

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ YOL ÜSTYAPISINDA DOLGU MALZEMESİ VE
GEOPOLİMER BAĞLAYICI OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

Muhammed Enes OLTULULAR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Dr. Öğr. Üyesi Kaan YÜNKÜL
Doç. Dr. Harun AKOĞUZ
Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2026

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK danışmanlığında, Muhammed Enes OLTULULAR tarafından hazırlanan bu çalışma 21/04/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Kaan YÜNKÜL İmza:

Üye : Doç. Dr. Harun AKOĞUZ İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK İmza:

Yukarıdaki Yüksek Lisans Tezi Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“İnşaat Yıkıntı Atıklarının Yol Üstyapısında Dolgu Malzemesi ve Geopolimer Bağlayıcı Olarak Kullanımının Araştırılması” isimli “Yüksek Lisans” tezım tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 21/04/2026

(İmza)

**Muhammed Enes
OLTULULAR**

ÖZET

İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ YOL ÜSTYAPISINDA DOLGU MALZEMESİ VE GEOPOLİMER BAĞLAYICI OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Muhammed Enes OLTULULAR

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

2026, 104 sayfa

Bu çalışma, artan inşaat faaliyetleri sonucu oluşan inşaat yıkıntı atıklarının (İYA) çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilir malzeme kullanımını desteklemek amacıyla, bu atıkların geopolimer bağlayıcı ile stabilize edilerek yol üstyapısında değerlendirilebilirliğini araştırmaktadır. Bu kapsamda, sahadan temin edilen beton agregası ile atık cam, tuğla ve beton tozları içeren, ince dane oranı %2 ila %12 arasında değişen altı farklı tasarım gradasyonu (T1–T6) hazırlanmıştır. Karışımlar, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) kriterleri dikkate alınarak alt temel tabakası için TİP-A, temel tabakası için ise TİP-C standartlarına uygun şekilde oluşturulmuştur. Mühendislik performansının belirlenmesi amacıyla numuneler üzerinde Modifiye Proktor ve California Bearing Ratio (CBR) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Modifiye Proktor sonucunda, ince dane oranındaki artışın maksimum kuru birim hacim ağırlığını $2,02 \text{ g/cm}^3$ 'ten $2,16 \text{ g/cm}^3$ 'e yükselttiği, optimum su muhtevasını ise %12'den %8,5'e düşürdüğü belirlenmiştir. CBR deneylerinde, stabilize edilmemiş numunelerin ince dane artışına bağlı olarak taşıma kapasitelerinin arttığı ve en yüksek değerin %159,6 ile T6 numunesinde elde edildiği görülmüştür. Bu tasarımların sodyum hidroksit (NaOH) alkali aktivatörü ile farklı molaritelerde aktive edilmesi ve kür süresinin 91 güne çıkarılmasıyla, 4M NaOH ile stabilize edilen T6 numunesinin CBR değerinin %223,9 seviyesine kadar yükseldiği saptanmıştır. Ayrıca mikroyapısal değişimlerin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen SEM ve EDS analizleri, artan aktivatör molaritesi ile birlikte mikro boşlukların azaldığına, daha sıkı ve kompakt bir yapının geliştiğine işaret etmiştir. Sonuç olarak, elde edilen bulgular geopolimer bağlayıcı ile stabilize edilen İYA'nın, yol üstyapısında çevre dostu alternatif bir malzeme olarak kullanılabilme potansiyeline işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Beton agregası, CBR, Cam tozu, Geopolimerizasyon, İnşaat yıkıntı atıkları, Modifiye Proktor, SEM, Tuğla tozu.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE USE OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE AS FILL MATERIAL AND GEOPOLYMER BINDERS IN ROAD PAVEMENT STRUCTURES

Muhammed Enes OLTULULAR

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,**

Department of Civil Engineering

Advisor: Assistant Professor Adem IŞIK

2026, 104 pages

This study investigates utilizing construction and demolition waste (CDW) stabilized with a geopolymer binder in road pavements to mitigate environmental impacts of waste from rising construction activities and support sustainable material usage. Within this scope, six design gradations (T1–T6) containing concrete aggregate sourced from the field along with waste glass, brick, and concrete powders were prepared, with fines content varying from 2% to 12%. The mixtures complied with the Technical Specifications of Turkish State Highways (KTŞ) criteria, meeting TYPE-A for sub-base and TYPE-C for base standards. Modified Proctor and California Bearing Ratio (CBR) tests evaluated engineering performance. Modified Proctor results indicated that increasing the fines content raised the maximum dry density from 2.02 g/cm³ to 2.16 g/cm³ and reduced the optimum moisture content from 12% to 8.5%. In CBR tests, the bearing capacity of unstabilized specimens increased with fines content, peaking at 159.6% for the T6 specimen. Alkaline activation of these designs with sodium hydroxide (NaOH) at different molarities and extending the curing period to 91 days increased the CBR of the 4M NaOH-stabilized T6 specimen to 223.9%. Furthermore, SEM and EDS analyses conducted to examine microstructural changes indicated that higher activator molarity reduced microvoids, leading to the development of a denser and more compact structure. Consequently, the findings indicate the potential of geopolymer-stabilized CDW as an eco-friendly alternative material in road pavements.

Keywords: Brick powder, CBR, Concrete aggregate, Construction and demolition waste, Geopolymerization, Glass powder, Modified Proctor, SEM.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, her aşamada beni yönlendiren ve destekleyen değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Değerli bilgi ve birikimleriyle destek ve katkılarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Harun AKOĞUZ'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kaan YÜNKÜL'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatım boyunca yanımda olarak maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili annem ve babama teşekkürlerimi sunarım. Son olarak bu tez çalışması, TÜBİTAK-1001 tarafından desteklenen, “İnşaat Yıkıntı Atıklarının Yeni Nesil Geopolimer Bağlayıcı Kullanarak Yol Tasarımlarında Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımının Araştırılması” adlı 124M637 kodlu proje kapsamında gerçekleştirilmiş olup, sağladığı tüm desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed Enes OLTULULAR

Nisan, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Amacı	1
1.2. Araştırmanın Kapsamı.....	1
1.3. Araştırmanın Önemi	2
1.4. Varsayımlar	2
1.5. Sınırlılıklar.....	3
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. İnşaat Yıkıntı Atıkları.....	4
2.1.1. Beton.....	9
2.1.2. Tuğla.....	13
2.1.3. Cam.....	17
2.2. İnşaat Yıkıntı Atıklarının Temel, Alt Temel İnşaatında Kullanımı.....	19
2.2.1. Kompaksiyon.....	23
2.2.2. CBR	24
3. YÖNTEM	26
3.1. Malzeme	26
3.1.1. Geri dönüştürülmüş beton agregası	26
3.1.2. Atık beton tozu	28
3.1.3. Atık cam tozu	29
3.1.4. Atık tuğla tozu	30
3.1.5. Alkali aktivatör çözeltisi.....	32
3.2. Alt temel ve Temel Malzemenin Hazırlanması	34
3.2.1. Alt temel	34
3.2.2. Temel.....	35
3.3. Deney Yöntemi.....	37

3.3.1. Modifiye Proktor deneyi.....	37
3.3.2. CBR deneyi	40
3.3.3. SEM analizi	42
4. BULGULAR	45
4.1. Tasarım Gradasyonlarının Modifiye Proktor Deney Sonuçları.....	45
4.2. CBR Deney Sonuçları	47
4.2.1. Stabilize edilmemiş tasarım gradasyonlarının CBR sonuçları	47
4.2.2. Aktivatör (NaOH) molaritesinin CBR değerleri üzerine etkisi	49
4.2.3. Kür süresinin stabilize edilmiş tasarım gradasyonlarının CBR değerleri üzerine etkisi	53
4.3. Mikroyapı İncelenmesi	57
4.3.1. SEM analizleri	58
4.3.2. EDS analizleri.....	64
5. SONUÇLAR.....	73
KAYNAKÇA	75
EKLER	84
Ek A. Modifiye Proktor Deneyi	85
Ek B. CBR Deneyi	88

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Türkiye ve AB ülkelerinde İYA geri kazanım oranlarının karşılaştırılması.....	7
Tablo 2. Farklı türdeki tuğla atıklarının kimyasal bileşimi	14
Tablo 3. Tekkim firmasına ait NaOH kimyasal bileşeni oranları.....	33
Tablo 4. Alt temel tabakası gradasyonu için KTŞ’de belirtilen sınırlar ve seçilen değerler	34
Tablo 5. Temel tabakası gradasyonu için KTŞ’de belirtilen sınırlar ve seçilen değerler....	36
Tablo 6. Tasarım gradasyonlarının Modifiye Proktor deney sonuçları.....	46
Tablo 7. EDS analizine göre T6 tasarım gradasyonlarının element yüzdeleri	68
Tablo 8. EDS analizine göre Si/Al ve Na/Al oranları	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Türkiye’de İYA yönetim süreci akış şeması	6
Şekil 2. 2023 Kahramanmaraş depremi sonrası İYA’nın yüzdesel dağılımı	8
Şekil 3. 2018 yılına ait İYA üretim miktarları	9
Şekil 4. İnce atık agrega üretimindeki iki farklı kırma-eleme ve yıkama süreci.....	10
Şekil 5. Elek seti	26
Şekil 6. Kamu binası ve yıkımdan elde edilen beton blokları	27
Şekil 7. Konkasör kırma tesisinde kırıcılar ile parçalanması	27
Şekil 8. Kırıcılar ile elde edilen agregalar	28
Şekil 9. Boyutlarına göre sınıflandırılmış agregalar.....	28
Şekil 10. Beton tozunun aşamaları	29
Şekil 11. Cam tozunun aşamaları	30
Şekil 12. Tuğla tozunun aşamaları	31
Şekil 13. Pul formundaki sodyum hidroksitin tartılımı ve suya karışımı.....	33
Şekil 14. Dane çapı dağılımı eğrisi.....	36
Şekil 15. Numune hazırlanması ve Modifiye Proktor cihazı.....	39
Şekil 16. Numunenin tıraşlanması ve tartılması	39
Şekil 17. Örnek alınan numunenin tartılması ve etüve gönderilmesi.....	40
Şekil 18. Ara yükleme diski, yarıklı sürsaj ağırlığı, filtre kağıdının kalıba yerleştirilmesi.	41
Şekil 19. CBR deney cihazı.....	42
Şekil 20. SEM deney cihazı.....	43
Şekil 21. Tasarım gradasyonlarına ait proktor eğrileri	46
Şekil 22. T1 nolu tasarım gradasyonuna ait yük-penetrasyon eğrisi	48
Şekil 23. Tasarım gradasyonlarının CBR değerleri	49
Şekil 24. 1 M NaOH çözeltisinde sıkıştırılan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri .	50
Şekil 25. 2 M NaOH çözeltisinde sıkıştırılan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri .	50
Şekil 26. 3 M NaOH çözeltisinde sıkıştırılan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri .	51
Şekil 27. 4 M NaOH çözeltisinde sıkıştırılan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri .	52
Şekil 28. T4, T5 ve T6 tasarım gradasyonlarının NaOH molaritesine göre CBR değerlerindeki değişim	53
Şekil 29. 7 günlük kür sürelerine tabi tutulan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri.....	54

Şekil 30. 28 günlük kür sürelerine tabi tutulan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri...	55
Şekil 31. 91 günlük kür sürelerine tabi tutulan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri...	56
Şekil 32. Tasarım gradasyonlarının 7, 28 ve 91 günlük kür süreleri altında CBR değerleri	57
Şekil 33. Beton tozuna ait SEM görüntüsü.....	58
Şekil 34. Tuğla tozuna ait SEM görüntüsü.....	59
Şekil 35. Cam tozuna ait SEM görüntüsü	60
Şekil 36. Geopolimer ile stabilize edilmemiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü	61
Şekil 37. 1 molar NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü	62
Şekil 38. 2 molar NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü	62
Şekil 39. 3 molar NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü	63
Şekil 40. 4 molar NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü	63
Şekil 41. Tuğla tozunun EDS grafikleri	64
Şekil 42. Beton tozunun EDS grafikleri	64
Şekil 43. Cam tozunun EDS grafikleri	65
Şekil 44. Geopolimer ile stabilize edilmemiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri..	66
Şekil 45. 1 M NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri	66
Şekil 46. 2 M NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri	67
Şekil 47. 3 M NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri	67
Şekil 48. 4 M NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri	68
Şekil 49. Na/Al oranına bağlı CBR performansı değişim grafiği (T6)	70
Şekil 50. Si/Al oranına bağlı CBR performansı değişim grafiği (T6).....	71

Şekil A1. T1 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu	85
Şekil A2. T2 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu	85
Şekil A3. T3 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu	86
Şekil A4. T4 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu	86
Şekil A5. T5 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu	87
Şekil A6. T6 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu	87
Şekil B1. T1 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu	88
Şekil B2. T2 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu	88
Şekil B3. T3 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu	89
Şekil B4. T4 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu	89
Şekil B5. T5 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu	90
Şekil B6. T6 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu	90
Şekil B7. T4 nolu numuneye ait 1 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	91
Şekil B8. T5 nolu numuneye ait 1 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	91
Şekil B9. T6 nolu numuneye ait 1 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	92
Şekil B10. T4 nolu numuneye ait 2 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	92
Şekil B11. T5 nolu numuneye ait 2 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	93
Şekil B12. T6 nolu numuneye ait 2 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	93
Şekil B13. T4 nolu numuneye ait 3 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	94
Şekil B14. T5 nolu numuneye ait 3 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	94
Şekil B15. T6 nolu numuneye ait 3 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	95
Şekil B16. T1 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu	95
Şekil B17. T2 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu	96
Şekil B18. T3 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu	96
Şekil B19. T4 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu	97
Şekil B20. T5 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu	97
Şekil B21. T6 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu	98
Şekil B22. T1 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	98
Şekil B23. T2 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	99
Şekil B24. T3 nolu numuneye ait 4 M NaOH - 28 gün CBR deney sonucu.....	99
Şekil B25. T4 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	100
Şekil B26. T5 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	100
Şekil B27. T6 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu	101
Şekil B28. T1 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu	101

Şekil B29. T2 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu	102
Şekil B30. T3 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu	102
Şekil B31. T4 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu	103
Şekil B32. T5 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu	103
Şekil B33. T6 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu	104

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AB	Avrupa Birliği
Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
ASR	Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	American Society for Testing and Materials
BT	Beton Tozu
Ca	Kalsiyum
C-A-S-H	Kalsiyum Alüminosilikat Hidrat
CBR	California Bearing Ratio
CO ₂	Karbon Dioksit
CT	Cam Tozu
ÇBGT	Çimento Bağlayıcı Granüler Temel
DA	Doğal Agrega
E-cam	Elektronik Sınıf Atık Cam
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
Fe	Demir
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
g/cm ³	Gram/santimetreküp
İYA	İnşaat Yıkıntı Atıkları
K	Potasyum
KA	Kırmataş Agrega
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
M	Molar
Mg	Magnezyum
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
Na	Sodyum
Na ₂ SiO ₃	Sodyum Silikat
NaOH	Sodyum Hidroksit
N-A-S-H	Sodyum Alüminosilikat Hidrat

O	Oksijen
PC	Portland Çimentosu
SEM	Scanning Electron Microscopy
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum Dioksit
s/ç	Su Çimento Oranı
T.C. ÇŞİDB	Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
TT	Tuğla Tozu
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
UK	Uçucu Kül
w	Su Muhtevası
w _{opt}	Optimum Su Muhtevası
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
%	Yüzde
γ _{kmaks}	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
μm	Mikrometre

1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, inşaat yıkıntı atıklarından (İYA) elde edilen beton agregası ile diğer atık malzemelerden (cam, beton ve tuğla tozları) oluşan geopolimer esaslı malzemelerin, karayolu dolgu yapımında özellikle alt temel ve temel tabakaları olarak uygulanabilirliğini incelemektir. Bu kapsamda:

- Milyonlarca ton atığın geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerine kazandırılmasına çevresel ve ekonomik katkı sağlanması,
- Doğal kaynakların (agrega, çimento vb.) tüketiminin azaltılması,
- Geopolimer yöntemle iyileştirilen atık malzemelerin zemin taşıma kapasitesini artırma potansiyelinin araştırılması hedeflenmiştir.

Bu doğrultuda, bu tez çalışması, inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen geopolimer esaslı malzemelerin yol üstü yapısında kullanılabilirliğini deneysel olarak ortaya koymayı ve ince dane oranı, NaOH molaritesi ile kür süresinin kompaksiyon ve taşıma gücü üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

1.2. Araştırmanın Kapsamı

Bu çalışma, Erzincan ilinde kentsel dönüşümden elde edilen (yapı ömrünü tamamlamış betonarme kamu binasına ait) beton agregaları ve atıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma, aşağıdaki malzemeleri ve aşamaları kapsamaktadır:

- Malzemeler: İYA'dan elde edilen beton agregası, tuğla tozu (TT), cam tozu (CT), beton tozu (BT) ve aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH).
- Aşama 1: Temel ve alt temel tabakaları için zemin danelerinin boyut dağılımının belirlenmesi, elek analizi ile sınıflandırılması ve malzemelerin deneylere hazır hale getirilmesi.
- Aşama 2: Modifiye Proktor deneyi ile tasarımların optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmaks}) değerlerinin belirlenmesi.
- Aşama 3: Belirlenen w_{opt} ve γ_{kmaks} üzerinden malzemenin dolgu yapımında alt temel ve temel tabakalarında kullanım uygunluğunun California Bearing Ratio (CBR) deneyi ile test edilmesi ve CBR taşıma kapasitesinin hesaplanması.

- Aşama 4: Modifiye Proktor ve CBR sonuçları ile SEM (Scanning Electron Microscopy) ve EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analiz sonuçlarının incelenmesi.
- Aşama 5: Sonuç ve önerilerin sunulması.

1.3. Araştırmanın Önemi

Bu araştırma, inşaat sektörünün mevcut yıkım faaliyetleri ve doğal afetlerin (özellikle 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminin) yol açtığı büyük miktardaki İYA sorununa çevresel, sosyal ve ekonomik faydalar sağlayabilecek bir çözüm sunma potansiyeli nedeniyle büyük önem taşımaktadır.

- Çevresel önem açısından; beton üretimi sırasında ortaya çıkan yüksek CO₂ salınımını ve enerji tüketimini azaltmaya yardımcı olmak suretiyle doğal kaynak tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayacak olmasıdır.
- Ekonomik önem açısından geri dönüştürülmüş atık malzemelerin, geleneksel yapı malzemelerine kıyasla maliyet yönünden rekabetçi bir alternatif olarak sektöre sunulabilecek olmasıdır.
- Yöntemsel özgünlük açısından; çalışma, diğer çalışmalardan farklı olarak, tamamen İYA olan tuğla, cam ve beton malzemelerinin toz haline getirilip geopolimer bağlayıcı ile iyileştirilerek dolgu yapımında kullanılabilirliğini ve performansını değerlendirmesi bakımından literatüre katkı sunmaktadır.

1.4. Varsayımlar

Bu çalışmada kabul edilen başlıca varsayımlar şunlardır:

- Kentsel dönüşümden elde edilen beton agrega atıkları ve diğer inşaat yıkıntı atıklarının (tuğla, cam) homojen ve ana kütleyi temsil edebilecek nitelikte örnekler olduğu kabul edilmiştir.
- Kullanılan aktivatör (NaOH) ve diğer kimyasalların, geopolimer tepkimelerini başlatmak ve istenen mühendislik özelliklerini (taşıma kapasitesi) sağlamak için uygun olduğu kabul edilmiştir.
- Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçların, saha koşullarında yapılacak yol dolgusu uygulamalarını öngörmede yeterli veri sunacağı kabul edilmektedir.

1.5. Sınırlılıklar

Bu çalışma aşağıdaki sınırlılıklar dâhilinde yürütülmüştür:

- Araştırma kapsamı, yalnızca Erzincan ilinde kentsel dönüşümden elde edilen belirli bir yapıya ait beton agregaları ve atıkları ile sınırlandırılmış olup, farklı yapılardaki atık özelliklerinin değişkenlik gösterebileceği dikkate alınmalıdır.
- İyileştirme sürecinde aktivatör olarak sadece NaOH kullanılmıştır. Farklı aktivatör veya aktivatör kombinasyonlarının kullanımı bu çalışmanın kapsamı dışındadır.
- Çalışma, malzemelerin laboratuvar ölçeğinde dolgu yapımındaki uygunluğuna odaklanmış olup uzun vadeli saha performansı (örn. donma-çözülme, yorulma direnci) gibi özellikler değerlendirilmemiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. İnşaat Yıkıntı Atıkları

Artan nüfus ve ham madde kaynaklarının azalması, son yıllarda dünyanın karşı karşıya kaldığı önemli sorunlardan biri olmakla beraber bu duruma karşı mevcut kaynakların korunması, kullanılan malzemelerin geri kazandırılıp tekrar kullanılması büyük önem taşımaktadır. Özellikle İstanbul gibi büyük şehirlerde, depreme karşı önlem almak amacıyla artan kentsel dönüşüm çalışmaları sonucu yıkılan yapılar, İYA'ya neden olmakta ve bu atıklar farklı alanlarda tekrar kullanılmak üzere işlenmektedir (Kutlu, 2023).

Doğal kaynakların bilinçsiz tüketimi ve sanayileşmeyle birlikte şehirlerde artan tüketim miktarı nedeniyle oluşan atıklar, çevreyi ciddi şekilde tehdit etmektedir. İYA miktarının kontrolsüz artması çevre, insan sağlığı ve ülke ekonomisi üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu atıkların geri dönüştürülmesi, çevresel tahribatın önüne geçilmesine ve ham madde ihtiyacı, nakliye masrafları, iş gücü ve enerji ihtiyacının azalmasına katkı sağlayacaktır (Özçelik, 2022).

İYA'nın geri kazanım süreçlerinde, malzemelerin fiziksel özellikleri yanı sıra kimyasal bileşimleri de önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Özellikle atık beton, tuğla ve seramik türü malzemeler, geopolimerizasyon reaksiyonunda temel rol oynayan silisyum (SiO_2) ve alüminyum (Al_2O_3) oksitlerince zengin olmaları nedeniyle potansiyel ham madde kaynakları arasında değerlendirilmektedir. Komnitsas vd. (2015) ile Robayo-Salazar vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen araştırmalarda, geleneksel Portland çimentosunun (PC) üretiminin yüksek enerji tüketimi ve karbon emisyonu oluşturduğu; buna karşın alüminosilikat esaslı İYA'ların alkali aktivasyonla bağlayıcı malzemeye dönüştürülmesinin hem atıkların değerlendirilmesi hem de çevre dostu malzeme üretimi açısından sürdürülebilir bir yaklaşım sunduğu ifade edilmektedir. Bu doğrultuda, dolgu malzemesi olarak kullanılmak üzere planlanan İYA'ların uygun stabilizasyon yöntemleriyle iyileştirilmesi, malzemenin durabilite ve taşıma kapasitesi gibi temel geoteknik özelliklerini geliştirerek mühendislik uygulamalarındaki kullanım imkanlarını artırmaktadır.

Arslan ve Ulubeyli (2019) çalışmalarında Türkiye'de İYA'nın yönetimine yönelik yaptıkları araştırmada, bu atıkların sürdürülebilir yapılaşma açısından önemli bir çevresel problem oluşturduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, Türkiye'deki inşaat firmalarının büyük çoğunluğunun İYA yönetim planına hâkim olmadığı, atıkların genellikle depolama sahalarına

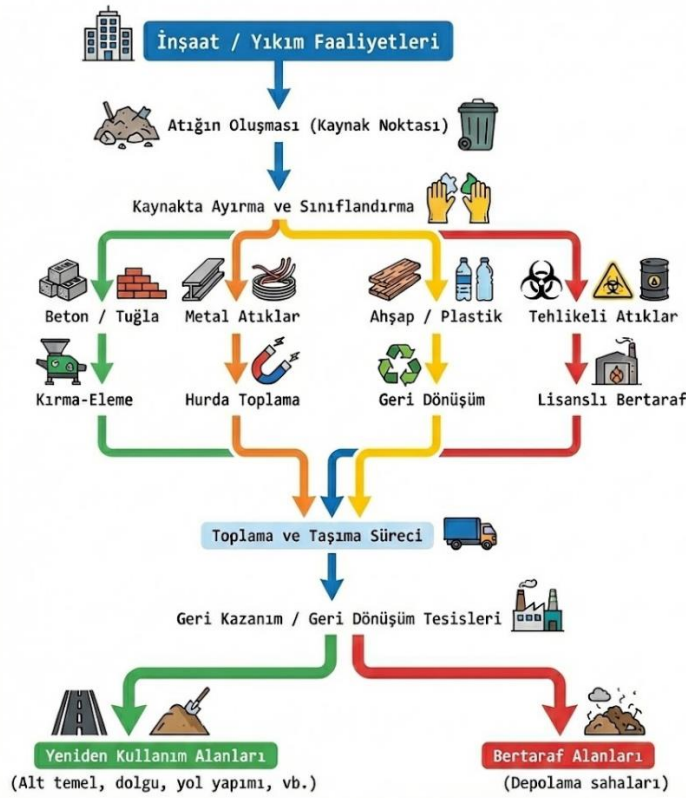
gönderildiği ve geri dönüşüm tesislerine erişiminde kısıtlı olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, kaynakta ayırma uygulamasının, atıkların yeniden kullanımını ve geri dönüşüm oranlarını artırdığı; taşıma ve bertaraf maliyetlerini azalttığı ve depolama alanlarının ömrünü uzattığı ifade edilmiştir. Araştırmaya katılanların çoğunluğu, kaynakta ayırma uygulamalarının İYA yönetimi açısından gerekli olduğunu ifade etmiştir. Sonuç olarak, yazarlar atık yönetimi sisteminin gelişebilmesi için toplumsal bilincin artırılması, maddi olarak teşviklerin sağlanması ve yerel yönetimlerin sürece aktif katılım göstermesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında İYA'nın taban, alt temel veya dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak söz konusu atıkların heterojen yapıda olması, standart zemin davranışından farklı mühendislik özelliği göstermesine neden olabilmektedir. Xuan vd. (2016) tarafından yürütülen çalışmada, geri dönüştürülmüş agreganın doğal agregalara (DA) kıyasla daha düşük birim hacim ağırlığına ve daha yüksek su emme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu fiziksel dezavantajları gidermek için ve malzemenin dolgu kullanımına uygun hale getirmek amacıyla, geopolimer kimyasal stabilizasyon yöntemleri kullanılarak basınç dayanımı ve CBR gibi mekanik performans parametrelerinin iyileştirilmesi literatürde sıklıkla tercih edilmektedir.

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı (2004) tarafından yayımlanan Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği'ne göre İYA'nın yönetiminde çevresel koruma ilkelerini ön planda tutmaktadır. Yönetmelik, atıkların kaynağında azaltılması, ayrı toplanması ve geri kazanılması esasını kabul ederken; tehlikeli olan atıklarda ise diğer atıklardan ayrıştırılarak yönetmeliğe uygun şekilde bertaraf edilmesini öngörmektedir. Ayrıca, atıkların taşınmasında "Taşıma İzin Belgesi" zorunluluğu, taşıma araçlarının belirli düzeyde özelliğe sahip olması ve geri kazanım tesislerinin çevresel gerekliliklerini karşılaması gibi teknik ve idari yükümlülükler düzenlenmiştir.

Şekil 1'de Türkiye'de İYA oluşumundan nihai veya yeniden kullanım aşamasına kadar izlenen yönetim süreci şematik olarak gösterilmiştir. Süreç, inşaat veya yıkım faaliyetleri sırasında atığın kaynağında ortaya çıkmasıyla başlar. İlk aşamada atıkların kaynakta ayrılması ve sınıflandırılması kritik öneme sahiptir; çünkü geri dönüşüm oranını artıran temel unsur ayrıştırmanın doğru yapılmasıdır. Beton/tuğla, metal, ahşap/plastik ve tehlikeli atıklar olmak üzere dört ana kategoride toplanmıştır. Beton ve tuğla atıkları kırma eleme işlemine gönderilerek dolgu, yol alt temel malzemesi gibi alanlarda yeniden kullanılabilir hâle getirilebilmektedir. Metal içerikli atıklar hurda toplama süreçleri aracılığıyla geri dönüşüm

sanayisine kazandırılır. Ahşap ve plastik atıklar ise uygun geri dönüşüm yöntemleriyle yeniden işlenebilir malzeme hâline getirilir. Tehlikeli atıklar, çevresel ve sağlık riskleri nedeniyle diğerlerinden ayrı olarak lisanslı atık tesislerine yönlendirilir. Ayrıştırma sonrasında tüm atık türleri toplama ve taşıma sürecinden geçerek geri kazanım veya geri dönüşüm tesislerine aktarılır. Bu tesislerde atıkların fiziksel veya kimyasal dönüşümü sağlanır ve kullanıma uygun yeni malzemeler üretilir. Süreç sonunda geri kazanılan ürünler yeniden kullanım alanlarına (alt temel, dolgu malzemesi, yol yapımı vb.) yönlendirilirken, geri kazanılamayan ya da tehlikeli özellik taşıyan atıklar bertaraf alanlarına (düzenli depolama sahaları) gönderilir. Bu akış şeması, İYA yönetim sürecinin temel aşamalarını açık biçimde ortaya koymakla birlikte, özellikle kaynaktan ayrıştırma, tesis altyapısı ve yerel yönetim uygulamalarının tutumu, sürecin başarısında belirleyici olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 1. Türkiye’de İYA yönetim süreci akış şeması

Buzkan ve Erman (2020) çalışmalarında yapılaşma faaliyetlerinin hızlanmasıyla artan yapı atıklarının yapısal atık kategorisinde değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmada, bu atıkların çevresel etkileri ve doğal kaynakların korunması açısından geri dönüşümünün önemi vurgulanmıştır. Yazarlar, Türkiye’de 2004 yılında yürürlüğe giren yerel düzenlemelere

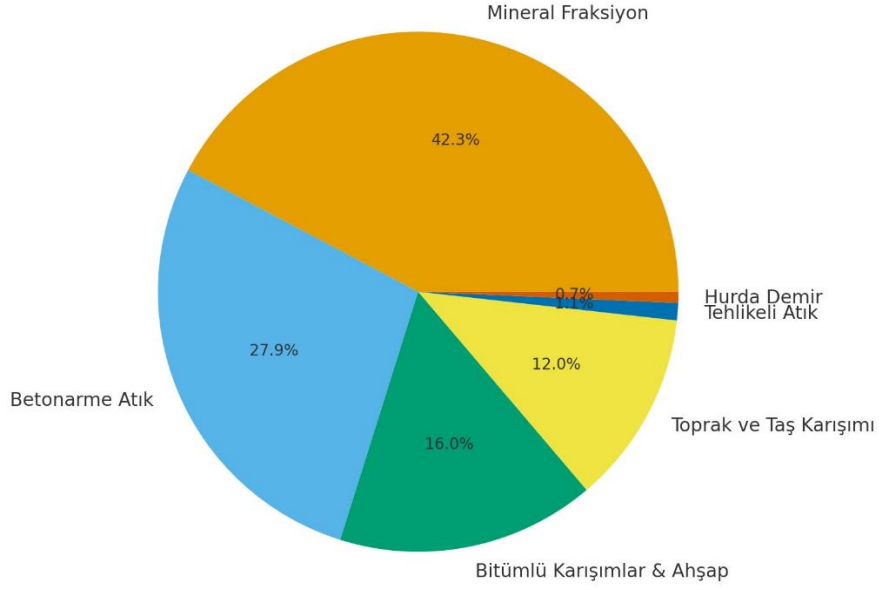
rağmen uygulamada geri dönüşüm oranlarının yetersiz kaldığını, yasal düzenlemeler ile uygulamaların çevresel koruma hedeflerine ulaşmada eksik olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, AB ve gelişmiş ülke uygulamaları ile ülkemiz mevzuatları kıyaslamasını yaparak etkin atık yönetimi için mevzuat iyileştirmeleri, denetim sistemlerinin güçlendirilmesi ve uygulama kapasitesinin artırılması yönünde çözüm önerileri sunmuşlardır.

Avrupa Birliği (AB) ülkeleri, 'Döngüsel Ekonomi Paketi' kapsamında İYA'nın geri kazanımında yüksek standartlara ulaşmıştır. Eurostat 2022 yılı verilerine göre; özellikle Hollanda'da geri kazanım oranları %99 seviyelerine ulaşarak atıkların neredeyse tamamı ekonomiye geri kazandırılmaktadır. AB-27 genel ortalaması incelendiğinde ise bu oranın yaklaşık %88 düzeyinde olduğu görülmektedir (Eurostat, 2023). Türkiye'de inşaat atıklarının yönetimi ve geri kazanımı konusunda henüz AB seviyelerine ulaşamadığı, kayıtlı geri kazanım oranlarının yaklaşık %4–5 seviyelerinde kaldığı görülmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı [ÇŞİDB], 2023). Bu verilere bakılarak Türkiye'de kayıtlı geri kazanım oranlarının AB ortalamasının oldukça altında kaldığı görülmektedir. Tablo 1'de, Türkiye ve AB arasındaki durum özetlenmiştir.

Tablo 1. Türkiye ve AB ülkelerinde İYA geri kazanım oranlarının karşılaştırılması

Bölge / Ülke	Geri Kazanım Oranı (%)	Veri Kaynağı
Hollanda	~%99	(Eurostat, 2023)
AB-27 Ortalaması	~%88	(Eurostat, 2023)
Türkiye	~ %4–%5	(ÇŞİDB, 2023)

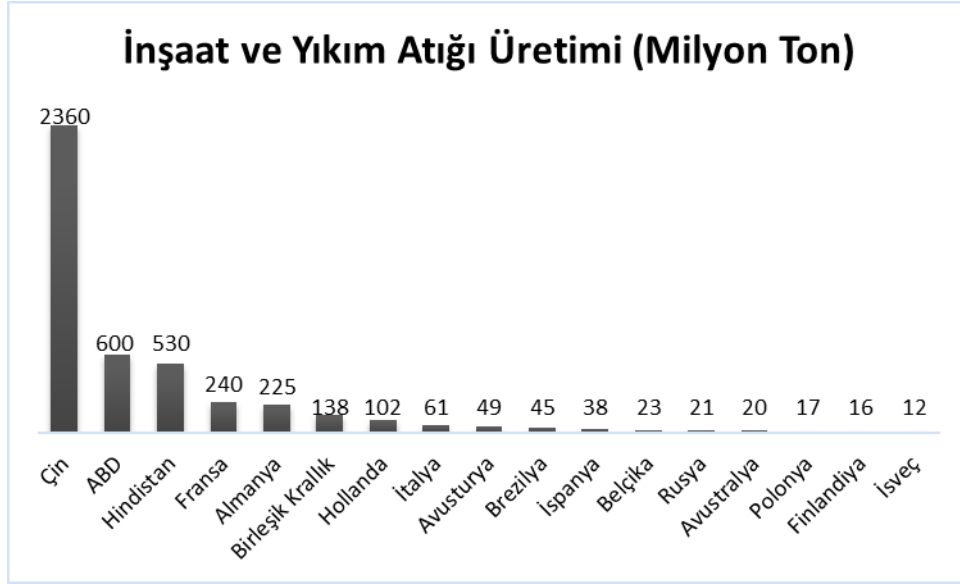
Doğdu ve Alkan (2023), Kahramanmaraş'ta 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremlerin sonucunda, yaklaşık 350–580 milyon ton arasında İYA'nın oluştuğu öne sürülmektedir. Bu miktarın bileşimi incelendiğinde; 1.453.015,25 ton tehlikeli atık, 16.273.770,74 ton toprak ve taş karışımı, 21.698.360,99 ton bitümlü karışımlar ve ahşap atıklar, 57.151.932,97 ton mineral fraksiyon, 37.747.073,20 ton betonarme atık ve 935.317 ton hurda demir atığı olarak belirlenmiştir. Araştırma, bu veriler doğrultusunda, oluşan atıkların büyük bölümünün geri dönüştürülebilir nitelikte olduğunu ve uygun önlemlerle ekonomiye kazandırılabilceğini öne sürerken; tehlikeli atıkların hassasiyetle bertaraf edilmesi gerektiği değerlendirilmiştir. Şekil 2'de atık dağılımı yüzdesel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 2023 Kahramanmaraş depremi sonrası İYA'nın yüzdesel dağılımı

Temelli vd. (2023) çalışmasında ise Kahramanmaraş ve çevresinde meydana gelen deprem sonrası oluşan İYA'nın miktarı ve içerdiği potansiyel ekonomik değeri incelemişlerdir. Bu analiz sonucunda, toplam atık miktarının yaklaşık 97 milyon ton (120 milyon m³) olduğu; hurda demir atıklarının 935 bin ton civarında ve mineral fraksiyon atıklarının 57 milyon ton düzeyinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Ayrıca, bu atıkların taşınma ve geri kazanım maliyetleri sırasıyla 5,6 milyon € ve 142,6 milyon € arası olarak tahmin edilmiş, kaynaklarının çimento fabrikalarında değerlendirilmesinde yaklaşık %37,5 oranında ekonomik kazanç sağlanabileceği; hurda demir atıklarının demir çelik sektöründe değerlendirilerek %13,1 ile %75,5 arasında kazanç imkanı sağlayabileceği ifade etmektedir. Bu büyüklükteki atıkların afet zamanlarında yönetilebilmesi için senaryo bazlı planlama, lojistiğin ve çevresel risk analizinin önceden yapılıp planlanmasının önem taşıdığını ileri sürmektedir.

İYA genellikle beton, asfalt, ahşap, alçı, metal, tuğla, cam, plastik gibi malzemelerle beraber toprak ve kaya gibi diğer malzemeleri de içerebilmektedir. Çin, yaklaşık 2.360 milyon ton ile en fazla İYA üreten ülke olmuştur. Onu Amerika Birleşik Devletleri yaklaşık 600 milyon ton ve Hindistan yaklaşık 530 milyon ton takip etmektedir (Wang, B. vd., 2021). 2018 yılına ait dünya genelinde üretilen İYA miktarı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 2018 yılına ait İYA üretim miktarları (Wang, B. vd., 2021)

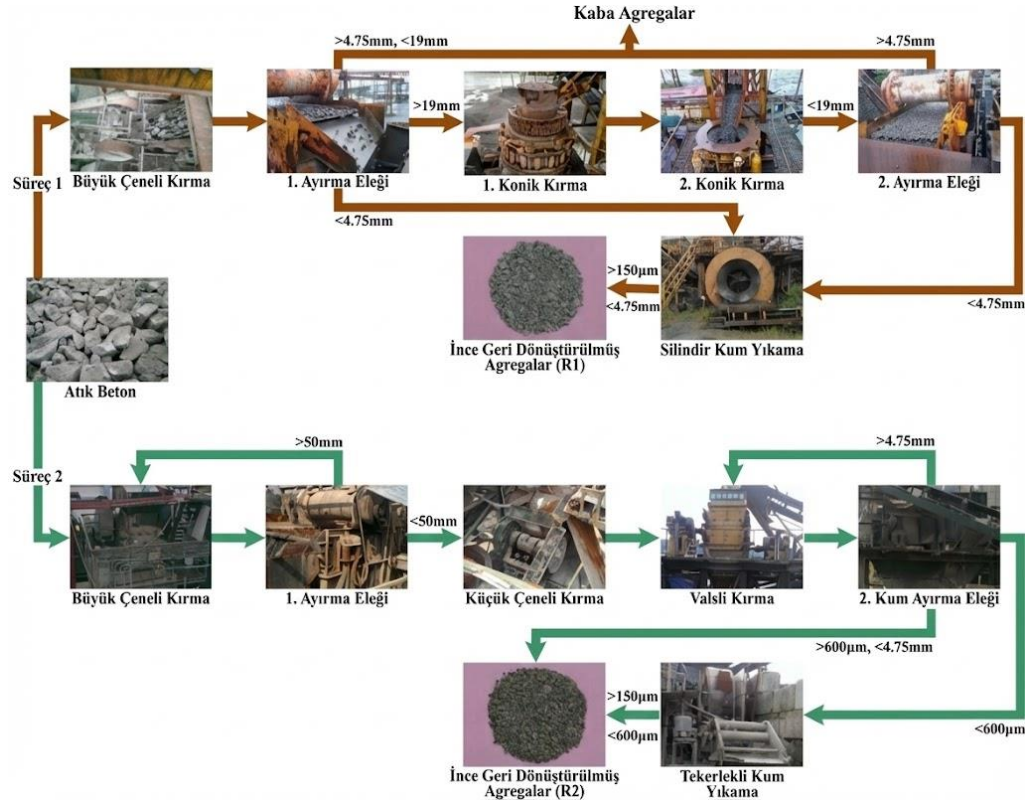
2.1.1. Beton

Beton, inşaat ve yıkım faaliyetleri sonucunda oluşan atıklar içerisinde hacimsel olarak en büyük paya sahip malzemelerden biridir. Yıkım süreçlerinden elde edilen beton atıkları, uygun kırma ve eleme işlemleri sonrasında belirli boyutlarda geri dönüştürülmüş agrega olarak yeniden değerlendirilebilmektedir. Bununla birlikte, İYA'dan elde edilen beton agregasının DA'ya kıyasla daha yüksek gözenekliliğe ve zayıf ara yüzey geçiş bölgelerine sahip olması, bu agregalar kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımı ve işlenebilirlik performansında azalmaya yol açmaktadır.

