

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ASİT NÖTRALİZE EDİCİ MALZEMELER KULLANILARAK SÜLFÜRLÜ ATIKLARDAN  
DURAYLI MACUN DOLGU ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Maden Yüksek Mühendisi Tekin YILMAZ**

**NİSAN 2019  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ASİT NÖTRALİZE EDİCİ MALZEMELER KULLANILARAK SÜLFÜRLÜ ATIKLARDAN  
DURAYLI MACUN DOLGU ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Maden Yüksek Mühendisi Tekin YILMAZ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**  
**"DOKTOR (MADEN MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 / 04 / 2019**

**Tezin Savunma Tarihi : 30 / 04 / 2019**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI**

**Trabzon 2019**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Tekin YILMAZ Tarafından Hazırlanan**

**ASİT NÖTRALİZE EDİCİ MALZEMELER KULLANILARAK SÜLFÜRLÜ  
ATIKLARDAN DURAYLI MACUN DOLGU ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09 /04 /2019 gün ve 1799 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
DOKTORA TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

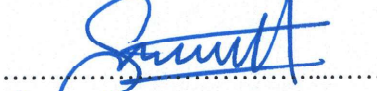
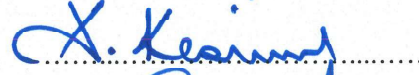
**Başkan : Prof. Dr. Turgay ONARGAN**

**Üye : Prof. Dr. Emel ABDİOĞLU YAZAR**

**Üye : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL**

**Üye : Doç. Dr. Gülşen TOZSİN**

**Üye : Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI**



**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

"Asit Nötralize Edici Malzemeler Kullanılarak Sülfürlü Atıklardan Duraylı Macun Dolgu Üretiminin Araştırılması" başlıklı çalışma, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar, KTÜ Maden Mühendisliği Bölümü, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) Ar-Ge Laboratuvarları ve ACME Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir. Tez konusunun belirlenmesi, çalışmaların yürütülmesi ve sonuçlandırılmasına kadar her aşamada bilgi, destek ve değerli görüşlerinden yararlandığım danışman hocam Sayın Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalar boyunca bana sürekli vakit ayıran, öneri, destek, yardım ve yapıcı eleştirilerini esirgemeyen, beni yönlendiren tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Ayhan KESİMAL'a ve Prof. Dr. Emel ABDİOĞLU YAZAR'a ve tez savunma sınavım için İzmir ve Erzurum'dan gelerek beni onurlandıran Sayın Prof. Dr. Turgay ONARGAN'a ve Sayın Doç. Dr. Gülşen TOZSİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bilgi, tecrübe ve her türlü desteklerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Hacı DEVECİ'ye, Sayın Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR'e ve Sayın Doç. Dr. E. Yener YAZICI'ya çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen değerli çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Taha BOYRAZ'a, Arş. Gör. Elif YILMAZ'a, Arş. Gör. Fırat AHLATCI'ya, Arş. Gör. Ercüment KOÇ'a ve Arş. Gör. Dr. Özüm YAŞAR'a çok teşekkür ederim. Bu çalışmayı yapmam için malzeme (yüksek fırın cürufu, C-sınıfı uçucu kül, Kireçtaşı ve Portland çimentosu) desteği sağlayan Kardemir Demir-Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye, Afşin Elbistan Termik Santrali İşletmesi'ne ve Aşkale Çimento A.Ş. Trabzon Çimento Fabrikası'na teşekkür ederim. Bu çalışma, 217M025 No'lu TÜBİTAK 3001-Başlangıç Ar-Ge Projesi ve FDK 2016-5500 No'lu KTÜ BAP 06-Lisansüstü Tez Projesi (Doktora) tarafından desteklenmiştir.

Tez çalışmamı, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anneme, babama, ağabeyime, kız kardeşime ve özellikle yeterince vakit ayıramadığım, varlıkları ve sevgileri ile bana güç veren sevgili eşime ve doğacak oğluma ithaf ediyorum.

Tekin YILMAZ  
Trabzon, 2019

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

"Doktora Tezi" olarak sunduğum "Asit Nötralize Edici Malzemeler Kullanılarak Sülfürlü Atıklardan Duraylı Macun Dolgu Üretimini Araştırılması" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 30/04/2019

  
Tekin YILMAZ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Gerekçesi.....	2
1.3. Tezin Özgün Değeri .....	3
1.4. Tezin Amacı .....	5
1.5. Çimentolu Macun Dolgu Yöntemi .....	5
1.5.1. Dayanım ve Duraylılık .....	8
1.5.2. Asit ve Sülfat Etkisi.....	9
1.6. Asit Nötralizasyon Malzemeleri.....	13
1.6.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC) .....	13
1.6.2. Mermer Artığı (MA) .....	18
1.6.3. C-sınıfı Uçucu Kül (C-UK).....	22
1.6.4. Kireçtaşı Artığı (KA) .....	28
1.6.5. İnşaat Yıkıntı Atığı (İYA) .....	32
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	38
2.1. Giriş.....	38
2.2. Atık ve Bağlayıcı Malzeme.....	40
2.3. Asit Nötralizasyon Malzemeleri.....	43
2.3.1. Malzeme Temini ve Boyut Küçültme .....	43
2.3.2. Malzemelerin Karakterizasyonu .....	45
2.4. Asit-Baz Hesaplama Testi (ABH).....	47

2.5.	Atık Malzemenin Reolojik Özellikleri.....	49
2.6.	Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması .....	51
2.7.	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testi .....	53
2.8.	Asit (pH) ve Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) Analizleri .....	53
2.9.	Porozite (MIP) Analizleri.....	55
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA .....	58
3.1.	Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) ÇMD Performansına Etkisi .....	58
3.1.1.	Dayanım ve Duraylılığa Etkisi.....	58
3.1.2.	Asit (pH) ve Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) Oluşumuna Etkisi .....	60
3.1.3.	Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi.....	63
3.2.	Mermer Artığının (MA) ÇMD Performansına Etkisi .....	67
3.2.1.	Dayanım ve Duraylılığa Etkisi.....	67
3.2.2.	Asit (pH) ve Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) Oluşumuna Etkisi .....	69
3.2.3.	Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi.....	72
3.3.	C-sınıfı Uçucu Külün (C-UK) ÇMD Performansına Etkisi.....	74
3.3.1.	Dayanım ve Duraylılığa Etkisi.....	74
3.3.2.	Asit (pH) ve Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) Oluşumuna Etkisi .....	77
3.3.3.	Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi.....	81
3.4.	Kalsitik Kireçtaşının (KK) ÇMD Performansına Etkisi .....	84
3.4.1.	Dayanım ve Duraylılığa Etkisi.....	84
3.4.2.	Asit (pH) ve Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) Oluşumuna Etkisi .....	87
3.4.3.	Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi.....	90
3.5.	Dolomitik Kireçtaşının (DK) ÇMD Performansına Etkisi.....	94
3.5.1.	Dayanım ve Duraylılığa Etkisi.....	94
3.5.2.	Asit (pH) ve Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) Oluşumuna Etkisi .....	96
3.5.3.	Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi.....	99
3.6.	İnşaat Yıkıntı Atığının (İYA) ÇMD Performansına Etkisi .....	102
3.6.1.	Dayanım ve Duraylılığa Etkisi.....	102
3.6.2.	Asit (pH) ve Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) Oluşumuna Etkisi .....	105
3.6.3.	Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi.....	107
4.	SONUÇLAR .....	111
5.	ÖNERİLER.....	115
6.	KAYNAKLAR.....	116

7. EKLER.....	129
ÖZGEÇMİŞ.	





Doktora Tezi

ÖZET

ASİT NÖTRALİZE EDİCİ MALZEMELER KULLANILARAK SÜLFÜRLÜ  
ATIKLARDAN DURAYLI MACUN DOLGU ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Tekin YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI  
2019, 128 Sayfa, 8 sayfa ek

Bu tez çalışmasında, asit nötralizasyon potansiyeli (ANP) bulunan malzemeler kullanılarak sülfürlü maden atıklarından duraylı macun dolgu üretimi araştırılmıştır. Bu amaçla, ANP bulunan 6 farklı malzeme (yüksek fırın cürufu (YFC), mermer artığı (MA), C-sınıfı uçucu kül (C-UK), kalsitik kireçtaşı (KK), dolomitik kireçtaşı (DK) ve inşaat yıkıntı atığı (İYA)) sülfürce zengin (%15,82 S<sup>2-</sup>) maden atığı yerine %5-15 kullanılarak %7,5-8,5 bağlayıcı oranında toplam 581 adet ÇMD numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler 7-360 günlük kür süresi boyunca tek eksenli basınç dayanımı (TEBD), asit (pH) ve sülfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) analizine ve 28-180 gün sonunda porozite (MIP) testine tabi tutulmuştur. Ayrıca, ANP bulunan 6 farklı malzemenin kullanımı ile üretilen 1,0 m<sup>3</sup> ÇMD karışımındaki bağlayıcı tasarrufu miktarları değerlendirilmiştir. Bulgular değerlendirildiğinde, ANP bulunan malzemelerin ikame edilmesiyle bağlayıcı oranı ve kür süresinden bağımsız olarak 5,19 kata kadar daha yüksek TEBD, %14-54 oranında daha yüksek pH değerlerine (daha düşük asit üretimi), %72,1 oranına kadar daha düşük sülfat iyonu salınımına ve %12,43'e kadar daha düşük poroziteye sahip ÇMD üretimi sağlanmıştır. 1,0 m<sup>3</sup> ÇMD üretiminde bağlayıcı oranı %7,5'e düşürülüp sülfürlü atık malzeme yerine %15 asit nötralizasyon malzemesi ikame edildiğinde %12,0-15,1 arasında değişen oranlarda bağlayıcı tasarrufu sağlanacağı öngörülürken kontrol numunesine (%15,92) kıyasla uzun dönemde (90-360 gün) yaşanan dayanım kaybı %8,90'a kadar azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Macun dolgu, Sülfürlü atık, Endüstriyel atık/artık, Asit nötralizasyon malzemesi, Basınç dayanımı, Asit-sülfat etkisi, Porozite

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE DURABLE PASTE BACKFILL PRODUCTION FROM  
SULPHIDE TAILINGS USING ACID NEUTRALISATION MATERIALS

Tekin YILMAZ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mining Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bayram ERÇIKDI  
2019, 128 Pages, 8 Appendix pages

In this thesis study, the durable cemented paste backfill (CPB) production from sulphide mine tailings using the materials having acid neutralization potential (ANP) was investigated. For this purpose, a total of 581 CPB samples were prepared using six different materials having ANP (blast furnace slag (BFS), marble waste (MW), class-C fly ash (C-FA), calcitic limestone (CL), dolomitic limestone (DL) and construction and demolition waste (CDW)) as partial replacement (5-15% by weight) to sulphide tailings (15.82%  $S^{2-}$ ). These samples were subjected to the unconfined compressive strength (UCS) test, acid and sulphate analyses during 7-360 days of curing period and the porosity (MIP) test at the end of 28-180 days. The amounts of binder saving in the CPB mixtures of 1.0 m<sup>3</sup> produced with utilization of six different materials having ANP were also performed. When the findings were examined, the producing of CPB having up to 5.19 fold higher UCS, 14-54% higher pH values (lower amount of acid producing), 72.1% lower sulphate ion release and 12.43% lower porosity were obtained with replacing the materials having ANP, irrespective of the binder dosages and curing periods. When 15 wt.% (by weight) acid neutralisation material to sulphide tailings was replaced to produce 1.0 m<sup>3</sup> CPB at 7.5 wt.% of binder dosage, it is foreseen that the binder savings varying at the rate of 12.0-15.1% can be provided, whilst, the loss of strength at long-term (90-360 days) was decreased up to 8.90% in comparison with control samples (15.92%).

**Keywords:** Paste backfill, Sulphide tailings, Industrial waste, Acid neutralizing material, Compressive strength, Acid-sulphate effect, Porosity

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1. Asit maden drenajı (AMD) sonucu çevrenin genel görünümü (URL-1, 2017)..	1
Şekil 1.2. ÇMD'nin ana bileşenlerini gösteren şematik diyagram .....	7
Şekil 1.3. ÇMD'nin yeraltı üretim boşluklarındaki işlevi (Ercikdi vd., 2017)..	8
Şekil 1.4. Yüksek fırının görünümü (Özdemir ve Öz Saraç, 2015) .....	13
Şekil 1.5. Normal (a,c) ve şlam uzaklaştırılmış (b,d) atık ile hazırlanan ÇMD'de asit (a,b) ve sülfat oluşumu (c,d) (Cihangir ve Akyol, 2018).....	17
Şekil 1.6. Yerüstünde depolanan mermer atıklarının görünümü .....	19
Şekil 1.7. GMA (a) ve BMA (b) ilavesinin ÇMD dayanım ve duraylılığına etkisi (Ercikdi vd., 2015).....	22
Şekil 1.8. Uçucu kül üretiminin görünümü (URL-4, 2018).....	22
Şekil 1.9. UK'nın tane şekilleri; küresel (a), boşluklu küreler (b), mineral agrega (c) ve düzensiz şekilli (d) (Xu ve Shi, 2018) .....	23
Şekil 1.10. Yatağan (a) ve Afşin-Elbistan (b) termik santrali atık depolama sahaları (Başar vd., 2016).....	25
Şekil 1.11. Kireçtaşlarının genel görünümü .....	29
Şekil 1.12. Kireçtaşı ilavesinin pH değişimine etkisi (Mylona vd., 2000).....	30
Şekil 1.13. İYA'nın görünümü (a) ve genel bileşenleri (b) (Özalp vd., 2016).....	33
Şekil 2.1. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların şematik gösterimi.....	40
Şekil 2.2. Atık malzemelerin varillere doldurularak tesis çıkışından alınması.....	41
Şekil 2.3. Pirit atığın TBD (a) ve XRD profilinin (b) görünümü .....	42
Şekil 2.4. MA (a,d), KK (b,e) ve DK'nın (c,f) çeneli kırıcı öncesi (a,b,c) ve sonrası (d,e,f) görüntüleri .....	44
Şekil 2.5. İYA'nın çeneli kırıcı öncesi (a,b,c) ve sonrası (d,e,f) görüntüleri; beton-agrega karışımı (a,d), beton-tuğla-kiremit karışımı (b,e) ve harç-tuğla-beton karışımı (c,f) .....	44
Şekil 2.6. Öğütme sonrası asit nötralizasyon malzemelerinin görünümü.....	45
Şekil 2.7. Asit nötralizasyon malzemelerinin tane boyutu dağılımları.....	46
Şekil 2.8. ABH test süreci; numunenin tartımı (a), asit eklenmesi (b), süspansiyonun ısıtılması (c) ve titrasyon işlemi (d) .....	48
Şekil 2.9. Atığın akışkanlık konisine doldurulması (a), koninin sabit hızla kaldırılması (b) ve akışkanlık değerinin ölçümü (c).....	50

Şekil 2.10. Deneysel çalışmalarda kullanılan atık malzemenin katı oranı-akışkanlık değeri değişimi.....	50
Şekil 2.11. ÇMD numunelerinin hazırlık süreci; mikserde karıştırma (a), kalıplara doldurma (b), drenaj işlemi (c) ve kür işlemi (d).....	51
Şekil 2.12. Deney için hazırlanmış numuneler (a) ve TEBD test cihazı (b).....	53
Şekil 2.13. Numunelerin rendelenmesi (a), cam behere doldurulması (b) ve nem içeriklerinin tayini (c) .....	54
Şekil 2.14. Numunelerin kapalı bir şekilde bekletilmesi (a), filtre yardımıyla süzülmesi (b), pH (c) ve sülfat içeriği ölçümlerinin yapılması (d) .....	55
Şekil 2.15. MIP cihazı (a), AB ünitesi (b) ve YB ünitesinin (c) görünümü .....	56
Şekil 3.1. YFC ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi .....	59
Şekil 3.2. YFC ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi .....	60
Şekil 3.3. Kontrol (a), %5 YFC (b) ve %15 YFC (c) ikameli numunelerin 180 gün sonundaki görünüşleri .....	62
Şekil 3.4. YFC ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) konsantrasyonuna etkisi .....	63
Şekil 3.5. YFC ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi .....	64
Şekil 3.6. MA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi .....	68
Şekil 3.7. MA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi .....	70
Şekil 3.8. MA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) konsantrasyonuna etkisi .....	71
Şekil 3.9. MA ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi .....	73
Şekil 3.10. C-UK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi .....	77
Şekil 3.11. C-UK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi .....	78
Şekil 3.12. Kontrol (a), %5 C-UK (b) ve %15 C-UK (c) ikameli numunelerin 180 gün sonundaki görünüşleri .....	79
Şekil 3.13. C-UK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) konsantrasyonuna etkisi .....	80
Şekil 3.14. C-UK ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi .....	82
Şekil 3.15. KK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi .....	86

Şekil 3.16. KK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi .....	88
Şekil 3.17. Kontrol (a), %5 KK (b) ve %15 KK (c) ikameli numunelerin 180 gün sonundaki görünüşleri .....	88
Şekil 3.18. KK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) konsantrasyonuna etkisi .....	89
Şekil 3.19. KK ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi .....	92
Şekil 3.20. DK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi .....	95
Şekil 3.21. DK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi .....	97
Şekil 3.22. DK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) konsantrasyonuna etkisi .....	98
Şekil 3.23. DK ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi .....	100
Şekil 3.24. İYA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi .....	104
Şekil 3.25. İYA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi .....	106
Şekil 3.26. İYA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) konsantrasyonuna etkisi .....	107
Şekil 3.27. İYA ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi .....	108

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. ÇMD'nin mekanik özelliklerini etkileyen faktörler (Ercikdi vd., 2017).....	9
Tablo 1.2. Kömür tipine bağlı UK'nın kimyasal bileşimi (Blissett ve Rowson, 2012).....	23
Tablo 1.3. Türkiye'de kömür kullanılan termik santraller .....	25
Tablo 1.4. Kireçtaşlarının sınıflandırılması (Semerci, 2008).....	29
Tablo 1.5. AB üyesi 15 ülkede açığa çıkan ve farklı şekillerde değerlendirilen İYA miktarı (Eurostat, 2015).....	34
Tablo 2.1. ANM kullanılarak hazırlanan ÇMD numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı ve asit-sülfat oluşumu testlerine yönelik deneysel tasarım.....	39
Tablo 2.2. ANM kullanılarak hazırlanan ÇMD numunelerinin mikroyapı (MIP) testlerine yönelik deneysel tasarım .....	39
Tablo 2.3. Atık ve bağlayıcı malzemenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri....	42
Tablo 2.4. PA ve ANM'nin öğütme süreleri, D80 tane boyutları ve <20 µm malzeme miktarları.....	46
Tablo 2.5. ANM'nin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri.....	47
Tablo 2.6. Fışırdaama sınıfı, gerekli asit miktarı ve malzemelerin fışırdaama sınıfı .....	48
Tablo 2.7. PA, YFC, C-UK, MA, KK, DK ve İYA'nın AP, NP ve NNP sonuçları.....	49
Tablo 2.8. ÇMD numunelerinin hazırlanmasında kullanılan deneysel çalışma koşulları .....	52
Tablo 3.1. Kontrol ve YFC ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler .....	66
Tablo 3.2. Kontrol ve MA ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler .....	74
Tablo 3.3. Kontrol ve C-UK ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler .....	84
Tablo 3.4. Kontrol ve KK ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler .....	93
Tablo 3.5. Kontrol ve DK ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler .....	102
Tablo 3.6. Kontrol ve İYA ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler .....	110

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AMD	: Asit maden drenajı
ANM	: Asit nötralizasyon malzemesi
ANP	: Asit nötralizasyon potansiyeli
AP	: Asit potansiyeli
BMA	: Bayburt mermer artığı
$\text{CaCO}_3$	: Kalsiyum karbonat/ kalker/kalsit
$\text{Ca(OH)}_2$	: Kalsiyum hidroksit/Portlandit
$\text{CaO}$	: Kalsiyum oksit
$\text{CaMg(CO}_3)_2$	: Kalsiyum-magnezyum karbonat/dolomit
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	: İkincil alçıtaşı
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	: Trikalsiyum alüminat
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	: Etrenjit
ÇMD	: Çimentolu macun dolgu
GDA	: Geri dönüşüm agregası
GKA	: Geri kazanılmış agregası
GMA	: Gümüşhane mermer artığı
MKA	: Mermer kesim artığı
MOA	: Mermer ocağı artığı
NP	: Nötralizasyon potansiyeli
NNP	: Net nötralizasyon potansiyeli
PÇ/CEM I 42,5R	: Portland çimentosu
PKÇ	: Portland kompoze çimento
SDÇ	: Sülfata dayanıklı çimento
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
$d_{eş}$	: Eşik gözenek çapı
$D_{80}$	: Nihai ürün tane boyutu
$n_{top}$	: Toplam porozite
$n_{Büyük}$	: Büyük boyutlu porozite
$n_{Orta}$	: Orta boyutlu porozite

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Metal madenciliği endüstrisinde flotasyon yöntemiyle bakır (Cu), kurşun (Pb) ve çinko (Zn) gibi metallerin kazanımı sonucunda büyük miktarda ince öğütülmüş (<100µm) ve baskın olarak pirit içeren sülfürce zengin maden atığı üretilmektedir. Bu zararlı atıkların bertaraf edilmesi için doğru düzgün bir atık yönetimi yöntemi seçilmezse ve bu atıklar gelişigüzel depolanırsa, en önemli çevresel problemlerden birisi olan ve en önemli oksidasyon kaynağı olan pirit gibi sülfür içeren minerallerin hava (oksijen) ve nem (su) varlığında oksidasyona uğramasıyla asit maden drenajı (AMD) oluşabilir (Şekil 1.1) (Quispe vd., 2013; Chen vd., 2014; Plante vd., 2014). AMD yüzünden, çok büyük miktarda asit/sülfat ve ağır metallere dönüşen oldukça zararlı bileşenler üretilir ve böylece ekosistem ciddi bir şekilde etkilenirken, insanların ve diğer canlıların sağlıkları açısından tehdit oluşabilir (Karapınar, 2009; Genty vd., 2012).



Şekil 1.1. Asit maden drenajı (AMD) sonucu çevrenin genel görünümü (URL-1, 2017)

Avrupa Birliği Komisyonu, cevher zenginleştirme atıklarının yaklaşık %50-55'inin güvenle yeraltında cevheri alınmış boşluklara (stope) depolanmasını sağlayan ve tavan tahkimatı olarak kullanılabilen çimentolu macun dolgunun (ÇMD) i) atık yönetimi maliyetlerini azaltmak, ii) sülfürlü atıkların nötralizasyon potansiyelini arttırmak, iii) düşük geçirimsizliğe sahip çimentolu ortamda atıkların güvenli bir şekilde depolanmasını sağlamak, iv) cevher kazanım oranını arttırmak ve v) AMD oluşumunu önemli derecede önlemek veya



azaltmak gibi teknik, operasyonel, ekonomik ve çevresel avantajlara sahip olmasından dolayı en uygun atık yönetimi yöntemlerinden birisi olduğunu belirtmiştir (European Commission, 2009; Yılmaz ve Fall, 2017; Ercikdi vd., 2017; Li ve Fall, 2018; Yılmaz vd., 2018).

## 1.2. Tezin Gerekçesi

ÇMD esas olarak ağırlıkça %70-85 katı oranına sahip susuzlandırılmış cevher zenginleştirme atığı (normal veya sınıflandırılmış), ağırlıkça %9'a kadar hidrolik bağlayıcı (sıklıkla normal Portland çimentosu) ve macun kıvamındaki karışımın dolgu tesisinden yeraltındaki üretim açıklıklarına kolayca iletilmesi için gerekli ve yeterli miktarda sudan (taze su ve/veya maden proses suyu) oluşan sertleşmiş malzemedir (Ercikdi vd., 2017; Li ve Fall, 2018; Yılmaz vd., 2018). Macun dolgunun kısa dönemde dayanımının sağlanması ve uzun dönemde duraylılığının korunması için tüm dünyada en yaygın olarak kullanılan bağlayıcı (çimento) tipi, normal Portland çimentosudur (PÇ'dir). Fakat PÇ, sülfürlü atıkların varlığında meydana gelen asit ve sülfat atak sebebiyle oluşan AMD'nin olumsuz etkisinin önlenmesi/azaltılması konusunda dirençsizdir. Bu yüzden yeraltında bulunan üretim açıklıklarına yerleştirilen ÇMD içerisinde PÇ kullanımı özellikle uzun dönemde (>28 gün) dolgu yapısının duraylılığına zarar verebilir (Hassani vd., 2001; Tariq ve Nehdi, 2007; Cihangir vd., 2012; Ercikdi vd., 2015; Yin vd., 2018). Tariq ve Nehdi (2007), Portland çimentosu kullanılarak %52,3 pirit içeriğine sahip atık malzeme ile üretilen ÇMD'nin 180 gün sonunda pH değerinin 12,0'den 4,0'e düştüğünü ve hatta sülfata dayanıklı çimento (SDÇ) kullanımında dahi pH değerinin 6,0'ya kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar sülfürce zengin atıklar ile üretilen ÇMD'de oluşan asitin nötralize edilebilmesi için çimentonun tek başına yeterli olmadığını bildirmişlerdir (Ercikdi ve Yılmaz, 2019). Farklı bağlayıcı (PÇ) oranlarında (%5-7) ÇMD numuneleri hazırlayarak 360 güne kadar asit oluşumunu (pH değişimini) inceleyen Cihangir vd. (2012) ise düşük bağlayıcı oranında (%5) hazırlanan numunelerde pH değerinin oldukça düştüğünü (<6,0) ve oksidasyonun numunenin iç kısmına doğru ilerlediğini, buna karşın, %6-7 bağlayıcı oranında asit oluşumunun nispeten azaldığını (pH> 9,0) bildirmişlerdir. Daha yüksek bağlayıcı oranında (%10) hazırlanan ve başlangıç sülfat içeriğinin (5000-45000 ppm) ÇMD'nin kısa dönem (7, 14 ve 28 gün) dayanım ve mikroyapı gelişimine etkisini araştıran Rong vd. (2017) 5000 ve 35000 ppm sülfat içeriğinin dayanım ve mikroyapı gelişimini

olumlu yönde etkilediğini bildirmişlerdir. Fakat, Dong vd. (2019) 4 farklı başlangıç sülfür içeriğine (%2, %5, %10 ve %15) sahip kurşun-çinko atığı ile yüksek bağlayıcı dozajında (ağırlıkça bağlayıcı/atık= 1/6) hazırlamış oldukları ÇMD'nin 56 günden sonra pH değerlerinde meydana gelen hızlı düşüş (360 gün sonunda pH<7,0) ve sülfat konsantrasyonunda yaşanan artış ile uyumlu olarak uzun dönemde başlangıç sülfür içeriği arttıkça dayanım kayıplarının arttığını rapor etmişlerdir. Başka bir araştırmada, sülfür içeriğinin artması ile artan genleşme miktarının engellenmesi için çimento miktarının %100 oranında artırılmasına rağmen dolgu bünyesindeki çatlakların oluşumu ve dayanım kaybı engellenememiştir (Yin vd., 2018). Bununla birlikte bağlayıcı maliyeti macun dolgu işletme maliyetlerinin %50-80'ini teşkil ettiğinden çimento sarfiyatındaki artışın, dolgu işletme maliyetlerini de olumsuz yönde etkilemesi söz konusudur (Dudenev vd., 2013; Li ve Fall 2018). Benzer şekilde, Zheng vd. (2018) çimento miktarındaki artışın sülfürlü atıklardan hazırlanan macun dolguda dayanım kaybını engelleyemediğini, sadece dayanımda meydana gelen kayıpların başlangıç süresini geciktirebildiğini belirtmiş, dayanım kaybını engellemek için de puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddelerinin kullanımını önermiştir.

Sülfürce zengin cevher zenginleştirme atıklarının nötralize edilerek asit ve sülfat oluşumunun engellenmesi/kontrol altına alınması konusunda yetersiz kalan PÇ kullanımına alternatif olarak içerisinde kalsiyumca zengin bileşikler (kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) ve kalsiyum-magnezyum karbonat ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )) içeren endüstriyel atıklar (yüksek fırın cürufu, C-sınıfı uçucu kül, mermer artığı, kireçtaşı vb.) ÇMD karışımı içerisinde çimento yerine belirli oranlarda kullanılmaya başlamıştır. Bu malzemelerin sülfürlü atıklardan üretilen ÇMD'de özellikle uzun dönemde meydana gelebilecek dayanım ve duraylılık problemlerinin önüne geçebilmek için i) porozite, boşluk oranı ve geçirgenliği azaltmak, ii) nötralizasyon potansiyeli sayesinde asit ve sülfat etkisini engellemek/azaltmak, iii) çimento maliyetini/tüketimini azaltmak, iv) endüstriyel atık malzemelerle ilgili (mermer artığı, kireçtaşı ve uçucu kül vb.) atık depolama/rehabilitasyon maliyetlerini ve olumsuz çevresel problemleri azaltmak gibi birçok faydası bulunmaktadır (Alp vd., 2003; Ercikdi vd., 2015).

### 1.3. Tezin Özgün Değeri

Madencilik endüstrisinde, cevher zenginleştirme işlemleri (flotasyon vb.) sonucunda ülkemizde ve dünyada oldukça büyük miktarlarda ince boyutlu katı atık açığa çıkmaktadır.

Bu tür katı atıkların gelişigüzel bir şekilde çevreye bırakılması sonucunda atık malzemenin kimyasal ve mineralojik özelliklerine bağlı olarak bazı çevresel problemler meydana gelmektedir. Bu katı atıkların yerüstü atık barajlarında depolanabilmesi durumunda ise geniş alanlara ihtiyaç duyulsa da özellikle son yıllarda meydana gelen atık barajı kazaları sonrasında artan çevresel baskılar ve yasal kısıtlamalar katı atıkların emniyetli ve güvenli bir şekilde yönetilmesini (katı atık yönetimi) zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, büyük miktarlardaki sülfürce zengin cevher zenginleştirme atıkları ülkemizde 2000'li yıllardan beri arakatlı kazı ve kes-doldur gibi üretim yöntemlerinin uygulandığı yeraltı işletmelerinde ÇMD malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Bu atıkların ÇMD olarak yeraltına depolanması amacıyla hazırlanan karışım içerisinde bağlayıcı (çimento) olarak ülkemizde ve dünyada yaygın bir şekilde Portland çimentosu kullanılmaktadır. Fakat, atık içerisindeki sülfürlü minerallerin (pirit vb.) varlığında meydana gelen oksidasyon kaynaklı asit ve sülfat oluşumunun önlenmesi/azaltılması konusunda, PÇ'nin oldukça dirençsiz/yetersiz olduğu bilinen bir gerçektir. Bu yüzden ÇMD'de özellikle uzun dönemde dayanım ve duraylılık açısından dolgu bünyesinde çatlakların oluşumu ve dayanım kaybı gibi problemler meydana gelebilmektedir. Bu problemleri azaltmak veya engellemek için çözüm olarak bağlayıcı miktarının artırılması ise ÇMD'nin mekanik performansında iyileşme sağlasa bile hem uzun dönemdeki çatlak oluşumunu ve dayanım kaybını engelleyememekte hem de dolgu üretiminde kullanılan en pahalı malzeme çimento olduğundan dolayı işletme maliyetlerinin önemli derecede artması kaçınılmaz olmaktadır. Ayrıca, çimento üretimi esnasında ortaya çıkan hava kirliliği ve atmosferin ısınmasına yol açan CO<sub>2</sub> emisyonları da dikkate alınması gereken önemli bir diğer konudur.

Tüm bu sorunlardan dolayı, daha önceki çalışmalardan farklı olarak ilk defa bu çalışmada sülfürlü cevher zenginleştirme atığı yerine belirli oranlarda asit nötralizasyon potansiyeli (ANP) bulunan endüstriyel atıkların/artıkların (yüksek fırın cürufu (YFC), C-sınıfı uçucu kül (C-UK), mermer artığı (MA), kalsitik kireçtaşı (KK), dolomitik kireçtaşı (DK) ve inşaat yıkıntı atığı (İYA)) kullanılması ve bu sayede i) özellikle uzun dönemdeki dayanım ve duraylılık problemlerinin bertaraf edilmesi/azaltılması, ii) ÇMD'de içsel olarak gerçekleşen asit ve sülfat oluşumunun engellenmesi/azaltılması, iii) mikroyapı (porozite vb.) özelliklerinin iyileştirilmesi, iv) dayanım-duraylılık performansı açısından en uygun asit nötralizasyon malzemesinin ve ikame oranının belirlenmesi ve v) işletme maliyetleri açısından problem teşkil eden bağlayıcı (çimento) oranının düşürülmesinin araştırılması bu çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır. Diğer bir özgün katkı, ülkemizde metalik

madenlerin işletilmesi sonucu açığa çıkan çevresel açıdan zararlı maden atıklarının (sülfürlü vb.) ve atık malzemeye ikame olarak belirli oranlarda kullanılan endüstriyel atık/artık malzemelerin cevheri alınmış yeraltı üretim boşluklarında emniyetli bir şekilde depolanmasıyla muhtemel çevre kirliliği, yerüstü atık depolama alanı gereksinimi ve atık rehabilitasyon maliyetleri gibi problemlerin engellenmesi veya azaltılması ve ayrıca bu endüstriyel artıklar için yeni bir kullanım alanının ortaya çıkacak olmasıdır.

#### **1.4. Tezin Amacı**

Bu doktora tez çalışmasının başlıca amaçları;

1. 6 farklı asit nötralizasyon potansiyeline (ANP'ye) sahip endüstriyel atık/artık malzemelerinin (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) sülfürce zengin cevher zenginleştirme atığı yerine belirli oranlarda kullanılmasının ÇMD'nin dayanım ve duraylılık özelliklerine etkisinin araştırılması ve en uygun asit nötralizasyon malzemesi (ANM) tipinin ve oranının belirlenmesi,
2. Asit nötralizasyon malzemelerinin (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) sülfürce zengin cevher zenginleştirme atığı yerine belirli oranlarda kullanılmasının özellikle uzun dönemde ÇMD içerisinde oluşabilecek asit ve sülfat atak etkilerine karşı performansının araştırılması,
3. Asit nötralizasyon malzemelerinin ÇMD'nin mikroyapı özelliklerine (toplam porozite, gözenek boyut dağılımı vb.) etkilerinin belirlenmesi,
4. ÇMD içerisinde ANM kullanımının üretilen 1,0 m<sup>3</sup> dolgu karışımı için gerekli bağlayıcı (çimento) miktarında ne kadarlık azalma sağlayacağını değerlendirilmesidir.

#### **1.5. Çimentolu Macun Dolgu Yöntemi**

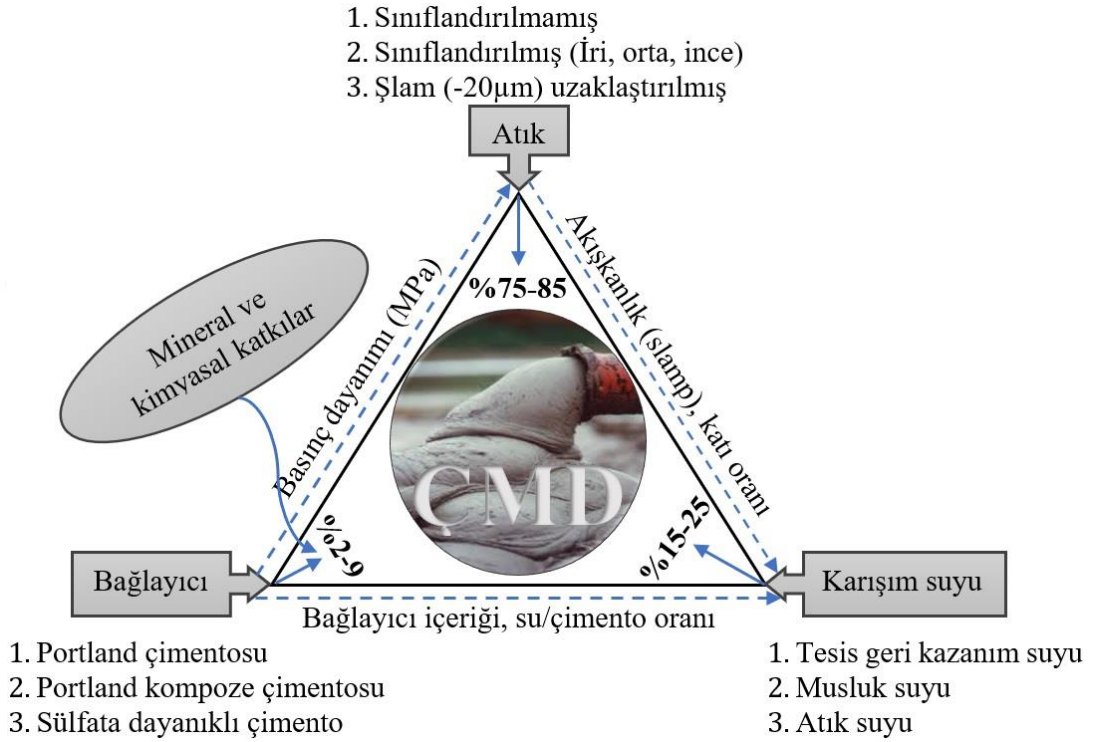
Yeraltı madenciliğinde cevheri alınmış boşlukların doldurulması veya tahkimat için 1970'li yılların sonlarında Almanya'nın Bad Grund Madeni'nde uygulanmaya başlayan ve özellikle Kanada ve Avustralya'da oldukça yaygın bir şekilde kullanılan ÇMD teknolojisi son 30 yılda önemli gelişim kaydetmiştir (Yumlu, 2010; Cihangir, 2011; Ercikdi vd., 2017).

Ayrıca Kanada, Avustralya ve diğer gelişmiş ülkelerin aksine, ÇMD teknolojisinin kullanımının oldukça yeni olduğu Çin’de cevher kaynaklarının üretimi sonucunda toplamda 25 milyar tondan fazla cevher zenginleştirme atığının ortaya çıkması ve bunun sonucunda yaklaşık 12 bin atık barajının inşa edilmesi tahmin edilmektedir (Lu vd., 2018; Sun vd., 2018). Bu yöntemin kullanılmasına ihtiyaç duyulması ise 1950-2005 yılları arasında Çin’deki madenlerde 4779 can kaybının yaşandığı 10.869 jeolojik kaza meydana gelmiş olması ve madenlerdeki jeolojik kazaların %50’sinin (5.416) yüzey çökmesi sonucu oluşmasıdır (Sun vd., 2018). Tüm dünyada 12-200 m<sup>3</sup>/saat arasında değişen kapasitelere sahip 100’den fazla ÇMD tesisi bulunmaktadır. Ayrıca yaklaşık 30 ÇMD tesisinin ise dizayn ve kurulum aşamasında olduğu bilinmektedir (Yumlu, 2010). Hidrolik dolgu ve kaya dolguya kıyasla işletme maliyeti oldukça düşük olan ve cevher zenginleştirme atıklarının büyük bir bölümünün yeraltında depolanmasına imkân sağlayan ÇMD yöntemi ülkemizde uzun yıllardır Çayeli Bakır İşletmesinde kullanılmakta olup, 2013 yılından beri Tüprak-Efemçukuru Altın madeni ve Etibakır Kastamonu-Küre işletmelerinde başarıyla uygulanmaya devam etmektedir.

ÇMD yöntemi öncesinde yerüstü atık barajlarına, deniz ve okyanusların derin bölgelerine depolanmakta olan cevher zenginleştirme atıklarının son yıllarda meydana gelen atık barajı kazaları ve artan çevresel kaygılar nedeniyle arakatlı kazı veya kes doldur yöntemiyle üretim yapılan yeraltı üretim boşluklarında güvenli bir şekilde depolanmasıyla;

- ® Tahkimat işlevi vasıtasıyla dolgu yapılan bölgeye komşu olan cevher odalarının üretimi sırasında güvenli çalışma şartları ve tahkimat amaçlı bırakılan büyük boyutlu topuklardan cevher kazanımı sağlanmaktadır (Fall ve Samb, 2009).
- ® Yerüstü tasman (çökme) oluşumu önlenmekte veya azaltılmaktadır.
- ® Cevher zenginleştirme atıklarının büyük bölümünün (%50-55’inin) yeraltı üretim boşluklarında depolanması ile yerüstünde depolanacak olan özellikle sülfürlü cevher zenginleştirme atıklarının depolama ve rehabilitasyon maliyetleri azaltılmaktadır (Benzaazoua vd., 2002).
- ® Son yıllarda kullanılan en güvenli ve başarılı atık yönetimi yöntemlerinden birisi konumunda olan ÇMD teknolojisi ile atmosferik şartlar altında yerüstünde muhafaza edilmesi (depolanması) sonucu özellikle AMD oluşumu gibi büyük çevresel sorunlara sebep olabilecek sülfürce zengin ince boyutlu maden atıkları güvenli bir şekilde depolanabilmektedir (Çetiner vd., 2006).

ÇMD, oldukça az miktardaki bağlayıcı (genellikle ağırlıkça %2-9) ve karışım suyu ile filtrasyon işlemine tabi tutulmuş cevher zenginleştirme atığının (ağırlıkça %75-85) karıştırılmasıyla üretilen yüksek yoğunluğa sahip ve ayrışma özelliği bulunmayan kompozit bir malzemedir (Şekil 1.2) (Ercikdi vd., 2014; Ouattara vd., 2018; Panchal vd., 2018).



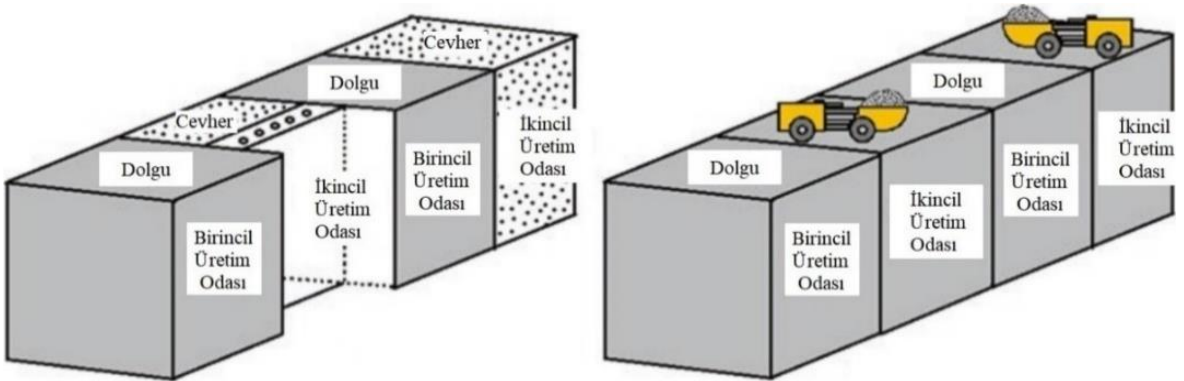
Şekil 1.2. ÇMD'nin ana bileşenlerini gösteren şematik diyagram

ÇMD karışımı içerisine bağlayıcı (çimento) eklenmesi, ÇMD'nin dayanım ve duraylılığı için birinci derecede önemlidir. Ayrıca, ÇMD'nin macun dolgu tesisinden yeraltında cevheri alınmış boşluklara transferi sırasında gerekli akışkanlığın sağlanması için yeterli miktarda su içeriğine sahip olması gereklidir. Genel olarak, yerçekimi etkisi (kot farkından yararlanılarak) veya pompa kullanılarak bir boru hattı vasıtasıyla ÇMD karışımının yeraltındaki boşluklara iletilebilmesi konusunda karışımın istenen akış özelliklerini sağlayacak macun kıvamını oluşturulabilmesi oldukça önemlidir (Ouattara vd., 2018). Bunun için ÇMD karışımı gibi taneli bir malzemenin gerekli miktardaki koloidal suyu bünyesinde tutabilmesi için en az %15 oranında ince boyutlu (<20 µm) malzeme içermesi gereklidir. Çimentosuz malzemenin (cevher zenginleştirme atığı) koloidal özelliklerinin değerlendirilmesi için su bırakma ve standart akışkanlık (akışkanlık) konisi testlerini içeren indeks testler yapılır (Ercikdi vd., 2013). ÇMD bileşenlerinin yani; atık

malzeme, bağlayıcı (çimento vb.) ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakteristikleri üretilen macun dolgunun kısa (dayanım) ve uzun dönem (duraylılık) performansı, yeraltına nakledilmesi ve yeraltındaki boşluklara doldurulması konularında dikkate değer bir role sahiptir (Fall ve Nasir, 2010; Ercikdi vd., 2017).

### 1.5.1. Dayanım ve Duraylılık

Macun dolgu tesisinin kurulumu sırasında ÇMD'nin yeraltı su kalitesine, akıcılık özelliklerine ve kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılık özelliklerine etkisi detaylı bir şekilde araştırılmalı ve en uygun hale getirilmelidir. Bu bağlamda, tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) ve gerilme-deformasyon davranışı gibi mekanik özellikler ÇMD'nin etkili ve güvenli bir şekilde tasarlanması için temel faktördür (Ghirian ve Fall, 2014). Pratikte, ÇMD'nin farklı kür sürelerindeki dayanımı; test yönteminin düşük maliyetli olmasının yanı sıra basit ve kolay uygulanabilir olmasından dolayı TEBD testi ile belirlenmektedir (Yılmaz, 2013). Dolgunun yeraltındaki işlevine göre, dolgunun istenen limit dayanım değerleri farklılık arz edebilmektedir. Örneğin, pratikte, maden operatörlerinin yeraltında güvenli bir şekilde çalışabilmesi, cevher üretimi yapılan bölge etrafındaki dolgunun duraylılığını koruyabilmesi ve yeraltına yerleştirilen dolgunun ekipmanlar ve çalışanlar için güvenli çalışma platformu oluşturabilmesi (Şekil 1.3) için 28 günlük kür süresi sonunda macun dolgunun yeterli ( $TEBD \geq 1,0$  MPa) dayanıma sahip olması istenmektedir (Yumlu 2001). Ayrıca dolgunun tavan tahkimatı olarak kullanılabilmesi için en az 5,0 MPa (Belem ve Benzaazoua, 2004) dayanıma sahip olması gerekmektedir.



