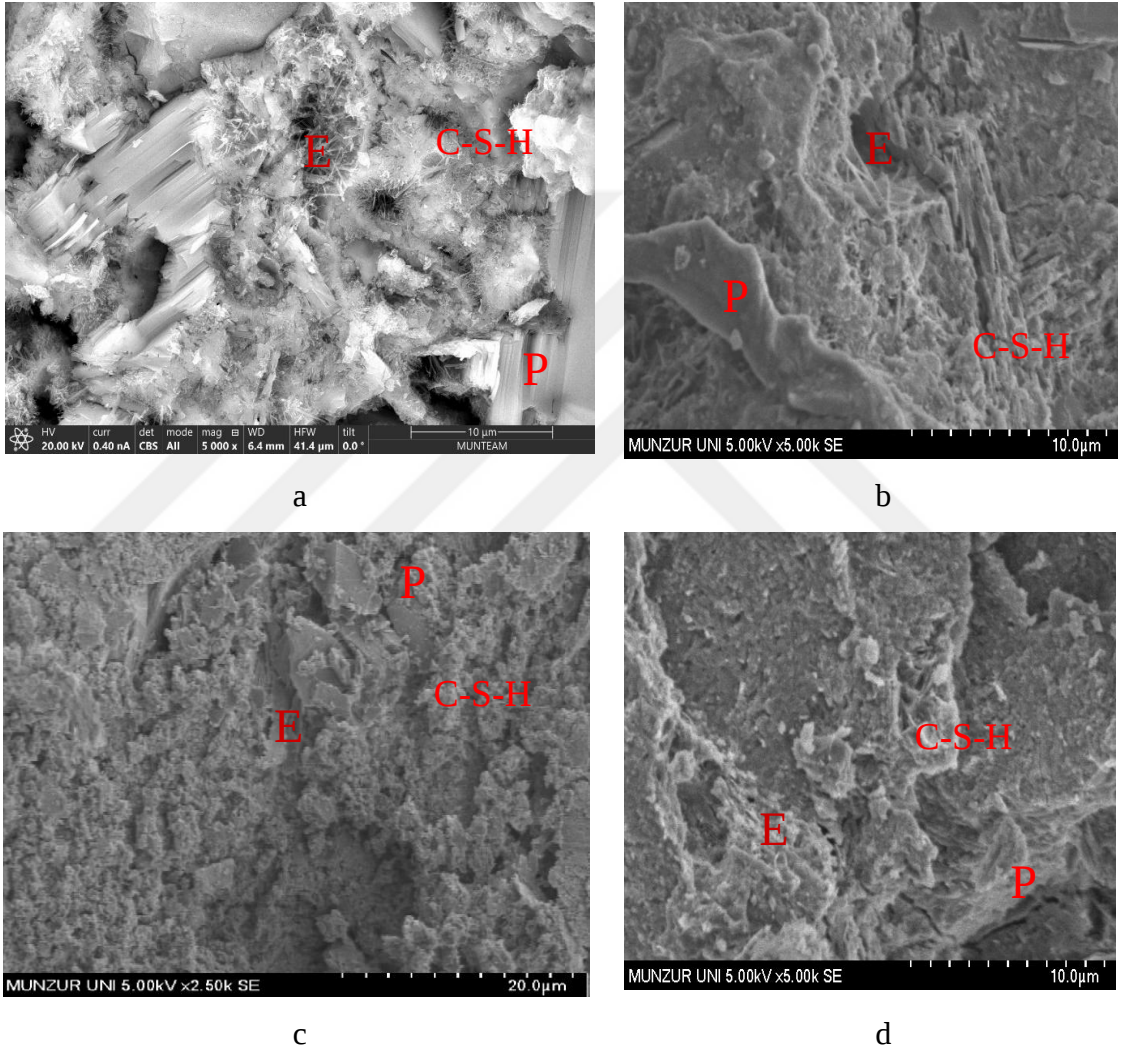
Şekil 4.1. RFB, KPB, RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin SEM görüntüleri 10.00 KX büyütme ile a) RFB (Referans Lifsiz Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), b) KPB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), c) RLFB (Referans Lifli Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), d) KLPB (Kiremit Tozlu Lifli Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü).

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere a şeklinde olan RFB numunesinin görüntüsünde parçacıklı ve düzensiz bir yapısı vardır. Ayrıca agregalar belirgin olmasına rağmen homojen yayılmadığı görülmektedir. Üstelik bu numune ısıya maruz kaldığından dolayı bazı bölgelerde çatlaklar ve boşluklar olduğu görülmektedir.

Şekil 4.1 olan b resminde KPB numunesinin morfolojik SEM görüntüsünde daha homojen bir görüntü vardır. Bu numunede kullanılan kiremit tozu daha iyi yayılmış ve boşlukların azaldığı görülmektedir. Bundan dolayı da çatlamlar daha da azdır.

Şekil 4.1’de verilen c olan SEM görüntüsünde RLFB numunesi bulunan parçacıklı ve düzensiz bir yapısı olduğunu göstermektedir. Agregalar belirgindir ama homojen dağılmamıştır. İçerisinde bulunan liflerin çatlamları azalttığını gösterebiliyor.

Şekil 4.1’de verilen d olan SEM görüntüsünde KLPB numunesinde yoğun ve homojen olduğu görülmektedir. Resimde görüldüğü üzere lifler ve kiremit tozu etkisiyle az boşluklu bir yapısı vardır. Bunun sayesinde çatlaklar minimum seviyesine düşmüştür. Bu da dayanımın en yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.2. RFB, KPB, RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin SEM görüntüleri 10.00 KX büyütme ile a) RFB (Referans Lifsiz Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü b) KPB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü, c) RLFB (Referans Lifli Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü, d) KLPB (Kiremit Tozlu Lifli Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü.

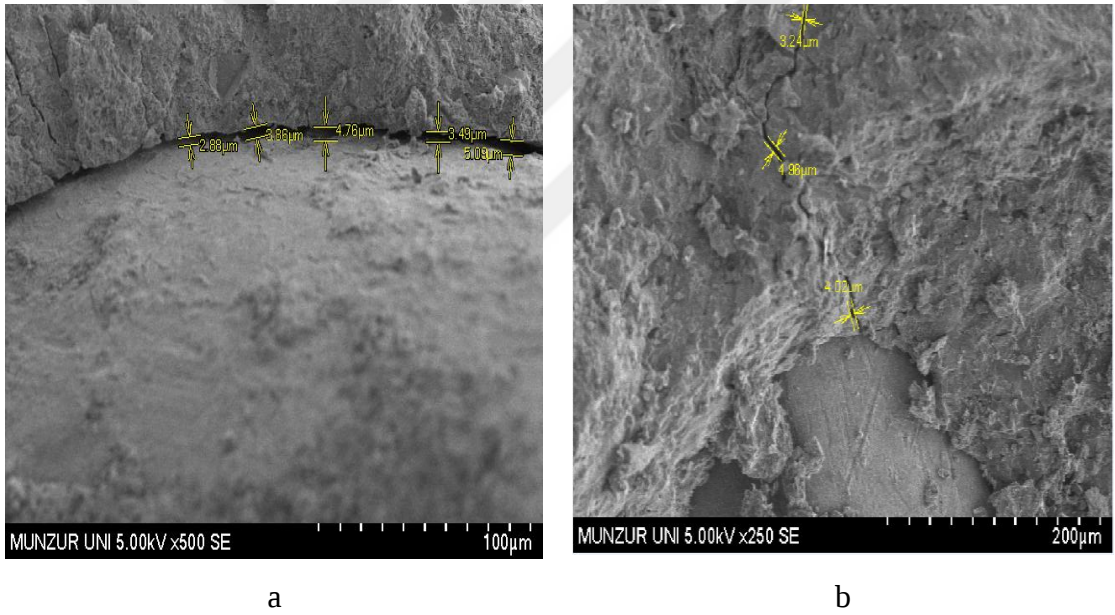
Şekil 4.2’de verilen a şeklinde gösterilen SEM morfolojisinin incelenmesinde yüzeyin oldukça pürüzlü ve parçacıklı olduğu görülmektedir. Agregalar kullanıldığı için çok

fazla boşluk ve gözenekler olduğu belirgindir. Boşluklar olduğundan dolayı çatlaklar oluştuğu görülmektedir.

Şekil 4.2’de verilen b şeklinde gösterilen SEM morfolojisinin incelenmesinde kiremit tozunun ince yapısı olduğundan dolayı boşlukların azalması sağlanmıştır. Mikro gözeneklilik agregaya göre çok azdır. Bu nedenle çatlaklığı azalmış olur ve bu da dayanıma olumlu sonuç verdiğini göstermektedir.

Şekil 4.2’de verilen b şeklinde gösterilen SEM morfolojisinin incelenmesinde liflerin olması düzensiz olduğunu gösterir. Ama lifler sayesinde çatlak oluşumu engellenmiş olur çünkü çelik lifler çatlak uçlarını tutup çatlamayı engeller.

Şekil 4.2’de verilen b şeklinde gösterilen SEM morfolojisinin incelenmesinde kiremit tozu sayesinde yüzeyi daha homojen ve lif etkisiyle pürüzlüdür. Kiremit tozu ile çelik lif birleşimi çatlak oluşumunu azaltarak dayanımın fazla olduğunu göstermektedir.