Fan vd. (2015), İYA'dan elde edilen ince beton agregasının üretiminde kullanılan iki farklı kırma-eleme sürecini karşılaştırmıştır. Süreç 1'de atık beton büyük çeneli kırıcıda parçalanmakta ve titreşimli elekler yardımıyla iri ve ince fraksiyonlara ayrılmaktadır. Bu yöntemle elde edilen agregaların yüzeyinde çimento hamuru kalıntılarının daha fazla bulunduğu ve buna bağlı olarak yüksek su emme kapasitesi ile düşük yoğunluk sergilediği belirtilmiştir.

Süreç 2 ise yalnızca ince agrega üretimine odaklanan çok aşamalı bir sistem olarak tanımlanmıştır. Bu yöntemde atık beton; büyük çeneli kırıcı, küçük çeneli kırıcı ve silindirik kırıcıdan geçirilerek yeniden kırma-eleme işlemlerine tabi tutulmaktadır. Bu süreç sonunda elde edilen agregaların daha düşük gözeneklilik, daha yüksek yoğunluk ve daha düşük su emme kapasitesi gösterdiği rapor edilmiştir (Fan vd., 2015).

Araştırma sonuçları, geri dönüştürülmüş ince beton agregalarının fiziksel özellikleri üzerinde üretim yönteminin önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle aşamalı kırma-eleme sistemleriyle elde edilen agregaların daha kaliteli fiziksel özellikler sergilediği belirtilmiştir. Süreç aşamaları Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. İnce atık agrega üretimindeki iki farklı kırma-eleme ve yıkama süreci (Fan vd., 2015)

Ahıskalı (2025), ince ve kaba İYA'nın yanı sıra atık beton tozu (BT) ve polipropilen elyaf içeren silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, basınç dayanımını en fazla etkileyen parametrenin BT olduğu belirlenmiştir. Kontrol karışımı, 90 günlük basınç dayanımında en yüksek değeri (48,98 MPa) göstermiştir. Geri dönüştürülmüş agrega ve BT içeriğindeki artışın ise basınç dayanımını genel olarak azalttığı vurgulanmıştır. En dayanıklı karışımların, %25 ince İYA, %10–20 BT ve orta düzeyde polipropilen elyaf (%0,25–0,50) içeren karışımlarda elde edildiği belirtilmiştir. Buna karşılık, yüksek BT (≥ 40) ve yüksek polipropilen elyaf dozlarının ($\geq 0,75$) mekanik ve dayanıklılık performansında azalmaya yol açtığı sonucuna ulaşmıştır.

Kutlu (2023) tarafından yapılan çalışmada, İstanbul ilinde kentsel dönüşüm kapsamında yıkılan ve yaklaşık 5 MPa basınç dayanımına sahip bir yapıdan elde edilen agregaların yeni beton

retiminde kullanılabilirliği incelenmiştir. Elde edilen agregalar, betonda farklı oranlarda (%0, %10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100) kullanılarak numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Mineral katkı olarak farklı oranlarda silis dumanı ve uçucu kül (UK) kullanılırken, kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcı tercih edilmiştir. Sonuç olarak, İYA'dan elde edilen beton agregasının performansı değerlendirildiğinde, optimum kullanım oranının yaklaşık %20 seviyelerinde olduğu; bu seviyenin üzerindeki artışların özellikle basınç ve yarmada çekme dayanımlarında belirgin azalmaya yol ağtığı grlmştir. Ayrıca, ęalıřmada kullanılan silis dumanının, İYA kökenli agreganın mekanik kayıplarını büyük lęde azaltarak beton performansını iyileştirdiği; buna karşılık UK'nin dayanım üzerinde sınırlayıcı etki oluşturduğunu bununla birlikte, İYA oranı arttıķa betonun işlenebilirliğinin azaldığı ve karışımın hedef kıvama ulaşabilmesi için daha fazla süper akışkanlaştırıcı kullanımına ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, İYA kökenli agregaların uygun katkılarla desteklenmesi durumunda belirli oranlarda beton üretiminde kullanılabileceğini, ancak yüksek oranlarda kullanımın mekanik performansı olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

Manzi vd. (2023) ęalıřmasında geri dönüşüm oranı düşük olan İYA'dan elde edilen agregaları kullanarak, geleneksel DA kullanımını azaltmayı amaçlayan alternatif bir bağlayıcı sistem geliştirmiştir. Bu kapsamda, metakaolin esaslı alkali aktive harçlara farklı oranlarda İYA'dan elde edilen beton agregası ilave edilmiş ve numunelere kr uygulanmıştır. Ancak, agreganın yüzeyinde bulunan eski harç tabakasının açık gözenekliliği arttırarak metakaolinin alkali aktivasyonunu kısmen engellediği belirlenmiştir. Deney sonuçları DA'nın %12,5 oranında İYA'dan elde edilen beton agregası ile değiştirilmesi durumunda yaklaşık 20 MPa, %25 oranında değiştirilmesi durumunda ise yaklaşık 15 MPa düzeyinde 28 günlük basınç dayanımı elde edildiğini göstermektedir. Bu değerler, referans karışımlara kıyasla sırasıyla yaklaşık %35 ve %50 oranında dayanım kaybına işaret etmektedir.

Akhtar ve Sarmah (2018), İYA ile beton üretiminin önemli çevresel etkiler ve CO₂ emisyonları oluşturduğunu gözlemlemiştir. Dünya genelinde yıllık 3 milyar tonu aşan İYA oluşumu dikkate alındığında, bu atıkların yönetimi ve geri dönüştürülmüş agregaların özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik kapsamlı yaklaşımların geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Özellikle Hindistan ve in gibi ülkelerde yüksek atık hacminin yönetilebilmesi için kapsayıcı modelleme yaklaşımlarına ihtiyaç duyulduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, İYA'dan elde edilen beton agregalarının düşük kalite göstermesi nedeniyle, araştırmacılar mukavemeti arttırmak amacıyla puzolanik özellik gösteren ek çimentolu malzemelerin kullanımını ve geri dönüştürülmüş agregaların %30–50 oranında kullanılmasını önermiştir. Bununla birlikte, geri

dönüştürülmüş agregaların kalite belirsizliği ve standart eksikliği nedeniyle yaygın kullanımının sınırlı kaldığı, bu nedenle düşük riskli yapısal uygulamalar için daha fazla araştırma ve standart geliştirilmesine ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

İnşaat sektörü, çoğu ülke için ekonomik açıdan kritik öneme sahiptir. Araştırmalar, İYA kökenli geri dönüştürülmüş agreganın beton üretiminde kullanılabileceğini ve bu kullanımın çevresel açıdan iki yönlü avantaj sağladığını; ancak yüksek su emme kapasitesi ve düşük yoğunluk nedeniyle dayanımda bir miktar azalma meydana gelebileceğini göstermektedir. Buna karşılık, agregaların kalitesini artırmaya yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve bu yöntemlerin hem laboratuvar hem de gerçek ölçekli uygulamalarda kullanılabilir olduğu gösterilmiştir (Salgado ve Silva, 2022).

Thomas vd. (2013), İYA kökenli beton agregasının dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini, farklı su/çimento (s/ç) oranlarında üretilen numunelerde, agreganın gözenekli yapısı nedeniyle dayanıklılığın azaldığı; ancak düşük s/ç oranlarında bu farkın azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek s/ç oranlarında basınç dayanımındaki düşüşün daha belirgin olduğu, düşük oranlarda ise performans farkının sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir.

Guo vd. (2018), İYA'dan elde edilen agregaların dayanıklılığı üzerine yapılan araştırmaları kapsamlı biçimde incelemiştir. Çalışmada, literatürdeki sonuçların farklılıklarının genellikle geri dönüştürülmüş agregaların kalitesi, yapışık harç miktarı, orijinal betonun özellikleri ve s/ç oranındaki değişikliklerden kaynaklandığı belirtilmiştir. Araştırma, İYA'dan elde edilen agrega oranının ve s/ç oranının artmasının betonun dayanıklılığını olumsuz etkilediğini, özellikle geri dönüştürülmüş ince agregaların iri agregalara kıyasla daha olumsuz sonuçlar verdiğini incelemiştir. Buna karşılık, UK ve silis dumanı gibi puzolanik malzemelerin İYA'dan elde edilen agregaların yüzey kaplamasında veya beton karışımında kullanılmasıyla dayanıklılığın artırılabilirliği vurgulanmıştır. Ayrıca, CO₂ ile yapılan yüzey işlemlerinin, bu agregaların mikro yapısını geliştirerek betonun mekanik ve dayanıklılık performansını iyileştirebildiği tespit edilmiştir. Genel olarak çalışma, İYA'dan elde edilen agregaların uygun şekilde işlenmesi ve katkı malzemelerinin kullanılmasıyla birlikte sürdürülebilir ve dayanıklı beton üretiminin mümkün olabileceğini göstermektedir.

Pourghadri Sefidehkan (2017), farklı oranlarda İYA'dan elde edilen agregalar kullanılarak üretilen betonlar, kırmataş agrega (KA) ile karşılaştırılmıştır. İnce ve iri agregalar %0–100 oranlarında kullanılmış olup, ayrıca tüm karışımlarda çimentonun yerine %20 oranında UK kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, İYA'dan elde edilen agrega oranı arttıkça betonun

dayanım ve yoğunluk değerlerinin azaldığı, ancak çoğu karışımın hedeflenen C25 dayanımına ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca, %100 oranında İYA'dan elde edilen agrega kullanımının, KA içeren betona kıyasla dayanım açısından bir alt sınıfta yer aldığı tespit edilmiştir.

Çivioğlu (2020), İYA'dan elde edilen beton agregası kullanılarak kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üretimi ve özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, kalker esaslı KA, hacimce %0, 20, 40, 60, 80 ve 100 oranlarında beton agregası ile birlikte kullanılmıştır. Kullanılan agregalar, C25 ve C30 sınıfındaki atık betonlardan elde edilmiştir. Üretilen KYB numunelerinde taze beton kıvamı, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, basınç ve çekme dayanımı, klorür geçirimsizliği, elektriksel özdirenç ve su emme özellikleri test edilmiştir. Sonuçlar, İYA'dan elde edilen beton agregasının KYB üretiminde kullanılabilir olduğunu ve çevresel sürdürülebilirlik ile ekonomik açıdan katkılar sağlayabileceğini göstermiştir.

2.1.2. Tuğla

Tuğla, tarihte imal edilen ilk yapı malzemesi olup, kil, su ve ateşin birleşimiyle ortaya çıkmıştır. İlk yerleşim yerleri, tuğla üretimine uygun alüvyonlu topraklara sahip geniş nehir havzalarında kurulmuştur. Tuğla sanatının başlangıcı bu dönemlere rastlamakta ve Mezopotamya'daki Nil, Dicle ve Fırat nehirlerinin aşağı bölgelerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Bölgedeki kazılarda bulunan kalıplanmış kil tabletler, tuğla üretiminin erken çağlarda tapınaklar ve önemli yapıların inşasında kullanıldığını göstermektedir (Özçay, 2010). Ayrıca kırılmış tuğla agregaları, DA'ya kıyasla daha yüksek su emme kapasitesine sahip olup, bu durum beton karışım tasarımında ilave su gereksinimine yol açabilmektedir (Zhu vd., 2024).

Tuğla, Türkiye'de basit üretim süreçlerine sahip olması, düşük maliyeti ve yaygın tüketimi sayesinde önemli ve erişilebilir bir yapı malzemesidir. Türkiye'de tuğla sanayisi, geniş dağılıma sahip çok sayıda üretim tesisiyle gelişmiş bir sektör olarak değerlendirilmektedir. Ham maddeye kolay erişim sağlanan bölgelerde küçük yoğunlaşmalar halinde sektöre hizmet veren yaklaşık 500'den fazla tuğla fabrikası bulunmaktadır. Bu tesis sayısı dikkate alındığında, sektörün yıllık tuğla ve kiremit ham madde kullanımının yaklaşık 30 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca, üretim süreçlerinde oluşan atık miktarının %20–25 civarında olduğu ifade edilmektedir. (Bayraktar, 2018).

Bayer vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, kentsel dönüşüm sahalarından temin edilen harman tuğlası, delikli tuğla ve çatı kiremiti atıkları, laboratuvar tipi bilyalı öğütücüde optimum

iki saatlik süreyle öğütülerek geopolimerizasyon potansiyelleri incelenmiştir. Elde edilen numunelerin kimyasal analizleri sonucunda, her üç atık türünün de geopolimer reaksiyonu için kritik olan silis ve alümina açısından zengin olduğu ifade edilen kimyasal bileşim sonuçları Tablo 2’de birlikte verilmiştir. F sınıfı uçucu kül ile büyük benzerlik göstererek etkin bir bağlayıcı adayı olduğu tespit edilmiştir; ayrıca fiziksel özellikler açısından harman tuğlasının daha yumuşak yapısı nedeniyle öğütme işleminde diğer atıklara kıyasla daha yüksek inceliğe (tamamına yakını <100 µm) ulaştığı rapor edilmiştir.

Tablo 2. Farklı türdeki tuğla atıklarının kimyasal bileşimi

Malzeme	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Diğerleri
Delikli Tuğla	61,61	17,27	6,70	3,31	11,11
Harman Tuğlası	53,39	20,50	7,77	4,75	13,59
Çatı Kiremiti	54,02	15,98	8,93	7,42	13,65

Deraman vd. (2025), artan nüfus ve yapı sektöründeki büyüme, özellikle çevresel etkileri düşük olan yapı malzemelerine olan ihtiyacı artırmıştır. Geleneksel tuğlalar uzun yıllardır dayanıklı yapı malzemeleri olarak kullanılmasına rağmen, özellikle çimento esaslı tuğlalar PC olan bağımlılıkları nedeniyle önemli çevresel dezavantajlar taşımaktadır. PC üretiminin yıllık yaklaşık 1.35 milyar ton CO₂ emisyonuna neden olduğu ve bunun küresel sera gaz salımının yaklaşık %7’sini oluşturduğu belirtilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar, çevresel etkileri azaltmak için UK ve yüksek fırın cürufu (YFC) gibi endüstriyel yan ürünlerin değerlendirilmesine yönelmiş ve bu malzemelerin alkali aktivasyon yoluyla bağlayıcıya dönüştürüldüğü geopolimer teknolojisinin tuğla üretiminde güçlü bir alternatif oluşturabileceğini ortaya konmuştur. Geopolimer esaslı tuğlaların hem çimentoya kıyasla düşük karbon ayak izi , yeterli mekanik dayanım, kimyasal stabilite ve uzun ömürlü olması nedeniyle yapı malzemesi geliştirme çalışmalarında önemli bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır.

Alakara (2022), İYA’dan elde edilen atık tuğla tozu (TT) geopolimer harçlarda kullanılabilirliğini incelemiştir. Çalışmada, YFC esaslı geopolimer karışımlarda %10–50 arasında oranlarında TT kullanımıyla elde edilen harçların mekanik özellikleri

değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, TT kullanım oranı arttıkça basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerleri azalma eğilimi göstermiş, en olumlu sonuçlar %10 seviyesinde elde edilmiştir. Bununla birlikte, %20–50 TT içeren karışımların yapı uygulaması için yeterli düzeyde olduğu ifade edilmiştir. Atık tuğlaların bu şekilde değerlendirilmesinin çevre kirliliğini azaltarak sürdürülebilir malzeme kullanımını destekleyebileceğini vurgulanmıştır.

Luga vd. (2025), yıkım atıklarından elde edilen kırmızı tuğlaların, çimentoya alternatif olarak kullanımını incelemiştir. Deneysel ve sayısal analizlerle, farklı oranlarda öğütülmüş tuğla ve harç içeren 14 farklı karışım hazırlanmış ve test edilmiştir. Karışımların basınç ve eğilme dayanımı ile su emme özellikleri 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde değerlendirmiştir. Araştırmada, mekanik özellikleri tahmin edebilen istatistiksel bir öngörü modeli geliştirilmiş ve yüksek doğruluk katsayılarıyla modelin güvenilirliği desteklenmiştir. Sonuçlar, optimum çimento–atık oranlarının belirlenmesiyle malzeme dayanıklılığının artırılabilirliğini göstermektedir.

Tuğla atıklarının beton üretiminde alternatif malzeme olarak kullanımı sonucunda, geri dönüştürülmüş tuğlanın en uygun kullanım biçiminin TT olarak belirlenmiş ve %20'ye kadar çimento ikamesinin, TT'nin puzolanik reaktivitesi sayesinde betonun dayanımını ve dayanıklılığını artırabileceği ifade edilmiştir. (Wong vd., 2018).

Adamson vd. (2015), iri agrega olarak kırılmış tuğla kullanılan betonların dayanıklılığını incelemiştir. Çalışmada, iri agrega ile üretilen doğal betonlar ve kırılmış tuğla agregalı betonlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel bulgular, çelik donatı olmayan betonlarda tuğla kullanımının betonun dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Ancak, donatılı betonlarda kırılmış tuğla agregasının kullanımı önerilmemektedir, çünkü çelik donatının varlığıyla birlikte dayanıklılık performansı olumsuz etkilenmektedir.

Aliabdo vd. (2014), yıkılmış binalardan elde edilen killi KT'nin beton üretiminde kullanımını incelemiştir. Çalışmada, KT atıkları iri, ince agrega ve TT olarak sınıflandırılmış ve bunların harç, beton ve briketlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Sonuçlara göre, çimento hamuruna %25 oranında TT ilave edilmesi gözenekliliği azaltmış ve yüksek sıcaklık altındaki dayanım performansını iyileştirdiği görülmüştür. Geri dönüştürülmüş tuğla kullanımı betonun birim ağırlığını düşürmüş, ısı direncini artırmış ve Mısır standartlarına göre uygun dayanım değerini sağlamıştır. Çalışma, tuğla atıklarının çevresel açıdan sürdürülebilir ve ekonomik bir alternatif agrega kaynağı olabileceği vurgulanmıştır.

Bektaş (2014), kırılmış kırmızı kil tuğla agregalarının alkali-silika reaksiyonu (ASR) üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, farklı oranlarda (%10, %25, %50 ve %100) tuğla agregası içeren harç ve beton karışımları üretilmiş ve bu numuneler yüksek sıcaklık, nem ve alkali ortam koşullarında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tuğla agregası miktarındaki artışa bağlı olarak genleşme değerlerinin arttığını, ancak zararlı düzeyde bir genleşmenin oluşmadığını göstermiştir. NaOH ortamında gerçekleştirilen deneylerde belirli oranlarda genleşme artışı gözlenmiş; mikroyapı analizleri ise alkali-silika jeli ve ettringit oluşumunu doğrulamıştır. Çalışma sonucunda, kil tuğla agregalarının beton üretiminde belirli oranlarda kullanılabilir potansiyel gösterdiği ifade edilmiştir.

Binici vd. (2012), kırmızı TT ve pomza gibi mineral katkıların çimentolu sistemlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonuçları, uygun oranlarda kullanılan bu katkıların sülfat etkisine karşı direnci artırabildiğini ve mikro yapıyı iyileştirdiğini göstermiştir. SEM analizleri, katkıların çimento matrisinde daha yoğun ve düşük boşluklu bir yapı oluşumuna katkı sağladığını gözlemlemiştir.

Cachim (2009), DA yerine KT kullanılarak üretilen betonların mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada iki farklı tuğla türü kullanılmış ve bu agregalarla üretilen betonların basınç dayanımı, çekme dayanımı, yoğunluğu, işlenebilirliği, elastisite modülü ve gerilme-şekil değiştirme davranışı değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, %15 oranında tuğla agregası kullanımı betonun mühendislik özelliklerinde belirgin bir değişikliğe yol açmazken, %30 oranında ise yaklaşık %20'ye kadar dayanım kaybı gözlenmiştir. Ayrıca, tuğlanın üretim tipi ve özelliklerinin, betonun performansını doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Çalışma, KT agregalı betonların prefabrik elemanlar gibi yapısal olmayan uygulamalarda kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Debieb ve Kenai (2008), KT'nin iri ve ince agrega olarak betonda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada, doğal kum ve iri agregalar sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 oranlarında KT agregalarıyla değiştirilmiştir. Üretilen betonların basınç ve eğilme dayanımları, gözeneklilik, su emme, su geçirimsizliği ve rötre özellikleri 90 güne kadar incelenmiştir. Sonuçlar, iri agregalarda %25 ve ince agregalarda %50'ye kadar tuğla kullanımı durumunda betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini koruyabildiğini göstermiştir. Daha yüksek oranlarda ise belirli dayanım kayıpları gözlenmiştir.

2.1.3. Cam

Beton üretiminde ince agrega yerine kısmen atık cam kullanımının çevresel ve mekanik etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemenin sürdürülebilir bir alternatif olduğunu göstermektedir. Kırılmış atık camın %10, %15 ve %20 oranlarında kum yerine kullanılmasıyla hem dayanımda artış hem de ASR'de azalma sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, atık camın pozolanik özellik gösterdiğini ve betonun çevresel performansını iyileştirdiğini ortaya koymaktadır (Ismail ve Al-Hashmi, 2009).

Chen vd. (2002), çimento üretiminde atık cam kullanımına yönelik yenilikçi yaklaşımları incelemiştir. Çalışmada, laboratuvar ortamında analiz edilen 32 farklı cam türünün kimyasal bileşimlerinin renk veya kaynağa göre büyük farklılık göstermediği, esas farklılığın kullanım amacına bağlı olduğu belirlenmiştir. Hong Kong kaynaklı cam şişelerin ortalama %15 oranında sodyum oksit içerdiği ve bu oranın çimento üretim sürecine olumsuz bir etkisinin bulunmadığı ifade edilmiştir. Ayrıca, üretilen klinker ve çimento ürünlerinin kalitesinde de herhangi bir olumsuzluk tespit edilmemiştir. Bu sonuçlar, uygun oranlarda atık cam kullanımının çimento üretiminde çevre dostu ve uygulanabilir bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

Chen vd. (2006), Elektronik sınıf atık cam (E-cam) parçacıklarının çimentolu karışımlarda kullanımına bakmışlardır. E-cam, elektronik cam iplik atıklarının öğütülmesiyle elde edilmiş ve amorf yapıda olduğu belirlenmiştir. Uygun oranlarda kullanıldığında, E-cam betonun basınç dayanımını, sülfat ve klorür iyonuna karşı direncini belirgin şekilde artırabildiği gözlemlenmiştir. Özellikle %40 oranında E-cam içeren numunelerde, 28, 91 ve 365 gün sonunda dayanımın sırasıyla %17, %27 ve %43 oranında arttığı saptanmıştır. Ayrıca, camın parçacık boyutuna bağlı olarak hem bağlayıcı hem de dolgu malzemesi olarak işlev görebileceği, optimum oranının ise %40–50 aralığında olduğu ifade etmiştir. Bu bulgular, atık camın beton üretiminde sürdürülebilir ve performans artırıcı bir malzeme olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

Topçu ve Canbaz (2004) çalışmasında atık camın betonda agrega olarak değerlendirilmesine yönelik çalışmalar, çevresel kazanımlarına rağmen beton performansı üzerinde hem olumlu hem olumsuz etkilerin bulunduğunu göstermektedir. Atık cam kullanımı betonun birim ağırlığını düşürürken, çimento hamuru arasındaki zayıf aderans nedeniyle basınç, eğilme ve çekme dayanımlarında azalmalar ortaya çıkmaktadır; ayrıca kaba cam taneleri beton dayanımını olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte, camın UK ile kullanılması dayanım ve

dayanıklılık üzerinde olumlu etkiler oluşturabilmekte, ince öğütülmüş atık camda ise belirgin pozolanik özellik göstermektedir. Özgöl ağırlığının düşük olması beton birim ağırlığını azaltarak maliyet avantajı sağlayabilir ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir yaklaşım sunar; ancak cam oranındaki artışın beton dayanımında özellikle %49'a varan düşüşe yol açabileceğini belirtmektedir.

Corinaldesi vd. (2005), kırık şişelerden ve bina yıkım atıklarından elde edilen atık camın beton ve harçlarda ince agrega olarak yeniden kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada, camın silikası ve çimentodaki alkaliler arasında oluşabilecek ASR riskine dikkat çekilmiş, ancak camın 75 µm'nin altına kadar ince öğütülmesi durumunda bu zararlı reaksiyonun meydana gelmeyeceği belirlenmiştir. 100 µm'ye kadar olan parçacık boyutlarında genleşme gözlenmemiştir. Ayrıca ince CT'nin mikro yapısını iyileştirerek mekanik dayanımı artırdığı saptanmıştır. Sonuçlar, ince öğütülmüş atık camın, dayanıklılığı koruyarak ve çevresel fayda sağlayarak harç ve beton üretiminde kullanılabilir bir ince agrega alternatifi olabileceğini göstermektedir.

Park vd. (2004), atık cam agregalarının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, Kore'deki endüstriyel atıklardan elde edilen farklı renklerdeki kırılmış atık camlar beton üretiminde ince agrega olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, cam parçacıklarının köşeli dane yapısı nedeniyle betonun çökme ve kompaksiyon faktörü değerlerinin azaldığını, buna karşın hava içeriğinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, atık cam oranı arttıkça betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Çalışma, atık camın kontrollü oranlarda kullanılması durumunda beton üretiminde uygulanabilir bir alternatif agrega malzemesi olabileceğini ifade etmektedir.

Shayan ve Xu (2004), geri dönüştürülmeyen atık camların ince CT haline getirilerek beton üretiminde kullanılabilirliğini incelemiştir. İnce öğütülmüş camın, zararlı ASR'yi azalttığı ve pozolanik özellik göstererek çimentonun %30'una kadar kullanabileceğini belirlenmiştir. Ayrıca, dayanım gelişimi ve büzülmesi açısından da betonun performansının kabul edilebilir düzeyde olduğu saptanmıştır. Bu sonuçlar, CT'nin çevre dostu ve performansına katkı sağlayarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Shayan ve Xu (2006), CT'nin beton üretiminde pozolanik katkı malzemesi olarak saha koşullarındaki performansını incelemiştir. Soda-kireç bazlı atık ambalaj camlarından üretilen CT, 40 MPa betonlarda çimentonun %20–30'unun yerine kullanılmıştır. Sonuçlar, CT'nin dayanıklılığı artırdığını, klorür iyonu geçişini azalttığını ve donatı korozyonu riskini

düşürdüğünü göstermiştir. Bu bulgular, atık CT'nin çimentonun yerine kullanılabileceğini söylemektedir.

Topçu ve Canbaz (2008), atık camın ince agrega olarak kullanıldığı harçlarda ASR etkilerini ve bu etkinin UK ile lityum karbonat (Li_2CO_3) katkıları ile nasıl azaltılabileceğini araştırmıştır. Çalışmada, beyaz, yeşil ve kahverengi olmak üzere üç farklı renkte cam, dört farklı oranda harç karışımlarına eklenmiş ve ASR'ye karşı davranışları incelenmiştir. Sonuçlar, beyaz camın en yüksek genleşmeyi oluşturduğunu, cam oranı arttıkça genleşmenin de yükseldiğini göstermiştir. Buna karşın, %20 UK ve %2 Li_2CO_3 katkısı kullanıldığında genleşme değerlerinin kritik %0,2 sınırının altına düştüğü belirlenmiştir. Bu bulgular, kimyasal ve mineral katkıların ASR genleşmesini azaltabildiği ve atık camın uygun katkılarla birlikte ince agrega olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

2.2. İnşaat Yıkıntı Atıklarının Temel, Alt Temel İnşaatında Kullanımı

Alt temel ve temel tabakaları, kaplama tabakalarının altında yer alan ve üstyapının taşıyıcı sistemini oluşturan önemli yapı elemanlarıdır. Alt temel tabakası; kaplamadan gelen yükleri zemine iletmek, uygun drenaj koşullarını sağlamak, deformasyon ve aşınmalara karşı dayanım göstermek, ince daneli zeminlerin temel tabakasına karışmasını önlemek ve don etkilerini azaltmak gibi görevler üstlenmektedir. Bu işlevlerin tam olarak yerine getirilebilmesi için, tabakada kullanılan malzemelerin yüksek stabiliteye ve iyi drenaj kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle alt temel tabakalarında tercih edilen malzemelerin; yüksek stabiliteye sahip, uygun dane dağılımı gösteren, boşluklu bir granülometriye, yüksek içsel sürtünme açısına ve yüksek CBR değerine sahip malzemeler arasından seçilmesi önerilmektedir. Ayrıca, kullanılan agregaların düşük filler oranına, açısal ve pürüzlü yüzey özelliğine sahip olması; yassı, ince ve uzun taneler içermemesi ve don duyarlılığının düşük olması beklenmektedir. Alt temel ile granüler temel tabakası arasında gözle görülür bir fark bulunmamakla birlikte, alt temel tabakası genellikle daha kalın ve düşük maliyetli olarak inşa edilmektedir (Tunç, 2007).

Arslan vd. (2012), Türkiye'deki İYA'nın yönetimi, geri dönüşümü ve yeniden kullanım potansiyellerini incelemişlerdir. Söz konusu çalışmada, ülke genelindeki atık yönetim uygulamaları ile mevzuat yapısı analiz edilmiş; İYA'nın geri kazanım oranlarının düşük olmasına karşın önemli bir altyapı malzemesi potansiyeli sunduğu ifade edilmiştir. Geri dönüştürülmüş atıkların özellikle yol inşaatlarında temel ve alt temel tabakalarda

değerlendirilmesinin hem doğal kaynak kullanımını azaltacağı hem de atık depolama sorunlarını hafifleteceği belirtilmiştir. Ayrıca, Türkiye’de bu tür uygulamaların yaygınlaşabilmesi için teknik standartların, teşviklerin ve geri dönüşüm tesislerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Şen (2021) çalışmasında, Erzurum'daki harman tuğlası ve İYA'nın karayolu yapımında tekrar kullanılabilirliğini incelemiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) standartları esas alınarak yapılan değerlendirmeler, atıkların yol yapımında kullanılabilirliğini ifade etmiştir. Tuğla ve İYA'nın, KTŞ standartlarını sağlamak koşuluyla, karayolu dolgu tabakası için %100 oranında kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, alt temel ve plent-mix tabakalarında ise İYA'nın belirli oranlarda agrega ile karıştırılarak yeniden kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır. Yapılan fayda-maliyet analizleri, Erzurum'da ortaya çıkan İYA miktarının, 2018-2020 yılları arasında inşa edilen yollar potansiyel malzeme talebini karşılayabilecek düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. Geri dönüştürülmüş İYA'nın yol temellerinde kullanılması, büyük yol yapım maliyetlerinin önemli ölçüde düşmesine katkı sağlayacağını ifade edilmektedir.

Khan vd. (2024), geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkım atığı agregalarının yol yapımında temel ve alt temel tabakalarında kullanılabilirliğini değerlendiren kapsamlı bir derleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, yer alan laboratuvar ve saha verileri karşılaştırılmış; uygun dane dağılımı ve sıkıştırma koşullarında bu malzemelerin DA'ya benzer mühendislik özellikleri gösterebildiği belirlenmiştir. Ayrıca çimento veya UK katkısı ile stabilizasyonun performansı artırdığı, kullanımın çevresel etkilerini düşürdüğü ve maliyet avantajı sağladığı vurgulanmıştır. Bununla birlikte, uygulamanın yaygınlaşabilmesi için eksikliklerinin giderilmesi ve uzun dönem saha performansının araştırılması gerektiği ifade edilmiştir.

Mazhar vd. (2023), yıkılmış beton atıklarının yol yapımında alt temel malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, DA'nın %0–100 arasında geri dönüştürülmüş beton agregası ile yer değiştirdiği karışımlar laboratuvar ortamında test edilmiştir. Sonuçlar, %50 oranında İYA'dan elde edilen beton agregası içeren karışımın en uygun mühendislik performansını gösterebileceğine işaret etmektedir. Ayrıca, beton agregası kullanımıyla maliyetlerin azaldığı ve doğal kaynak tüketiminin önemli ölçüde düştüğü belirtilmiştir. Araştırmacılar, çevresel sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi açısından bu yaklaşımın etkili bir alternatif oluşturduğunu vurgulamışlardır.

Prajapati vd. (2022), inşaat ve yıkım atıklarının zemin iyileştirmesi ve yol alt temel uygulaması için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, zemin numuneleri %0, %25, %50 ve %75 oranlarında İYA ile karıştırılmış ve laboratuvar deneyleri (CBR ve sıkışma testleri) gerçekleştirilmiştir. Bulgular, %50 oranındaki İYA katkısının zeminin taşıma gücü ve dayanımını belirgin biçimde artırdığını gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, geri dönüştürülmüş atık malzemelerin yol alt temelinde zemin iyileştirici bir bileşen olarak kullanılmasıyla CBR değerinde yaklaşık %82,75 oranında bir artış sağlanabileceğine işaret etmektedir.

Nguyen vd. (2022), inşaat ve yıkım atıklarının yol tabanı ve alt temel malzemesi olarak kullanım potansiyelini incelemişlerdir. Çalışmada, Hanoi bölgesinden temin edilen geri dönüştürülmüş yıkıntı atıkları farklı tane boyutlarında işlenmiş ve çimento ile stabilize edilmiştir. Laboratuvar deneyleri sonucunda, çimento katkısının basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinde önemli artış sağladığı belirlenmiştir. Araştırmacılar, çimento ile stabilize edilmiş İYA karışımlarının yol temel ve alt temel tabakalarında DA'ya uygun bir alternatif oluşturabileceğini ve düşük trafikli veya kırsal yollarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Yadav vd. (2024), yol üstyapı tasarımında yalnızca yapısal performansın değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Araştırmada, İYA'dan elde edilen beton agregasının DA yerine sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanılmasının yanı sıra, çimento miktarının %10, %15 ve %20'sinin UK ve hidrate kireç karışımıyla değiştirilmesiyle elde edilen karışımlar incelenmiştir. Bulgulara göre, %100 İYA'dan elde edilen beton agregası içeren karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}), %100 DA içeren karışıma kıyasla daha düşük bulunmuştur. Bu durumun, agreganın yüzeyinde bulunan yapışık eski harç tabakasının meydana getirdiği gözenekli yapıdan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Genel olarak, laboratuvar deneyleri sonucunda yol alt temel tabakasında kullanılmak üzere en uygun karışım oranının %50 İYA'dan elde edilen beton agregası + %50 DA olduğu belirlenmiştir.

Karayolu mühendisliğinde İYA'dan elde edilen beton agregası, DA kaynaklarının azalması ve atık beton hacminin artması nedeniyle önemli bir alternatif malzeme haline gelmiştir. İYA'dan elde edilen beton agregası, özellikle temel ve alt temel tabakalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu agreganın söz konusu tabakalarda tercih edilmesinin başlıca nedenleri arasında artmış taşıma kapasitesi, yüksek açısallığı ve yeniden çimentolaşma özelliği yer

almaktadır. Bu özellikler sayesinde, İYA'dan elde edilen beton agregası sıkıştırma sonrası yüksek rijitlik ve düşük deformasyon davranışı sergilemektedir (FHWA, 2004).

İYA'nın tek başına yumuşak zeminlerdeki kaplama tasarımları için doğrudan uygun olmaması nedeniyle, stabilize edilmiş karışımların performansını değerlendirmek üzere serbest basınç dayanımı testlerini içeren laboratuvar çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalarda genellikle üç farklı sıkıştırma enerjisi (standart, orta ve modifiye) ile 90 güne kadar değişen kür süreleri tercih edilmiştir. Sonuçlar, İYA'nın (kum ve çakıl boyutundaki malzemelerin) zemine katılmasının, tüm sıkıştırma enerjilerinde basınç dayanımını artırdığını göstermiştir. Tekrarlı yüklemeler, numunelerin boşluk oranını azaltarak yoğunluğun artırdığını ve sonuç olarak, orta sıkıştırma enerjisinde ve ağırlıkça %40–60 arasında İYA içeren sıkıştırılmış karışımların, geleneksel toprak–çimento temel/alt temel tabakalarına kıyasla kaplama uygulamalarında potansiyel olarak kullanılabilir olduğu belirtilmiştir (Moreira vd., 2023).

Hidalgo vd. (2023), zemin–İYA karışımlarının işlenebilirliğinin İYA oranı arttıkça iyileştiğini, bunun da (γ_{kmax}) artışı ve optimum su muhtevsındaki (w_{opt}) azalma ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum sıkıştırma verimliliğini artırarak daha rijit ve dayanıklı tabakalar oluşmasını sağlamıştır. Ancak %30'un üzerindeki İYA oranlarında yoğunluk ve nemde belirgin bir değişim gözlenmediğinden, optimum oran %30 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, CBR ve dayanım modülü değerlerinin İYA oranı ile arttığı; özellikle %60 İYA içeriğinde dayanım modülünün, granüler alt temel malzemeleri için öngörülen değerlere yaklaştığı rapor edilmiştir.

Arulrajah vd. (2013), beş temel İYA'dan elde edilen beton agregası, kırmızı tuğla kırığı, asfalt kırığı, geri kazanılmış karışık agrega ve ince geri dönüştürülmüş camın geoteknik özelliklerini kapsamlı laboratuvar deneyleriyle değerlendirmişlerdir. Bulgular, İYA'dan elde edilen beton agregası ve asfaltın geleneksel taş ocağı granüler alt temel malzemeleriyle karşılaştırılabilir veya daha üstün performans sergilediğini; tuğla kırığının ise daha düşük hedef nem içeriğinde alt temel gereksinimlerini karşıladığını göstermektedir. Buna karşılık malzemelerin kaplama alt tabakalarında kullanılabilirliğinin, katkı maddeleriyle iyileştirilerek veya yüksek kaliteli agregalarla karıştırılarak artırılabilceği belirtilmektedir.

Turkane ve Chouksey (2022a; 2022b), yüksek plastisiteli zeminlerin UK bazlı geopolimerler ile stabilize edilerek mekanik özelliklerinin iyileştirilebildiğini belirtmişlerdir. Farklı UK oranları ve farklı alkalın aktivatör derişimleri altında yapılan deneylerde, stabilize edilmiş zeminlerin CBR değerlerinin yol üstyapısı için gerekli kabul kriterlerini sağladığı ve temel ile alt temel tabakası gereksinimlerini karşılayabildiği ifade edilmiştir. Ayrıca bu tür iyileştirilmiş

killerin yüksek hacimli yol uygulamalarında alt temel malzemesi olarak kullanılabileceği ve bunun kaplama kalınlığının azaltılmasına katkı sağlayabileceği ifade edilmiştir.

2.2.1. Kompaksiyon

Kompaksiyon, zemin içerisindeki hava boşluklarının azaltılarak daha yoğun, daha stabil ve daha dayanıklı bir yapı elde edilmesini sağlayan temel bir geoteknik işlemdir. Zemin yoğunluğundaki artış, zeminin mühendislik özelliklerini doğrudan etkilediğinden, kompaksiyon hem geoteknik tasarımın hem de karayolu üstyapı mühendisliğinin en kritik süreçlerinden biridir (Das ve Sobhan, 2014; Lambe ve Whitman, 1969).

Kompaksiyon, zemin taneleri arasındaki temas yüzeyini artırarak kayma dayanımının yükselmesini sağlamaktadır. Artan kuru birim hacim ağırlığı, zeminin daha yüksek yükleri güvenli şekilde taşıyabilmesine imkân tanımaktadır (Holtz vd., 2011). Yetersiz kompaksiyon durumunda alt temel ve temel tabakalarında taşıma kapasitesi düşmekte, oturmalar artmakta ve yapısal performans olumsuz yönde etkilenmektedir.

Proctor, 1930’lu yıllarda Los Angeles Su İdaresi bünyesinde yürütülen baraj çalışmaları sırasında kompaksiyon prensiplerini geliştirmiş ve bu prensipleri Engineering News-Record dergisinde yayımladığı makaleler ile literatüre kazandırmıştır (Saran, 2018). Kompaksiyon, mekanik enerji uygulanması yoluyla zemin yoğunluğunun artırılması işlemi olarak tanımlanmaktadır. R. R. Proctor tarafından geliştirilen standart laboratuvar kompaksiyon deneyi, literatürde “Proktor deneyi” olarak adlandırılmaktadır. Proctor, zeminin sıkışma davranışının; kuru birim hacim ağırlığı (γ_k), su içeriği (ω), uygulanan sıkıştırma enerjisi ve zemin tipine bağlı olduğunu ifade etmektedir (Holtz ve Kovacs, 2010).