Şekil 1.3. ÇMD'nin yeraltı üretim boşluklarındaki işlevi (Ercikdi vd., 2017)

Üretilen macun dolgunun yeraltındaki kullanım alanına bağlı olarak 28 günlük kür süresi sonunda istenen kritik TEBD değerini ( $TEBD \geq 1,0$  MPa veya  $5,0$  MPa) uzun dönemde ( $>28$  gün) korumaya devam etmesi de oldukça önem arz etmektedir. Cevheri alınmış yeraltı üretim odalarına yerleştirilen ÇMD'nin istenilen kritik dayanımı sağlama hızı, komşu üretim odalarının üretilmesi için gerekli bekleme süresinin azalması için muazzam öneme sahip olmasından dolayı ÇMD için uygun bir mühendislik tasarımının yapılması oldukça önemlidir.

ÇMD'nin kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılığını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler genel olarak iç (yapısal) ve dış etkenler olmak üzere iki gruba ayrılmıştır (Tablo 1.1). Dolguyu oluşturan ana bileşenler olan; atık malzeme, bağlayıcı ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri iç (yapısal) etkenleri oluştururken, yeraltı üretim boşluğuna doldurulan macun dolgunun yan kayaç ile olan etkileşimi, dolgunun yerleştirildiği yerdeki drenaj koşulları, kür koşulları (sıcaklık ve nem), komşu üretim odalarının üretimi esnasında yapılan patlatmalardan kaynaklı titreşimler ve dolgu yerleştirme şekli (kademeli vb.) gibi birçok parametre ise dış etkenler olarak sıralanabilir (Erçikdi vd., 2012; Erçikdi vd., 2017). Tablo 1.1'de özetlenen ÇMD'nin mekanik özelliklerini (dayanım ve duraylılığını) etkileyen faktörler detaylı olarak Erçikdi (2009) tarafından irdelenmiştir.

Tablo 1.1. ÇMD'nin mekanik özelliklerini etkileyen faktörler (Erçikdi vd., 2017)

İç Etkenler		Dış Etkenler
Atık özellikleri	Bağlayıcı özellikleri	Yerinde koşullar
Özgül ağırlık	Bağlayıcı (çimento) tipi ve oranı	Kür koşulları (sıcaklık, nem)
Tane şekli	Mineral katkı maddesi kullanımı	Yan kayaçla etkileşim (yanal basınç vb.)
Mineraloji	Kimyasal katkı maddesi kullanımı	Sıvılaşma riski
Tane boyut dağılımı		Dolgu yerleştirme şekli (kademeli vb.)
Asit ve sülfat etkisi		Konsolidasyon
		Drenaj koşulları
Karışım suyu özellikleri	Karışım özellikleri	Patlatma kaynaklı titreşimler
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> konsantrasyonu	Su/çimento oranı	Yeraltı suyu koşulları
pH	Katı oranı (%) (yoğunluk)	Dolgu barikatının sağlamlığı

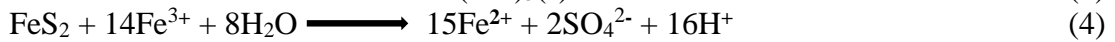
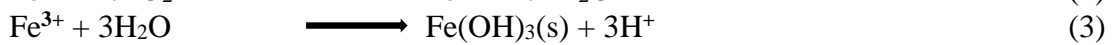
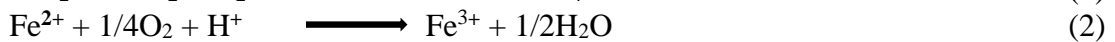
### 1.5.2. Asit ve Sülfat Etkisi

Dolgunun kısa (dayanım) ve uzun dönem (duraylılık) performansı, yeraltına nakledilmesi ve yeraltındaki boşluklara doldurulması konularında dikkate değer bir parametre olan sülfürlü atıklar ile üretilen macun dolgu, mineralojik özelliklerine göre



tasarım aşamasında ağırlıkça %15-25 arasında karışım suyu içerdiğinden dolayı yerleştirildiği bölgede uzun süre bu suyu (nemi) tutmaktadır. Macun dolguda kullanılan atıkların genellikle ince boyutlu (yüzey alanının yüksek) olması nedeniyle dolgu matrisinin boşluklu bir yapıya sahip olması ve kür işlemlerinin yeraltında nemli ortamlarda gerçekleşmesinden dolayı özellikle atık malzemenin sülfürlü mineraller içermesi durumunda, boşluklardaki oksijen ve su varlığında  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonları ve asit üretimi ( $\text{H}^+$ ;  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) meydana gelmektedir. Macun dolguda meydana gelen asit ve sülfat etkisi içsel kaynaklı olup atık malzeme içerisindeki sülfür içeriğindeki artış ile ortamdaki oksijen miktarı, sıcaklık ve yüzey alanının artması, pH'ın ise düşmesiyle (Hassani ve Archibald 1998) oksidasyon ürünleri artmakta ve dolgu ortamı agresifleştirdiğinden dolayı dolgu bünyesindeki bozulmalar artmaktadır. Sülfürlü minerallerin reaktivitesinin mineral tipine, minerallerin özgül yüzey alanına, ortamın pH ve oksijen miktarına bağlı olduğu belirtilmiş (Ercikdi, 2009) ve sülfürlü mineraller, sülfür tipine bağlı olarak minerallerin sülfür reaktivitesi oranına göre pirit>arsenopirit>pirit>kalkopirit>sfalerit>galen>kalkosit şeklinde sıralanmıştır (Ercikdi vd., 2017).

ÇMD'de karşılaşılan potansiyel uzun dönem duraylılık problemleri (dayanım kaybı vb.) esas olarak pirit ( $\text{FeS}_2$ ) gibi sülfürlü minerallerin hava (oksijen) ve nem (su) varlığında oksidasyona uğrayarak asit ve sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) oluşumunun ortaya çıkmasıyla ilişkilidir. Sülfürlü mineraller içeren atık malzemenin atmosferik şartlardaki oksidasyon reaksiyonları (1-4) aşağıda sıralanmış olup bu reaksiyonlar sonucunda oluşan oksidasyon kaynaklı asit, hidrasyon ürünlerinin (C-S-H ve portlandit) bozunmasına (çözünmesine) ve zayıflamasına sebep olabilir ve sonunda 9'un altındaki düşük pH değerlerinde hidrasyon ürünlerinin bağlayıcılık özelliklerini kaybetmelerine yol açarak ÇMD'nin dayanım ve duraylılığını olumsuz etkilemektedir (Tariq ve Nehdi, 2007; Ercikdi vd., 2015; Cihangir ve Akyol, 2018; Yin vd., 2018; Yılmaz vd., 2018). Buna ek olarak, ÇMD'deki sülfatın kaynağının, önceden oksitlenmiş sülfürlü atık malzemenin varlığı veya sülfatça zengin karışım suyu olabileceği dikkate alınmalıdır (Orejarena ve Fall, 2010).



Yukarıdaki reaksiyonlar sonucu oluşan asit ile ortamın pH'ı düşer ve meydana gelen sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), dolgu karışımına ilave edilen çimento içindeki trikalsiyum alüminat ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ile reaksiyona girer. Bunun sonucunda jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (5) ve etrenjit ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) (6) oluşmaktadır. Bu minerallerin genişleme özelliği bulunduğundan dolayı hacimleri kendilerini oluşturan ürünlerin hacimlerinden daha büyük olur. Hacimde meydana gelen büyüme önemli miktarda (70-200 MPa) içsel gerilme oluşturacağı için özellikle uzun dönemde dolgunun dayanım ve duraylılığını kaybetmesine yol açacak çatlamalara sebep olmaktadır (Fall ve Benzaazoua, 2005; Kesimal vd., 2005; Ouellet vd., 2007; Tariq ve Nehdi, 2007).



Yeraltı maden işletmelerinde, cevheri alınmış üretim boşluklarının tahkimat ve atık depolama amacıyla doldurulmasında yararlanılan ÇMD uygulamasının mekanik (dayanım ve duraylılık) özelliklerine bağlayıcı (çimento) türü ve miktarının gözle görülür derecede etkisi bulunmaktadır. Macun dolgunun istenilen zamanda gerekli mekanik dayanımı sağlaması ve çalışmaların aksamadan devam etmesi için dolgu karışımı içerisine ağırlıkça %2-9 oranında bağlayıcı ilave edilmektedir. Bununla birlikte, macun dolgu tesisinin işletme giderleri (maliyetleri) açısından önemli bir faktör olarak görünen çimento (bağlayıcı) masrafları macun dolgu tesisinin işletme masraflarının %50-80'ine karşılık gelmektedir (Kesimal vd., 2005; Yılmaz ve Guresci, 2017). Bundan dolayı, uygun, düşük maliyetli ve macun dolgunun kısa (dayanım) ve uzun dönem (duraylılık) mekanik performansını sürdürülebilmesine engel olabilecek faktörlere (asit ve sülfat etkisi vb.) karşı dirençli bir çimento tipinin seçilmesi kayda değer bir öneme sahiptir (Erçıkıdı vd., 2009).

Ouellet vd. (2007) yeraltı maden işletmelerinde uygulanan ÇMD içerisinde alkali bağlayıcıların kullanımının nötrleştirme sağlaması ve metal iyonları salınımını azaltması gibi faydalarının olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, araştırmacılar ÇMD karışımına eklenen bağlayıcının dolgu içerisine doğru olan oksijen difüzyonunu azalttığını ve böylece sülfürlü minerallerin reaktivitesinden dolayı meydana gelen asit ve sülfat oluşumunu sınırlandırdığını belirtmişlerdir. Bunlara rağmen, sülfürce zengin atıklar ile hazırlanan macun dolguda yapılan bazı araştırmalar, ÇMD'nin özellikle uzun dönem dayanım ve

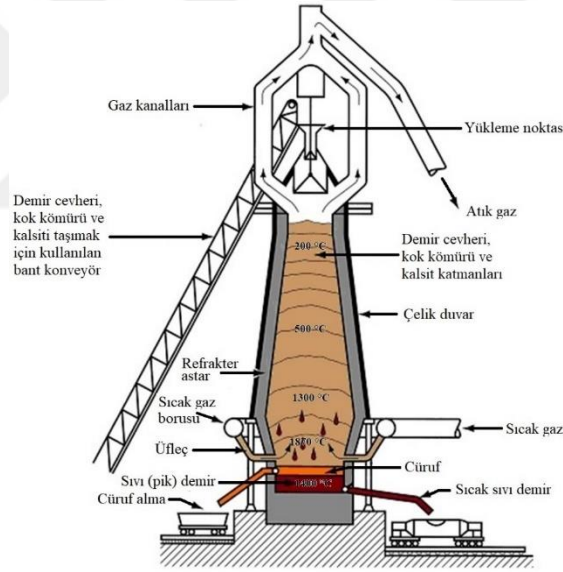
duraylılığını sağlamak/korunak amacıyla dolguya ilave edilen bağlayıcıların (normal Portland çimentosu; PÇ, Portland kompoze çimento; PKÇ ve sülfata dayanıklı çimento; SDC) sülfürlü atıkların özellikle uzun dönemde oksidasyona uğramasıyla ortaya çıkan asit ve sülfat atak ile mücadele konusunda yetersiz kaldığını ve dolgu yapısının duraylılığının tehlike altında olabileceğini göstermiştir (Bertrand vd., 2000; Hassani vd., 2001; Tariq ve Nehdi, 2007; Cihangir vd., 2012; Ercikdi vd., 2015; Yin vd., 2018). Cihangir vd. (2012) farklı bağlayıcı (PÇ) oranlarında (%5-7) hazırlanmış olduğu ÇMD numunelerinin 360 günlük kür süresi boyunca asit oluşumunu (pH değişimini) incelemişler ve %5 bağlayıcı oranına sahip ÇMD numunelerinde pH değeri 6,0'nın altına düştüğünü ve oksidasyonun PÇ içeren numunenin iç kısmına doğru ilerlediğini, bağlayıcı oranının %6-7'ye artırılmasıyla asit oluşumunun oldukça azaldığını (pH> 9,0) ortaya koymuşlardır. Tariq ve Nehdi (2007) %52,3 pirit içeriğine sahip sülfürlü atık ile hazırlanan ÇMD'de pH değerinin 180 günlük kür süresi sonunda 12,0'den 4,0'lere kadar düştüğünü, hatta agresif çevrelere (sülfat atak vb.) karşı daha dirençli olduğu bilinen sülfata dayanıklı çimento (SDC) ile hazırlanan ÇMD'nin pH değerinin aynı kür süresi sonunda 6,0'nın altına düştüğünü rapor etmişler. Erçikdi ve Yılmaz (2019) ise sülfür içeriği yüksek atıklar ile hazırlanan macun dolguda meydana gelen asitin nötralizasyonunda çimentonun tek başına yeterli olmadığını ifade etmişlerdir. Bir başka çalışmada, Zheng vd. (2018) çimento miktarındaki artışın sülfürlü atıklardan hazırlanan macun dolguda dayanım kaybını engelleyemediğini, sadece basınç dayanımında meydana gelen düşüşlerin daha geç kür sürelerinde başlamasını sağladığını belirtmiş, dayanım kaybını engellemek için de puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddelerinin kullanımını önermiştir. Buna karşın Yin vd. (2018) ise sülfür içeriğinin artmasıyla birlikte genleşme oranının arttığını, bunu engellemek için çimento miktarının %8'den %16'ya çıkartılmasının bile sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan macun dolguda çatlakların oluşmasını ve dayanım kaybını engelleyemediğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte bağlayıcı maliyeti macun dolgu işletme maliyetlerinin %50-80'ini teşkil ettiğinden çimento sarfiyatındaki artış, dolgu işletme maliyetlerini de olumsuz yönde etkileyecektir.

Yukarıda belirtildiği üzere; asit ve sülfat etkisinin sebep olduğu dayanım ve duraylılık problemleri yüzünden son yıllarda gerçekleştirilen bazı çalışmalarda kalsiyum (Ca) içeriği yüksek minerallerden (kalsit, dolomit vb.) oluşan ve ANP'ye sahip endüstriyel artıkların (C-sınıfı uçucu kül, mermer artığı, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı vb.) sülfürlü atıkların/toprakların nötralizasyonunun sağlanmasında ve çevreye zararlı ağır metal salınımının engellenmesinde etkili olduğu belirtilmektedir.

## 1.6. Asit Nötralizasyon Malzemeleri

### 1.6.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Yüksek fırın cürufu (YFC), yüksek fırında ham (pik) demir üretimi veya çelik üretimi için sıvı ham demir elde edilmesi sırasında elde edilen bir yan (ikincil) üründür (Özbay vd., 2016; Yılmaz vd., 2017). Ham demirin üretilmesi için yüksek demir içeriğine (%50-70) sahip hematit ( $Fe_2O_3$ ) veya manyetit ( $Fe_3O_4$ ) cevherleri, cüruf elde etmek ve oluşacak cürufun özelliklerini ayarlamak için kalsit ( $CaCO_3$ ), dolomit ( $CaMg(CO_3)_2$ ) gibi oksit içerikli eritken malzemeler ve yakıt olarak kullanılan kok kömürü ile birlikte üretim kapasitelerine bağlı olarak yükseklikleri oldukça fazla olan (30-90 m arasında değişen) yüksek fırınlara şarj edilir (Şekil 1.4) (Işık, 2018; URL-2, 2018).



Şekil 1.4. Yüksek fırının görünümü (Özdemir ve Öz Saraç, 2015)

Fırın içerisinde oluşan sıcaklık ve gazlar neticesinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan, sıvı pik demire kıyasla yoğunluğu oldukça düşük ve sıcaklığı ise pik demire yakın ( $1400-1600^{\circ}C$ ) olan ergimiş cüruf, pik demirin hemen üst kısmında toplanır. Fırının üst ağız açıklığından malzemeler beslendikçe tabanda toplanan cüruf, fırın taban bölgesinin sol tarafında bulunan açıklıktan dökülerek alınır. Meydana gelen YFC'nin ana bileşenlerini kalsiyum oksit ( $CaO$ ), silisyum dioksit ( $SiO_2$ ) ve alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) oluşturmaktadır (Şekil 1.4) (Cihangir, 2011).

Oldukça yüksek sıcaklıklarda elde edilmiş olan eriyik haldeki YFC, farklı şekillerde soğutma işlemine tabi tutulur. YFC, soğutma prosesine göre; hava ile soğutulmuş, geliştirilmiş ve granüle (tanecikli) YFC olarak sınıflandırılır. Bunun dışında, YFC yavaş bir şekilde soğutulursa kristal bir yapı kazanırken hızlı bir şekilde soğutulursa amorf bir yapı meydana gelir. Erimiş cüruf bir havuzda su veya güçlü su jeti ile hızla soğutulursa granüle cüruf olarak bilinen ve potansiyel hidrolik özelliklere sahip ince taneli (<5 mm boyutunda) ve neredeyse tamamen amorf (camsı) bir yapıya dönüşür (Özbay vd., 2016; Çolak, 2018; Işık, 2018).

Dünya genelinde üretilen yıllık 700 milyon ton çeliğin yaklaşık %60'ı yüksek fırınlardan sağlanmaktadır (URL-3, 2018). Ayrıca, tüm dünyanın yıllık cüruf üretiminin 300-360 milyon ton civarında olduğu tahmin edilmektedir. 2016 yılından bu yana 300 milyon ton çelik cürufunun yararlı bir şekilde kullanılmamış olduğu Çin'de yıllık 100 milyon tondan fazla cüruf üretilirken bunun kullanım oranı sadece %29,5 olarak açıklanmıştır. Türkiye'de ise İsdemir (İskenderun), Kardemir (Karabük) ve Erdemir (Ereğli) Demir-Çelik Fabrikaları'nda bulunan yüksek fırınlarda çelik üretiminde kullanılmak üzere ham demir üretimi yapılmakta ve bu üretim sırasında yılda yaklaşık 300 bin ton YFC endüstriyel atık olarak ortaya çıkmaktadır (Açıkgöz, 2015; Guo vd., 2018; Işık, 2018; Rashad, 2018).

Hızlı ekonomik gelişmelere ve dünya demir üretimindeki büyümeye dayandırılarak cüruf üretiminin önemli derecede artması ve ortaya çıkan büyük miktardaki bu cüruf lar hala atık depolama alanlarında depolanmaya devam ettiğinden dolayı çevre kirliliğine sebep olma riski oldukça yüksektir. Bu nedenle puzolanik ve hidrolik bağlayıcı özellikleri bilinen YFC'nin çimento içerikli malzemelerin işlenebilirliğini arttırması, dayanımı geliştirirken hidrasyon ısını düşürmesi, permabiliteyi ve poroziteyi azaltması gibi faydalarından dolayı son 20 yıl içerisinde oldukça ilerleme/gelişme kaydeden ÇMD alanında YFC'nin farklı parametrelere (basınç dayanımı, asit ve sülfat oluşumu, mikroyapı vb.) olan etkisinin araştırılmasıyla ilgili kullanımına yönelik birçok çalışma bulunmaktadır (Belem vd., 2001; Benzaazoua vd., 2002; Fall vd., 2007; Ouellet vd., 2007; Ercikdi vd., 2009; Fall ve Pokharel, 2010; Cihangir vd., 2012; Cihangir ve Akyol, 2018; Li ve Fall, 2018). Benzaazoua vd. (2002) üç farklı sülfür içeriğine (%5; düşük, %16; orta ve %32; yüksek) sahip atık malzeme ile farklı bağlayıcı oranlarında çimento yerine %80 YFC ikame ederek hazırladıkları ÇMD numunelerinden elde ettikleri basınç dayanımı sonuçlarına göre; yüksek (%32) sülfür içerikli atıklar için %80 YFC ikamesi uygun olmazken, düşük (%5) ve orta (%16) miktardaki sülfür

içerikli atık malzemeler için uygun olduğu belirtilmiştir. Fall vd. (2007) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, sülfür miktarı yüksek (%26) maden atıkları kullanılarak %50 YFC ikameli ÇMD numuneleri üretilmiş ve 28 günlük kür süresi sonunda yapılan dayanım testi sonucunda kontrol numunesine kıyasla 2,2 kat daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Yazarlar, YFC'nin dayanıma olan yüksek katkısını, ince YFC tanelerinin çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurması ve atık taneleri ile çimento taneleri arasındaki boşlukları birleştirmesiyle sonuçlanan filler etkisi ve YFC'nin puzolanik özelliği sebebiyle üretilen ilave C-S-H'nin çimento pastası içinde yüke dayanım gösteren ana yapı olarak kabul edildiği gerçeğinden hareket ederek çimento matrisi içinde C-S-H miktarının artması sonucu bağlayıcı matrisi ve atık taneleri arasında daha yüksek bir dayanım bağı oluşması ile ilişkilendirmişlerdir. Ercikdi vd. (2009) endüstriyel bir atık malzeme olan YFC'nin Portland çimentosu yerine belirli oranlarda (%20-60) ikame edilmesiyle %5 bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD numunelerinin 360 günlük kür süresi boyunca dayanım ve duraylılık performansını incelemişlerdir. Kontrol numuneleri 56 güne kadar YFC ikameli numunelere kıyasla daha yüksek basınç dayanımı üretirken 90 günden sonra %20 YFC ikameli numunelerin kontrol numunelerinin basınç dayanımını geçtiği belirlenmiştir. Araştırmacılar daha yüksek YFC ikamesinin (%40-60) istenen basınç dayanımının üretilmesine katkı sağlayamadığını, buna karşın YFC ikamesinin ÇMD'de uzun dönemde meydana gelen duraylılık problemlerini önemli derecede azalttığını gözlemlemişlerdir.

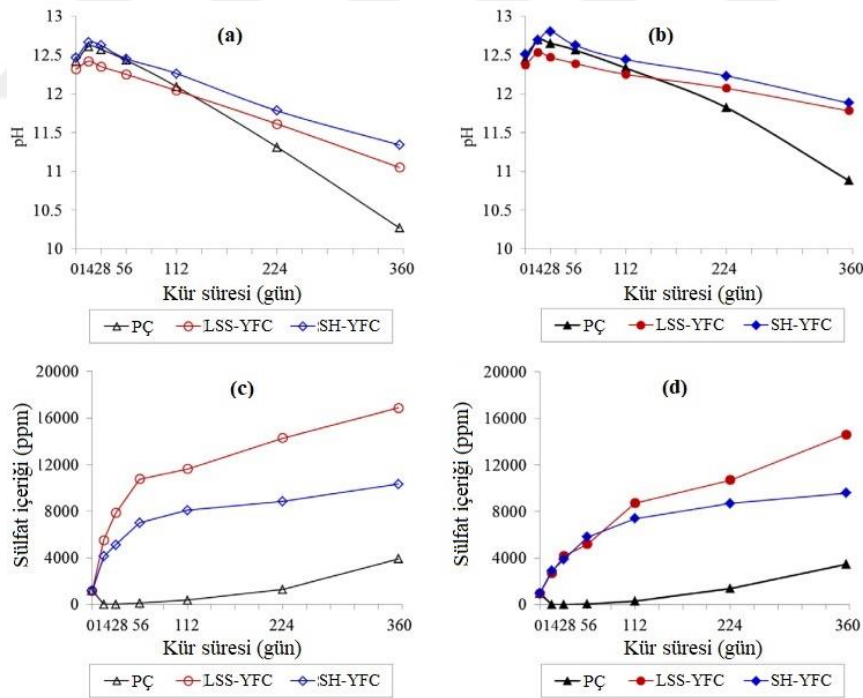
Ouellet vd. (2007) sadece Portland çimentosu (T10; %100 PÇ) ile ve PÇ yerine %80 YFC (T10SL; %20 PÇ+%80 YFC) ikame ederek üç farklı sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) konsantrasyonuna sahip (0, 4613 ve 7549 ppm) karışım suyu kullanarak hazırladıkları ÇMD numunelerinin basınç dayanımı ve porozite (MIP) analizlerini yapmışlar ve kür süresi ve karışım tipinden bağımsız olarak YFC ikameli numunelerin daha yüksek basınç dayanımı ürettiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca en yüksek basınç dayanımının en yüksek sülfat içeriğine (7549 ppm) sahip karışım suyu ile hazırlanan YFC içeren numunelerden elde edildiği bildirilmiştir. Dayanım sonuçlarına paralel olarak tüm kür sürelerinde kontrol numunesinin ortalama porozitesi %33,5 ve %11,0 civarındayken, ortalama porozite ve küçük boyutlu porozite değerleri %80 YFC ikameli ÇMD numunelerinde sırasıyla %29,4 ve %15,3 olarak ölçülmüştür. Sonuçlardan, YFC'nin daha fazla miktarda küçük gözenek ( $<0,3 \mu m = \%15,3 > \%11,0$ ) oluşturarak ÇMD'de daha ince bir mikroyapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ouellet vd. (2007) dayanım kazanımının genellikle kür süresinin artması ile toplam porozitenin düşmesi sonucunda meydana gelmeyebileceğini, gözenek boyut dağılımının kür

süresiyle birlikte değişim geçirebileceğini (gözeneklerin bölünmesi/parçalara ayrılması ve küçülmesi/incelmesi) ve dayanım gelişiminin mikroyapıdaki bu değişim ile ilişkili olabileceğini rapor etmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgularla benzerlik gösteren bir başka çalışmada, Belem vd. (2001) %5 bağlayıcı oranında kullandıkları Portland çimentosu (PÇ) yerine %80 oranında YFC ikame ederek (ağırlıkça %1 PÇ + %4 YFC) hazırladıkları ÇMD numunelerinin porozite (MIP) testlerini yapmışlar ve eşik gözenek çapının %50 küçülerek 2 mikrondan 1 mikrona düştüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, gözenek boyutundaki bu iyileşmenin (küçülmenin) ÇMD'nin doygun hidrolik iletkenliğini düşürürken, su tutma özelliklerini arttırdığını bildirmişlerdir.

Aynı bağlayıcı oranında (%4,5) sadece Portland çimentosu (%100) (Fall ve Pokharel, 2010) ve Portland çimentosu yerine %50 oranında YFC (Li ve Fall, 2018) kullanılarak ve başlangıç sülfat içeriği (0, 5000, 15,000 ve 25,000 ppm) farklı olan macun dolgu karışımları ile hazırlanan ÇMD numunelerinin aynı kür sıcaklığında (23°C) 28 günlük kür süresi sonundaki basınç dayanımı gelişimlerinin incelendiği iki farklı çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalarda, Fall ve Pokharel (2010) 0 ve 5000 ppm sülfat içeriğindeki ÇMD numunelerinde 28 gün sonunda sırasıyla yaklaşık olarak 800 ve 1100 kPa basınç dayanımı elde ederken, Li ve Fall (2018) PÇ yerine %50 YFC ikame ederek hazırladıkları numunelerin aynı sülfat içeriğinde sırasıyla yaklaşık 1250 ve 1500 kPa dayanım ürettiklerini gözlemlemişlerdir. Daha yüksek sülfat içerikli (15000 ve 25000 ppm) numunelerde ise her iki çalışmada da dayanım düşüşleri meydana gelmiştir.

Cihangir vd. (2012) sülfürce zengin maden atıkları içeren ÇMD'de PÇ'ye alternatif olarak aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu (A-YFC) kullanımının ÇMD'nin kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılık performansına etkisini araştırdıkları çalışmalarında; farklı bağlayıcı oranlarında (%5-7) PÇ ile ve aynı bağlayıcı oranlarında iki farklı aktivatör tipi (sıvı sodyum silikat (LSS) ve sodyum hidroksit (SH)) ile aktifleştirilmiş YFC içeren ÇMD numuneleri üretmişler ve 14-360 günlük kür süresinde basınç dayanımı, asit ve sülfat oluşumu testlerine tabi tutmuşlardır. A-YFC'nin ÇMD'de alternatif bağlayıcı olarak kullanımının yüksek potansiyele sahip olduğunu belirten araştırmacılar, bağlayıcı oranının artırılmasının iyileştirici etkisine rağmen PÇ içeren numunelerin uzun dönemde (>56 gün) atık içerisinde bulunan pirit oksidasyonu sonucu meydana gelen asit ve sülfat oluşumu ile ilişkilendirilen ciddi dayanım kayıplarına sahip zayıf bir dayanım ve duraylılık performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Buna karşın, PÇ içeren ÇMD numunelerine kıyasla uzun dönemde önemli derecede yüksek (360 günde PÇ'ye göre 2,4-5,1 kat daha fazla) dayanım

ürettiği bildirilen A-YFC içeren numunelerde herhangi bir dayanım kaybının meydana gelmediği ve bu tip bağlayıcıların yüksek pH ( $\geq 10,7$ ) değerlerinde kalabilme ve yüksek sülfat konsantrasyonlarını (12330 ppm) tolere edebilme yeteneğine sahip olduklarından dolayı asit ve sülfat atağa karşı oldukça dirençli oldukları belirlenmiştir. Bir başka çalışmada Cihangir ve Akyol (2018) normal ve şlam uzaklaştırılmış atık malzeme kullanarak hazırladıkları PÇ içeren (kontrol) ve alkali kimyasallar (sıvı sodyum silikat (LSS) ve sodyum hidroksit (SH)) ile aktifleştirilmiş YFC içeren ÇMD numunelerinin 14-360 gün boyunca mekanik, hidrolik ve mikroyapı özelliklerini araştırmışlardır. Bulgular, A-YFC numunelerinin atık ve aktivatör tipinden bağımsız olarak 1,0-4,9 kat daha yüksek dayanım ürettiğini ve uzun dönemde özellikle LSS ile aktifleştirilen YFC içeren numunelerde dayanım kaybı oluşmadığını göstermiştir. Dayanım ve duraylılık özelliklerindeki olumlu gelişmelere ve A-YFC numunelerinin pH değerlerinin oldukça yüksek ( $\geq 11,0$ ) olmasına rağmen sülfat konsantrasyonlarının kontrol ÇMD numunelerine göre oldukça yüksek ( $16000 < 4000$  ppm) olduğu görülmüştür (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Normal (a,c) ve şlam uzaklaştırılmış (b,d) atık ile hazırlanan ÇMD'de asit (a,b) ve sülfat oluşumu (c,d) (Cihangir ve Akyol, 2018)

Aynı çalışmada, A-YFC ve PÇ içeren numunelerin 56 gün sonunda gerçekleştirilen porozite testi sonuçları değerlendirildiğinde, A-YFC numunelerinin kontrol numunelerine



kıyasla normal atık (%39,14-39,75<%43,13) ve şlam uzaklaştırılmış atıkta (%32,23-33,90<%35,05) daha düşük porozite değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, A-YFC numuneleri atık tipinden bağımsız olarak daha fazla miktarda orta boyutlu porozite ( $0,002 \mu\text{m} < n_{\text{Orta}} < 0,05 \mu\text{m}$ ) ve daha az miktarda büyük boyutlu porozite ( $n_{\text{Büyük}} > 0,05 \mu\text{m}$ ) değerleri üretilmesini sağlamıştır (Cihangir ve Akyol, 2018).

ANP'ye sahip endüstriyel atık malzemelerin AMD oluşumunu engelleme potansiyelinin araştırıldığı bir çalışmada Feng vd. (2004) farklı cüruf dozajlarında (2, 5, 8 ve 30 mg/l) kullanılan iki farklı YFC'nin AMD oluşumunda etkili parametreler olan asit (pH) ve sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) değişimi üzerine etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, cüruf tipinden bağımsız olarak sulu karışım içerisindeki YFC miktarının artmasıyla pH değerinin 2,03'ten 6,68'e yükseldiğini ve karışım içerisindeki  $\text{SO}_4^{2-}$  gideriminin %89 seviyesine ulaştığını rapor etmişlerdir. Başka bir çalışmada, Michalková vd. (2013) 2 farklı maden bölgesinden aldığı AMD örneklerine öğütülmüş YFC ile muamele etmiş ve ortamın sülfat konsantrasyonunda %43 oranında azalma olduğunu, pH değerinin 2'den 6'ya kadar yükseldiğini ve ortamdaki ağır metal konsantrasyonlarının (Fe, Al, As, Mn, Zn, Cu vb.) azaldığını belirtmiştir. Wajima (2015) ise 3 farklı cürufun (suda soğutulmuş, havada soğutulmuş ve çelik cürufu) AMD'ye etkisini incelemiş ve asit nötralizasyon kapasitesi bakımından en etkili cürufun çelik cürufu olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, araştırmacı pH değeri 2 olan AMD sıvısına suda soğutulmuş YFC (10 gr/100 ml) eklenmesi durumunda 6 saat sonunda pH değerinin 6'ya yükseldiğini belirtmiştir. AMD oluşumunun önlenmesi ve/veya azaltılması amacıyla gerçekleştirilen diğer bir araştırmada, Name ve Sheridan (2014) öğütülmüş ( $< 75 \mu\text{m}$ ) 100 gr bazik oksijen fırını cürufunun (BOFC) başlangıç pH değeri 2,5 olan AMD sıvısının pH değerini 4 saat sonra 12,1 seviyesine çıkartırken, çelik cürufunun (ÇC) aynı sürede 6,0'ya çıkarttığını rapor etmiştir. Ayrıca demir ve sülfat konsantrasyonlarındaki azalma, BOFC ilavesi sonrası sırasıyla %99,7 ve %75 olarak gerçekleşirken, ÇC ilavesinin ardından ise sırasıyla %63,6 ve %39,8 olmuştur.

### 1.6.2. Mermer Artığı (MA)

Bilimsel ve endüstriyel olarak iki farklı tanımı bulunan mermer; bilimsel olarak kalsitik ( $\text{CaCO}_3$ ) ve dolomitik ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) kireçtaşlarının yüksek sıcaklık ve basınç altında metamorfizmaya uğraması sonucu yeniden kristallenerek oluşan ve %50'nin üzerinde kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) ve/veya dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) içeren kayaçlar olarak

adlandırılırken (Onargan vd, 1992; Erkan, 1998; Tur, 2007), endüstriyel olarak ise blok verebilen, kesilip boyutlandırılabilen, cilalandığında parlayabilen, dayanıklı, güzel görünümlü, dekoratif amaçlı kullanılabilen ve ticari değeri olan her türlü kayaç (metamorfik, sedimanter ve magmatik) olarak tanımlanmaktadır (Onargan vd, 1992; Tur, 2007). Esas minerali kalsit ve/veya dolomit olan mermerin içerisinde az miktarda demir oksit, feldspat, silis, mika, silika ve organik maddeler yer almaktadır. Bununla birlikte genellikle beyaz ve grimsi renklere sahip olan bu kayaçlar, içerisinde bulundukları az miktardaki yabancı maddelerden dolayı farklı renklere (kırmızı, siyah, pembe, sarı vb.) sahip olabilirler (Gürü vd. 2005; Tur, 2007; Özer 2012; Tozsın vd., 2014a; Demir, 2017).

Önemini günümüze kadar sürdürmüş olan mermer, ilk çağlarda çoğunlukla bina yapıtaşı olarak kullanılırken, uygarlığın gelişimiyle birlikte dekoratif amaçlı ve sanatsal tasarımlarda kullanılmaya başlamıştır. Dünya mermer rezervinin 15 milyar m<sup>3</sup>'ten fazla olduğu tahmin edilirken, bu rezervin yaklaşık olarak 5,2 milyar m<sup>3</sup>'ü Türkiye'de yer almaktadır (Alyamaç ve Aydın, 2015). Tüm dünya rezervinin yaklaşık %40'lık kısmına sahip ülkemizde blok mermer üretim ocaklarında ve mermer işleme fabrikalarında mermerin kesilmesi, şekil verilmesi ve parlatılması işlemleri esnasında her yıl 2,592 milyon ton mermer artığı (MA) açığa çıkmaktadır (Şekil 1.6) ve bunların stok sahalarında depolanmaya devam edilmesinin imkânsız olduğu çok açıktır (Gesöglü vd., 2012; Kırgız, 2016).



Şekil 1.6. Yerüstünde depolanan mermer atıklarının görünümü

Günümüzde, bu atıkların depolanmasının dünya genelinde yaşanan ciddi çevresel problemlerden bir tanesi olması ve 1,0 m<sup>3</sup> mermer bloğunun işlenmesi sırasında makinelerin meydana getirdiği toz miktarının yaklaşık 0,481 m<sup>3</sup> (%48) olduğu düşünüldüğünde artan çevresel bilinçlenme ile ortaya çıkan bu atıkların atık depolama problemlerini ortadan

kaldırmak/azaltmak için alternatif çözüm yolları araştırmak oldukça önemli hale gelmiştir (Sadek vd., 2016). Bundan dolayı bu atıkların yeniden kullanılarak azaltılması hem doğal kaynakların optimal olarak kullanılması hem de çevresel etkilerin (tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, evre kirliliği vb.) azaltılması bakımından, MA'nın kompoze imento retiminde (Aruntaş vd., 2010) ve tuğla endüstrisinde (Bilgin vd., 2012) ilave olarak, asidik toprakların nötralizasyonunda (Tozsın vd., 2014a) ve beton yapımında ikame olarak (Aliabdo vd., 2014), asfalt yol kaplamalarında (Akbulut ve Gürer, 2007) ve daha duraylı beton retiminde (Binici vd., 2008; Sardinha vd., 2016) agrega yerine ve daha duraylı MD'de bağlayıcıya ikame (Ercikdi vd., 2015) olarak kullanılması gibi daha birçok farklı çalışmada uygulama alanı bulunmaktadır.

Eski ve terkedilmiş açık ocak sahasının farklı noktalarından alınan ve pH değeri 2,2-3,4 arasında değişen 7 farklı asidik toprak numunesi üzerine pH değeri 8,8-9,2 arasında değişen 7 farklı MA ve bunlardan oluşan mermer karışım numunesi belirli oranlarda eklenerek 12 ay boyunca pH, Eh ve elektrik iletkenlik testleri yapılış ve asidik maden toprağı ıslahı gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen bulgular, MA ile asidik toprak ıslahının toprak-su sisteminin pH ve elektrik iletkenliği değerleri üzerinde oldukça önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Kireçleme işleminden 1 ay sonra toprak numunesinin pH değeri hızlı bir Şekilde 3,2'den 6,0'ya yükselmiş ve deneysel çalışma süresi (12 ay) boyunca çoğu ağır metal için etkili çökelme aralığına denk gelen değer olan 5,7-7,0 arasında değişen pH değerlerinde tam anlamıyla sabit kalmıştır. Araştırmacılar, kalsitin çözünmesi ile asit nötralizasyonunun desteklendiğini ve numune içerisindeki baziklik derecesinin ve pH değerinin arttığını ifade etmişlerdir (Fernandez-Caliani ve Barba-Brioso, 2010).

Mermer artıklarının kullanıldığı bir başka çalışmada Tozsın vd. (2014a) asidik toprakların nötralizasyonu konusunda MA uygulamasının etkinliğini araştırmak için asidik özellikteki toprak malzemesi üzerine farklı oranlarda ve iki farklı MA (mermer ocağı artığı; MOA ve mermer kesim artığı; MKA) kullanarak belirli inkübasyon (bekletme) sürelerinde (15, 30, 45, 60 ve 75 gün) 25°C sıcaklığa sahip laboratuvar ortamında kolon testi yapmışlardır. Sonuçlar, 75 günlük inkübasyon süresi sonunda MKA ve MOA'nın asidik toprağın pH değerini 4,71'den sırasıyla 6,36 ve 6,84'e yükselttiğini göstermiştir. Buna karşılık kontrol numunelerinin pH'sı aynı kr süresinde sabit (4,71±0,18) kalmıştır. Bununla birlikte daha fazla miktarlarda yapılan MA ilavesinin daha düşük ilavelere göre pH'ı daha hızlı bir Şekilde yükselttiğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda MKA ve MOA'nın asidik

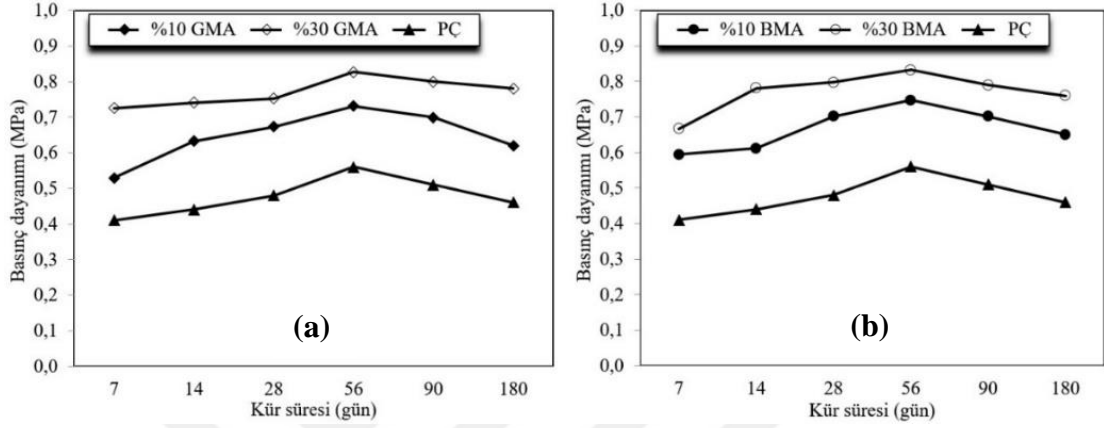
toprakların nötralizasyonunda kullanılabilceği ve böylece mermer atıklarının çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılabileceği bildirilmiştir.

Mermer artıklarının arazi (Giresun) koşullarında kullanımının araştırıldığı başka bir çalışmada Tozsın vd. (2014b) MKA ve MOA'nın toprak özellikleri ve fındık bitkisi üzerindeki etkisini 1 yıl boyunca yerinde incelemiştirlerdir. Araştırmacılar mermer artıklarının asidik toprağın nötralizasyonunda önemli bir etkiye sahip olduğunu ve tarımsal kireç ihtiyacı kadar MA uygulamasının ardından toprağın pH değerinin 4,71'den 5,88'e yükseldiğini gözlemlemiştirlerdir. Ayrıca, MA uygulaması sonucunda fındık veriminin %43,3 oranında artarak hektar başına 1605,3 kg seviyesine ulaştığı bildirilmiştir.

Artvin-Murgul Bakır işletmesi flotasyon atığının sebep olduğu AMD ve ağır metal salınımının engellenmesi için ANP bulunan MKA kullanımının araştırıldığı çalışmada, Tozsın vd. (2016) 50 g atık üzerine asit baz hesaplama testinden elde edilen sonuca göre değişen miktarlarda (33-132 g) MKA ve belli miktarda saf su ekleyerek 10 günlük periyotlar halinde olmak üzere toplam 40 gün boyunca çalkalama testi yapmışlardır. Yazarlar, başlangıç pH değeri 2,1 olan atık malzemeye MKA ilavesinin ardından geçen 40 günlük süreç sonunda pH değerinin MKA ilave miktarına bağlı olarak 6,5-7,8 arasına yükseldiğini ve 4558 mg/l olan başlangıç sülfat konsantrasyonunun %82 düşüşle 838 mg/l seviyesine kadar azaldığını açıklamışlardır.

Ercikdi vd. (2015) ÇMD karışımı içerisinde bağlayıcı olarak kullanılan PÇ'ye ilave olarak eklenen %10-30 oranındaki iki farklı (Gümüşhane mermer artığı (GMA) ve Bayburt mermer artığı (BMA)) öğütülmüş MA'nın 7-180 günlük kür süresi aralığındaki basınç dayanımı ve asit oluşumuna karşı gösterdiği performansı incelemiştirlerdir. Araştırmacılar tarafından, %10 ve %30 oranında GMA ve BMA içeren ÇMD numunelerinin aynı kür sürelerinde (7-180 gün) kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla %29-78 ve %34-77 daha yüksek basınç dayanımı ürettiği ve %30 MA ilaveli ÇMD numunelerinde 56-180 gün arasında sadece %6-8 dayanım kaybı ile sonuçlanan daha yüksek uzun dönem duraylılık performansının sergilendiği bildirilmiştir (Şekil 1.7). Ayrıca sülfürlü minerallerden oluşan atık malzeme ile üretilen ÇMD'de meydana gelen oksidasyon kaynaklı üretilen asitin özellikle uzun dönemde ÇMD'nin duraylılığına etkisi tartışılmış ve pH değeri 10,5'in altına düşen kontrol ÇMD numuneleri ile karşılaştırıldığında, 180 günlük kür süresi sonunda bile yüksek pH değerlerinde ( $pH \geq 12,15$ ) kalabilmeyi başaran MA içeren ÇMD numunelerinin duraylılık performansı oldukça istikrarlı bir görünüm sergilemiştir. Araştırmacılar, MA içeren ÇMD'de meydana gelen yüksek pH değerleri sonucu MA'nın macun dolgunun

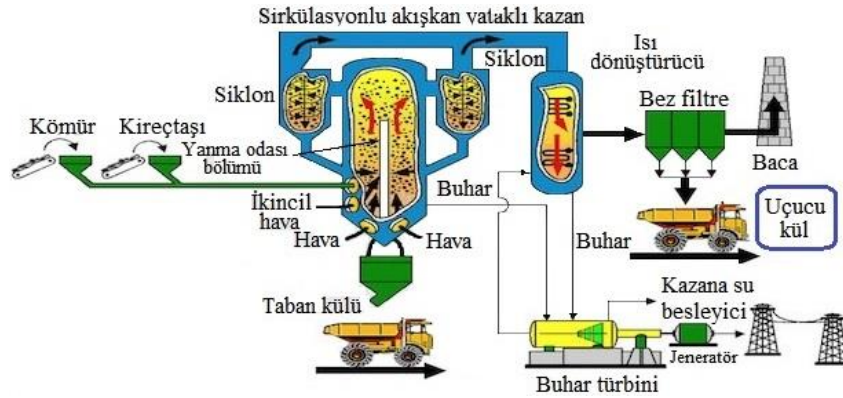
duraylılığına sağladığı olumlu katkıyı literatürle uyumlu olarak (Fernandez-Caliani ve Barba-Brioso, 2010) MA'nın ana bileşeni olan kalsitin çözünmesi ile dolgu içerisinde OH<sup>-</sup> iyonlarının salınımı sayesinde asit oluşumunun engellenmesini teşvik etmesi ile ilişkilendirmişlerdir.