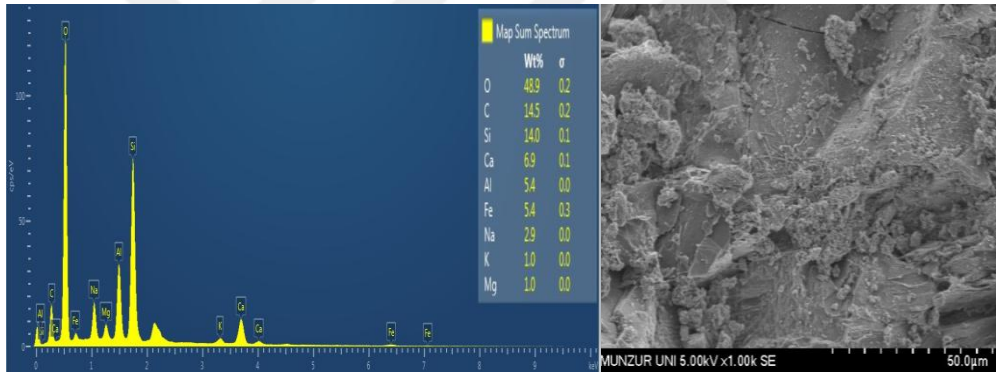


Şekil 4.3. RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin SEM görüntüleri 100 ve 200µm KX büyütme ile a) RB (Referans Lifsiz Pudra Beton) b) KLPB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton)

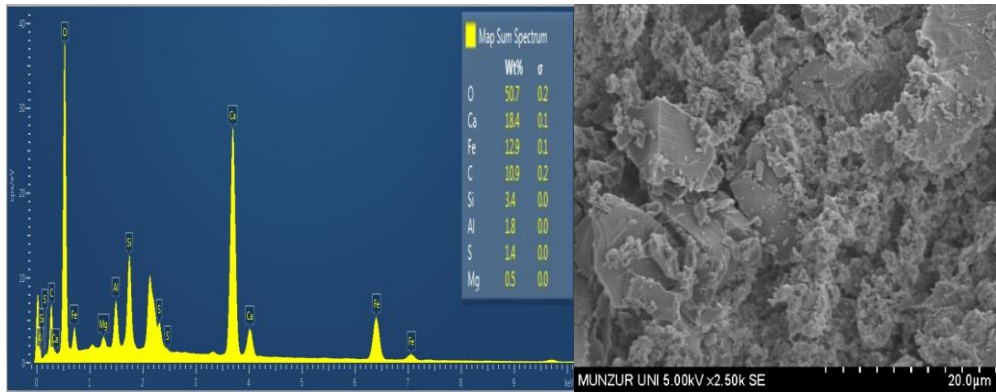
Şekil 4.3’te görüldüğü üzere içerisinde çelik lif kullanıldığı görüntülenmiştir. Kiremit tozu kullanılan beton ama daha homojen yayılmış ve çatlak oluşumu daha azdır.

4.7. EDX (Enerji dağılımlı X-Işını) Analizleri

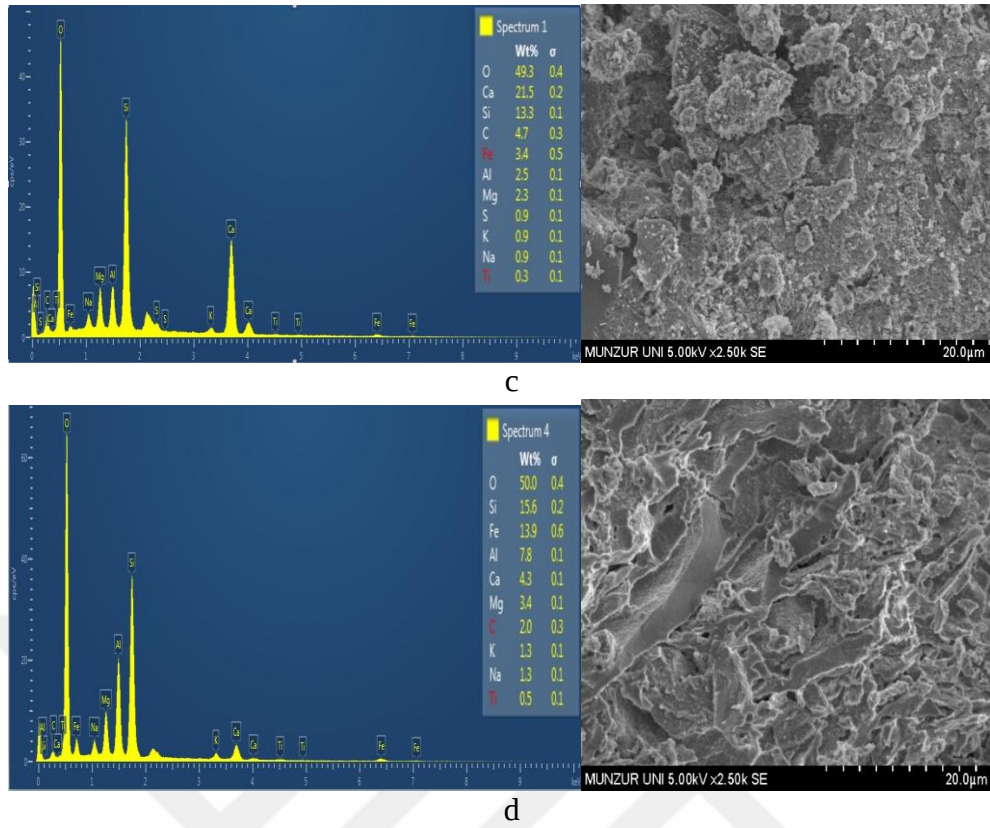
Yaygın olarak EDX olarak kısaltılan Enerji Dağıtım X-ışını Analizi, araştırmacıların yüzde (%) cinsinden nicel olarak ifade edilen, belirli bir numune üzerinde özel olarak seçilmiş bir noktanın veya belirlenmiş alanın temel bileşimini tespit etmelerini sağlayan, cihaz SEM olarak adlandırılan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) aparatı ile birlikte kullanılan gelişmiş bir analitik tekniği temsil eder. Ayrıca, bu yöntem sadece element bileşimini belirlemeye değil, aynı zamanda numune matrisinde bulunan çeşitli öğelerin grafiksel dağılımını görsel olarak temsil eden bir haritalama tekniği kullanarak, numune boyunca elementlerin dağılımının tekdüzeliğine ilişkin kritik bilgiler sağlamaya da hizmet eder. Örnekte bulunan elementlerin yüzde dağılımlarının, EDX grafikleri olarak bilinen grafik gösterimlerde gözlemlendiği gibi, her öğeye karşılık gelen zirvelerin altında temsil edilen alanlarla doğrudan bir orantılılık sergilediğini belirtmek önemlidir. Tez araştırmamız sırasında oluşturulan örnekler üzerinde yapılan EDX analizlerinden elde edilen sonuçlar sonraki bölümlerde sunulmaktadır.



a



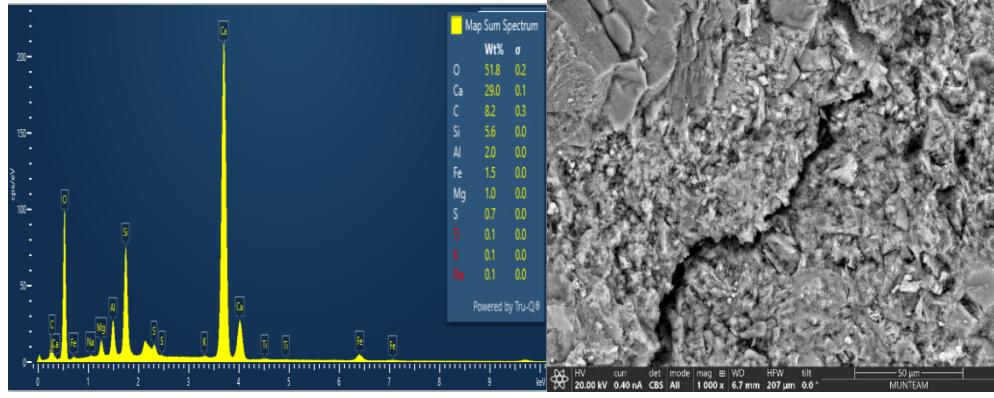
b



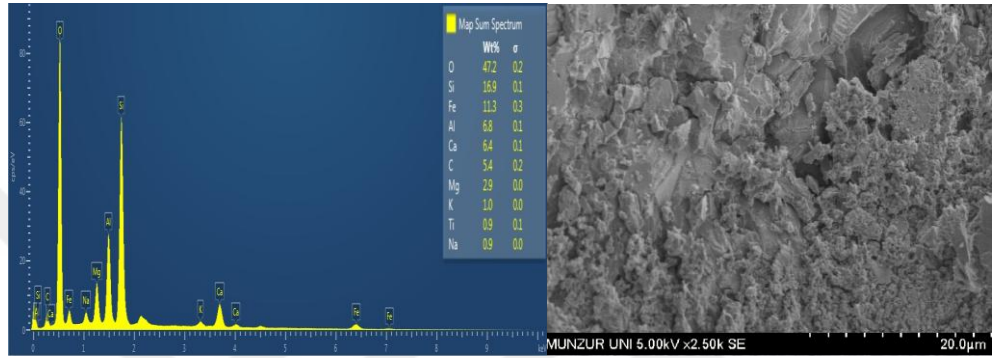
Şekil 4.4. RFB, KPB, RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin EDX görüntüleri a) RFB (Referans Lifsiz Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), b) RLFB (Referans Lifli Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), c) KPB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü), d) KLPB (Kiremit Tozlu Lifli Pudra Beton) kombine kür (4 gün 20°C standart su kürü+ 2 gün 180°C etüv kürü).

EDX grafikleri verilen şekil 4.4'te a grafiği olan RFB O (Oksijen) ağırlığı %48,9 RFLB de %50,7 KPB %49,3, KLPB de ise %50,0 olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca bütün grafiklerde O, Si, Fe, Al, Ca, Mg, S, C, Na, K elementleri bulunmaktadır. Ama c ve d grafiğinde de görüldüğü üzere a ve b grafiğinden farklı element olarak Ti elementi bulunmaktadır. Buradan da anlaşıldığı üzere kiremit tozunun içeriğinde Titanyum elementi vardır.