Arruda vd. (2023) çalışmasında İYA’nın zeminle karıştırılarak dolgu yapılarında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Brezilya’daki üç geri dönüşüm tesisinden alınan İYA, lateritik zeminle %25 ile %50 oranlarında karıştırılmıştır. Kompaksiyon testleri sonucunda, karışımların γ_{kmax} değerlerinde belirgin bir değişim meydana gelmediği, w_{opt} değerinin ise yaklaşık %2 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu durum, İYA türüne bağlı olarak %10–20 oranında daha fazla su gereksinimi ortaya çıkabileceğine işaret etmekle birlikte, dolgu kalitesini olumsuz yönde etkilememiştir. Sonuç olarak, İYA’nın dolgu yapılarında ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilir bir malzeme olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

İYA'dan elde edilen agregalar, DA'ya göre daha gözenekli, daha yüksek su emmeye sahip ve daha düşük yoğunlukta olduğundan, kompaksiyon bu malzemelerin mühendislikte kullanılabilirliğini belirleyen en önemli aşamadır (Arulrajah vd., 2013; Arulrajah vd., 2016). Türkiye'de yapılan çalışmalarda da İYA kompaksiyon davranışının DA'ya göre farklılık gösterdiği, w_{opt} değerinin daha yüksek, γ_{maks} değerinin ise daha düşük gerçekleştiği rapor edilmiştir (Çolakoğlu vd., 2021).

Sonuç olarak kompaksiyon; taşıma gücü, oturma kontrolü, kayma dayanımı, permeabilite ve üstyapı performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Hem doğal zeminlerin iyileştirilmesi hem de geri dönüştürülmüş malzemelerin mühendislik uygulamalarına kazandırılması açısından kompaksiyonun doğru şekilde analiz edilmesi ve sahada uygulanması, geoteknik ve üstyapı tasarımlarında büyük önem arz etmektedir.

2.2.2. CBR

Sharma ve Sharma (2020) çalışmalarında, zayıf zeminlere belirli oranlarda İYA ilavesinin zeminlerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiler yarattığını, İYA ilavesinin γ_{maks} ile w_{opt} değerini azalttığını buna karşın, uygun miktarda İYA katkısı ile zeminlerin serbest basınç dayanımı, CBR ve geçirgenlik değerlerinde belirgin iyileşmeler meydana geldiği tespit edilmiştir. Özellikle %24 İYA oranında, doymun CBR değerinde %143'e varan artış gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Aboutalebi Esfahani (2020) yürüttüğü çalışmada, İYA'nın hem temel hem de alt temel tabakalarında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Ancak, temel tabakasının oldukça önemli olması ve önerilen İYA oranının düşük olması nedeniyle, temel tabakasının ağırlık olarak doğal malzemelerden inşa edilmesi tavsiye edilmektedir. Buna karşılık, İYA alt temel tabakasında güvenle kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Tahran'daki depolama sahasından alınan atıklardan fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilmiş ve alt temel tabakasında kullanılabilirliği incelenmiştir. Sonuçlar, CBR değerlerinin standartların üzerinde olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu malzemelerin alt temel tabakasında DA yerine alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmektedir (Mehrijardi vd., 2020).

Kalantar Hormozi vd. (2021), yürüttükleri çalışmada İran'ın Fooladshahr bölgesinden elde edilen geri dönüştürülmüş İYA'nın yol yapımında temel ve alt temel tabakalarında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. İYA ve DA üzerinde yapılan eleme, dayanıklılık, aşınma,

sıkıştırma ve CBR testleri sonucunda, atıkların geri dönüşüm ve boyutlandırma sonrası bazı mekanik özelliklerinin standartların altında kalması sebebiyle çimento stabilizasyonu uygulanmıştır. Karışıma %12 oranında çimento ilave edilmesiyle malzemelerin maksimum kuru yoğunluğu 1,83 g/cm³'ten 2,10 g/cm³'e, CBR değeri ise %65,8'den %88,6'ya yükselmiştir. Sonuçlar, uygun stabilizasyon yöntemleri ile İYA'nın DA'ya alternatif bir malzeme olarak yol tabakalarında uygun şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Zhu vd. (2024) tarafından yol tabanı ve alt temel tabakalarında geri dönüştürülmüş inşaat atıklarının kullanılabilirliğine yönelik yürütülen çalışmalar, özellikle karışık geri dönüştürülmüş agregalarda tuğla varlığının mühendislik performansı üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, tuğla agrega içeriğinin karışık geri dönüştürülmüş agregaların CBR değerlerini belirgin şekilde etkilediği ortaya konmuştur. Tuğla içeriği arttıkça CBR değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, belirli sınır oranlarına kadar tuğla agregasının yol alt temelinde performans açısından değerlendirilebileceğine işaret etmektedir. Ayrıca, tuğla agrega oranının %40'ın altında olması, karışık İYA'dan elde edilen agregaların hem gradasyonu hem de taşıma performansı üzerinde sınırlı etkiye sahiptir. Parçacık kırılma davranışına ilişkin olarak, 9,5–19 mm boyutundaki karışık agregaların sıkıştırma sırasında yüksek kırılma oranına sahip olduğu; tuğla oranı yükseldikçe kırılma değerinin arttığı ve bu artışın CBR performansı ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, karışık geri dönüştürülmüş agregalarda tuğla kullanımının sınırlandırılması önerilmekte ve literatürde %40–60 aralığındaki tuğla–beton karışım oranlarının yol alt temeli için uygun mühendislik performansı sunduğu belirtilmiştir.

Tran Viet vd. (2019), beton ve kil tuğla içeren İYA'nın geri dönüştürülerek yol alt temel malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Farklı beton–kil tuğla oranlarına sahip İYA'dan elde edilen agregaların CBR performansının karışım oranına bağlı olarak değiştiğini ve %100 kil tuğla hariç tüm karışımların teknik standartları karşıladığı tespit edilmiştir. Özellikle %50 geri dönüştürülmüş beton ve %50 geri dönüştürülmüş kil tuğlası karışımının en uygun alt taban malzemesi olduğu ifade edilmiştir. Bu bulgular, İYA'dan elde edilen agregaların sürdürülebilir yol yapımında uygun şekilde değerlendirebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, ince fraksiyon yalnızca fiziksel bir dolgu malzemesi değil, aynı zamanda geopolimerleşme reaksiyonlarına katılan reaktif bir fazdır. Alkali aktivasyon sonucu oluşan bağlayıcı jel yapılar, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirerek taşıma gücünü artırmaktadır (van Deventer vd., 2010). Bu nedenle ince dane içeriğinin artışı, hem fiziksel hem de kimyasal etkiler yoluyla CBR değerlerinin yükselmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

3. YÖNTEM

3.1. Malzeme

Bu çalışma kapsamında, Erzincan ili sınırları içerisinde bulunan ve yapı ömrünü tamamlamış bir kamu binasının yıkımından elde edilen beton agregaları, cam ve tuğla atıkları temin edilmiştir. Geopolimer bağlayıcı olarak kullanılmak üzere, yıkım sahasından getirilen tuğla, beton ve cam atıkları ayrıştırıldıktan sonra laboratuvar ortamında ufaltılıp ASTM C136 standardına uygun şekilde 200 numaralı elekten (0,075 mm) geçirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Beton agrega blok parçaları konkasör kırma eleme tesisinde 3 farklı sınıf halinde parçalara ayrılarak laboratuvara getirilmiştir. Söz konusu agregalar, ASTM C136 standardına uygun şekilde No. 3/4" (19 mm), No. 3/8" (9,5 mm), No. 4 (4,75 mm), No. 10 (2,0 mm), No. 40 (0,425 mm) ve No. 200 (0,075 mm) eleklerden geçirilerek farklı dane boyutlarında sınıflandırılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Elek seti

3.1.1. Geri dönüştürülmüş beton agregası

Bu araştırmada, dolgu yapımında kullanılmak üzere gerekli agrega malzemeleri, Erzincan ilinde bir kamu binasına ait yıkım sahasından elde edilen inşaat yıkıntı atıklarından sağlanmıştır (Şekil 6). Elde edilen agrega parçaları kamyon ile Erzincan Karayolları Şube Müdürlüğüne ait konkasör kırma eleme tesisinde iri orta ve ince yapıda olmak üzere üç sınıf halinde parçalara ayrıştırılıp laboratuvara getirilmiştir (Şekil 7-8). Tasarım kriterleri doğrultusunda, tüm

agregalar ASTM C136 standardına uygun şekilde No. 3/4 (19 mm) eleğinden geçecek şekilde elenmiştir. No. 3/8 (9,5 mm), No. 4 (4,75 mm), No. 10 (2,0 mm), No. 40 (0,425 mm) ve No. 200 (0,075 mm) eleklerin üzerinde kalan malzemeler dane boyutlarına göre sınıflandırılarak ayrı kaplarda muhafaza edilmiştir (Şekil 9).



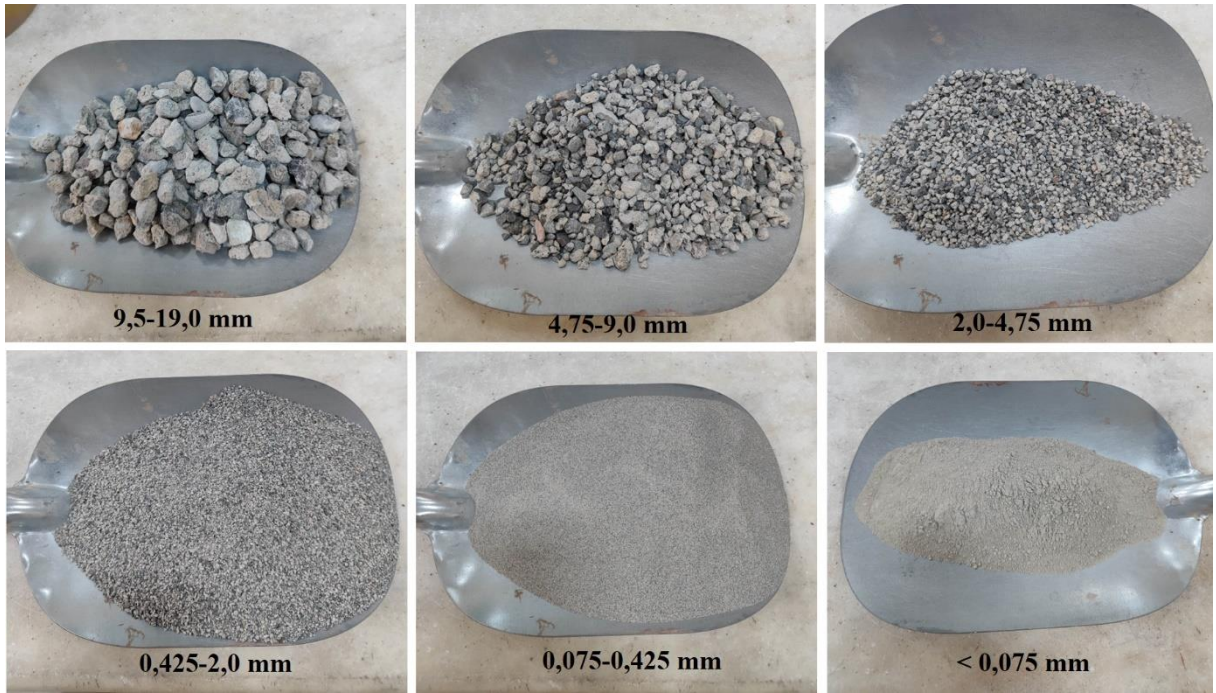
Şekil 6. Kamu binası ve yıkımdan elde edilen beton blokları



Şekil 7. Konkasör kırma tesisinde kırıcılar ile parçalanması



Şekil 8. Kırıcılar ile elde edilen agregalar



Şekil 9. Boyutlarına göre sınıflandırılmış agregalar

3.1.2. Atık beton tozu

Laboratuvara getirilen inceltilmiş agregalar, elek seti ve titreşimli elek sarsma cihazı yardımıyla No. 200 (0,075 mm) elekten geçirilmiş ve elek altında kalan kısım kullanılarak uygun dane boyutunda beton tozu (BT) elde edilmiştir (Şekil 10). Elde edilen BT, yüzdesel ağırlık olarak silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) içermektedir.

Titreşimli elek sarsma cihazı, katı partikülleri boyutlarına göre ayırmak amacıyla kullanılan bir laboratuvar cihazıdır. Bu cihaz, bir dizi elek üzerine yerleştirilen numuneye mekanik titreşim

uygulayarak küçük parçacıkların alt eleklerden geçmesini, daha büyük parçacıkların ise üst eleklerde kalmasını sağlamaktadır. Böylece malzemenin partikül boyutu dağılımı belirlenebilmektedir (Mahand Ceramic, 2025).



Şekil 10. Beton tozunun aşamaları

3.1.3. Atık cam tozu

Sahadan temin edilen atık cam parçaları çekiç yardımıyla küçültüldükten sonra, Los Angeles aşındırma cihazında çelik bilyeler kullanılarak belirli bir boyuta kadar ufaltılmıştır. Elde edilen cam parçaları 200 nolu (0,075 mm) elekten elenerek elek altında kalan cam tozu (CT) öğütülmüş ve ince dane boyutuna ulaştırılmıştır (Şekil 11). Los Angeles Aşındırma Cihazı, agregalar malzemelerinin mekanik dayanıklılığını belirlemek amacıyla kullanılan standart bir laboratuvar test ekipmanıdır. Bu cihaz, agregaların darbe ve aşınmaya karşı dirençlerini ölçerek, malzemenin yol kaplamaları, beton üretimi ve altyapı projelerinde kullanılabilirliğini değerlendirir (ASTM, 2016).

Cihaz, iç yüzeyi çelik plakalarla kaplanmış silindirik bir tamburdan oluşur. Tambur içerisine belirli miktarda agregalar numunesi ve farklı boyutlarda çelik bilyeler yerleştirilir. Tambur, 30–33 devir/dakika hızında, belirli sayıda (genellikle 500 veya 1000) dönüş yapar. Dönme

sırasında, agregalar ve çelik bilyeler birbirine çarpar; bu çarpışmalar sonucu agrega parçalanır ve aşınır (TS EN 1097-2, 2010).



Şekil 11. Cam tozunun aşamaları

3.1.4. Atık tuğla tozu

Alümino-silikat bakımından zengin olan tuğla tozu (TT), geopolimer üretimi için önemli potansiyel ham madde kaynakları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, bu atıkların kontrolsüz bir şekilde depolanması çeşitli çevresel sorunlara neden olmaktadır (Pathak vd., 2014).

Tuğla esaslı malzemeler çoğunlukla kil kökenli olup, üretim sürecinde uygulanan fırınlama sıcaklığına bağlı olarak farklı fiziksel ve mekanik özellikler gösterebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda pişirilmeleri nedeniyle bu malzemeler dayanıklı bir yapı kazanabilmektedir. Yapılan çalışmalar, bazı kırılmış tuğla agregalarının beton üretiminde kullanılabilecek yeterli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir (Khalaf ve DeVenny, 2004). Bununla birlikte, tuğla esaslı agregaların DA'ya kıyasla daha yüksek su emme oranına sahip olduğu ve bu durumun beton veya harç karışımlarında su/bağlayıcı oranı ile karışım tasarımının dikkatle ayarlanmasını gerektirdiği belirtilmektedir (Khalaf ve DeVenny, 2005).

Yıkım atıklarının geri kazanılarak yeniden kullanılması, sürdürülebilir malzeme yönetimi açısından önemli faydalar sağlamaktadır. Özellikle tuğla temelli yıkım atıklarının geri dönüştürülmesi, hem atık miktarının azaltılmasına hem de bertaraf alanlarına duyulan ihtiyacın düşürülmesine katkı sunmaktadır (Vegas vd., 2015). Kırılmış tuğla parçalarının yapı sektöründe agrega olarak değerlendirilmesi, DA tüketimini azaltarak çevresel etkilerin ve kaynak kullanımının azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca birçok ülkede, geri dönüştürülmüş tuğla agregalarının yol, beton ve temel uygulamalarında kullanılmasına yönelik standartların bulunduğu ve bu malzemelerin ilgili teknik şartnameler kapsamında kabul edildiği belirtilmektedir (Poon vd., 2002).

TT üretimi için atık ve hasarlı tuğla, kiremit, briket parçaları laboratuvara getirildikten sonra çekiç yardımı ile mekanik kırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra homojen hâle getirebilmek için diskli öğütücü yardımıyla belirli bir dane boyutuna ulaşana kadar inceltiştir. İnceltilen homojen tuğla parçaları 200 nolu (0,075 mm) elekten geçirilip altında kalan malzeme ile TT ince dane boyutuna indirgenmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Tuğla tozunun aşamaları

3.1.5. Alkali aktivatör çözeltisi

Bu çalışmada alkali aktivatör olarak NaOH tercih edilmiştir. “Mol”, Uluslararası Birimler Sistemi’nde (SI) madde miktarını ifade eden temel birim olup, bir mol madde $6,022 \times 10^{23}$ adet temel tanecik içermektedir. Bu tanecikler atom, molekül, iyon veya diğer kimyasal türlerden oluşabilmektedir (Petrucci vd., 2017). Çalışmada kullanılan “M” ifadesi ise molariteyi, yani bir litre çözeltide çözünen madde miktarını (mol/L) ifade eder. Buna göre 1 M NaOH çözeltisi, 1 litre çözeltide 1 mol NaOH bulunduğunu gösterir (International Union of Pure and Applied Chemistry [IUPAC], 2014). NaOH’un mol kütlesi, sodyum (Na), oksijen (O) ve hidrojen (H) atomlarının toplamından hesaplanır ve yaklaşık 40 g/mol’dür. Bu nedenle, 1 mol NaOH 40 gram kütleye karşılık gelmektedir. 1 litre çözeltide 1 mol NaOH bulunması durumunda, çözelti 1 molar olarak ifade edilir ve bu çözeltide 40 gram NaOH çözünmüş olur (Petrucci vd., 2017). NaOH kullanımının en önemli avantajlarından biri, çözünürlüğünün yüksek olması ve sistemde hızlı bir iyonik ortam oluşturabilmesidir. Bu durum reaksiyon kinetiğini hızlandırarak özellikle erken yaş dayanımlarının artmasına katkı sağlamaktadır (Sani vd., 2016). Ayrıca NaOH, Na_2SiO_3 gibi diğer aktivatörlere kıyasla daha basit bir kimyasal yapıya sahip olup, deneysel çalışmalarda molarite kontrolünün kolay yapılmasına olanak tanır. Bu durum, farklı alkalilik seviyelerinin sistem üzerindeki etkilerinin detaylıca incelenmesini mümkün kılmaktadır.

NaOH, alkali aktivatör sistemlerde yaygın olarak kullanılan temel bileşenlerden biridir ve erişilebilirliği nedeniyle geopolimer üretiminde sıkça tercih edilmektedir. Na_2SiO_3 gibi diğer aktivatörlerle birlikte kullanımı, bağlayıcı sistemin performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Davidovits, 2020). NaOH aynı zamanda geopolimer sistemlerde mikro yapı gelişimine de olumlu katkı sağlamaktadır. Yüksek alkalilik sayesinde Si–O–Si ve Si–O–Al bağlarının oluşumu teşvik edilmekte, bu da daha yoğun ve daha az boşluklu bir yapı oluşmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum, mekanik dayanımın ve durabilitenin artması ile sonuçlanmaktadır (Provis ve van Deventer, 2014).

NaOH sulu çözeltisi, yüksek alkaliniteye sahip güçlü bir baz olup geopolimer bağlayıcı sistemlerde yaygın olarak kullanılan bir alkali aktivatördür. Alkali aktivatör olarak kullanıldığında, katı pul veya boncuk formunda ve genellikle %98 saflıkta temin edilmekte, istenilen derişimde (molaritede, M) suda çözülerek hazırlanmaktadır (Davidovits, 2020; Ekmen ve Mermerdaş, 2018). Bu çalışmada kullanılan NaOH $\geq$ %98 saflıkta olup kimyasal bileşimi Tablo 3’te verilmiştir. Bu kapsamda NaOH çözeltileri 1 molar (1 M), 2 molar (2 M), 3 molar

(3 M) ve 4 molar (4 M) olarak hazırlanmıştır. Literatürde yüksek alkali derişimlerinin efloresans ve mikro çatlak oluşumuna neden olabileceğı belirtilmektedir (Sani vd., 2016). Bu nedenle, bu tez kapsamında NaOH molaritesi 1 M–4 M aralığında kullanılmıştır.

Tablo 3. Tekkim firmasına ait NaOH kimyasal bileşeni oranları

Bileşen	Kimyasal formül	Oran(%)
Sodyum Hidroksit	NaOH	$\geq \%98$
Sodyum Karbonat	Na_2CO_3	$\leq 0,5$
Sodyum Klorür	NaCl	$\leq 0,02$
Demir	Fe	$\leq 0,001$

Kullanılan bu NaOH kimyasalı TEKKİM firmasından tedarik edilmiştir. NaOH, kolay erişilebilirliği, yüksek kalite standardı ve ekonomik uygunluğu gibi nedenlerden dolayı tercih edilmiştir. NaOH'un suda çözünmesi oldukça ekzotermik bir süreçtir; çözelti içerisinde OH^- ve Na^+ iyonlarına ayrışır. Bu durum, ortamın pH seviyesini ve alkalitesini artırarak bağlayıcı malzemelerin yapısında bulunan Al ve Si minerallerinin çözünme derecesini artırmaktadır. Çalışmada bu aktivatör belirli molaritelerde (1 M, 2 M, 3 M, ve 4 M) hazırlanıp tasarım kriterine göre hassas terazide belirlenen suya ilave edilmiş ve ekzotermik reaksiyon nedeniyle deney öncesinde oda sıcaklığına gelene kadar soğutulmuştur. Şekil 13'te NaOH'un hassas terazide tartılması ve belirlenen su miktarlarıyla hazırlanması gösterilmiştir.



Şekil 13. Pul formundaki sodyum hidroksitin tartılması ve suya karışımı

3.2. Alt temel ve Temel Malzemenin Hazırlanması

3.2.1. Alt temel

Karayolları Teknik Şartnamesi 'ne (KTŞ) göre alt temel tabakası; belirtilen limitler dâhilinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin su ile karıştırılarak, yarma veya dolgu üstyapı tabanı üzerine serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabaka olarak tanımlanmaktadır. Bu tabakanın serim ve sıkıştırma işlemleri, projede öngörülen en kesit, plan ve profile uygun olarak birden fazla tabaka halinde gerçekleştirilmektedir. Alt temel malzemenin 0,075 mm eleğin geçen kısmı 0,425 mm eleğin geçen kısmından 2/3'ünden fazla olmayacak şekilde şart koşulmuştur (Karayolları Genel Müdürlüğü [KGM], 2023).

Alt temel, taban yüzeyi ile temel tabakası arasına yerleştirilen, sıkıştırılmış daneli veya uygun bağlayıcı malzeme ile stabilize edilmiş bir zemin tabakasıdır. Bu tabaka, taban zemininin taşıma gücünü aşabilecek düzeydeki gerilmeleri dağıtarak zeminin deformasyonunu önlemeli ve don etkilerinin üstyapıya yansımaları engelleyebilecek fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmalıdır (KGM, 2023).

Çalışma kapsamında alt temel tabakası numunesi hazırlarken TİP-A gradasyon limitleri dikkate alınmıştır. Alt temel tabakasında kullanılacak olan TİP-A ve TİP-B için belirlenen dane çapı dağılım limitlerinin alt ve üst sınır yüzde değerleri ve İYA'dan elde edilen agrega numenlerinin seçilen dane çapı dağılımı Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Alt temel tabakası gradasyonu için KTŞ'de belirtilen sınırlar ve seçilen değerler

Elek açıklığı		Tip-A	Tip-B	Seçilen
mm	inç	% geçen	% geçen	% geçen
19	3/4	70-100	45-80	100
9,5	3/10	45-80	30-70	60
4,75	No.4	30-75	25-55	45
2	No.10	-	15-40	30
0,425	No.40	10-25	10-20	15
0,075	No.200	0-12	0-12	2-12

Alt temel tabakasının sıkıştırılması tamamlandıktan sonra, temel tabakasının serilmesine geçilmeden önce belirlenen kesimlerde doğrulama testleri uygulanmalıdır. Bu testler sırasında alt temel malzemesinin sıkıştırma esnasındaki su içeriği, optimum su muhtevasının en fazla %4 altında ($w_{opt} - 4$) olacak şekilde kontrol edilmelidir. Testte kullanılacak ekipman ve araçların lastik basınçları ile taşıyacağı yük, standartlara uygun biçimde önceden belirlenip ayarlanmalıdır. Doğrulama testinde kullanılan araçlar 4–8 km/saat hız aralığında hareket etmeli ve bu hız, tabakadaki esneme, defleksiyon ve çökme gibi deformasyonların gözlemlenmesine olanak tanıyacak şekilde düzenlenmelidir. Testler birden fazla geçişle yapılmalı ve her geçişte lastik tekerleklerin farklı alanlara temas etmesi sağlanmalıdır. Test sonucunda stabil olmayan, çöken veya üniform özellik göstermeyen kesimlerde zemin incelemesi yapılmalı; bu alanlardan alınan numuneler laboratuvarında analiz edilerek problemin kaynağı belirlenmelidir. Zayıf veya çöken bölgeler kazılarak uygun granülometriye sahip alt temel ya da seçme malzeme ile yenilenmeli, yüzey düzgünlüğü sağlanarak tabaka iyileştirilmelidir (KGM, 2013).

3.2.2. Temel

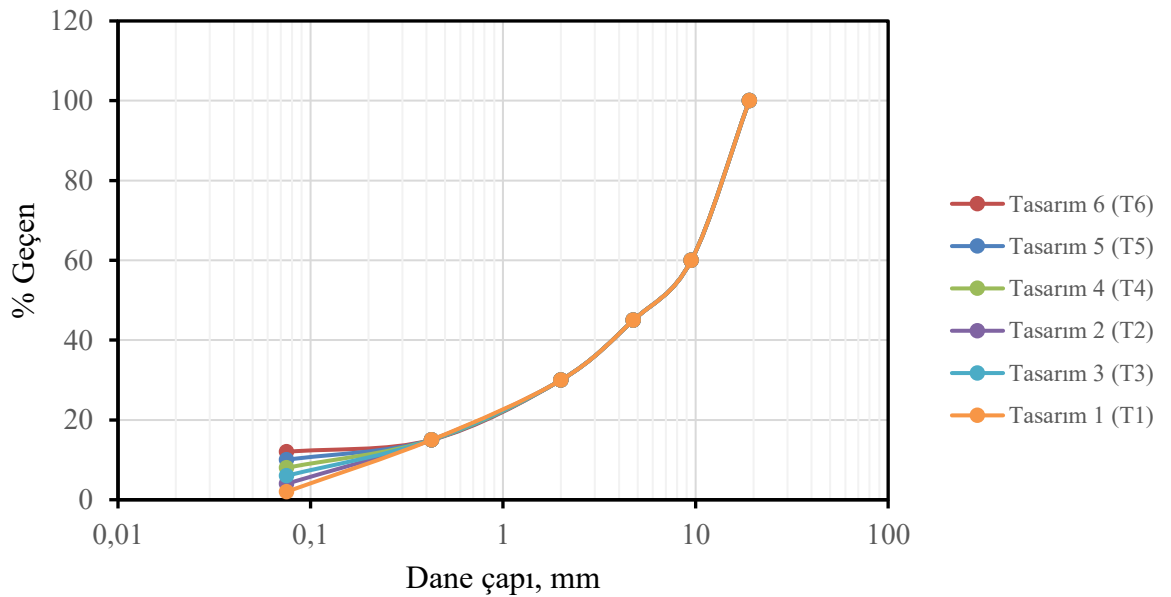
KTŞ (2023) uyarınca temel tabakası; alt temel tabakası veya taşıma gücü yeterli olan üstyapı tabanı üzerine inşa edilmektedir. Şartnamede; plent-miks temel, granüler temel, çimento bağlayıcılı granüler temel ve çelikhane cürufu temel olmak üzere dört farklı temel tipi tanımlanmıştır. KGM (2023) kriterlerine göre temel yapımında kullanılan kaba agregalar şu şekilde sınıflandırılmaktadır: Doğal halde bulunan düzensiz şekilli ve aşınmış malzemeler 'çakıl', kırma işlemi neticesinde istenen maksimum dane boyutunun en az 1,5 katı büyüklükteki kayaların parçalanmasıyla elde edilen malzemeler 'kırılmış çakıl', kum, kil ve silt karışımı içeren ve düşük trafikli yollarda kullanılabilen şartnameye uygun malzemeler 'teras çakılı', bazalt, granit, kuvarsit, kalker veya dolomit gibi kayaların kırılmasıyla üretilen agregalar 'kırmataş' ve havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun kırılmasıyla elde edilen yan ürünler ise 'kırılmış cüruf' olarak adlandırılmaktadır.

İnce agrega için temel yapımında kullanılacak malzemenin ince kısmı doğal veya kırılmış çakıl, cüruf, kırma kumu vb. malzemelerin karışım halinde kullanılmasıyla oluşturulur. 2 mm ile 0,075 mm eleğin arasında kalan taşların ayrışma ve bozuşmasından kalan malzeme doğal kum, 9,5 mm ile 2 mm arasında kalan çakıla ince çakıl, taş ocağında kırım esnasında elde edilen ince malzemeye taş tozu, havada soğutulmuş YFC'nin elenmesi ile elde edilen malzeme cüruf kumu olarak ifade edilmektedir. Sathi kaplamalı yapılacak il yollarında proje koşullarına bağlı olarak

granüler temel A,B,C tipi malzemelerden tercih edilebileceği belirtilmiştir. Granüler temel tabakasının Modifiye Proktor TS 1900-1 AASHTO T180'e göre minimum %98 sıkışma sağlaması gerektiği şart koşulmuştur (KGM, 2023). Çalışma kapsamında temel tabakası numunesi hazırlarken TİP-C gradasyon limitleri esas alınmıştır. Temel tabakasında kullanılacak malzeme için belirtilen dane çapı dağılımları ve İYA agrega numunesi için seçilen dane çapı dağılımı Tablo 5'te verilmiştir. KTŞ'ye uygun numunelerini hazırlamak için laboratuvara getirilen agrega numuneleri 3/4", 3/8", 4, 10, 40 ve 200 nolu elekler kullanılarak oluşturulan dane çapı dağılım eğrisi grafiği Şekil 14'te sunulmuştur.

Tablo 5. Temel tabakası gradasyonu için KTŞ'de belirtilen sınırlar ve seçilen değerler

Elek açıklığı		Tip-A	Tip-B	Tip-C	Seçilen
mm	inç	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen
19	3/4	45-80	60-92	75-100	100
9,5	3/10	30-70	40-75	50-85	60
4,75	No.4	25-55	30-60	35-65	45
2	No.10	15-40	20-45	25-50	30
0,425	No.40	8-20	10-25	12-30	15
0,075	No.200	2-8	0-12	0-12	2-12



Şekil 14. Dane çapı dağılımı eğrisi

3.3. Deney Yöntemi

Bu çalışmada, İYA'nın geopolimer bağlayıcı ile stabilize edilerek yol üstyapısında dolgu malzemesi olarak kullanım uygunluğu araştırılmıştır. Bu kapsamda, elek altı fraksiyonlarından elde edilen beton, cam ve tuğla tozları belirli oranlarda kullanılarak geopolimer bağlayıcı hazırlanmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH çözeltisi 1 M, 2 M, 3 M ve 4 M olmak üzere farklı molaritelerde hazırlanmıştır.

Hazırlanan geopolimer bağlayıcılar ile numuneler oluşturulmuş ve Modifiye Proktor deneyi uygulanarak w_{opt} ile γ_{maks} değerleri belirlenmiştir. Ardından, 7, 28 ve 91 günlük kür süreleri sonunda numunelerin taşıma gücü özellikleri CBR deneyi ile değerlendirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, aynı şartlarda NaOH kullanılmadan hazırlanan kontrol numuneleri üzerinde de Modifiye Proktor ve CBR deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca, geopolimer bağlayıcı kullanımının mikro yapı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla SEM analizleri gerçekleştirilmiş ve numunelerin yüzey morfolojisi, boşluk yapısı ve bağlayıcı faz oluşumu değerlendirilmiştir. Numunelerin kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla EDS analizleri yapılmış ve element dağılımları incelenmiştir.

3.3.1. Modifiye proktor deneyi

Tez kapsamında kullanılan malzemeler, ASTM C136 standardına uygun olarak farklı dane boyutlarına göre sınıflandırılmıştır. Bu doğrultuda tüm malzemelerin No. 3/4 eleğinden geçmesi sağlanmış ve No. 3/8 eleği üzerinde %40, No. 4 eleği üzerinde %15, No. 10 eleği üzerinde %15, No. 40 eleği üzerinde %15 ve No. 200 eleği üzerinde %3-%5-%7-%9-%11-%13 oranlarında malzeme olacak şekilde gradasyon oluşturulmuştur. No. 200 elek altındaki malzeme oranları ise %2-%4-%6-%8-%10-%12 olarak belirlenmiştir.

No. 200 elek altındaki ince fraksiyon için %60 TT, %20 BT ve %20 CT olacak şekilde karışım hazırlanmıştır. Bu karışım oranı, malzemelerin kimyasal bileşimlerine dayalı dengeli bir bağlayıcı sistemi oluşturma amacıyla belirlenmiştir. TT yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği nedeniyle ana alüminosilikat kaynağı olarak görev yaparken, CT amorf silika içeriği sayesinde sisteme ilave reaktif silika sağlamaktadır (İsmail ve Al-Hashmi, 2009). BT ise içerdiği CaO sayesinde matris yapısının yoğunlaşmasına ve daha kompakt bir mikro yapı gelişimine katkı

sağlayabilmektedir (Ye vd., 2022). Bu nedenle söz konusu karışım oranı, reaktiflik ve mekanik performans açısından dengeli bir sistem olarak tercih edilmiştir.

Hazırlanan bu gradasyonlara ait tasarımlar üzerinde, γ_{kmaks} ve w_{opt} belirlenmesi amacıyla Modifiye Proktor deneyi uygulanmıştır. Deneyler, malzemenin sıkışma özelliklerinin belirlenmesi ve farklı tasarımların davranışlarının karşılaştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hazırlanan numuneler üzerinde CBR deneyinde kullanılan sıkıştırma enerjisine uygun işlemler uygulanarak, sıkıştırma enerjisinin malzeme performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Modifiye Proktor deneyi, temel ve alt temel tabakalarında kullanılan granüler malzemelerin w_{opt} ile γ_{kmaks} belirlenmesi amacıyla uygulanmaktadır. Bu iki parametre, zeminlerin sıkışma özelliklerini ortaya koymakta ve özellikle yol dolguları, baraj gövdeleri ve temel altı dolgular gibi mühendislik yapılarında kullanılacak malzemelerin performansının değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Das ve Sobhan, 2014; KGM, 2013).

Modifiye Proktor deneyi, standart proktor deneyine göre daha yüksek sıkıştırma enerjisi uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Bunun nedeni, günümüzde kullanılan ağır inşaat ekipmanlarının oluşturduğu enerji seviyesinin klasik deneyde kullanılan enerjiden daha yüksek olmasıdır. Bu sayede modern mühendislik uygulamalarında karşılaşılan yüksek trafik yükleri ve büyük yapı temelleri gibi durumlar laboratuvar ortamında daha gerçekçi şekilde temsil edilmektedir (Head, 2006).

Deney, ASTM D1557 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, hazırlanan numuneler Modifiye Proktor kalıbında, her biri 56 vuruş olacak şekilde 5 tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Kullanılan kalıbın çapı 152 mm, yüksekliği 116 mm ve hacmi 2124 cm³ olup, tokmak ağırlığı 4,54 kg ve düşme yüksekliği 457 mm'dir.

Deneydeki tasarımların w_{opt} değerlerinin net olarak belirlenmesi amacıyla, her tasarımı için 5 farklı su içeriğine sahip numuneler hazırlanmıştır. Şekil 15'te belirlenen su miktarları, kuru karışıma yavaşça ilave edilmiş ve homojen bir dağılım elde edilene kadar iyice karıştırılmıştır. Karışım, suyun tüm danelere eşit şekilde nüfuz edebilmesi amacıyla 12 ila 24 saat boyunca nemli bir ortamda bekletildikten sonra Proktor cihazında sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıbın yaka kısmı çıkarılmış, numune yüzeyi tıraşlama bıçağıyla düzeltilerek tekrar tartılıp yaş numunenin kütlesi belirlenmiştir (Şekil 16).



Şekil 15. Numune hazırlanması ve Modifiye Proktor cihazı



Şekil 16. Numunenin tıraşlanması ve tartılması

Yaş numunenin kütlesi Modifiye Proktor kalıbının hacmine bölünmesi ile kuru birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır. Tartım sonucu Şekil 17’de farklı noktalardan alınan numuneler 2 ayrı kaba konulup tartılma işleminin ardından 24 saat 108 derecede etüve gönderilir. Etüvden çıkarılan numuneler tekrar tartılır ve kuru zemin ağırlığı ve su ağırlığı hesaplanır. Su ağırlığının kuru zemin ağırlığına bölünüp 100 ile çarpılmasıyla su muhtevası belirlenmiştir. Kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevaları belirlendikten sonra grafik eğrisi çizilerek belirlenen tasarımlar için γ_{kmaks} ve w_{opt} oranı belirlenmiştir.



Şekil 17. Örnek alınan numunenin tartılması ve etüve gönderilmesi

3.3.2. CBR deneyi

CBR (California Bearing Ratio) deneyi, karayolu ve havaalanı gibi taban, alt temel ve temel tabakalarında kullanılacak zemin veya granüler malzemelerin taşıma gücünü belirlemek amacıyla yapılan bir deney olarak ifade edilmektedir (KGM, 2013). Standart yöntem uygun olarak, hacmi 2300 cm^3 olan CBR kalıplarında deney gerçekleştirilmiştir. Bu deney, zeminin yük altında ne kadar direnç gösterebileceğini ölçerek, üstyapı tasarımında kullanılacak tabaka kalınlıklarının belirlenmesine önemli katkı sağlamaktadır. Deneyin temel amacı, belirli bir penetrasyon derinliğinde (2,5 mm ve 5,0 mm) zeminin veya dolgu malzemesinin gösterdiği direnç kuvvetini standart bir kırmataş malzemenin gösterdiği direnç ile karşılaştırmaktır (Çetin ve Erol, 2018). Bu karşılaştırmadan elde edilen oran, CBR yüzdesi olarak ifade edilir. CBR değeri ne kadar yüksekse, malzemenin taşıma gücü o kadar yüksektir. Bu nedenle yüksek CBR değeri, daha ince bir üstyapı kalınlığı ile yeterli performansı sağlayabileceği anlamına gelmektedir.

Deney, şu adımlarla gerçekleştirilir:

- Numune, laboratuvar koşullarında Modifiye Proktor ile sıkıştırılarak hazırlanır.
- Hazırlanan numune, belirli bir doygunluk (su emdirme) süresine tabi tutulur.
- CBR cihazında numunenin yüzeyine penetrasyon pistonu belirli bir hızla (1,27 mm/dk) batırılır.
- Penetrasyon derinliğine karşılık gelen yük ölçülümü yapılır ve CBR yüzdesi hesaplanır (KGM, 2013).

Şekil 18’de Modifiye Proktor cihazından çıkarılan numune için CBR kalıbının üst kısmına filtre kağıdı, yarıklı sürsaj ağırlığı ve ara yükleme diski yerleştirilmiştir. Bu elemanlardan filtre kâğıdı, su emdirme sürecinde İYA içerisindeki ince danelerin dışarı sızmasını veya delikli plakanın gözeneklerini tıkamasını önleyerek malzeme gradasyonunu korumak; ara yükleme diski ve yarıklı sürsaj ağırlıkları ise sahada tabakanın üzerine gelecek olan üstyapı yükünü yansıtarak numunenin kontrolsüz şişmesini sınırlandırmak ve penetrasyon esnasında zeminin sahadaki gibi sıkışıp davranmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 18. Ara yükleme diski, yarıklı sürsaj ağırlığı, filtre kağıdının kalıba yerleştirilmesi

Şekil 19’da Laboratuvarıda kullanılan ELE marka CBR cihazı, deneyin yükleme ve ölçme işlemlerini yarı otomatik olarak gerçekleştirmektedir. Hazırlanan numune yükleme çerçevesine yerleştirilmiş ve piston zemine temas edecek şekilde ayarlanmıştır. Cihazın motorlu ünitesi, pistonu dakikada 1,27 mm hızla zemine batırmaktadır. Her 0,25 mm’lik penetrasyon derinliğinde piston kuvveti yük hücresi veya kuvvet halkası yardımıyla okunmuş ve tabloya kaydedilmiştir. Daha sonra 2,5 mm ve 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen yükler belirlenmiş ve ölçülen yük değerlerinin standart yük değerlerine oranlanmasıyla CBR yüzdeleri hesaplanmıştır (ELE International, 2016).