Şekil 1.7. GMA (a) ve BMA (b) ilavesinin ÇMD dayanım ve duraylılığına etkisi (Ercikdi vd., 2015)

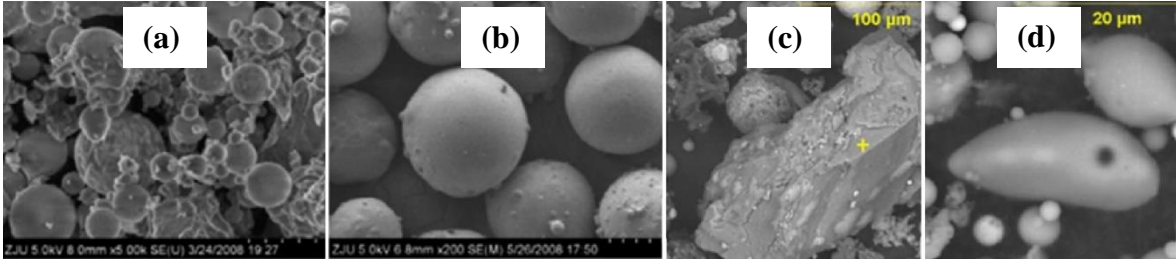
### 1.6.3. C-sınıfı Uçucu Kül (C-UK)

Kömür yakılarak elektrik üretilen termik santrallerde, beslenen kömürün içindeki organik ve inorganik maddelerin 1200-1700°C sıcaklıktaki fırın ortamında erimesi ve bacadan atılması sırasında soğuyarak atmosfere karışmadan önce elektro-filtreler vasıtasıyla tutulan endüstriyel yan ürün; uçucu kül (UK) olarak adlandırılır (Şekil 1.8) (Türker vd., 2009; Blissett ve Rowson, 2012; Yao vd., 2015; Xu ve Shi, 2018).



Şekil 1.8. Uçucu kül üretiminin görünümü (URL-4, 2018)

UK tanelerinin mikromorfoloji gözlemleri sonucunda baskın olarak camsı küresel şekilde, içi boşluksuz küresel yapılar, boşluklu küreler, yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yapay hafif agrega şekilli, yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar ve gözenekli yanmamış karbon içerdiğini ortaya koymaktadır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. UK'nın tane şekilleri; küresel (a), boşluklu küreler (b), mineral agrega (c) ve düzensiz şekilli (d) (Xu ve Shi, 2018)

Taneciklerinin şekil ve büyüklük farklılıkları UK tipinden kaynaklanmakta olan uçucu küllerin tane büyüklükleri 0,5-150  $\mu\text{m}$  arasında değişmekte ve içerisinde camsı küresel taneciklerin yanı sıra düzensiz şekilli tanecikler de bulunmaktadır (Türker vd., 2009; Yao vd., 2015). UK'nın rengi ise genellikle gridir ve yanmamış karbon miktarı arttıkça rengi daha da koyulaşmaktadır. Uçucu külün özgül ağırlığı 2,2-2,7  $\text{g}/\text{cm}^3$  arasındadır ve özgül yüzeyi çimento inceliğine yakın olup, öğütme yapmadan kullanılabilceği belirtilmiştir (Özer, 2012). Kimyasal özelliklerine göre UK'nın ana bileşenleri; değişken miktarlarda bulunan karbonla birlikte alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ), demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) olarak belirlenmiştir. Ayrıca farklı kömür tiplerine bağlı UK kimyasal bileşimleri Tablo 1.2'de özetlenmiştir.

Tablo 1.2. Kömür tipine bağlı UK'nın kimyasal bileşimi (Blissett ve Rowson, 2012)

Bileşim (%)	Bitümlü kömür	Düşük bitümlü kömür	Linyit kömürü
$\text{SiO}_2$	20-60	40-60	15-45
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5-35	20-30	10-25
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	10-40	4-10	4-15
$\text{CaO}$	1-12	5-30	15-40
$\text{MgO}$	0-5	1-6	3-10
$\text{Na}_2\text{O}$	0-4	0-2	0-6
$\text{K}_2\text{O}$	0-3	0-4	0-4
$\text{SO}_3$	0-4	0-2	0-10
Kızdırma kaybı	0-15	0-3	0-5

Uçucu küller, kömürün yanma tipinden kaynaklanan kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak F ve C sınıfı olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılmıştır. F-sınıfı uçucu küller  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$  olan antrasit veya bitümlü kömürün yakılmasıyla, C-sınıfı küller (C-UK) ise,  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$  olan düşük bitümlü kömür ve linyit kömürünün yakılmasıyla meydana gelmektedir (Blissett ve Rowson, 2012; ASTM C618-17a, 2017). Çoğu linyit kömürü ve düşük bitümlü kömürlerin yakılmasıyla meydana gelen yüksek CaO içeriğine ( $\geq \%10$ ) sahip C-UK'ların, düşük puzolanik özelliğinin yanı sıra kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) varlığında çimentomsu ürünlerin oluşumu ile kısmen bağlayıcılık özellik de gösterdikleri ve yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırıldıkları bildirilmiştir (Xenidis vd., 2002; Türker vd., 2009; Blissett ve Rowson, 2012). Çoğu uçucu küllerin bazikliğe karşı eğilimi olmakla birlikte pH değerleri 1,2-12,5 arasında değişmektedir. Diğer küçük (önemsiz) alkaliler veya bazik katyonların asit-baz dengesine katkı sağlayabilmesine rağmen uçucu kül-su sisteminin pH değeri, esasen kül içindeki Ca/S molar oranına bağlıdır. Ca/S oranı ve sonucundaki pH değerine bağlı olarak, uçucu küller; güçlü bazik kül (pH= 11-13), orta (ılımlı) bazik kül (pH= 8-9) ve asidik kül olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilir (Yao vd., 2015).

Güncel literatürdeki çoğu tahminlerden küresel çapta yıllık UK üretiminin 500 milyon ton olduğu anlaşılmakla birlikte bu tahminlerin en azından 10 yıl eskiye dayandığı belirtilmektedir. Büyük ölçüde Çin'deki ekonomik büyüme sebebiyle aradan geçen zaman boyunca kömür tüketimi %50'ye kadar artmıştır. Rakamlar göz önünde bulundurulduğunda dünya çapında her yıl 750 milyon ton UK üretileceği tahmin edilmektedir. Çimento ve beton endüstrisi, tarım, seramik ve cam sanayii, toprak stabilizasyonu, madencilik uygulamaları ve yapısal dolgu gibi çeşitli alanlarda değerlendirilen UK'nın Almanya, Hollanda ve Belçika'da kullanımını %95'den fazla, İngiltere'de ise yaklaşık %50'dir (Aruntaş, 2006). Bununla birlikte, ABD ve Avrupa'da güncel UK kullanımını sırasıyla %39 ve %47 olarak gerçekleştirirken, UK'nın küresel kullanım ortalaması ise %25'e yakın olarak tahmin edilmektedir (Blissett ve Rowson, 2012; Tangüler Bayramtan, 2015). Türkiye'de ise büyük ölçekli 15 adet termik santral (Tablo 1.3) faaliyet göstermekte, bu santrallerde elektrik üretimi için yaklaşık 62 milyon ton kömür yakılmakta ve bunun sonucunda 17,5 milyon ton kül açığa çıkmaktadır (Başar vd., 2016). Ortaya çıkan atıkların %80-90'ının uçucu kül olduğu düşünüldüğünde; Başar vd. (2016) yaklaşık 15 milyon ton UK açığa çıktığını bildirirken, Tangüler Bayramtan (2015) UK üretiminin yıllık yaklaşık 20 milyon ton olarak tahmin edildiğini rapor etmiştir. Ayrıca bu miktarın 2020 yılına kadar yıllık 50 milyon tonu

geçebileceği öngörülmektedir (Görhan vd., 2008). Açığa çıkan büyük miktarlardaki UK'nın Türkiye'de çok az miktarının yeniden değerlendirilebilmesinden dolayı bu endüstriyel atıkların taşınması, açık sahalarda depolanması (Şekil 1.10) ve buralarda muhafaza edilmesi (saklanması) veya bu atıkların gelişigüzel atılması tarım ürünlerine zarar verme, toprakta süzülme, çevrede tozlanma, radyasyon, yağmur ve rüzgâr erozyonu gibi problemler meydana getirmekte ve bu çevre sorunları sonucu doğal hayat, tarım ürünleri, su ve hava kalitesi, çevre güzelliği ve bölgenin ekonomik durumu olumsuz etkilenmektedir (Aytekin, 2009). Bu yüzden her yıl üretilen muazzam miktarlardaki UK'nın önemli bir kısmının yeniden değerlendirilerek bertaraf edilmesi zorunlu ve hayati derecede önemli görünmektedir.

Tablo 1.3. Türkiye'de kömür kullanılan termik santraller

<b>Termik Santraller Adı</b>	<b>Kömür Tipi</b>	<b>Bulunduğu Şehir</b>
Afşin Elbistan	Linyit	Kahramanmaraş
Biga		Çanakkale
Çan		Ankara
Çayırhan		Sivas
Kangal		Bursa
Orhaneli		Kütahya
Seyitömer		Manisa
Tunçbilek		Muğla
Soma		
Kemerköy		
Yatağan		
Yeniköy		
Çatalağzı		Antrasit
Zetes	Bitümlü	
Sugözü		Adana



Şekil 1.10. Yatağan (a) ve Afşin-Elbistan (b) termik santrali atık depolama sahaları (Başar vd., 2016)

Dünya genelinde kömür yakılarak enerji üretilen termik santrallerde açığa çıkan büyük miktarlardaki UK'nın atık depolama sahalarında depolanmasına kıyasla oldukça iyi bir



alternatif olarak yeniden kullanılmasının (değerlendirilmesinin) hayati derecede önemli olması ve çevresel faydalarının yanı sıra önemli ekonomik kazanımlar sağlayabileceği öngörülerek çimentoda hammadde olarak, tarımda toprak iyileştirici malzeme olarak (Manoharan vd., 2010; Pandey ve Singh, 2010), inşaat ve maden sektörünün olmazsa olmazı olan betonda (Memon vd., 2002; Nath ve Sarker, 2011; Shaikh ve Supit, 2015; Wang ve Park, 2015) ve çimentolu macun dolguda (Tariq ve Nehdi, 2007; Ercikdi vd., 2009) çimentoya ikame/ilave ve agrega olarak, cam ve seramik üretiminde (Erol vd., 2008; López-Badillo vd., 2013), zeolit sentezinde (Babajide vd., 2012), küçük gözenekli malzemelerin yapımında (Dhokte vd., 2011) ve kataliz işlemlerinde katalizör olarak (Saputra vd., 2012) kullanımına yönelik birçok çalışma yapılmıştır.

Tariq ve Nehdi (2007) yüksek pirit içeriğine (%52,3) sahip maden atığı kullanarak PÇ ile hazırladıkları ÇMD'de 180 günlük kür süresi boyunca asit oluşumunun giderek arttığını (pH değerinin 12,0'den 4,0'lere kadar düştüğünü), hatta agresif çevrelere karşı daha dirençli olan SDC kullanımında dahi asit oluşumunun gözle görülür derecede azalmadığını (pH<6,0) rapor etmişlerdir. Sülfür içeriği yüksek atıklar ile hazırlanan macun dolguda meydana gelen asitin nötralizasyonunda çimentonun tek başına yeterli olmadığını ifade eden araştırmacılar, PÇ yerine ikame olarak uçucu kül (C-sınıfı ve/veya F-sınıfı) kullanımının macun dolgu gibi katılmış bir yapının mekanik dayanımını geliştirirken asiti nötralize ederek ve baziklik sağlayarak asit oluşumunu azalttığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, dolgu karışımında kullanılan UK'nın PÇ içeren ÇMD'de sülfat atak oluşumuna yatkın kalsiyum alümina bileşimlerinin varlığını azalttığını göstermiştir.

Okumuşoğlu (2009) Çanakkale Çan ilçesinde bulunan terk edilmiş yerüstü linyit madeninde meydana gelen asidik maden gölündeki su kalitesini değerlendirmek için alınan su örnekleri üzerinde pH ve ağır metal analizleri yapmış ve asidik maden suyunun (AMS'nin) iyileştirilmesi amacıyla UK kullanarak asit nötralizasyon ve metal adsorpsiyonu alternatifleri üzerinde çalışmıştır. Bu kapsamda Hayırtepe asidik maden gölünden alınan su örnekleri içerisine belirli karışım oranlarında (1:1, 1:2, 1:3, 1:5, 1:10 ve 1:20) Çataltepe termik santralinde 2006 (düşük CaO içerikli) ve 2008 (yüksek CaO içerikli) yıllarında üretilen uçucu küllerden eklenmiş ve UK'nın asit nötralizasyon performansı incelenmiştir. Elde edilen bulgulardan, AMS içerisine eklenen yüksek miktarlardaki (1:1, 1:2, 1:3 ve 1:5) UK ile birlikte çözeltinin pH'nın 11 saatin sonunda yüksek asidik seviyeden (2,28) oldukça alkali seviyelere (pH= 11-13) yükseldiği ve başlangıçta sülfat konsantrasyonu 5912,5 mg/l iken, karışım oranlarına bağlı olarak 12-2600 mg/l arasına kadar düştüğü belirlenmiştir.

Benzer olumlu bulguların elde edildiği bir başka çalışmada Potgieter-Vermaak vd. (2006) AMS içerisindeki kirletici konsantrasyonların giderilmesi ve suyun pH değişimi üzerine nötralizasyon malzemesi olarak UK'nın etkisini araştırdıkları çalışmalarında 6 saatlik temas süresi sonunda suyun pH değerinin 1,2'den 7,9'a yükseldiğini ve AMS bünyesindeki  $SO_4^{2-}$  gideriminin %78'e ulaştığını bildirmişlerdir. Ayrıca, kullanılan nötralizasyon malzemelerinin yüzey alanındaki büyümenin nötralizasyon hızını arttırabileceği belirtilmiştir. Sülfürlü atıktan kaynaklanan asit üretiminin kontrolünde C-UK'nın kullanım potansiyelinin araştırıldığı çalışmada (Xenidis vd., 2002) asit üretme potansiyeline sahip malzeme olarak sınıflandırılan (%27 S) sülfürlü atık ile farklı miktarlarda C-UK (%10-63) laboratuvar ölçekli kolon kinetik test hücresinde homojen bir şekilde karıştırılarak sızıntı suyu kalitesinin (pH gelişimi, iletkenlik, sülfat içeriği, permabilite ve metal konsantrasyonu vb. parametrelerin) değerlendirilmesi amacıyla 600 gün boyunca takip edilmiştir. Bulgulardan, sülfürlü atık içerisine yapılan oldukça düşük C-UK ilavesinde (%10) bile sızıntı suyunun dikkate değer ölçüde baziklik kazandığı ve kontrol numunesine kıyasla pH değerinin (9,5>4,1) bir hayli yükseldiği gözlenmiştir. Bununla birlikte %10 ve %18 C-UK ile muamele edilen kolonlardan elde edilen sızıntı sularının sülfat konsantrasyonları sırasıyla 920-1830 mg/l ve 330-1560 mg/l arasında değişirken, kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında, 600 gün sonunda kümülatif çözünmüş sülfat miktarının %10 ve %18 C-UK için sırasıyla %49 ve %72 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Jones ve Çetin (2017) laboratuvar ölçekli kolon hücresi kullanarak pH değeri asidik seviyede (2,0-4,0) bulunan maden atığı içerisine farklı CaO içeriğine sahip (UK1; %1,07, UK2; %0,7 ve UK3; %12,5) 3 farklı UK ekleyerek hazırladıkları karışımın pH değişimlerini ölçerek AMD oluşumunun engellenmesi/azaltılması konusunda UK'nın etkisini araştırmışlardır. Sonuçlardan, UK3'ün karışımın pH değerini oldukça alkali düzeye (pH>9,0) yükselttiği, buna karşın diğer UK numunelerinin (UK1 ve UK2) asidik seviyelerde (pH<6,0) kaldığı belirlenmiştir. Bu durum geçmiş çalışmalarla (Vadapalli vd., 2008) benzer sonuçların elde edilmesiyle beraber daha yüksek CaO içeriğine sahip UK'nın bünyesindeki alkali bileşenlerin çözünme miktarının artmasından dolayı asit nötralizasyon kapasitesinin daha fazla olmasıyla açıklanmıştır.

Ercikdi vd. (2009) bağlayıcı olarak %5 PÇ kullanarak (kontrol) ve PÇ yerine ağırlıkça %10-30 oranında UK ikame ederek hazırlanmış oldukları ÇMD numunelerini 7-360 günlük kür süresi aralığında basınç dayanımı testine tabi tutarak ÇMD'nin kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılık performansını araştırmışlardır. İkame oranından bağımsız olarak UK

içeren ÇMD numunelerinin basınç dayanımı bütün kür sürelerinde kontrol ÇMD numunelerinin altında kalırken, uzun dönemde dayanım kaybını oldukça azalttığı/engellediği ve böylece ÇMD’de uzun dönemde meydana gelen duraylılık problemlerini önemli derecede azalttığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar düşük reaktif SiO<sub>2</sub> içeriğinden kaynaklı olarak UK’nın ÇMD’nin dayanım kazanımına kısıtlı katkı sağlamasına rağmen, uzun dönem duraylılık konusundaki yararlı etkisini sülfürlü atıkların oksidasyonundan kaynaklı asit oluşumuna karşı UK’nın yüksek CaO içeriğinden dolayı asit nötralizasyon kapasitesinin yüksek olması ile ilişkilendirmişlerdir (Xenidis vd., 2002). Başçetin ve Eker (2019) Kastamonu-Küre bakır madeni cevher hazırlama tesis atıkları ile hazırladıkları ÇMD karışımlarında üç farklı (%5, %7 ve %9 PÇ) bağlayıcı içeriği ve bağlayıcıya ikame olarak %10-40 oranlarında Çatalağzı Termik santralinden temin edilen UK kullanmışlardır. Araştırmacılar ürettikleri ÇMD numuneleri üzerinde gerçekleştirdikleri kısa dönem mekanik testler sonucunda %5-7 PÇ oranında hazırlanan %10-40 UK ikameli numunelerin kontrol numunelerine kıyasla daha düşük dayanım ürettiğini ve 14 günden sonra dayanım kayıplarının meydana geldiğini, buna karşın, bağlayıcı oranı %9’a arttırıldığında %10 UK içeren numunelerin basınç dayanımının aynı bağlayıcı oranına sahip kontrol numunelerini geçtiğini ve dayanım kaybı meydana gelmediğini bildirmişlerdir.

#### **1.6.4. Kireçtaşı Artığı (KA)**

Yer kabuğunun üst katmanında yaygın bir biçimde bulunan kayalardan birisi olan ve farklı jeolojik süreçlerde oluşan kireçtaşı; kimyasal ve organik etkiler vasıtasıyla sularda çökelen minerallerin meydana getirdiği bir kayadır. Karbonatlı tortul kayalar için kullanılan genel bir tabir olan kireçtaşları, esas olarak kalsit, dolomit, aragonit ve manyezit gibi kalsiyumca (Ca) zengin CaCO<sub>3</sub> veya CaCO<sub>3</sub>/MgCO<sub>3</sub> bileşiklerine sahip minerallerden oluşmaktadır (Şekil 1.11) (Parlakııldız, 2008; Semerci, 2008). Sedimentasyon süreçleri sırasında bünyesine giren organik maddelerin ve minerallerin miktarlarına bağlı olarak kireçtaşları, yüksek derecedeki saflığın belirtisi olan beyaz renkte ve safsızlıklardan kaynaklı gri, kahverengi, yeşil, açık sarı ve kırmızı renklerde olabilirler. Kalsitik kireçtaşlarının (KK) özgül ağırlıkları 2,3-2,7 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişmekte ve sertlik derecesi 3,0 iken, dolomitik kireçtaşlarının (DK) özgül ağırlıkları 2,8 gr/cm<sup>3</sup> ve sertliği 3,5-4,0 arasındadır. Asit nötralizasyonunda kullanılabilen kireçtaşlarından KK’nın sudaki pH değeri 8,0-9,0 iken, DK’nın pH değeri 9,0-9,2 arasında değişmektedir (Parlakııldız, 2008).



Şekil 1.11. Kireçtaşlarının genel görünümü

Kimyasal bileşimine, oluştuğu bölgeye, jeolojik oluşumuna, mineralojik yapısına, renk ve sertlik özelliklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilen kireçtaşlarının; kimyasal bileşimi ve içindeki kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) miktarı esas alınarak yapılan sınıflandırma Tablo 1.4'te gösterilmiştir.

Tablo 1.4. Kireçtaşlarının sınıflandırılması (Semerci, 2008)

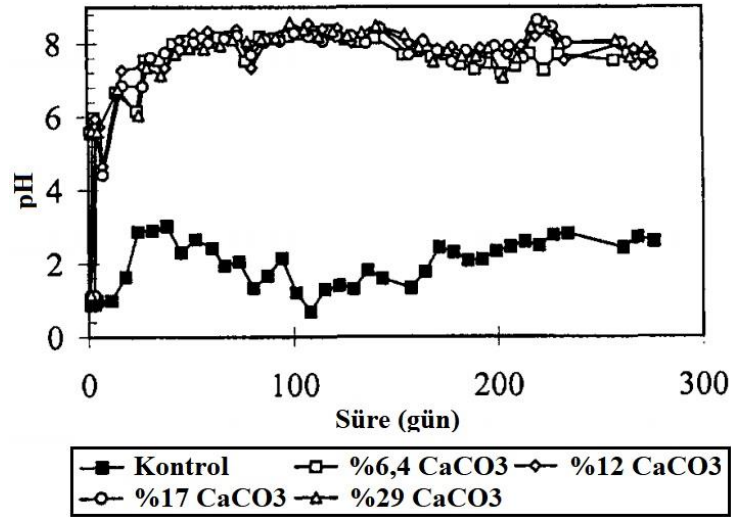
<b>Kimyasal bileşimine göre</b>			
Kalsiyum içeriği yüksek			<%5 MgO
Magnezyum içeriği yüksek			%5-20 MgO
Dolomit			%20-46 MgO
<b>Kalsiyum karbonat (<math>\text{CaCO}_3</math>) oranına göre</b>			
Çok yüksek kalsiyumlu	$\text{CaCO}_3 \geq \%97$	Magnezyumlu kireçtaşı	%5-20 $\text{MgCO}_3$
Yüksek kalsiyumlu	$\text{CaCO}_3 \geq \%95$	Dolomitik kireçtaşı	%20-40 $\text{MgCO}_3$
Yüksek karbonatlı	$\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 \geq \%95$	Yüksek magnezyumlu dolomit	%40-46 $\text{MgCO}_3$
Kalsitik kireçtaşı	%5 $\text{MgCO}_3$		

Kireçtaşı artıklarının çimento sanayi, inşaat sektörü, seramik, cam ve tuğla üretimi gibi çeşitli alanlarda kullanılmasının yanı sıra AMD oluşumu sonucu meydana gelen çevresel sorunların etkisinin önlenmesi/azaltılması konusunda birçok çalışma yapılmıştır (Mylona vd., 2000; Vermaak-Potgieter vd., 2006; Genty vd., 2012; Shim vd., 2015).

Shim vd. (2015) kapatılmış bir kömür madeni çevresinde bulunan AMD içeren akarsu ve/veya derelerin uzun süreli (yaklaşık 10 yıllık) su kalitesi değişimi üzerinde kireçtaşının etkisini araştırmak için 1995 yılında maden üretiminin durdurulmasından sonra 1999 yılında kömür madenine kireçtaşı ilavesi yapmışlar ve yaklaşık 10 yıl sonra (2008-2011 yılları arasında) yapılan pH ölçümlerinden kireçtaşı ilavesi öncesinde su numunelerinin 2,5-3,0 arasında olan pH değerlerinin 4,5-5,0 seviyelerine yükseldiğini ve buralarda sabit seyrettiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, numunelerin Ca konsantrasyonunun 10 yıl sonra dahi

azalmadığını ve Fe, Ni, Zn gibi zararlı metal konsantrasyonlarının azaldığını gözlemleyen yazarlar; ortama yeterli miktarda ince boyutlu ( $<40 \mu\text{m}$ ) ve yüksek özgül yüzey alanına sahip kireçtaşı ilave edilmesi ile ortamın pH değerinin 8,3'e kadar çıkabildiğini ortaya koymuşlardır.

Sülfürlü atıklardan kaynaklanan asitin engellenmesi için kireçtaşı ilavesi uygulamasının yaygın bir teknik olduğu belirtilen bir çalışmada (Mylona vd., 2000), pirit konsantresinden kaynaklı asitin engellemesi için stokiyometrik gereksinimden daha az olan küçük miktarlarda kireçtaşı ilavesinin etkinliği araştırılmıştır. Bu amaçla %42,6 sülfür içeriğine sahip kısmen oksitlenmiş pirit konsantresi içerisine %6,4-29,0 oranlarında kireçtaşı (ağırlıkça %11'i dolomit) ilave edilerek uzun süreli (270 günlük) laboratuvar ölçekli kolon kinetik testine tabi tutulmuş ve kolonun drenaj kalitesi gözlemlenerek pirit-kireçtaşı karışımının performansı (pH, sülfat miktarı, oksidasyon-redüksiyon potansiyeli, iletkenlik, asitlik-bazlık ve metal konsantrasyonu) değerlendirilmiştir. Araştırmacılar kontrol kolon kinetik test hücrelerinde 270 gün boyunca ölçülen pH değerinin  $2,0 \pm 0,7$  seviyesinde iken, farklı oranlarda kireçtaşı eklenen test hücrelerinde kireçtaşı miktarının artmasıyla pH değerlerinin yükselerek 250 gün boyunca alkali seviyede seyrettiğini ve ortalama 7,8-8,0 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Kireçtaşı ilavesinin pH değişimine etkisi (Mylona vd., 2000)

Ayrıca bulgular sonucu, ilave edilen kireçtaşı miktarına bağlı olarak kontrol (sadece sülfürlü atık içeren) numunesine kıyasla drenaj sıvısındaki Fe, Pb, Zn, Cd, Mn ve sülfat kaynaklı S gibi zararlı metal konsantrasyonlarında çok yüksek oranlarda (%98,5'a kadar)

azalma sağlandığı, %17 kireçtaşı ilavesi yapılan pirit-kireçtaşı karışımının permabilitesinin kontrol numunesine göre 10 kat azaldığı ve karbonat minerallerinin (kalsit ve dolomit) çözünmesi sonucunda ortamda sülfat minerallerinden birisi olan jipsin oluştuğu belirtilmiştir (Mylona vd., 2000).

Genty vd. (2012) AMD Lorraine ve AMD Light olarak adlandırılan 2 farklı AMD çözeltilisinin iyileştirilmesi için yığın tepkime hücresi ve kolon test hücresi vasıtasıyla laboratuvar ölçekli olarak oksijensiz kireçtaşı kanalı yöntemi kullanılarak kireçtaşına ait tane boyutu ve mineraloji gibi farklı parametrelerin etkisini değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda üç farklı tane boyutunda (iri; 1,3-3,8 cm, orta; 0,8-1,9 cm ve ince; 0,03-0,8 cm) kalsit ve orta boyutlu (0,8-1,9 cm) dolomit malzemesi kullanılarak oksijenli ve oksijensiz ortamda testler gerçekleştirilmiştir. Bulgular değerlendirildiğinde, orta boyutlu kalsit ve dolomit malzemesi başlangıç pH değeri 3,3 olan AMD Lorraine çözeltilisinin oksijensiz koşullarda yığın tepkime hücresinde 15 saat sonunda pH değerlerini sırasıyla 5,8 ve 5,5'e yükseltirken, aynı koşullarda başlangıçta pH değeri 5,6 olan AMD Light çözeltilisinin pH değerlerini 6,0 ve 5,7'ye yükseltmiştir. Ayrıca, kalsit numunesinin tane boyutu 1,3-3,8 cm'den 0,03-0,8 cm'ye küçüldüğünde çözeltilerin (AMD Lorraine ve AMD Light) pH değerleri 5,7'den sırasıyla 6,0 ve 6,2'ye yükselmiştir. Araştırmacılar oksijensiz koşullar sona erdikten sonra ise ağırlıklı olarak metallerin hidrolizi ve demir hidroksitin çökmesiyle ilişkilendirdikleri pH düşmesinin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. 40 gün boyunca oksijensiz olarak gerçekleştirilen kolon test hücresinde AMD Lorraine ve AMD Light çözeltilerinin pH değerleri orta boyutlu kalsit eklendiğinde sırasıyla 3,3 ve 5,5'den 6,0 ve 6,4'e kadar yükselirken, aynı boyutlu dolomit eklendiğinde sırasıyla 5,2 ve 6,0'ya kadar artmıştır. Ayrıca yığın tepkime hücresinde elde edilen sonuçlarla benzer olarak kalsitin tane boyutu küçüldükçe çözelti tipinden bağımsız olarak pH değerlerinin yükseldiği belirtilmiştir. Araştırmacılar analizler sonucunda, tane boyutunun küçültülmesiyle daha yüksek pH değerlerinin elde edildiğini ve nötralizasyon kapasitesi üzerinde kireçtaşı tane boyutunun oldukça etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Dahası, %95 CaCO<sub>3</sub> içeriğine sahip olmasından dolayı kalsitin nötralizasyon potansiyelinin dolomite kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Genty vd., 2012).

Temsili bir AMS'nin pH değişimi, AMS içerisindeki demir (ferrus ve ferrik) ve sülfat iyonları gideriminin boyutu ve kalsiyum iyonu konsantrasyonundaki değişim konusunda iki farklı nötralizasyon malzemesinin (kireçtaşı ve dolomit) etkinliğinin ve uygulanabilirliğinin araştırıldığı başka bir çalışmada Potgieter-Vermaak vd. (2006) AMS içerisine eklenen 50 ve

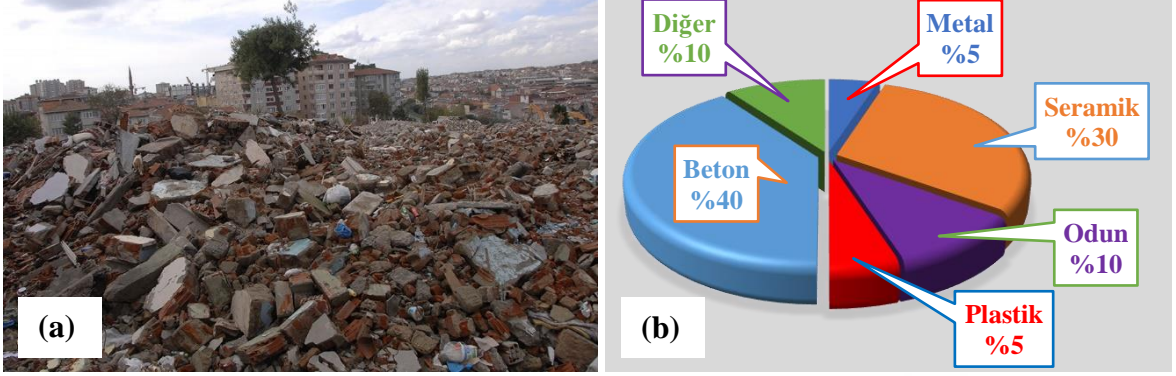
100 g/l kireçtaşının 6 saatlik temas süresi sonunda suyun pH değerini 1,2'den sırasıyla 7,2 ve 7,4'e yükselttiğini, buna karşın daha fazla miktarlarda (120 ve 160 g/l) eklenen dolomitin sırasıyla ancak 6,5 ve 6,9'a kadar yükselttiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, AMS içerisindeki  $SO_4^{2-}$  iyonları giderimi nötralizasyon malzemesi miktarına bağlı olarak kireçtaşı ve dolomit için sırasıyla %70 ve %64 seviyelerinde gerçekleşirken, ferrus ve ferrik demir iyonları kireçtaşı ve dolomit ile %100 ve %99,6'ya ulaşan oranlarda uzaklaştırılmıştır. Bulgular sonucunda, araştırmacılar daha yüksek özgül yüzey alanına sahip nötralizasyon malzemelerinin kullanılması ile asit nötralizasyon hızının artabileceğini rapor etmişlerdir.

Zheng vd. (2016) kireçtaşı ikamesinin ÇMD'nin dayanım, mikroyapı ve işlenebilirlik özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmalarında, düşük sülfür içeriğine (%5,14 S) sahip iri taneli atık malzeme yerine ikame olarak %10-22,5 oranlarında öğütülmüş kireçtaşı kullanarak hazırladıkları ÇMD numuneleri üzerinde 7-112 günlük kür süresi aralığında basınç dayanımı ve 7-28 gün arasında porozite (MIP) testleri uygulamışlardır. Bulgulardan %10'a kadar yapılan kireçtaşı ikamesinin daha ince taneli kireçtaşının iri atık taneleri arasındaki boşlukları doldurmasından (filler etkisinden) dolayı dolgunun dayanım ve işlenebilirlik performansının arttığı gözlemlenen çalışmada, kireçtaşı ikame oranının artmasıyla kür süresinden bağımsız olarak basınç dayanımının düştüğü, buna karşın her iki ikame oranında (%10 ve %22,5) hazırlanan ÇMD numunelerinin kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek dayanım ürettiği belirlenmiştir. Porozite (MIP) testi sonuçları incelendiğinde kireçtaşı (%10 ve %22,5) ikameli ÇMD numunelerinin 7 günde kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek poroziteye (%38,6-41,5>%35,5) sahip olduğu görülürken, 28 gün sonunda %22,5 kireçtaşı ikameli numunenin porozitesi büyük boyutlu porozite ( $n_{Büyük}$ ) miktarının %20,4'ten %15,6'ya düşmesi ve küçük boyutlu porozitesinin ( $n_{Küçük}$ ) %14,4'ten %17,8'e yükselmesiyle; yani büyük boyutlu gözeneklerin küçülmesiyle kontrol numunesine kıyasla (%33,4<%34,8) azalmıştır (Zheng vd., 2016).

### 1.6.5. İnşaat Yıkıntı Atığı (İYA)

Ekonomik servis ömrünü tamamlayan yapıların yıkılmasının yanında, kentsel geri dönüşüm faaliyetleri kapsamında eski yapıların (binaların) yıkımı ve deprem gibi doğal afetler sonucu önemli miktarlarda ortaya çıkan ve genel olarak beton, tuğla, harç, seramik, kum, çakıl, metal, plastik, odun, moloz içeren malzeme karışımı inşaat yıkıntı atığı (İYA) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1.13a). İYA'nın %80'ini beton, seramik, harç ve atık tuğla

malzemeleri oluşturmaktadır (Şekil 1.13b) (Tabsh ve Abdelfatah, 2009; Özalp vd., 2016; Chen vd., 2018).



Şekil 1.13. İYA'nın görünümü (a) ve genel bileşenleri (b) (Özalp vd., 2016)

Şu anda, Amerika'da bina, yol, köprü ve havaalanı inşaatı ve yenileme çalışmaları nedeniyle üretilen 200 milyon ton'dan fazla İYA'nın sadece yaklaşık yarısı yeniden değerlendirilmektedir (Jones ve Cetin, 2017). 2010 yılı verilerine göre, Avrupa Birliği (AB) üyesi tüm ülkelerde inşaat endüstrisi kaynaklı yıllık 900 milyon ton İYA açığa çıkmaktadır (Martínez vd., 2016). AB'de üretilen İYA'nın büyük bir miktarı geri dönüşüm, yerüstü ve yeraltı atık depolama gibi yollarla değerlendirilmektedir. 2012 yılında AB üyesi 15 ülke tarafından 584 milyon ton İYA'nın açığa çıktığı ve bunun %37'sinin çeşitli kullanım alanlarında yeniden değerlendirildiği bildirilmiştir. Ayrıca, Almanya ve Fransa, diğer ülkelerden çok daha fazla İYA üretirken, geri dönüşüm konusuna daha erken uyum sağlayan Hollanda ve Belçika gibi bazı ülkelerde açığa çıkan İYA'nın geri kazanılma oranının yaklaşık %90'lara ulaştığı, buna karşın İtalya ve İspanya gibi diğer Avrupa ülkelerinde bu oranın %10'un altında kaldığı belirtilmiştir (Tablo 1.5) (Tabsh ve Abdelfatah, 2009; Eurostat, 2015). Benzer olarak, Türkiye'deki kentsel dönüşüm projeleri kapsamında eski yapıların yıkımı sonucunda yıllık 20 milyon ton gibi büyük miktarlarda İYA açığa çıkmaktadır. 2018 yılı başına kadar T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yaklaşık 130 bin eski ve riskli bina yıkılmış ve bu sayının gelecek 15 yıl içinde 7,5 milyona ulaşacağı tahmin edilmektedir. 2010-2013 yılları arasında sadece İstanbul'da kayıt altına alınan toplam 163 milyon ton İYA açığa çıktığı bildirilen çalışmada Karaca (2012) 2008-2012 yılları arasında İstanbul'da İYA geri dönüşüm tesislerinden farklı agrega boyutu kategorilerinde (0-12 mm, 12-23 mm ve 22-38 mm) toplam 300 bin ton geri dönüşüm agrega



malzemesinin temin edildiğini ve bunların yaklaşık %68'inin beton, %20'sinin harç parçaları, %5'inin tuğla kırığı, %4'ünün de fayans, karo ve mermer kırıklarından oluştuğunu ifade etmiştir. Çalışma için malzeme temin edilen Trabzon'da ise son 5 yıldır sadece 4 kentsel dönüşüm projesi (Erdoğdu, Pelitli, Bahçecik ve Çömlekçi) kapsamında 1288 eski bina yıkılmıştır (Yılmaz vd., 2018).

Tablo 1.5. AB üyesi 15 ülkede açığa çıkan ve farklı şekillerde değerlendirilen İYA miktarı (Eurostat, 2015)

Ülke	İnşaat yıkıntı atığı (İYA) miktarı (milyon ton)				
	Açığa çıkan	Geri dönüşüm	Yeraltına depolama	Yerüstüne depolama	Kontrol dışı
Almanya	201,300	66,200	-	16,893	-
Belçika	6,946	14,542	-	0,271	-
Çek Cumhuriyeti	13,800	10,350	-	2,405	-
Danimarka	5,571	4,791	-	0,390	-
Estonya	1,499	1,349	-	-	-
Finlandiya	16,027	-	-	-	-
Fransa	246,700	76,477	39,472	37,005	-
Hollanda	25,706	24,249	-	0,477	0,16
İspanya	27,703	19,011	4,329	4,364	7,368
İsveç	1,310	0,180	0,480	0,15	-
İtalya	33,756	-	0,165	9,332	-
Letonya	0,397	0,155	-	-	-
Portekiz	1,224	0,430	-	0,227	-
Romanya	1.330	-	-	-	-
Slovakya	0,806	-	-	-	-

Mevcut yerüstü depolama alanlarının yetersiz olması, içme sularının ve atmosferin kirlenmesi, toz ve görüntü kirliliği, doğal agrega kaynaklarının korunması, yeni yapılar için gerekli agrega ihtiyacının karşılanamaması, taşocaklarının şehir merkezlerine uzak mesafede olması, artan atık düzenleme maliyetleri ve çevresel önlemler gibi nedenlerden dolayı İYA'nın inşaat sektöründe beton, asfalt ve altyapı malzemelerinde iri ve/veya ince agrega veya ultra ince malzeme (filler) olarak yeniden kullanımına ve geri kazanılmasına yönelik yapılan araştırmalar giderek artmaktadır (Yılmaz vd., 2018).

Ülkemizde ise, kentsel dönüşüm projeleri kapsamında yıkılan eski ve/veya riskli yapıların yıkılması sonucu ortaya çıkan bu atıkların yeniden değerlendirilmesi (geri dönüşümü) konusunda yapılan çalışmalar oldukça yeni olmakla birlikte son yıllarda giderek artmaktadır. İYA'dan elde edilen geri kazanılmış agreganın (GKA) betonun mekanik

özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmada Çakır (2014), doğal agregaya ikame olarak farklı oranlarda (%25-100) İSTAÇ A.Ş.'de (İstanbul Çevre Koruma ve Atık Maddeleri Değerlendirme Sanayi ve Ticaret A.Ş.) üretilen GKA kullanılarak beton numuneleri hazırlanmış ve 28 günlük kür süresi sonunda TEBD ve çekme dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Araştırmacı, doğal agrega yerine kullanılan GKA oranı arttıkça betonun basınç dayanımının giderek azaldığını ve %100 GKA ikameli numunelerde düşüş oranının %24'ten fazla olduğunu belirtmiştir. Bu durumun GKA'nın doğal agregaya kıyasla daha yüksek poroziteye ve daha düşük yoğunluğa sahip olması ile ilişkilendirildiği araştırmada, %50 üzerindeki GKA kullanımı ile dayanım düşmesinin daha dikkat çekici hale geldiği bildirilmiştir.

Uygunoğlu vd. (2014) kendiliğinden yerleşen beton üretiminde doğal kireçtaşı agregası yerine ikame olarak İYA'dan elde edilmiş agregaları kullanarak geri dönüşüm agregasının (GDA) kendiliğinden yerleşen betonun dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 28 gün sonunda gerçekleştirilen basınç dayanımı testinden elde edilen bulgular, GDA içeren beton numunelerinin doğal agrega içeren numunelere kıyasla %5,6-7,0 oranında daha düşük basınç dayanımı ürettiğini göstermiş ve gözlemlenen dayanım düşüklüğünün GDA'nın daha zayıf olması, agreganın şekli ve tane boyut dağılımı ile bağlantılı olduğu belirtilmiştir.

İnşaat yıkıntı atıklarının özellikle GDA olarak beton üretiminde kullanılması konusunda olmak üzere inşaat sektöründe farklı şekillerde kullanımına yönelik çok fazla sayıda çalışmalar yapılmasına rağmen madencilik endüstrisinde kaya dolgu malzemesi ve/veya ÇMD malzemesi olarak değerlendirilmesine yönelik araştırmalar oldukça kısıtlıdır. Bazı araştırmacılar İYA malzemelerinin ANP'ye sahip olduğunu, sülfürlü atıkların/toprakların nötralizasyonunda kullanılabileceğini ve bu sayede AMD oluşumunu engelleyebileceğini/azaltabileceğini belirtmişlerdir (Engelsen vd., 2009; Indraratna vd., 2010; Chen et al., 2012; Bestgen vd., 2016; Jones ve Çetin, 2017).

Chen vd. (2012) GDA'nın asit nötralizasyon kapasitesini belirlemek amacıyla yapmış olduğu çalışmada 4 farklı yerden (Kaliforniya, Kolorado, Minesota ve Teksas) temin ettiği GDA malzemelerini bütün halde ve boyut küçültme işlemleri vasıtasıyla 3 farklı (çakıl, kum ve ince) tane boyut aralığında olmak üzere 4 farklı boyutta sınıflandırarak bu numunelerin üzerine asit ve baz ekleyerek pH'a bağlı yağın testine tabi tutmuşlardır. Sonuçlar incelendiğinde, Kolorado, Minesota ve Teksas'tan temin edilen GDA malzemelerinin önemli derecede asit nötralizasyon kapasitesine sahip olduğu, buna karşın Kaliforniya

GDA'nın daha düşük nötralizasyon gücü bulunduğu bildirilmiştir. Ayrıca, GDA'nın tane boyut dağılımı küçüldükçe (ince taneli GDA>kum boyutlu GDA>çakıl boyutlu GDA>bütün GDA) bünyesinde daha fazla çimento pastası içerebilmesinden dolayı nötralizasyon kapasitesinin daha yüksek seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir (Engelsen vd., 2009; Bestgen vd., 2016).