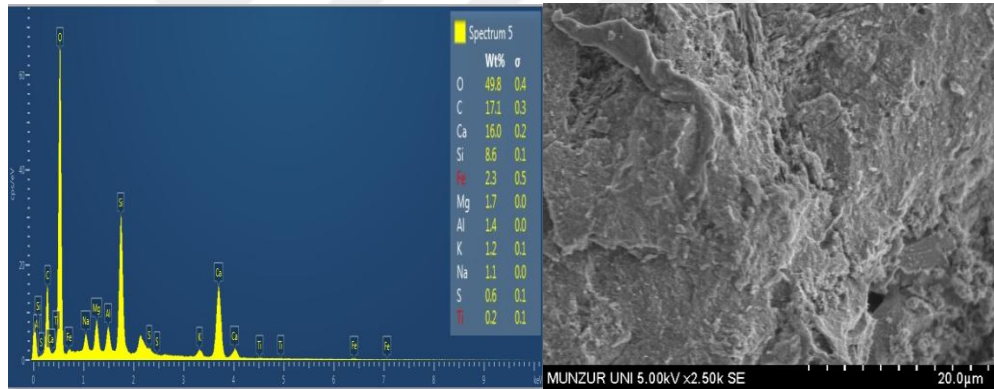
Şekil 4.5'te b ve d grafiklerinde Fe elementi oranı fazladır. Çünkü içerisinde çelik lif bulunmaktadır.



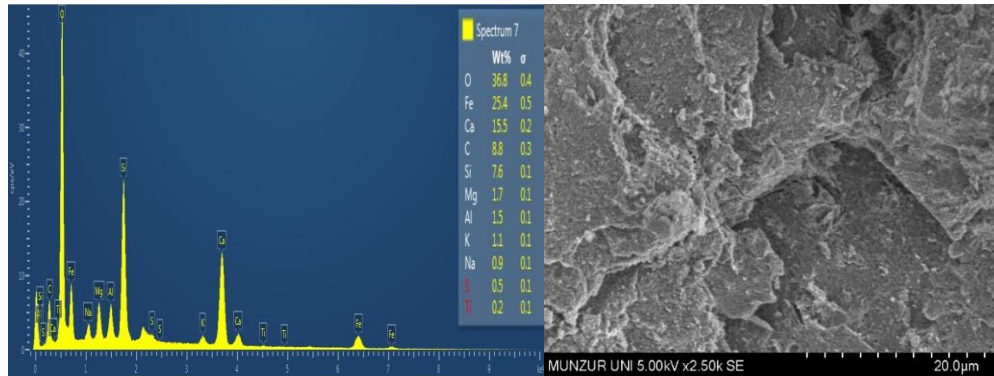
a



b



c

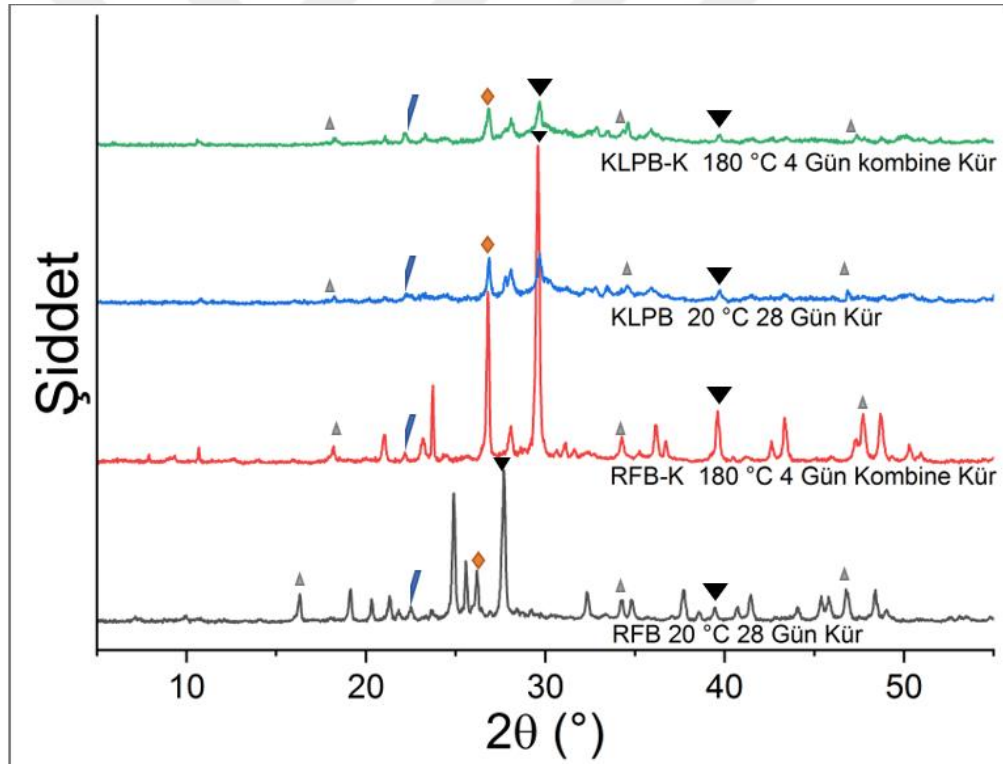


d

Şekil 4.5. RFB, KPFB, RLFB, KLPB içeren örneklerin morfolojisinin EDX görüntüleri a) RFB (Referans Lifsiz Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü b) RLFB (Referans Lifli Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü, c) KPFB (Kiremit Tozlu Lifsiz Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü, d) KLPB (Kiremit Tozlu Lifli Pudra Beton) 28 Gün 20°C standart su kürü

4.8. XRD Analizleri

X-ışını kırınımı ve enerji dağılımlı spektrometri testleri (XRD) kullanılarak bileşimler hesaplanmış ve silis dumanı, kiremit tozu ile yapılan reaktif pudra betondaki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca reaktif pudra betonun yol kaplaması ve altındaki C30/37 betonunun 180°C 4 gün kombine kür, 28 gün 20°C'de su kürüne tabi tutulan numuneler ile aynı şekilde kürlere tabi tutulmuş kiremit tozu, silis dumanı karışımı ile yapılan reaktif pudra betonun sertleşmiş prizmalardan alınan numuneler XRD faz analizine tabi tutulmuş ve bu analizde kuvars (SiO_2), portlandit (CH) ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) varlığı tespit edilmiştir. Kombine numunelerde 180 °C sıcaklığın fazlar üzerinde etkiye sahip olmuş ve fazlarda yükselme olmuştur. CH yoğunluğunun arttığı görülmüş beton mukavemeti artmıştır (Demir vd., 2018)



Şekil 4.6. XRD faz analizleri (a) KLPB-K (b) KLPB (c) RFB-K (d) RFB (▲) Portlandit, (◆) kuvars, (▼) kalsit, (—) Etrenjit

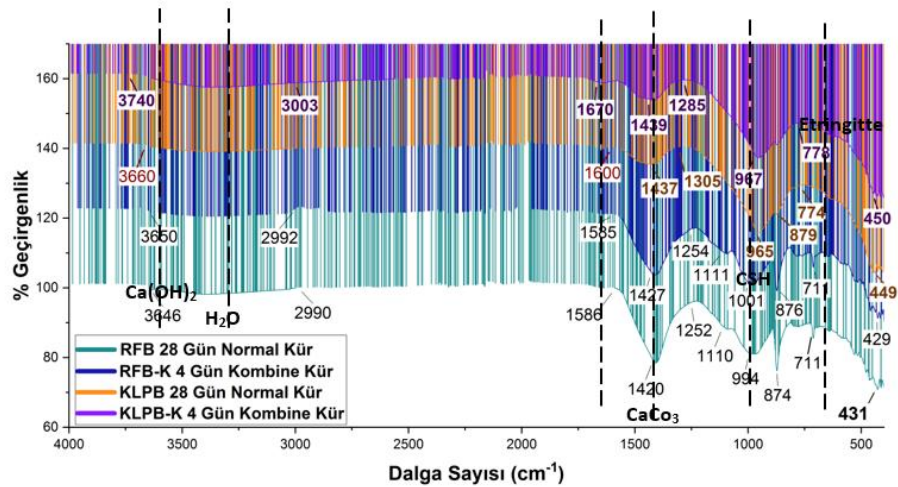
Hidrasyon ürünlerinde portlandit, kalsit, etrenjit ve kuvars pikleri bulunur. Çimento bazlı betonlar, XRD incelemesinde genellikle $2\theta = 26,5^\circ$ 'da bir hali ve $2\theta \approx 29,5^\circ$ 'da bir maksimum değer gösterir. SiO_2 (silika) için (Ersoy vd., 2024) Numunenin

24° ile 31° arasında, silikatlar genellikle $2\theta = 26,5^\circ$ 'da maksimum yansıma gösterir (Erten vd., 2017). $2\theta \approx 26,5^\circ$ 'da en büyük yansıma görülür (Şekil 4.6). 180°C'de, CH ($2\theta \approx 18^\circ$ ve $2\theta \approx 34^\circ$) ve CaCO_3 ($2\theta \approx 29^\circ$) fazları, beton numunelerindeki sıcaklık ile artmıştır. (Şekil 4.6). (Giray, 2015). RFB'de kullanılan kuvars tozunun varlığı, $2\theta \approx 26,6^\circ$ ve $2\theta \approx 50,2^\circ$ civarında piklerle gösterilir (Erosemiah & 2019, 2019). Genellikle görüldüğü üzere, belit ve alit fazları sırasıyla $29,5^\circ$ ve $32,1^\circ$ 2θ civarında maksimum değerlere ulaşır ve bu değerler RFB'deki hidrasyon ürünlerini değerlendirmek için çok önemlidir (Mansoutre vd., 1996). Tipik beton hidrasyonunu gösteren portlandit pikleri, yaklaşık $18,0^\circ$ ve $34,0^\circ$ 2θ 'de bulunur (Jeong vd., 2013).

Bununla birlikte, normal beton, RFB bileşimi nedeniyle daha yüksek mukavemet ve farklı mikroyapısal özellikler sergilerken, genellikle daha düşük mukavemeti ve dayanıklılığı sergiler. Bu fark, kiremit tozu gibi katkı maddeleri ile RFB kullanmanın gelişmiş yapısal uygulamalar için potansiyel faydalarını göstermektedir.