Şekil 19. CBR deney cihazı

3.3.3. SEM analizi

SEM analizi, numunelerin mikro yapısını incelemek amacıyla kullanılan yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme tekniğidir. Bu çalışmada, seçilen numunelerin yüzey morfolojisi, boşluk yapısı ve bağlayıcı faz oluşumu değerlendirilmiştir. Özellikleri belirlemek amacıyla FEI Quanta 450 FEG cihazı kullanılmıştır. Cihaz, araştırma amaçlı mikro yapısal çalışmalarında yaygın olarak tercih edilen güçlü bir görüntüleme platformudur. Elde edilen görüntülerde numuneler uygun boyutlarda hazırlanarak cihaz içerisine yerleştirilmiş ve yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir. SEM deney cihazı şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 20. SEM deney cihazı

Quanta 450 FEG SEM üç farklı çalışma moduna sahiptir: High Vacuum (HV), Low Vacuum (LV) ve Environmental SEM (ESEM). HV modu kaplama yapılmış veya iletken numunelerde yüksek çözünürlüklü görüntüleme için kullanılırken, LV modu yalıtkan örneklerin yüzey kaplamasına ihtiyaç duyulmadan analiz edilmesine olanak tanımaktadır. ESEM modu ise su içeriği yüksek veya nemli numunelerin doğal yapısının korunarak görüntülenebilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece biyolojik ve hidratlı malzemelerde önemli avantaj sunmaktadır (FELMI-ZFE, 2023). Cihaz üzerinde SE (Secondary Electron), BSE (Backscattered Electron) ve ESEM moduna özel Gaseous SE (GSED) dedektörleri bulunmaktadır. Bu dedektörler, numunelerin yüzey katmanı, faz farklılıkları ve kompozisyon değişimleri gibi kritik parametrelerin ayrıntılı biçimde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (FEI Company, 2012).

Quanta 450 FEG cihazı, çalışma koşullarına bağlı olarak yaklaşık 1,2–2,0 nm çözünürlük düzeyi sunmakta ve 6x ile 1.000.000x arasında değişen geniş bir büyütme aralığına sahiptir (FEI Company, 2012). Bu teknik kapasite sayesinde metalik malzemeler, seramikler, polimerler, jeolojik örnekler ve kompozitler de dahil olmak üzere çok çeşitli malzeme gruplarında ayrıntılı mikro yapısal analizlere olanak sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında numunelerin morfolojik yapıları SEM analizi ile incelenmiştir. Analizlerde uygun dedektörler kullanılarak numunelerin mikro yapı özellikleri değerlendirilmiş, jel oluşumu, partiküller arası bağlanma durumu ve boşlukların dağılımı

incelenmiştir. Ayrıca, numunelerin kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri yapılmış ve başlıca elementlerin (Si, Al, Ca, Na vb.) dağılımı değerlendirilmiştir.

SEM ve EDS analizleri, ilgili laboratuvarın teknik personeli tarafından gerçekleştirilmiş olup, elde edilen görüntü ve analiz sonuçları bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Bu analizler sayesinde geopolimerleşme sürecinin mikro yapı ve kimyasal bileşim üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4. BULGULAR

Bu çalışma, inşaat yıkıntı atıklarından (İYA) elde edilen, Karayolları Teknik Şartnamesinde alt temel ve temel dolgu malzemesi için belirtilen gradasyonlara uygun hazırlanan numunelerin kompaksiyon davranışı ve CBR yüzdeleri belirlenmesine yönelik çalışmaları kapsamaktadır. CBR deneyleri, inşaat yıkıntı atığı (beton, tuğla ve cam) tozu ile oluşturulan geopolimer bağlayıcı ile stabilize edilmiş ve stabilize edilmemiş numuneler üzerinde yapılmıştır. Deneysel çalışma programı, %2 ila %12 arasında değişen farklı ince dane oranlarında ağırlıklı olarak CBR ve Modifiye Proktor deneylerini kapsamaktadır.

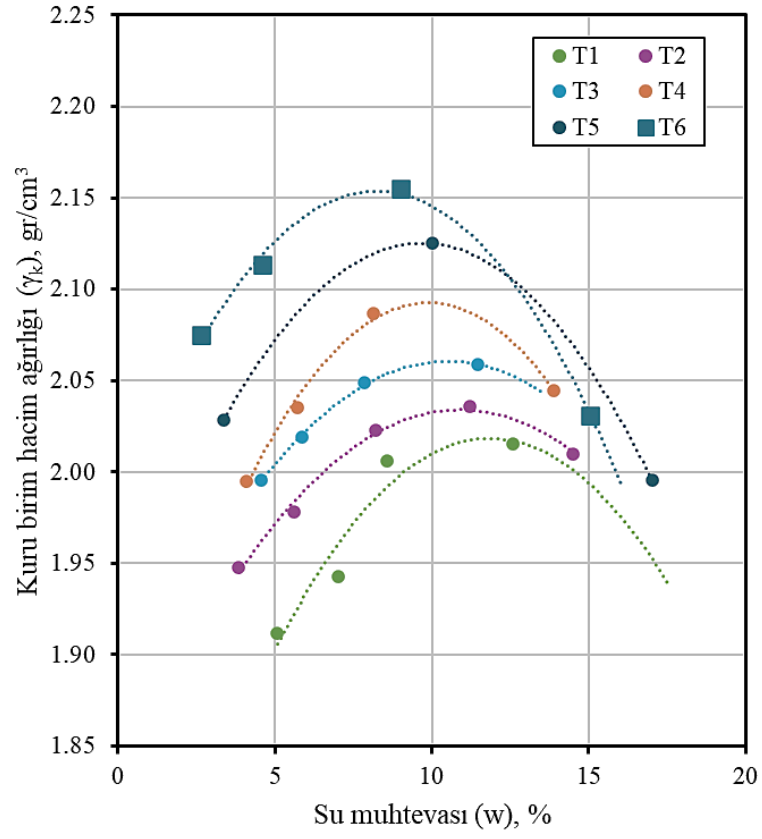
Deneysel çalışma, aşağıda belirtilen sistematik işlem adımları çerçevesinde uygulanmıştır:

- KTŞ alt temel ve temel dolgu malzemesi için belirtilen gradasyon limitlerine uygun olarak; ince dane içeriği %2 ila %12 arasında değişen altı farklı numune oluşturulmuştur.
- Hazırlanan numuneler üzerinde, kompaksiyon davranışlarının belirlenmesine yönelik Modifiye Proktor deneyleri yapılmıştır.
- Proktor deneyleri sonucunda belirlenen w_{opt} değerlerinde sıkıştırılan numuneler üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır.
- CBR deneyleri, geopolimer bağlayıcı olarak kullanılan inşaat yıkıntı atığı tozu (ince dane) miktarına (%2–12), numunelerin tabi tutulduğu kür süresine (7, 28 ve 91 gün) ve geopolimerizasyon sürecinde kullanılan NaOH aktivatörünün molaritesine (1M–4 M) bağlı olarak gerçekleştirilmiştir.
- Mikro yapısal analiz için, stabilize edilmemiş ve geopolimerle stabilize edilmiş numuneler üzerinde SEM analizleri yapılarak 28 gün boyunca kürlenmiş numuneler üzerinde karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. EDS analizi de stabilize edilmiş ve stabilize edilmemiş numunelerinin element bileşimlerini belirlemek ve faz değişimlerini incelemek için kullanılmıştır.

4.1. Tasarım Gradasyonlarının Modifiye Proktor Deney Sonuçları

KGM (2023) alt temel ve temel dolgu malzemesi şartnamesine uygun olarak hazırlanan altı farklı tasarım gradasyonu üzerinde Modifiye Proktor deneyleri yapılmıştır. Modifiye Proktor deneyleri ile her bir tasarım gradasyonunun w_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri belirlenmiştir. Şekil 21 ve Tablo 6’da görüldüğü üzere sırasıyla kompaksiyon eğrileri ve tasarım gradasyonlarına ait w_{opt} ile γ_{kmaks} değerleri verilmiştir. Buna göre; tasarım gradasyonlarının w_{opt} değerlerinin %8,5 ila

%12,0 arasında, γ_{kmax} değerlerinin ise 2,02 ila 2,16 g/cm³ arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 21. Tasarım gradasyonlarına ait proktor eğrileri

Tablo 6. Tasarım gradasyonlarının modifiye proktor deney sonuçları

Tasarım gradasyonu	Optimum su muhtevası, (w _{opt}) (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık, γ_{kmax} (g/cm ³)
T1	12,0	2,02
T2	11,2	2,03
T3	10,5	2,06
T4	10,0	2,09
T5	9,5	2,13
T6	8,5	2,16

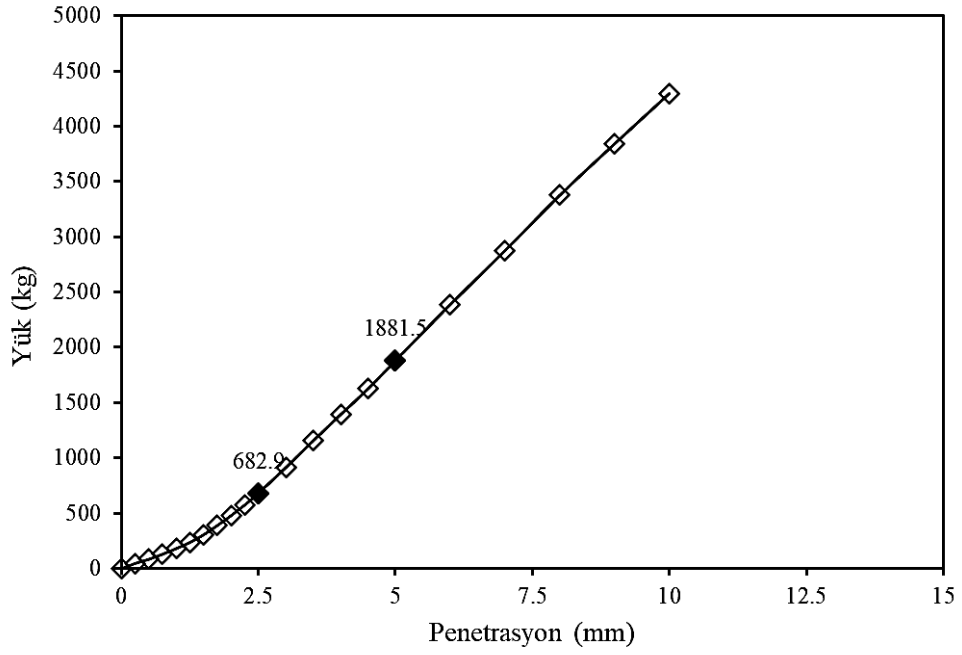
Tasarım gradasyonlarında ince dane oranının %2'den %12'ye artırılmasıyla birlikte $\gamma_{k_{maks}}$ 'da belirgin bir artış meydana gelmiştir. T1 karışımında $2,02 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenen $\gamma_{k_{maks}}$, T6 karışımında $2,16 \text{ g/cm}^3$ değerine ulaşmış ve yaklaşık %6,9 oranında artış göstermiştir. Buna karşılık w_{opt} %12'den %8,5'e düşerek yaklaşık %29 oranında azalmıştır. Bu durum, ince danelerin agrega boşluklarını doldurarak daha sıkı ve yoğun bir yapı oluşturduğunu doğrulamaktadır. Proktor eğrilerinden de görüleceği üzere $\gamma_{k_{maks}}$ değeri en yüksek olan T6 nolu tasarım gradasyonuna aittir. w_{opt} açısından incelendiğinde ise, karışımların ince dane oranı arttıkça w_{opt} değerinin azaldığı görülmektedir. Tüm tasarım gradasyonlarına ait Modifiye Proktor deney sonuçları ve eğrileri EK A' da verilmiştir.

4.2. CBR Deney Sonuçları

Tasarım gradasyonlarının taşıma gücü oranlarının belirlenmesi için Modifiye Proktor enerjisinde ve w_{opt} 'ta hazırlanan numuneler üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır. CBR deneyleri inşaat yıkıntı atığı bazlı geopolimerle stabilize edilmemiş numuneler, geopolimerle stabilize edilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Stabilize edilmemiş numunelerin ince dane oranlarına bağlı olarak sergiledikleri CBR performansları dikkate alınmıştır. Geopolimerle stabilize edilmiş numunelerde, 7, 28 ve 91 günlük kür sürelerinin ve 1–4 M arasında NaOH ile aktive edilerek geopolimerleşme yapılan numunelerin molaritelerinin CBR yüzdeleri üzerine etkisi incelenmiştir.

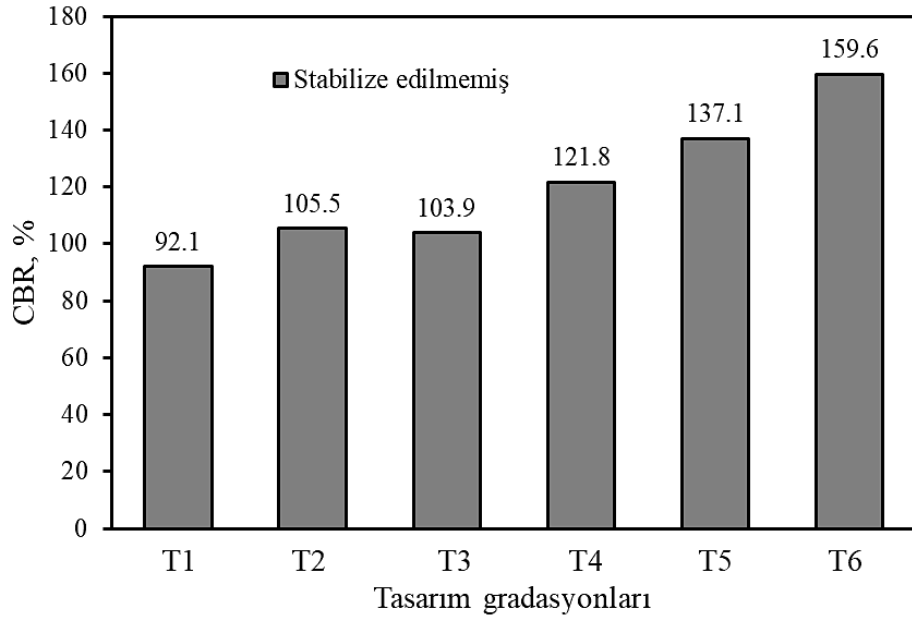
4.2.1. Stabilize edilmemiş tasarım gradasyonlarının CBR sonuçları

İnce dane oranları %2–%12 arasında değişen ve geopolimer ile stabilize edilmemiş tasarım gradasyonları üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır. Şekil 22'de T1 nolu tasarım gradasyonuna ait yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir. T1 nolu tasarım gradasyonu için 2,5 mm penetrasyon değerine gelen yük 682,9 kg iken 5,0 mm penetrasyon için elde edilen yük değeri 1881,5 kg olarak ölçülmüştür. CBR yüzdesi, 2,5 mm ve 5,0 mm penetrasyon için elde edilen yük değerlerinin standart malzemeden alınan yük değerlerine oranı olarak tanımlanır. Buna göre T1 tasarım gradasyonunun 2,5 mm penetrasyon için CBR yüzdesi %50,1 iken 5,0 mm penetrasyon için %92,1 olarak belirlenmiştir. Ayrıca tüm tasarım gradasyonlarına ait yük-penetrasyon eğrileri EK B'de sunulmuştur.



Şekil 22. T1 nolu tasarım gradasyonuna ait yük-penetrasyon eğrisi

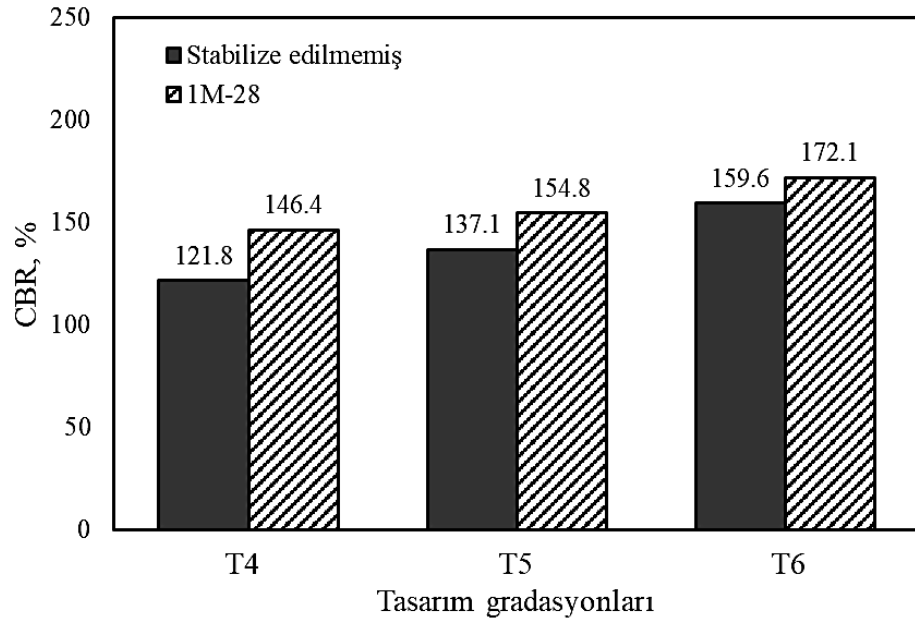
Tasarım gradasyonlarının ince dane oranının CBR değerleri üzerine etkisi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 23'te verilmiştir. En yüksek CBR değeri %159,6 ile T6 tasarım gradasyonunda elde edilmiştir. En düşük CBR değeri ise %92,1 ile T1 tasarım gradasyonunda elde edilmiştir. Ayrıca artan ince dane oranı ile tasarım gradasyonlarının CBR değerleri de artmıştır. İnce dane oranının artması, boşlukların doldurulmasını sağlayarak daha yoğun bir yapı oluşturmaktadır. Bu durum $\gamma_{k_{maks}}$ ile CBR değerlerini artırırken w_{opt} değerini azalttığını doğrulamaktadır (Das ve Sobhan, 2014).



Şekil 23. Tasarım gradasyonlarının CBR değerleri

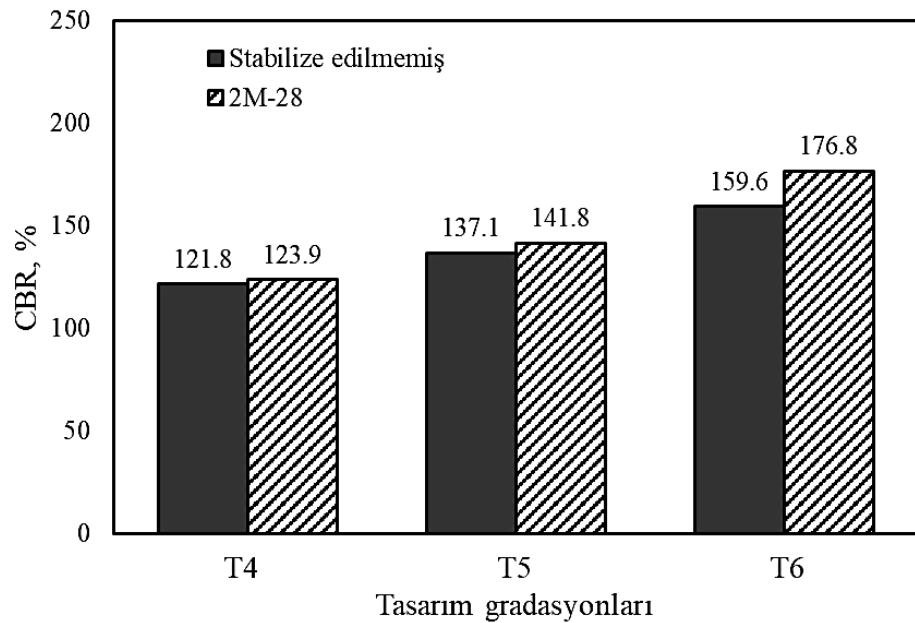
4.2.2. Aktivatör (NaOH) molaritesinin CBR değerleri üzerine etkisi

İnşaat yıkıntı atığı bazlı (beton, tuğla ve cam) ve NaOH ile aktifleştirilerek kullanılan geopolimer bağlayıcının tasarım gradasyonlarının CBR değerleri üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 24'te w_{opt} 1 molar NaOH çözeltisi kullanılarak Modifiye Proktor enerjisinde sıkıştırılan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri verilmiştir. Bu aşamada, geopolimerleşmenin etkisinin incelenmesi amacıyla tasarım gradasyonlarının stabilize edilmemiş CBR değerleri en yüksek üç tasarım (T4, T5 ve T6) seçilmiştir. Seçilen tasarım gradasyonları 1 M NaOH çözeltisi ve 28 günlük kür sürelerine tabii tutulmuştur. Şekil incelendiğinde; seçilen üç farklı tasarım gradasyonunda geopolimerle stabilize edilen numunelerin CBR performanslarında, kontrol numunelerine kıyasla ortalama %10 düzeyinde bir artış gözlenmiştir. Bu doğrultuda en yüksek mukavemet artışı, %121,8'den %146,4 seviyesine yükselen (yaklaşık %20 iyileşme) T4 tasarımında gerçekleşmiştir.



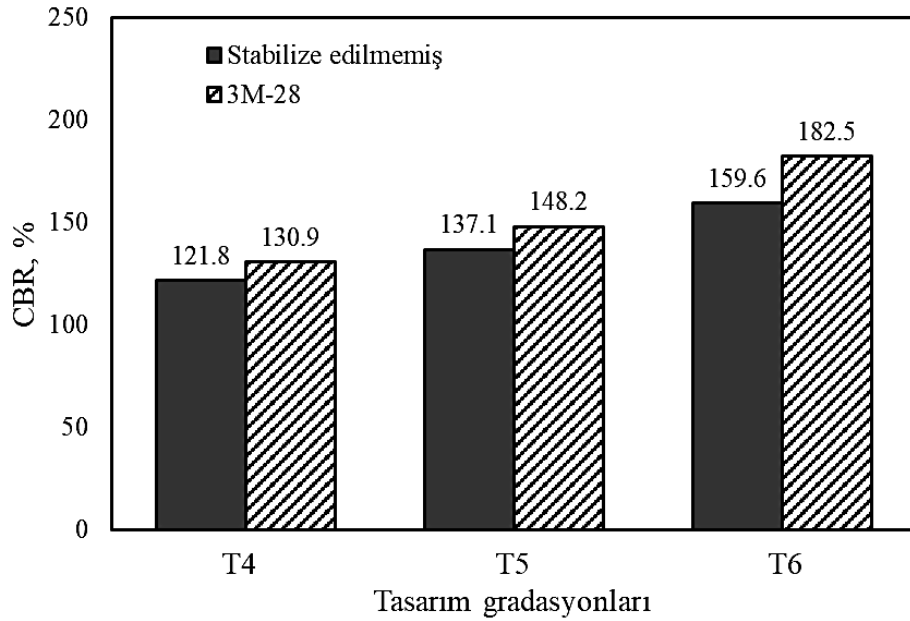
Şekil 24. 1 M NaOH çözeltisinde sıkıştırılan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri

Şekil 25’te tasarım gradasyonlarının, 2 molar NaOH çözeltisinde ve 28 günlük kür süresi sonunda CBR deney sonuçları verilmiştir. Buna göre, geopolimerle stabilize edilmiş numunelerin CBR değerleri stabilize edilmemiş numunelere göre daha yüksek olarak belirlenmiştir. T4 ve T5 tasarım gradasyonları için geopolimerin CBR değeri üzerine etkisi çok az iken T6 tasarım gradasyonunda ise yaklaşık %10’luk bir artış olduğu tespit edilmiştir.



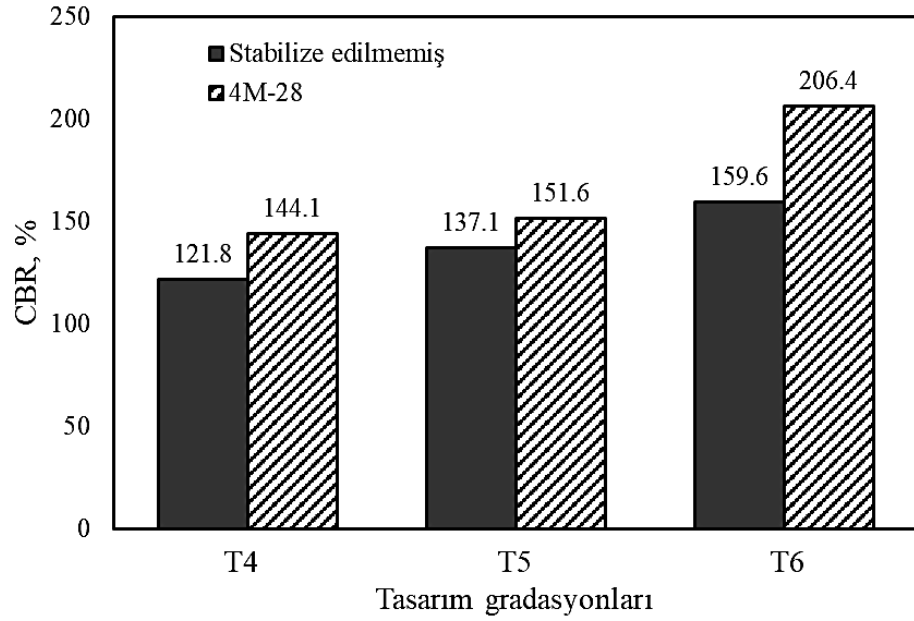
Şekil 25. 2 M NaOH çözeltisinde sıkıştırılan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri

Şekil 26’da tasarım gradasyonlarının, 3 molar NaOH çözeltisinde ve 28 günlük kür süresi sonunda elde edilen CBR deney sonuçları verilmiştir. Buna göre, geopolimerle stabilize edilmiş numunelerin CBR değerleri stabilize edilmemiş numunelere göre 1M ve 2M NaOH çözeltili numunelere benzer şekilde daha yüksek olarak belirlenmiştir. Ancak T4 ve T5 tasarım gradasyonları için CBR değerlerindeki iyileşme %7–8 civarlarında iken T6 tasarım gradasyonunda ise yaklaşık %15’lik bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir.



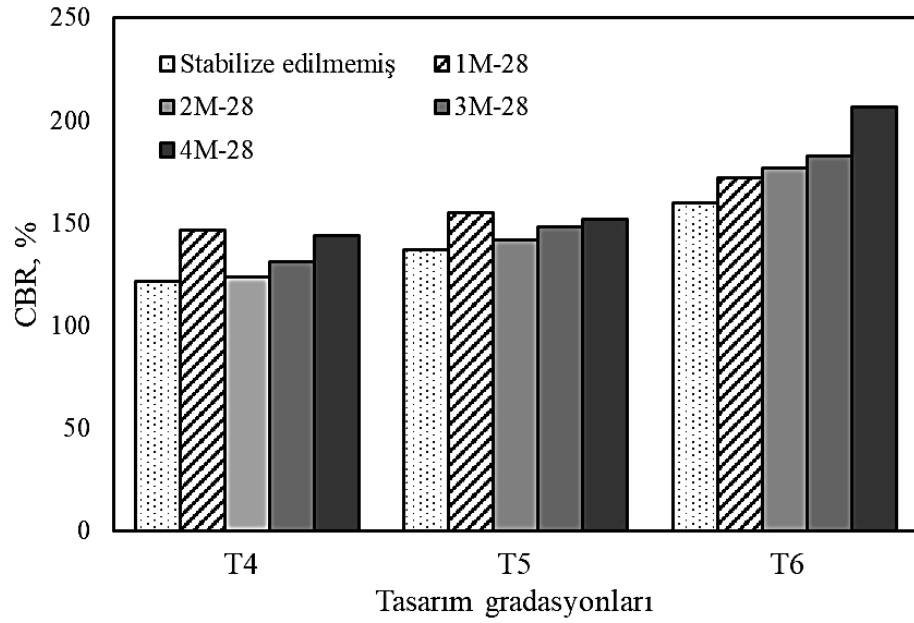
Şekil 26. 3 M NaOH çözeltisinde sıkıştırılan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri

Şekil 27’de tasarım gradasyonlarının, 4 molar NaOH çözeltisinde ve 28 günlük kür süresi sonunda elde edilen CBR deney sonuçları verilmiştir. Buna göre, tüm tasarım gradasyonlarında 4 M NaOH çözelti ile stabilize edilen numunelerin CBR değerlerinde belirgin bir iyileşme olduğu belirlenmiştir. T4 ve T5 tasarım gradasyonları için CBR değerlerinde meydana gelen iyileşme %10–15 civarlarında iken T6 tasarım gradasyonu için iyileşme oranı daha da belirginleşmiş %30 mertebelerine çıkmıştır.



Şekil 27. 4 M NaOH çözeltisinde sıkıştırılan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri

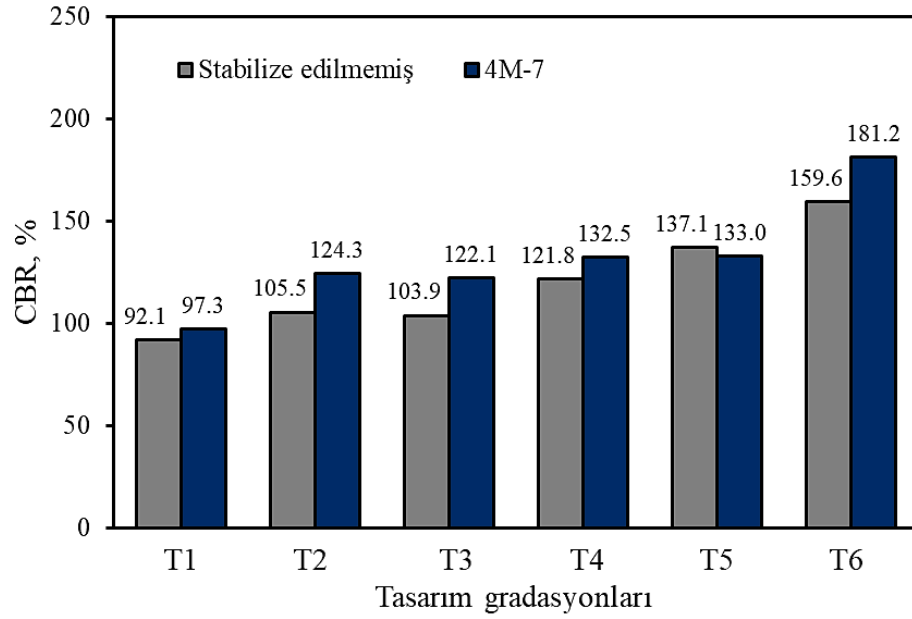
Tasarım gradasyonları üzerinde molaritenin (NaOH çözelti molaritesi) etkisinin belirlenmesi amacıyla CBR deney sonuçları Şekil 28’de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere özellikle T4 ve T5 tasarım gradasyonu için 1, 2 ve 3 molar NaOH çözeltisinde hazırlanan numunelerin CBR değerleri arasında anlamlı ve kayda değer bir fark görülmemektedir. Ancak 4 molar NaOH çözeltisi için ise CBR değerlerindeki iyileşmenin belirginleşmeye başladığı tespit edilmiştir. T6 tasarım gradasyonu için ise CBR değerlerindeki iyileşmenin NaOH çözeltisinin molaritesi arttıkça daha da gözlemlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak; artan alkali aktivatör molaritesine bağlı olarak T4 ve T5 tasarımlarının CBR değerlerinde kısmi bir artış eğilimi görülse de, bu gelişimin belirgin bir düzeyde gerçekleşmediği saptanmıştır. Ancak T6 tasarım gradasyonu için artan NaOH çözelti molaritesi ile CBR değerlerinin belirgin olarak iyileştiği belirlenmiştir. Bu durum T6 tasarım gradasyonunun sahip olduğu ince dane miktarının diğer tasarım gradasyonlarına göre daha fazla olması nedeni ile açıklanmaktadır. Artan ince dane oranının geopolimerleşmeye pozitif katkı sunduğu ve CBR değerlerinde iyileşme yarattığı açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 28. T4, T5 ve T6 tasarım gradasyonlarının NaOH molaritesine göre CBR değerlerindeki değişim

4.2.3. Kür süresinin stabilize edilmiş tasarım gradasyonlarının CBR değerleri üzerine etkisi

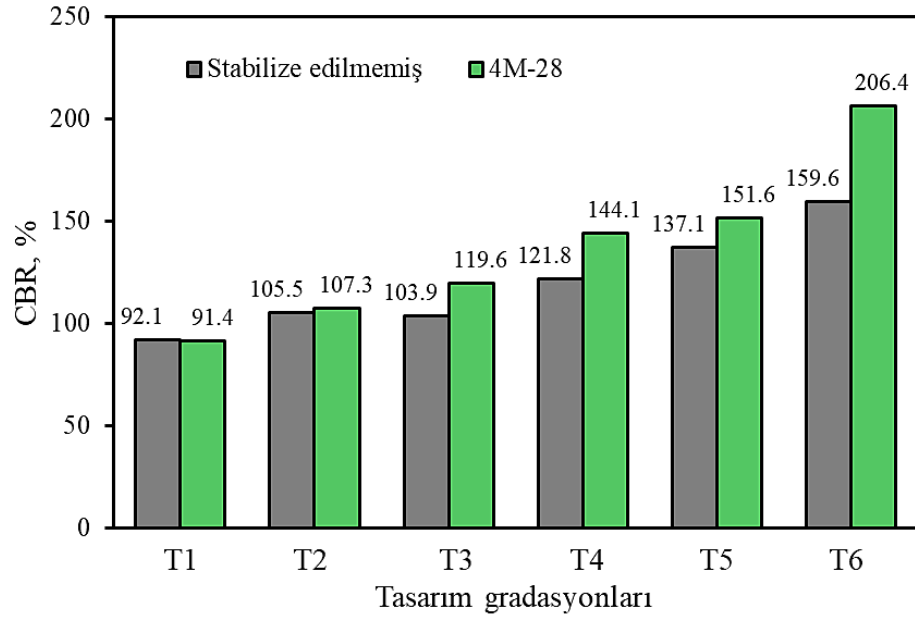
İnşaat yıkıntı atığı bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş tasarım gradasyonlarının CBR değerlerinin kür süresine bağlı değişimlerini incelemek amacıyla numuneler 7, 28 ve 91 günlük kür sürelerine tabi tutulmuştur. Tüm tasarım gradasyonları için artan ince dane oranları ile geopolimer ile stabilize edilmemiş numunelerin CBR değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kür süresinin etkisinin incelenmesi için sabit molaritede NaOH çözeltisi (4 molar) ile stabilize edilmiş tasarım gradasyonları üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır. 7 günlük kür süreleri sonunda CBR deneyine tabi tutulan tasarım gradasyonlarının CBR deney sonuçları Şekil 29’da verilmiştir. 7 günlük kür sürelerine maruz bırakılan numunelerin CBR değerlerine bakıldığında, artan ince dane oranına bağlı olarak CBR değerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak T5 tasarım gradasyonunun CBR değerinde çok az miktarda düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, T5 tasarım gradasyonunda geopolimerleşmenin gerçekleşmediği veya deney esnasında numune özelinde hatalar oluştuğu şeklinde açıklanabilir. T6 tasarım gradasyonunda, CBR değeri benzer şekilde artmış ancak diğer tasarım gradasyonlarına göre bu artışın daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 29. 7 günlük kür sürelerine tabi tutulan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri

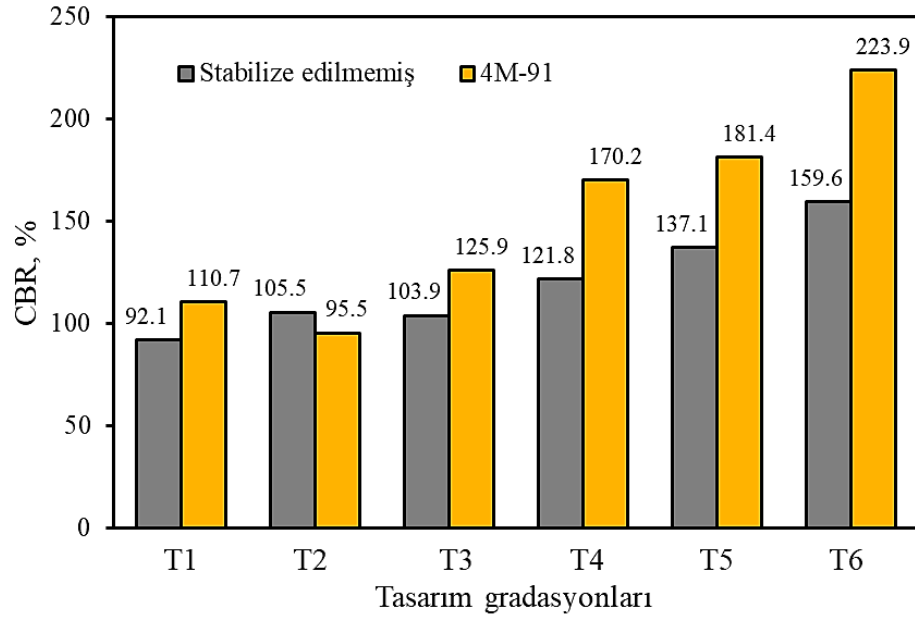
28 günlük kür süreleri sonunda CBR deneyine tabi tutulan tasarım gradasyonlarının CBR deney sonuçları Şekil 30’da verilmiştir. 28 günlük kür sürelerine maruz bırakılan numunelerin CBR değerlerine bakıldığında, 7 günlük kür sürelerine maruz bırakılan numunelerin CBR değerlerine benzer şekilde artan ince dane oranına bağlı olarak CBR değerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak T1 ve T2 tasarım gradasyonları için CBR değerlerinde belirgin bir iyileşme gözlemlenmezken, T6 tasarım gradasyonunda yaklaşık olarak %30 mertebelerinde bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Bu durum, geopolimer bağlayıcı sistemlerde kür süresinin dayanım gelişimi üzerindeki etkisi ile açıklanabilir. Kür süresi arttıkça alkali aktivasyon reaksiyonları ilerlemekte ve çözünmüş silika ile alümina türleri yeniden organize olarak bağlayıcı jel fazlarını oluşturmaktadır. Bu süreçte oluşan jel yapılar zamanla daha yoğun ve süreklilik gösteren bir matris haline gelmekte, böylece boşluk oranı azalmakta ve mikro yapı daha düşük gözenekliliğe sahip hale gelmektedir. Bu mikro yapısal gelişim, malzemenin taşıma gücü ve dayanım özelliklerinin artmasına neden olmaktadır (Provis ve van Deventer, 2014).