Jones ve Çetin (2017) AMD oluşumunu engelleme/azaltma konusunda GKA'nın etkinliğini değerlendirmek için laboratuvar ölçekli kolon testleri gerçekleştirdiği çalışmada, pH değeri 2,0-4,0 arasında olan maden atığı içerisine CaO içeriği %37,9-55,8 arasında değişen 4 farklı GKA (GKA1, GKA2, GKA3 ve GKA4) ekleyerek hazırladıkları karışımın pH, elektrik iletkenlik, alkalilik, sülfat konsantrasyonu vb. parametrelerindeki değişimi incelemiştir. Bulgular irdelendiğinde, GKA ilavesi yapılmadan önce maden atığının pH değeri asidik seviyede (2,0-4,0) bulunurken, maden atığı bulunan kolon hücresi içerisine GKA eklemesinin ardından GKA bünyesinde yer alan serbest CaO ve CaCO<sub>3</sub> gibi çimentomsu bileşenlerin çözünmesi sonucu GKA tipinden bağımsız olarak karışımların oldukça alkali seviyelere (pH>11,0) ulaştığı görülmüştür. Araştırmacılar CaO içeriği diğerlerine nazaran daha düşük olan GKA1 eklendiğinde karışımın pH değerinin 12,0'nin altında kaldığını, buna karşın diğer malzemeler eklendiğinde karışımın daha yüksek alkali (pH>12,0) seviyelere ulaştığını gözlemlemiştir. Ayrıca, oldukça yüksek düzeyde (>5000 mg/l) olan sülfat konsantrasyonlarının da GKA eklenmesiyle oldukça azaldığı (<1000 mg/l) belirtilmiş ve AMD'nin engellenmesi/giderilmesinde GKA'nın CaO içeriğinin önemli rol oynadığı bildirilmiştir.

Chen vd. (2018) asidik özelliğe sahip (pH= 2,13) ince taneli fosfojips atıklarına ikame olarak %10-50 oranında İYA (<3 mm boyutunda) kullanımının macun dolgunun dayanım, reoloji ve mikroyapı özelliklerine etkisini incelemiştir. Araştırmacılar, karışım içerisindeki İYA miktarının artmasıyla karışımın katı oranının yükseldiğini ve %40'a kadar İYA ikamesinin ÇMD'nin basınç dayanımını arttırdığını, %50 İYA ikamesinin ise dayanım kazanımında azalmaya sebep olduğunu belirtmişlerdir. Bunun dışında belirli miktardaki iri boyutlu (<3 mm) inşaat yıkıntı atığı ikamesinin ÇMD karışımının tane boyut dağılımını iyileştirdiği ve bu sayede daha düşük poroziteli yapı oluşturduğu belirtilirken, %40'dan fazla İYA ikamesinin tane boyut dağılımındaki gradasyonu olumsuz etkileyerek yüksek poroziteli ÇMD oluşumuna sebep olduğu ve bu yüzden dayanım kazanımının azaldığı bildirilmiştir (Chen vd., 2018).

Külekçi ve Yılmaz (2018) madencilik işlemleri sonrasında yeraltında oluşan boşlukları doldurmak amacıyla hazırlanan dolguda, doğal agrega malzemesi kullanımı yerine kısmen (%25 oranında) inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen iri boyutlu (0-31,5 mm) GKA'nın kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Bunun için %5 bağlayıcı oranında hazırlanan toplam 36 adet 15x15x15 cm boyutlarındaki küp numunelerin 7-270 günlük kür süresi sonunda TEBD testleri yapılmıştır. Araştırmacılar GKA içeren numunelerin 28 günde 3 MPa'ın üzerinde dayanım ürettiğini, kür süresi ile birlikte dayanımın arttığını ve inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen GKA'nın yeraltı üretim boşluklarının doldurulması amacıyla hazırlanan dolguda doğal agrega yerine kısmen (%25 oranında) kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Fernandez-Naranjo vd. (2016) inert durumdaki inşaat yıkıntı atıklarının açık ocak madencilik faaliyetleri sonucu etkilenen sahaların rehabilitasyonunda kullanılabileceğini, sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) içermesi durumunda ise sızdırmazlık barajına ihtiyaç duyulacağını belirtmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Bu çalışmada, ÇMD yöntemi ile sülfürlü cevher zenginleştirme atıklarının yeraltında depolanması sırasında hava ve nem kaynaklı oksidasyondan dolayı meydana gelen asit ve sülfat oluşumunun engellenmesi/kontrol altına alınması konusunda Portland çimentosu kullanımının yetersiz kalması ve bu sorunun çözümü için çimento miktarının artırılmasının işletme maliyetlerini olumsuz etkilemesinden dolayı önceki çalışmalardan farklı olarak ilk defa kalsiyum (Ca) içeriği yüksek bileşikler ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{CaMg(CO}_3)_2$ ) içeren kalsit, dolomit vb. minerallere sahip olan ve asit nötralizasyon potansiyeli (ANP) bulunan endüstriyel atıklar/artıklar sülfürlü atık malzeme yerine belirli oranlarda ikame edilerek duraylı macun dolgu üretimi araştırılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, sülfürlü cevher zenginleştirme tesisi atığı, 6 farklı ANP'ye sahip endüstriyel atık/artık malzemeleri (yüksek fırın cürufu (YFC), C-sınıfı uçucu kül (C-UK), mermer artığı (MA), kalsitik kireçtaşı (KK), dolomitik kireçtaşı (DK) ve inşaat yıkıntı atığı (İYA)), Portland çimentosu (CEM I 42,5R), 5x10 cm boyutlu (boy/çap oranı = 2/1) drenajlı silindirik numune kapları ve musluk suyu kullanılmıştır.

Bu çalışmanın başlıca amaçları;

1. 6 farklı ANP'ye sahip endüstriyel atık/artık malzemelerinin (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) sülfürlü atığa ikame olarak belirli oranlarda (%5, %10 ve %15) kullanılmasının ÇMD'nin dayanım ve duraylılık özelliklerine etkisinin araştırılması ve en uygun asit nötralizasyon malzemesi (ANM) tipinin ve ikame oranının belirlenmesi (Tablo 2.1),
2. Asit nötralizasyon malzemelerinin (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) sülfür içeriği yüksek atık yerine %5-15 oranında kullanılmasının özellikle uzun dönemde (>28 gün) ÇMD içerisinde oluşabilecek asit ve sülfat atak etkilerine karşı performansının araştırılması (Tablo 2.1),
3. YFC, C-UK, MA, KK, DK ve İYA malzemelerinin macun dolgunun mikroyapı özelliklerine (toplam porozite, gözenek boyut dağılımı vb.) etkilerinin belirlenmesi (Tablo 2.2),

4. İki farklı bağlayıcı oranında (%7,5 ve %8,5) hazırlanan ÇMD karışımları içerisinde ANM kullanımının üretilecek olan 1,0 m<sup>3</sup> dolgu karışımı için gerekli bağlayıcı (çimento) miktarında ne kadarlık azalma sağlayacağını değerlendirilmesidir.

Tablo 2.1. ANM kullanılarak hazırlanan ÇMD numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı ve asit-sülfat oluşumu testlerine yönelik deneysel tasarım

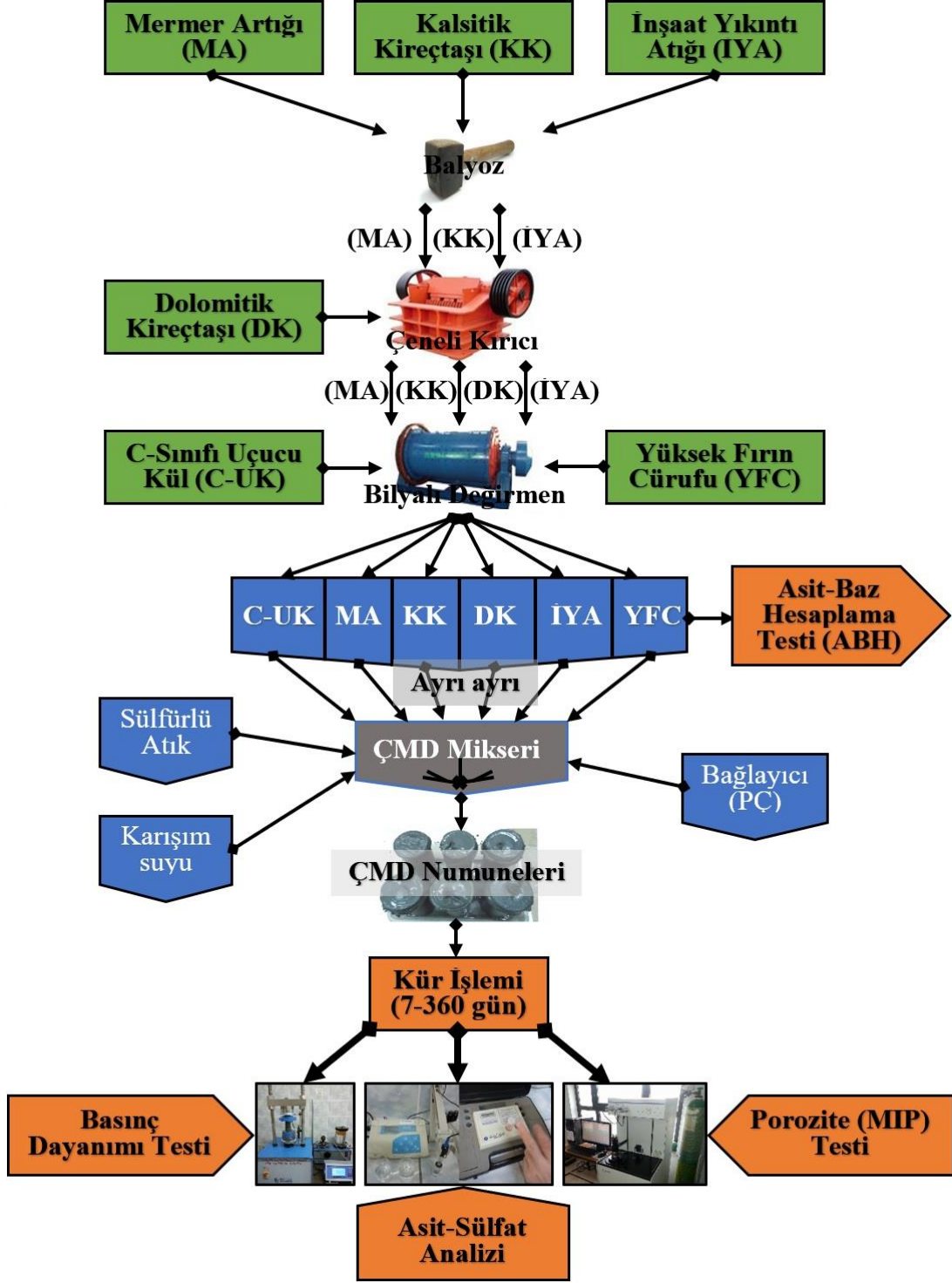
Karışım tipi	İkame oranı (Ağr. %)	Bağlayıcı oranı (Ağr. %)	Akışkanlık değeri (cm)	Kür süresi (gün)	Numune sayısı
Kontrol	-	8,5			15
YFC				7	90
MA				28	90
C-UK	5, 10, 15	7,5-8,5	19,05	90	90
KK				180	90
DK				360	90
İYA					90
<b>Toplam numune sayısı</b>					<b>555</b>

**YFC:** Yüksek fırın cürufu, **C-UK:** C-sınıfı uçucu kül, **MA:** Mermer artığı, **KK:** Kalsitik kireçtaşı, **DK:** Dolomitik kireçtaşı, **İYA:** İnşaat yıkıntı atığı

Tablo 2.2. ANM kullanılarak hazırlanan ÇMD numunelerinin mikroyapı (MIP) testlerine yönelik deneysel tasarım

Karışım tipi	İkame oranı (Ağr. %)	Bağlayıcı oranı (Ağr. %)	Akışkanlık değeri (cm)	Kür süresi (gün)	Numune sayısı
Kontrol	-				2
YFC					4
MA					4
C-UK	5, 15	8,5	19,05	28, 180	4
KK					4
DK					4
İYA					4
<b>Toplam numune sayısı</b>					<b>26</b>

Sülfür içeriği yüksek cevher zenginleştirme atığı yerine belirli oranlarda (%5, %10 ve %15) ikame olarak ANP'ye sahip endüstriyel atık/artık malzemeler (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) kullanılarak duraylı macun dolgu üretiminin araştırılması kapsamında kullanılan malzemeler (atık, bağlayıcı, asit nötralizasyon malzemeleri, karışım suyu) ve gerçekleştirilen deneysel çalışmalar Şekil 2.1'de özetlenmiştir.



Şekil 2.1. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların şematik gösterimi

## 2.2. Atık ve Bağlayıcı Malzeme

Cevher zenginleştirme işlemleri ile değerli metallerin (bakır, kurşun, çinko vb.) konsantreye alınması sonucu oluşan atık malzemenin yeniden zenginleştirme işlemine tabi

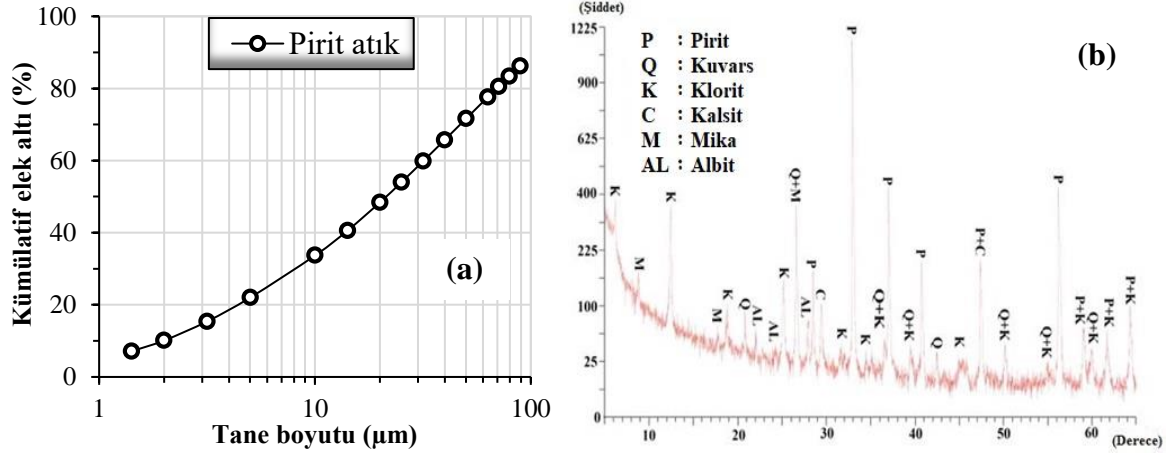
tutularak içerisinde kalan piritin geri kazanılması sebebiyle pirit atık (PA) olarak adlandırılan atık malzeme; Kastamonu ili Küre ilçesi sınırlarında bulunan Eti Bakır A.Ş. Küre Bakır İşletmesi'nden temin edilerek 500 kg'lık variller vasıtasıyla ÇMD laboratuvarına getirilmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Atık malzemelerin varillere doldurularak tesis çıkışından alınması

Tane boyut dağılımı (TBD) ölçer (Malvern Mastersizer) cihazı aracılığıyla yapılan TBD analizi sonucuna göre pirit atığının  $20 \mu\text{m}$  altı ( $<20\mu\text{m}$ ) malzeme miktarı ağırlıkça %48,41 olarak belirlenmiş (Şekil 2.3a) ve  $<20\mu\text{m}$  malzeme miktarına bağlı olarak yapılan sınıflandırmaya göre atık malzeme orta boyutlu ( $\%35 < 20\mu\text{m} = \%48,41 < \%60$ ) ÇMD malzemesi olarak sınıflandırılmıştır. Kimyasal karakterizasyonu Kanada'da bulunan ACME laboratuvarlarında ICP AES cihazı kullanılarak belirlenmiş olan PA'ta baskın olarak demir (III) oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) minerali bulunduğu ve gravimetrik analiz yöntemi ile ölçülen sülfür ( $\text{S}^2 = \%15,82$ ) içeriğinin yüksek olduğu görülmüştür (Tablo 2.3). Ayrıca atık malzemenin Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş olan XRD (X- ışınları difraktometre) analizi sonuçları incelendiğinde atık malzemenin yüksek miktarda pirit ( $\text{FeS}_2 = \%29,66$ ) minerali ve genel olarak silikat grubu mineralleri (albit, muskovit, kuvars, klorit gibi) içerdiği tespit edilmiştir (Şekil 2.3b, Tablo 2.3). Atık malzemenin; piknometre ve yüzey alanı ölçer cihazı ile belirlenen özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı sonuçlarına göre atığın özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı sırasıyla  $3,37 \text{ g/cm}^3$  ve  $4440 \text{ cm}^2/\text{g}$  olarak ölçülmüştür (Tablo 2.3).





Şekil 2.3. Pirit atığın TBD (a) ve XRD profilinin (b) görünümü

Deneyisel çalışmalarda bağlayıcı olarak; Aşkale Çimento Sanayii A.Ş. bünyesindeki Trabzon Çimento Fabrikası'ndan getirilen CEM I 42,5R tipi Portland çimentosu tercih edilmiştir. Fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri Tablo 2.3'te özetlenen bağlayıcı malzemenin özgül yüzey alanının ( $\geq 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) yeterli incelikte olduğu görülmektedir.

Tablo 2.3. Atık ve bağlayıcı malzemenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri

Özellikler	Pirit atık (%)	CEM I 42,5R (%)
<b>Kimyasal bileşim</b>		
SiO <sub>2</sub>	31,89	21,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,97	5,27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,09	3,06
MgO	4,08	2,19
CaO	3,48	62,91
Serbest CaO	-	1,19
Kızdırma kaybı	16,1	3,6
Toplam	99,48	99,92
Sülfür içeriği (S <sup>-2</sup> ) (%)	15,82	-
Pirit içeriği (FeS <sub>2</sub> ) (%)	29,66	-
<b>Fiziksel özellikler</b>		
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3,37	3,12
Özgül yüzey alanı (cm <sup>2</sup> /g)	4440	4335
<b>Mineralojik bileşim</b>		
Pirit, Kuvars		C <sub>3</sub> S= 56,61
Albit, Kalsit		C <sub>2</sub> S= 13,77
Klorit, Mika		C <sub>3</sub> A= 8,79
		C <sub>4</sub> AF= 9,31

## 2.3. Asit Nötralizasyon Malzemeleri

### 2.3.1. Malzeme Temini ve Boyut Küçültme

Sülfür içeriği yüksek maden atıklarından duraylı macun dolgu üretiminin araştırılması için ÇMD karışımı içerisinde atık malzeme yerine belirli oranlarda (%5-15) ikame olarak kullanılacak olan ANP'ye sahip endüstriyel atık/artık malzemelerden yüksek fırın cürufu (YFC); Kardemir demir çelik fabrikasından, C-sınıfı uçucu kül (C-UK); Kahramanmaraş Afşin Elbistan termik santralinden, mermer artığı (MA); Gümüşhane'deki mermer ocaklarından, kalsitik kireçtaşı (KK); Aşkale Çimento A.Ş.'ye ait Araklı-Taşönü hammadde ocağından, dolomitik kireçtaşı (DK); Antalya-Karaöz bölgesinden ve inşaat yıkıntı atığı (İYA); kentsel dönüşüm projesi kapsamında Trabzon-Esentepe mahallesinde yıkılan yapılardan temin edilmiştir. Farklı bölgelerden temin edilen ve macun dolgu laboratuvarına getirilmiş olan asit nötralizasyon malzemelerinden MA, KK, DK ve İYA, tane boyut dağılımı sülfürlü atık malzemenin tane boyut dağılımına eşdeğer olacak şekilde kırma ve öğütme işlemlerine tabi tutulurken, YFC ve C-UK malzemeleri sadece öğütülmüştür.

İlk olarak malzeme boyutu oldukça büyük olan MA, KK ve DK kırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu amaçla sahadan +20-30 cm boyutuna sahip olarak getirilen MA ve KK malzemeleri öncelikle çeneli kırıcı giriş açıklığı boyutuna uygun olacak şekilde balyoz yardımıyla -10 cm boyutuna kırılmıştır. -10 cm boyutuna indirilen MA, KK ve sahadan yaklaşık -5 cm boyutunda temin edilmiş olan DK boyut küçültme işlemlerinden önce içerilerinde bulunan doğal nemin uzaklaştırılması için laboratuvarında bulunan etüvde 36 saat süre ile yaklaşık 50<sup>0</sup>C sıcaklıkta kurutulmuştur. Kurutma işleminden sonra malzemeler ayrı ayrı çeneli kırıcıya beslenerek -2 mm boyutunda kırılmış malzeme elde edilmiştir. Bu malzemelerden MA (Şekil 2.4a,d), KK (Şekil 2.4b,e) ve DK'nın (Şekil 2.4c,f) çeneli kırıcı öncesi (Şekil 2.4a, b ve c) ve çeneli kırıcıdan kırılmış olarak (Şekil 2.4d, e ve f) elde edilen görünüşleri Şekil 2.4'te verilmiştir.

Kentsel dönüşüm projeleri kapsamında Trabzon-Esentepe mahallesinde yıkılan yapılardan temin edilen ve +50 cm boyutunda laboratuvara getirilen İYA; beton-agrega karışımı (Şekil 2.5a), beton-tuğla-kiremit karışımı (Şekil 2.5b) ve harç-tuğla-beton karışımı (Şekil 2.5c) olmak üzere 3 farklı gruba ayrılmıştır. Her bir gruba ait malzemeler çeneli kırıcı giriş açıklığına uygun olacak şekilde balyoz yardımıyla -10 cm boyutuna (Şekil 2.5a, b ve

c) kırılmıştır. Sonrasında malzemeler ayrı ayrı çeneli kırıcıda kırılmış ve -2 mm boyutunda malzemeler (Şekil 2.5d, e ve f) elde edilmiştir.



Şekil 2.4. MA (a,d), KK (b,e) ve DK'nın (c,f) çeneli kırıcı öncesi (a,b,c) ve sonrası (d,e,f) görüntüleri



Şekil 2.5. İYA'nın çeneli kırıcı öncesi (a,b,c) ve sonrası (d,e,f) görüntüleri; beton-agrega karışımı (a,d), beton-tuğla-kiremit karışımı (b,e) ve harç-tuğla-beton karışımı (c,f)

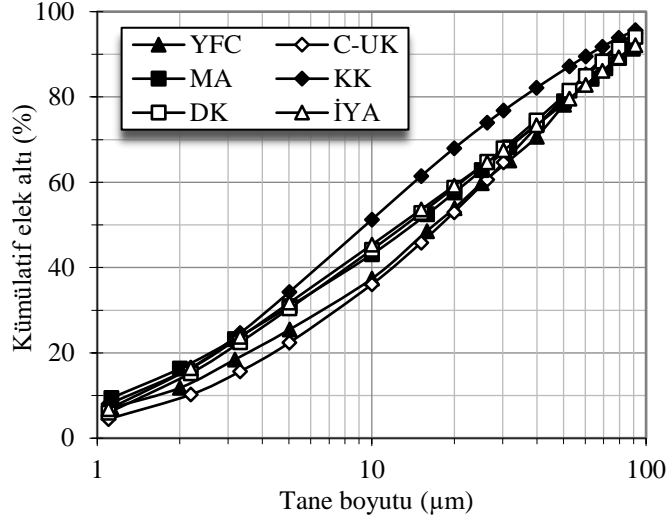
Çeneli kırıcı vasıtasıyla kırılan ve öğütme işlemine hazır hale getirilen MA, KK, DK ve İYA malzemeleri ve tane boyutu ince olduğu için sadece öğütme işlemi gerektiren YFC ve C-UK malzemeleri sülfürce zengin atık malzemenin tane boyutuna eşdeğer olacak şekilde fiziksel özelliklerine göre farklı sürelerde ortalama 82 devir/dakika dönme hızına sahip bilyeli değirmende 5 farklı çap ve ağırlıkta olmak üzere toplam 84 adet bilye kullanılarak kuru öğütmeye tabi tutulmuştur. Öğütme işlemi sonrasında ANP'ye sahip malzemelerin görünümü Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Öğütme sonrası asit nötralizasyon malzemelerinin görünümü

### 2.3.2. Malzemelerin Karakterizasyonu

Asit nötralizasyon malzemelerinin (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) boyut küçültme (kıırma ve öğütme) işlemleri tamamlandıktan sonra her bir malzemenin tane boyut dağılımı analizi Malvern Mastersizer tane boyutu ölçer cihazı ile yapılmış ve elde edilen tane boyutu dağılımlarını gösteren grafik Şekil 2.7'de verilmiştir. Ayrıca her bir malzemenin öğütme süresi ve malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı (D<sub>80</sub> boyutu) Tablo 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Asit nötralizasyon malzemelerinin tane boyutu dağılımları

Tablo 2.4. PA ve ANM'nin öğütme süreleri,  $D_{80}$  tane boyutları ve  $<20 \mu\text{m}$  malzeme miktarları

Asit nötralizasyon malzemesi	Öğütme süresi (dakika)	$D_{80}$ tane boyutu ( $\mu\text{m}$ )	$<20 \mu\text{m}$ malzeme miktarı (%)
Pirit atık (PA)	-	70	48
Yüksek fırın cürufu (YFC)	240	53	54
Mermer artığı (MA)	75	51	57
C-sınıfı uçucu kül (C-UK)	105	50	53
Kalsitik kireçtaşı (KK)	90	36	68
Dolomitik kireçtaşı (DK)	90	49	59
İnşaat yıkıntı atığı (İYA)	240	52	59

Asit nötralizasyon malzemelerinin (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) kimyasal bileşimleri Kanada'da bulunan ACME laboratuvarlarında ICP AES cihazı kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 2.5'te verilmiştir. Malzemelerin kimyasal bileşimlerine bakıldığında, İYA haricinde kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) içeriklerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun dışında, YFC, C-UK ve İYA malzemelerinin silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) içeriklerinin yüksek olduğu, DK'nın ise kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) içeriğine ek olarak yüksek miktarda magnezyum oksit ( $\text{MgO}$ ) içerdiği belirlenmiştir. Malzemelerin TÇMB laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş olan XRD (X-ışınları difraktometre) analizi sonuçları incelendiğinde, YFC haricinde genel olarak bütün malzemeler içerisinde baskın olarak kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) ve buna ek olarak kuvars, dolomit, mika, albit gibi silikat grubu minerallerinin bulunduğu görülmektedir (Tablo 2.5, Ek Şekil 1-2).

Asit nötralizasyon malzemelerinin özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı testleri sırasıyla piknometre ve ATOM-CM-BL 101 model yüzey alanı ölçer cihazı ile yapılmıştır. Malzemelerin özgül ağırlıkları 2,42-2,91 g/cm<sup>3</sup> arasında değişirken, özgül yüzey alanı değerleri 4640-6360 cm<sup>2</sup>/g arasında değişmiştir (Tablo 2.5).

Tablo 2.5. ANM'nin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri

Özellikler	YFC (%)	MA (%)	C-UK (%)	KK (%)	DK (%)	İYA (%)
<b>Kimyasal Bileşim</b>						
SiO <sub>2</sub>	39,85	1,09	34,96	0,86	0,12	54,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,58	0,48	13,92	0,23	0,09	11,67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,21	0,09	6,42	0,06	0,06	5,44
MgO	6,26	0,16	2,32	0,22	20,18	3,08
CaO	37,02	55,74	30,62	55,26	32,28	12,23
Na <sub>2</sub> O	0,30	<0,01	0,27	0,02	0,01	1,92
K <sub>2</sub> O	0,97	0,05	0,91	0,12	0,02	1,74
TiO <sub>2</sub>	0,77	0,01	0,71	0,01	<0,01	0,57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	<0,01	0,40	0,02	0,02	0,12
MnO	2,54	<0,01	0,04	0,02	<0,01	0,09
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,019	0,005	0,054	<0,002	<0,002	0,025
Serbest CaO	-	0,01	8,67	0,01	0,03	0,02
Kızdırma kaybı	-0,5	43	3,4	43,1	46,9	8,8
Toplam	99,85	99,97	94,16	99,99	99,66	99,92
<b>Fiziksel Bileşim</b>						
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,91	2,70	2,42	2,63	2,79	2,60
Özgül yüzey alanı (cm <sup>2</sup> /g)	4640	4670	6360	5665	5020	6600
<b>Mineralojik bileşim</b>						
	Camsı faz	Kalsit	Kuvars Portlandit Anhidrat Kalsit	Kalsit Kuvars	Dolomit Kalsit	Kalsit Kuvars Albit Mika

#### 2.4. Asit-Baz Hesaplama Testi (ABH)

Bir statik test yöntemi olan asit-baz hesaplama testi ile kullanılan sülfürlü atık malzemenin (pirit atık) ve asit nötralizasyon edici endüstriyel atık/artık malzemelerinin (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) asit potansiyelleri (AP) ve nötralizasyon potansiyelleri (NP) hesaplanarak atığın asit üretme potansiyeline karşılık endüstriyel atık/artık malzemelerinin nötralizasyon potansiyelleri belirlenmiştir. Bu çalışmada ABH yöntemi olarak standart Sobek test metodu kullanılmıştır (Sobek vd., 1978). Bu kapsamda ilk olarak pirit atığın asit potansiyeli aşağıda verilmiş olan eşitlik vasıtasıyla hesaplanmış ve Tablo 2.7'de verilmiştir. AP hesaplanırken atık malzemedeki bulunan sülfür miktarının (%15,82) kaynağının pirit (FeS<sub>2</sub>) olduğu ve tamamının tepkimeye girerek oksitleneceği kabul edilmiştir.

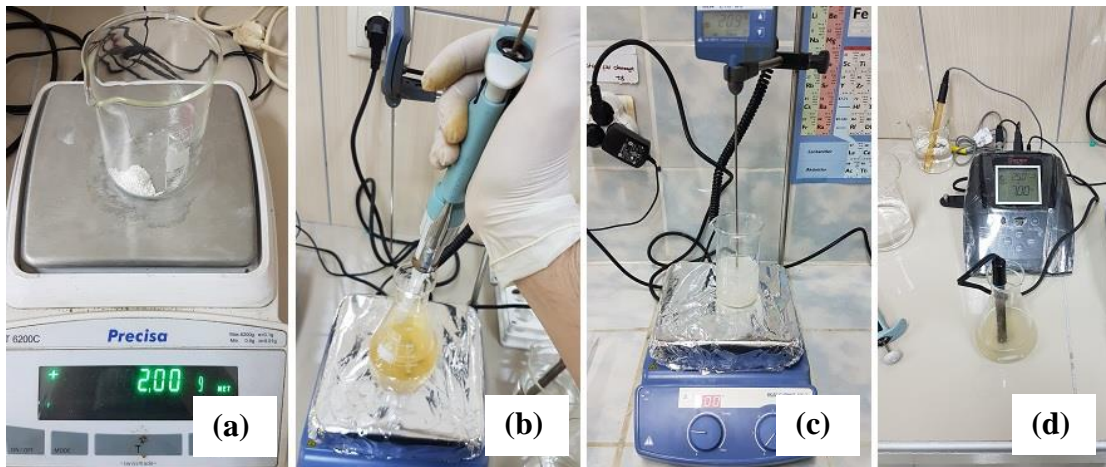
$$AP= 31,25 \times S \quad (7)$$

Malzemelerin (pirit atık, YFC, C-UK, MA, KK, DK ve İYA) nötralizasyon potansiyellerinin (NP) belirlenmesi için öncelikle asit/su oranı =3/1 olacak şekilde hazırlanmış olan HCl çözeltisi 0,5 g malzemenin üzerine damlatılarak her bir malzemenin fişirdama (fizz) hızı/sınıfı belirlenmiş ve Tablo 2.6’da gösterilmiştir. Deneysel çalışmada saf su kullanılmıştır.

Tablo 2.6. Fışirdama sınıfı, gerekli asit miktarı ve malzemelerin fişirdama sınıfı

Fışirdama (Fizz) Sınıfı	Asit Normalitesi (N)	Asit Hacmi (MI)	Malzeme Tipi
Yok	0,1	20	Pirit atık
Hafif	0,1	40	C-UK, İYA
Orta	0,5	40	YFC, DK
Sert	0,5	80	MA, KK

Fışirdama hızı belirlenmiş olan malzemelerin nötralizasyon potansiyelleri asit-baz titrasyon testi ile belirlenmiştir. Bu kapsamda Her bir test için, -250 µm boyutlu 2,0 g numune hassas terazide tartılmış (Şekil 2.8a) ve üzerine fişirdama sınıfında belirtilen miktarda HCl eklenmiştir (Şekil 2.8b). Oluşan süspansiyon, gaz oluşumunun meydana gelmediğini teyit etmek için birkaç saniye 90-95°C’ye ısıtılmış (Şekil 2.8c) ve daha sonra yavaş bir şekilde soğutulmuştur. Son olarak karışım pH= 7,0 için 0,1 M NaOH ile titrasyona tabi tutulmuştur (Şekil 2.8d).



Şekil 2.8. ABH test süreci; numunenin tartımı (a), asit eklenmesi (b), süspansiyonun ısıtılması (c) ve titrasyon işlemi (d)

Titrasyon sonucu her bir malzeme için kullanılan asit (HCl) ve bazın (NaOH) hacmi belirlenmiş ve aşağıdaki eşitlikler yardımıyla malzemelerin sırasıyla NP ve net nötralizasyon potansiyeli (NNP) değerleri hesaplanarak Tablo 2.7’de verilmiştir.

$$NP = \frac{(An*Ah)-(Bn*Bh)*50}{a} \quad (8)$$

$$NNP = NP - AP \quad (9)$$

Burada;

NP	= Nötralizasyon potansiyeli (kg CaCO <sub>3</sub> /ton atık)	Ah	= Kullanılan asitin hacmi (ml)
NNP	= Net nötralizasyon potansiyeli (kg CaCO <sub>3</sub> /ton atık)	Bn	= Kullanılan bazın normalitesi (N)
AP	= Asit potansiyeli (kg CaCO <sub>3</sub> /ton atık)	Bh	= Kullanılan bazın hacmi (ml)
An	= Kullanılan asitin normalitesi (N)	a	= Numune ağırlığı (g)

Tablo 2.7. PA, YFC, C-UK, MA, KK, DK ve İYA'nın AP, NP ve NNP sonuçları

Özellikler	PA	YFC	MA	C-UK	KK	DK	İYA
Sülfür (S <sup>2-</sup> ) İçeriği (%)	15,82	-	-	-	-	-	-
CaO İçeriği (%)	3,48	37,02	55,74	30,62	55,26	32,28	12,23
Serbest CaO İçeriği (%)	-	-	0,01	8,67	0,01	0,03	0,02
Asit Potansiyeli (AP)*	494,38	0	0	0	0	0	0
Nötralizasyon Potansiyeli (NP)*	8,58	532,25	987,75	318,84	987,63	741,25	90,00
Net Nötralizasyon Potansiyeli (NNP)*	-485,805	532,25	987,75	318,84	987,63	741,25	90,00

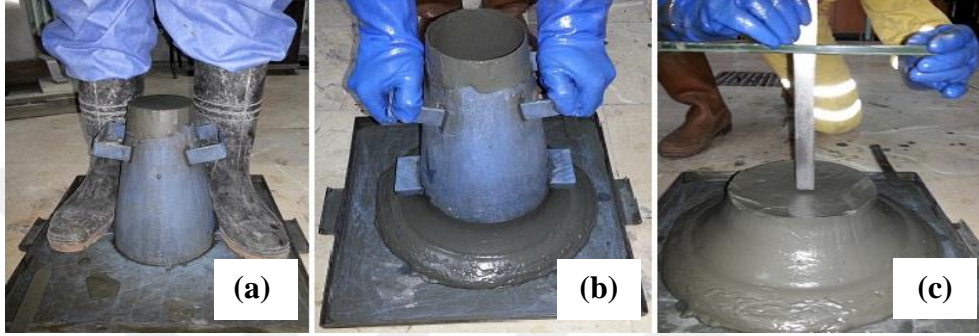
\*: kg CaCO<sub>3</sub>/ton atık

## 2.5. Atık Malzemenin Reolojik Özellikleri

Atık malzeme için ASTM C 143 (2008) standardına göre 16,51-21,59 cm akışkanlık değeri aralığında akışkanlık ölçümleri yapılmış ve akışkanlık değerlerine karşılık gelen katı oranları (%) belirlenmiştir (Şekil 2.10). Malzemenin akışkanlık değerini belirlemek için ilk olarak, 30,48 cm yüksekliğe sahip standart akışkanlık konisinin 1/3'lük kısmı karıştırıcıdan alınan akışkan haldeki malzeme ile doldurulmuş ve malzeme içerisindeki boşlukların giderilmesi amacıyla şişleme çubuğu kullanılarak tüm yüzeyi kapsayacak şekilde 25 defa şişleme yapılmıştır. Daha sonra koninin 2/3'lük kısmı macun dolgu karışımı ile doldurulmuş ve tüm yüzey şişleme çubuğuyla bir önceki seviyenin 2,54 cm derinliğine kadar gelecek şekilde 25 defa şişleme yapılmıştır. Son olarak, akışkanlık konisinin tamamı doldurularak şişleme işlemi ikinci aşamada uygulandığı şekilde tekrarlanmıştır. Akışkanlık konisinden taşan malzemeler alınarak koninin üzeri düzeltilmiş ve koninin üst kulplarından tutularak

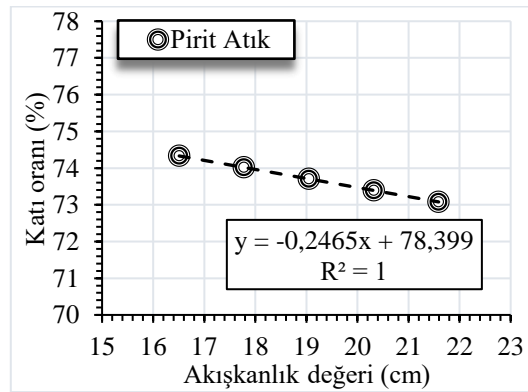


sabit bir hızda yüzeye dik şekilde kaldırılmıştır. Malzeme boşaltıldıktan sonra akışkanlık konisi malzeme yığını yanına konularak şişleme çubuğu yere paralel olacak şekilde koni üzerine yerleştirilmiştir. Numune yığınının üst kısmı ile şişleme çubuğunun alt tarafı arasında kalan mesafe ölçülmüş, eğer malzeme yığını üzerinde alçak ve yüksek noktalar varsa bu noktalardan ölçüm alınarak ortalama değer, akışkanlık değeri olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Atığın akışkanlık konisine doldurulması (a), koninin sabit hızla kaldırılması (b) ve akışkanlık değerinin ölçümü (c)

Akışkanlık değerleri belirlenen atık malzemeye (PA) ait farklı akışkanlık (akışkanlık) değerlerine sahip malzemelerden 1,0'er kg numune alınarak 8 saat boyunca 105°C sıcaklığa sahip etüvde kurutulmuş ve atık örneklerinin katı oranı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre katı oranı arttıkça atık malzemenin akışkanlık değerinin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 2.10). Atık malzemenin 19,05 cm akışkanlık değerine karşılık gelen katı oranı; %73,70 olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.10. Deneysel çalışmalarda kullanılan atık malzemenin katı oranı-akışkanlık değeri değişimi

## 2.6. Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması

Atık malzeme (pirit atık), bağlayıcı malzeme (PÇ: CEM I 42,5R), asit nötralizasyon malzemeleri (yüksek fırın cürufu, C-sınıfı uçucu kül, mermer artığı, kalsitik kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve inşaat yıkıntı atığı) ve karışım suyu kullanılarak %7,5-8,5 çimento oranı, %5, %10 ve %15 ikame oranı (atık malzeme yerine ağırlıkça % olarak) ve 19,05 cm (7,5 inç) akışkanlıkta ÇMD karışımları hazırlanmıştır. ÇMD karışımlarının hazırlanması sırasında, bağlayıcı malzeme (çimento) ve asit nötralizasyon malzemeleri deneylerde kullanılan akışkanlık değerine karşılık gelen katı oranına göre hesaplanmış ve karışım içerisine eklenmiştir. ÇMD karışımının önceden belirlenmiş akışkanlık değerine ulaşması için karışıma yeteri kadar musluk suyu eklenmiştir. ÇMD karışımında kullanılan atık malzemenin bünyesinde bulunan suyun bağlayıcı, ANM ve musluk suyu eklenmeden önceki pH'ı ve  $SO_4^{2-}$  içeriği ölçülmüş ve bu değerler sırasıyla 6,85 ve 5616 ppm (mg/l) olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan atık malzeme içerisinde başlangıçta var olan su, istenen akışkanlık değerinin sağlanması için gerekli olan toplam su miktarının yaklaşık %65-75'ini kapsamıştır. Karışım suyu içerisindeki sülfat iyonlarını, atık malzeme bünyesindeki piritin oksitlenmesi ile oluşan sülfat iyonları, flotasyon işlemlerinde kullanılan kimyasallar sonucu meydana gelen sülfat iyonları ve musluk suyunda bulunan sülfat iyonları oluşturmaktadır. Homojen bir şekilde karıştırılması gereken ÇMD karışımı (pirit atık, asit nötralizasyon malzemesi, çimento ve su) 20,8 lt hacimli karıştırıcı (Univex SRMF 20) (Şekil 2.11a) kullanılarak 7 dakika süresince 105 devir/dk'lık dönme hızında karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 2.11. ÇMD numunelerinin hazırlık süreci; mikserde karıştırma (a), kalıplara doldurma (b), drenaj işlemi (c) ve kür işlemi (d)

Karıştırma işlemi tamamlanan ÇMD karışımları, 5 cm çap ve 10 cm yüksekliğe sahip (5x10 cm) drenajlı (altı delikli) dolgu kalıpları içerisine doldurularak sıkılama işlemine tabi

tutulmuştur (Şekil 2.11b). Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgu malzemelerindeki gibi serbest drenaj koşullarının sağlanabilmesi için numune kalıplarının alt tarafında delikler mevcut olup drenaj koşulları aynıdır. 5x10 cm boyutlu silindirik kalıplarda hazırlanan ÇMD numuneleri içerisinde bulunan fazlalık suyunun drene olması için 24 saat boyunca drenaj masalarında bekletilmiştir (Şekil 2.11c). Bu sürenin sonunda numuneler önceden belirlenen kür süreleri (7-28-90-180-360 gün) boyunca dolgu numunelerinin yeraltındaki kür koşullarını yansıtmaları amacıyla tamamen açık şekilde kür odasında yer alan yaklaşık %85 nem ve 20°C sıcaklığa sahip kür dolabında kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 2.11d).

TEBD testinde kullanılmak amacıyla önceden belirlenmiş farklı kür süreleri (7, 28, 90, 180 ve 360 gün) için 3'er adet ve iki farklı kür süresinde (28 ve 180 gün) MIP testine tabi tutulmak için 1'er adet 5x10 cm boyutunda ÇMD numunesi olmak üzere; ANM'nin TEBD'na ve asit-sülfat oluşumuna etkisinin araştırılması amacıyla 555 adet (Tablo 2.1) ve mikroyapı (MIP) özelliklerine etkisinin belirlenmesi için 26 adet (Tablo 2.2) olacak şekilde toplam 581 adet numune hazırlanmıştır. ÇMD numunelerinin hazırlanmasında kullanılan deneysel çalışma koşulları Tablo 2.8'de verilmiştir.

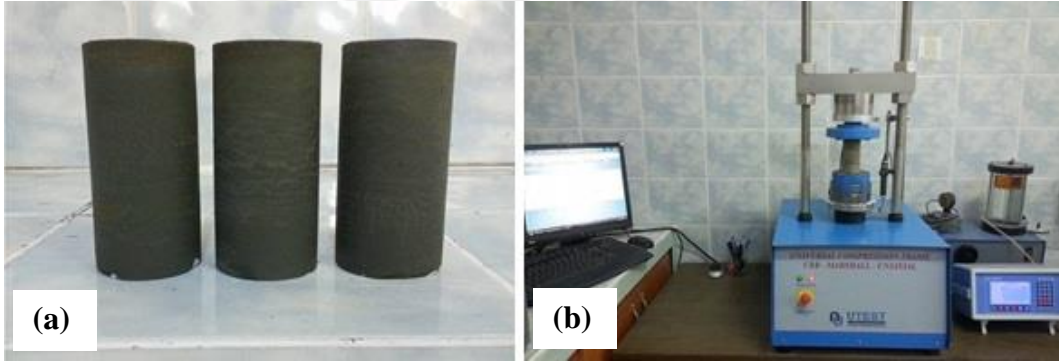
Tablo 2.8. ÇMD numunelerinin hazırlanmasında kullanılan deneysel çalışma koşulları

Karışım tipi	İkame oranı (Ağr. %)		Bağlayıcı oranı ((BO) <sup>1</sup> Ağr. %)	Katı oranı ((KO) <sup>2</sup> , Ağr. %)		Su/çimento oranı (w/c) <sup>3</sup>		Akışkanlık değeri (cm)
	Atık	ANM		%8,5	%7,5	%8,5	%7,5	
Kontrol	100	-	8,5	73,70	-	4,20	-	19,05
	95	5		73,80	73,61	4,18	4,78	
YFC	90	10	7,5-8,5	74,14	73,97	4,10	4,69	
	85	15		74,55	74,19	4,02	4,64	
MA	95	5	7,5-8,5	73,97	73,71	4,14	4,76	
	90	10		74,33	73,82	4,06	4,73	
C-UK	85	15	7,5-8,5	74,70	73,94	3,98	4,70	
	95	5		73,25	72,87	4,30	4,96	
KK	90	10	7,5-8,5	73,44	73,22	4,25	4,88	
	85	15		73,90	73,66	4,15	4,77	
DK	95	5	7,5-8,5	73,38	72,97	4,27	4,94	
	90	10		73,69	73,10	4,20	4,91	
İYA	85	15	7,5-8,5	74,02	73,58	4,13	4,79	
	95	5		73,65	73,41	4,21	4,83	
DK	90	10	7,5-8,5	74,03	73,68	4,13	4,76	
	85	15		74,31	73,91	4,07	4,71	
İYA	95	5	7,5-8,5	73,87	73,30	4,16	4,86	
	90	10		74,15	73,63	4,10	4,77	
	85	15		74,56	74,13	4,01	4,65	

$$1 \text{ BO} : \frac{100 \times (M_{\text{kuru-bağlayıcı}})}{(M_{\text{kuru-bağlayıcı}} + M_{\text{kuru-atık}})}; 2 \text{ KO} : \frac{100 \times (M_{\text{kuru-atık}} + M_{\text{kuru-bağlayıcı}})}{(M_{\text{kuru-atık}} + M_{\text{kuru-bağlayıcı}} + M_{\text{su}})}; 3 \text{ w/c} : \frac{M_{\text{su}}}{M_{\text{kuru-bağlayıcı}}}; (M: \text{Ağırlık})$$

## 2.7. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testi

Kür süresini tamamlayan (7-360 gün) ÇMD numuneleri kalıplarından çıkarılmış ve TEBD testi gerçekleştirilmeden önce numunenin alt ve üst yüzeylerinin düzgün (paralel) olması için zımparalanarak düzeltme işlemi uygulanmıştır (Şekil 2.12a). Toplam 555 adet silindirik ÇMD numunesinin TEBD testi, ASTM C39/C39M-16b (2016) standardı çerçevesinde bilgisayar tarafından kontrolü sağlanan ve 50 kN yükleme kapasitesi bulunan UTEST marka basınç ve deformasyon ünitesinde yükleme hızı 1,00 mm/dk seçilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.12b). Belirlenen 5 adet kür süresinin (7, 28, 90, 180 ve 360 gün) her biri için 3 adet ÇMD numunesinin TEBD testi yapılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.