4.9. FT-IR Analizleri

Herhangi bir malzeme içindeki kimyasal bağlar ve kimyasal bileşikler, kullanışlı ve basit bir teknik olan FT-IR spektroskopisi ile tespit edilebilir (Ateş, 2013). Doğal agrega ile hazırlanan RFB (C30/37) betonu ile kiremit tozu katkılı reaktif pudra betonu KLPB'nin normal 28 kür edilmiş şekli ve 4 gün kombine küre tabi tutulmuş hallerinin, FT-IR analizi kullanılarak CH, CSH, kalsit ürünlerine bakılmış ve karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4.7. RFB, RFB-K, KLPB, KLPB-K FT-IR analizi

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere ASR (Alkali Silika Reaksiyonu), 3393 ve 1580 cm^{-1} ’de O-H-O bandında yüksek miktarda su tutar, bu da ASR’nin nemli ortam sıcaklıklarında olgunlaştığını gösterir (Yıldırım Korkmaz, 2018). Ek olarak, C-S-H’yi gösteren 955 cm^{-1} bandı daha yüksek bir banda kayarken, 1374 cm^{-1} ’deki kalsit pik de hacimce daha yüksek bir banda kaymaktadır (Ou vd., 2011).

Literatür verileri, tespit edilen bantları tanımlamak için kullanılabilir. Birçok bant, amorf silika ile bağlantılıdır. Örnekler arasında X = K veya Na (955 cm^{-1}) olan Si-O-X gerilme, Si-O asimetrik ve simetrik gerilme (1154 ve 1037 cm^{-1}), O-Si-O bükülme (457-600 cm^{-1}) ve simetrik gerilme (783 cm^{-1}) sayılabilir (Kılınç Ve & Toplan, 2024),(N. Öztürk vd., 2021),(Öztürk vd., 2020),(Doğruyol vd., 2024). Moleküler su varlığı, 1642 ila 1660 cm^{-1} arasındaki bantta H₂O’nun bükülmesiyle gösterilir.

Ayrıca, X = H veya Si olan X-OH’nin uzaması, 2300–3700 cm^{-1} aralığını kapsayan geniş bantla bağlantılıdır, bu da silika matrisinde önemli miktarda OH grubunun bulunduğunu gösterir (K. A. Dalı, 2018). Ancak 1470 cm^{-1} ’deki bant, (CO₃)₂ anyonlarıyla eşleştiği için karbonatların varlığını gösterir (Doğruyol vd., 2024).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu kapsamlı araştırma sırasında, yol uygulamaları için beton kaplamaların inşası bağlamında Kiremit Tozundan elde edilen atıkların potansiyel kullanımının değerlendirilmesine odaklanıldı. Bu araştırma çerçevesinde, Kiremit Tozu atıklarının beton yol kaplama malzemelerinin imalatı amacıyla özellikle beton agreganın bir bileşeni olarak yenilikçi bir şekilde kullanılmıştır. Çalışma, agrega referans betonu (RFB) olarak adlandırılır, agrega lifli referans betonu (RLFB) olarak anılır, kiremit tozu lifsiz beton (KPB) olarak tanımlanır ve kiremit tozu lifli beton (KLFB) olarak adlandırılmış gibi tipleri içeren titiz testler için tasarlanmış dört farklı beton çeşidi titizlikle üretildi. Kalıplarından çıkarılan numuneler, 20 santigrat derece kontrollü bir sıcaklıkta yedi gün süren bir su kürlenme sürecini içeren bir dizi arıtma protokolüne ve ardından 180 santigrat derecede iki günlük yoğun aşındırma kursu ile tamamlanan dört günlük standart su kürlenme tekniğine ek olarak aynı sıcaklıkta 28 günlük genişletilmiş bir su kürlenme işlemleri içeren bir dizi sisteme tabi tutuldu. Bu kürlenme işlemlerinin tamamlanmasından sonra, beton numuneleri üzerinde basınç testi, eğilme testi, aşınma değerlendirmesi (özellikle bükülmeye odaklanarak) ve donma-çözülme dayanıklılığının değerlendirilmesi dahil olmak üzere çeşitli mekanik testler yapılmıştır. Belirlenen şartnamelere uygun olarak, gerekli minimum basınç dayanımının 28 MPa eşiğine ulaşması, izin verilen minimum eğilme mukavemetinin 4,5 MPa'dan az olmaması gerektiği öngörülmüştür; ayrıca aşınma değerinin 18'e eşit veya daha az olması zorunludur. Ek olarak, özellikler donma-çözülme döngüleri sırasında izin verilen maksimum kütle kaybının metrekare başına 1,0 kilogram sınırını aşmaması gerektiğini belirtti. Sonuçlar, bu katı şartname kriterlerine göre titizlikle analiz edildiğinden ve yorumlandığından, bulgular, yol inşaatı için beton uygulamalarında Kiremit Tozu atıklarının uygulanabilirliği ve performans özellikleri hakkında kritik bilgiler sağladı.

RFB tarafından yürütülen çalışmada, suda 20 santigrat derece kontrollü bir sıcaklıkta yedi günlük bir kürlenme süresinin ardından malzemenin ortalama basınç dayanımının yaklaşık 37,71 MPa olduğunu belirledi ve bu da bu tür malzeme için orta düzeyde bir mukavemet olduğunu gösterir. Ayrıca analiz, ortalama bükülme mukavemetinin, aynı 20 santigrat derece sıcaklıkta yedi günlük su kürlenme işleminden sonra ölçülen yaklaşık 4,47 MPa değerine ulaştığını ortaya koydu. Belirlenen şartnamelere uygun olarak, RFB'nin yukarıda belirtilen yedi günlük su kürlenme

prosedürünü 20 santigrat derece sıcaklıkta geçirdikten sonra belirtilen sınırlar dahilinde belirtilen gerekli basınç ve bükülme mukavemetlerini elde edemediği sonucuna varılmıştır. Tersine, RFB, 20 santigrat derecede yedi günlük su kürlenmesinden sonra ortalama 15,15 kilogramlık bir kütle kaydetti ve bu, öngörülen spesifikasyon sınırlarıyla aynı hizada ve bu özel açıdan uygunluğu gösterir. Ek olarak, RFB, yedi gün boyunca 20 santigrat derecede yürütülen su kürleme işleminden kaynaklanan metrekare başına ortalama 2,02 kilogramlık bir kütle kaybı gözlemlendi ve bu da malzemenin performans özellikleri hakkında daha fazla bilgi sağlar. Bununla birlikte, 20 santigrat derecede yedi günlük su kürleme işleminin tamamlanmasının ardından RFB'nin spesifikasyonlarda belirtilen sınırları karşılamadığını belirtmek zorunludur. Sonuç olarak, yukarıda belirtilen bulgulara ve hem basınç hem de bükülme mukavemetleri için gerekli kriterlerin karşılanmamasına dayanarak, asfalt yüzeylerin bütünlüğünü ve güvenliğini tehlikeye atabileceğinden, 20 santigrat derece sıcaklıkta bir su kürleme işleminden geçtikten sonra RFB'nin yol yüzeyleri için malzeme olarak kullanılmaması gerektiğini göstermektedir.

RFB, 28 gün boyunca 20 °C su kürü sonrası 42,23 MPa basınç belirledi. Aynı standartlarda, eğilme dayanımı ortalama 4,92 MPa'dır. Şartnameye göre, RFB bu süre boyunca ve belirtilen değerlerde ve eğilme değerlerinde korunmuştur. Ek olarak, aşınma değeri 13,91 cm olarak ölçüldü ve şartname sınırını aştı. Ancak donma-çözülme sonrası kütle kaybı ortalama 1,81 kg/m² idi ve spesifikasyon sınırlarını karşılamadı. Bu nedenle, RFB, basınç, eğilme ve aşınma dayanımlarını karşılamasına rağmen donma-çözülme spesifikasyon sınırını karşılamadığı için 28 gün 20°C su kürü sonrasında yol kaplamalarında kullanılmamalıdır.

4 günlük su kürü ve 180°C'de 2 günlük fırın küründen sonra, RFB'nin ortalama basınç dayanımı 47,55 MPa olarak belirlenmiştir. 4 günlük su kürü ve 180°C'de 2 günlük fırın küründen sonra, RFB'nin ortalama eğilme mukavemeti 5,63 MPa olmuştur. Şartname, 4 günlük su kürü ve 180 santigrat derecede 2 günlük fırın küründen sonra RFB'nin eğilme ve basınç dayanımı sınırlamalarına ulaştığını belirtmektedir. 4 günlük su kürü ve 180°C'de 2 günlük fırın küründen sonra, aşınma değeri 10,23 cm olarak ölçülerek şartnameye uygundur ve 4 günlük su kürü ve 180°C'de 2 günlük fırın küründen sonra, donma-çözülmeden kaynaklanan ortalama kütle kaybı 4,70 kg/m² olmuştur. RFB belirtilen parametreleri karşılamamaktadır. RFB, basınç, eğilme ve aşınma dayanımı gereksinimlerini karşılamasına rağmen donma-çözülme spesifikasyon sınırını karşılamamaktadır. Bu nedenle beton yol kaplamalarında uygulanması mümkün değildir.

7 günlük 20°C su kürü sonrasında RLFB, ortalama 38,93 MPa sıkıştırma mukavemeti gösterdi. 7 günlük 20°C su kürlenmesinden sonra, RLFB'nin bükülme mukavemetinin ortalama 4,83 MPa olduğu bulunmuştur. RLFB, 7 gün boyunca 20°C'de su küründen sonra spesifikasyonda belirtilen basınç ve bükülme mukavemetini karşıladı. Spesifikasyon uyarınca, RLFB, 20°C'de 7 günlük su kürlenmesinden sonra ortalama 14,83 aşınma testi sonucu gösterdi. 7 günlük 20°C su kürü sonrası RLFB'nin ortalama donma-çözülme kütle kaybı 2,52 kg/m² idi. 7 günlük 20°C su kürü sonrasında RLFB, spesifikasyondaki sınırlamaları karşılamaz. RLFB, basınç, eğilme mukavemeti ve aşınma değerlerini karşılamasına rağmen, donma-çözülme sınırını karşılamadı.