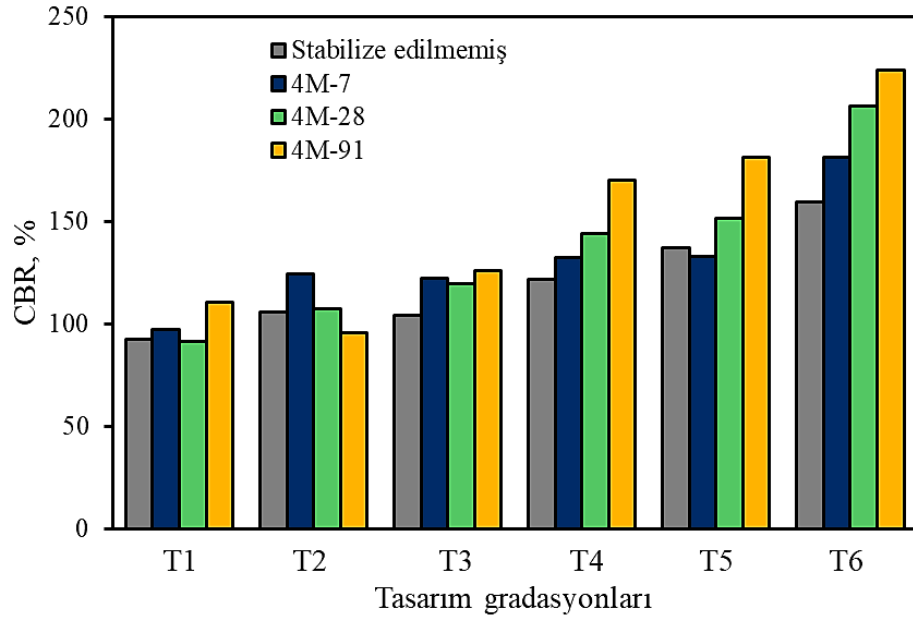
Şekil 30. 28 günlük kür sürelerine tabi tutulan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri

91 günlük kür süreleri sonunda CBR deneyine tabi tutulan tasarım gradasyonlarının CBR deney sonuçları Şekil 31’de verilmiştir. 91 günlük kür sürelerine maruz bırakılan numunelerin CBR değerlerine bakıldığında, 7 ve 28 günlük kür sürelerine maruz bırakılan numunelerin CBR değerlerine benzer şekilde artan ince dane oranına bağlı olarak CBR değerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak T2 tasarım gradasyonunda, CBR değerinde bir düşüş gözlemlenmiş olup bu durum ince dane oranına (%4) bağlı olarak geopolimerleşmenin gerçekleşmemesi sonucu iyileşme meydana gelememesi ile açıklanmaktadır. Ayrıca 91 günlük kür sürelerine maruz bırakılan T4, T5 ve T6 tasarım gradasyonlarının CBR değerlerinde yaklaşık olarak %40’lık bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 31. 91 günlük kür sürelerine tabi tutulan tasarım gradasyonlarının CBR değerleri

İnce dane oranının inşaat yıkıntı atığı bazlı geopolimerle stabilize edilmiş ve edilmemiş tasarım gradasyonlarının CBR değerleri üzerine etkisini karşılaştırmak için 7, 28 ve 91 günlük kür süreleri altında CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kür sürelerinin etkisi yukarıda da bahsedildiği gibi ayrı ayrı olarak detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve sonuçları Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31’de gösterilmiştir. Bütün tasarım gradasyonlarının kür süreleri altında artan ince dane oranına bağlı olarak (geopolimerle stabilize edilmiş ve edilmemiş numuneler) CBR değerleri Şekil 32’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde özellikle T4, T5 ve T6 tasarım gradasyonlarının CBR değerleri artan kür süreleri ile doğru orantılı belirgin bir şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 32. Tasarım gradasyonlarının 7, 28 ve 91 günlük kür süreleri altında CBR değerleri

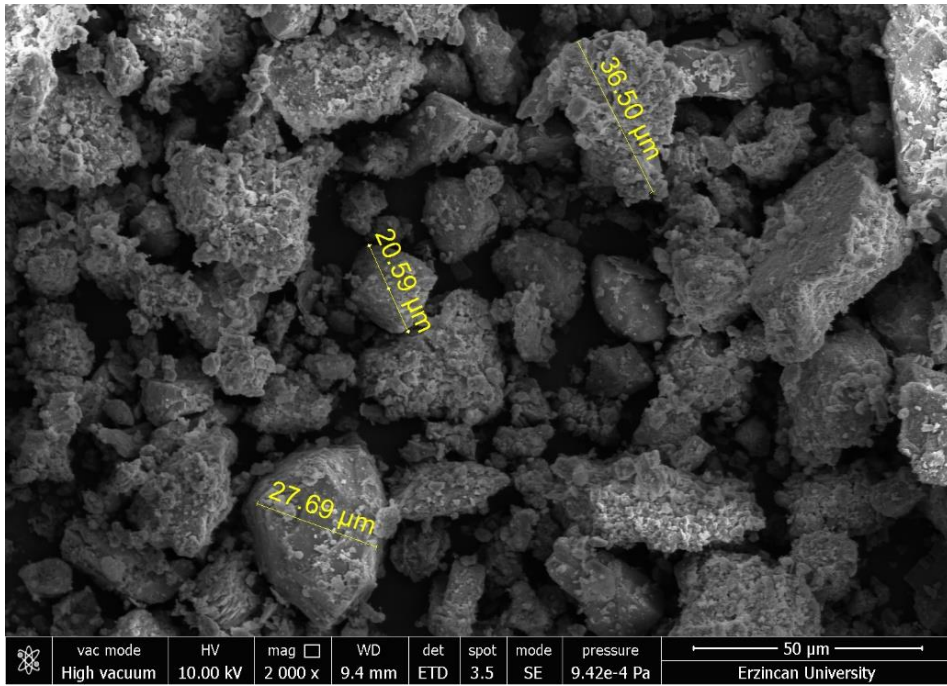
CBR sonuçlarında gözlenen dayanım değişimlerinin mikro yapısal nedenlerini inceleyebilmek amacıyla SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sayesinde alkali aktivasyon sonrası oluşan morfolojik değişimler ile taşıma kapasitesi arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

4.3. Mikroyapı İncelenmesi

İnşaat yıkıntı atığı bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş tasarım gradasyonlarının mikro yapıdaki değişimlerini ve geopolimerleşmeyi incelemek için tuğla, beton ve cam tozu ile 28 günlük kür sürelerine maruz bırakılan bazı numuneler üzerinde SEM (Scanning Electron Microscopy) analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tuğla, beton ve cam tozu ile stabilize edilmiş ve edilmemiş numuneler üzerinde mineral dağılımını incelemek için EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analizleri yapılmıştır. SEM ve EDS analizleri Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan aktivatör (NaOH) çözeltisinin molar derişiminin etkisini SEM analizlerinde incelemek için 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş ve 1–4 molar arasında değişen molaritelerde hazırlanan numuneler incelenmiştir.

4.3.1. SEM analizleri

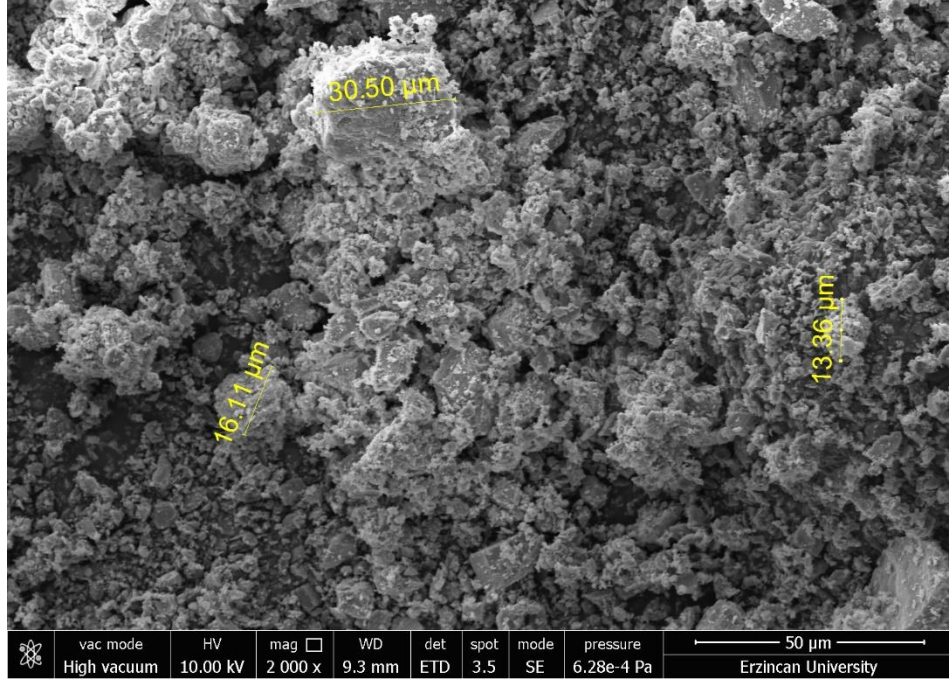
Tuğla, beton ve cam malzemelerine ait SEM görüntüleri, 5 kV altında yüksek vakum koşullarında çalışan taramalı elektron mikroskobu kullanılarak elde edilmiştir. SEM görüntülerinde, malzemelerin büyük kısmının 40 μm 'den daha ince dane boyutuna sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, İYA kökenli malzemelerin geopolimerizasyon için gerekli inceliğe sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 33'te öğütülmüş BT'ye ait SEM görüntüleri verilmiştir. Bu mikroyapı analizi, beton agregasından elde edilen tozun morfolojik özelliklerini ve dane yapısını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 33. Beton tozuna ait SEM görüntüsü

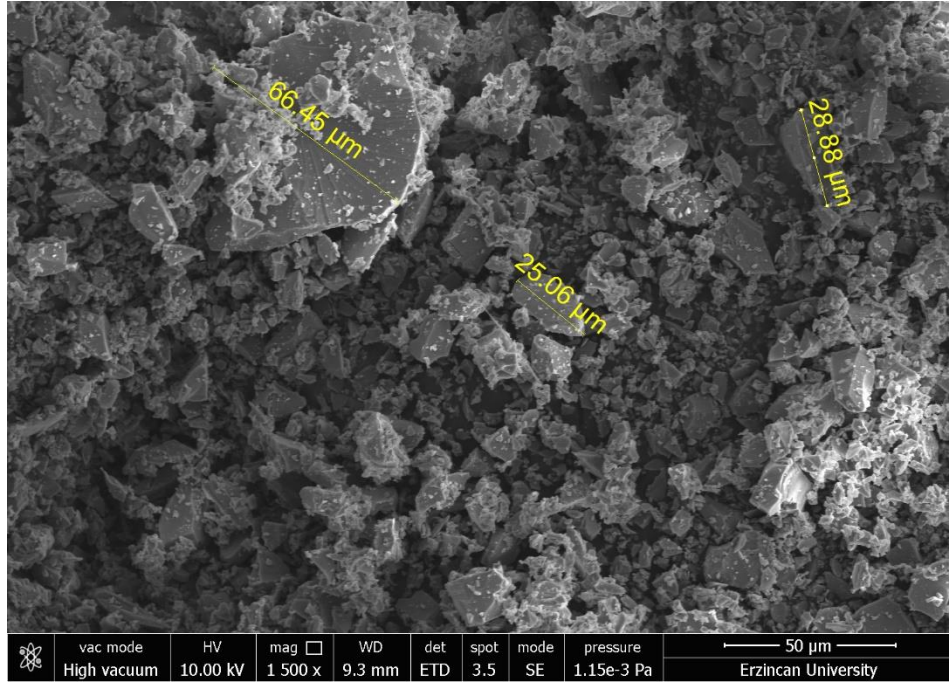
BT'nin SEM görüntülerinde ölçülen dane boyutlarının yaklaşık 20-37 μm aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu değerler, geopolimerizasyon reaksiyonları açısından uygun incelik aralığında olduğuna işaret etmektedir. Benzer şekilde Işık (2025), çalışmasında İYA tabanlı öncül malzemelerin büyük çoğunluğunun 40 μm 'den daha ince olduğunu ve bu inceliğin geopolimerizasyon açısından uygunluğunu ifade etmiştir. Literatürde de ince dane boyutuna sahip alüminosilikat esaslı malzemelerin daha yüksek özgül yüzey alanı sağlayarak alkali aktivasyon reaksiyonlarını hızlandırdığı ve geopolimerizasyon verimini artırdığı belirtilmektedir (Komnitsas vd., 2015; Wang, H. vd., 2021).

Şekil 34'te öğütülmüş TT'ye ait SEM görüntüleri verilmiştir. Yapılan dijital mikro-ölçümler, toz partiküllerinin genel olarak 13,36 μm , 16,11 μm ve 30,50 μm boyutlarında yoğunlaştığını ve bu değerlerin geopolimerleşme reaksiyonları için şartları sağladığı göstermektedir.



Şekil 34. Tuğla tozuna ait SEM görüntüsü

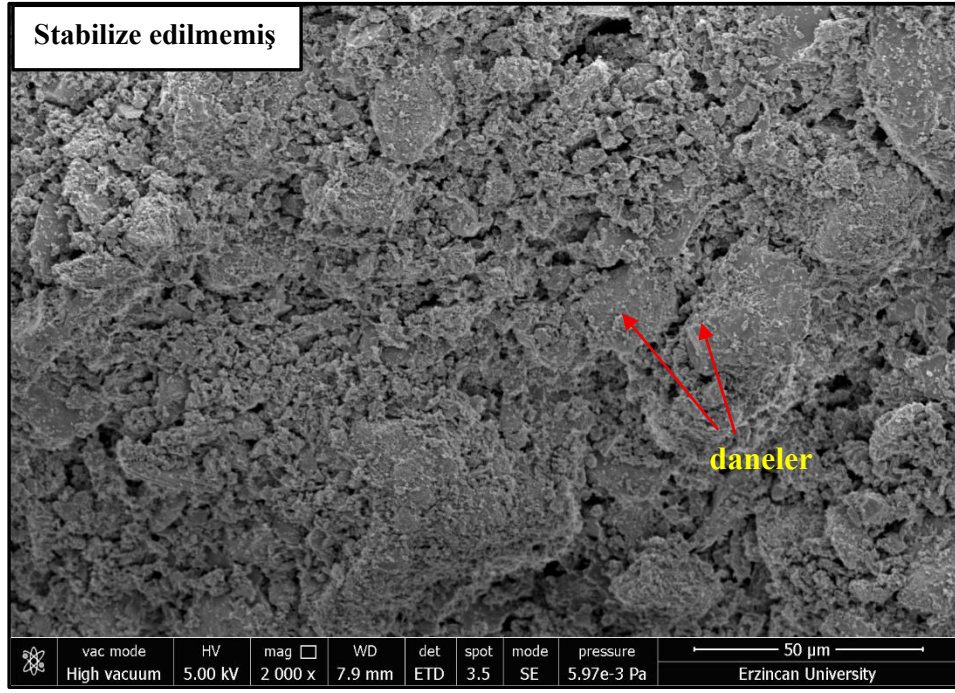
CT'ye ait mikroyapısal özellikler ve dane boyutu dağılımı Şekil 35'te gösterilmiştir. Yapılan dijital mikro-ölçümler, toz partiküllerinin 25,06 μm , 28,88 μm ve 66,45 μm boyutlarında olduğunu ve malzemenin genel olarak keskin kenar, amorf bir yapı sergilediğini göstermektedir. Ölçülen danelerin önemli bir kısmının 40 μm altındaki boyutlarda yoğunlaşması, malzemenin geopolimerleşme reaksiyonları için gerekli olan yüksek özgül yüzey alanına sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 35. Cam tozuna ait SEM görüntüsü

SEM görüntülerinde özellikle yüksek molariteli numunelerde daha düşük boşluk oranına sahip ve yoğun bir mikro yapı olduğu gözlenmiştir. Bu durum, geopolimerizasyon reaksiyonları sonucunda oluşan bağlayıcı jel yapılarının boşlukları azaltılmasıyla ilişkilendirilmektedir. Benzer şekilde, Komnitsas vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da alkali aktivasyon sonrası daha yoğun, düşük boşluk oranına sahip yapı olarak rapor edilmiştir. Wang, H. vd. (2021) ise uygun Si/Al ve Na/Al oranlarında oluşan sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H) tipi jellerin, matris yapısını daha sıkı paketlenmiş ve bütünleşmiş bir forma kavuşturduğunu belirtmişlerdir.

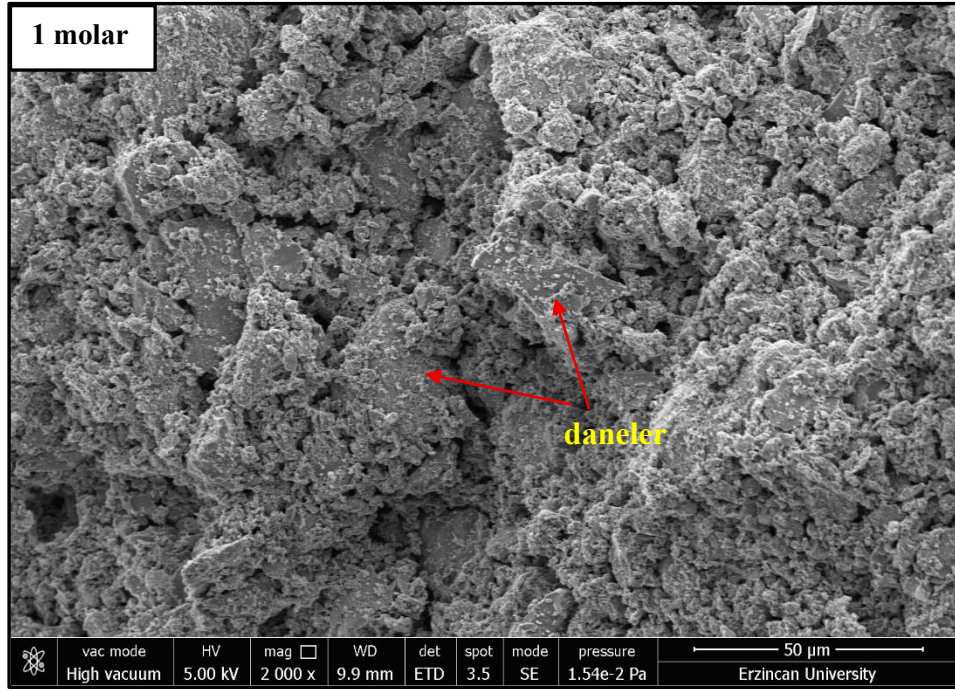
Geopolimer ile stabilize edilmemiş tasarım gradasyonlarının SEM görüntü analizlerine bakıldığında, daneler ayrık bir şekilde ve nispeten yüksek gözenekliliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 36). Bu nedenle, stabilize edilmemiş tasarım gradasyonlarının CBR değerleri daha düşük olarak tespit edilmiştir (Şekil 37, Şekil 38, Şekil 39 ve Şekil 40).



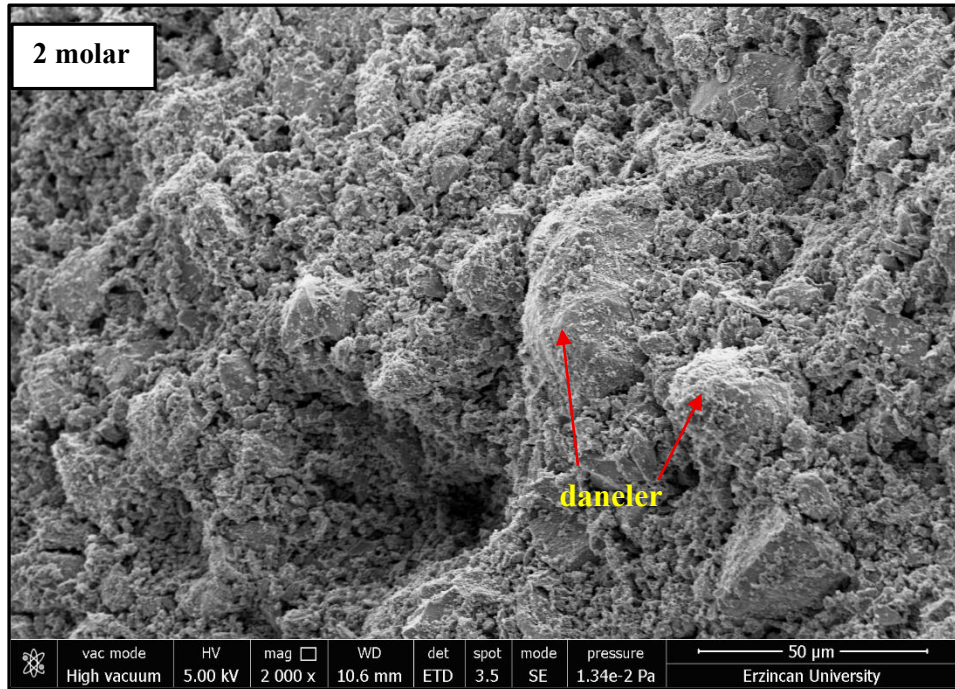
Şekil 36. Geopolimer ile stabilize edilmemiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü

Şekil 37’de, inşaat yıkıntı atığı bazlı geopolimerle stabilize edilmiş tasarım gradasyonlarının (özellikle 4 molar) mikro yapısının daha yoğun ve homojen olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) jellerinin inşaat yıkıntı atığı miktarına bağlı olarak doğru orantılı olarak geopolimerleşmenin kademeli olarak oluşmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Burada, geopolimer jelleri daneleri sararak ve birbirine bağlayarak daha yoğun bir yapı oluşturmaktadır.

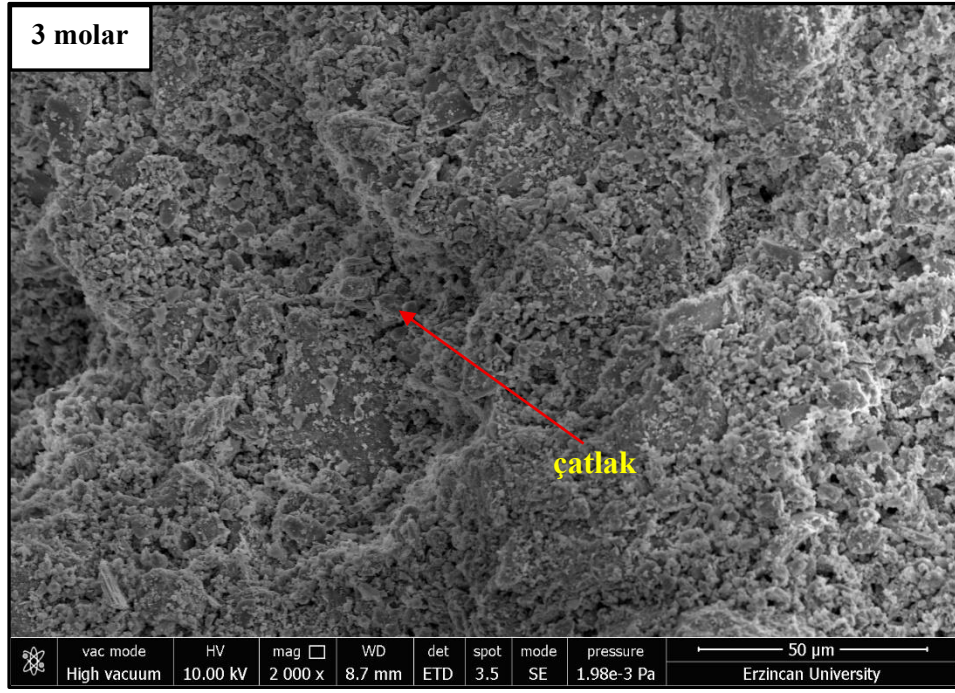
İlgili şekillerden (Şekil 37 ve Şekil 38) görüleceği üzere, 1 M ve 2 M NaOH ile hazırlanan numunelerde mikro boyutlu gözenekler hâlâ varlığını korumaktadır; ancak aktivatör derişimi (molaritesi) arttıkça, stabilize edilmiş İYA matrisindeki boşluk hacminde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu durum 4 M NaOH çözeltisi ile hazırlanan tasarım gradasyonlarında daha net görülmektedir. Ayrıca, 3 M (Şekil 39) ve 4 M (Şekil 40) NaOH çözeltisi ile hazırlanan numunelerde gözeneklerin nispeten daha az olduğu ve daha yoğun ve homojen bir yapı olduğu görülmektedir. SEM görüntülerinde, özellikle yüksek molariteli numunelerde daha düşük boşluk oranına sahip kompakt bir yapının geliştiği gözlenmiştir. Bu bulguları destekler nitelikte, Işık (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da İYA tabanlı geopolimer içeriğinin artmasıyla birlikte mikroyapıdaki gözenekliliğin azaldığı ve daha kararlı bir matrisin olduğu rapor edilmiştir.



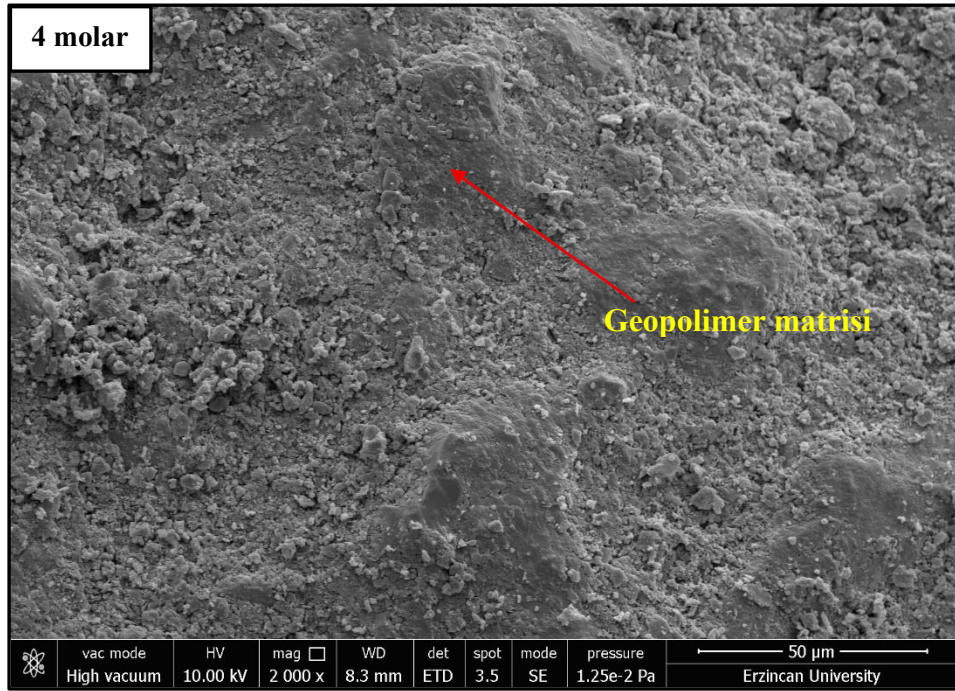
Şekil 37. 1 molar NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü



Şekil 38. 2 molar NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü



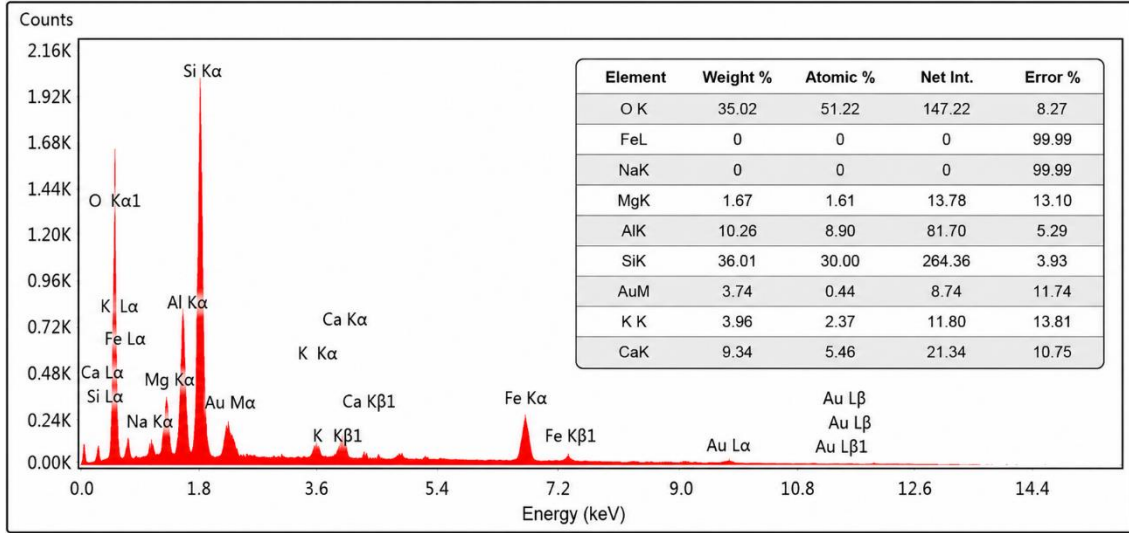
Şekil 39. 3 molar NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü



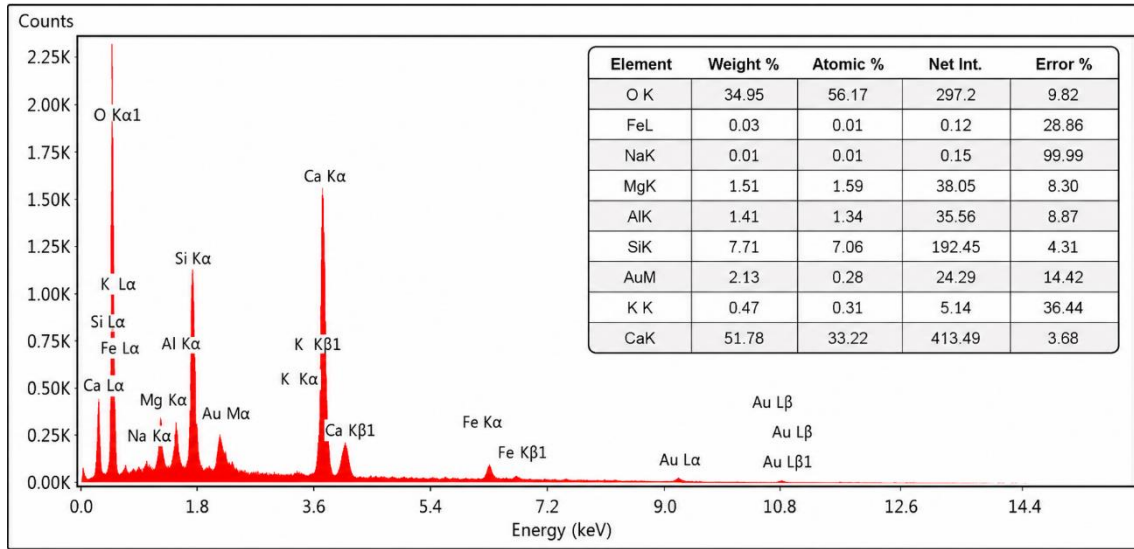
Şekil 40. 4 molar NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun SEM analiz görüntüsü

4.3.2. EDS analizleri

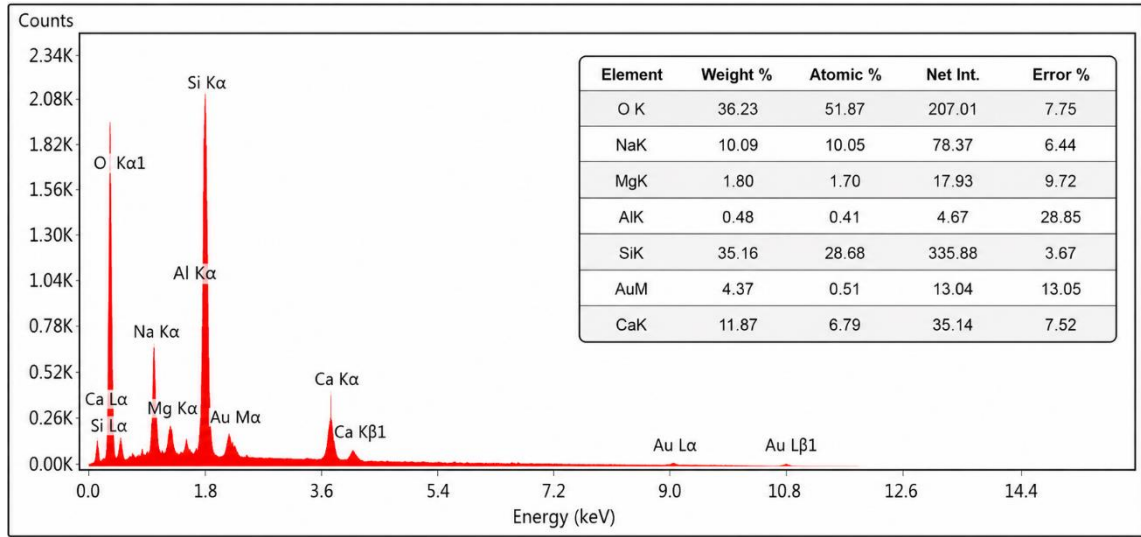
Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimini ve element dağılımlarını belirlemek amacıyla EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. TT, BT ve CT'ye ait EDS kimyasal bileşimleri Şekil 41-43'te verilmiştir.



Şekil 41. Tuğla tozunun EDS grafikleri



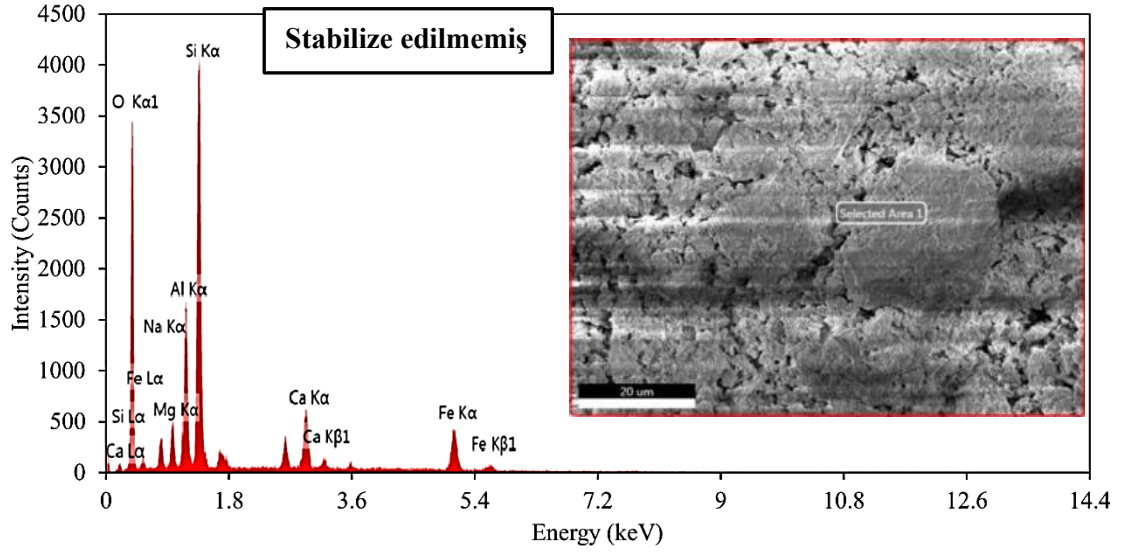
Şekil 42. Beton tozunun EDS grafikleri



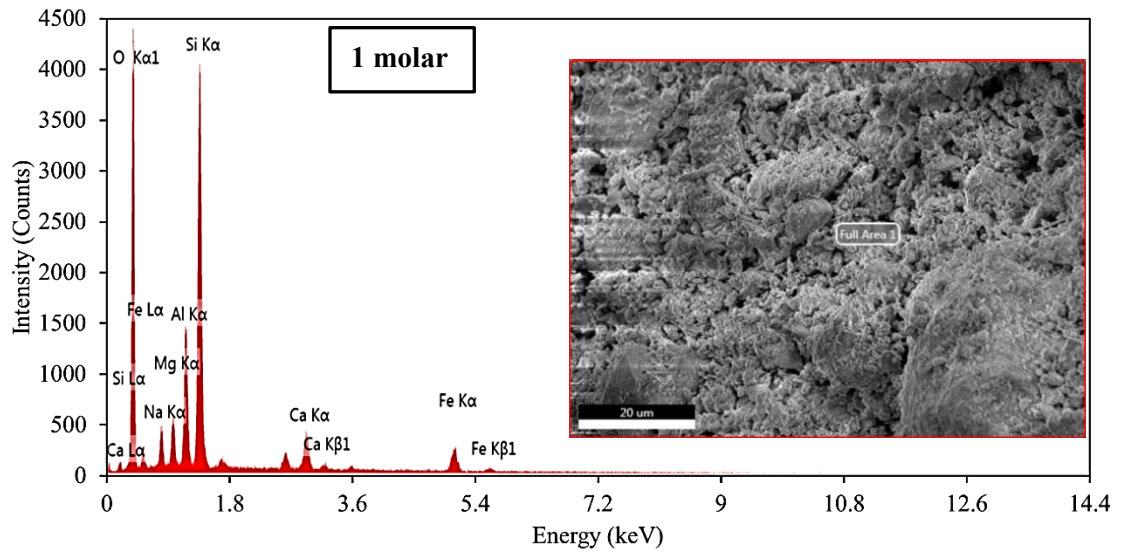
Şekil 43. Cam tozunun EDS grafikleri

EDS analiz sonuçlarına göre CT ve TT yüksek Si içeriğine sahip olduğu, TT’de Al oranının da belirgin seviyede bulunduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, söz konusu malzemelerin geopolimerizasyon reaksiyonları açısından alüminosilikat karakter gösterebileceğini düşündürmektedir. BT’de ise yüksek Ca içeriği tespit edilmiş olup, bu yapının Kalsiyum Alüminosilikat Hidrat (C-A-S-H) ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) benzeri bağlayıcı faz gelişimini destekleyen yapıların oluştuğu değerlendirilmiştir. Böylece kullanılan üç farklı atık malzemenin birbirini tamamlayıcı kimyasal özellikler sergilediği görülmektedir.

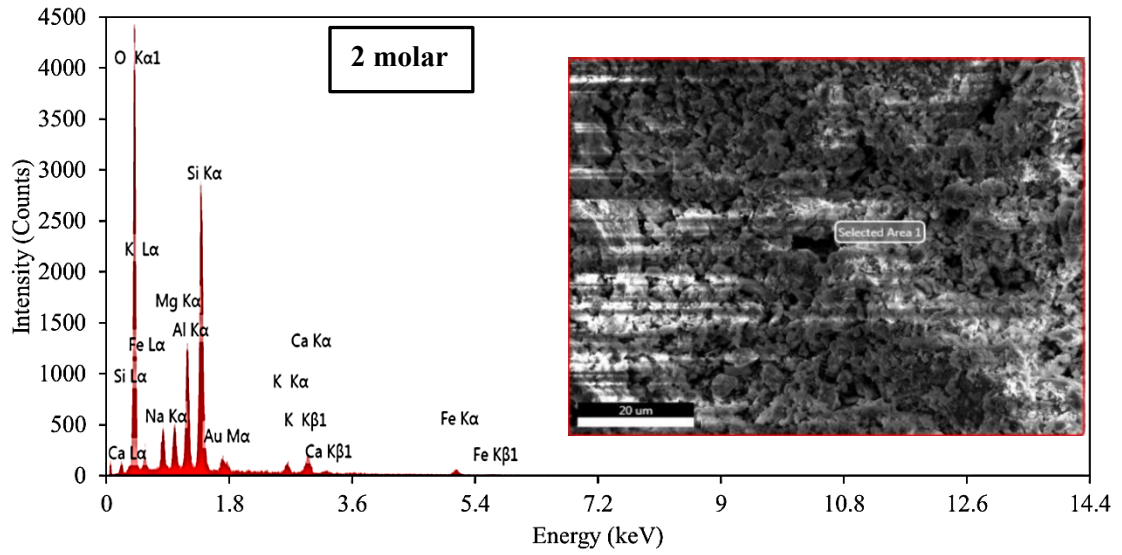
Şekil 44–48, 28 günlük kürleme süresinden sonra seçilen stabilize edilmemiş ve inşaat yıkıntı atığı bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş tasarım gradasyonlarının EDS spektrumlarını göstermektedir. Numunelerde tespit edilen ortalama elementlerin kimyasal bileşimleri spektrumlarda verilmiştir ve tablolar eklenmiştir. EDS sonuçları, stabilize edilmiş numunelerde geopolimer jel oluşumuna işaret edebilecek nitelikte bulgular olduğunu ortaya koymaktadır. EDS analizlerinden elde edilen verilere göre; sodyum hidroksit (NaOH) molar derişimleri 1M–4M arasında değişen numunelerin ana element bileşimi Na, Ca, Si ve Al olarak belirlenmiştir. Bu durum, inşaat yıkıntı atığı bazlı geopolimer sistemlerde reaksiyon süreci boyunca N-A-S-H ve C-A-S-H benzeri yapıların oluşabileceğini düşündürmektedir. Bunun, numunelerin daha yoğun bir yapı kazanmasına ve CBR değerlerindeki artışa katkı sağlamış olabileceği değerlendirilmektedir. EDS sonuçlarından, numunelerinin kimyasal bileşimleri Tablo 7’de verilmiştir. Na elementi, stabilize edilmemiş numunelerde çok az iken, stabilize edilmiş numunelerde ise İYA bazlı geopolimer üretimi için NaOH molar derişimin artmasıyla birlikte artmıştır.