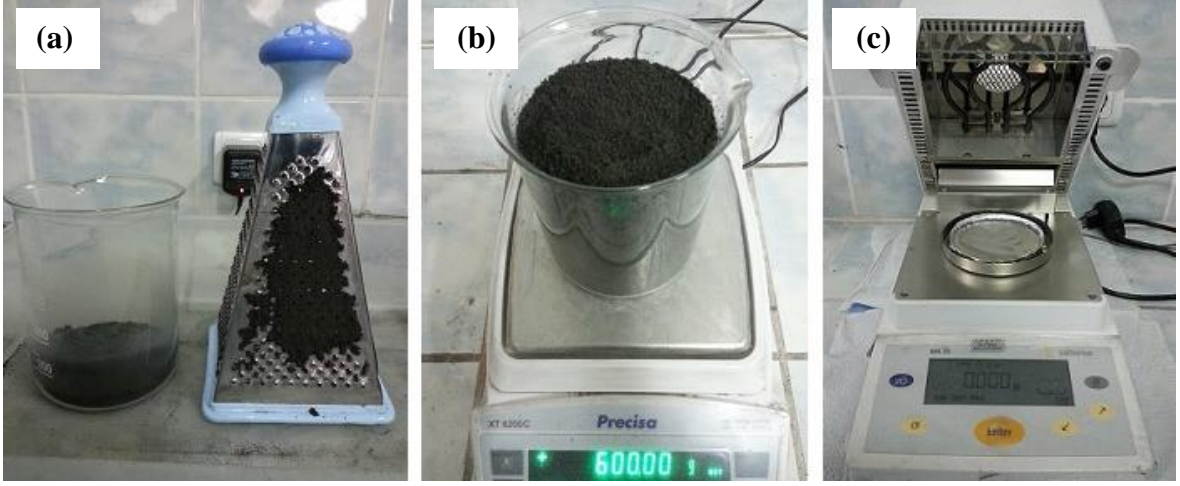
Şekil 2.12. Deney için hazırlanmış numuneler (a) ve TEBD test cihazı (b)

## 2.8. Asit (pH) ve Sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) Analizleri

Yeraltında depolanacak atık malzeme yüksek oranda pirit içerdiğinden dolayı, piritin su ve oksijen varlığında bozunması sonucunda AMD'na sebep olabilecek olan asit ve sülfat oluşumunun macun dolgunun özellikle uzun dönemdeki (>90 gün) duraylılığına etkisini incelemek oldukça önemlidir. Bu amaçla, önceden belirlenmiş kür süreleri (7-360 gün) sonunda TEBD testleri yapılan ÇMD numunelerinin asit (pH) ve sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) analizleri gerçekleştirilmiştir.

ÇMD içerisinde bulunan gözenek suyunun asit oluşumu ve serbest sülfat konsantrasyonunun ölçülmesi için Cihangir'in (2011) farklı standartlardan (ASTM C 265-08 (2008), ASTM C 1580-09 (2009), ASTM D 4972-01 (2007) ve ASTM D 4980-89 (2003))

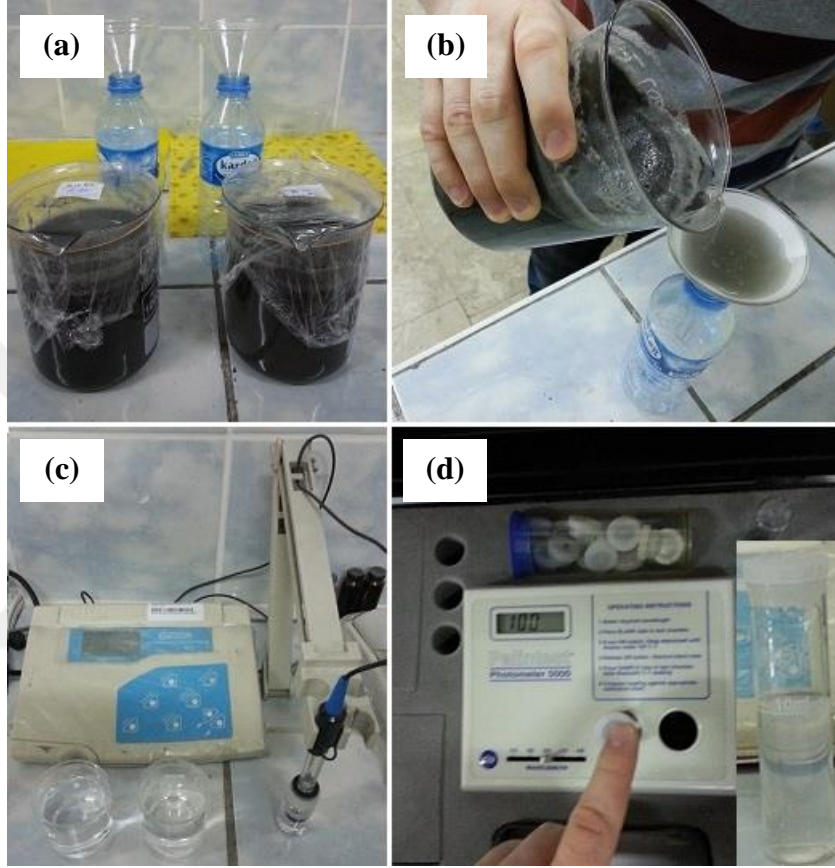
faydalanarak uyarladığı yöntem kullanılmıştır. Bu yönteme göre, kür süresi tamamlanmış ÇMD numuneleri TEBD testine tabi tutulduktan sonra paslanmaz çelikten imal edilmiş mutfak rendesi ile rendelenmiş (Şekil 2.13a), 2,36 mm'lik elekten elenerek 1000 ml'lik cam beherlere doldurulmuş (Şekil 2.13b) ve streç film yardımıyla hava ile temasları kesilmiştir. Rendelenen numunelerden ortalama 1,0-1,25 g malzeme alınarak Sartorius MA35 marka nem tayini cihazında (Şekil 2.13c) nem içerikleri yüzde (%) olarak belirlenmiştir. Nem içeriği belirlenen numunelerin katı ve sıvı miktarları hesaplanmış ve katı (k) ve sıvı (s) miktarları eşit ( $k/s=1$ ) olacak biçimde 1000 ml hacimli beherlere doldurularak üzerine saf su eklenmiştir. Hazırlanan katı-sıvı karışımı paslanmaz çelik karıştırıcı vasıtasıyla 5 dk süresince karıştırılmıştır.



Şekil 2.13. Numunelerin rendelenmesi (a), cam behere doldurulması (b) ve nem içeriklerinin tayini (c)

Beher içerisindeki katı-sıvı karışımın karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra beher üzerine streç film örtülerek ve paketlenme lastiği kullanılarak ağız kısmı sarılarak kapatılmış ve hava ile teması kesilmiştir (Şekil 2.14a). Katı-sıvı şeklinde bulunan karışım, katının çökerek üst kısmında sıvının birikmesi için 1 saat boyunca bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda çöken katı kısmın üzerinde toplanan sıvı kısım huniye monte edilen filtre (Whatman No 1) yardımı ile süzölmüş (Şekil 2.14b) ve elde edilen sıvının asitliği (pH'ı) pH metre (Oakton pH/Con 510) ile ölçülmüştür (Şekil 2.14c). Aynı zamanda örneklerin sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) konsantrasyonunun belirlenmesi için süzölen sıvıdan belirli bir miktar alınmış, fotometre ölçüm aralığı dikkate alınarak belirlenen miktarda saf su ile seyreltilmiş ve 10 ml hacimli cam tüpe doldurulmuştur. Cam tüp içerisine 1 adet  $BaCl_2$  tableti eklenerek karıştırma

çubukları ile 2 dk karıştırılmıştır. Karıştırma işleminden sonra içerisinde çözelti bulunan tüp 5 dk bekletilmiş ve bu süre sonunda tüp tekrar karıştırılmıştır. Son olarak cam tüp fotometre (Palintest photometer 5000) içerisine yerleştirilmiş ve sülfat iyonu konsantrasyonu ppm (mg/l) olarak belirlenmiştir (Şekil 2.14d).



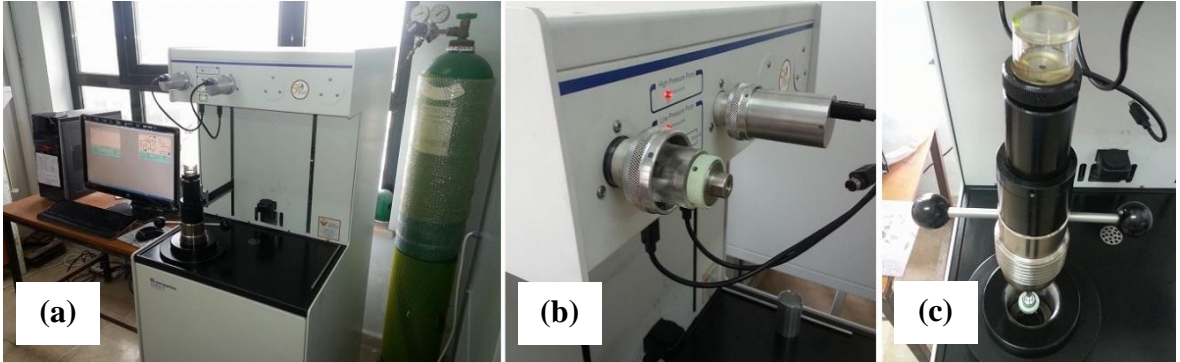
Şekil 2.14. Numunelerin kapalı bir şekilde bekletilmesi (a), filtre yardımıyla süzülmesi (b), pH (c) ve sülfat içeriği ölçümlerinin yapılması (d)

## 2.9. Porozite (MIP) Analizleri

TEBD testi, asit (pH) ve sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) analizleri gerçekleştirilen ÇMD numuneleriyle aynı karışım özelliklerine sahip olan mikser kovaında hazırlanmış ve herhangi bir teste tabi tutulmamış numuneler üzerinde dolgunun mekanik davranışına ve asit-sülfat oluşturma potansiyeline olan etkilerini araştırmak amacıyla kür süreleri (28 ve 180 gün) tamamlanan ÇMD numunelerinin porozite (MIP) testleri yapılarak porozite değişimleri (toplam porozite, kademeli porozite, gözenek boyut dağılımı vb.) incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanmış ÇMD numuneleri, 28 ve 180 gün sonunda içerisindeki nemin uzaklaştırılarak ağırlıklarının

sabitlenmesi amacıyla laboratuvarında bulunan etüvde 50°C sıcaklıkta 60 saat boyunca kurutma işlemine tabi tutulmuş ve ardından etüvden alınarak desikatöre yerleştirilip tekrar nemden etkilenmemesi sağlanmıştır. MIP (Micromeritics Autopore IV 9410) cihazında ASTM D 4404-18 (2018) tarafından önerilen kurallara göre gerçekleştirilecek porozite testi için hazır duruma gelen ÇMD numunelerinin porozite testleri, maksimum 60.000 psi (0-414 MPa) değerinde hidrostatik basınç verilerek <0,003 µm boyutlu mikro gözeneklere kadar cıva girişi olacak şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.15a).

MIP cihazında iki aşamalı olarak gerçekleştirilen porozite analizlerinin ilk aşamasında numune boyutu penetrometre hacmine bağlı olarak hazırlanmış ÇMD numunesi penetrometre içerisine konularak cıva sızdırmazlık önlemlerinin alınması için penetrometrenin metal kapağı düzgün bir biçimde kapatılır ve penetrometre alçak basınç (AB) ünitesine yerleştirilir (Şekil 2.15b). Bu üniteye sırasıyla ÇMD numunesi içerisindeki gazların buharlaştırılması, penetrometre içine cıva dolununun yapılması ve belirli bir basınç (7-345 kPa) aralığında gözenek ölçümü işlemleri gerçekleştirilir. AB ünitesinden çıkarılan ve içerisinde cıva bulunan penetrometrenin ağırlık ölçümü yapıldıktan sonra ikinci aşama olan yüksek basınç (YB) ünitesinde (Şekil 2.15c) en fazla 414 MPa değerine kadar basınç verilerek ÇMD numunesinin porozite değişimleri (toplam porozite, kademeli porozite, gözenek boyut dağılımı vb.) ölçülür.



Şekil 2.15. MIP cihazı (a), AB ünitesi (b) ve YB ünitesinin (c) görünümü

Porozite testlerinde, cıva yüzey çekimi ve cıva-numune yüzeyi arasındaki kontak açısı sırasıyla 0,485 N/m ve 130° alınarak deneysel çalışmalar yürütülmüştür (Zheng vd., 2016; Cihangir ve Akyol 2018). Ayrıca, penetrometre sapı hacmi (stem volume), MIP cihazı üreten firmaların önerileri doğrultusunda %25-90 aralığında (%25<stem volume<%90) olacak

şekilde testler yapılmıştır. MIP testleri sonrasında elde edilen veriler yardımıyla gözeneklerin karakterize edilmesi çalışmalarında, Uluslararası Kuramsal ve Uygulamalı Kimya Sınıflaması Birliği (IUPAC) tarafından önerilen gözenek boyutu sınıflaması kullanılmıştır (Everett, 1972). Bu sınıflamaya göre orta gözenek boyutuna (0,002-0,05  $\mu\text{m}$ ) ve büyük gözenek boyutuna ( $>0,05 \mu\text{m}$ ) sahip gözeneklerin ölçümü MIP testi ile yapılabilirken, minik boyutlu ( $<0,002 \mu\text{m}$ ) gözeneklerin analizi yapılamamaktadır.





### **3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

#### **3.1. Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) ÇMD Performansına Etkisi**

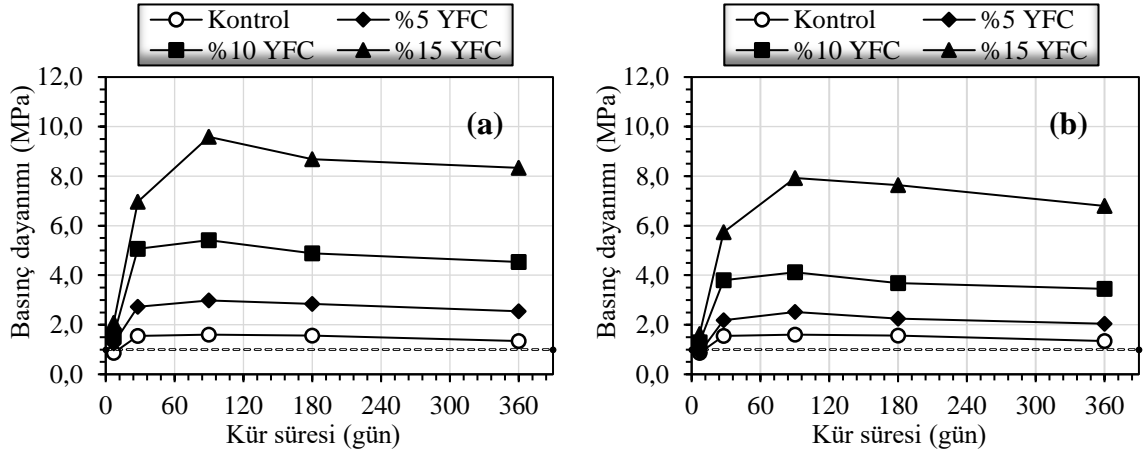
##### **3.1.1. Dayanım ve Duraylılığa Etkisi**

İki farklı bağlayıcı oranında (%7,5-8,5) YFC'nin atık malzeme yerine ağırlıkça 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) ikame edilmesiyle hazırlanan ÇMD numunelerinin 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) sonuçları Şekil 3.1'de verilmiştir.

Bağlayıcı oranı ve karışım özelliklerinden bağımsız olarak bütün ÇMD numunelerinin basınç dayanımları 7-90 günlük kür süresi boyunca artarken, 90 günden sonra (90-360 gün) numunelerin basınç dayanımlarında düşüş eğilimi meydana gelmiştir. YFC ikamesinin etkisi incelendiğinde, YFC içeren ÇMD numunelerinin TEBD değerlerinin kür süresi ve bağlayıcı oranından bağımsız olarak ikame oranının artmasıyla arttığı belirlenmiştir. %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan YFC ikameli (%5, %10 ve %15) ÇMD numuneleri 7-360 günlük kür süresi aralığında kontrol numunelerine kıyasla 1,44-5,19 kat daha yüksek TEBD üretirken, %7,5 bağlayıcı oranındaki numunelerde 4,05 kata kadar daha yüksek dayanım artışı gerçekleşmiştir (Şekil 3.1a,b). YFC ikamesinin basınç dayanımına yaptığı yüksek katkı, atık taneleri arasındaki boşlukların ince YFC taneleri tarafından doldurulmasıyla sonuçlanan filler etkisi ve YFC'nin puzolanik özelliği sebebiyle ilave C-S-H ürünlerinin üretilmesi ile ilişkilendirilebilir (Fall vd., 2007). Ayrıca, YFC'nin olumlu etkisi; ÇMD karışımı içerisinde kullanılan YFC ikamesi oranının %5'ten %15'e artmasıyla aynı akışkanlık (19,05 cm) değerinde karışım içinde istenen su miktarını azaltmasıyla sonuçlanan katı oranının artması (%73,87-74,55>%73,70) ve su/çimento oranının azalması (4,02-4,18<4,20) ile açıklanabilir (Tablo 2.8) (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz vd., 2018).

Atık malzeme içerisinde yer alan sülfürlü minerallerin (pirit vb.) hava ve nem varlığında oksidasyona uğrayarak asit ve sülfat oluşumunun meydana gelmesi ve bunun sonucunda ortamın pH'nın (<9) düşmesiyle hidrasyon ürünlerinin (C-S-H jelleri ve portlandit) zayıflaması ve çözünmesi ile ilişkilendirilen (Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2015; Cihangir ve Akyol, 2018; Yin vd., 2018) ÇMD'deki uzun dönem (90-360 gün) duraylılık problemleri (dayanım kaybı) değerlendirildiğinde, %8,5 bağlayıcı oranına sahip

kontrol numunelerinin dayanım kaybı oranının yaklaşık %16 olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.1a,b). Bu çalışmayla karşılaştırıldığında daha yüksek oranda (%12,5) Portland çimentosu kullanılarak %15 sülfür ( $S^{2-}$ ) içeriğine sahip maden atığı ile hazırlanmış olan ÇMD numunelerinde 90-360 gün aralığında %32,7 oranında dayanım kaybı meydana geldiği bildirilmiştir (Dong vd., 2019). Önceki çalışmanın aksine daha düşük bağlayıcı oranlarında (%8,5 ve %7,5) hazırlanan ÇMD karışımlarında sülfürlü atık yerine %15 YFC ikame edildiğinde ise aynı kür süresi aralığında meydana gelen dayanım kaybı miktarı %13-14 oranında gerçekleşmiş ve YFC ikamesinin uzun dönemde yaşanan dayanım kayıplarını azaltma konusunda daha başarılı olduğu ortaya konmuştur (Şekil 3.1a,b).



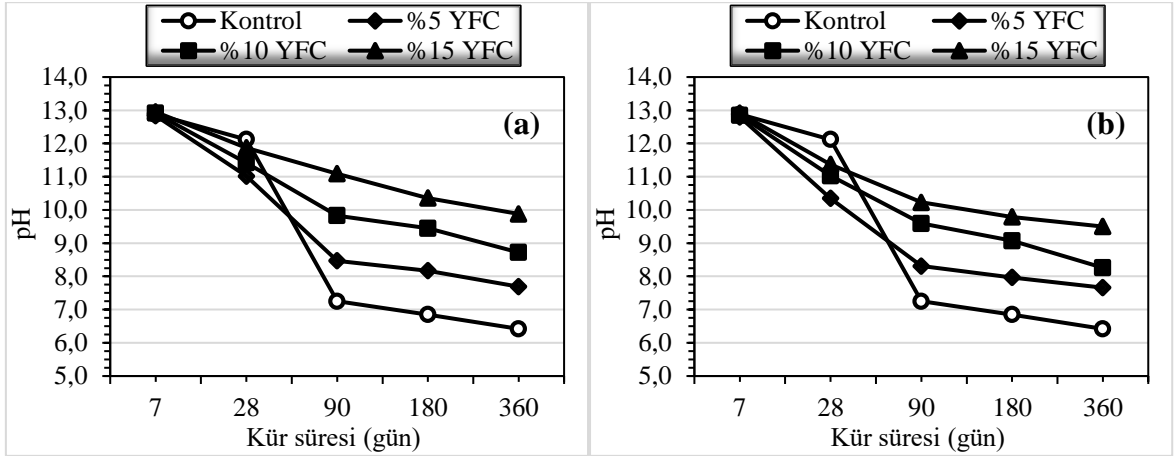
Şekil 3.1. YFC ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi

ÇMD uygulamasının kullanıldığı yeraltı maden işletmelerinde cevher üretiminin yapıldığı bölgelere komşu olan cevheri alınmış üretim açıklıklarına yerleştirilmiş olan dolgunun duraylılığını koruyarak yeraltında güvenli çalışma koşullarının tesis edilmesi ve üretim döngüsünün sorunsuz devam etmesi için 28 günde en az 1,0 MPa dayanım kazanması ve bu dayanımı uzun dönemde (>90 gün) koruyabilmesi istenirken (Yumlu, 2001), üretilen dolgunun aynı kür süreleri boyunca en az 5,0 MPa dayanım sağlaması koşuluyla tavan (zemin) tahkimatı olarak kullanılabilmesi ifade edilmiştir (Belem ve Benzaazoua, 2004). Bu kriterler dikkate alındığında, bütün ÇMD karışımlarının dolgu olarak kullanılabilmesi, buna karşın bağlayıcı oranından bağımsız olarak sadece %15 YFC içeren dolguların (28-360 gün arasında sırasıyla 6,96-8,34 MPa ve 5,74-6,80 MPa  $\geq$  5,0 MPa) tavan tahkimatında kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür (Şekil 3.1a,b).

### 3.1.2. Asit (pH) ve Sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) Oluşumuna Etkisi

%7,5-8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD karışımları içerisinde sülfür içeriği yüksek (%15,82 S) atık malzeme yerine ağırlıkça üç farklı (%5, %10 ve %15) oranda YFC ikame edilerek üretilen ÇMD numunelerinin 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük kür süreleri sonundaki asit (pH) ve sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) oluşumu sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Şekil 3.2 incelendiğinde, 7-360 günlük kür süresi aralığında tüm ÇMD (kontrol ve YFC ikameli) numunelerinin pH değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. Tüm numuneler 28 güne kadar alkali seviyelerde ( $\geq 10,35$ ) bulunurken, 28 günden sonra kontrol (%100 sülfürlü atık) numunelerinde asit oluşumu (pH değerlerinde düşüş) keskin bir şekilde hızlanmıştır. Buna karşın 28 gün sonunda YFC içeren ÇMD numunelerinin pH değerleri kontrol numunesine kıyasla nispeten düşük seviyede olmasına karşın ilerleyen kür sürelerinde (90-360 gün) pH değerlerinde nispeten daha yavaş bir düşüş eğilimi meydana gelmiştir. Bağlayıcının hidrasyon reaksiyonu sonucu üretilen kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) 28 güne kadar tüm numunelerde alkali koşulların (yüksek pH) oluşmasını sağlamıştır (Şekil 3.2a,b) (Cihangir vd., 2015; Yılmaz vd., 2018).

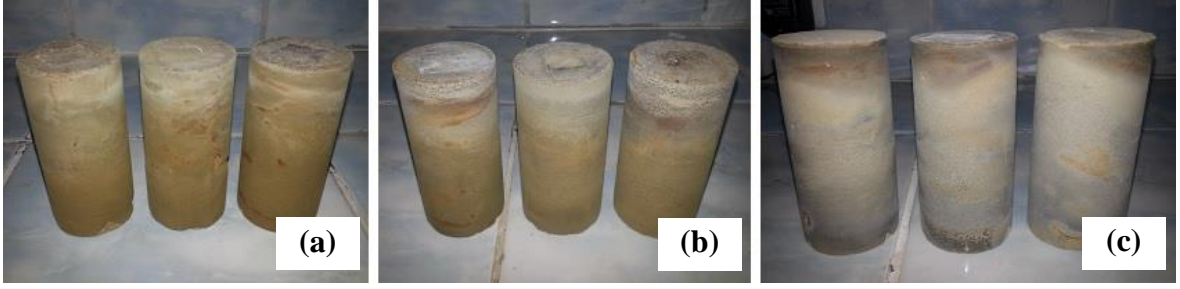


Şekil 3.2. YFC ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi

Kontrol ÇMD numunesiyle karşılaştırıldığında, YFC'nin asit oluşumuna karşı ilerleyen kür sürelerinde gösterdiği olumlu etki, YFC'nin puzolanik özelliği sebebiyle çimento pastası içerisinde ilave C-S-H ürünlerinin üretilmesi ile ilişkilendirilebilir (Fall vd.,

2007). Bunlara ek olarak Şekil 3.2a'dan anlaşılacağı üzere bağlayıcı oranı arttığında numunelerde meydana gelen asit oluşumunun nispeten azaldığı gözlenmiştir. Bağlayıcı oranının artmasının yararlı etkisi, bağlayıcı bileşenlerde ve ÇMD'nin asit atağa karşı direnç kapasitesinde artış ile sonuçlanan hidrasyon ürünlerinin (portlandit ve C-S-H) miktarındaki artışa dayandırılabilir (Cihangir vd., 2012).

YFC ikamesinin etkisine bakıldığında, ÇMD karışımı içerisinde YFC ikamesi arttıkça bağlayıcı oranından bağımsız olarak numunelerin daha düşük miktarlarda asit (daha yüksek pH değerleri) ürettikleri belirlenmiştir. Kontrol ve YFC ikameli ÇMD numunelerinin 7 günlük kür süresi sonunda ölçülen pH değerleri birbirine oldukça yakın (pH= 12,88-12,95) iken özellikle 360 günlük kür süresi sonunda kontrol numunesinin (%8,5 CEM I 42,5R) pH'ı 6,5'in altına düşerken, YFC ikameli numunelerin pH değerleri %8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranında 7,7-9,9 seviyelerinde kalmıştır (Şekil 3.2a,b). Kür süresinin artmasıyla birlikte özellikle kontrol ve %5 YFC ikameli ÇMD numunelerinde meydana gelen asit oluşumunda gözlemlenen artış, bu numunelerin 28 ve 180 günlük kür süreleri sonundaki XRD profillerinden anlaşılacağı üzere ÇMD'de içsel olarak gerçekleşen oksidasyonun kaynağı olan pirit miktarının azalmasıyla açıklanabilir (Ek Şekil 3a,b). Bu bulguların aksine, bağlayıcı oranından bağımsız olarak %15 YFC içeren numunelerde asit oluşumunun daha düşük olması ( $pH \geq 9,5$ ), ince YFC tanelerinin daha iri boyutlu atık tanelerinin arasını doldurması sonucunda daha yoğun (kompakt) ve daha düşük poroziteli bir dolgu içyapısı oluşması ve YFC'nin asit nötralizasyon potansiyelinin bulunması (Tablo 2.7) sebebiyle uzun dönemde gerçekleşen piritin oksidasyonunun azaltılmasının/engellenmesinin bir göstergesi olan pirit miktarında azalma olmaması ile açıklanabilir (Ek Şekil 3c). Ayrıca, Dong vd. (2019) 180 gün sonunda farklı sülfür içerikli numunelerin yüzey görünümünü incelemişler ve hava ve nem varlığında, önce ferrus iyon ve sonra ferrik iyon oksitlenen piritin, numunelerin yüzeylerinde sarıdan kahverengiye doğru koyulaşan izler oluşmasına sebep olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmayla uyumlu olarak 180 gün sonunda kontrol, %5 YFC ve %15 YFC içeren ÇMD numunelerinin yüzey görünümü karşılaştırıldığında, kontrol ve %5 YFC (Şekil 3.3a,b) içeren ÇMD numunelerinde oksidasyonun göstergesi olarak daha fazla miktarda sarı ve kahverengi izlerin bulunduğu, buna karşın %15 YFC (Şekil 3.3c) içeren numunelerde asit oluşumunun daha az olduğunun bir kanıtı olarak bu izlerin oldukça az miktarda bulunduğu gözlenmiştir.

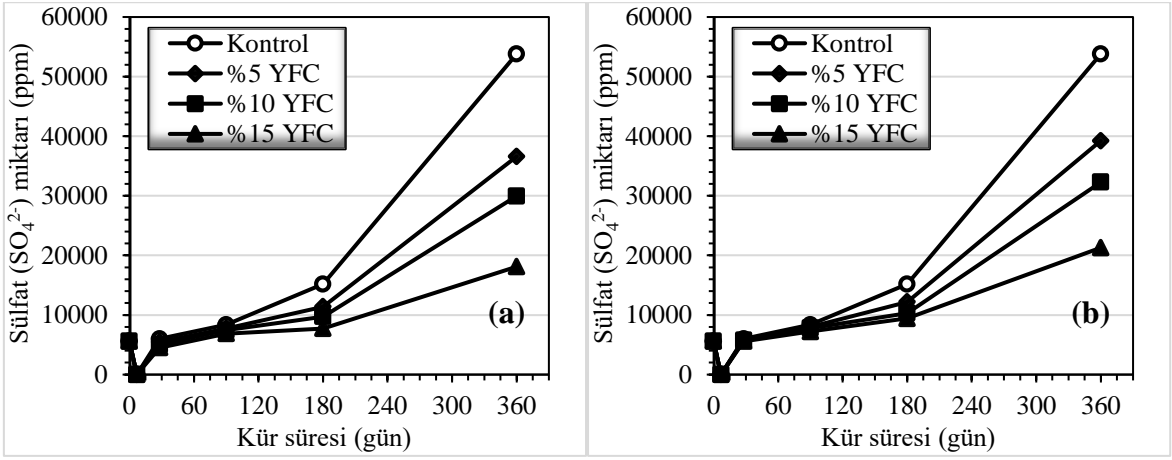


Şekil 3.3. Kontrol (a), %5 YFC (b) ve %15 YFC (c) ikameli numunelerin 180 gün sonundaki görünümleri

Şekil 3.4'te gösterilen sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) konsantrasyonu sonuçlarından görüleceği üzere deneysel çalışmalarda ÇMD numunelerinin içerdiği serbest sülfat konsantrasyonunun kür süresine bağlı takibini daha sağlıklı yapabilmek için dolgu numunelerini hazırlamadan önce bağlayıcı ilavesiz şekilde atık malzemenin deneysel çalışma koşullarına uygun olarak (19,05 cm akışkanlık değerinde) sülfat içeriği analizi yapılmış ve atık malzemenin serbest sülfat konsantrasyonu 5616 ppm olarak belirlenmiştir. Atık bünyesinde başlangıçta var olan  $SO_4^{2-}$  iyonlarının tamamının bağlayıcı bileşenleri (C-S-H) ve portlandit gibi hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girerek jips ve etrenjit gibi sülfat içeren yapıların muhtemel oluşumundan dolayı tüm ÇMD numunelerinde (kontrol ve YFC ikameli) 7 gün sonunda sülfat iyonuna rastlanmamıştır (sülfat iyonu konsantrasyonu "0" olarak ölçülmüştür). Dolgu bünyesinde hidrasyon süreci devam ettiği için bağlayıcı oranından bağımsız olarak tüm ÇMD numunelerinde 28-90 gün aralığında  $SO_4^{2-}$  iyonu konsantrasyonu yavaş artarken, ÇMD numunelerinin basınç dayanımındaki düşüşün başlangıcı olan (Şekil 3.1) 90 günden itibaren sülfat iyonu salınımında daha hızlı artış gözlemlenmiştir (Şekil 3.4a,b).

Atık malzeme yerine %5-15 oranında yapılan YFC ikamesinin sülfat iyonu miktarına etkisi incelendiğinde, ikame oranı arttıkça bağlayıcı oranından bağımsız olarak sülfat iyonu oluşumunun azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle 360 gün sonunda oluşan sülfat içerikleri karşılaştırıldığında, kontrol (%100 sülfürlü atık) ÇMD numunesinin bünyesinde 53790 ppm seviyelerinde sülfat iyonu üretilirken, %8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranlarında hazırlanan %15 YFC ikameli numunelerde kontrol numunesine kıyasla %66,35 ve %60,42 düşüş göstererek sırasıyla 18100 ve 21290 ppm seviyelerinde serbest sülfat konsantrasyonu üretilmiştir (Şekil 3.4). Bu bağlamda, uzun dönemde özellikle %15 YFC içeren ÇMD numunelerinde meydana gelen dayanım kaybı miktarlarının ve dolgu duraylılığındaki bozulmaların kontrol numunesine kıyasla nispeten düşük (%13-14<%16) seviyelerde

kalması, YFC'nin nötralizasyon potansiyelinin bulunmasından (Tablo 2.7) dolayı dolgu bünyesinde meydana gelen asit ve sülfat oluşumunun daha düşük düzeyde olmasıyla ilişkilendirilebilir. Bunlara ek olarak, Horkoss vd.'nin (2016) bulgularıyla uyumlu olarak asit ve sülfat atak sonucu hidrasyon ürünlerinin zayıflamasına ve dolguda genleşme, çatlama ve yapısal bütünlüğün bozulmasına sebep olan jips ve bassanit gibi ikincil yapıların oluşumu dayanımdaki düşüşün muhtemel sebepleri arasında gösterilebilir (Ek Şekil 3). Fakat ÇMD numunelerinin görünür kırık, çatlak vb. herhangi bir kusur içermediği belirlenmiştir (Şekil 3.3).



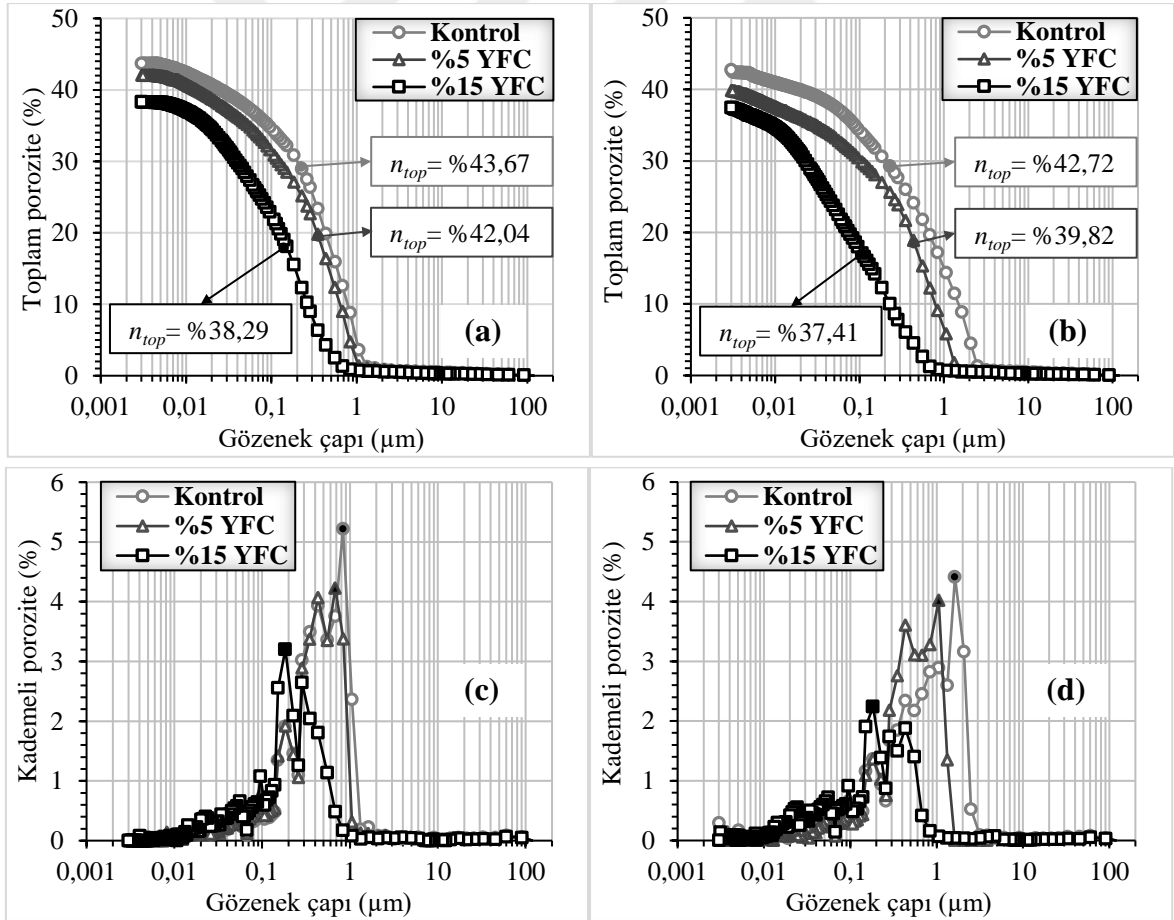
Şekil 3.4. YFC ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) konsantrasyonuna etkisi

### 3.1.3. Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi

%8,5 bağlayıcı oranında tamamen (%100) sülfürlü atık ile hazırlanan kontrol numunesi ve atık malzeme yerine %5 ve %15 oranında YFC ikame edilerek üretilen ÇMD numunelerinin 28 ve 180 günlük kür süreleri sonundaki toplam ( $n_{top}$ ) ve kademeli porozite sonuçları Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Ayrıca, porozite analizleri gerçekleştirilen ÇMD numunelerine ait teknik parametreler (gözenek boyut dağılımı, büyük boyutlu porozite ( $n_{büyük}$ ), orta boyutlu porozite ( $n_{orta}$ ), eşik gözenek çapı ( $d_{eş}$ ) vb.) Tablo 3.1'de özetlenmiştir.

Kontrol, %5 YFC ve %15 YFC ikameli ÇMD numunelerinin toplam ( $n_{top}$ ) porozite değerlerinin kür süresinin 28 günden 180 güne artmasıyla azaldığı belirlenmiştir. 28 gün sonunda kontrol, %5 YFC ve %15 YFC içeren numunelerin  $n_{top}$  değerleri sırasıyla %43,67, %42,04 ve %38,29 iken, kür süresinin 180 güne artmasıyla birlikte bu değerler %42,72,

%39,82 ve %37,41 olarak ölçülmüştür. Karışım tipinden bağımsız olarak kür süresinin artması sonucu tüm macun dolgu numunelerin toplam porozite değerlerindeki düşüş basınç dayanımında meydana gelen artışlar ile uyum göstermiştir (Şekil 3.1a ve Şekil 3.5). Bu çalışmayla uyumlu bulguların elde edildiği çalışmada Mangane vd. (2018) referans ve süper akışkanlaştırıcı katkılı ÇMD numunelerinin kür süresinin 7 günden 28 ve 90 güne artmasıyla toplam porozite değerlerinin azalmasıyla uyumlu olarak basınç dayanımının arttığını rapor etmişler ve ÇMD'nin mekanik performansının drenaj, yerleşme/çökme, ikincil mineral çökmesi ve çimento hidratasyonu gibi birçok parametre tarafından etkilenen mikroyapı ile doğrudan bağlantılı olduğunu bildirmişlerdir (Benzaazoua vd., 2004; Belem vd., 2016; Mangane vd., 2018). Toplam porozite değerleriyle benzer şekilde tüm ÇMD numunelerinin kademeli porozite değerlerinin de kür süresinin artması ile azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.5c,d).



Şekil 3.5. YFC ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi

YFC ikamesinin porozite değişimine etkisi incelendiğinde, kür süresinden bağımsız olarak YFC ikamesi arttıkça  $n_{top}$  değerleri azalmıştır. Kontrol numunesinin 28 ve 180 gün sonundaki  $n_{top}$  değerleri sırasıyla %43,67 ve %42,72 olarak gerçekleşirken, %5 ve %15 YFC içeren numunelerin  $n_{top}$  değerleri kontrol numunesine kıyasla 28 günde sırasıyla %3,73 ve %12,32 düşüşle %42,04 ve %38,29 olarak, 180 gün sonunda ise %6,79 ve %12,43 düşerek %39,82 ve %37,41 olarak ölçülmüştür (Şekil 3.5a,b). Sülfürlü atık yerine %5-15 oranında ikame edilen YFC'nin porozite gelişimine sağladığı olumlu etki; YFC'nin puzolanik özelliği sayesinde ilave C-S-H ürünlerinin üretilmesi sonucu bağlayıcı ile atık taneleri arasındaki boşluklarının doldurulmasıyla daha güçlü bir dayanım bağı oluşması (Fall vd., 2007; Zheng vd., 2016) ve atık malzemeye kıyasla nispeten daha yüksek özgül yüzey alanına (Tablo 2.5) ve daha ince tane boyutuna (Şekil 2.7) sahip olan YFC'nin atık taneleri ile çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurması (filler etkisi) sonucu aynı akışkanlık (19,05 cm) değerinde karışım içinde istenen su miktarının azalmasıyla sonuçlanan katı oranının artması (%73,87-74,55>%73,70) ve su/çimento oranının azalması (4,02-4,18<4,20) ile açıklanabilir (Tablo 2.8) (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Yılmaz vd, 2017; Yılmaz vd., 2018). Benzer porozite gelişimlerinin gözlemlendiği başka bir araştırmada Zheng vd. (2016) iri taneli atık malzemeye ikame olarak %22,5 oranında KT kullanımının ÇMD'nin toplam porozitesinin kontrol numunesine kıyasla özellikle 28 gün sonunda %4,0 azalma sağladığını bildirmiş ve bu durumu; KT'nin boşlukları doldurma etkisi, inceliği ve su bırakma gibi yüzey özellikleri ile açıklamıştır.

Porozite testleri sonrasında kontrol ve %5-15 YFC içeren numunelere ait teknik parametrelerin (toplam porozite;  $n_{top}$ , orta boyutlu porozite;  $n_{Orta}$ , büyük boyutlu porozite;  $n_{Büyük}$ , eşik gözenek çapı;  $d_{eş}$  ve kademeli porozite) gösterildiği Tablo 3.1 incelendiğinde, toplam porozite değerleriyle örtüşen biçimde kür süresinin 28 günden 180 güne artması sonucu tüm numunelerin büyük boyutlu porozite ( $n_{Büyük}$ ) değerleri azalırken, gözeneklerin küçülmesine ve toplam porozitenin azalmasına işaret olarak gösterilebilen orta boyutlu porozite ( $n_{Orta}$ ) değerlerinde artış meydana gelmiştir. Numunelerin  $n_{Büyük}$  değerleri karşılaştırıldığında, kontrol numunesinin 28 ve 180 gün sonundaki  $n_{Büyük}$  değerleri sırasıyla toplam porozitelerinin ( $n_{top}$ ) %86 ve %88'ini kapsarken, %5 ve %15 YFC ikameli numunelerin  $n_{Büyük}$  değerleri 28 ve 180 günde azalarak  $n_{top}$  değerinin %84-73 ve %83-62'sini oluşturmuştur. Bununla birlikte, özellikle ÇMD karışımı içerisine yapılan %15 YFC ikamesinin kontrol numunesine göre  $n_{Büyük}$  değerlerini 28 ve 180 günde sırasıyla %26 ve %38 oranında azalttığı,  $n_{Orta}$  miktarlarını %71 ve %172 oranında arttırdığı belirlenmiştir



(Tablo 3.1).  $n_{\text{Büyük}}$  ve  $n_{\text{Orta}}$  değerlerindeki gelişimin toplam porozitenin önemli derecede azalmasıyla ve basınç dayanımının artmasıyla örtüşmesi, YFC'nin puzolanik özelliği vasıtasıyla gözenek yapısını küçülten ve yoğunlaştıran ilave hidrasyon ürünlerinin oluşması ve nispeten daha ince tane boyutuna (daha yüksek yüzey alanına) sahip olmasından dolayı boşlukların doldurulması (büyük boyutlu gözeneklerin kapanması) veya küçülerek orta boyutlu gözeneğe dönüşmesi ile ilişkilendirilebilir (Ghirian ve Fall, 2014; Yılmaz vd., 2017; Erçikdi ve Yılmaz, 2019). Bu çalışmada belirlenen bulgularla uyumlu olarak Zheng vd. (2016) %5 sülfür içerikli atık malzeme yerine ikame olarak %10 ve %22,5 oranında öğütülmüş KT kullanımının 28 günlük ÇMD numunelerinin  $n_{\text{Büyük}}$  (%16,3-15,6<%20,4) miktarlarını önemli ölçüde azalttığını rapor etmişlerdir.