20°C'de 28 günlük su kürlenmesinden sonra, RLFB'nin basınç mukavemetinin 46,13 MPa olduğu belirlendi. RLFB'nin ortalama bükülme mukavemeti, 20°C'de 28 günlük su kürlenmesinin ardından 5,67 MPa olarak belirlendi. Spesifikasyon, 20°C'de 28 günlük su kürü sonrasında RLFB'nin basınç ve bükülme mukavemet sınırlamalarına ulaştığını belirtir. RLFB, 20°C'de 28 günlük su kürlenmesinden sonra ortalama 11,71 aşınma testi sonucu ortaya çıkmıştır bu da şartnameyi sağlamıştır. 20°C'de 28 günlük su kürlenmesinden sonra, donma-çözülmesinden kaynaklanan ortalama kütle kaybı 4,16 kg/m² idi. Bu da şartnameyi sağlamadığını göstermektedir. Sonuç olarak, 20°C'de 28 günlük su kürlenmesinden sonra, basınç, eğilme ve aşınma değerlerini karşılamasına rağmen donma çözünme değerini sağlamadığı için RLFB yol kaldırımalarında kullanım için uygunluğu mümkün görülmemektedir.

Dört günlük su kürü ve 180 santigrat derecede iki günlük fırın kürlenmesinden sonra, RLFB'nin ortalama sıkıştırma mukavemeti 50,82 MPa idi. 4 günlük su kürü ve 180°C'de 2 günlük fırın kürlemesinden sonra, RLFB'nin bükülme mukavemetinin 7,72 MPa olduğu belirlendi. Şartname, 4 günlük su kürü ve 2 günlük 180°C fırın kürü sonrasında, RLFB'nin basınç ve bükülme mukavemet sınırlarına ulaştığını belirtmektedir. RLFB, 4 günlük su kürü ve 2 günlük 180°C fırın kürü sonrasında ortalama 9,31 aşınma testi skoru gösterdi ve bu da standardı yerine getirdi. RLFB, 4 gün su + 2 gün 180°C fırın kürlenmesinin ardından ortalama donma-çözünme kütle kaybı 17,75 kg/m² gösterdi. 4 günlük su kürü ve 2 günlük 180°C fırın kürü sonrasında, RLFB de basınç, eğilme ve aşınma değerlerini karşılamasına rağmen donma çözünme değerini sağlamadığı için RLFB yol kaldırımalarında kullanım için uygunluğu mümkün görülmemektedir.

KPB, 20°C'de 7 gün boyunca su kürlemesine tabi tutulduktan sonra yapılan testlerde başarılı sonuçlar elde etti. Yapılan incelemelerde basınç dayanımının 60,74 MPa, eğilme mukavemetinin ise 4,61 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu değerler şartname

sınırlarını karşılar. Ayrıca belirtilen standartlara uygunluğu gösteren aşınma testi sonucunda ortalama 9,30 aşınma elde edilmiştir. Donma-çözülme testinde kütle kaybı ortalama 0,8 kg/m² olarak ölçüldü ve şartnamelerde belirtilen kriterleri karşıladığı görülmektedir. Tüm bu değerlendirmeler sonucunda KPB'nin yol kaldırımlarında kullanıma uygun bulunmuştur.

KPB olarak bilinen malzemenin, 28 gün süren ve 20 santigrat derece sıcaklıkta tutulan bir su ortamında yürütülen ve böylece belirli koşullar altında sağlamlığını gösteren bir kürleme işleminin ardından ortalama 63.20 MPa basınç dayanımı sergilediği belirlenmiştir. Ek olarak, KPB'nin yukarıda belirtilen sıcaklıkta aynı 28 günlük su kürleme periyodundan sonra ortalama 5.45 MPa bükülme mukavemetine sahip olduğu değerlendirilmiştir ve bu da bükülme kuvvetlerine etkili bir şekilde dayanma kapasitesini gösterir. Belirtilen titiz spesifikasyonlara dayanarak, KPB'nin 20 santigrat derecede belirtilen 28 günlük su kürleme işleminden geçtikten sonra belirlenen spesifikasyon sınırları dahilinde tanımlanan gerekli basınç ve eğilme mukavemeti parametrelerini başarıyla karşıladığı tespit edilmiştir. Ayrıca KPB, 28 günlük su kürleme süresinin 20 santigrat derecede tamamlanmasından sonra kaydedilen ortalama 5.85 aşınma testi sonucu göstermiştir ve böylece dayanıklılık için gerekli şartname kriterlerine uyduğunu doğrulamıştır. Ek olarak, KPB, 20 santigrat derecede aynı 28 günlük su kürlemesinden sonra donma ve çözülme nedeniyle ortalama 0,62 kg/m² kütle kaybı kaydetmiştir ve bu da zorlu çevre koşullarındaki performansını yansıtır. KPB'nin, belirtilen 20 santigrat derece sıcaklıkta 28 günlük kürleme işleminin tamamlanmasından sonra bile belirlenen şartname sınırlarını karşılamaya devam etmesi dikkat çekicidir. Sonuç olarak, bulgular, KPB'nin 20 santigrat derecede belirtilen 28 günlük su kürleme süresinden sonra gözlemlenen performans ölçümleri göz önüne alındığında, yol kaplamalarında uygulama için gerçekten uygun olduğunu göstermektedir.

KPB olarak bilinen malzemenin, suya batırılmış 4 günlük bir sürenin ardından 2 günlük 180 santigrat derece yüksek bir sıcaklıkta bir aşındırma işlemine tabi tutuldu daha sonra ortalama 79,94 MPa basınç dayanımına sahip olduğu belirlendi. KPB'nin batırılmış 4 günlük bir sürenin ardından 2 günlük 180 santigrat derece yüksek bir sıcaklıkta bir aşındırma işlemi uygulandıktan sonra 6.13 MPa'da ölçülen ortalama bir bükülme mukavemeti ortaya çıkmıştır. Belirlenen spesifikasyon parametrelerine göre, KPB'nin 4 günlük suya daldırma ve sonraki 2 günlük aşındırma işleminin 180 santigrat derecede tamamlanmasından sonra gerekli spesifikasyon sınırları dahilinde belirtilen basınç ve bükülme mukavemeti eşiklerini tatmin edici bir şekilde karşıladığı sonucuna varılabilir.

Ayrıca KPB, 180 derece santigrat derecede 2 günlük aşındırmanın yanı sıra suda 4 günlük işleminden sonra titizlikle kaydedilen aşınma testinde ortalama 5,55 sonuç gösterdi ve böylece dayanıklılığına ilişkin gerekli şartname kriterlerini sağlamıştır. KPB örneğinde, analiz, donma-çözülme döngüsünden kaynaklanan kütle kaybının, suda belirtilen 4 günlük işlem süresinden sonra ve ardından 180 santigrat derecede 2 günlük aşındırma işleminden sonra ortalama 0,94 kg/m²'lik bir değere ulaştığını ortaya koydu. Sonuç olarak, KPB'nin özellikle 4 günlük suya daldırma işleminin tamamlanmasından sonra 2 günlük aşındırma işleminin 180 santigrat derece yüksek sıcaklıkta tamamlanmasından sonra elde edilen sonuçları dikkate alarak, KPB'nin yol kaplamalarında uygulama için kesin olarak uygun olduğu sonucuna varılabilir.

KLPB 7 gün boyunca 20°C'de su kürüne tabi tutulduktan sonra ortalama basınç dayanımı 82,61 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı koşullar altında KLPB'nin eğilme dayanımı ortalama 13,68 MPa olarak belirlenmiştir. Şartnamelere göre KLPB'nin 7 günlük su kürü sonrasında belirtilen basınç ve eğilme dayanımı limitlerini karşıladığı görülmüştür. Ayrıca KLPB'nin 20°C su kürü sonrası 7 gün sonra yapılan aşınma testi sonucunda ortalama 6,46 aşınma değeri elde edilmiştir ki bu da belirtilen standartlara uyumlu olduğunu göstermektedir. Aynı koşullar altında donma kütle kaybı 0,64 kg/m² olarak belirlenmiştir. KLPB, 20°C için 7 günlük su kürü sonrasında da spesifikasyon limitlerini karşılamaktadır. Elde edilen sonuçları dikkate alarak, KLPB'nin yol kaplamalarında uygulama için kesin olarak uygun olduğu görülmüştür.

28 günlük 20°C su küründen sonra, KLPB ortalama 68.74 MPa basınç dayanımına sahip olmuştur. 28 günlük 20°C su küründen sonra, KLPB ortalama 9.12 MPa eğilme dayanımına sahip olmuştur. Şartnameye göre, KLPB 28 günlük 20°C su kürü sonrasında şartname limitlerinde belirtilen basınç ve eğilme dayanımını karşılamıştır. Buna ek olarak, KLPB, 20 santigrat derecede 28 günlük su kürünün tamamlanmasından sonra kaydedilen ortalama 4.57 aşınma testi sonucu göstermiş ve böylece dayanıklılık için gerekli şartname kriterlerini karşıladığını doğrulamıştır. 20°C'de 28 günlük su kürünün ardından KLPB'nin ortalama donma-çözülme kütle kaybı 0,96 kg/m² olmuştur. KLPB ayrıca 28 günlük 20°C su küründen sonra spesifikasyon limitlerini karşılamaktadır. Bu nedenle, KLPB 28 günlük 20°C su küründen sonra yapılan işlemler sonrasında yol kaplamalarında kullanılabilir olduğu sonucuna varılır.