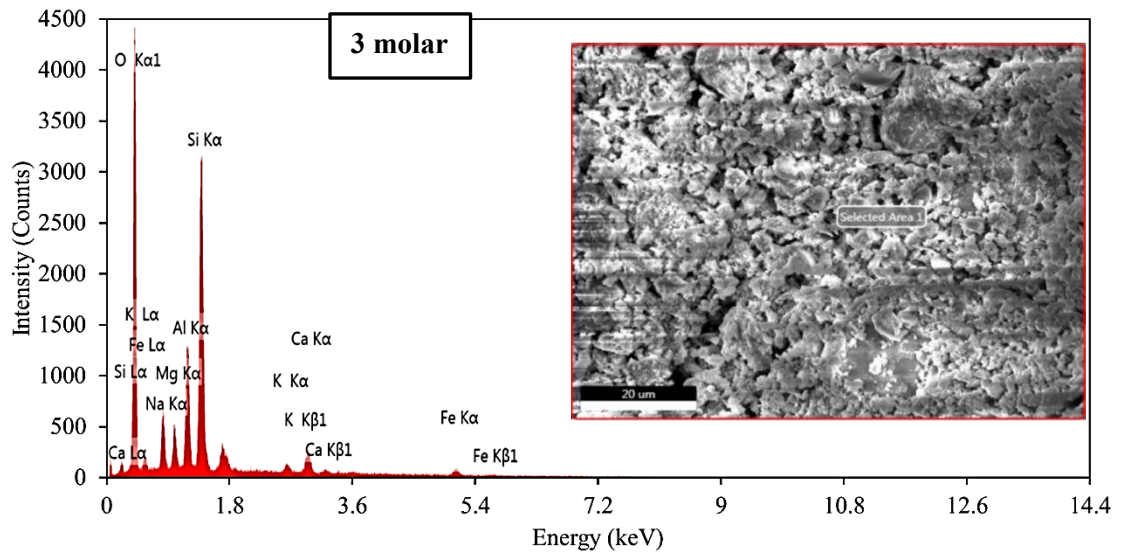
Şekil 44. Geopolimer ile stabilize edilmemiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri



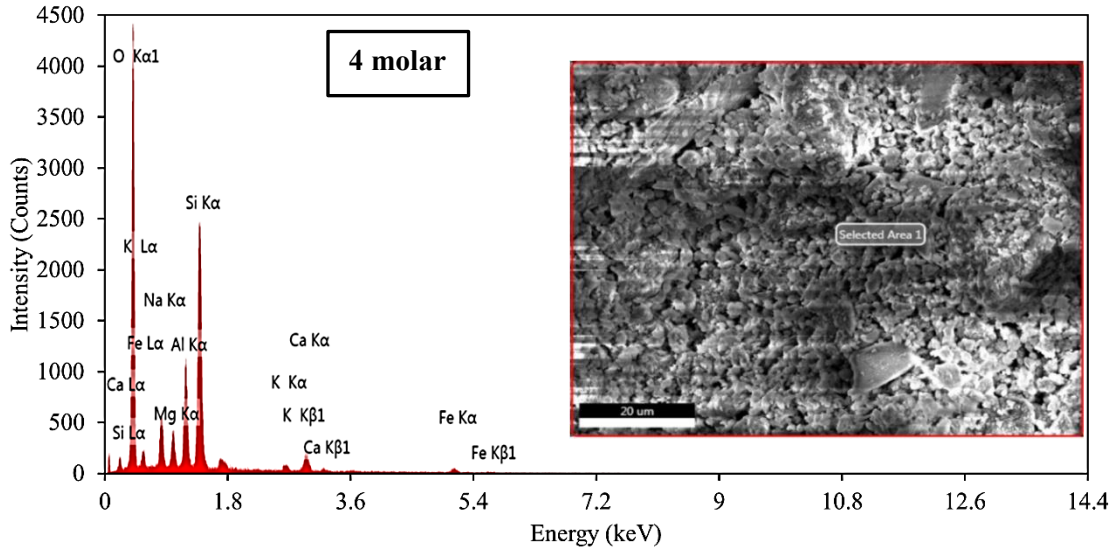
Şekil 45. 1 M NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri



Şekil 46. 2 M NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri



Şekil 47. 3 M NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri



Şekil 48. 4 M NaOH çözeltisi ile aktive edilen ve stabilize edilmiş T6 tasarım gradasyonunun EDS grafikleri

Tablo 7. EDS analizine göre T6 tasarım gradasyonlarının element yüzdeleri

Element	Stabilize edilmemiş	1 M	2 M	3 M	4 M
O	19,99	24,41	44,44	43,49	48,04
Si	58,65	55,57	27,77	29,02	27,24
Al	16,17	14,05	9,96	9,57	8,9
Fe	0,28	0,33	1,75	1,16	1,62
Mg	2,56	3,12	2,76	2,22	1,96
Ca	0,98	0,55	6,93	8,53	6,75
K	-	-	2,01	1,99	0,95
Na	1,38	1,97	2,76	4,02	4,55

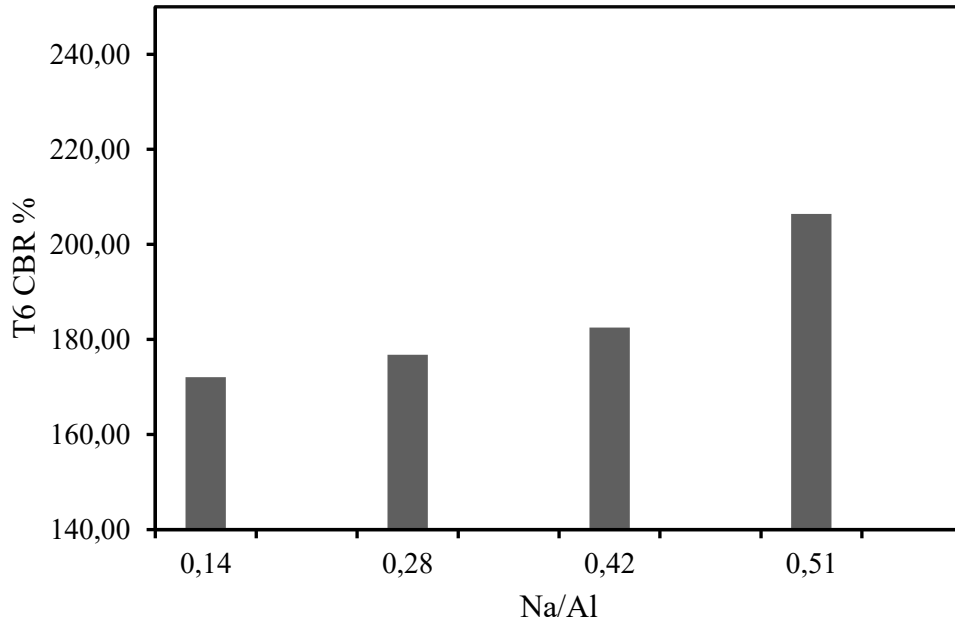
Tablo 7'deki EDS verileri kullanılarak hesaplanan Si/Al ve Na/Al oranları incelendiğinde, molarite artışının geopolimer matrisindeki kimyasal dengeleri etkilediği görülmektedir. Özellikle Na/Al oranının 0,09'dan 0,51'e doğru artış göstermesi, artan alkali aktivatör konsantrasyonu ile birlikte sistemdeki Na miktarının yükseldiğini göstermektedir. Literatürde, Si/Al ve Na/Al oranlarının geopolimerlerin mikroyapısı, jel oluşumu ve mekanik davranışı üzerinde önemli etkiler oluşturduğu belirtilmektedir (Juengsuwattananon vd., 2019; Wang H. vd., 2021). Yapısal kararlılık açısından önemli kabul edilen Si/Al oranının ise 1 M seviyesindeki 3,96 değerinden 2 M ve sonrasında 2,79–3,06 aralığında dengelenmesi, reaksiyon ürünlerinin daha kararlı bir ağ yapısına yöneldiğini düşündürmektedir. Ayrıca, 3 M ve 4 M sonuçlarının

birbirine yakın olması, yüksek molarite seviyelerinde benzer jel karakteristiklerinin oluşabileceğine işaret etmektedir. EDS analizine göre Si/Al ve Na/Al oranları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. EDS analizine göre Si/Al ve Na/Al oranları

T6 Numune Tasarımı	Si/Al	Na/Al
Stabilize edilmemiş	3,63	0,09
1 M	3,96	0,14
2 M	2,79	0,28
3 M	3,03	0,42
4 M	3,06	0,51

Na/Al oranı ile T6 CBR 28 günlük değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde, alkali aktivatör miktarındaki artışın malzemenin taşıma kapasitesini doğrudan ve pozitif yönde etkilediği görülmektedir; özellikle Na/Al oranının 0,14’ten 0,42’ye yükseldiği 1 M - 3 M aralığında CBR değerleri kademeli bir artış sergilerken, oranın 0,51’e ulaştığı 4 M seviyesinde artış ivme kazanarak %206,4 noktasına ulaşmıştır. Bu durum, belirli seviyede artan Na konsantrasyonunun geopolimerleşme reaksiyonunu etkin hale getirerek matris yapısını güçlendirdiğini ve T6 tasarımı için yüksek Na/Al oranlarının mekanik stabilizasyonu artırdığı ifade edilmektedir. Şekil 49’da Na/Al oranına bağlı CBR performansı değişim grafiği (T6) verilmiştir.



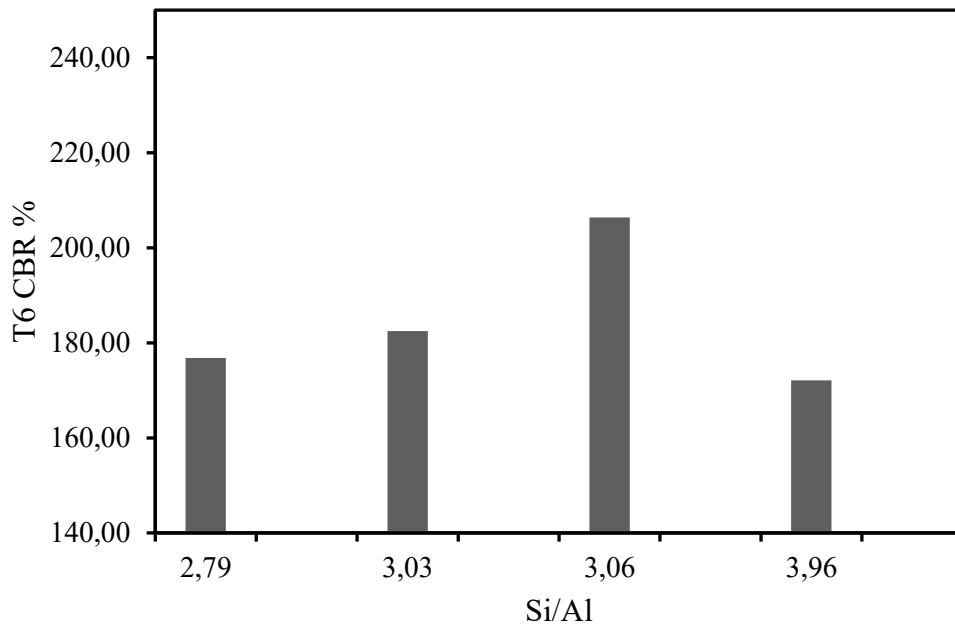
Şekil 49. Na/Al oranına bağlı CBR performansı değişim grafiği (T6)

Molarite artışıyla birlikte Na/Al oranındaki yükselme, Na miktarının arttığını ve geopolimerizasyon reaksiyonlarının geliştiğini göstermektedir. Wang, H. vd. (2021), uygun Na/Al oranlarının N-A-S-H tipi geopolimer jellerinin oluşumunu desteklediğini ve bunun mikro yapıda daha yoğun ve kompakt bir matris meydana getirdiğini belirtmiştir. Çalışmada, düşük Na/Al oranlarında gevşek ve gözenekli bir yapı gözlenirken, Na/Al = 0,73 oranında daha yoğun bir mikro yapı ve yüksek miktarda N-A-S-H jeli olduğu SEM görüntüleriyle birlikte ifade edilmektedir. Bununla birlikte, aşırı yüksek Na/Al oranlarının ise aşırı alkalilik nedeniyle geopolimer jel yapısını bozarak mekanik dayanımın azalmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Işık (2025), Na/Al oranındaki artış ile dayanım değerleri arasında pozitif bir ilişki bulunduğunu ve artan Na^+ iyon konsantrasyonunun alkali aktivasyon reaksiyonlarını desteklediğini belirtmiştir.

T6 tasarımı için Si/Al oranı ile CBR değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde, 1 M seviyesinde Si/Al oranının 3,96 gibi yüksek bir değere ulaşmasına rağmen en düşük CBR değerinin (%172,1) elde edilmesi, düşük aktivatör konsantrasyonunda yüksek silis içeriğinin tek başına dayanım artışı için yeterli olmadığını, molarite artışıyla birlikte 2 M seviyesinden itibaren Si/Al oranının 2,79–3,06 aralığında daha dengeli değerlere gerileyerek stabilize olması, geopolimer jel yapısının daha kararlı bir forma ulaştığına işaret etmektedir.

Wang, H. vd. (2021), uygun Si/Al oranlarının geopolimerizasyon reaksiyonlarını destekleyerek N-A-S-H tipi jel oluşumunu desteklediğini, bunun sonucunda daha yoğun ve daha az boşluk içeren yapı geliştiğini ve mekanik dayanımın iyileştiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Duxson vd. (2007), Si/Al oranının geopolimerlerin mikro yapısı ve ağ oluşumu üzerinde belirleyici olduğunu ve uygun Si/Al oranlarının daha kararlı aluminosilikat yapıların gelişimini desteklediğini ifade etmiştir.

4 M seviyesinde CBR değerinin %206,4'e ulaşması, yaklaşık 3 seviyesinde dengelenen Si/Al oranının T6 tasarımında daha gelişmiş bir ağ yapısı ve iyileşmiş mekanik performans sağladığını göstermektedir. Şekil 50'de Si/Al oranına bağlı CBR performansı değişim grafiği (T6) verilmiştir.



Şekil 50. Si/Al oranına bağlı CBR performansı değişim grafiği (T6)

EDS ve SEM analiz sonuçları eş zamanlı olarak incelendiğinde, aktivatör molaritesindeki artışa bağlı olarak malzeme yapısında daha bütünlüklü bir bağlayıcı matrisin geliştiği görülmektedir. Özellikle Na/Al oranındaki artışın alkali aktivasyon reaksiyonlarını destekleyerek aluminosilikat çözünmesini belirli düzeyde artırdığı ve buna bağlı olarak bağlayıcı faz gelişimini teşvik ettiği değerlendirilmektedir. Nitekim Işık (2025), artan Na^+ iyon konsantrasyonunun alkali aktivasyon reaksiyonlarını destekleyerek N-A-S-H tipi bağlayıcı faz gelişimini artırabileceğini ifade etmiştir. Benzer şekilde Wang, H. vd. (2021) de uygun Si/Al ve

Na/Al oranlarında oluşan N-A-S-H tipi jellerin, daha az boşluklu ve daha yüksek mekanik dayanım sağladığını belirtmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen yüksek CBR değerleri ile SEM görüntülerindeki yoğun morfoloji birlikte ele alındığında, geopolimerizasyon reaksiyonlarının zemin taşıma kapasitesini doğrudan ve olumlu yönde etkilediği açıkça görülmektedir.

5. SONUÇLAR

İYA'nın yol üstyapısında dolgu malzemesi, alt temel ve temel tabakası olarak yeniden kullanım potansiyelinin parametrik ve mikroyapısal düzeyde incelendiği bu deneysel çalışmada, üstyapı performansını doğrudan etkileyebilecek mühendislik çıkarımları elde edilmiştir. KTŞ alt temel ve temel tabakası gradasyon limitlerine uygun olarak hazırlanan altı farklı tasarım gradasyonunda ince dane oranının %2'den %12'ye (T1'den T6'ya) artırılmasının, ince danelerin agrega boşluklarını doldurmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlığını (γ_{kmax}) 2,02 g/cm³'ten 2,16 g/cm³'e yükselttiği ve yaklaşık %6,9 oranında bir artış sağladığı belirlenmiştir. Bu doğrusal artışa paralel olarak, optimum su muhtevasının (w_{opt}) %12'den %8,5'e gerileyerek yaklaşık %29 oranında azalmasının, İYA esaslı ince malzemenin (tuğla, beton ve cam tozu karışımı) üstyapı tabakalarında Modifiye Proktor enerjisi altında sıkışma verimliliğini artıran bir dolgu işlevi gördüğü şeklinde değerlendirilmektedir.

Tasarım gradasyonlarının taşıma gücü karakteristiklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen CBR deneylerinde, geopolimer bağlayıcı ile stabilize edilmemiş numunelerin ince dane oranındaki artışa bağlı olarak üstyapı taşıma kapasitesinin arttığı, en düşük değerin %92,1 ile T1 numunesinde, en yüksek değerin ise %159,6 ile T6 numunesinde elde edildiği görülmüştür. Söz konusu İYA tasarımlarının NaOH alkali aktivatörü ile 1 M'den 4 M'ye farklı molaritelerde aktive edilmesinin, özellikle ince dane oranı en yüksek olan T6 numunesinin 28 günlük CBR değerini %172,1'den %206,4 seviyesine kadar kademeli olarak yükselttiği tespit edilmiştir. Kür süresinin 7 günden 91 güne çıkarılması ise geopolimerizasyon reaksiyonlarının zamana bağlı olarak ilerlediğini desteklemektedir. Nitekim 4 M NaOH ile stabilize edilen T6 numunesinin CBR değeri 7 günde %181,2 ve 28 günde %206,4 iken, 91 günlük kür periyodu sonunda %223,9 seviyesine ulaşmıştır. Elde edilen bu değerlerin, KTŞ granüler temel ve alt temel tabakası için kabul kriterlerinin belirli koşullarda sağlanabileceğini ortaya koyduğu değerlendirilmektedir.

Deneysel çalışmalarda belirlenen taşıma kapasitesi artışlarının yapısal nedenleri, SEM ve EDS analizleri ile mikroyapısal düzeyde incelenmiştir. Stabilize edilmemiş numunelerde ayırık, gevşek ve gözenekli bir yapı gözlenirken; NaOH molaritesi arttıkça (özellikle 3 M ve 4 M seviyelerinde) mikro boşlukların azaldığı, amorf yapıli bağlayıcı jellerin gelişmesiyle birlikte daha sıkı ve kompakt bir yapının meydana geldiği belirlenmiştir. Kimyasal element dağılımlarını gösteren EDS spektrumlarında, reaksiyon süreci boyunca mikroyapıda N-A-S-H ve C-A-S-H benzeri jellerin oluşumuna işaret eden Na, Ca, Si ve Al elementlerinin ön plana

çıkıtığı saptanmıştır. Molarite artışına paralel olarak Na/Al oranının 0,09'dan 0,51'e yükselmesinin, Na⁺ iyonlarının alüminosilikat yapısının çözünmesinde önemli bir rol oynadığı şeklinde yorumlanmaktadır.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular geopolimer bağlayıcı ile stabilize edilen İYA'nın, yol üst yapısında çevre dostu alternatif bir malzeme olarak kullanılabilme potansiyeline işaret etmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, inşaat atıklarının geri kazanılmasıyla sürdürülebilir çevre ve atık yönetimi politikalarına değerli katkılar sağlanabileceği öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda ise malzemenin uzun vadeli performansının ve dinamik trafik yükleri altındaki davranışlarının incelenmesinin, saha uygulamalarına geçiş sürecine önemli katkılar sunacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Aboutalebi Esfahani, M. (2020). Evaluating the feasibility, usability, and strength of recycled construction and demolition waste in base and subbase courses. *Road Materials and Pavement Design*, 21(1), 156–178. doi:10.1080/14680629.2018.1483259
- Adamson, M., Razmjoo, A., & Poursaee, A. (2015). Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 94, 426–432. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.056
- Ahıskalı, M. (2025). *İnşaat yıkıntı atıklarının ikame malzemesi ve agrega olarak silindirle sıkıştırılmış lifli beton yollarda kullanılabilirliği* (Yüksek lisans tezi). Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262–281. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.085
- Alakara, E. H. (2022). İnşaat yıkıntı atıklarından elde edilen atık tuğlaların geopolimer harçlarda kullanımının incelenmesi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi (GBAD)*, 11(3), 251–259.
- Aliabdo, A. A., Abd-Elmoaty, A. M., & Hassan, H. H. (2014). Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*, 53(1), 151–168. doi:10.1016/j.aej.2013.12.003
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2006). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates (ASTM C136-06)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2012). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)) (ASTM D1557-12)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2016). *Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine (ASTM C131/C131M-14)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Arruda, M. S. Z. J., Mancini, S. D., Rodrigues, R. A., & Antunes, M. L. P. (2023). Analysis of mixing construction and demolition waste with soil for embankments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management*, 176(3), 109–117. doi:10.1680/jwarm.22.00001

- Arslan, H., Coşgun, N., & Salgın, B. (2012). Construction and demolition waste management in Turkey. In L. F. M. Rebellon (Ed.), *Waste Management – An Integrated Vision* (pp. 313–332). InTech. doi:10.5772/46110
- Arslan, H., & Ulubeyli, S. (2019). Sorting at source and reusing: The case of construction and demolition waste in Turkey. *Journal of Construction Engineering Management & Innovation*, 2(4), 231–241.
- Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2016, November). *Recycled construction and demolition materials in pavement and footpath bases*. Paper presented at the Sixth International Symposium on Rural Roads, Thailand.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M., & Bo, M. W. (2013). Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1077–1088. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652
- Bayer, R., Ulugöl, H., Demir, İ., Yıldırım, G., & Şahmaran, M. (2020). Tasnif edilmiş inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen harman tuğlası, delikli tuğla ve çatı kiremitinden oluşan ikili karışımların geopolimer hamur üretiminde değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 79–89.
- Bayraktar, O. Y. (2018). Sürdürülebilir bir materyal olarak tuğla tozunun potansiyel kullanımı. *SETSCI ISAS 2018 Winter*, 3, 1314–1322.
- Bektaş, F. (2014). Alkali reactivity of crushed clay brick aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 79–85. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.014
- Binici, H., Kapur, S., Arocena, J., & Kaplan, H. (2012). *The sulphate resistance of cements containing red brick dust and ground basaltic pumice with sub-microscopic evidence of intra-pore gypsum and ettringite as strengtheners*. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 279–287. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.10.001
- Buzkan, C., & Erman, O. (2020). Yapısal atıkların geri dönüşüm sorunu ve Türkiye’deki durumun mevzuat bakımından değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(1), 76–89.
- Cachim, P. B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1292–1297. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023
- Chen, C. H., Huang, R., Wu, J. K., & Yang, C. C. (2006). Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 449–456. doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.010

- Chen, G., Lee, H., Young, K. L., Yue, P. L., Wong, A., Tao, T., & Choi, K. K. (2002). Glass recycling in cement production—An innovative approach. *Waste Management*, 22(7), 747–753. doi:10.1016/S0956-053X(02)00047-8
- Corinaldesi, V., Gnappi, G., Moriconi, G., & Montenero, A. (2005). Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management*, 25(2), 197–201. doi:10.1016/j.wasman.2004.12.009
- Çetin, A., & Erol, O. (2018). *Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri*. Ankara: Nobel Yayıncılık.
- Çivioğlu, F. S. (2020). *Geri dönüştürülmüş beton agregası ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonların fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Çolakoğlu, B., Yıldız, M., & Karakaya, M. Ç. (2021). Geri dönüştürülmüş farklı tip inşaat ve yıkıntı atıklarının kompaksiyon özelliklerinin incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(4), 1049–1058. doi:10.33793/acperpro.04.02.47
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). *Principles of geotechnical engineering* (8th ed.). Stamford, CT: Cengage Learning.
- Davidovits, J. (2020). *Geopolymer chemistry and applications* (5th ed.). Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère.
- Debieb, F., & Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 22(5), 886–893. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013
- Deraman, L., Abdullah, M. M. A. B., Ibrahim, W. M. W., Tahir, M. F. M., Kusbianoro, A., Abdila, S. R., ... Salleh, M. A. A. M. (2025). Geopolymer as prospective materials for brick production. In *Recent developments of geopolymer materials: Processing and characterisations* (pp. 53–92). Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-0-443-24068-3.00003-0
- Doğdu, G., & Alkan, S. N. (2023). Deprem sonrası oluşan inşaat ve yıkıntı atıklarının değerlendirilmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri. *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 38–50.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. doi:10.1007/s10853-006-0637-z
- Ekmen, Ş., & Mermerdaş, K. (2018). Alkali aktivatör parametrelerinin ve test koşullarının geopolimer betonların büzülme ve sünme davranışı üzerine etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 93–101.
- ELE International. (2016). *CBR test apparatus: Operating manual*. London: ELE International Ltd.

- Eurostat. (2023). *Waste statistics – recovery of construction and demolition waste. (2022 data)*
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Recovery_of_construction_and_demolition_waste.
- Fan, C.-C., Huang, R., Hwang, H., & Chao, S.-J. (2015). *The Effects of Different Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Mortar*. *Materials*, 8(5), 2658–2672.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2004). *Transportation applications of recycled concrete aggregate: FHWA state-of-the-practice national review*. U.S. Department of Transportation.
- FEI Company. (2012). *Product Data Quanta 450 FEG*.
https://microwiki.org/media/fei/quanta_450_feg/specification_of_quanta450_feg.pdf
- FELMI-ZFE - TU GRAZ. (2023). *FEI ESEM Quanta 450 FEG – Environmental Scanning Electron Microscope*. <https://felmi-zfe.at/instrumentation/sem/fei-esem-quanta-450-feg-environmental-scanning-electron-microscope>
- Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T.-C., Zhang, H., & Wang, Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 89, 251–259. doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008
- Head, K. H. (2006). *Manual of soil laboratory testing: Vol. 1 – Soil classification and compaction tests* (3rd ed.). Dunbeath, Scotland: Whittles Publishing.
- Hidalgo, C., Carvajal, G., Hincapié, A., Muñoz, F., & Hernández, M. (2023). Ground improvement by construction and demolition waste (CDW) soil mixture replacement. *Buildings*, 13(3), 779. doi:10.3390/buildings13030779
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (2010). *Geoteknik mühendisliğine giriş* (K. Kayabalı, Çev.). Ankara: Gazi Kitabevi.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (2nd ed.). Prentice Hall.
- International Union of Pure and Applied Chemistry. (2014). *Amount concentration*. In *IUPAC compendium of chemical terminology* (the “Gold Book”).
- Isik, A. (2025). Experimental study on compressive strength of clay soil stabilized with construction and demolition waste-based geopolymer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84, 380. doi:10.1007/s10064-025-04396-8
- Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2009). Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 29(2), 655–659. doi:10.1016/j.wasman.2008.08.012

- Juengsuwattananon, K., Winnefeld, F., Chindaprasirt, P., & Pimraksa, K. (2019). Correlation between initial $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ and $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios on phase and microstructure of reaction products of metakaolin-rice husk ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 226, 406–417.
- Kalantar Hormozi, M. J., Jorkesh, Z., Ajalloeian, R., & Mortazavi Gelsefidi, S. A. (2021). Feasibility of using recycled combined construction and demolition waste for road base and subbase. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(2). doi:10.1061/JPEODX.0000267
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2013). *Toprak ve stabilizasyon laboratuvarı el kitabı*. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı. <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/ToprakveStabilizasyonLabElKitabi.pdf>
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2023). *Karayolları teknik şartnamesi*. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Khalaf, F. M., & DeVenny, A. S. (2004). Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 18(4), 225–234.
- Khalaf, F. M., & DeVenny, A. S. (2005). Properties of new and recycled clay brick aggregates for use in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4), 556–564.
- Khan, Z. A., Balunaini, U., Costa, S., & Nguyen, N. H. T. (2024). A review on sustainable use of recycled construction and demolition waste aggregates in pavement base and subbase layers. *Cleaner Materials*, 13, 100266. doi:10.1016/j.clema.2024.100266
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., & Galetakis, M. (2015). Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes geopolymers. *Advanced Powder Technology*, 26(2), 368–376.
- Kutlu, M. (2023). *Geri kazanılmış agregaların betona etkisi* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*. New York, NY: Wiley.
- Luga, E., Mustafaraj, E., Corradi, M., & Dajko, M. (2025). Recycled red brick masonry demolition waste as a sustainable cement replacement alternative. *Journal of Building Engineering*, 111787. doi:10.1016/j.jobbe.2025.111787
- Mahand Ceramic. (2025). Introduction to vibrating sieve shakers. <https://mahandceramic.com/en/tile-and-ceramic-industries-articles/vibrating-sieve-shakers/>

- Manzi, S., Baldazzi, L., & Saccani, A. (2023). *Formulating geopolymers through construction and demolition waste (CDW) recycling: A comprehensive case study*. *Materials*, 16(23), 7304. doi:10.3390/ma16237304
- Mazhar, M. A., Alam, P., Ahmed, S., Khan, M. S., & Adam, F. A. (2023). Sustainable usage of demolished concrete waste as a sub-base material in road pavement. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1060878. doi:10.3389/frsus.2023.1060878
- Mehrjardi, G. T., Azizi, A., Haji-Azizi, A., & Asdollahfardi, G. (2020). Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction. *Transportation Geotechnics*, 23, 100349. doi:10.1016/j.trgeo.2020.100349
- Moreira, E. B., Baldovino, J. A., Izzo, R. L. S., & Rose, J. L. (2023). Transforming construction and demolition waste into soft-soil treatment for paving design. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(8), 4321–4343. doi:10.1007/s10706-023-02503-8
- Nguyen, T. H., Pham, H. K., & Pham, Q. T. (2022). Study on the use of construction and demolition waste for road base or subbase pavement construction in Hanoi. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 9(4), 467–475.
- Özçay, Ü. (2010). *Kiremit sektöründeki endüstriyel atıkların geri kazanılması* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özçelik, Y. (2022). *İnşaat yıkıntı atıklarının köpük beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Park, S. B., Lee, B. C., & Kim, J. H. (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2181–2189. doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.006
- Pathak, A., Kumar, S., & Jha, V. K. (2014). Development of building material from geopolymers of construction and demolition waste. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 73(2), 133–137. doi:10.1080/0371750X.2014.922429
- Petrucchi, R. H., Herring, F. G., Madura, J. D., & Bissonnette, C. (2017). *General chemistry: Principles and modern applications* (11th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- Poon, C. S., & Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(3), 293–305. doi:10.1016/j.resconrec.2006.06.005
- Pourghadri Sefidehkan, H. (2017). *Geri dönüşüm agrega ile üretilmiş betonun mühendislik özelliklerinin incelenmesi / Investigation of engineering properties of concrete made with recycled aggregate* (Yayımlanmış yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

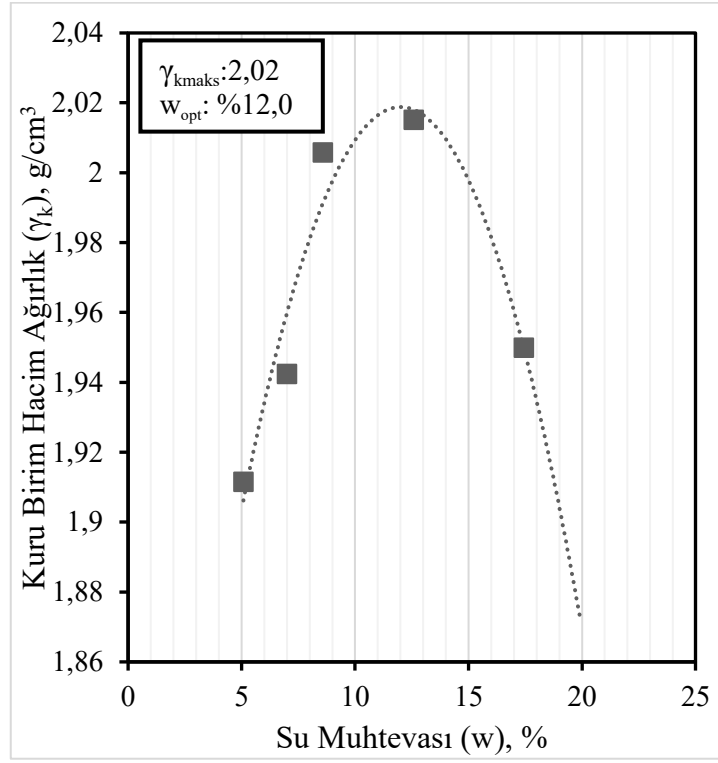
- Prajapati, A. R., Shah, A. U., Jain, P. H., & Rangwala, H. M. (2022). Improvement of soil using CDW. *Proceedings of IGS*.
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali activated materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Dordrecht: Springer.
- Robayo-Salazar, R. A., Rivera, J. F., & Mejía de Gutiérrez, R. (2017). Alkali-activated building materials based on demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 149, 130-138.
- Salgado, F. de A., & Silva, F. de A. (2022). Recycled aggregates from construction... *Journal of Building Engineering*, 52, 104452. doi:10.1016/j.job.2022.104452
- Sani, N. A. M., Man, Z., Shamsuddin, R. M., Azizli, K. A., & Shaari, K. Z. K. (2016). Determination of excess sodium hydroxide in geopolymer by volumetric analysis. *Procedia Engineering*, 148, 298–301. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.621
- Saran, O. (2018). *Van Gölü çevresindeki ince taneli zeminlerin kompaksiyon parametrelerinin ve ön konsolidasyon basınçlarının standart ve modifiye Proctor yöntemleri ile incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Sharma, A., & Sharma, R. K. (2020). Strength and drainage characteristics... *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 4753–4760. doi:10.1007/s10706-020-01324-3
- Shayan, A., & Xu, A. (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 81–89. doi:10.1016/S0008-8846(03)00251-5
- Shayan, A., & Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 457–468. doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.012
- Şen, B. N. (2021). *Hafriyat toprağı, inşaat ve yıkıntı atıklarının yol yapımında kullanılabilirliğinin incelenmesi: Erzurum örneğı* (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *Ulusal Atık Yönetimi Eylem Planı (2023-2035)*. Ankara: Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. (2004). *Hafriyat toprağı, inşaat ve yıkıntı atıklarının kontrolü yönetmeliğı*. Ankara: Resmi Gazete (Sayı: 25406).
- Temelli, U. E., Sezgin, N., & Özdoğan Cumalı, B. (2023). Afet zamanlarında inşaat yıkıntı atıklarının belirlenmesi ve atıkların değerlendirilmesi: Kahramanmaraş depremi örneğı. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 8(2), 225–232. doi:10.35229/jaes.1286631
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejs, P., & Sánchez de Juan, M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054–1065. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106

- Topçu, İ. B., Boğa, A. R., & Bilir, T. (2008). Alkali–silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate. *Waste Management*, 28(4), 878–884. doi:10.1016/j.wasman.2007.04.005
- Topçu, İ. B., & Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 267–274. doi:10.1016/j.cemconres.2003.07.003
- Tran Viet, C., Nguyen Van, T., Nguyen Hoang, G., & Kawamoto, K. (2019). Utilization of construction and demolition waste (CDW) for unbound road subbase in Hanoi, Vietnam. In *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development* (pp. 731–735). Singapore: Springer.
- TS EN 1097-2. (2010). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler – Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini (Los Angeles yöntemi)*. Türk Standartları Enstitüsü.
- Tunç, A. (2007). *Karayolu mühendisliği temel ilkeleri*. Nobel Yayın Dağıtım.
- Turkane, S. D., & Chouksey, S. K. (2022a). *Application of response surface method for optimization of stabilizer dosages in soil stabilization*. Innovative Infrastructure Solutions, 7, 106.
- Turkane, S. D., & Chouksey, S. K. (2022b). *Optimization of fly ash geopolymer dosage for California bearing ratio using response surface method*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 7(1), 61.
- van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., & Brice, D. G. (2010). Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. *Waste and Biomass Valorization*, 1(1), 145–155. doi:10.1007/s12649-010-9015-9
- Vegas, I., Broos, K., Nielsen, P., Lambertz, O., & Lisbona, A. (2015). Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. *Construction and Building Materials*, 75, 121–128. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.109
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105565. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105565
- Wang, H., Wu, H., Xing, Z., Wang, R., & Dai, S. (2021). *The effect of various Si/Al, Na/Al molar ratios and free water on micromorphology and macro-strength of metakaolin-based geopolymer*. Materials, 14(14), 3845. doi:10.3390/ma14143845
- Wong, C. L., Mo, K. H., Yap, S. P., Alengaram, U. J., & Ling, T. C. (2018). Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, 195, 226–239. doi:10.1016/j.jclepro.2018.05.193

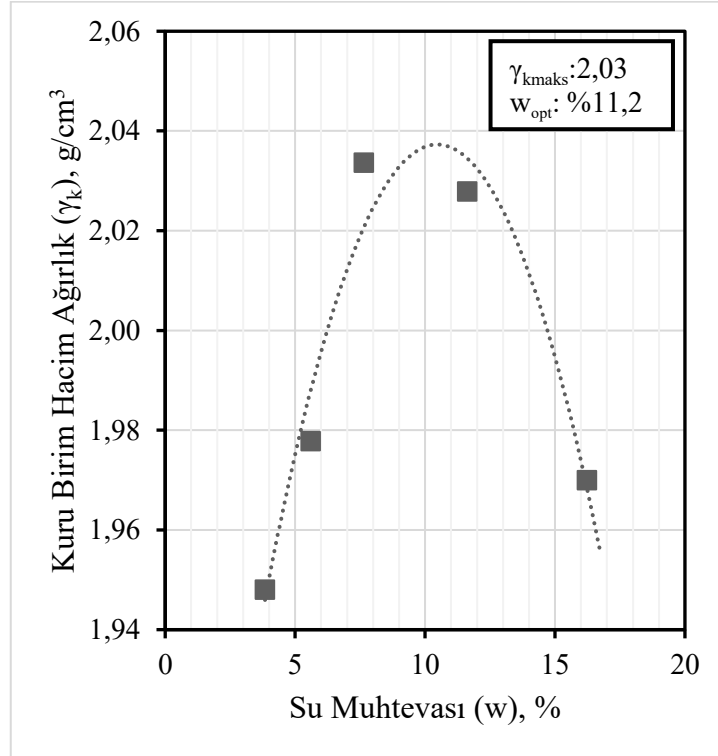
- Xuan, D., Zhan, B., & Poon, C. S. (2016). Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 65, 67–74. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018
- Yadav, N., Kumar, R., & Jethy, B. (2024). Influence of supplementary cementitious materials along with construction and demolition waste in pavement cement-treated sub-base applications. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(3), 65. doi:10.1007/s41062-023-01358-5
- Ye, T., Xiao, J., Duan, Z., & Li, S. (2022). Geopolymers made of recycled brick and concrete powder: A critical review. *Construction and Building Materials*, 330, 127232. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.127232
- Zhu, X., Ding, L., Wu, Y., Wang, X., & Tan, X. (2024). Effect of brick aggregate content on performance of recycled construction-solid-waste aggregate. *Materials*, 17(11), 2616. doi:10.3390/ma17112616

EKLER

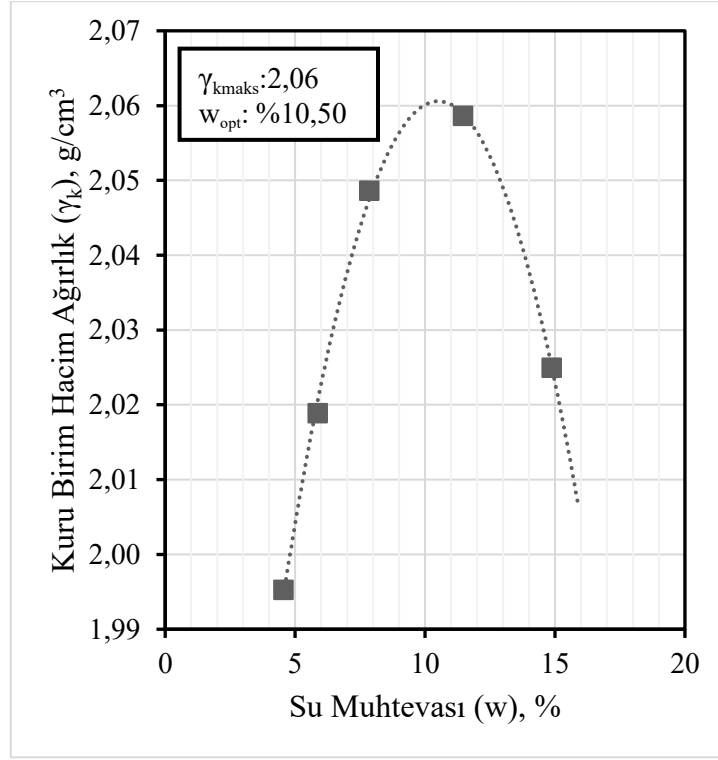
Ek A. Modifiye Proktor Deneyi



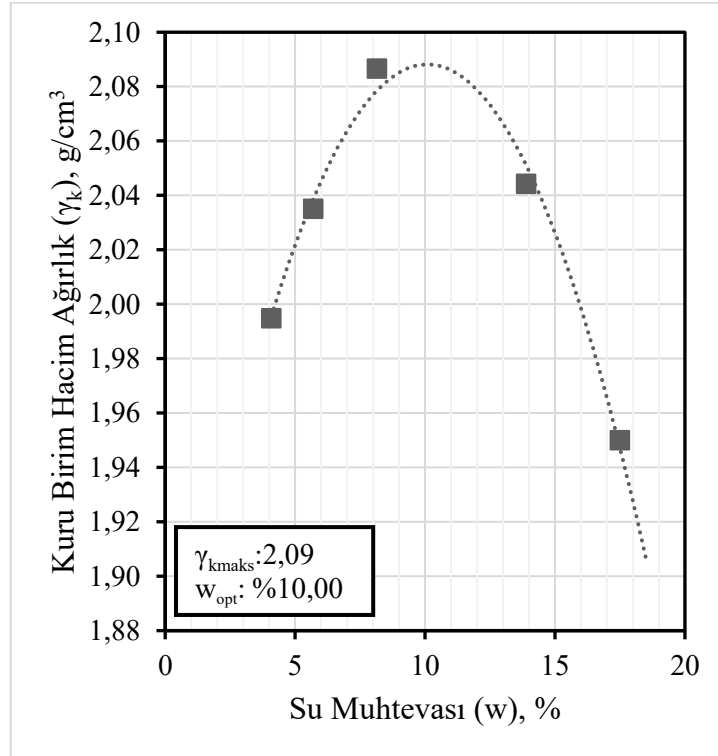
Şekil A1. T1 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu



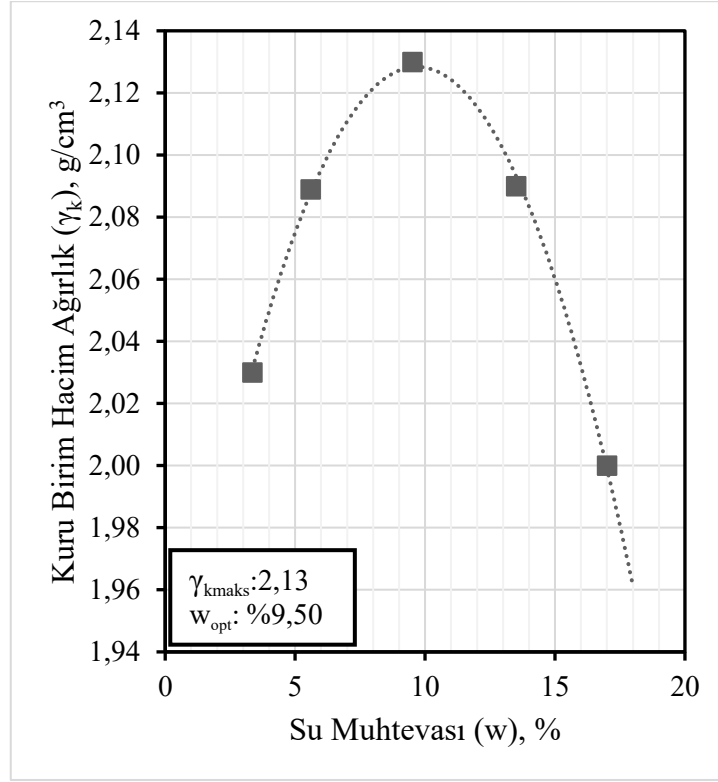
Şekil A2. T2 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu



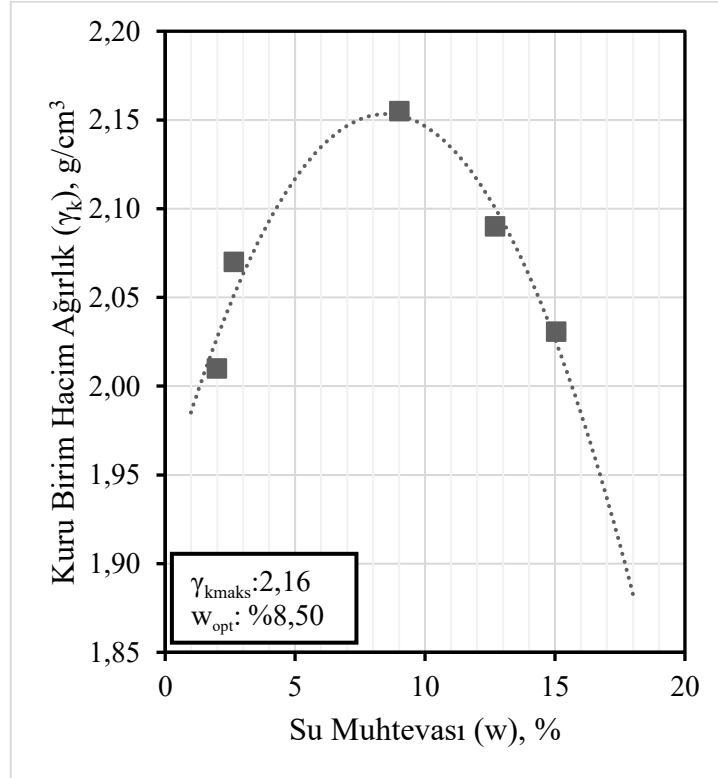
Şekil A3. T3 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu



Şekil A4. T4 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu.