Tablo 3.1. Kontrol ve YFC ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler

Karışım Tipi	Kür Süresi (gün)	Toplam Porozite (%)	Kümülatif Porozite (%)		TEBD (MPa)	<sup>(c)</sup> $d_{eş}$ (µm)	Kademeli Porozite (%)
			<sup>(a)</sup> $n_{\text{Orta}}$	<sup>(b)</sup> $n_{\text{Büyük}}$			
Kontrol		43,67	6,08	37,59	1,55	0,836	5,21
%5 YFC	28	42,04	6,90	35,14	2,73	0,679	4,23
%15 YFC		38,29	10,39	27,90	6,96	0,183	3,20
Kontrol		42,72	5,23	37,49	1,56	1,628	4,41
%5 YFC	180	39,82	6,61	33,21	2,85	1,056	4,02
%15 YFC		37,41	14,24	23,17	8,69	0,183	2,24

<sup>(a)</sup> $n_{\text{Orta}}$  (Orta boyutlu gözenek) : 0,002-0,05 µm arasındaki gözeneklerin gözeneklilik değeri

<sup>(b)</sup> $n_{\text{Büyük}}$  (Büyük boyutlu gözenek): 0,05 µm'den büyük gözeneklere ait gözeneklilik değeri

<sup>(c)</sup> $d_{eş}$  (Eşik gözenek çapı) : Kademeli porozite eğrisinin en dik noktasına karşılık gelen çap değeri (Everett, 1972; Yılmaz vd., 2011; Yılmaz vd., 2018)

ÇMD'nin permabilite gibi hidrolik iletkenlik özelliklerini etkileyen ve dolayısıyla akışkan taşınım kabiliyetini kontrol eden (Fall vd., 2009; Yılmaz vd., 2011; Cihangir ve Akyol, 2018) eşik gözenek çapının ( $d_{eş}$ ) genel olarak kür süresinin artmasıyla büyüdüğü görülmektedir. Ayrıca, YFC ikameli numunelerin  $d_{eş}$  değerlerinin kür süresinden bağımsız olarak kontrol numunesine kıyasla nispeten daha küçük olduğu ve özellikle %15 YFC ikamesinin eşik gözenek çapını fark edilir biçimde küçülttüğü belirlenmiştir (Tablo 3.1). Benzer olarak kademeli porozite değerlerinin de YFC ikame oranı arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Uzun dönemde asit ve sülfat oluşumunun artmasıyla eşik gözenek çaplarının büyümesi uyumluluk göstermesine rağmen dolgu karışımı içerisine yapılan %5-15 YFC ikamesi ile daha iri boyutlu atık taneleri arasındaki boşlukların nispeten daha ince YFC taneleri ile doldurularak aynı akışkanlıkta karışımın katı oranının artması (%73,87-74,55>%73,70) ve su/çimento oranının azalması (4,02-4,18<4,20) sağlanmış ve gözenek

yapısı önemli ölçüde iyileştirilmiştir (Tablo 2.8). Özellikle %15 YFC içeren ÇMD'de farkedilebilir bir biçimde daha ince ve yoğun bir mikroyapı oluşmuştur (Tablo 3.1). Önceki araştırmacıların (Yılmaz vd., 2011; Yılmaz ve Ercikdi, 2016) belirttiği üzere katı oranındaki artış ve su/çimento oranındaki azalma ÇMD'nin toplam porozitesinin azalmasını sağlamıştır. Bu bağlamda, YFC içeren ÇMD'nin daha yüksek mekanik performans sağlaması (Şekil 3.1) ve sülfat atak mekanizmasının yavaşlaması (Şekil 3.4), iri boyutlu atık taneleri arasındaki boşlukların ince YFC taneleri tarafından doldurulması sayesinde permabilitenin azalmasına sebep olan porozitenin düşmesi (Şekil 3.5 ve Tablo 3.1), gözenek yapısının iyileştirilmesi ve oksidasyona sebep olan sülfürlü atık yüzeyinin küçültülmesiyle numune içerisine nem ve hava (oksijen) girişinin kısıtlanarak pirit oksidasyonunun azaltılması ile açıklanabilir (Mangane vd., 2018; Yılmaz vd., 2018).

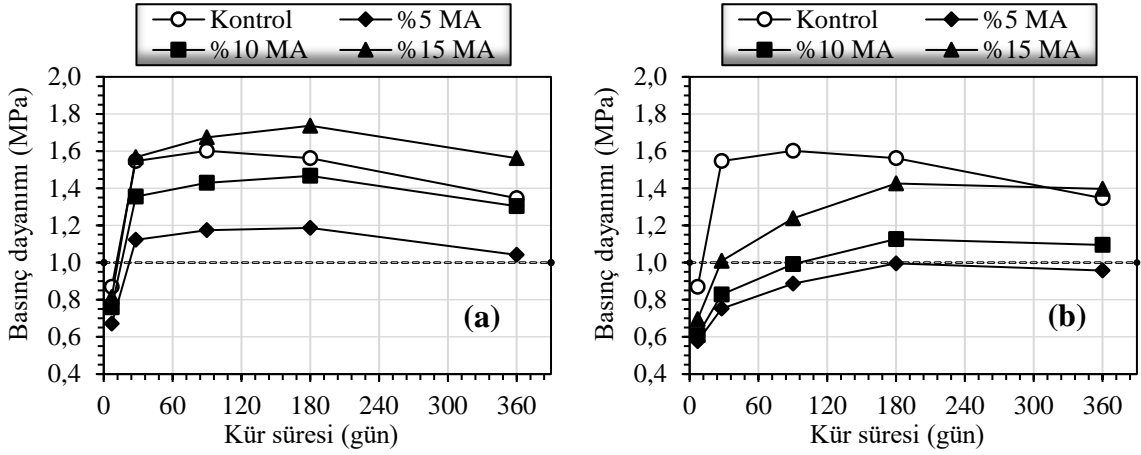
### **3.2. Mermer Artığının (MA) ÇMD Performansına Etkisi**

#### **3.2.1. Dayanım ve Duraylılığa Etkisi**

Şekil 3.6'da, iki farklı bağlayıcı oranında (%7,5-8,5) hazırlanan macun dolgu karışımları içerisinde sülfür içeriği yüksek (%15,82 S) atık malzeme yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında MA ikame edilerek üretilen ÇMD numunelerinin 7-360 günlük kür süresi aralığındaki TEBD sonuçları gösterilmiştir.

Tüm macun dolgu numunelerinin TEBD değerleri, karışım özellikleri ve bağlayıcı oranından bağımsız olarak 7-90 günlük kür süresi aralığında artış göstermiştir. Fakat 90 günden sonra kontrol numunelerinin TEBD değerlerinde azalma ortaya çıkarken, her iki bağlayıcı oranında (%7,5 ve %8,5) hazırlanan MA ikameli ÇMD numunelerinde dayanım artışı 180 güne kadar devam etmiş ve sonrasında daha yavaş bir düşme eğilimi gözlenmiştir (Şekil 3.6a,b). Pirit atık yerine yapılan MA ikamesinin etkisi incelendiğinde, ikame oranı arttıkça TEBD'nin arttığı tespit edilirken, sadece %8,5 bağlayıcı oranına sahip %15 MA ikameli numunelerin bütün kür sürelerinde kontrol numunesine kıyasla daha yüksek TEBD ürettiği görülmüştür (Şekil 3.6a). %7,5 bağlayıcı oranındaki MA ikameli numunelerin basınç dayanımlarının ise kontrol numunelerine göre daha düşük seviyede kaldığı, buna karşın %15 MA ikameli numunelerin basınç dayanımının 360 gün sonunda kontrol numunelerini geçtiği belirlenmiştir (Şekil 3.6b). Özellikle %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD karışımında kullanılan sülfürlü atık yerine %15 oranında MA ikame edilmesinin basınç dayanımı ve uzun

dönem duraylılık açısından yaptığı katkı, puzolanik bir malzeme olmayan MA'nın, sülfürlü maden atıklarının oksidasyonu sebebiyle dolgu bünyesinde ortaya çıkan asit oluşumuna karşı yüksek nötralizasyon kapasitesine sahip olması ile açıklanabilir (Tablo 2.7). Ayrıca, dayanım ve duraylılık konusundaki olumlu gelişim, aynı bağlayıcı oranında (%8,5) dolgu karışımı içerisinde daha ince boyutlu taneler içeren MA (%15'e kadar) eklenmesi ile iri atık taneleri arasındaki boşlukların doldurularak karışımın su gereksiniminin azaltılması ve böylece katı oranında artış sağlanması (74,70>73,70) ile ilişkilendirilebilir (Tablo 2.8) (Ercikdi vd., 2013; Celik vd., 2014; Yılmaz vd., 2017).



Şekil 3.6. MA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi

Asit-sülfat oluşumu sebebiyle ÇMD'de uzun dönemde (90-360 gün) yaşanan dayanım kayıpları incelendiğinde, kontrol numunelerinin TEBD değerleri %15,92 oranında düşerken aynı bağlayıcı oranında %15 MA ikameli numunelerde %6,75 dayanım düşüşü gerçekleşmiştir. Dahası, %7,5 bağlayıcı oranında aynı ikame oranı (%15 MA) ile hazırlanan ÇMD numunelerinin basınç dayanımları kontrol numunelerine göre daha düşük seviyede kalmasına karşın, uzun dönemde dayanım kaybı oluşmamıştır (Ek Tablo 1). Bu durum, MA'nın puzolanik özelliğinin bulunmamasına rağmen, ÇMD içerisinde oluşan ve sülfürlü maden atıklarının oksidasyonundan kaynaklanan asitin nötralize edilmesinde oldukça başarılı olmasına bağlanabilir (Ercikdi vd., 2015).

ÇMD yönteminin uygulandığı yeraltı maden işletmelerinde, cevheri alınmış boşluklara yerleştirilen dolgunun gerekli dayanımı kazanıp uzun dönemde duraylılığını sürdürmesi ve böylece üretim döngüsünün sorunsuz devam etmesi için 28-360 gün arasında

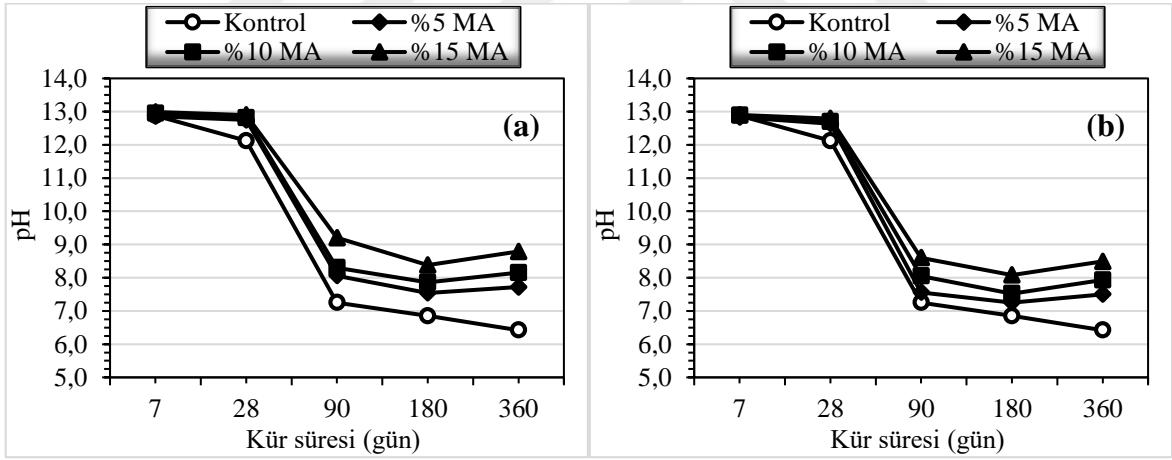
istenen kritik basınç dayanımını ( $TEBD \geq 1,0$  MPa) (Yumlu, 2001) %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan tüm ÇMD numuneleri sağlarken, %7,5 bağlayıcı oranında sadece %15 MA ikameli numuneler sağlamıştır (Şekil 3.6a,b). Her iki bağlayıcı oranında (%7,5-8,5) özellikle %15 MA ikamesi ile üretilen ÇMD'nin sadece dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için gerekli kritik basınç dayanımı değerini (28-360 gün arasında  $\geq 1,0$  MPa) sağladığı için  $1,0$  m<sup>3</sup> dolgu üretiminde bağlayıcı oranı %7,5'e düşürülerek kontrol karışımına kıyasla %13,62 oranında bağlayıcı tasarrufu sağlanabileceği tespit edilmiştir (Ek Tablo 1).

### 3.2.2. Asit (pH) ve Sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) Oluşumuna Etkisi

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de %8,5-7,5 bağlayıcı oranında ve sülfürlü atık yerine ağırlıkça %5-15 oranında MA ikame edilerek üretilen ÇMD numunelerinin 7-360 günlük kür süresi aralığındaki pH ve  $SO_4^{2-}$  içerikleri verilmiştir.

28 günlük kür süresi sonuna kadar bağlayıcı oranı ve karışım özelliklerinden bağımsız olarak tüm ÇMD numunelerinin asit üretim miktarlarının oldukça düşük seviyelerde ( $pH > 12,10$ ) olduğu ve bu durum, ÇMD karışımında bağlayıcı malzeme olarak kullanılan PC'nin hidrasyonu vasıtasıyla üretilen portlandit gibi kalsiyum hidroksit mineralleri sonucu bazik bir ortam oluşması ile ilişkilendirilirken (Cihangir vd., 2015; Yılmaz vd., 2018), 28-90 gün arasında ise tüm numunelerin asit üretiminde keskin bir artış (pH değerlerinde hızlı bir düşüş) eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. 90 gün sonunda pH değeri 7,25 olan kontrol numunelerinin pH değerlerinde düşüş devam ederek 360 gün sonunda 6,50'nin altına kadar azalırken, bağlayıcı oranından bağımsız olarak ağırlıkça %5-15 MA içeren numunelerin asit oluşumu (pH değerlerinde düşme) 180 güne kadar devam etmiş ve sonrasında tekrar azalma (pH değerlerinde artış) eğilimi başlamıştır (Şekil 3.7a,b). ÇMD numunelerinde kür süresinin artmasıyla birlikte asit oluşumunda meydana gelen artış, 28 ve 180 günlük kür süreleri sonundaki XRD analizlerinden anlaşılacağı üzere ÇMD'de gerçekleşen oksidasyonun kaynağı olan pirit miktarının azalmasına bağlanabilir (Ek Şekil 3a ve Ek Şekil 4a,b). Ayrıca MA ikame oranının artmasıyla birlikte bağlayıcı oranından bağımsız olarak tüm kür sürelerinde asit üretiminin nispeten azaldığı gözlemlenmiştir. MA içeren ÇMD numunelerinde nispeten daha yüksek pH değerlerinin meydana gelmesi, Fernandez-Caliani ve Barba-Brioso (2010) tarafından yapılmış çalışma ile uyumlu olarak asit nötralize etme kapasitesine sahip olan mermerin ana minerali konumundaki kalsitin çözünmesi sonucu dolgu bünyesine  $OH^-$  iyonu salınımı ile açıklanabilir (Ek Şekil 4) (Ercikdi

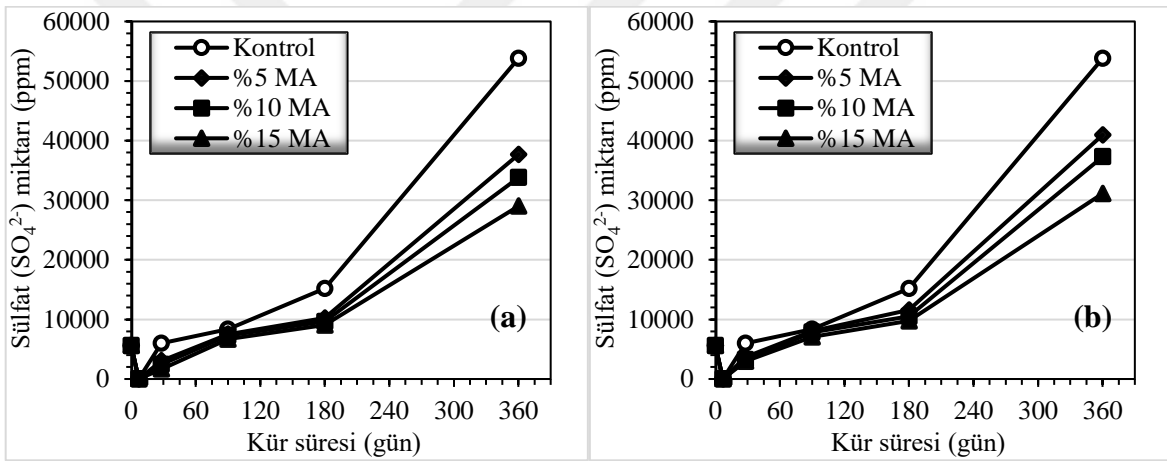
vd., 2015). Sonuçlar ile uyumlu olarak, Tozsın vd. (2014a) asidik toprakların nötralizasyonu için iki farklı MA kullanarak 15, 30, 45, 60 ve 75 günlük inkübasyon sürelerinde gerçekleştirdikleri kolon testi sonuçlarından asidik özellikteki ( $\text{pH} = 4,71 \pm 0,18$ ) toprak (kontrol) numunesinin pH değerlerinin MA ilave edilmesiyle 75 gün sonunda 6,84 seviyelerine kadar yükseldiğini tespit etmişlerdir. Buna ek olarak, araştırmacılar daha fazla miktarlarda yapılan MA ilavesinin pH'ı daha hızlı bir şekilde yükselttiğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda, başka bir çalışmada (Ercikdi vd., 2015), dolgu içerisinde bağlayıcıya ilave olarak kullanılmış olan MA miktarı %10'dan %30'a arttırıldığında tüm kür sürelerinde (7-180 gün) pH değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. Bağlayıcı oranının etkisi değerlendirildiğinde, %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD numunelerinin %7,5 bağlayıcı oranına kıyasla nispeten daha yüksek pH değerleri ürettiği tespit edilmiş ve bu olumlu katkı, dolgu içerisinde üretilen hidrasyon ürünlerinin (portlandit ve C-S-H) miktarındaki artışa bağlı olarak bağlayıcı bileşenlerde ve ÇMD'nin asit atağa karşı direnç kapasitesinde artış meydana gelmesi ile açıklanabilir (Cihangir vd., 2012).



Şekil 3.7. MA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi

Aynı karışım özelliklerinde hazırlanan ÇMD numunelerinde 7-360 gün boyunca meydana gelen sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) konsantrasyonu miktarları incelendiğinde (Şekil 3.8), sülfürlü atık içerisinde başlangıçta var olan  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonlarının çimentonun hidrasyonu esnasında üretilen C-S-H ve portlandit ile reaksiyona girmesi sonucu jips ve etrenjit gibi sülfat içeren yapıların muhtemel oluşumundan dolayı kontrol ve MA ikameli numunelerde bağlayıcı oranından bağımsız olarak 7 gün sonunda sülfat iyonu konsantrasyonu sıfır "0" olarak

ölçülmüştür. 7 günden sonra bütün numunelerin sülfat miktarları bağlayıcı oranından bağımsız olarak 360 gün sonuna kadar artış eğilimi göstermiştir. Buna ek olarak dolgu içerisinde hidrasyon süreci tam olarak tamamlanmadığından dolayı 28-90 gün aralığında tüm numunelerde  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonları oluşumu nispeten daha yavaş artarken, 90 günden itibaren ÇMD numunelerinde meydana gelen basınç dayanımı düşüşüyle (Şekil 3.6) uyumlu olarak sülfat iyonu salınımının daha hızlı arttığı tespit edilmiştir (Şekil 3.8a,b). Bu durum, 28 ve 180 günlük kür süreleri sonundaki XRD sonuçlarından açıkça görüldüğü üzere kür süresinin artmasıyla birlikte ÇMD’de gerçekleşen oksidasyonun kaynağı olan pirit miktarının azalmasıyla sonuçlanan muhtemel sülfat artışı ile açıklanabilir (Ek Şekil 3a ve Ek Şekil 4a,b).



Şekil 3.8. MA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD’nin sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) konsantrasyonuna etkisi

MA ikamesinin dolgu bünyesinde meydana gelen sülfat iyonu salınımına etkisi değerlendirildiğinde, ikame oranı arttıkça %8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranında hazırlanmış ÇMD numunelerinde daha düşük miktarda sülfat iyonu oluştuğu görülmektedir. 360 gün sonunda kontrol ÇMD numunesi bünyesinde 53790 ppm seviyelerinde sülfat iyonu üretilirken, bağlayıcı oranından bağımsız olarak özellikle %15 MA içeren numunelerde 180-360 gün arasında asit oluşumunun azalması (pH değerlerinde artış) ve serbest sülfat iyonlarının MA’nın ana bileşeni olan kalsitin çözünmesi sonucu oluşan  $\text{Ca}^{2+}$  iyonları ile reaksiyona girerek bassanit minerali şeklinde bağlanması sonucunda sülfat konsantrasyonu %42,18-46,27 oranlarında azalmıştır (Şekil 3.8a,b ve Ek Şekil 4). Böylelikle, uzun dönemde (90-360 gün) %15 MA ikameli ÇMD numunelerinde oluşan dayanım kaybı miktarlarının

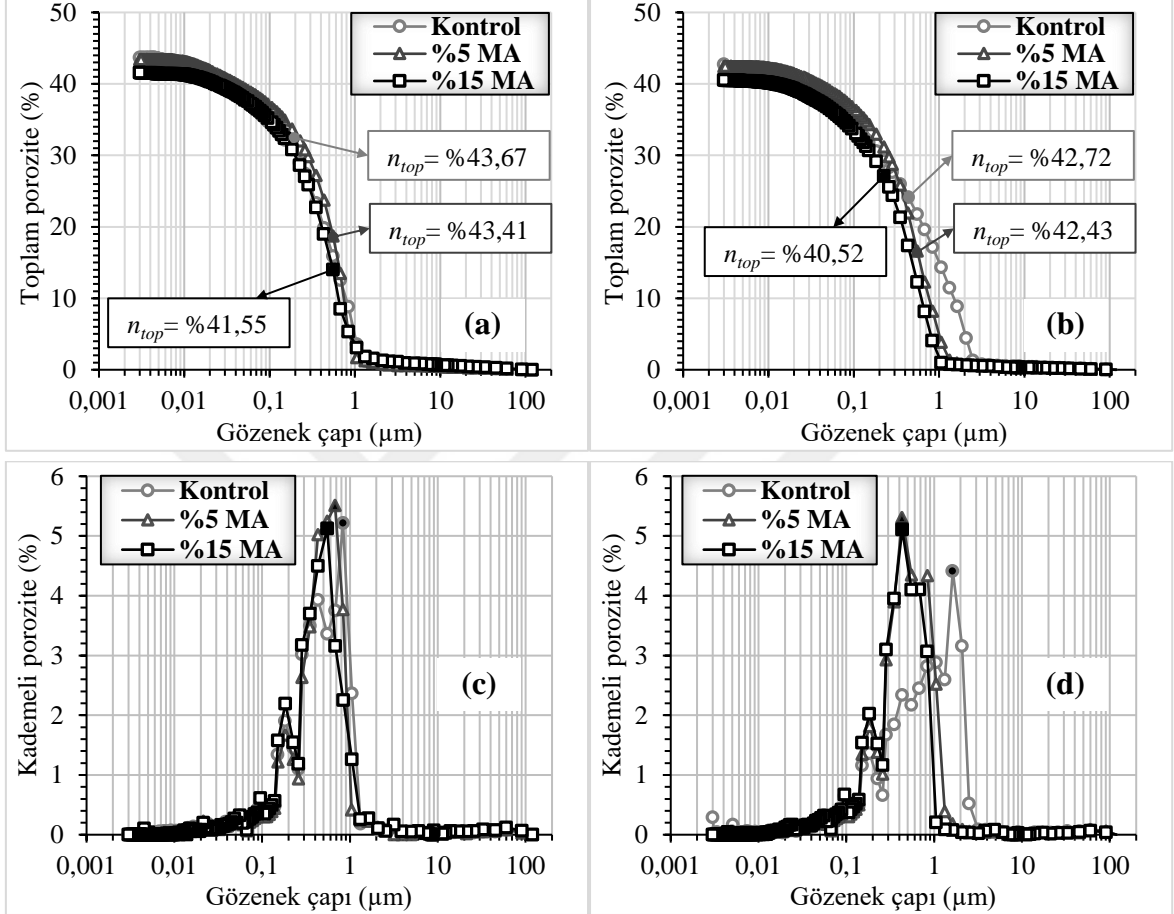
kontrol numunelerinden oldukça düşük ( $6,75 < 16$ ) olması dolgu bünyesinde meydana gelen asit ve sülfat oluşumunun daha düşük seviyelerde kalmasıyla açıklanabilir.

### 3.2.3. Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi

Şekil 3.9, %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan kontrol numunesi ve atık malzeme yerine %5 ve %15 MA ikame edilerek üretilen ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki  $n_{top}$  ve kademeli porozite değişimlerini göstermektedir. Ayrıca, ÇMD numunelerine ait gözenek boyut dağılımı,  $n_{büyük}$ ,  $n_{orta}$ ,  $d_{eş}$  gibi teknik parametreler Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Kür süresinin artmasıyla birlikte tüm ÇMD numunelerinin (kontrol ve %5-15 MA)  $n_{top}$  değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. 28 gün sonunda numunelerin  $n_{top}$  değerleri %43,67-41,55 arasında değişirken, 180 gün sonunda bu değerlerin %42,72-40,52 arasında değiştiği belirlenmiştir. Kür süresi artışı sonucunda toplam porozite değerlerinde meydana gelen düşüş ile basınç dayanımı değerlerinin kısmen uyum gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.9a,b ve Şekil 3.6a). Önceki araştırmacılar, farklı kür sürelerinde (7, 14 ve 28 gün; Yılmaz vd., 2014), (7, 28, 90 gün; Mangane vd., 2018) ve (7, 28, 90 ve 150 gün; Ghirian ve Fall, 2014) gerçekleştirdikleri porozite testleri sonucunda kür süresi artışının poroziteyi azalttığını bildirmişlerdir ve sonuçlar bu çalışma ile benzerlik göstermiştir. Ayrıca, kür süresi artışının tüm numunelerin kademeli porozite değerlerinin de azalmasına katkı sağladığı belirlenmiştir (Şekil 3.9c,d). MA ikamesinin  $n_{top}$  değişimine etkisi değerlendirildiğinde, MA ikame oranının (%5 ve %15) artması 28 ve 180 günlük  $n_{top}$  değerlerini azaltmıştır. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında, %5 ve %15 MA içeren ÇMD numuneleri 28 ve 180 günde sırasıyla %0,6-4,9 ve %0,7-5,1 arasında değişen oranlarda daha düşük  $n_{top}$  değerleri üreterek porozite miktarlarını %41,55 ve %40,52’ye düşürmüşlerdir (Şekil 3.9a,b). Özellikle %15 MA ikamesinin porozite gelişimine sağladığı katkı; MA’nın atık malzemeye kıyasla daha yüksek özgül yüzey alanına (Tablo 2.5) sahip olması ve daha fazla ince boyutlu tane (Şekil 2.7) içermesi sayesinde atık taneleri ile çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurarak karışımın su gereksinimini azaltması (su/çimento oranının azalması) ve böylece katı oranında artış sağlanması ( $74,70 > 73,70$ ) ile açıklanabilir (Tablo 2.8) (Erçikdi vd., 2013; Celik vd., 2014; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Yılmaz vd, 2017; Yılmaz vd., 2018). Önceki bir araştırmada, yazarlar iri taneli atık malzeme yerine %22,5 oranında öğütülmüş KT kullanımı ile 28 gün sonunda kontrol numunesine göre %4,0 daha düşük porozite değeri elde

etmişlerdir. Araştırmacılar porozite gelişimine karşı sağlanan olumlu katkıyı, KT'nin filler etkisi, inceliği ve su bırakma gibi yüzey özelliklerinin bulunmasına dayandırmışlardır (Zheng vd., 2016).



Şekil 3.9. MA ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi

Kontrol ve MA ikameli numunelerin porozite testine ait Tablo 3.2'de verilmiş olan teknik parametreler incelendiğinde, kür süresinin 28 günden 180 güne artması ile tüm numunelerde toplam porozite değerleri ile uyumlu olarak  $n_{Büyük}$  değerleri azalmış, buna karşın  $n_{Orta}$  değerlerinde genel olarak artış meydana gelmemiştir. MA ikame oranının  $n_{Büyük}$  ve  $n_{Orta}$  değerlerine olan etkisi değerlendirildiğinde, %5 MA ikamesinin  $n_{Büyük}$  değerinin kür süresinden bağımsız olarak kontrol numunesine kıyasla daha yüksek olduğu, buna karşın ikame oranının %15'e artırılmasıyla birlikte büyük boyutlu porozite oranının kontrol numunesinin altına düştüğü belirlenmiştir (Tablo 3.2). Bunlara ek olarak, kontrol numunesine kıyasla MA ikameli numunelerin  $n_{Orta}$  değerlerinde görülen düşüklük, dolgu



içerisinde bulunan gözeneklerin kapanması ve boyutunun küçülmesinden ziyade farklı boyuta sahip gözeneklerin ince boyutlu MA taneleri ile doldurularak kapanması sonucu toplam porozitenin düştüğünü göstermektedir. Bu durum, kontrol numunesine kıyasla MA içeren ÇMD numunelerinde meydana gelen düşük orandaki basınç dayanımı kazanımının (Şekil 3.6a) ve asit-sülfat oluşumuna karşı gösterdiği direncin (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8) diğer asit nötralizasyon malzemelerine kıyasla (YFC, C-UK vb.) nispeten düşük olmasını desteklemektedir (Tablo 3.2).

ÇMD numunelerinin eşik gözenek çapları ( $d_{eş}$ ) gelişimi üzerinde kür süresi değişiminin etkisi karşılaştırıldığında kontrol numunesinin  $d_{eş}$  boyutunun büyüdüğü, buna karşın %5-15 MA içeren numunelerin  $d_{eş}$  boyutunun küçüldüğü belirlenmiştir. Dahası,  $d_{eş}$  boyutuna karşılık gelen kademeli porozite değerlerinin de kür süresi artışıyla birlikte azaldığı ve MA ikamesinin kademeli porozitede meydana gelen azalmaya olumlu etkisinin olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 3.2). MA ikameli numunelerin sülfat konsantrasyonunun (Şekil 3.8a,b) kontrol numunesine kıyasla oldukça düşük seviyede olması; MA ikamesi sonucu numunelerin toplam porozitelerinin azalması ve eşik gözenek çaplarının küçülmesi sayesinde permabilitenin düşmesi ile sonuçlanan numune içerisine nem ve hava girişinin kısıtlanmasını ve böylece pirit oksidasyonunun azalarak sülfat atak mekanizmasının yavaşlamasını desteklemektedir (Mangane vd., 2018; Yılmaz vd., 2018).

Tablo 3.2. Kontrol ve MA ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler

Karışım Tipi	Kür Süresi (gün)	Toplam Porozite (%)	Kümülatif Porozite (%)		TEBD (MPa)	$d_{eş}$ ( $\mu$ m)	Kademeli Porozite (%)
			$n_{Orta}$	$n_{Büyük}$			
Kontrol	28	43,67	6,08	37,59	1,55	0,836	5,21
%5 MA		43,41	4,10	39,31	1,12	0,677	5,51
%15 MA		41,55	3,77	37,78	1,57	0,554	5,12
Kontrol	180	42,72	5,23	37,49	1,56	1,628	4,41
%5 MA		42,43	3,34	39,09	1,19	0,433	5,31
%15 MA		40,52	3,94	36,58	1,74	0,434	5,11

### 3.3. C-sınıfı Uçucu Külün (C-UK) ÇMD Performansına Etkisi

#### 3.3.1. Dayanım ve Duraylılığa Etkisi

Şekil 3.10, %8,5 oranında PÇ kullanılarak hazırlanan kontrol numuneleri ve iki farklı PÇ oranında (%7,5 ve %8,5) sülfürlü atık yerine %5, %10 ve %15 oranında ikame olarak C-

UK içeren ÇMD numunelerinin 7, 28, 90, 180 ve 360 gün sonundaki TEBD sonuçlarını göstermektedir.

Karışım özellikleri ve bağlayıcı oranından bağımsız olarak bütün ÇMD numunelerinde 90 güne kadar dayanım artışı meydana gelirken, daha sonra (>90 gün) tüm numunelerin TEBD değerlerinde azalma gözlemlenmiştir (Şekil 3.10a,b). Bağlayıcı oranının %7,5'ten %8,5'e artırılmasıyla birlikte ikame oranından bağımsız olarak ÇMD numunelerinin TEBD değerleri artmıştır. Ayrıca, sülfürlü maden atığı yerine yapılan C-UK ikamesinin oranı arttıkça, her iki bağlayıcı oranı ve tüm kür sürelerinde numunelerin basınç dayanımları artmıştır. ÇMD karışımında kullanılan farklı oranlardaki (%5, %10 ve %15) C-UK ikamesi, kontrol numunelerine kıyasla %8,5 bağlayıcı oranında 1,44-3,68 kat daha yüksek basınç dayanımı üretilmesini sağlarken, bağlayıcı oranı azaltıldığında (%7,5) bile dayanım artışı 1,18-3,16 kat arasında gerçekleşmiştir. Üstelik %7,5 bağlayıcı oranında, atık malzeme ile kıyaslandığında daha fazla ince tane (daha yüksek yüzey alanı) içeren C-UK'nın atık yerine %5-15 oranında ikame edilmesiyle dolgunun su/çimento oranı artmış (4,77-4,96>4,20) ve katı oranı (72,87-73,66<73,70) azalmıştır (Tablo 2.5 ve Tablo 2.8). Wang ve Park (2015) çimentolu malzemeler içerisinde kullanılan yüksek orandaki UK sonucunda beton numunelerinin su gereksiniminin azaldığını rapor etmesine rağmen bu çalışmada özellikle %7,5 bağlayıcı oranında %15 oranına kadar yapılan C-UK ikamesinin aynı akışkanlık ve bağlayıcı değerinde hazırlanan kontrol numunelerine kıyasla ÇMD karışımının su ihtiyacını kısmen arttırdığı belirlenmiştir. Bu çalışma ile benzer sonucun meydana geldiği diğer bir çalışmada ise araştırmacılar (Wongkeo vd., 2014) kendinden yerleşen betonda kullanılan UK miktarının artırılmasıyla beton numunelerinin su gereksiniminin artmasıyla sonuçlanan su emme miktarının arttığı ve kontrol numunelerine kıyasla daha fazla olduğu bildirilmiştir.

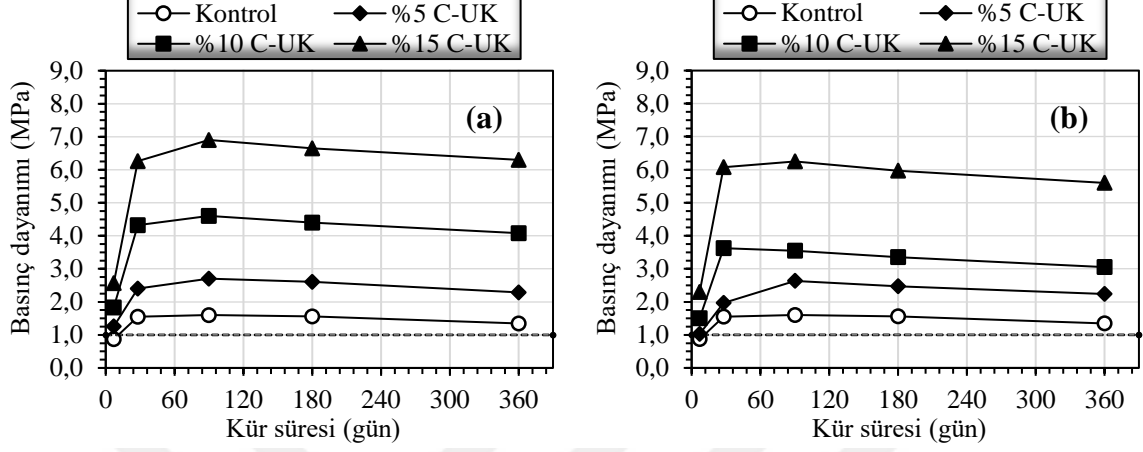
ÇMD uygulamasının kullanıldığı yeraltı maden işletmelerinde güvenli çalışma koşullarının tesis edilerek üretim döngüsünün sorunsuz devam etmesinin sağlanması amacıyla cevheri alınmış üretim açıklıklarına yerleştirilmiş olan dolgunun duraylılığını koruması ve dolgu yapılmış açıklıklara komşu olan bölgelerde gerçekleştirilecek üretim esnasında cevher seyrelmesinin meydana gelmemesi için 28-360 gün arasında istenen TEBD değerini ( $TEBD \geq 1,0$  MPa) bütün ÇMD numuneleri sağlarken, tavan (zemin) tahkimatı olarak kullanılabilmesi için gerekli dayanımı ( $TEBD \geq 5,0$  MPa) bağlayıcı oranından bağımsız olarak sadece %15 C-UK ikameli numuneler sağlamıştır (Şekil 3.10).

Bu bulgulara ek olarak, bağlayıcı oranının düşürülmesine rağmen hem kontrol numunesinden çok daha yüksek oranda TEBD kazanımı elde edilmiş hem de bağlayıcı

tüketiminde tasarruf sağlanmıştır. 1,0 m<sup>3</sup> dolgu karışımı üretiminde %8,5 bağlayıcı oranına sahip PÇ ile hazırlanan kontrol numunelerinde 130 kg çimento kullanılırken, %7,5 bağlayıcı oranında atık yerine %15 C-UK ikameli 1,0 m<sup>3</sup> ÇMD üretiminde 110,59 kg çimento kullanılmıştır (Ek Tablo 1). Böylece, çimento sarfiyatında gerçekleşen %14,93 oranındaki tasarruf ile ÇMD işletme giderlerinde önemli oranda düşüş sağlanacağı düşünülürse, C-UK'nın öğütme giderleri buradan karşılanabilir. Hatta üretilen ÇMD'nin sadece dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için 28-360 gün arasında  $\geq 1,0$  MPa dayanım sağlamasının yeterli olduğu düşünülürse, bağlayıcı tasarrufunun çok daha yüksek oranlara çıkartılabileceği öngörülmüştür. %7,5 bağlayıcı oranında C-UK ikame edilerek üretilen ÇMD numunelerinin daha yüksek su/çimento oranına sahip olmasına ve daha düşük miktarda çimento içermesine karşın, oldukça yüksek seviyede TEBD üretmeleri; C-UK'nın puzolanik özellik gösteren bir endüstriyel artık olmasından dolayı kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek ilave ikincil hidratasyon ürünü (C-S-H jelleri) üretilmesini sağlaması ve yüksek CaO oranına sahip olması sebebiyle bağlayıcılık özelliğinin de olmasıyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca, amorf yapıya sahip olan C-UK'nın atık malzemeden daha ince tane boyutuna ve dolayısıyla daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olması sebebiyle iri boyutlu atık taneleri arasındaki boşlukları doldurması ile sonuçlanan dolgu porozitesinin azalması ve/veya dolgu içerisindeki büyük boyutlu gözeneklerin küçülmesi ile açıklanabilir (Memon vd., 2002; Shaikh ve Supit, 2015; Erçikdi ve Yılmaz, 2019). Çalışmada kullanılan ve Afşin-Elbistan termik santralinden temin edilen C-UK'nın puzolanik etkinliğinin erken kür sürelerinde (<28 gün) düşük olduğu, buna karşın daha uzun kür süresi aralıklarında (>28 gün) nispeten daha etkili olduğu bildirilmiştir (Türker vd., 2009). Fakat Şekil 3.10'a bakıldığında, C-UK içeren ÇMD numunelerinin kısa dönem (7-28 gün) aralığında dayanım kazanımı bağlayıcı oranından bağımsız olarak %91,9-165,1 artış gösterirken, TEBD değerlerinde meydana gelen yükselişin devam ettiği 28-90 gün arasında ise numunelerin dayanımları %2,9-33,6 oranlarında artmıştır.

Atık malzeme içerisinde yer alan sülfürlü minerallerin (pirit vb.) hava ve nem varlığında oksidasyona uğrayarak asit ve sülfat oluşumunun meydana gelmesi ve bunun sonucunda ortamın pH'nın (<9) düşmesiyle hidratasyon ürünlerinin (C-S-H jelleri ve portlandit) zayıflaması ve çözünmesi ile ilişkilendirilen (Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2015; Cihangir ve Akyol, 2018; Yin vd., 2018) ÇMD'deki uzun dönem duraylılık problemleri değerlendirildiğinde, özellikle oldukça yüksek dayanım kazanımlarının ve bağlayıcı tasarrufunun sağlandığı %7,5 bağlayıcı oranında hazırlanan %15 C-UK ikameli

ÇMD numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %35 daha az (%10,32<%15,92) dayanım kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir (Ek Tablo 1) (Şekil 3.10).



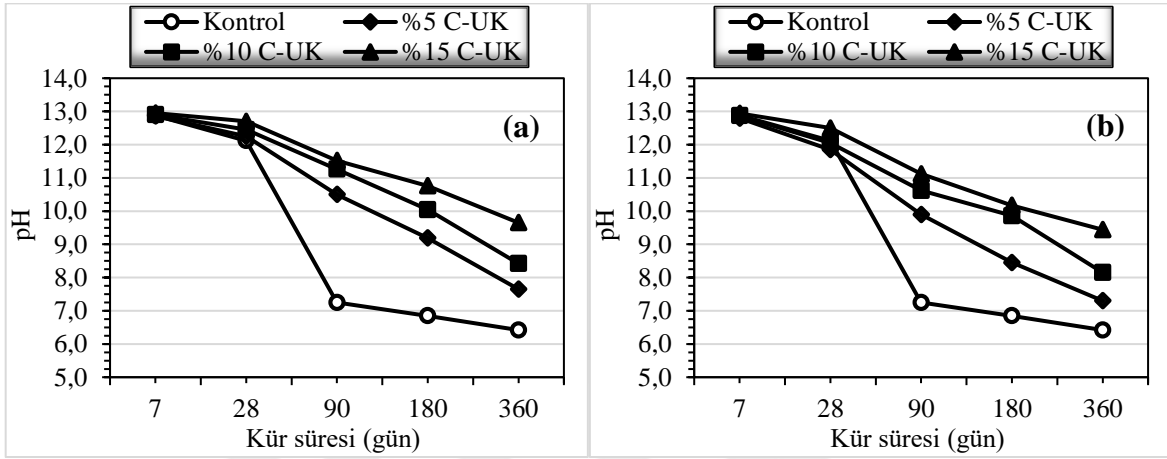
Şekil 3.10. C-UK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi

### 3.3.2. Asit (pH) ve Sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) Oluşumuna Etkisi

%8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranında, sülfürlü atık yerine %5-15 C-UK kullanılarak üretilen ÇMD numunelerinin 360 gün sonuna kadar ölçülen asit (pH) oluşumu ve sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) konsantrasyonları sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.13'te sunulmuştur.

Şekil 3.11, 360 günlük kür süresi sonuna kadar tüm ÇMD (kontrol ve C-UK ikameli) numunelerinin pH değerlerinin azaldığını göstermiştir. Bağlayıcının hidrasyon reaksiyonu sonucu üretilen kalsiyum hidroksit ( $Ca(OH)_2$ ) kaynaklı olarak 28 güne kadar tüm numunelerde asit oluşumu oldukça düşük seviyelerde (pH değerleri  $\geq 11,85$ ) bulunurken (Cihangir vd., 2015; Yılmaz vd., 2018), daha sonra kontrol numunelerinin asit oluşumu hızlı bir biçimde artış göstermiş ve 90 gün sonunda pH değeri 7,25 seviyesine düşmüştür. Buna karşın bağlayıcı oranından bağımsız olarak C-UK ikameli numunelerin 90 gün sonuna kadar asit oluşumu oldukça düşük seviyelerde seyretmiş ve alkali koşullar ( $pH \geq 9,90$ ) devam etmiştir (Şekil 3.11a,b). Kür süresinin artmasıyla birlikte kontrol ve C-UK ikameli ÇMD numunelerinin asit oluşumunda gözlemlenen artış, Ek Şekil 3a ve Ek Şekil 5a,b'de verilen XRD profillerinden görüldüğü üzere ÇMD'de oksidasyon sebebiyle pirit miktarının azalmasından kaynaklanabilir. Ayrıca bağlayıcı oranı arttığında, ikame oranından bağımsız olarak ÇMD numunelerinin pH değerlerinin nispeten daha yüksek seviyelerde seyrettiği

belirlenmiştir (Şekil 3.11a). Bu durum, karışım içerisinde kullanılan bağlayıcı miktarının artmasıyla hidrasyon ürünlerinin (portlandit ve C-S-H) miktarında artış meydana gelmesi ve böylelikle ÇMD'nin asit atağa karşı direnç kapasitesinin artmasıyla açıklanabilir (Cihangir vd., 2012).