KLPB, 4 günlük su + 2 günlük 180°C fırında kürleme sonrasında ortalama 82,61 MPa basınç dayanımı göstermiştir. Aynı koşullar altında KLPB'nin eğilme dayanımı ortalama 13,68 MPa olarak belirlenmiştir. Şartnameye göre KLPB, 4 günlük su + 2

günlük 180°C fırında kürlleme sonrasında gerekli basınç ve eğilme dayanımı sınırlarını karşılamaktadır. Ayrıca KLPB, 4 günlük su + 2 günlük 180°C fırında kürlleme sonrasında kaydedilen 3,48'lik ortalama aşınma testi sonucuyla dayanıklılık için şartname kriterlerine uyduğunu doğrulamıştır. Ortalama donma-çözülme kütle kaybı 0,78 kg/m²'dir. Bu sonuçlar, KLPB'nin 4 günlük su + 2 günlük 180°C fırında kürlleme sonrasında şartname sınırlarını karşıladığını ve yol kaplamalarında kullanılmaya uygun olduğunu göstermektedir.

Ultrasonik Ses Hızının (UPV) ölçümü hem karmaşık boşluk mimarisinin hem de iki farklı malzemenin doğal mukavemet özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesine önemli ölçüde yardımcı olabilecek önemli bir teşhis parametresi olarak hizmet eder. Bu analitik çerçeve içinde, kaydedilen yüksek bir UPV değerinin, malzeme içinde bulunan azalmış bir boşluk oranı ile korelasyon eğiliminde olduğu ve böylece dış kuvvetlere karşı daha dayanıklı olabilecek daha yoğun paketlenmiş ve sağlam bir iç yapıyı gösterdiği ima edilmektedir. Ayrıca, UPV değerindeki bir artışın, çeşitli mühendislik uygulamaları için hayati bir özellik olan incelenen malzemenin basınç dayanımındaki önemli bir artışla doğrudan ilişkili olduğu fikrinin altını çizdiğini belirtmekte fayda var. Bu gözlemlenen ilişki, UPV ölçümleri ile boşluk oranı arasında ters bir korelasyonun varlığını aydınlatırken, aynı anda UPV değerleri ile malzemenin strese maruz kaldığında sergilediği basınç dayanımı arasında doğrudan doğrusal bir ilişki olduğunu öne sürer. Bu tez araştırmasının parametreleri dahilinde toplanan ampirik veriler, bu eklenmiş sonuçları sadece doğrulamakla kalmaz, aynı zamanda güçlendirir, böylece bu kritik malzeme özellikleri arasındaki karşılıklı bağımlılıkların kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar. Bu nedenle, bulgular, malzeme performansı ve dayanıklılığı üzerine daha geniş bir söyleme katkıda bulunarak, UPV ölçümlerinin uygulanmasının çeşitli mühendislik bağlamlarında malzemelerin yapısal bütünlüğünü tahmin etmek için güvenilir bir araç olarak hizmet edebileceğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, bu araştırma, malzeme davranışı anlayışımızı geliştirmek için gelişmiş ölçüm tekniklerini kullanmanın önemini vurgulamakta ve böylece malzeme bilimi ve mühendislik metodolojilerinde gelecekteki yeniliklerin yolunu açmaktadır.

Yapışma deneyinde de normal betona göre yapışma özelliğini baz alınırsa kiremit tozunun normal betona yapışma değeri 7 gün su küründe 1,37 MPa çıkarken 28 gün su küründe ise 2,69 çıkarak normal betona göre çok daha iyi yapışma özelliği olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak bir kez daha kiremit tozunun beton yol kullanımında iyi bir performans göstereceği ortaya çıkmıştır.

SEM-EDX, XRD ve FT-IR analizlerinde de görüldüğü üzere kiremit tozunun kullanılabilirliği yapılan analizlerle desteklenerek çok iyi sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu da atık kiremit tozunun beton yol için kullanılması ekonomik açıdan ve yeni bir çalışma olarak büyük katkı olduğunu göstermektedir.



KAYNAKLAR

- Abaklıoğlu, M. (2019). *Geleceğe hazır şehirler için akıllı şehir ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojisinin önemi* [Yüksek lisans tezi]. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi.
<https://search.proquest.com/openview/0a297e8da0cd2c4ce258984fa6837c18/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Abdulai, T. (2023). *Kuzey Makedonya’da endüstriyel yapıların çevreye etkileri: Tetova kenti ve hava kirliliği sorunu* [Yüksek lisans tezi]. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi.
<https://search.proquest.com/openview/6c392c7d0e86f616ae8031cff08cd5ea/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Adil, G., Kevern, J. T., & Mann, D. (2020). Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 247, 118453.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118453>
- Ahmed, B., Islam, S. M. Z., Hossen, M. T., Ahmed, H., & Islam, M. R. (2018). Eco-friendly and cost-effective design of concrete pavement using used foundry sand and tiles dust. *Nano Hybrids and Composites*, 23, 46–54.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/NHC.23.46>
- Akkurt, S., Sütçü, M., & Başoğlu, K. (2011). Isı yalıtım özellikleri iyileştirilmiş yapı tuğlalarının geliştirilmesinde kağıt üretim atıklarının kullanılması etkileri. *Uluslararası Meslek Yüksekokulları Sempozyumu*. <https://mmoteskon.org/wp-content/uploads/2014/12/2011-55.pdf>
- Aktürk, M. (2021). *Metakaolin tabanlı pişirilmiş taş tozu atığı ikameli kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri* [Yüksek lisans tezi]. Konya Teknik Üniversitesi.
<https://gcris.ktun.edu.tr/handle/20.500.13091/2279>
- Alakara, E. H. (2022). İnşaat yıkıntı atıklarından elde edilen atık tuğlaların geopolimer harçlarda kullanımının incelenmesi. *Journal of Gaziosmanpaşa Scientific Research*, 11(3), 251–259. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gbad/issue/74308/1213502>
- Alazzawı, S. M. A. (2024). *Geri dönüştürülmüş eski kırma beton ve çelik lif ile üretilen beton yol kaplamalarının özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Çankırı Karatekin Üniversitesi.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Ali, A., & Mohammed, A. (2018). *Yapıtaşlarının temel indeks özellikleri ve elastik parametreleri ile Böhme aşınma kaybı indeksleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi*

- [Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi]. Ankara Üniversitesi.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Almoamar, A. (2024). *Sentetik hibrit liflerle güçlendirilen silindire sıkıştırılan beton yol kaplamanın performans özellikleri* [Yüksek lisans tezi]. Bartın Üniversitesi.
<https://acikerisim.bartın.edu.tr/handle/11772/16519>
- Ambika, D., Nandhini, V., Rubini, V. S., Poovizhi, G., & Priya, S. D. (2021). An exploration on the durability properties of reactive powder concrete. *Materials Today: Proceedings*, 45, 529–534. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.170>
- Apaydın, A. (2018). Kentleşmenin yeraltısuyu beslenimine etkileri ve Türkiye’de kentleşme-yeraltısuyu ilişkisi üzerine bir değerlendirme. *Journal of Urban Academy / Kent Akademisi Dergisi*, 11(4), 781–797.
<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=10120726&AN=137766973>
- Arık, A. (2022a). *Beton yol kaplamalarında ultra yüksek performanslı lifli beton (UYPLB) kullanılması üzerine bir araştırma* [Yüksek lisans tezi]. Balıkesir Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Arık, A. (2022b). *Beton yol kaplamalarında ultra yüksek performanslı lifli beton (UYPLB) kullanılması üzerine bir araştırma* [Yüksek lisans tezi]. Balıkesir Üniversitesi. <https://dspace.balikesir.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12462/12512>
- Arman, S. K. (2020). *Beton yol kaplamasında perlit ve mermerin kullanılabilirliğinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Bitlis Üniversitesi.
<https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/5860>
- Arpacık, Ç. (2024). *Dezavantajlı bireyler için erişilebilir rota planlaması: Sakarya örneğinde ulaşım standartları ve toplu taşıma rotalarının karşılaştırmalı analizi* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Asmara, Y. (2024). Beton yapı. In *Springer* (pp. 7–24). https://doi.org/10.1007/978-981-99-5933-4_2
- Ateş, M. (2013). Nanoparçacıkların ölçme ve inceleme teknikleri. *Cumhuriyet Science Journal*, 34(3), 80–92. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/608610>
- Ay, İ. (2014). *Geosentetik malzemelerin demiryollarında kullanımı ve balast-alt balast tabaka kalınlıklarının azaltılması* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi. POLEN @ İTÜ. <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/6679116d-8ddb-4cbe-85de-0334d77cbe85/download>
- Ayata, Ü., Çakicier, N., Gürleyen, L., & Üniversite katkı yazarları. (2022). UV kürlenmeli vernik uygulanmış karakavak odununda renk, parlaklık, salımsal sertlik ve yüzeye yapışma direnci üzerine yapay yaşlandırmanın etkisi [The effect of artificial aging on color, glossiness, pendulum hardness and adhesion to the surface of black poplar wood treated with UV curable varnish]. *Gümüşhane Üniversitesi*