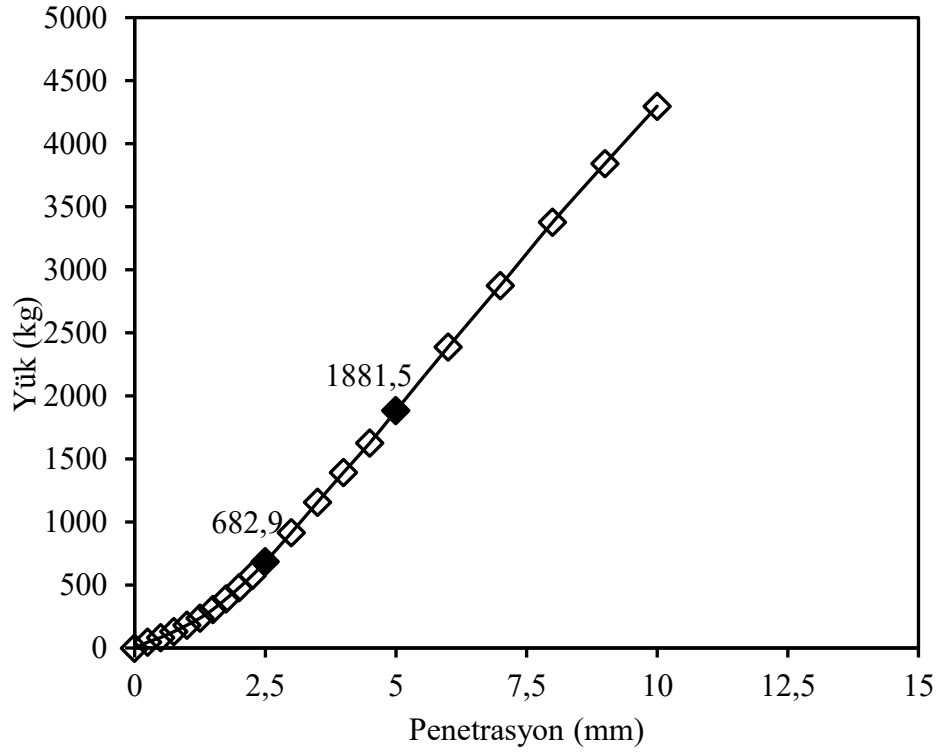


Şekil A5. T5 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu

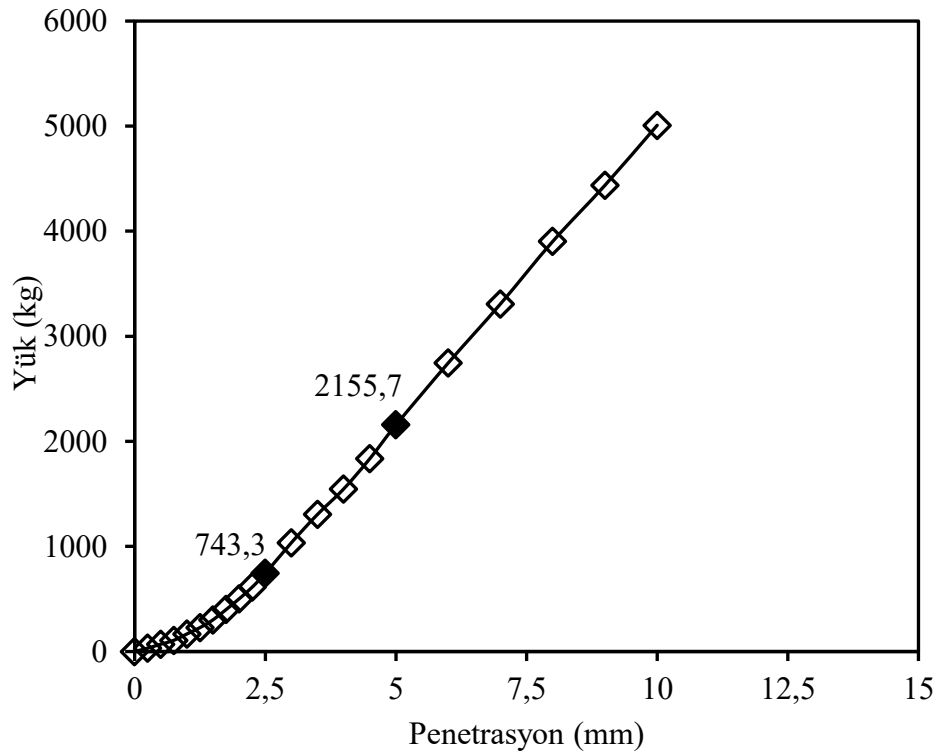


Şekil A6. T6 nolu numuneye ait Modifiye Proktor deney sonucu

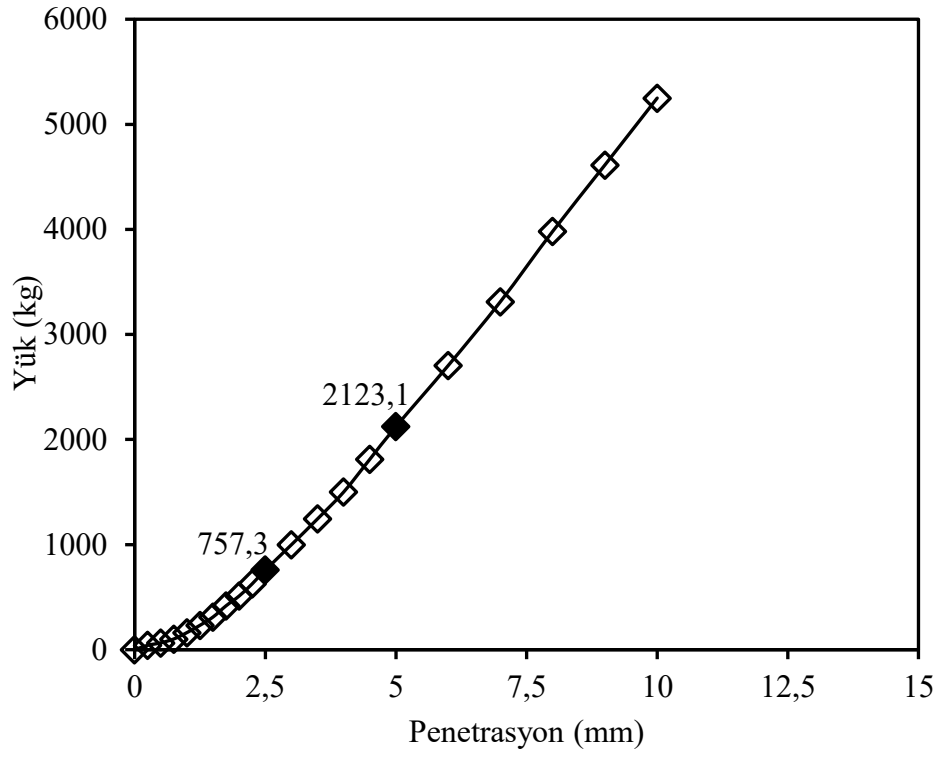
Ek B. CBR Deneyi



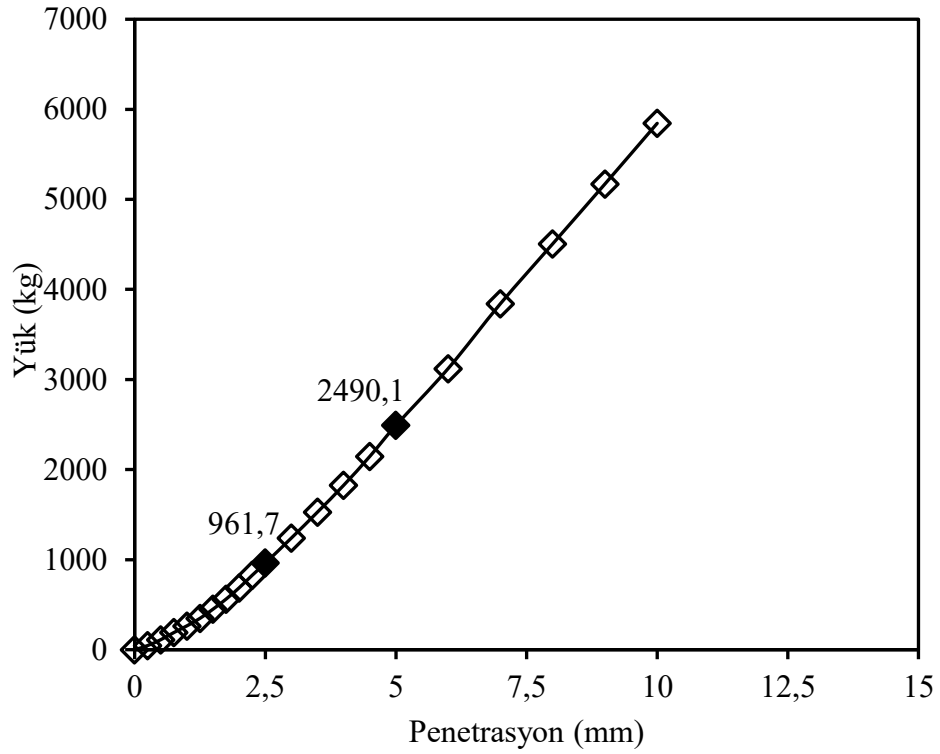
Şekil B1. T1 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu



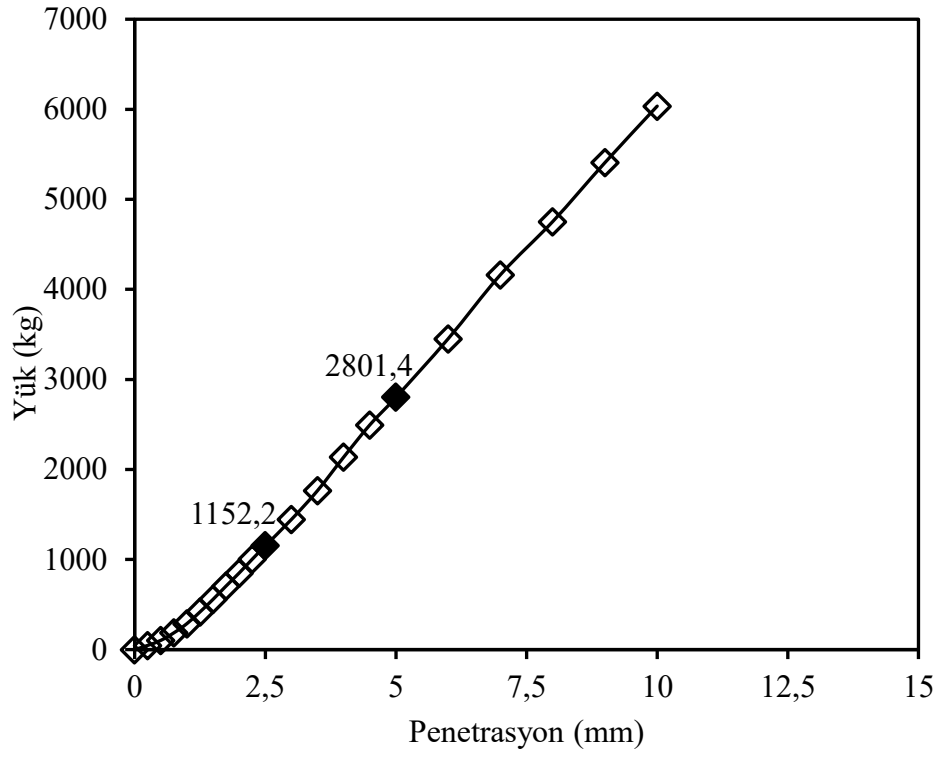
Şekil B2. T2 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu



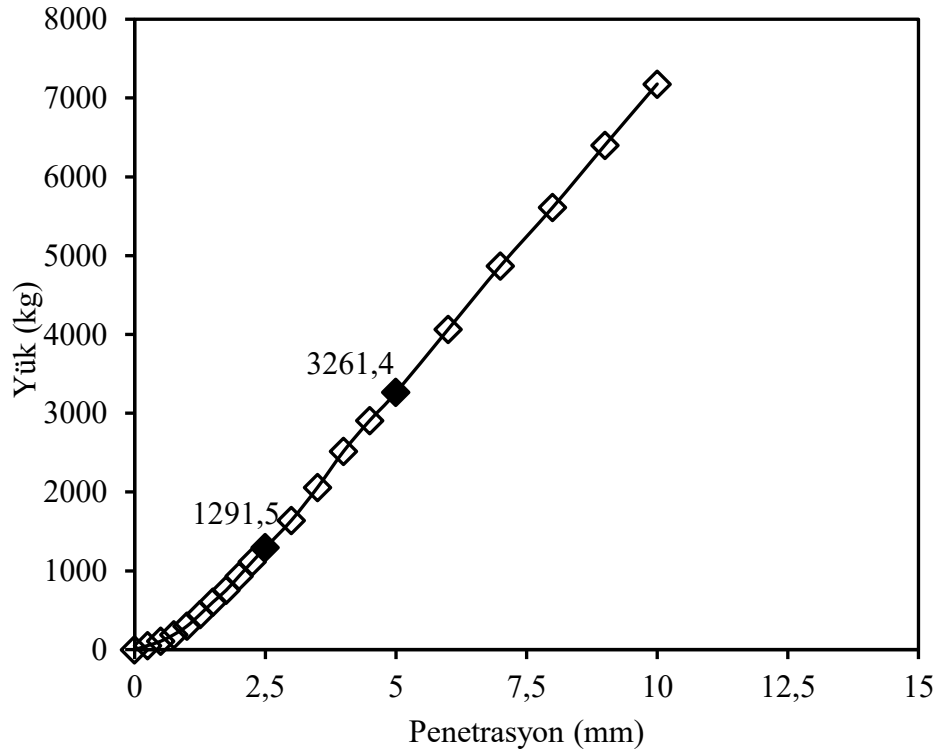
Şekil B3. T3 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu



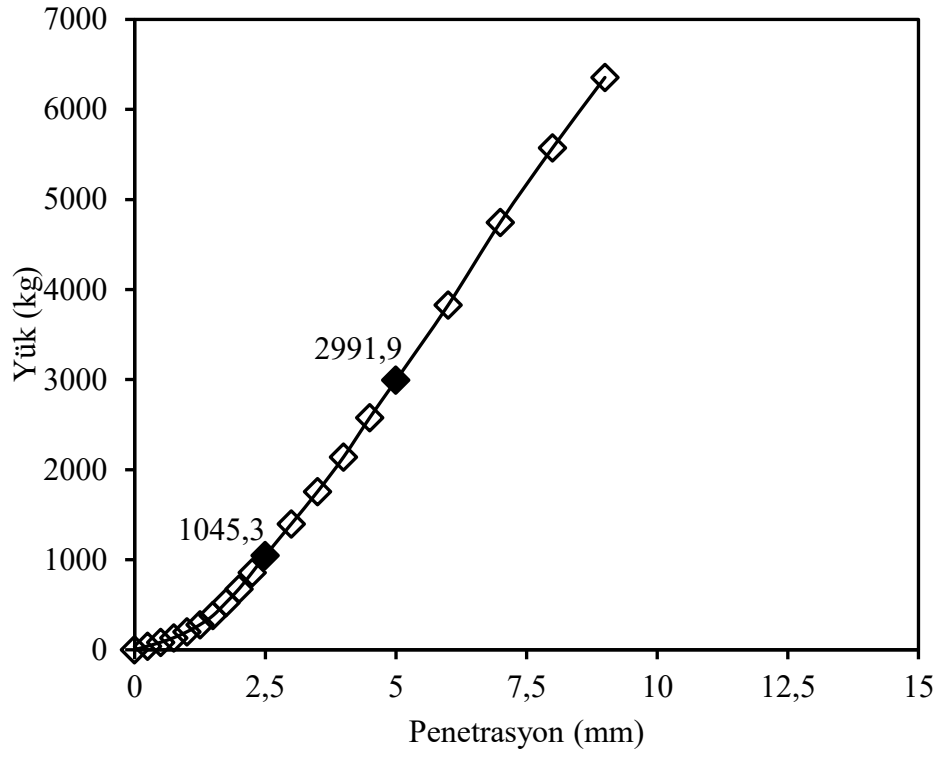
Şekil B4. T4 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu



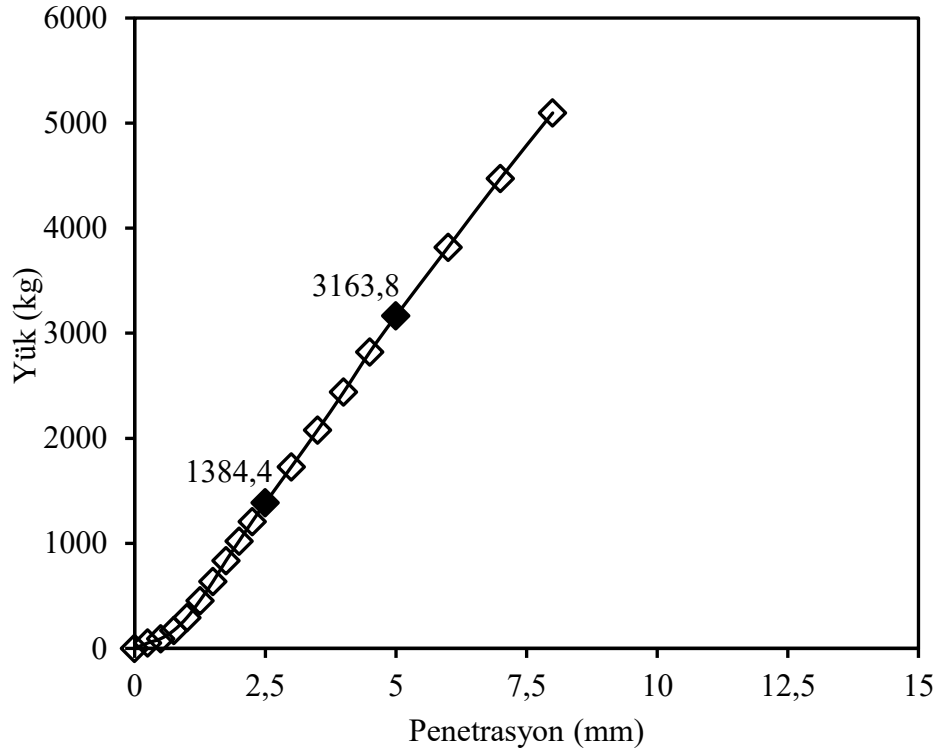
Şekil B5. T5 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu



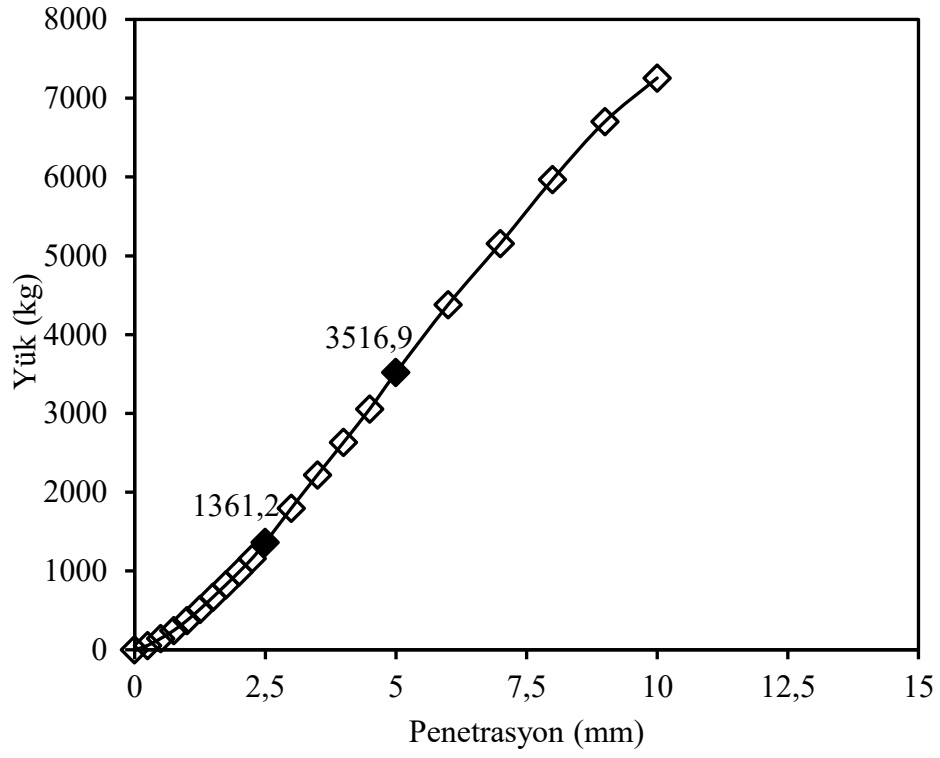
Şekil B6. T6 nolu numuneye ait geopolimer olmayan CBR deney sonucu



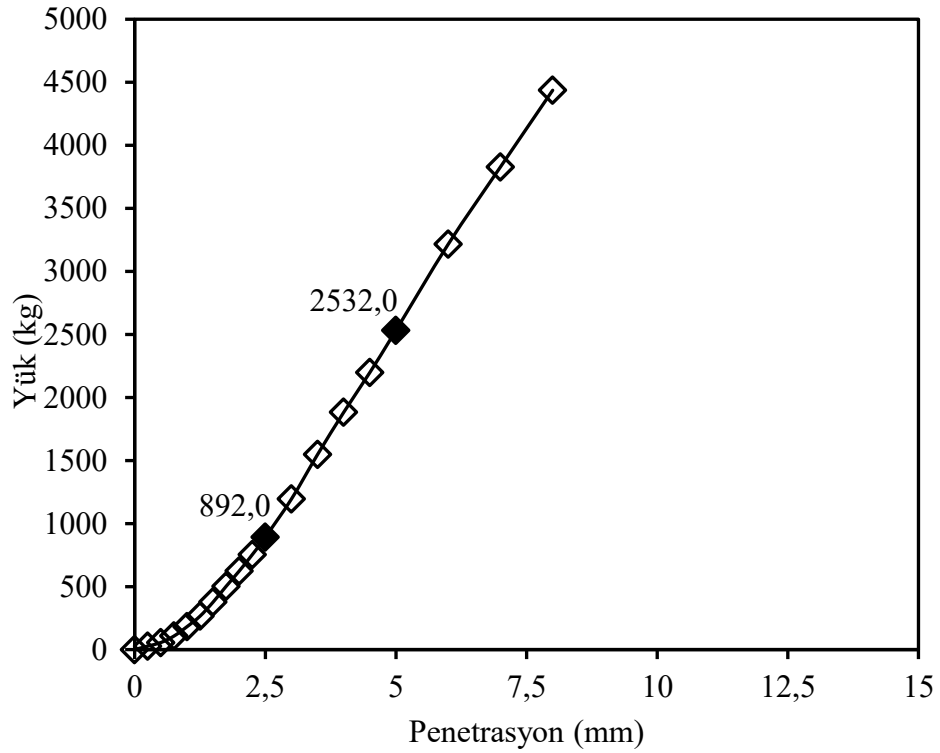
Şekil B7. T4 nolu numuneye ait 1 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



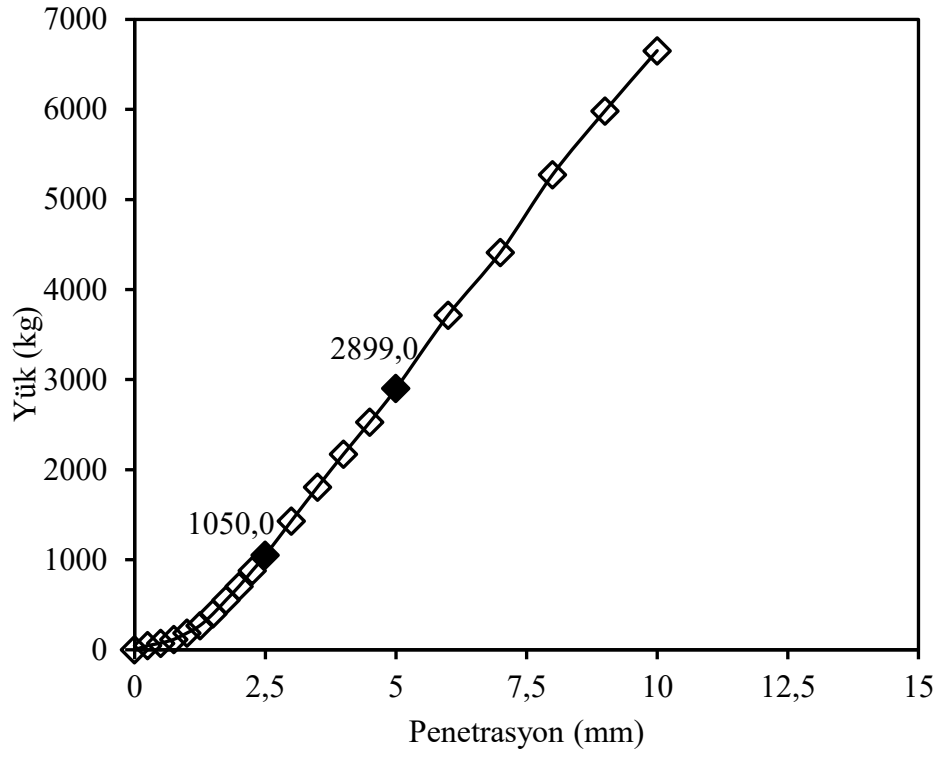
Şekil B8. T5 nolu numuneye ait 1 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



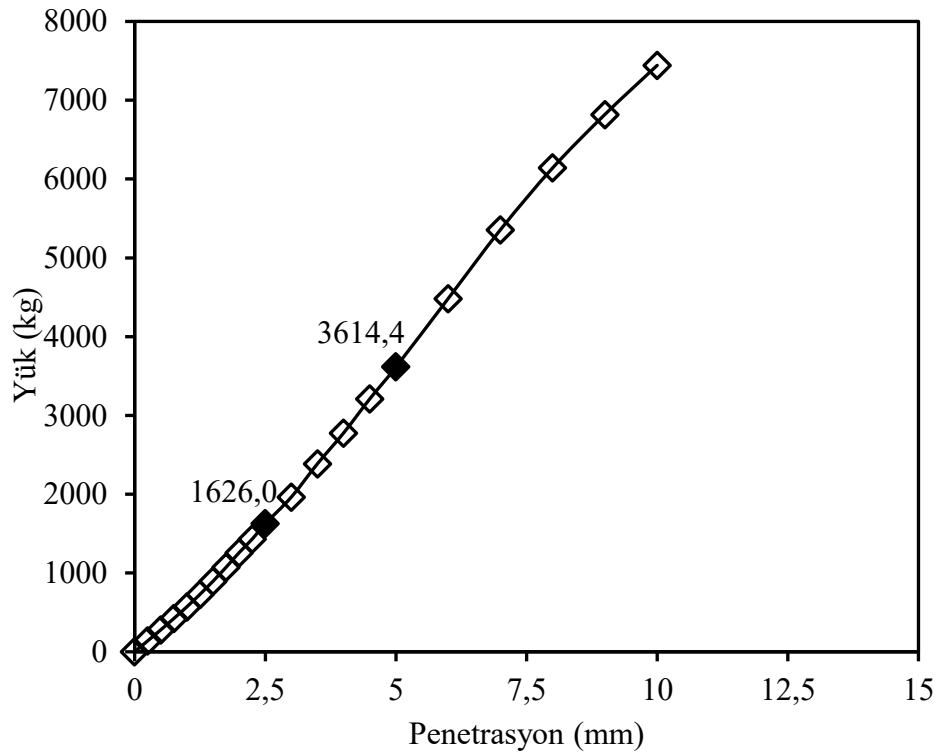
Şekil B9. T6 nolu numuneye ait 1 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



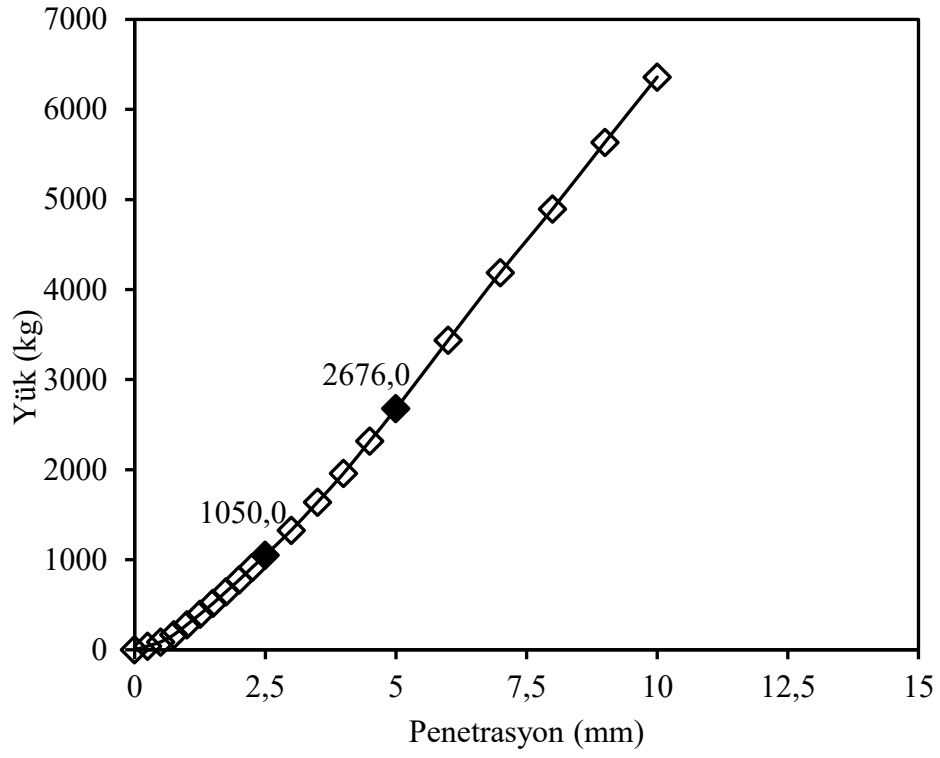
Şekil B10. T4 nolu numuneye ait 2 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



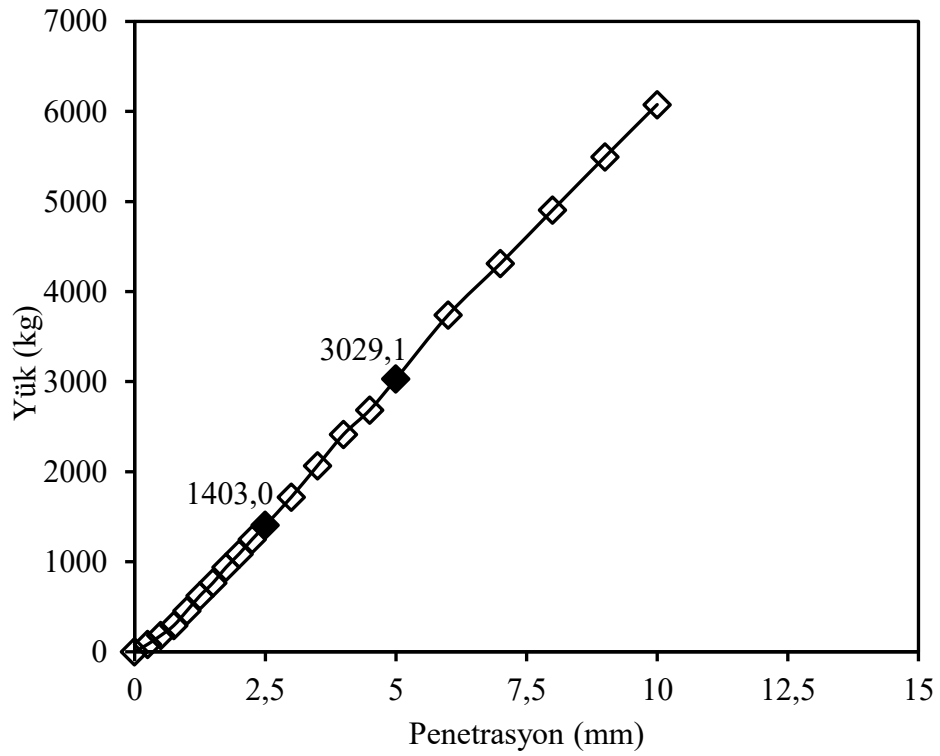
Şekil B11. T5 nolu numuneye ait 2 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



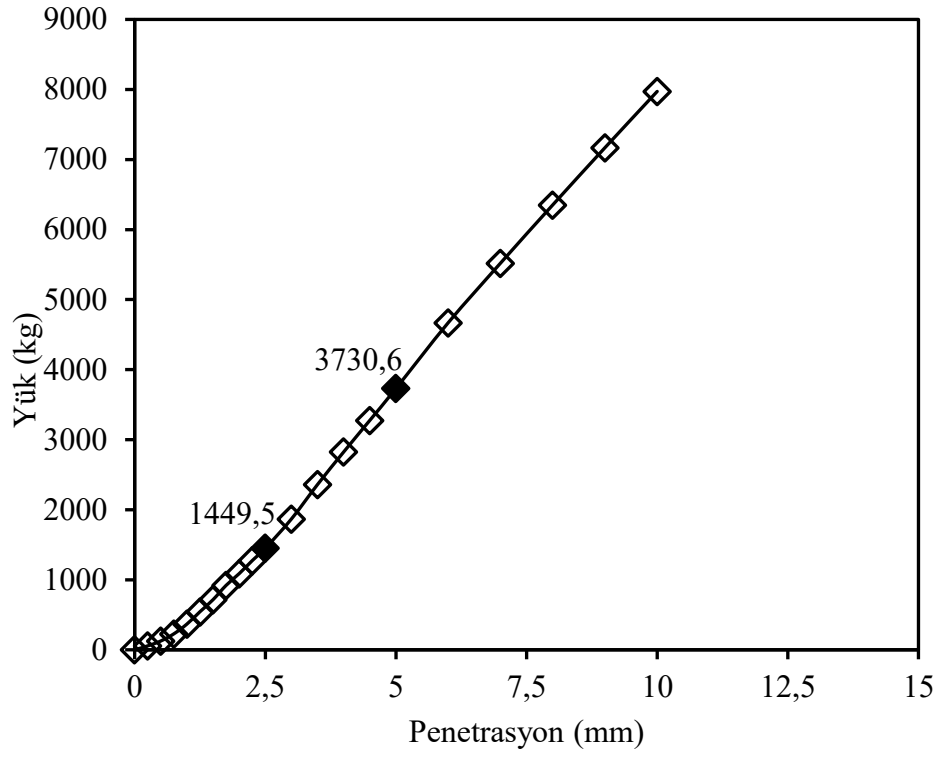
Şekil B12. T6 nolu numuneye ait 2 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