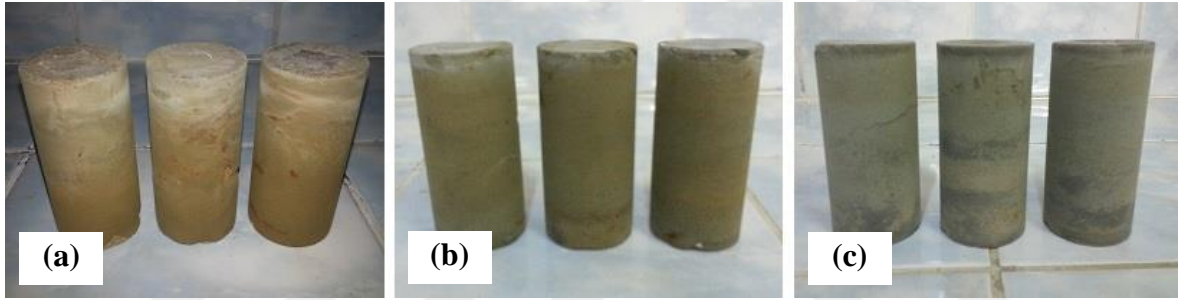


Şekil 3.11. C-UK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi

C-UK ikamesinin asit oluşumuna etkisi değerlendirildiğinde, dolgu karışımında kullanılan C-UK ikamesinin oranı arttıkça her iki bağlayıcı oranında numunelerin kontrol numunelerine kıyasla daha düşük miktarlarda asit ürettikleri belirlenmiştir. Kontrol ve C-UK ikameli ÇMD numunelerinin 360 günlük kür süresi sonundaki pH değerleri karşılaştırıldığında, kontrol numunesinin (%8,5 CEM I 42,5R) pH'nın 6,5'in altına düştüğü, buna karşın C-UK içeren numunelerin pH'nın %8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranında ve ikame oranına bağlı olarak 7,30-9,65 arasında seyrettiği açıkça görülmüştür (Şekil 3.11a,b). C-UK ikamesinin asit oluşumuna karşı sağladığı olumlu katkı, C-UK'nın puzolanik özellik gösteren bir endüstriyel artık olmasından dolayı kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek ilave ikincil hidrasyon ürünü (C-S-H jelleri) üretilmesini sağlaması ve yüksek CaO oranına sahip olması sebebiyle hem bağlayıcılık özelliğinin hem de asit nötralizasyon potansiyelinin bulunması ile ilişkilendirilebilir (Memon vd., 2002; Xenidis vd., 2002; Türker vd., 2009; Blissett ve Rowson, 2012; Shaikh ve Supit, 2015; Erçikdi ve Yılmaz, 2019).

Bu çalışmadaki bulgularla uyumlu olarak, AMD oluşumunun engellenmesi/azaltılması için UK'nın etkisini araştıran Jones ve Çetin (2017), pH değeri 2,0-4,0 arasında bulunan maden atığı içerisinde üç farklı (%0,7, %1,07 ve %12,5) CaO içeriğine

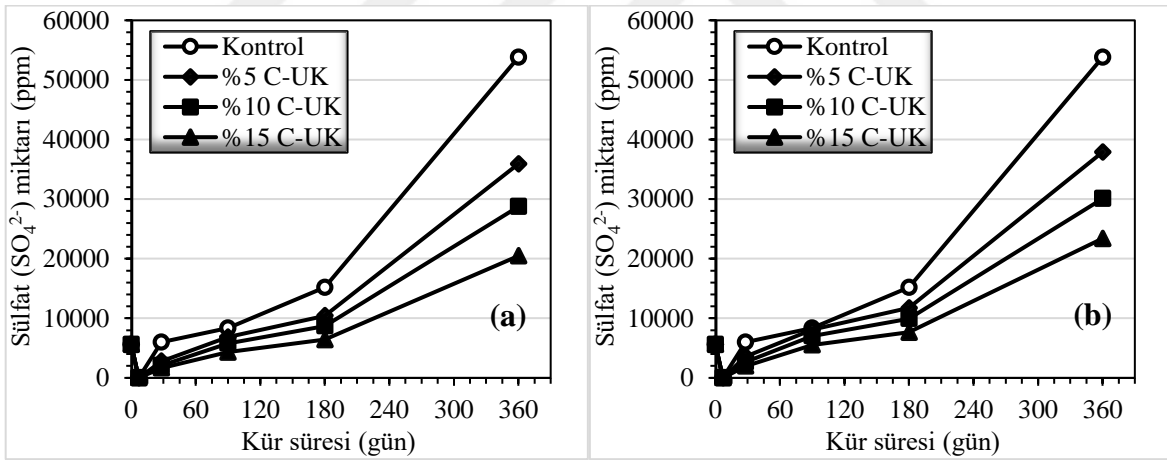
sahip UK ilave ederek hazırlamış oldukları karışımın pH değişimlerini ölçmüşler ve %12,5 CaO içerikli UK ilavesinin karışımın pH değerini oldukça alkali düzeye ( $\text{pH} > 9,0$ ) yükselttiğini rapor etmişlerdir. Bunu, daha yüksek CaO içeriğine sahip UK'nın bünyesinde bulunan alkali bileşenlerin çözünme miktarının artmasından dolayı asit nötralizasyon kapasitesinin daha fazla olmasıyla ilişkilendirmişlerdir (Vadapalli vd., 2008). Tüm bunlara ek olarak, C-UK ikamesinin asit oluşumuna karşı daha fazla direnç gösterdiğinin bir başka kanıtı olarak hava ve nem varlığında piritin ferrus iyon ve sonra ferrik iyon oksitlenmesi sonucu kontrol ÇMD numunelerinde oksidasyonun göstergesi olarak daha fazla miktarda sarı ve kahverengi izler bulunurken, özellikle %15 C-UK ikameli numunelerde oksidasyon kaynaklı izlerin oldukça az olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.12) (Dong vd., 2019).



Şekil 3.12. Kontrol (a), %5 C-UK (b) ve %15 C-UK (c) ikameli numunelerin 180 gün sonundaki görünüşleri

%8,5 bağlayıcı oranında tamamen (%100) sülfürlü atık ile hazırlanan kontrol numunelerinin ve %8,5-%7,5 bağlayıcı oranlarında atık malzemeye ikame olarak üç farklı oranda (%5, %10 ve %15) C-UK kullanılarak üretilen ÇMD numunelerinin 7, 28, 90, 180 ve 360 gün sonundaki sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) içerikleri değerlendirildiğinde (Şekil 3.13), atık içerisinde var olan  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonlarının C-S-H ve portlandit gibi hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girerek jips ve etrenjit gibi serbest sülfat iyonlarını tüketen yapılara muhtemel dönüşümünden dolayı 7 gün sonunda sülfat iyonu konsantrasyonuna rastlanmamıştır. Daha sonra (>7 gün) kür süresinin ilerlemesiyle birlikte (360 gün sonuna kadar) karışım özelliklerinden bağımsız olarak tüm ÇMD numunelerinin sülfat iyonu miktarları artmıştır. Ayrıca, dolgu karışımında kullanılan çimentonun hidrasyonu %100 olarak tamamlanmadığından 90 güne kadar sülfat iyonu salınımları nispeten düşük seviyede artış gösterirken, daha sonra (>90 gün) tüm numunelerde tespit edilen basınç dayanımı kayıplarıyla (Şekil 3.10) örtüşen şekilde sülfat iyonu salınımının daha hızlı arttığı

belirlenmiştir (Şekil 3.13). Özellikle uzun dönemde (90-360 gün) sülfat iyonu salınımının artması, kontrol ve C-UK ikameli numunelerin 28 ve 180 günlük XRD profillerinden belirlendiği üzere oksidasyon kaynaklı olarak pirit miktarının azalmasıyla ilişkilendirilebilir (Ek Şekil 3 ve Ek Şekil 5a,b). Bu çalışmada kullanılan bağlayıcı miktarına kıyasla daha yüksek oranda (%12,5) PÇ ile ÇMD numunelerini hazırlayan Dong vd. (2019), 90 güne kadar sülfat iyonu salınımının azaldığını, buna karşın daha sonra (>90 gün) sülfür içeriği ile orantılı bir biçimde sülfat iyonu salınımının 1800 ppm miktarına kadar arttığını rapor etmişlerdir. Bu çalışma ile kıyaslandığında, atık içerisindeki sülfür içeriğinin neredeyse aynı (%15 $\cong$ %15,82) olmasına rağmen sülfat konsantrasyonunun çok daha düşük olması, daha yüksek oranda bağlayıcı kullanımı (%12,5>%7,5-8,5) ile sonuçlanan hidrasyon ürünlerinin (portlandit ve C-S-H) miktarının daha fazla olması ve asit nötralizasyon potansiyelinin göstergesi olan CaO miktarının atık malzeme içerisinde oldukça yüksek seviyede (%30>%3,5) bulunması sonucu asit atağa karşı direnç kapasitesinin artmasına dayandırılabilir (Cihangir vd., 2012; Jones ve Çetin, 2017).



Şekil 3.13. C-UK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) konsantrasyonuna etkisi

Sülfürlü atık yerine yapılan C-UK ikamesinin sülfat iyonu oluşumuna etkisi incelendiğinde, 7 günden sonra ÇMD'de meydana gelen pirit oksidasyonunun göstergesi olarak sülfat iyonu salınımının artış göstermesiyle birlikte karışım içerisindeki C-UK oranının artmasıyla bağlayıcı oranından bağımsız olarak daha düşük miktarlarda  $SO_4^{2-}$  iyonu salınımının meydana geldiği açıkça görülmektedir (Şekil 3.13a,b) (Yılmaz vd., 2018). 360 gün sonunda kontrol ÇMD numunesinde 53790 ppm seviyelerinde sülfat iyonu salınırken,

bağlayıcı oranından bağımsız olarak özellikle %15 C-UK ikameli numunelerde meydana gelen sülfat iyonu salınımının kontrol numunelerine kıyasla %56,5-62,0 düşüşle 20500 ppm seviyelerine gerilemiştir. Bu durum, XRD profillerinden anlaşılacağı üzere (Ek Şekil 5); uzun dönemde piritin oksidasyonu sebebiyle dolgu bünyesinde salınan serbest sülfat iyonlarının C-UK içerisindeki CaO'nun çözünmesi sonucu oluşan  $Ca^{2+}$  iyonları ile reaksiyona girerek jips ve bassanit gibi serbest sülfat iyonlarını bağlayan minerallerin meydana gelmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, uzun dönemde (90-360 gün) %15 C-UK içeren numunelerin pH değerlerinin 11,50'den 9,40 seviyelerine düşmesi (kontrol pH değeri=6,42) ve kontrol numunelerine göre sülfat iyonu salınımı artış oranlarının %31-41 arasında daha düşük olması ile uyumlu olarak aynı kür süreleri arasında meydana gelen basınç dayanımındaki düşüşün sadece %8,8-10,3 (Ek Tablo 1) oranlarında gerçekleşmesi; dolgu karışımı içerisinde puzolanik özelliğinin yanı sıra yüksek CaO içeriği sebebiyle kısmen bağlayıcılık özelliği ve asit nötralizasyon potansiyeli bulunan C-UK kullanımı ile ÇMD numunelerinin daha duraylı kalabileceğini göstermiştir (Xenidis vd., 2002; Türker vd., 2009; Blissett ve Rowson, 2012; Erçıkıd ve Yılmaz, 2019).

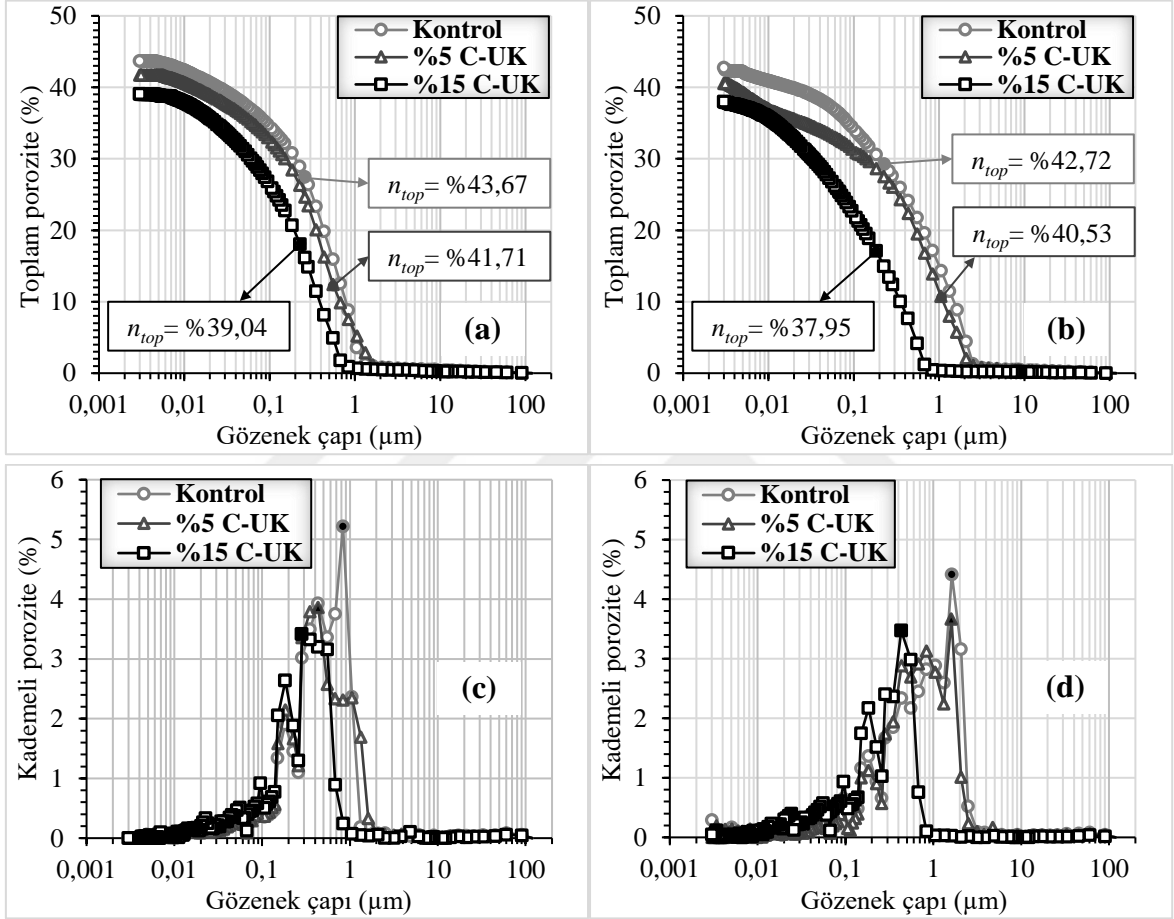
### 3.3.3. Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi

%8,5 bağlayıcı (PÇ) oranında sadece atık ile hazırlanan kontrol numunesi ve sülfürlü atık yerine ikame olarak %5-15 C-UK kullanılarak üretilen ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki toplam ( $n_{top}$ ) ve kademeli porozite gelişimleri Şekil 3.14'te verilmiştir.

Kür süresinin artması tüm ÇMD numunelerinin (kontrol ve %5-15 C-UK)  $n_{top}$  değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. Numunelerin 28 gün sonundaki  $n_{top}$  değerleri %43,67-39,04 arasında değişirken, kür süresinin 180 güne ulaşmasıyla numunelerin  $n_{top}$  değerleri 28 güne kıyasla %2,8'e kadar azalmış ve %42,72-37,95 arasında ölçülmüştür. Bu çalışmada gözlemlenen sonuçlarla uyumlu bulguların elde edildiği önceki çalışmalarda Yılmaz vd. (2011) karışım tipi ve drenaj koşullarından bağımsız olarak kür süresi 7 günden 28 güne arttığında, esas olarak daha iri boyutlu gözeneklerin çimentomsu yapılarla kısmen doldurulması ile gözeneklerde meydana gelen küçülme sonucu toplam porozitenin %44,8-38,6'dan %40,4-35,7 arasında değişen değerlere kadar azaldığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, kür süresinin artışıyla tüm numunelerin toplam porozite değerlerinde gerçekleşen azalmanın basınç dayanımında meydana gelen artışlar ile uyumlu olduğu belirlenmiştir (Tablo 3.3, Şekil 3.14a,b ve Şekil 3.10a,b). Benzer şekilde Mangane vd. (2018) kür süresinin 7 günden



28 ve 90 güne artmasıyla toplam porozite değerlerinin azaldığını ve basınç dayanımının arttığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar ÇMD'nin mekanik performansının drenaj, yerleşme/çökme, ikincil mineral çökmesi ve çimento hidratasyonu gibi birçok parametre tarafından etkilenen mikroyapı ile doğrudan bağlantılı olduğunu bildirmişlerdir (Benzaazoua vd., 2004; Belem vd., 2016; Mangane vd., 2018).



Şekil 3.14. C-UK ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi

C-UK ikamesinin toplam porozite gelişimine etkisi değerlendirildiğinde, Şekil 3.14'ten açıkça görüldüğü üzere; sülfürlü atık malzeme yerine %5-15 C-UK ikamesinin ÇMD'nin porozite gelişimine (toplam ve kademeli porozite) olumlu katkı sağladığı belirlenmiştir. Farklı oranlarda (%5 ve %15) C-UK ikamesi ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin  $n_{top}$  değerleri kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında; %5 C-UK numunesinin 28 ve 180 gün sonundaki  $n_{top}$  değerleri sırasıyla %4,5 ve %5,1 oranında düşerken, ikame oranının %15'e arttırılmasıyla aynı kür sürelerinde  $n_{top}$  değerleri %10,6 ve

%11,2 azalmıştır (Şekil 3.14a,b). Ayrıca, özellikle %15 C-UK ikamesinin kür süresinden bağımsız olarak ÇMD'nin gözenek çaplarını önemli ölçüde küçülttüğü tespit edilmiştir (Şekil 3.14c,d). C-UK'nın porozite gelişimine yaptığı gözle görülür katkı; puzolanik özellik gösteren endüstriyel bir artık olması ve yüksek CaO içeriğine sahip olması sebebiyle bağlayıcılık özelliğinin de olmasıyla kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek ilave hidrasyon ürünü (C-S-H jelleri) üretilmesini sağlaması ve böylece gözenekleri doldurması ve/veya küçülmesi ile açıklanabilir (Memon vd., 2002; Shaikh ve Supit, 2015; Erçikdi ve Yılmaz, 2019). Ayrıca, C-UK'nın atık malzemedeki daha ince tane boyutuna (Şekil 2.7) ve dolayısıyla daha yüksek özgül yüzey alanına (Tablo 2.5) sahip olması sebebiyle iri boyutlu atık taneleri arasındaki boşlukları doldurması sonucu aynı akışkanlık (19,05 cm) değerinde karışım içinde istenen su miktarının azalmasıyla sonuçlanan katı oranının artması ve su/çimento oranının azalması ile ilişkilendirilebilir (Tablo 2.8) (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Yılmaz vd., 2018).

Porozite analizleri gerçekleştirilen ÇMD numunelerine ait teknik parametreler Tablo 3.3'te sunulmuştur. Karışım tipinden bağımsız olarak, kür süresinin artması numunelerin  $n_{Büyük}$  değerlerinde azalmaya, gözeneklerin küçülmesine ve toplam porozitenin azalmasına işaret olarak gösterilebilen  $n_{Orta}$  değerlerinde ise genel olarak artışa sebep olmuştur. Kontrol numunesinin 28 ve 180 gündeki  $n_{Büyük}$  değerleri sırasıyla toplam porozitelerinin %86 ve %88'ini oluştururken, özellikle %15 C-UK içeren numunelerde bu değerler aynı kür sürelerinde sırasıyla %7,7 ve %17,0 azalarak  $n_{top}$  değerlerinin %80 ve %72'sini kapsamıştır. Benzer şekilde %15 C-UK ikameli ÇMD numunelerinin  $n_{Orta}$  değerlerinin de kontrol numunelerine kıyasla belirgin bir biçimde arttığı tespit edilmiştir (Tablo 3.3). Bu çalışmadaki bulgularla uyumlu sonuçların elde edildiği daha önceki bir çalışmada düşük sülfür içerikli (%5 S) atık malzemeye %10 ve %22,5 oranında öğütülmüş KT ikamesinin 28 günlük ÇMD numunelerinin büyük boyutlu porozite ( $n_{Büyük}$ ) (%16,3-15,6<%20,4) miktarlarını önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir (Zheng vd., 2016).  $n_{Büyük}$  ve  $n_{Orta}$  değerlerinde meydana gelen olumlu gelişimin toplam porozitenin azalması ve basınç dayanımının artması ile uyumlu bir ilişki göstermesi, puzolanik özelliğinin yanı sıra kısmen bağlayıcılık özelliği de bulunan C-UK'nın ilave hidrasyon ürünleri oluşturması ve daha ince tane boyutuna (daha yüksek yüzey alanına) sahip olmasından dolayı iri atık taneleri arasındaki boşlukların doldurulmasına (büyük boyutlu gözeneklerin kapanması) ve/veya küçülerek orta boyutlu gözeneğe dönüşmesine bağlanabilir (Memon vd., 2002; Shaikh ve Supit, 2015; Ghirian ve Fall, 2014; Erçikdi ve Yılmaz, 2019).

Eşik gözenek çapı ( $d_{eş}$ ) değerlerinin kür süresinin 28 günden 180 güne artmasıyla büyüdüğü belirlenmiştir. Fakat  $d_{eş}$  değerlerine karşılık gelen kademeli porozite değerlerinde kür süresi artışıyla birlikte azalma meydana gelmiştir. C-UK ikamesinin  $d_{eş}$  değerlerine olan etkisi değerlendirildiğinde, özellikle %15 C-UK ikamesinin 28 ve 180 gün sonundaki  $d_{eş}$  değerlerini kontrol numunesine kıyasla %66 ve %73 oranlarında küçülttüğü tespit edilmiştir (Tablo 3.3). Özellikle %15 C-UK ikamesi orta boyutlu gözenek miktarını artırıp büyük boyutlu gözenek miktarını ve  $d_{eş}$  değerini azaltmak suretiyle gözenek yapısını iyileştirmiş ve böylece kontrol numunesine kıyasla en düşük toplam porozite değerine sahip olmuştur. C-UK ikameli numunelerin basınç dayanımının kontrol numunesine kıyasla oldukça yüksek seviyede olması (Şekil 3.10),  $SO_4^{2-}$  konsantrasyonunun oldukça düşük seviyede olması (Şekil 3.13) ve dayanım kaybının daha az olması (Ek Tablo 1) ile oldukça uyumlu gerçekleşen bu bulgular ( $n_{top}$ ,  $n_{Büyük}$ ,  $n_{Orta}$  ve  $d_{eş}$ ) (Şekil 3.14 ve Tablo 3.3), akışkanın sızma/süzülme oranının muhtemel düşmesinden ve numune içerisine nem ve oksijen girişinin kısıtlanarak pirit oksidasyonunun azalmasından dolayı agresif çevrelere (sülfat atak vb.) karşı daha yüksek performans gösteren duraylı ÇMD üretilebileceğini göstermiştir (Cihangir ve Akyol, 2018; Mangane vd., 2018; Yılmaz vd., 2018).

Tablo 3.3. Kontrol ve C-UK ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler

Karışım Tipi	Kür Süresi (gün)	Toplam Porozite (%)	Kümülatif Porozite (%)		TEBD (MPa)	$d_{eş}$ ( $\mu$ m)	Kademeli Porozite (%)
			$n_{Orta}$	$n_{Büyük}$			
Kontrol		43,67	6,08	37,59	1,55	0,836	5,21
%5 C-UK	28	41,71	5,85	35,86	2,41	0,434	3,86
%15 C-UK		39,04	8,01	31,03	6,27	0,283	3,41
Kontrol		42,72	5,23	37,49	1,56	1,628	4,41
%5 C-UK	180	40,53	7,08	33,45	2,61	1,611	3,66
%15 C-UK		37,95	10,64	27,31	6,65	0,433	3,47

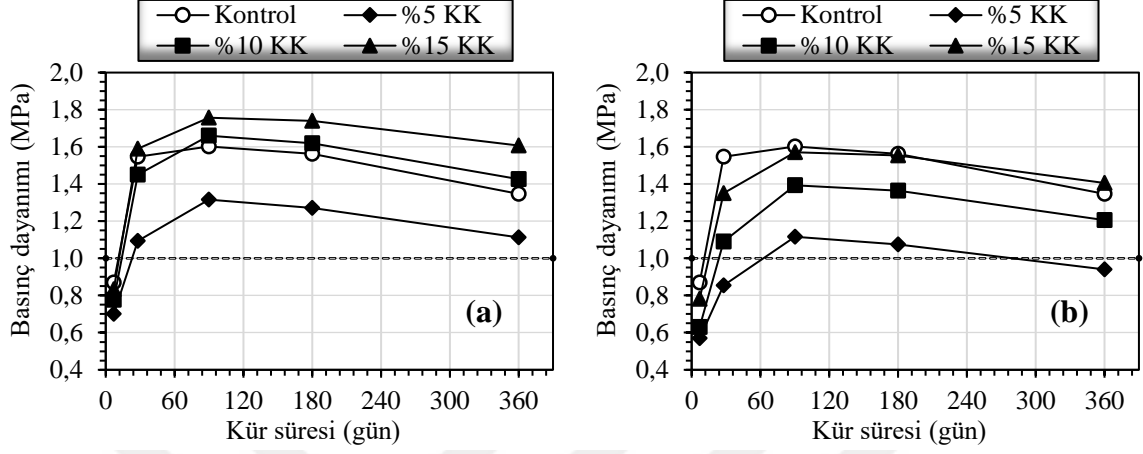
### 3.4. Kalsitik Kireçtaşının (KK) ÇMD Performansına Etkisi

#### 3.4.1. Dayanım ve Duraylılığa Etkisi

%8,5 bağlayıcı oranında PÇ ile hazırlanan kontrol numuneleri ve %7,5-8,5 PÇ oranında sülfürlü atık yerine %5-15 oranında ikame olarak KK içeren ÇMD numunelerinin 7-360 günlük kür süresi aralığındaki tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) sonuçları Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

Tüm bağlayıcı oranı ve karışım özelliklerinde 7-90 günlük kür süresi boyunca bütün ÇMD numunelerinin basınç dayanımları artarken, daha sonraki kür süreleri (90-360 gün) boyunca numunelerin basınç dayanımlarının düştüğü belirlenmiştir. Sülfür içeriği yüksek (%15,82 S) olan pirit atık yerine ikame olarak kullanılan KK'nın basınç dayanımına yaptığı etkiye bakıldığında, tüm bağlayıcı oranı ve kür sürelerinde KK ikame oranının artması ÇMD numunelerinin TEBD değerlerini arttırmıştır. Ayrıca, %8,5 bağlayıcı oranına sahip %10 KK içeren ÇMD numuneleri özellikle 90 günden itibaren ve %15 KK ikameli numuneler tüm kür sürelerinde kontrol numunelerinden daha yüksek basınç dayanımı üretmişlerdir (Şekil 3.15a). Bu durum, aynı akışkanlık değerinde hazırlanan karışım içerisine KK ikame edilmesiyle iri atık taneleri arasının ince KK taneleri ile doldurularak karışımın su ihtiyacının azalmasıyla sonuçlanan daha yüksek katı oranına ve daha düşük su/çimento oranına sahip daha kompakt bir dolgu yapısının oluşturulması ile ilişkilendirilebilir (Tablo 2.8) (Ercikdi vd., 2013; Yılmaz vd., 2018). Bunlara ek olarak, öğütülmüş kireçtaşının nükleasyon (çekirdeklenme) bölgesi oluşturarak bağlayıcı hidrasyonunu hızlandırması ve yeni hidrasyon ürünleri oluşturması basınç dayanımı gelişiminin sebebi olarak gösterilebilir (Moon vd., 2017). Buna karşın, %7,5 bağlayıcı oranında hazırlanan sadece %15 KK ikameli ÇMD numunelerinin basınç dayanımının 90 günde kontrol numunelerini yakaladığı ve 360 gün sonunda geçtiği görülürken, daha düşük ikame oranına sahip numunelerin kontrol numunelerine kıyasla düşük seyrettiği belirlenmiştir (Şekil 3.15b). Hidrasyon sürecinin büyük bölümü tamamlandıktan sonra özellikle uzun dönemde (90-360 gün) yaşanan asit oluşumu ve sülfat atak kaynaklı dayanım kayıpları değerlendirildiğinde, %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan %10 ve %15 KK ikameli numunelerde sırasıyla %14,04 ve %8,48 oranlarında dayanım düşmesi meydana gelirken, kontrol numunelerinde bu oran %15,92 seviyesinde gerçekleşmiştir. Dahası, %7,5 bağlayıcı oranında %15 MA ile hazırlanan ÇMD numunelerinin basınç dayanımlarının kontrol numuneleri ile yaklaşık aynı seviyelerde bulunmasına karşın, daha düşük ( $10,57 < 15,92$ ) dayanım kaybı tespit edilmiştir (Şekil 3.15a,b) (Ek Tablo 1). ÇMD karışımında, sülfürlü atık yerine özellikle %15 oranında KK ikame edilmesinin dayanım ve duraylılığa yaptığı pozitif etki, ÇMD'de içsel olarak gerçekleşen oksidasyon kaynaklı asit oluşumuna karşı CaO içeriği %55,26 olan KK'nın yüksek nötralizasyon kabiliyeti göstermesi ile açıklanabilir (Ercikdi vd., 2015; Jones ve Cetin, 2017). Bununla birlikte, özellikle %8,5 bağlayıcı oranında %10 ve %15 KK ikamesi sonucu meydana gelen daha düşük dayanım kaybı, filler etkisi olarak nitelenen ince tanelerin

daha iri taneler arasını doldurarak daha kompakt (düşük poroziteli) dolgu yapısının oluşturulmasına bağlanabilir (Celik vd., 2014; Yılmaz vd., 2017).



Şekil 3.15. KK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi

KK ikameli ÇMD karışımlarında kullanılan çimento oranının %7,5'e düşürülmesine rağmen uzun dönemde daha düşük dayanım kaybı tespit edilen %15 KK içeren numunelerin kontrol numunelerine kıyasla oldukça yakın basınç dayanımı üretmesi sonucu çimento tasarrufu sağlanmıştır. Ek Tablo 1 incelediğinde %8,5 bağlayıcı oranına sahip kontrol numunelerinde 130 kg çimento kullanılırken, %7,5 PÇ oranında %15 KK ikameli 1,0 m<sup>3</sup> ÇMD üretiminde 110,43 kg çimento kullanılmış ve çimento sarfiyatında %15,05 oranında tasarruf gerçekleştirilmiştir. Çimento sarfiyatında ortaya çıkması muhtemel tasarruf sayesinde KK numunesinin boyut küçültme masraflarının bertaraf edilebileceği öngörülmüştür.

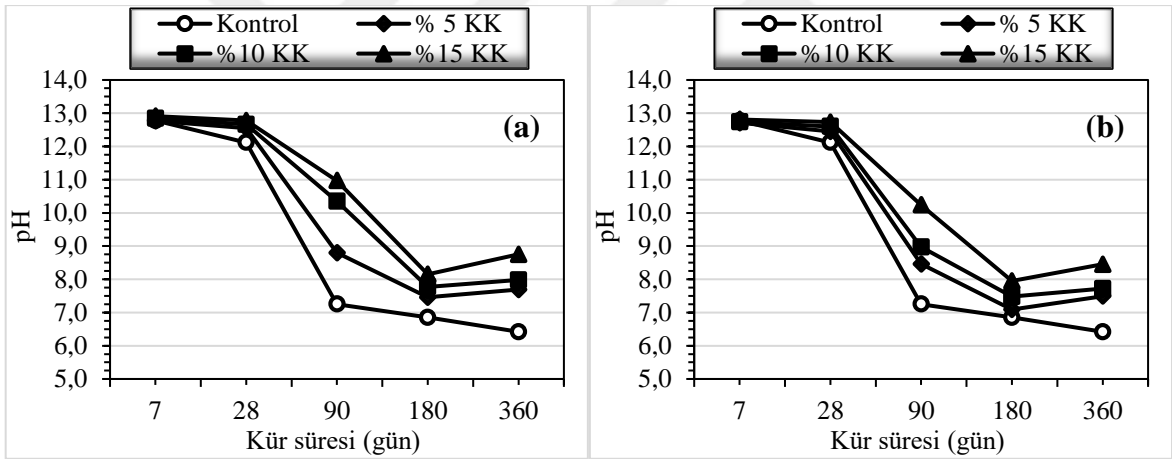
ÇMD uygulamasının kullanıldığı yeraltı maden işletmelerinde, çalışanların güvenli çalışma koşullarının sağlanarak üretim döngüsünün sorunsuz devam etmesi ve dolgu yapılmış bölge yakınında gerçekleştirilecek üretim esnasında cevher seyrelmesinin meydana gelmemesi amacıyla cevher üretiminin yapıldığı bölgelere komşu olan cevheri alınmış üretim boşluklarına yerleştirilen dolgunun kısa dönemde istenen basınç dayanımını sağlaması ve uzun dönemde duraylılığını koruyabilmesi için gerekli olan basınç dayanımı (28-360 gün arasında  $\geq 1,0$  MPa) değerini %8,5 bağlayıcı oranında tüm ÇMD numuneleri üretirken, %7,5 çimento oranında sadece %5 KK içeren numuneler sağlayamamıştır (Şekil 3.15a,b).

### 3.4.2. Asit (pH) ve Sülfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) Oluşumuna Etkisi

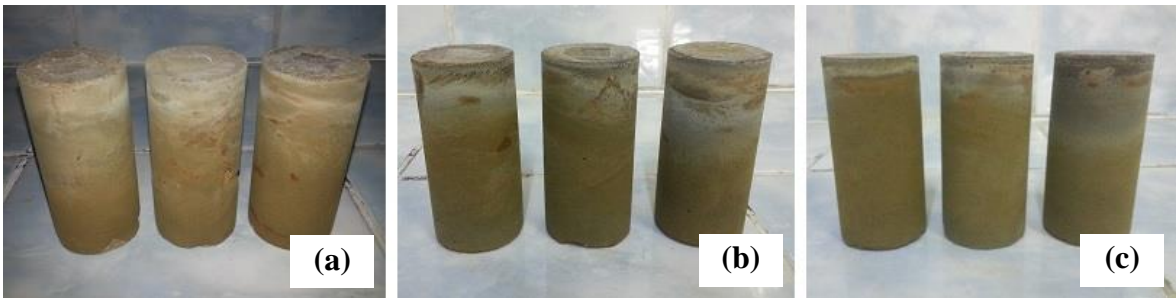
%8,5 PÇ oranında tamamen sülfürlü atık ile hazırlanan kontrol numunelerinin ve %7,5-8,5 bağlayıcı oranında atık yerine %5-15 KK ikame edilerek üretilen numunelerin 7-360 gün aralığındaki asit ve sülfat oluşumu sırasıyla Şekil 3.16 ve Şekil 3.18’de verilmiştir.

7-360 gün arasında tüm ÇMD (kontrol ve KK ikameli) numunelerinin asit oluşumunun arttığı açıkça görülmektedir. Ayrıca bağlayıcının hidrasyon sürecinin devam etmesi sonucu Ca(OH)<sub>2</sub> üretilmesi kaynaklı olarak 28 günlük kür süresi sonuna kadar tüm numunelerde oldukça düşük miktarda asit oluşumunun meydana geldiği belirlenmiştir (Cihangir vd., 2015; Yılmaz vd., 2018). 28-90 gün arasında kontrol ÇMD numunelerinin asit oluşumu keskin bir biçimde hızlanırken (90 günde pH= 7,25), KK ikameli numunelerin asit oluşumu daha yavaş artmış ve hâlâ alkali koşullarda (pH≥8,45) kalmayı başarmıştır. 90 gün sonunda pH değeri 7,25 olan kontrol numunelerinin pH değerlerinde düşüş seyri devam etmiş ve 360 gün sonunda asidik seviyeye ulaşmıştır. Buna karşın, bağlayıcı ve ikame oranından bağımsız olarak KK içeren ÇMD numunelerinin pH değerlerinde düşme 180 güne kadar devam etmiş ve sonrasında tekrar artmaya başlamıştır (Şekil 3.16a,b). Kontrol ve KK içeren numunelerde gerçekleşen asit oluşumunun sebebi olarak 28 günden 180 güne gelinceye kadar meydana gelen oksidasyon kaynaklı pirit miktarının azalması gösterilebilir (Ek Şekil 3a ve Ek Şekil 6a,b). KK ikamesinin ÇMD’nin pH değişimine etkisi değerlendirildiğinde, ikame oranının artmasıyla birlikte %8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranında hazırlanan numunelerin tüm kür sürelerinde pH değerlerinin nispeten daha yavaş azaldığı ve hatta 180-360 gün arasında tekrar artma eğilimi göstererek 8,45-8,75 seviyelerine kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Bu çalışmadaki bulgularla benzer sonuçların tespit edildiği çalışmada, araştırmacılar (Mylona vd., 2000) pH değerleri oldukça asidik seviyelerde (2,0±0,7) bulunan oksitlenmiş pirit konsantresi (%42,6 S<sup>2-</sup>) içerisine %29’a kadar kireçtaşı ilave ederek 270 gün boyunca gerçekleştirdikleri kolon testi sonucunda pH değerlerinin 250 gün boyunca alkali seviyede seyrettiğini ve ortalama 7,8-8,0 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, %17 kireçtaşı ilavesi yapılan pirit-kireçtaşı karışımının permabilitesinin kontrol numunesine göre 10 kat azaldığı ve karbonat minerallerinin çözünmesi sonucunda ortamda jips mineralinin oluştuğu belirtilmiştir (Mylona vd., 2000). Benzer sonuçlar doğrultusunda, kontrol numunelerine kıyasla pH değerlerinin daha yüksek seviyelerde seyretmesi asit nötralize etme kapasitesine sahip olan kireçtaşı içerisinde %95 seviyelerinde bulunan kalsitin (CaCO<sub>3</sub>) çözünmesi sonucu dolgu bünyesine OH<sup>-</sup> iyonu

salınımı ile açıklanabilir (Ek Şekil 6a,b) (Fernandez-Caliani ve Barba-Brioso, 2010; Ercikdi vd., 2015). Bunlara ek olarak, KK içeren ÇMD’de asit oluşumunun nispeten daha düşük seviyelerde kalmasına gerekçe olarak; eklenen kireçtaşının karboalüminat gibi ilave hidrasyon ürünlerinin oluşumuna katkı sağlaması (Ramezaniyanpour ve Hooton, 2014; Moon vd., 2017) ve Dong vd.’nin (2019) çalışmasında elde ettiği bulgularla uyumlu olarak oksidasyon sebebiyle 180 günlük kür süresi sonunda ÇMD numunelerinin yüzeylerinde sarıdan kahverengiye doğru koyulaşan izlerin kontrol numunelerine kıyasla özellikle %15 KK ikameli numunelerde nispeten daha az olması gösterilebilir (Şekil 3.17). Dahası, bağlayıcı oranı arttığında tüm KK içeren numunelerin asit oluşumunun nispeten azaldığı gözlenmiştir (Şekil 3.16a) ve bu durum; bağlayıcı bileşenlerde ve ÇMD’nin asit atağa karşı direnç kapasitesinde artış ile sonuçlanan hidrasyon ürünlerinin (portlandit ve C-S-H) miktarındaki artışa dayandırılabilir (Cihangir vd., 2012).

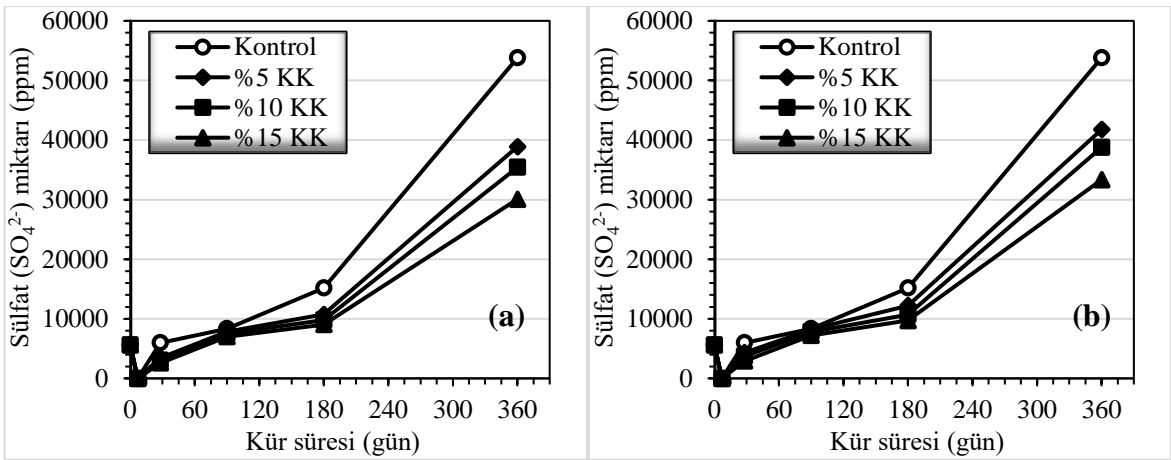


Şekil 3.16. KK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD’nin asit (pH) oluşumuna etkisi



Şekil 3.17. Kontrol (a), %5 KK (b) ve %15 KK (c) ikameli numunelerin 180 gün sonundaki görünüşleri

Şekil 3.18, kontrol ve KK ikameli ÇMD numunelerinin 7-360 gün aralığındaki sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) içeriklerini göstermektedir. Kontrol numunelerinde ve diğer 3 ANM’de (YFC, MA, C-UK) olduğu gibi KK ikameli numunelerde de sülfürlü atık içerisinde başlangıçta bulunan sülfat iyonlarının C-S-H ve portlandit gibi hidratasyon ürünleri ile reaksiyona girmesi sonucu jips ve etrenjit gibi serbest sülfat iyonlarını tüketen yapılara dönüşümü dolayısıyla 7 gün sonunda sülfat iyonuna rastlanmamıştır. Daha sonra (>7 gün), tüm ÇMD numunelerinin sülfat konsantrasyonları 360 gün sonuna kadar artmıştır. Ayrıca 90 güne kadar sülfat iyonu salınımları nispeten yavaş bir şekilde artarken, tüm numunelerde TEBD kayıplarının başladığı 90 günden sonra ise sülfat iyonu salınımının daha hızlı arttığı tespit edilmiştir (Şekil 3.18). Nispeten daha hızlı artan  $\text{SO}_4^{2-}$  konsantrasyonu, hava ve nem varlığında oksidasyona uğrayarak asit ve sülfat oluşumuna sebep olan piritin dolgu içerisindeki miktarlarının 28-180 gün arasında azalmasıyla açıklanabilir (Ek Şekil 3a ve Ek Şekil 6a,b). Dong vd. (2019) kurşun-çinko atığı ile hazırladıkları %2-15 sülfür içerikli ÇMD numunelerinin 90 güne kadar sülfat iyonu salınımının azaldığını, buna karşın daha sonra (>90 gün) sülfür içeriği ile orantılı bir biçimde sülfat iyonu salınımının 1800 ppm miktarına kadar arttığını bildirmişlerdir. Dolgu içerisindeki sülfür miktarı benzer (%15 $\cong$ %15,82) olmasına karşın sülfat içeriğinin çok daha düşük olması; daha yüksek oranda bağlayıcı kullanımı (%12,5>%7,5-8,5) sebebiyle dolgu bünyesinde üretilen hidratasyon ürünlerinin (portlandit ve C-S-H) miktarının daha fazla olması (Cihangir vd., 2012) ve kullanılan kurşun-çinko atığının oldukça yüksek oranda (%30>%3,5) CaO içeriğine sahip olmasıyla sonuçlanan asit nötralizasyon potansiyelinin artmasıyla açıklanabilir (Jones ve Çetin, 2017).



Şekil 3.18. KK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) konsantrasyonuna etkisi



KK ikamesinin  $SO_4^{2-}$  iyonu oluşumuna etkisi incelendiğinde, dolgu karışımı içerisinde KK ikame oranının artmasıyla birlikte tüm ÇMD numunelerinin kür süresinden bağımsız olarak sülfat iyonu salınımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında, ikame oranının artmasıyla orantılı olarak 360 gün sonunda KK içeren numunelerde %22-44 oranında bir azalma meydana gelmiş ve bağlayıcı oranından bağımsız olarak özellikle %15 KK ikameli numunelerde oluşan sülfat miktarları 30000 ppm seviyelerinde kalmıştır (Şekil 3.18a,b). Buna ek olarak, kontrol (pH= 6,42) numuneleriyle kıyaslandığında 360 gün sonunda %15 KK ikameli ÇMD numunelerinin pH değerlerinin alkali seviyelerde ( $pH \geq 8,45$ ) seyretmesi ve 90-360 gün arasındaki sülfat iyonu artış oranlarının %25-39 arasında daha düşük olması ile uyumlu olarak aynı kür süreleri arasında meydana gelen basınç dayanımındaki düşüşün sadece %8,5-10,5 oranlarında (Ek Tablo 1) gerçekleşmesi; oksidasyon sebebiyle meydana gelen asit oluşumuna karşı CaO içeriği %55,26 olan KK'nın yüksek nötralizasyon potansiyeline sahip olması (Tablo 2.7) (Ercikdi vd., 2015; Jones ve Cetin, 2017) ve filler etkisi olarak nitelenen ince KK tanelerinin daha iri atık taneleri arasını doldurarak daha kompakt (düşük poroziteli) bir dolgu yapısının oluşturulması ile açıklanabilir (Celik vd., 2014; Yılmaz vd., 2017; Erçikdi ve Yılmaz, 2019).