- Aydınlı, B., & Işık, N. (2024). Geleneksel yapılarda kullanılan kerpiç malzemenin SEM-EDX analizlerinin değerlendirilmesi: Diyarbakır Karaçalı (Tilalo) Mahallesi'ndeki güvercin evleri (Boranhane) örneği [Evaluation of SEM-EDX analysis of adobe material used in traditional buildings: The example of pigeon houses (Boranhane) in Diyarbakır Karaçalı (Tilalo) neighborhood]. *DUJE (Dicle University Journal of Engineering)*, 15, 951–962. <https://doi.org/10.24012/dumf.1535958>
- Ayyıldız, R. (2021). *Ulaşımında yerleşme geçmişimiz ve günümüzde raylı sistem araçlarında yerleştirme analizi* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Ticaret Üniversitesi. <https://acikerisim.ticaret.edu.tr/items/3a72d314-70be-4d0f-bb55-d1946c854951>
- Bakış, A. (2015). *Rijit yol üstyapı inşasında reaktif pudra betonun (RPB) kullanılabilirliğinin araştırılması* [Doktora tezi]. Atatürk Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Bakis, A. (2019). The usability of pumice powder as a binding additive in the aspect of selected mechanical parameters for concrete road pavement. *Materials*, 12(17), 2743. <https://doi.org/10.3390/ma12172743>
- Bakis, A., Isik, E., El, A. A., & Ülker, M. (2019). Mechanical properties of reactive powder concretes produced using pumice powder. *Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 34(2), 353–360. <https://doi.org/10.1007/s11595-019-2059-1>
- Balay, M. (2021). *Farklı yöntemlerle sıkıştırılmış betonların petrografisinin görüntü analizi yöntemi ile incelenmesi* [Doktora tezi]. Ankara Üniversitesi. <https://search.proquest.com/openview/0625c109c7b41578798763bd18906002/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Bamigboye, G. O., Bassey, D. E., Olukanni, D. O., Ngene, B. U., Adegoke, D., Odetoyan, A. O., Kareem, M. A., Enabulele, D. O., & Nworgu, A. T. (2021). Waste materials in highway applications: An overview on generation and utilization implications on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124581>
- Berberoğlu, Ş. (2011). *Beton yollarda buz çözücü tuz etkisine su-çimento oranının etkileri* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi. <https://search.proquest.com/openview/3d85895a179b655f2a6de861e8e9fdc4/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Bolat, E. (2018). *Dünyada gelişmekte olan aerotropolis yapının Türkiye yansıması: İstanbul örneğinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Anadolu Üniversitesi. <https://www.proquest.com/openview/bdd3736ad38d55b053366bff99350892/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

- Brintha, G. S., & Sakthieswaran, N. (2023). Utilization of slag powder and recycled concrete wastes in reactive powder concrete. *Materials and Technology*, 57(2), 103–109. <https://doi.org/10.17222/MIT.2022.701>
- Çetin, O. (2009a). *Beton yollarda yeni teknolojiler: Silindirle sıkıştırılan beton*. <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/31481c3c-3673-4a0d-9e34-cf627f9e3911/download>
- Çetin, O. (2009b). *Beton yollarda yeni teknolojiler: Silindirle sıkıştırılan beton*. <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/31481c3c-3673-4a0d-9e34-cf627f9e3911/download>
- Çetin, O. (2009c). *Beton yollarda yeni teknolojiler: Silindirle sıkıştırılan beton* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Dalı, K. A. (2018). *Yeni silika tabanlı akıllı ilaç taşıyıcı sistemin geliştirilmesi ve ilaç salım özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi. <https://acikerisim.selcuk.edu.tr/items/fe9c8d22-0417-4a89-a0b4-8a44f93fde58>
- Demir, İ., Güzelküçük, S., Sevim, Ö., Filazi, A., & Şengül, Ç. G. (2018). Micro-structural examination of the effect of sulfate on cement mortars with blast furnace slag substitution. *Bilimsel ve Mesleki Araştırmalar Dergisi*, 2(2), 8–18. <https://dergipark.org.tr/en/pub/bilmes/issue/38611/416947>
- Deniz, E. (2011). *Kür şeklinin yüksek performanslı betonların mekanik özelliklerine etkisi* [Yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Doç, Y., & Kömürlü, E. (2024). *Kaya mekanikçiler için bilim tarihi notları*. Madencilik Türkiye. <https://madencilikturkiye.com/wp-content/uploads/2024/03/Kaya-mekanikciler-icin-bilim-tarihi-notlari-final.pdf>
- Doğruyol, M., Ayhan, E., & Karaşin, A. (2024). Effect of waste steel fiber use on concrete behavior at high temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03051. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03051>
- Erosemiah, D. (2019). Microstructural analysis of a reactive powder concrete at elevated temperature. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 7(2), [Konferans bildirisi]. https://www.academia.edu/download/66395972/microstructural_analysis_of_a_reactive_powder_IJERTCONV7IS02008.pdf
- Ersoy, B., Yentürk, F., & vd. (2024). The effect of particle size of pozzolanic materials (bottom ash and zeolite) on alkali-silica reaction and compressive strength of mortar. *Cumhuriyet Yerbilimleri Dergisi*, 39(2), 977–991. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1197446>
- Erten, E., Yalçınkaya, Ç., Beglarigale, A., Yiğiter, H., & Yazıcı, H. (2017). Erken yaş büzülme çatlaklarının lif içeren/içermeyen ultra yüksek performanslı betona gömülü

- donatı korozyonuna etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32, 1347–1364. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.369857>
- Fakhri, M. (2016). Atık kauçuk parçacıklarının ve silika dumanının silindire sıkıştırılmış beton kaplamanın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi. *Temiz Üretim Dergisi*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616302773>
- Farjad, P. (2024). *Çimento karışımlarının performansının artırılması için kontrollü parçacık boyutuna sahip nanosilika uygulaması* [Yüksek lisans tezi]. Kanada Üniversitesi. <https://prism.ucalgary.ca/items/9660051c-48d9-4a59-8a30-adb0cade234e>
- Galiya, R. G. S., Mardanov, A. M., Rakhmatullin, R. E., & Tagirov, T. M. (2023). Yol inşaatı için betonun dayanım özellikleri üzerindeki kompleks bir katkı maddesinin etkisinin görünümü. *Geomate Journal*, 24(101), 132–137. <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/3934/3274>
- Gao, F., Tian, X. D., Lin, J. S., Dong, J. C., Lin, X. M., & Li, J. F. (2023). In situ Raman, FTIR, and XRD spectroscopic studies in fuel cells and rechargeable batteries. *Nano Research*, 16(4), 4855–4866. <https://doi.org/10.1007/S12274-021-4044-1>
- Giray, E. (2015). *Kimyasal katkı maddelerinin çimento ile uyumluluğunun ve harç üretimine etkisinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Anadolu Üniversitesi. <https://search.proquest.com/openview/932ab86991e1d19c1c0b0d19c17dde61/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Giriş, Ü. (2007). *Esnek üst yapılar ile rijit üst yapıların teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Güner, H. (2004). *Beton yollar* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi. <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/80616>
- Güngör, H. (2024). *Kriz dönemlerinde hava kargo taşımacılığında insansız hava araçlarının kriz yönetimine etkisi* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Gelişim Üniversitesi. <https://acikerisim.gelisim.edu.tr/items/3ced6d53-e0d3-427d-ad62-a5ab2a777309>
- Hacıoğlu, S. (2013). *Esnek üstyapılı yollarda çatlak tamir yöntemi uygulanarak asfalt ömrünün uzatılması* [Yüksek lisans tezi]. Bahçeşehir Üniversitesi. <https://acikerisim.bahcesehir.edu.tr/server/api/core/bitstreams/6dcedb3-e575-4ac5-a4a6-ee3c2cbca45/content>
- Hattatoğlu, F., & Bakış, A. (2017). Usability of ignimbrite powder in reactive powder concrete road pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 18(6), 1448–1459. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1213182>
- İpek, M., & İyiliksever, R. (2014). Atık mermer bulamacının reaktif pudra betonun mekanik özelliklerine etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(3), 367–374. <https://dergipark.org.tr/en/pub/taufenbilder/issue/20707/220923>

- Jeong, J. E., Min, J. S., Jang, Y. R., Kim, K. W., & Heo, S. C. (2013). The analytical application for cement using X-Ray diffraction and X-Ray fluorescence spectrometer. *Journal of Analytical Science and Technology*, 26(5), 340–345. <https://accesson.kr/ast/v.26/5/340/31561?lang=ko>
- Jiang, J., Zhang, S., Longhurst, P., Yan, W., & Zhang, Y. (2021). Molecular structure characterization of bituminous coal in Northern China via XRD, Raman and FTIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 255, 119724. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119724>
- Kadıoğlu, T., & Kitabı, M. A.-B. (2022). *Derzli donatısız beton yolların derzlerinde polipropilen (PP) liflerin performansının araştırılması*. BYK22 Betonyol. <https://byk22.betonyol.org.tr/wp->
- Karabulut, A. (2006). *Reaktif pudra betonun (RPB) özelliklerinin mineral katkılarla geliştirilmesi* [Yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Karahacıoğlu, İ. (2020). Asfalt yolların yaşam döngüsü maliyet analizi: İstanbul O3 otoyolunda uygulanması. *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları ve Geliştirme Dergisi (UMAGD)*, 12(1), 32–39. <https://doi.org/10.29137/umagd.541442>
- Karakurt, H. (2016). Çelik lif katkılı beton yol kaplamalarının özellikleri. *DÜBİTED: Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 148–156. <https://dergipark.org.tr/en/pub/dubited/issue/24379/258406>
- Kaya, S. (2020). *Beton yol kaplamasında perlit ve mermerin kullanılabilirliğinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Bitlis Eren Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Kaygusuz, M. (2018). *Yüksek sıcaklık hasarına uğramış betonarme kirişlerin FRP ile onarım ve güçlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi]. Atatürk Üniversitesi. http://earsiv.atauni.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/123456789/1640/Mehmet%20Akif%20KAYGUSUZ_0214863.pdf?sequence=1
- Kılınç, Ö., & Toplan, N. (2024). Perlit, diatomit, zeolit ve şamot tuğla harcından alümina-silika esaslı kompozit aerjel tozu üretimi. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 10(3), 558–573. <https://doi.org/10.30855/gmbd.0705AR08>
- Kinay, F. (2020). *Beton yol kaplama inşasında bazaltın kullanılabilirliği* [Yüksek lisans tezi]. Batman Üniversitesi. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/67999>
- Kozak, M. (2011). Beton yollar ve beton yol yapımının araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 12–20. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ytcd/issue/22210/238475>
- Kozak, M. (2011). Beton yollar ve beton yol yapımının araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(7), 89–99. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ytcd/issue/22210/238475>