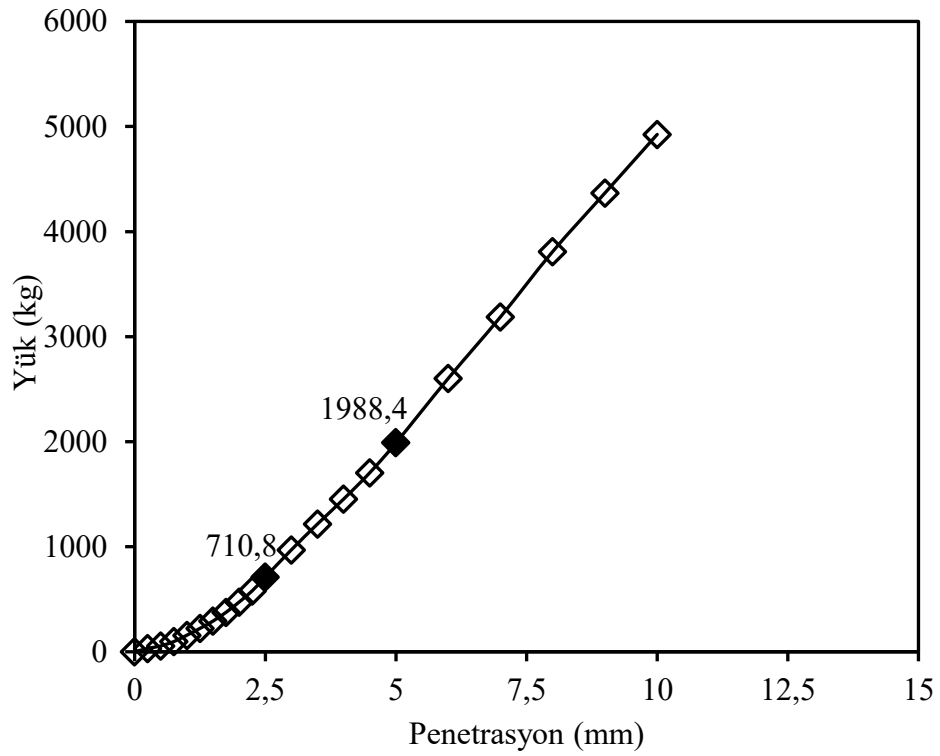
Şekil B13. T4 nolu numuneye ait 3 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



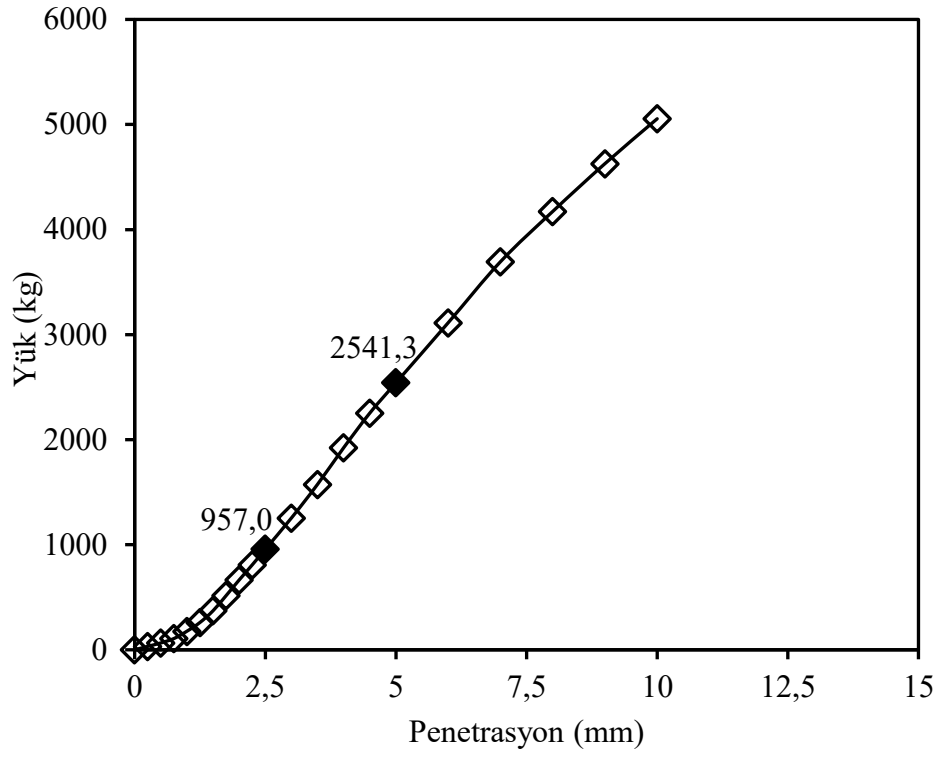
Şekil B14. T5 nolu numuneye ait 3 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



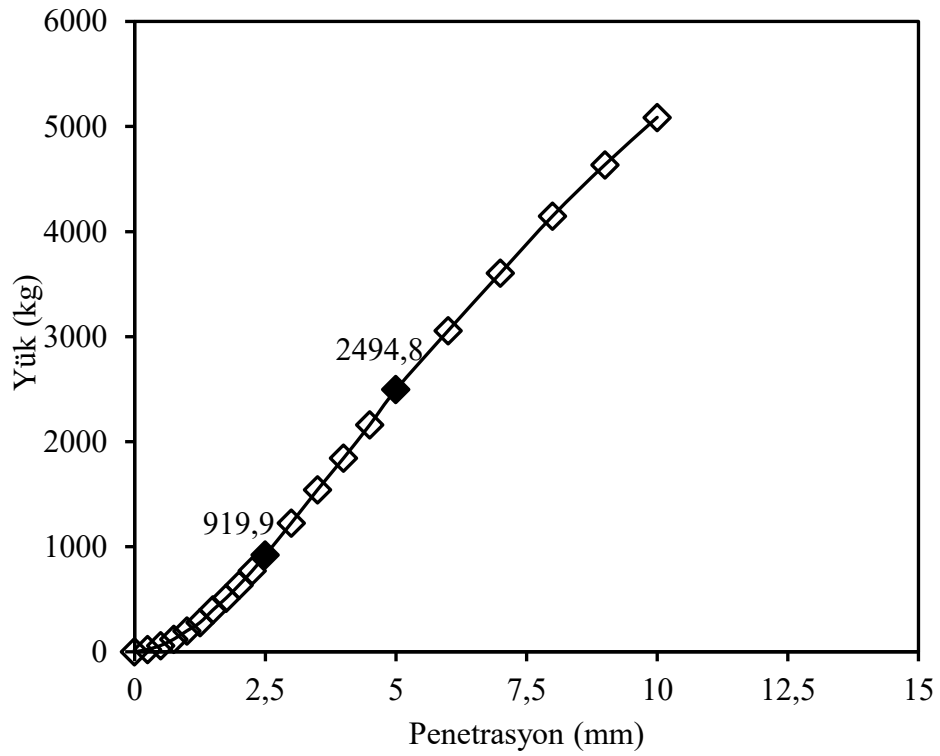
Şekil B15. T6 nolu numuneye ait 3 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



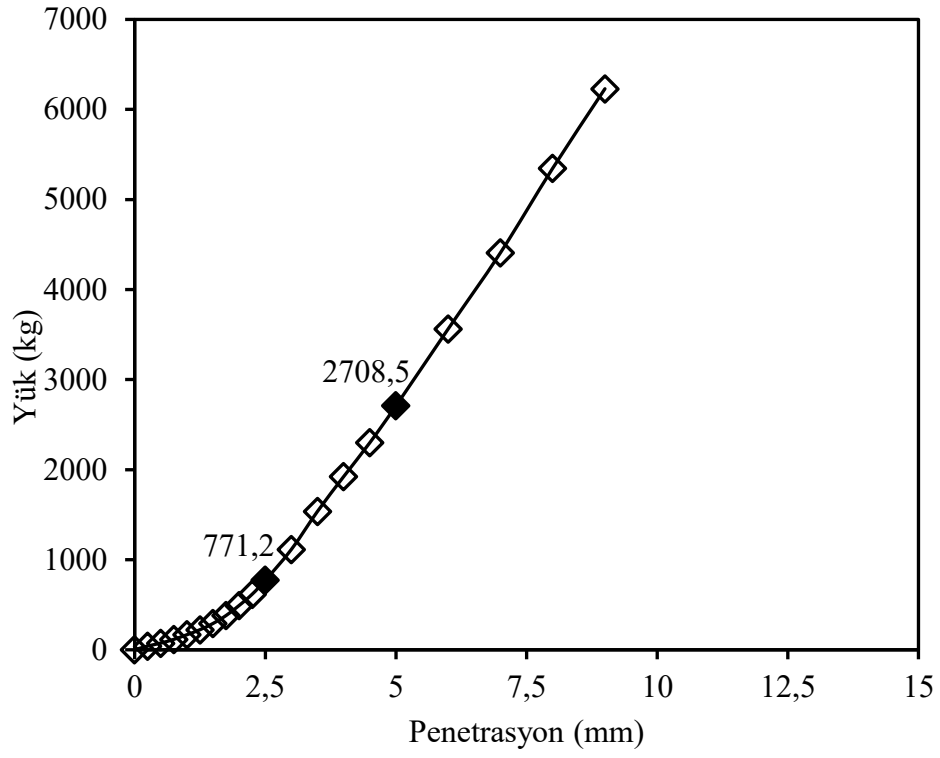
Şekil B16. T1 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu



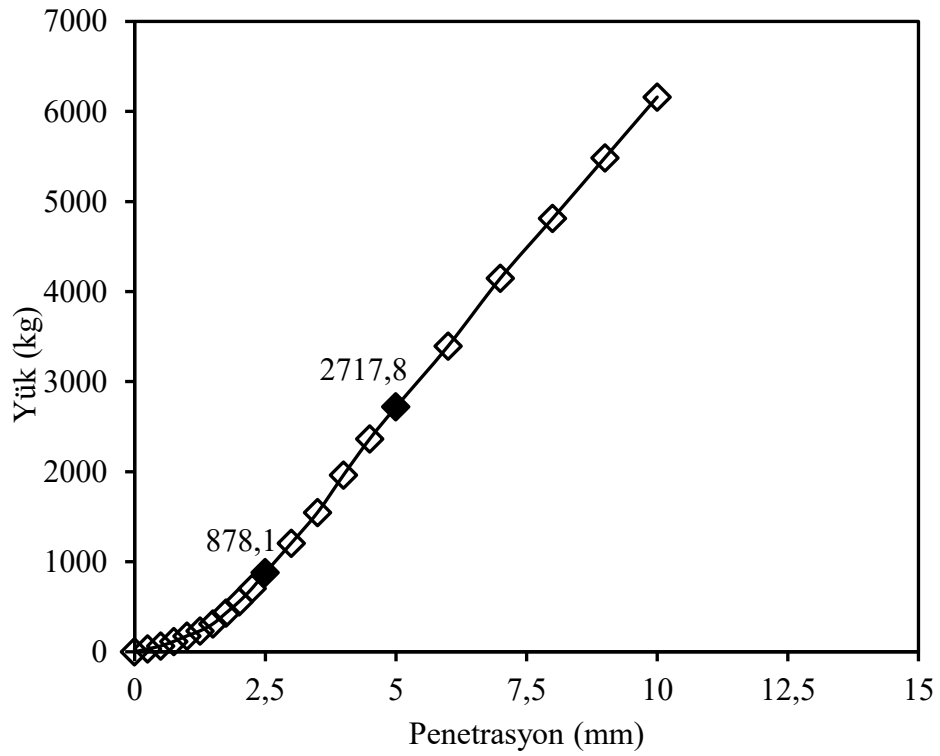
Şekil B17. T2 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu



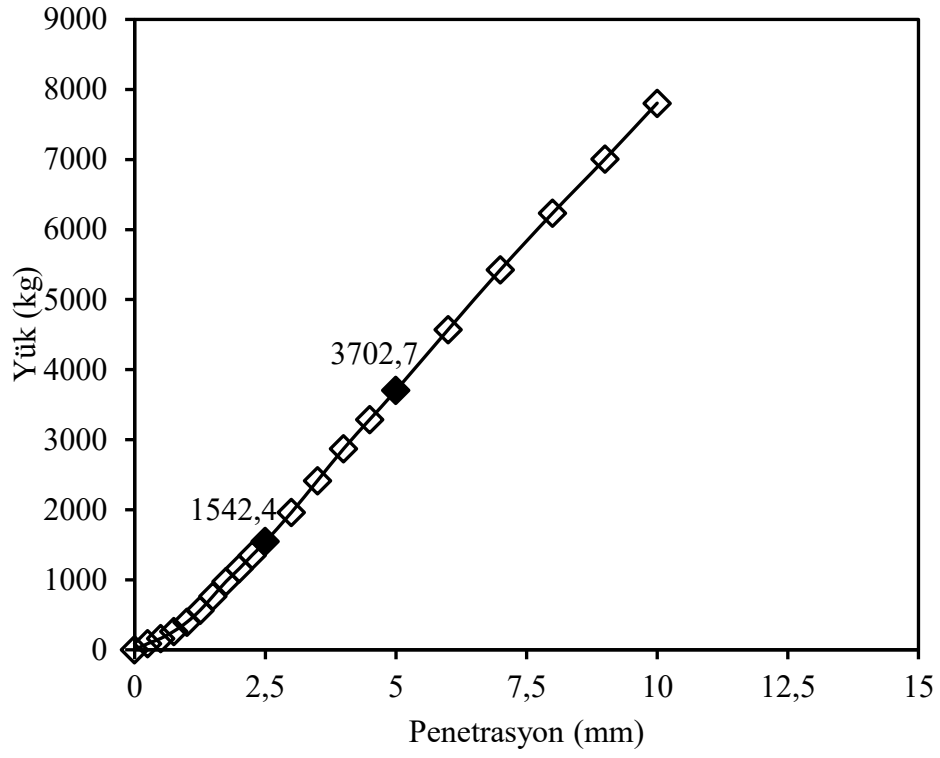
Şekil B18. T3 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu



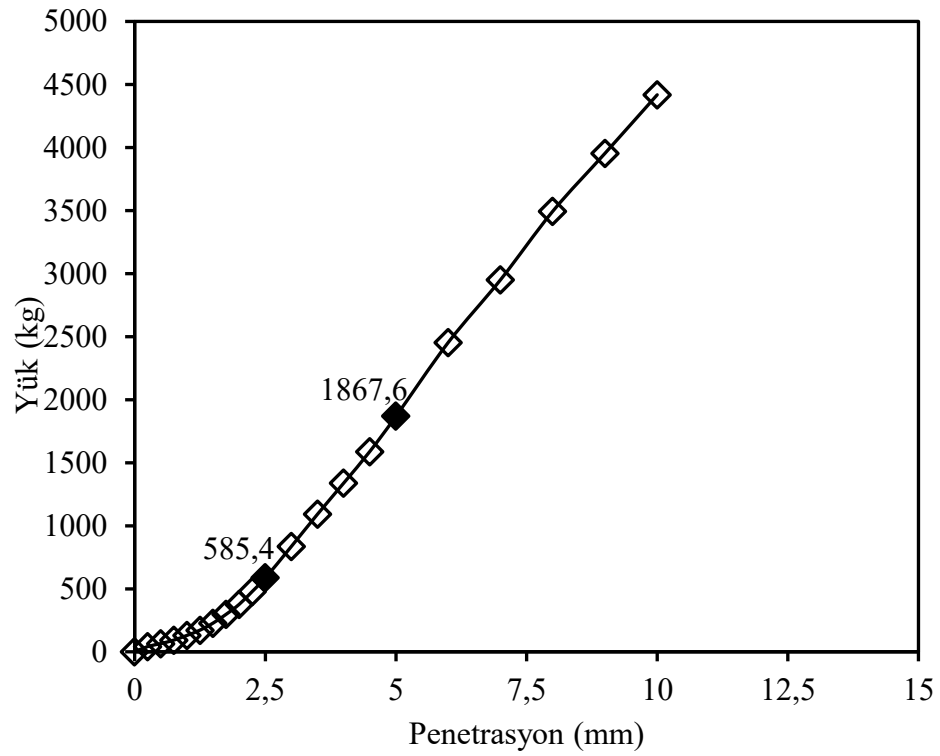
Şekil B19. T4 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu



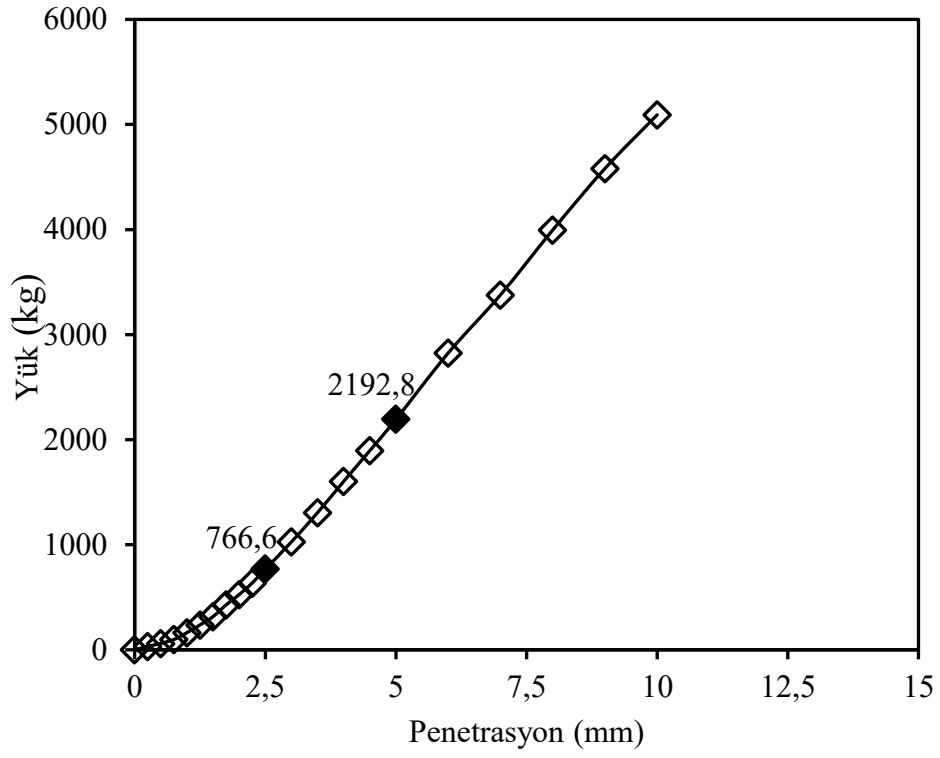
Şekil B20. T5 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu



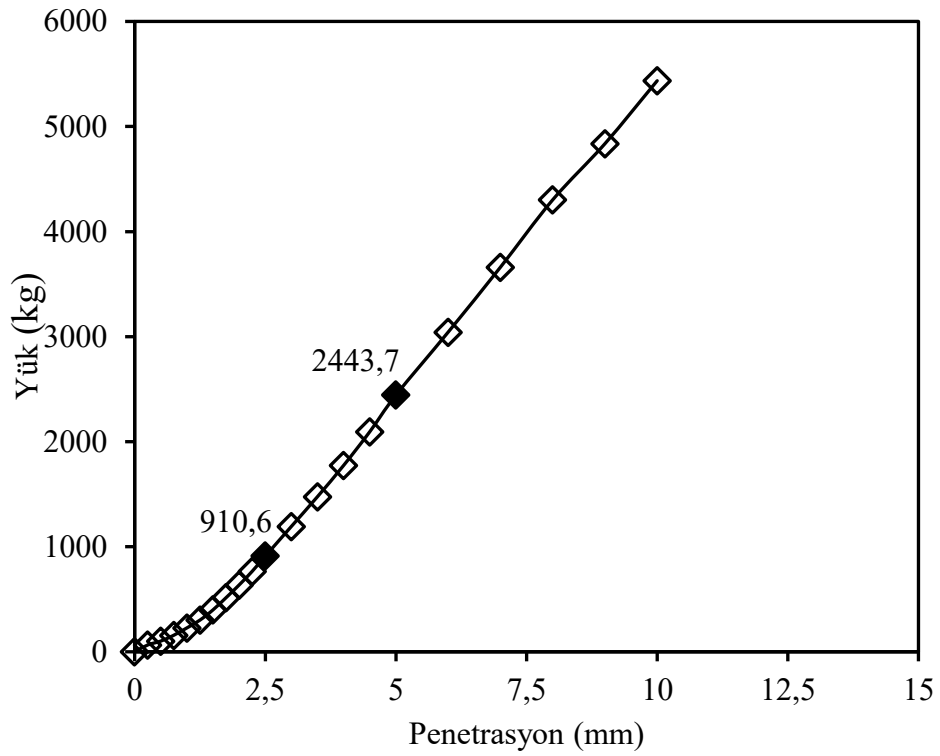
Şekil B21. T6 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 7 gün CBR deney sonucu



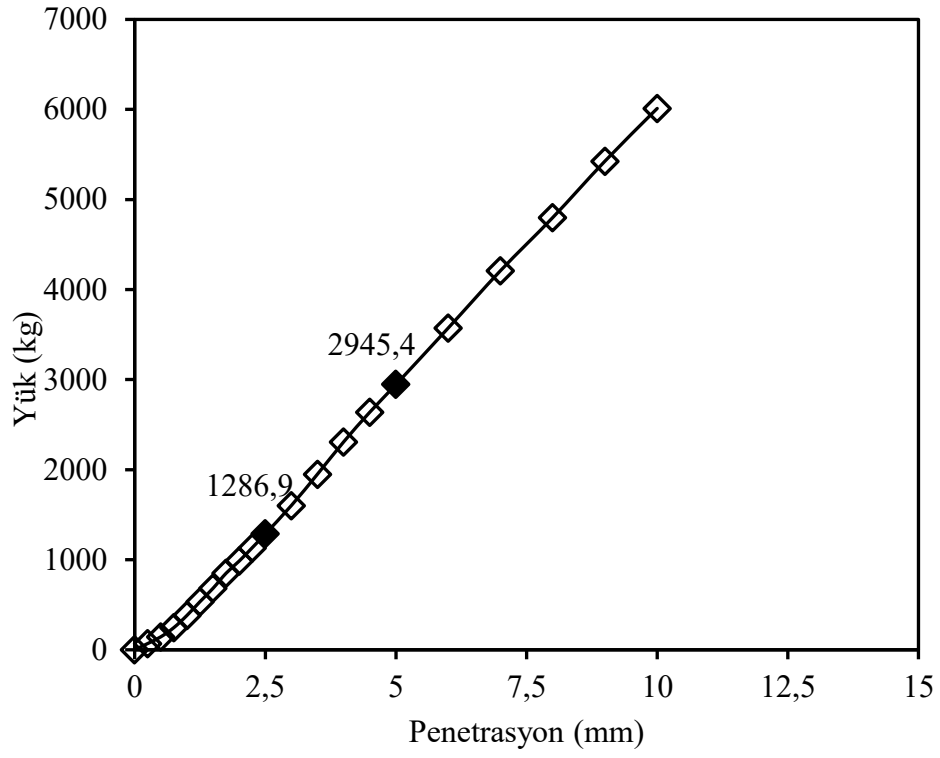
Şekil B22. T1 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



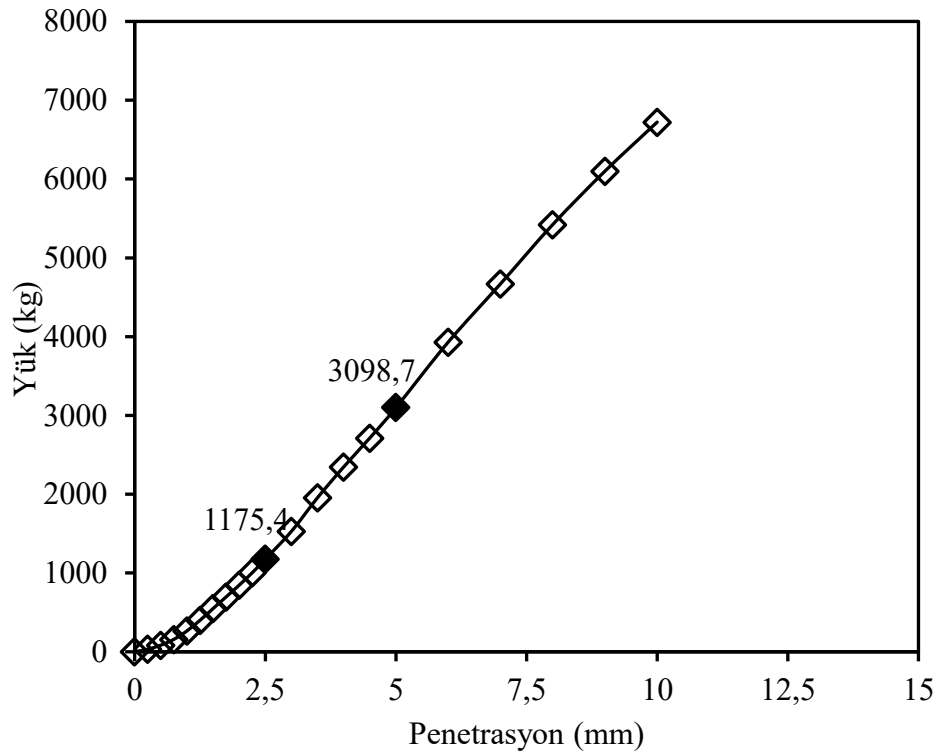
Şekil B23. T2 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



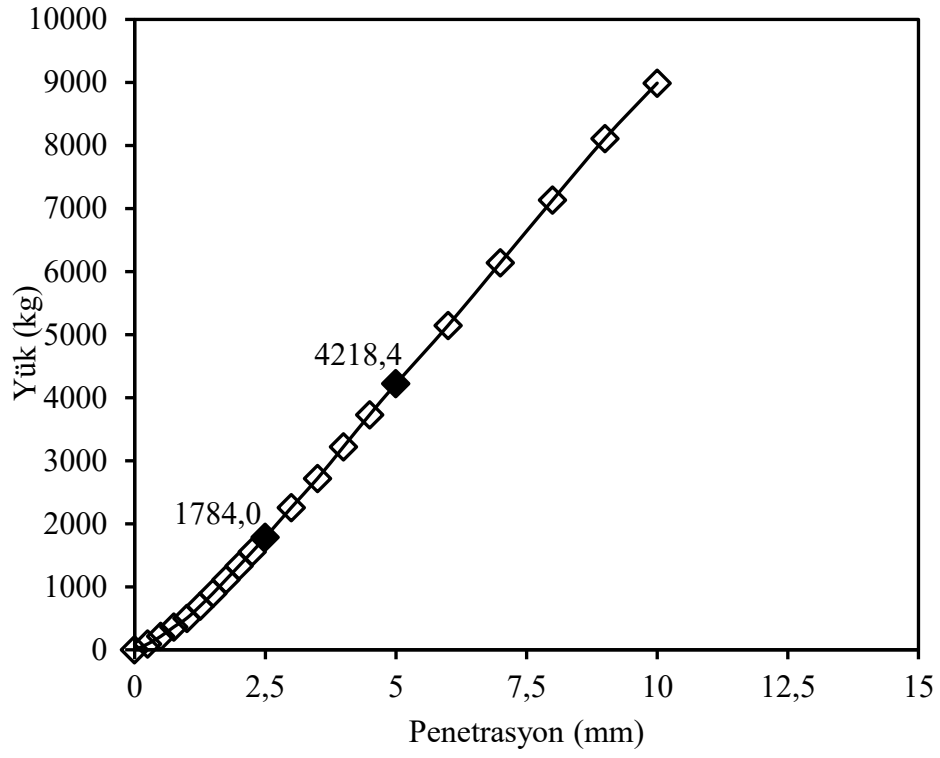
Şekil B24. T3 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



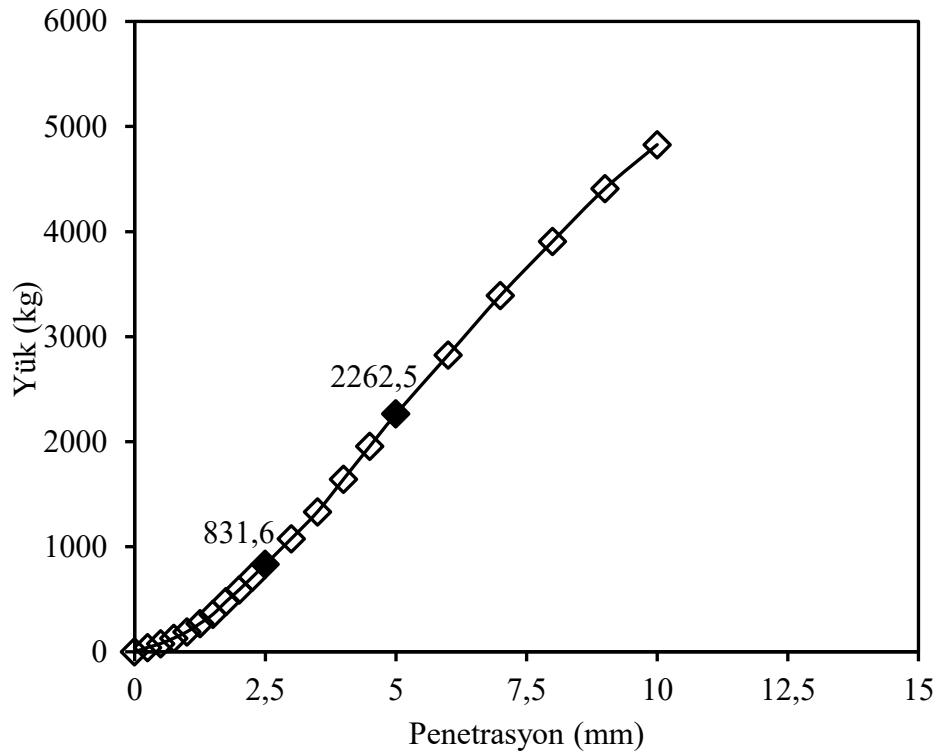
Şekil B25. T4 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



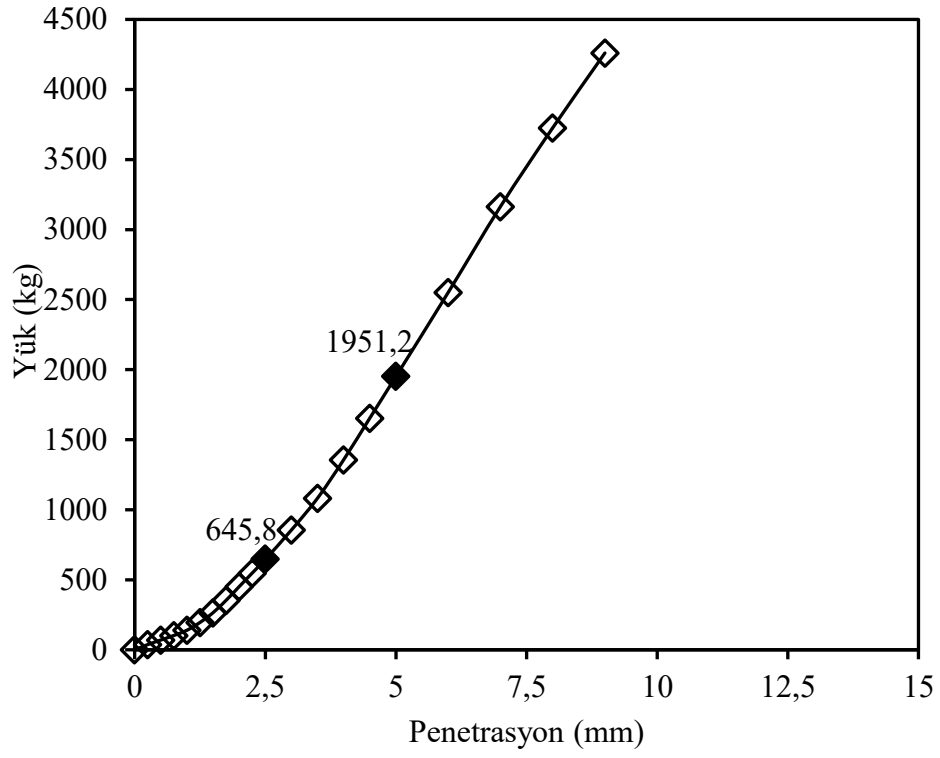
Şekil B26. T5 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



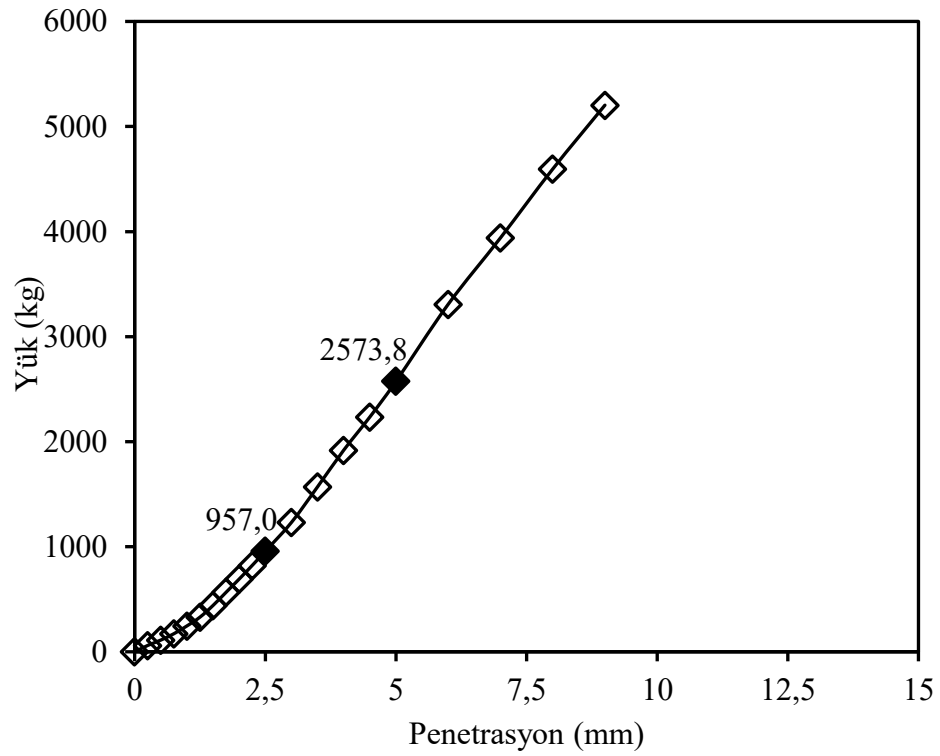
Şekil B27. T6 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 28 gün CBR deney sonucu



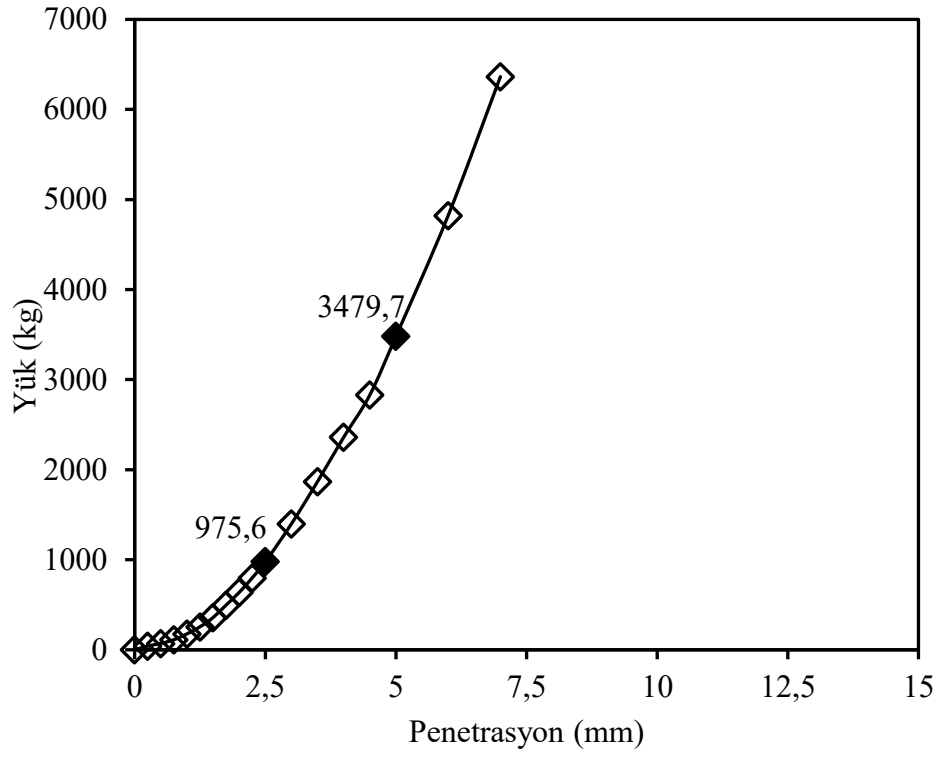
Şekil B28. T1 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu



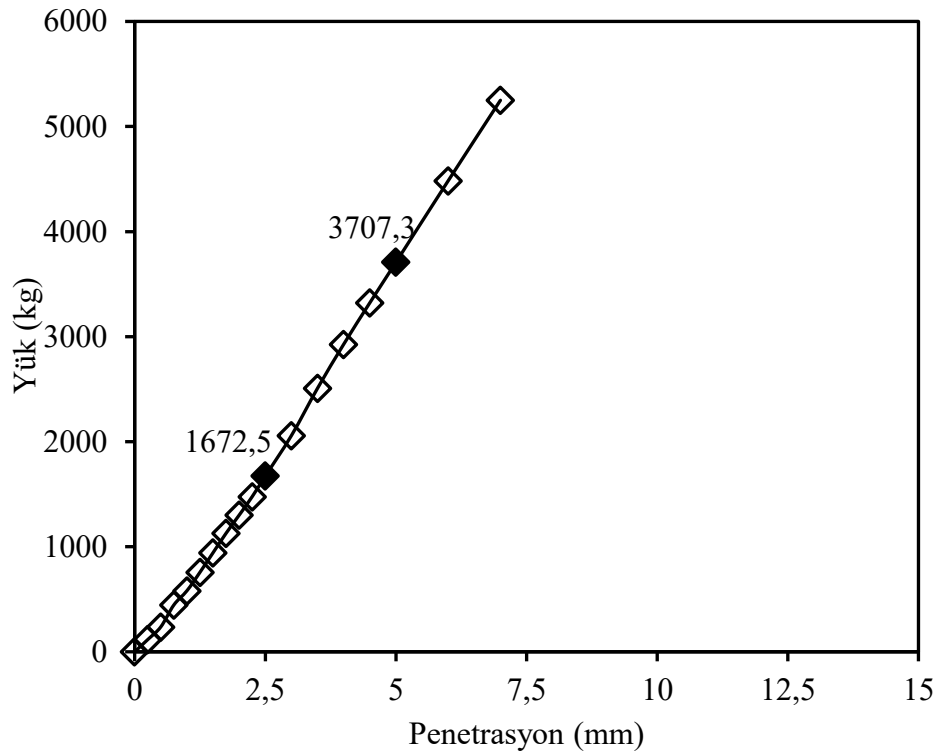
Şekil B29. T2 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu



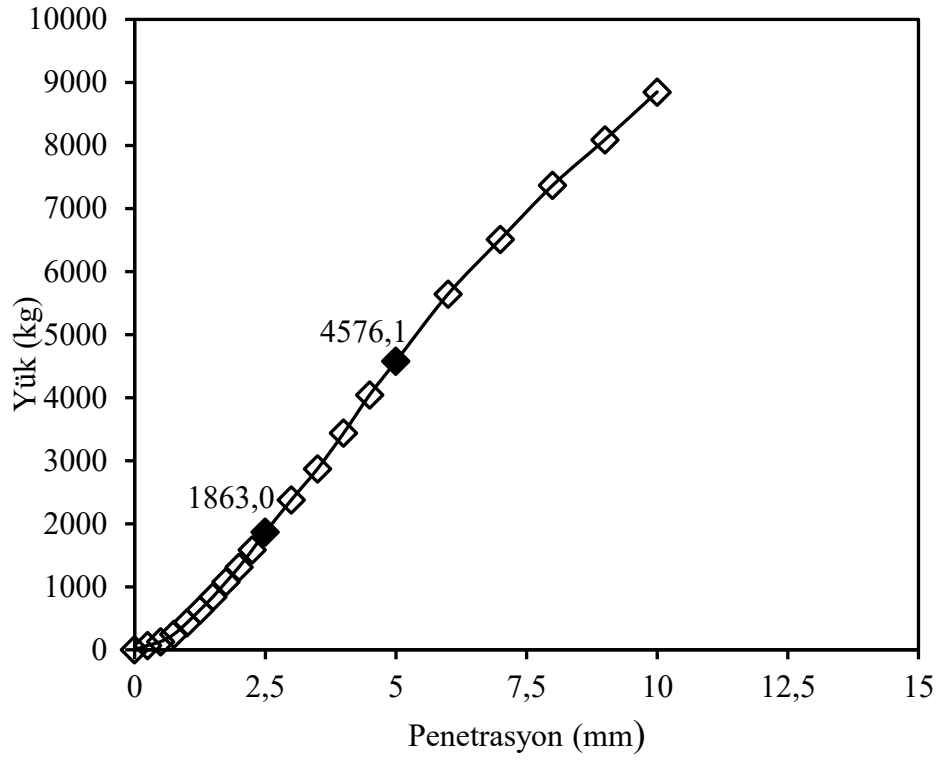
Şekil B30. T3 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu



Şekil B31. T4 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu



Şekil B32. T5 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu



Şekil B33. T6 nolu numuneye ait 4 M NaOH – 91 gün CBR deney sonucu