- Köse, H. (2015). *Balastsız üstyapıda asfalt ve beton taşıyıcı tabakaların teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi. POLEN @ İTÜ. <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/07413064-e50b-4413-bbfb-a948d0d3fa17/download>
- Krishnan, S., & Rajkumar, P. (2024). FTIR, XRD, EDX with SEM spectroscopic studies on sedimentary rocks of Bodamalai Hills, South India. *ResearchSquare*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4487593/v1>
- Kutlu, İ. (2024). Yığma yapılarda güçlendirme tekniklerinin koruma ilkeleri ile ilişkilendirilmesi ve Mardin tarihi dokusunda değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Journal of Science Culture*, 11(1). <https://doi.org/10.29109/gujsc.1497946>
- Ladignon, J. G., Agustin, E. J. B., Arcega, G. Y., De Castro, P. S., Loria, S. A., & Pascual, L. E. (2021). Comparison of concrete and asphalt in road construction – Which is better? *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 9(7), 2289–2293. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.35708>
- Li, W., Liu, H., Zhu, B., Lyu, X., Gao, X., & Liang, C. (2020). Mechanical properties and freeze–thaw durability of basalt fiber reactive powder concrete. *Applied Sciences*, 10(16), 5682. <https://doi.org/10.3390/app10165682>
- Mangi, S. A., Raza, M. S., Khahro, S. H., Qureshi, A. S., & Kumar, R. (2022). Recycling of ceramic tiles waste and marble waste in sustainable production of concrete: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 18311–18332. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18105-x>
- Mansoutre, S., & Lequeux, N. (1996). Quantitative phase analysis of Portland cements from reactive powder concretes by X-ray powder diffraction. *Advances in Cement Research*, 8(32), 175–182. <https://doi.org/10.1680/adcr.1996.8.32.175>
- Mardani-Aghabaglou, A., Bayqra, H., Özen, S., Faqiri, Z. A., & Ramyar, K. (2019). Silindirle sıkıştırılmış betonun dayanıklılık performansı ve boyutsal kararlılığı: Kapsamlı inceleme. *Dumlupınar Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Dergisi*, 7(2). <https://doi.org/10.29130/dubited.541786>
- Merghes, P., Varan, N., Ilia, G., Hulka, I., & Simulescu, V. (2023). A SEM-EDX study on the structure of phenyl phosphinic hybrids containing boron and zirconium. *Gels*, 9(9), Article 706. <https://doi.org/10.3390/gels9090706>
- Nalbantoğlu, H. (1961). *Afyon-Emirdağ yolu üzerine teknik incelemeler* https://scholar.google.com/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=hilmi+nalbanto%C4%9Flu+afyon-+emirda%C4%9F+yolu&oq=
- Nasiri, S., Rabiei, M., Palevicius, A., Janusas, G., Vilkauskas, A., Nutalapati, V., & Monshi, A. (2023). Modified Scherrer equation to calculate crystal size by XRD with high accuracy: Examples Fe₂O₃, TiO₂, and V₂O₅. *Nano Trends*, 3, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2023.100015>

- Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, 89(3), 768–774. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.003>
- Ou, Z., & Ma, B. (2011). Comparison of FT-IR, thermal analysis and XRD for determination of products of cement hydration. *Advanced Materials Research*, 168–170, 518–521. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.518>
- Öztürk, N., & Bozdoğan, S. (2020). Infrared and Raman spectroscopic analyses of poly(allylamine) adsorbed on CaA, NaX, NaY, and ZSM-5 synthetic zeolites. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(3), 1042–1049. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.709084>
- Öztürk, N., & Bozdoğan, S. (2021). Analyses of polyethylene glycol (mono- and dimethyl) ether adsorbed on CaA, NaX, NaY, and ZSM-5 synthetic zeolites by infrared and Raman spectroscopies. *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 10–18. <https://dergipark.org.tr/en/pub/kfbd/article/891309>
- Paglia, C., Mosca, C., & Antonietti, S. (2022). The concrete versus asphalt roadways: Case studies. *Journal of Materials and Polymer Science*, 3(1), 1–8. <https://www.researchgate.net/publication/363579552>
- Peker, E., & Demirkan, A. A. (2020). *Belediyeler için iklim değişikliği rehberi* [Rapor]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi. <https://open.metu.edu.tr/bitstream/handle/11511/102491/index.pdf>
- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695001442>
- Saini, J., Soni, D. K., & Mandal, A. K. (2020). Changing the physical and chemical properties of alkaline soil stabilized with industrial waste material (tile dust). *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 14(1), 65–84. <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2020.107303>
- Sanjuán, M. Á., & Andrade, C. (2021). Reactive powder concrete: Durability and applications. *Applied Sciences*, 11(12), 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>
- Sönmez, Ö., Kodaman, T., & vd. (2025). Karayolu yük taşımacılığının Türkiye ekonomisine etkilerine SWOT analizi ekseninde güncel bir yaklaşım. *International Conference on Urban Transport and Sustainability*. <https://doi.org/10.56809/icujtas.1492057>
- Stone, L., Pretorius, R., & Combrinck, R. (2020). Compatibility between cement and superplasticiser in combination with fines, gypsum and fly ash. In N. De Belie, C. Milestone, & M. Basheer (Eds.), *Proceedings of the 4th International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites* (pp. 200–208). RILEM Bookseries, 24. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33342-3_22

- Şengün, E., Kıran, E., & Yaman, İ. Ö. (2017). Türkiye’de beton yol ve beton bariyer fırsatları. *Hazır Beton, Mayıs–Haziran*, 28–33. <https://www.researchgate.net/publication/324909104>
- Şimşek, Z. (2005). *Yapı yeraltı kabuğunda su ve nem sorunlarının geçirimsiz beton malzeme ile giderilmesinin araştırılması* [Yüksek Lisans tezi]. Uludağ Üniversitesi. <https://search.proquest.com/openview/d27c271fe0b214b2fa280cbc22e8d5c8/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Taha, A. F. (2024). *Düşük dayanmalı atıklardan geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak kendiliğinden yerleşen betonun dayanımı ve dayanıklılık özelliklerinin değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi]. Necmettin Erbakan Üniversitesi. <https://acikerisim.erbakan.edu.tr/items/d40c1fa0-57df-4432-8796-9f91f1406cda>
- Tanyıldızı, M. M. (2022). *Beton yol kaplamalarında yüksek fırın cürufu ve çelik lif kullanımının araştırılması* [Doktora Tezi]. İnönü Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Taşdemir, M., & B., F. (2010). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İTÜ Dergisi*, 9(2). http://itudergi.itu.edu.tr/index.php/itudergisi_d/article/view/829
- Taşkınsu, H. Ç. (2019). *Silindirle sıkıştırılmış beton yolların performanslarının geleneksel beton yollar ve asfalt yollarla karşılaştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Toklu, K., Avşar, Y. E., Cihan, M. T., & Bıçakçı, E. (2022). Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, *UMAGD*, 14(1), 95–102. <https://doi.org/10.29137/umagd.955365>
- Topçu, İ. B., & Sarıkaya, E. (2021). Reaktif pudra betonlarındaki gelişmeler. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 440–449. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ogummf/article/946981>
- Turan-Sam, Ü. A. (2023). Kiremit tozunun AL6061 alaşımının aşınma miktarına etkisinin incelenmesi. *Ceeol.com*. <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1128319>
- Türkiye Beton Yollar Teknik Çalışma Grubu. (2003). *Beton yollar* (1. baskı). <https://www.betonyol.org.tr/uploads/otherpublications/beton-yollar.pdf>
- Ünal, O., & Uygunoğlu, T. (2003). Atık mermer tozu katkılı betonların donma-çözülme etkisinde mekanik özelliklerinin araştırılması.
- Varlıer, N. (2014). *Ulaşım projelerinde ekolojik ve sosyal etkiler: İstanbul üçüncü köprü incelemesi* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi. POLLEN @ İTÜ. <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/9f01b37c-4e5b-4df2-aff8-4e6305137e31/download>

- Yamanlar, A. (2012). *Farklı kaplama türlerinin yüzey doku özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi. <https://search.proquest.com/openview/6725c2e759d56dd96dd6bd08eed1e508/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Yan, B., Dai, G., & Hu, N. (2015). Recent development of design and construction of short span high-speed railway bridges in China. *Engineering Structures*, 103, 115–123. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029615004265>
- Yeğınobalı, A. (2009). *Niçin beton yol?* <https://www.betonyol.org.tr/uploads/concreteroads/nicin-beton-yol.pdf>
- Yetim, D. Y. (2019). Beton yollar ve silindirle sıkıştırılmış betonun Türkiye’deki yeni uygulama alanı. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/makale---beton-yollar-9-eylul-2019-20191220130448.pdf>
- Yıldırım Korkmaz. (2018). *2nd International Vocational Science Symposium (IVSS)*. <http://www.meslekisempozyum.com>
- Yıldızgöz, K. (2022). *Emergence of transportation network companies: An analysis of urban mobility, regulation and future role in urban mobility ecosystem* [Doktora tezi]. İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Youness, D., Yahia, A., & Tagnit-Hamou, A. (2022). Konsantre süspansiyonların viskozite modellerinin geliştirilmesi: Parçacık boyutu ve şekil endekslerinin katkısı. *Construction and Building Materials*, 344, 128–139. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182201995X>

EKLER

EK-1. Resimler



Şekil Ek-1.1. Malzemelerin karıştırılmasına ait görüntü



Şekil Ek 1.2. Harcın döküldüğü numune kalıpları



Şekil Ek 1.3. Numunelerin kalıplara konulması



Şekil Ek 1.4. Numunelerin suda ve etüvde olan görüntüleri



Şekil Ek 1.5. UPV deneyine ait görüntü



Şekil Ek 1.6. Basınç deneyine ait bir görüntü



Şekil Ek 1.7. Eğilme deneyine ait bir görüntü



Şekil Ek 1.8. Aşınma (Böhme) deneyine ait bir görüntü



Şekil Ek 1.9. Donma-Çözünme deneyine ait bir görüntü



Şekil Ek 1.10. Yapışma deneyine ait bir görüntü