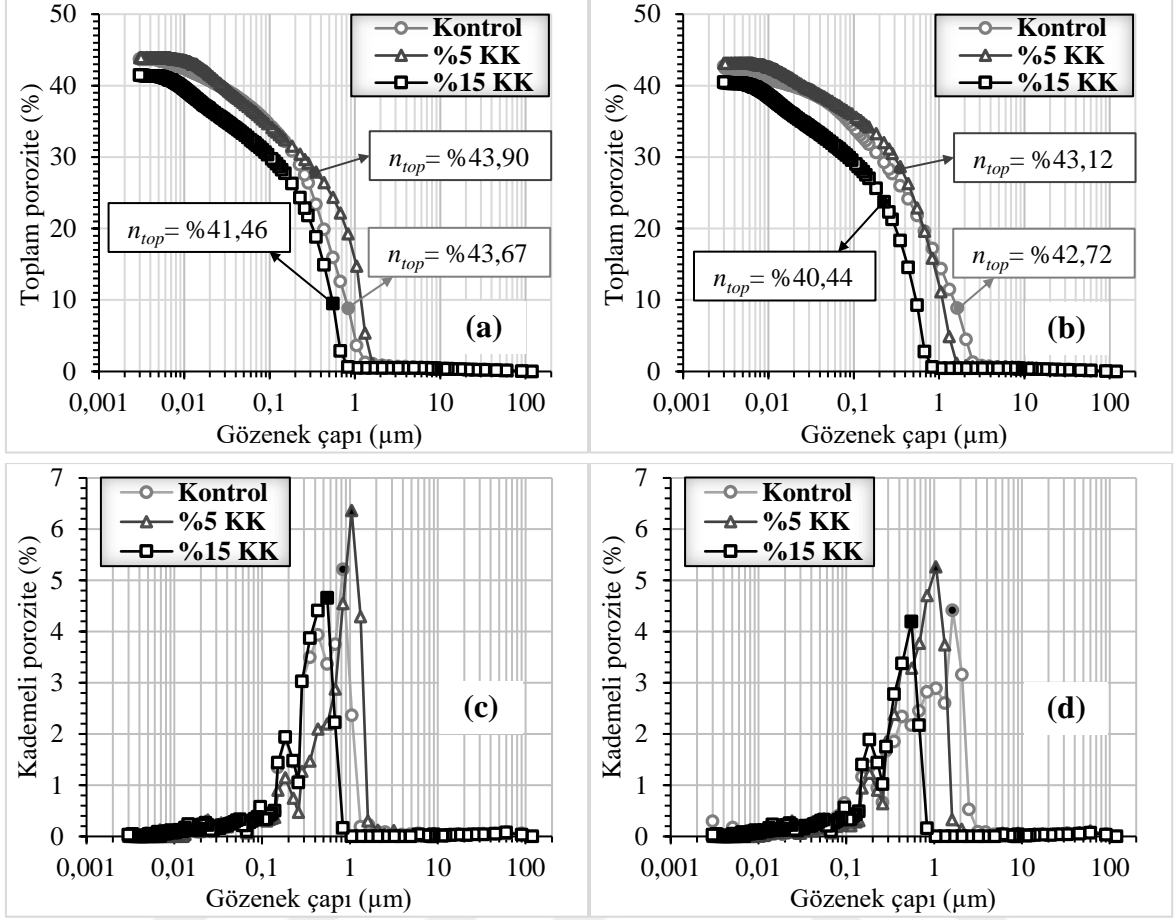
### 3.4.3. Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi

%8,5 bağlayıcı (PÇ) oranında tamamen sülfürlü (%15,82) maden atığı ile hazırlanan kontrol numunesi ve atık yerine %5 ve %15 KK ikame edilerek üretilen ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki toplam ( $n_{top}$ ) ve kademeli porozite gelişimleri Şekil 3.19'da verilmiştir.

Kür süresinin artması ile tüm ÇMD numunelerinin (kontrol ve %5-15 KK)  $n_{top}$  değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Numunelerin 28 gün sonundaki  $n_{top}$  değerleri %43,90-41,46 arasında değişirken, kür süresinin 180 güne ulaşmasıyla numunelerin  $n_{top}$  değerleri 28 güne kıyasla %2,5'e kadar azalmış ve %43,12-40,44 arasında ölçülmüştür (Şekil 3.19a,b). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile uyumlu olarak önceki araştırmacılar (Ghirian ve Fall, 2014; Yılmaz vd., 2014; Mangane vd., 2018) farklı kür sürelerinde (7-150 gün, 7-28 gün ve 7-90 gün) gerçekleştirdikleri porozite testleri sonucunda, kür süresi artışının poroziteyi azalttığını bildirmişlerdir. Ayrıca, tüm numunelerin kademeli porozite değerleri kür süresi artışıyla azalmıştır (Şekil 3.19c,d). Kür süresinin artışıyla kontrol ve %5-15 KK ikameli numunelerin toplam porozite değerlerinde meydana gelen düşüşün basınç

dayanımında meydana gelen artışlar ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.4, Şekil 3.19a ve Şekil 3.15a,b). Benzer ilişkilerin elde edildiği önceki çalışmalarda Yılmaz vd. (2011) ve Mangane vd. (2018) kür süresinin artmasıyla toplam porozite değerlerinin azaldığını ve ÇMD'nin mekanik performansının mikroyapı ile doğrudan bağlantılı olduğunu belirterek basınç dayanımının porozite düşüşüyle arttığını tespit etmişlerdir. KK ikamesinin toplam porozite değişimine etkisi incelendiğinde, kür süresinden bağımsız olarak %5 KK ikameli numunelerin  $n_{top}$  değerlerinin kontrol numunesine kıyasla daha yüksek olduğu, buna karşın KK ikame oranı %15'e çıkarıldığında numunelerin  $n_{top}$  değerleri 28 ve 180 gün sonunda sırasıyla %5,06 ve %5,34 azalarak %41,46 ve %40,44'e düşmüştür (Şekil 3.19a,b). Benzer şekilde %5 KK ikamesi 28 gündeki kademeli porozite değerlerinde azalma sağlayamazken, 180 günde gözeneklerde küçülme ve/veya azalma meydana getirmiştir. %15 KK ikamesinin ise kademeli porozite gelişimine kür süresinden bağımsız olarak gözle görülür şekilde olumlu katkı sağladığı belirlenmiştir (Şekil 3.19c,d). Sülfürlü atık yerine özellikle %15 oranında ikame edilen KK'nın porozite gelişimine sağladığı olumlu etki; KK'nın atık malzemeye kıyasla nispeten daha yüksek özgül yüzey alanına ( $5665 \text{ cm}^2/\text{g} > 4440 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) ve daha ince tane boyutuna (Şekil 2.7) sahip olmasından dolayı atık taneleri ile çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurması (filler etkisi) sonucu aynı akışkanlık (19,05 cm) değerinde karışım içinde istenen su miktarının azalmasıyla sonuçlanan katı oranının artması ( $\%74,02 > \%73,70$ ) ve su/çimento oranının azalması ( $4,13 < 4,20$ ) ile açıklanabilir (Tablo 2.8) (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Ercikdi, 2016; Yılmaz vd., 2018).

Bu çalışma ile uyumlu porozite gelişimlerinin gözlemlendiği iki farklı araştırmanın ilkinde Moon vd. (2017) kireçtaşı tozu (KT) ikame oranının artmasıyla karışım tipinden bağımsız olarak beton numunelerin porozitelerinin arttığını, buna karşın tüm karışım tiplerinde %15 KT içeren numunelerin porozitelerinin kontrol numunelerine kıyasla %3,78-8,65 oranlarında daha düşük ölçüldüğünü bildirmişler ve bu durumu, karışım içerisine eklenen KT miktarının belirli bir değere (%15 vb.) ulaşmasıyla karboalüminat gibi yeni hidratasyon ürünlerinin oluşması ve böylece toplam çimento porozitesinin azalması ile açıklamışlardır (Ramezaniyanpour ve Hooton, 2014). Diğer çalışmada ise yazarlar, iri taneli atık malzemeye ikame olarak %22,5 oranında KT kullanımının, ÇMD'nin toplam porozitesini kontrol numunesine kıyasla özellikle 28 gün sonunda %4,0 azalttığını tespit etmişler ve bu olumlu gelişimin sebebi olarak KT'nin boşlukları doldurma (filler) etkisini, inceliğini ve su bırakma gibi yüzey özelliklerini göstermişlerdir (Zheng vd., 2016).



Şekil 3.19. KK ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi

Tablo 3.4, porozite testleri yapılan ÇMD numunelerine ait gözenek boyut dağılımı,  $n_{büyük}$ ,  $n_{orta}$ ,  $d_{eş}$  gibi teknik parametreleri göstermektedir.

Kür süresinin artması %5 KK ikameli macun dolgu numunesi haricindeki numunelerin büyük boyutlu porozite ( $n_{Büyük}$ ) değerlerinde azalmaya sebep olurken, gözeneklerin küçülmesine ve toplam porozitenin azalmasına işaret olarak gösterilebilen orta boyutlu porozite ( $n_{Orta}$ ) değerlerinde ise genel olarak azalma meydana gelmiştir. Kontrol numunesinin 28 ve 180 gündeki  $n_{Büyük}$  değerleri sırasıyla toplam porozitelerinin %86 ve %88'ini oluştururken, özellikle %15 KK içeren numunelerde bu değerler aynı kür sürelerinde sırasıyla %7,4 ve %9,2 azalarak  $n_{top}$  değerlerinin %79,7'sini kapsamıştır. Benzer şekilde %15 KK ikameli ÇMD numunelerinin  $n_{orta}$  değerlerinin kontrol numunelerine kıyasla %38,7 ve %57,2 arttığı belirlenmiştir (Tablo 3.4). %15 KK ikamesinin ÇMD'nin toplam porozitesinin azalması ile sonuçlanan  $n_{Büyük}$  değerlerinin azalması ve  $n_{orta}$  değerlerinin artmasına yaptığı katkı, atık malzeme ile karşılaştırıldığında daha yüksek yüzey alanına ve

daha ince tane boyutuna sahip olan KK'nın iri atık taneleri arasındaki boşlukları doldurması sonucu büyük boyutlu gözeneklerin kapanması ve/veya küçülerek orta boyutlu gözeneğe dönüşmesi ile ilişkilendirilebilir (Zheng vd., 2016; Yılmaz vd., 2018). Bu çalışmada belirlenen bulgularla uyumlu olarak Zheng vd. (2016) %5 sülfür içerikli atık malzeme yerine ikame olarak %10 ve %22,5 oranında öğütülmüş KT kullanımının 28 günlük ÇMD numunelerinin büyük boyutlu porozite miktarlarını (%16,3-15,6<%20,4) önemli ölçüde azalttığını rapor etmişlerdir.

Tablo 3.4. Kontrol ve KK ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler

Karışım Tipi	Kür Süresi (gün)	Toplam Porozite (%)	Kümülatif Porozite (%)		TEBD (MPa)	$d_{eş}$ (µm)	Kademeli Porozite (%)
			$n_{Orta}$	$n_{Büyük}$			
Kontrol	28	43,67	6,08	37,59	1,55	0,836	5,21
%5 KK		43,90	6,54	37,36	1,09	1,048	6,36
%15 KK		41,46	8,43	33,03	1,59	0,554	4,65
Kontrol	180	42,72	5,23	37,49	1,56	1,628	4,41
%5 KK		43,12	5,16	37,96	1,27	1,050	5,26
%15 KK		40,44	8,22	32,22	1,74	0,554	4,19

Eşik gözenek çaplarının ( $d_{eş}$ ) gelişimi değerlendirildiğinde, kür süresinin 28 günden 180 güne artmasıyla %15 KK içeren numuneler hariç diğer numunelerin  $d_{eş}$  değerlerinin büyüdüğü tespit edilmiştir. KK ikamesinin etkisine bakıldığında, %5 KK ikameli ÇMD numunesinin  $d_{eş}$  değerinin kontrol numunesine kıyasla 28 günde daha büyük olduğu, 180 günde ise nispeten küçüldüğü belirlenmiştir. KK ikame oranı %15 olduğunda ise kür süresinden bağımsız olarak  $d_{eş}$  değerinin oldukça küçüldüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, tüm numunelerin eşik gözenek çaplarına karşılık gelen kademeli porozite değerlerinin kür süresi ve KK ikame oranının artmasıyla azaldığı görülmektedir (Tablo 3.4). Uzun dönemde asit ve sülfat oluşumunun artmasıyla  $d_{eş}$  değerlerinin (%15 KK hariç) büyümesi uyumluluk göstermesine rağmen dolgu karışımı içerisine yapılan özellikle %15 KK ikamesi ile filler etkisinden kaynaklı karışımın katı oranının artması (74,02>%73,70) ve su/çimento oranının azalması (4,13<4,20) sağlanarak ÇMD'nin gözenek yapısı önemli ölçüde geliştirilmiştir. Bu bağlamda %15 KK içeren çimentolu macun dolgunun nispeten daha yüksek mekanik performans göstermesi (Şekil 3.15) ve sülfat atağa karşı daha dirençli davranması (Şekil 3.18), filler etkisi kaynaklı boşlukların doldurulması sonucu permabilitenin azalmasına sebep olan porozitenin düşmesi ve pirit oksidasyonunun azaltılması ile açıklanabilir (Mangane vd., 2018; Yılmaz vd., 2018).

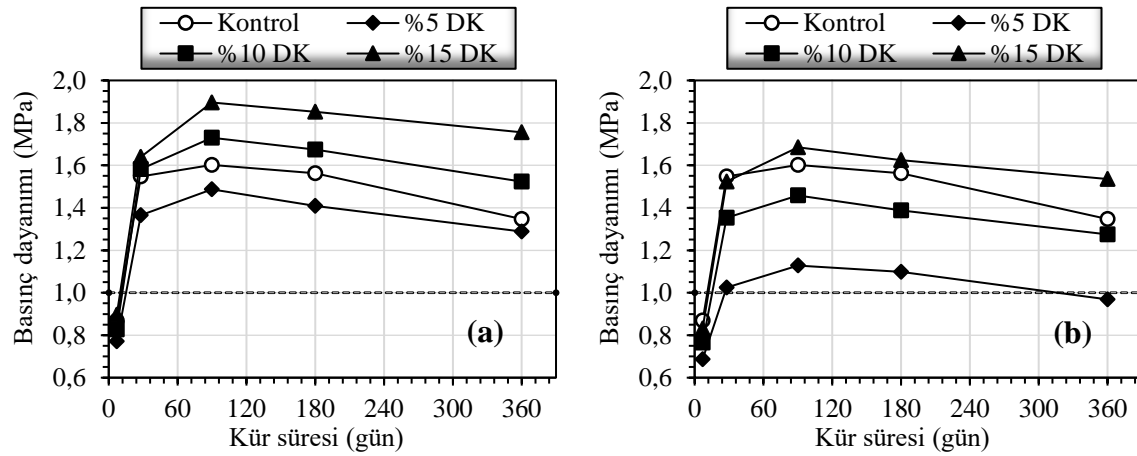
### 3.5. Dolomitik Kireçtaşının (DK) ÇMD Performansına Etkisi

#### 3.5.1. Dayanım ve Duraylılığa Etkisi

Şekil 3.20, %7,5-8,5 bağlayıcı oranında sülfürlü atık yerine ağırlıkça %5-15 oranda DK ikame edilmesiyle üretilen ÇMD numunelerinin 7-360 günlük kür süresi aralığındaki TEBD sonuçlarını göstermektedir.

Bütün ÇMD numunelerinin TEBD değerlerinin bağlayıcı oranı ve karışım özelliklerinden bağımsız olarak 90 günlük kür süresi boyunca arttığı görülürken, sonraki kür süreleri (90-360 gün) aralığında numunelerin basınç dayanımları düşüş eğilimi göstermiştir. Karışım içerisinde atık malzemeye ikame olarak kullanılan DK'nın ikame oranı arttırıldığında, ÇMD numunelerinin TEBD değerlerinin her iki bağlayıcı oranında ve tüm kür sürelerinde arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, %8,5 bağlayıcı oranında %10 ve %15 DK ikameli ÇMD numunelerinin kontrol numunelerine kıyasla %30'a kadar daha yüksek basınç dayanımı ürettiği, buna karşın bağlayıcı oranı %7,5 olduğunda sadece %15 DK ikameli numunelerin kontrol numunelerini geçtiği belirlenmiştir (Şekil 3.20a,b). Dolomitik kireçtaşı ikamesinin basınç dayanımına yaptığı olumlu katkı, öğütülmüş kireçtaşının nükleasyon (çekirdeklenme) bölgesi oluşturarak bağlayıcı hidrasyonunu hızlandırması ve yeni hidrasyon ürünleri oluşturması (Moon vd., 2017) ile açıklanabilir. Ayrıca, ÇMD karışımı içerisinde kullanılan öğütülmüş DK'nın daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olması (Tablo 2.5) sebebiyle daha iri boyutlu atık taneleri arasındaki boşlukları doldurmasıyla karışımın su ihtiyacının azalması ve böylece katı oranının artması (74,03-74,31>73,70) ve su/çimento oranının azalması (4,13-4,07<4,20) ile sonuçlanan daha yoğun bir dolgu yapısının oluşmasıyla ilişkilendirilebilir (Tablo 2.8) (Yılmaz ve Ercikdi, 2016; Yılmaz vd., 2018). Bu çalışma ile benzer TEBD sonuçlarının tespit edildiği başka bir araştırmada, Binici vd. (2007) 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajında hazırladıkları beton numunelerinde ince kum agrega yerine %5-15 oranında mermer tozu (MT) ve kireçtaşı tozu (KT) kullanımının 7-360 günlük kür süresi aralığında bazı mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar MT ve KT ikamesinin kontrol beton numunelerine kıyasla basınç dayanımına daha fazla katkı yaptığını ve su girişi derinliğini oldukça azalttığını gözlemlemişlerdir. Diğer bir çalışmada, çimento yerine %30'a kadar öğütülmüş DK ikamesinin betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi değerlendirilmiş ve %25 DK ikamesinin betonun 14 ve 28 gündeki basınç dayanımını kontrol beton numunesine kıyasla sırasıyla %16,7 ve %23,5

oranlarında arttırdığı bildirilmiştir. Yazarlar bu etkiyi DK'nın yüksek yüzey alanı (5500 cm<sup>2</sup>/g) sebebiyle betonun yoğunluğunu arttırması ile ilişkilendirmişlerdir (Mikhailova vd., 2013). Dahası, DK'nın basınç dayanımına yaptığı olumlu etki, cevher zenginleştirme atıklarının yüksek sülfür içeriğine sahip olması sebebiyle hava ve nem varlığında oksidasyona uğraması sonucu dolgu bünyesinde meydana gelen asitin nötralize edilebilmesinde DK'nın başarılı olması ile açıklanabilir (Ercikdi vd., 2015).



Şekil 3.20. DK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi

Bağlayıcı oranının %7,5'e düşürülmesi ile özellikle %15 DK içeren ÇMD numunelerinin kontrol numunelerinden daha yüksek basınç dayanımı sağlamaları sonucunda bağlayıcı tüketiminde önemli miktarda tasarruf sağlanmıştır. 1,0 m<sup>3</sup> dolgu üretiminde, %8,5 bağlayıcı oranına sahip kontrol numunelerinde 130 kg Portland çimentosu kullanılırken, %7,5 bağlayıcı oranında %15 DK ikameli 1,0 m<sup>3</sup> ÇMD karışımında 112,42 kg çimento kullanılmış ve bu sayede ÇMD tesisinde kullanılan çimento tüketiminde %13,52 oranında tasarruf yapılabileceği öngörülmüştür (Şekil 3.20b) (Ek Tablo 1). Ayrıca %15 DK içeren numuneler aynı kür süreleri aralığında kontrol numunelerine kıyasla %14 oranına kadar daha yüksek basınç dayanımı üretirken, sülfürlü minerallerin oksidasyona uğraması sonucu meydana gelen asit ve sülfat sebebiyle düşük pH'a (<9) sahip ortamda hidrasyon ürünlerinin (C-S-H jelleri ve portlandit) zayıflaması ve çözünmesi (Tariq ve Nehdi, 2007; Ercikdi vd., 2015; Cihangir ve Akyol, 2018; Yin vd., 2018) ile bağlantılı olarak uzun dönemde (90-360 gün) gerçekleşen dayanım kaybı oranları karşılaştırıldığında kontrol

numunesinde %15,92 dayanım kaybı meydana gelirken, %7,5 bağlayıcı oranına sahip %15 DK içeren numunelerde dayanım kaybı %8,90 olarak gerçekleşmiştir (Ek Tablo 1).

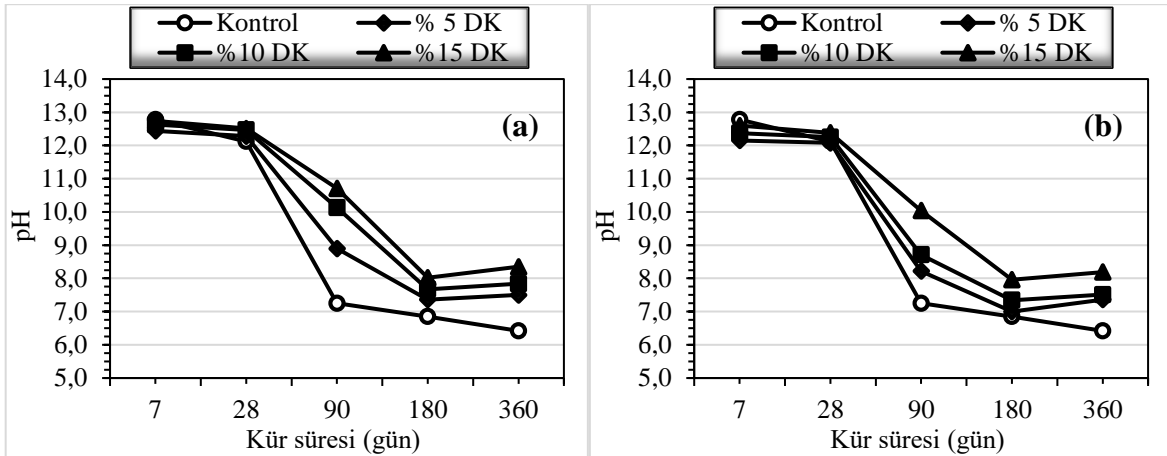
Cevher zenginleştirme sonucu meydana gelen atıkların ÇMD teknolojisi kullanılarak yeraltında cevheri alınmış üretim açıklıklarına yerleştirilmesi sonucu dolgunun duraylılığını koruması, dolgu yapılmış açıklıklara komşu olan bölgelerde gerçekleştirilecek üretim esnasında cevher seyrelmesinin meydana gelmemesi ve güvenli çalışma koşullarının tesis edilerek üretim döngüsünün sorunsuz devam etmesinin sağlanması için 28-360 gün arasında gerekli olan 1,0 MPa dayanım kriterini %7,5 bağlayıcı oranına sahip %5 DK ikameli numuneler haricinde tüm ÇMD numuneleri sağlamıştır (Şekil 3.20) (Yumlu, 2001).

### 3.5.2. Asit (pH) ve Sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) Oluşumuna Etkisi

Şekil 3.21 ve Şekil 3.22, %8,5 PÇ oranında sadece sülfürlü atık ile hazırlanan kontrol numunelerinin ve %7,5-8,5 bağlayıcı oranında atık yerine %5-15 oranında DK ikame edilerek üretilen numunelerin 7-360 gün aralığındaki asit (pH) ve sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) oluşumunu göstermektedir.

Tüm numunelerin 7-360 gün aralığında pH değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. Bağlayıcının hidrasyon sürecinin devam etmesi sebebiyle  $Ca(OH)_2$  üretilmesi sonucu tüm numunelerin 28 güne kadarki asit oluşumu oldukça düşük seviyededir ( $pH \geq 12,0$ ) (Cihangir vd., 2015; Yılmaz vd., 2018). 28 günden sonra kontrol numunesinin ve 90 günden sonra DK içeren ÇMD numunelerinin asit oluşumu (pH düşüşü) hızlanmıştır. 90 gün sonunda pH değeri nötral (7,25) koşullarda bulunan kontrol numunelerinin pH'ında düşüş devam etmiş ve 360 gün sonunda pH değeri asidik seviyeye (6,40) ulaşmıştır. Buna karşın, bağlayıcı ve ikame oranından bağımsız olarak DK ikameli numunelerin asit oluşumu 180 güne kadar artma eğilimine devam ederken, sonrasında tekrar asit oluşumunda azalma meydana gelmiş ve ikame oranının artmasıyla orantılı olarak pH değerlerinin 8,20-8,35 seviyelerine kadar yükseldiği tespit edilmiştir (Şekil 3.21a,b). Ayrıca tüm DK ikameli numunelerin kontrol numunelerine kıyasla daha düşük seviyede asit ürettiği gözlemlenen çalışmada tüm numunelerde meydana gelen asit oluşumu; dolgu içerisindeki oksidasyon sonucu pirit miktarının azalmasına bağlanabilir. DK'nın AMD'nin iyileştirilmesindeki etkinliğinin araştırıldığı ve bu çalışmayla uyumlu olarak olumlu sonuçların elde edildiği bir başka çalışmada Genty vd. (2012) başlangıç pH değeri 3,3 olan AMD çözeltilisi içerisinde orta boyutlu (0,8-1,9 cm) dolomit malzemesi ilave ederek 15 saat sonunda çözeltilinin pH değerini

5,5'e yükseltmişlerdir. Ayrıca, araştırmacılar tane boyutunun küçültülmesiyle (özgül yüzey alanının artırılmasıyla) nötralizasyon hızının arttığını ve dolayısıyla daha yüksek pH değerlerinin elde edildiğini gözlemlemişlerdir (Potgieter-Vermaak vd., 2006). DK içeren numunelerin pH değerlerinin kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek seviyelerde kalabilmesi asit nötrale etme kapasitesine sahip olan DK içerisindeki kalsitin çözünmesi sonucu dolgu bünyesine OH<sup>-</sup> iyonu salınımı ile açıklanabilir (Fernandez-Caliani ve Barba-Brioso, 2010; Ercikdi vd., 2015). Bunlara ek olarak, aynı karışım özelliklerinde DK ikamesi ile hazırlanan dolgu numunelerinin KK ikameli numunelere kıyasla asit oluşumuna karşı nispeten daha düşük direnç gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 3.18 ve Şekil 3.22). Bu çalışmayla uyumlu olarak, Potgieter-Vermaak vd. (2006) temsili bir AMS'nin pH değişimi üzerinde kireçtaşı ve dolomitin etkinliğini ve uygulanabilirliğini araştırdıkları çalışmalarında 50 ve 100 g/l kireçtaşının 6 saatlik temas süresi sonunda AMS'nin pH değerini 1,2'den sırasıyla 7,2 ve 7,4'e yükselttiğini, buna karşın daha fazla miktarlarda (120 ve 160 g/l) eklenen dolomitin sırasıyla ancak 6,5 ve 6,9'a kadar yükselttiğini gözlemlemişlerdir. Benzer sonuçların gözlemlendiği başka bir çalışmada Genty vd. (2012) bu durumu, kireçtaşının %95 CaCO<sub>3</sub> içeriğine sahip olmasından dolayı nötralizasyon potansiyelinin dolomite kıyasla daha yüksek olmasıyla açıklamışlardır.

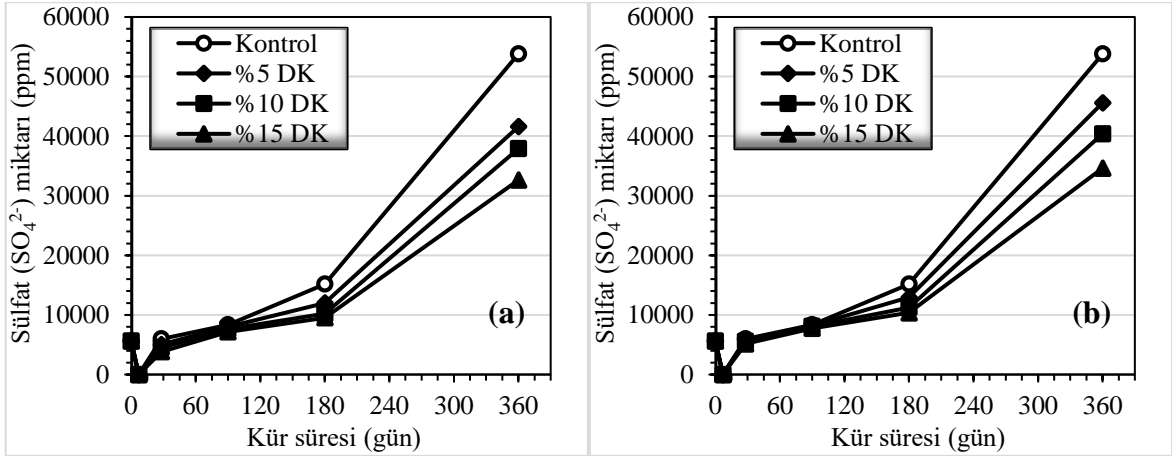


Şekil 3.21. DK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi

Kontrol ve %5-15 oranında DK ikameli ÇMD numunelerinin 7-360 gün boyunca meydana gelen sülfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) konsantrasyonu miktarları incelendiğinde (Şekil 3.22), bağlayıcı oranından bağımsız olarak 7 gün sonunda sülfat iyonu konsantrasyonuna



rastlanamamıştır. Bu durum, sülfürlü atıkta başlangıçta var olan  $SO_4^{2-}$  iyonlarının çimentonun hidratasyonu esnasında üretilen C-S-H ve portlandit ile reaksiyona girmesi sonucu jips ve etrenjit gibi sülfat içeren yapıların muhtemel oluşumu ile açıklanabilir (Yılmaz vd., 2018). 7 günden sonra, tüm (kontrol ve DK ikameli) ÇMD numunelerinin sülfat iyonu konsantrasyonları 360 günlük kür süresi sonuna kadar artmıştır. Ayrıca 90 güne kadar sülfat iyonu salınımları nispeten yavaş bir şekilde artarken, tüm numunelerde basınç dayanımı kayıplarının başladığı 90 günden sonra sülfat iyonu salınımının daha hızlı artış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 3.22). Uzun dönemde nispeten daha hızlı bir şekilde artan sülfat konsantrasyonu, diğer numunelerle (YFC, C-UK, MA, KK vb.) benzer olarak oksidasyon sonucu dolgu bünyesinde bulunan pirit miktarının muhtemel azalması ile ilişkilendirilebilir. DK kullanımının sülfat oluşumuna etkisi değerlendirildiğinde, DK ikame oranı arttıkça bağlayıcı oranı ve kür süresinden bağımsız olarak sülfat oluşumunun azaldığı tespit edilmiştir. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında, ikame oranının %15'e arttırılmasıyla 360 gün sonunda DK içeren numuneler %35-39 oranında daha düşük sülfat iyonu üretmiş ve kontrol numunesi aynı kür süresi sonunda yaklaşık 54000 ppm sülfat iyonu üretirken, %15 DK içeren numunelerin sülfat iyonu salınımı 32000-34000 ppm seviyelerinde gerçekleşmiştir (Şekil 3.22a,b).



Şekil 3.22. DK ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) konsantrasyonuna etkisi

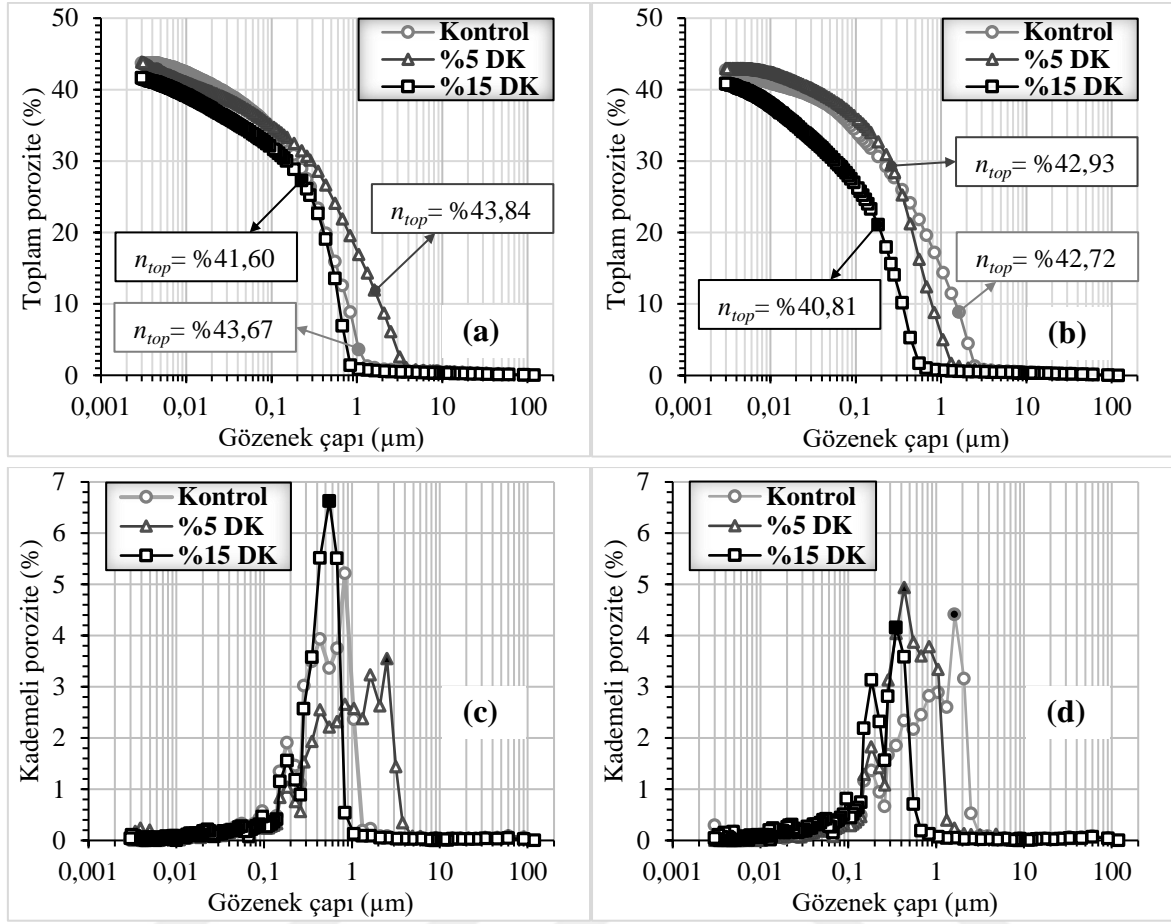
360 gün sonundaki pH ve sülfat değerleri karşılaştırıldığında, %15 DK içeren ÇMD numunelerinin alkali seviyelerde ( $pH \geq 8,20$ ) seyrettiği, buna karşın kontrol numunelerinin asidik seviyeye ( $pH=6,42$ ) düştüğü ve sülfat iyonu salınımı miktarlarının kontrol

numunesine kıyasla %35-39 oranında daha düşük olması ile uyumlu olarak bağlayıcı oranından bağımsız bir şekilde %15 DK ikameli numunelerin aynı kür süresi aralığındaki (90-360 gün) dayanım kaybı oranının oldukça düşük (%7,44-8,90<15,92) (Ek Tablo 1) olması; DK'nın asit nötralizasyon potansiyelinin göstergesi olan CaO içeriğinin %25'ten daha yüksek olması ve yüksek özgül yüzey alanına sahip olması (Tablo 2.5) sonucu uzun dönemde meydana gelen asit oluşumuna karşı direnç göstermesi ile ilişkilendirilebilir (Potgieter-Vermaak vd., 2006; Ercikdi vd., 2015; Jones ve Cetin, 2017). Ayrıca özgül yüzey alanı atık malzemeye kıyasla oldukça yüksek olan ince DK tanelerinin daha iri boyutlu atık tanelerinin arasını doldurması sonucu daha düşük poroziteli dolgu yapısının oluşması ÇMD'nin uzun dönemdeki duraylılığına katkıda bulunmuştur (Celik vd., 2014; Yılmaz vd., 2017; Erçikdi ve Yılmaz, 2019).

### 3.5.3. Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi

%8,5 bağlayıcı oranında sülfürlü atık ile hazırlanan kontrol numunesi ve atık malzeme yerine %5 ve %15 DK ikame edilerek üretilen ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki toplam ( $n_{top}$ ) ve kademeli porozite sonuçları Şekil 3.23'te gösterilmiştir. Ayrıca, porozite analizleri gerçekleştirilen ÇMD numunelerine ait teknik parametreler (gözenek boyut dağılımı,  $n_{büyük}$ ,  $n_{orta}$ ,  $d_{eş}$  vb.) Tablo 3.5'te özetlenmiştir.

Karışım özelliklerinden bağımsız olarak kür süresinin artışı tüm ÇMD (kontrol ve %5-15 DK ikameli) numunelerinin  $n_{top}$  değerlerinin azalmasını sağlamıştır. 28 günde %43,84-41,46 arasında değişen  $n_{top}$  değerlerinin, kür süresi 180 gün olduğunda %2,18 oranına kadar azalarak %42,93-40,81 arasında değişen değerlere düştüğü belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, farklı araştırmacıların (Ghirian ve Fall, 2014; Yılmaz vd., 2014; Mangane vd., 2018) farklı kür sürelerinde (7-150 gün, 7-90 gün ve 7-28 gün) yaptıkları porozite testleri sonucunda kür süresi arttıkça toplam porozite değerlerinin bu çalışma ile uyumlu olarak azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca,  $n_{top}$  değerlerinde (Şekil 3.23a,b) gerçekleşen düşme ile basınç dayanımında (Şekil 3.20a) meydana gelen artışların, ÇMD'nin mekanik performansı üzerinde porozite gelişiminin doğrudan etkili olduğu bilgisi doğrultusunda oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Benzaazoua vd., 2004; Belem vd., 2016; Mangane vd., 2018). Kademeli porozite değerleri incelendiğinde, kür süresinin artması ile kontrol numunesinin kademeli porozitesi genişlerken/büyürken, %5 ve %15 DK ikameli numunelerin kademeli poroziteleri küçülmüştür (Şekil 3.23c,d).



Şekil 3.23. DK ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi

Sülfürlü atık yerine DK ikamesinin toplam ve kademeli porozite gelişimine etkisi incelendiğinde, %5 DK ikamesinin kür süresinden bağımsız olarak  $n_{top}$  değerlerinde kontrol numunesine kıyasla iyileştirme sağlayamadığı, buna karşın DK ikamesi %15'e arttırıldığında 28 ve 180 gün sonunda  $n_{top}$  değerlerinde sırasıyla %5,1 ve %4,5 azalma sağlanmıştır (Şekil 3.23a,b ve Tablo 3.5). %15 DK kullanımının yaptığı olumlu etkinin sebebi olarak, puzolanik özelliği bulunmayan inert bir malzeme grubuna ait olan DK'nın atık malzemeye kıyasla daha fazla miktarda ince boyutlu tane içermesi (Şekil 2.7) ve daha yüksek özgül yüzey alanına (Tablo 2.5) sahip olması sonucu iri atık taneleri arasındaki boşlukları doldurmasıyla dolgunun içsel yapısının yoğunlaşması (sıkılaşması) gösterilebilir. Bu sayede ÇMD karışımının katı oranı artmış ( $\%74,31 < \%73,70$ ), su/çimento oranı azalmış ( $4,07 < 4,20$ ) ve aynı akışkanlık (19,05 cm) değerinde karışım içinde istenen su miktarı azalmıştır (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Moon vd., 2017; Yılmaz vd., 2018). Daha önce yapılan çalışmalarda, Moon vd. (2017) öğütülmüş kireçtaşı tozunun (KT)

betonun porozite gelişimine etkisini araştırmışlar ve kontrol numunesinin 28 gün sonundaki toplam porozitesi %18,5 olarak ölçülürken, tüm karışım tiplerinde %15 KT içeren numunelerin porozitelerinin kontrol numunelerine kıyasla %3,78-8,65 azalarak %17,8-16,9 arasında ölçüldüğünü bildirmişlerdir. Yazarlar bu olumlu gelişimin sebebini, öğütülmüş KT'nin çekirdeklenme bölgesi oluşturarak bağlayıcı hidrasyonunu hızlandırması ve karboalüminat gibi yeni hidrasyon ürünleri oluşturması sonucu toplam çimento porozitesinin azalması olarak göstermişlerdir (Ramezani pour ve Hooton, 2014; Moon vd., 2017). Bu çalışma ile uyumlu porozite gelişimlerinin gözlemlendiği diğer çalışmada ise yazarlar, iri taneli atık malzeme yerine %22,5 oranında KT ikame edildiğinde KT ikameli ÇMD'nin toplam porozitesinde kontrol numunesine kıyasla özellikle 28 gün sonunda %4,0 azalma meydana geldiğini tespit etmişler ve bu olumlu gelişimin, KT'nin boşlukları doldurma (filler) etkisi, inceliği ve su bırakma gibi yüzey özellikleri sonucunda ortaya çıktığını rapor etmişlerdir (Zheng vd., 2016).

Tablo 3.5'te verilmiş olan teknik parametreler incelendiğinde, kür süresinin 28 günden 180 güne artmasıyla genel olarak numunelerin büyük boyutlu ( $n_{Büyük}$ ) poroziteleri azalırken, orta boyutlu ( $n_{Orta}$ ) poroziteleri artmıştır. DK ikamesinin etkisine bakıldığında ise, %5 DK ikamesi numunelerin  $n_{Büyük}$  ve  $n_{Orta}$  değerlerinde dikkate değer bir iyileştirme sağlayamazken, ikame oranı %15 olduğunda numunelerin  $n_{Büyük}$  değerlerinin kontrol numunesine göre 28 ve 180 günde sırasıyla %8,7 ve %18,5 oranlarında düştüğü belirlenmiştir. Dahası, %15 DK ikamesinin  $n_{Orta}$  değerlerinde kontrol numunesine kıyasla gözle görülür derecede iyileşme sağladığı tespit edilmiştir (Tablo 3.5). Özellikle %15 DK ikamesinin ÇMD'nin toplam porozitesinin azalması ile sonuçlanan  $n_{Büyük}$  değerlerinin azalması ve  $n_{Orta}$  değerlerinin artması, DK'nın daha yüksek yüzey alanına ve daha ince tane boyutuna sahip olmasından dolayı iri atık taneleri arasındaki boşlukları doldurması (Zheng vd., 2016; Yılmaz vd., 2018), çekirdeklenme bölgesi oluşturarak bağlayıcı hidrasyonunu hızlandırması ve karboalüminat gibi yeni hidrasyon ürünleri oluşturması sonucu çimento porozitesinin azalması (Ramezani pour ve Hooton, 2014; Moon vd., 2017) ile sonuçlanan büyük boyutlu gözeneklerin kapanması ve/veya küçülerek orta boyutlu gözeneğe dönüşmesi ile açıklanabilir.

Eşik gözenek çaplarının ( $d_{eş}$ ) gelişimine bakıldığında (Tablo 3.5), kür süresi artışının kontrol numunesinin  $d_{eş}$  değerini büyüttüğü, buna karşın DK ikamesinin  $d_{eş}$  değerini küçülttüğü açıkça görülmektedir. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında, %5 DK ikamesinin 28 günde  $d_{eş}$  değerini küçültemezken, 180 günde  $d_{eş}$  değerini gözle görülür

biçimde küçülttüğü belirlenmiştir. İkame oranı %15 olduğunda ise eşik gözenek çaplarının oldukça küçüldüğü görülmüştür. Bunlara ek olarak eşik gözenek çaplarına karşılık gelen kademeli porozite değerlerinin kısmen uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.5). Uzun dönemde asit ve sülfat oluşumunun artmasına rağmen, özellikle %15 DK içeren ÇMD'nin kontrol numunesine kıyasla nispeten daha yüksek mekanik performans göstermesi (Şekil 3.20) ve sülfat atağa karşı daha dirençli davranması; DK'nın filler etkisi kaynaklı boşlukların doldurulmasını ve çekirdeklenme bölgesi oluşturarak bağlayıcı hidrasyonunu hızlandırması ve karboalüminat gibi yeni hidrasyon ürünlerinin oluşturulmasını sağlaması sonucu permabilitenin azalmasına sebep olan porozitenin düşmesi ve pirit oksidasyonunun azaltılmasına bağlanabilir (Moon vd., 2017; Mangane vd., 2018; Yılmaz vd., 2018).

Tablo 3.5. Kontrol ve DK ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler

Karışım Tipi	Kür Süresi (gün)	Toplam Porozite (%)	Kümülatif Porozite (%)		TEBD (MPa)	$d_{eş}$ (µm)	Kademeli Porozite (%)
			$n_{Orta}$	$n_{Büyük}$			
Kontrol	28	43,67	6,08	37,59	1,55	0,836	5,21
%5 DK		43,84	6,59	37,25	1,37	2,502	3,55
%15 DK		41,60	7,28	34,32	1,64	0,553	6,63
Kontrol	180	42,72	5,23	37,49	1,56	1,628	4,41
%5 DK		42,93	4,26	38,67	1,41	0,434	4,93
%15 DK		40,81	10,26	30,55	1,85	0,349	4,15

### 3.6. İnşaat Yıkıntı Atığının (İYA) ÇMD Performansına Etkisi

#### 3.6.1. Dayanım ve Duraylılığa Etkisi

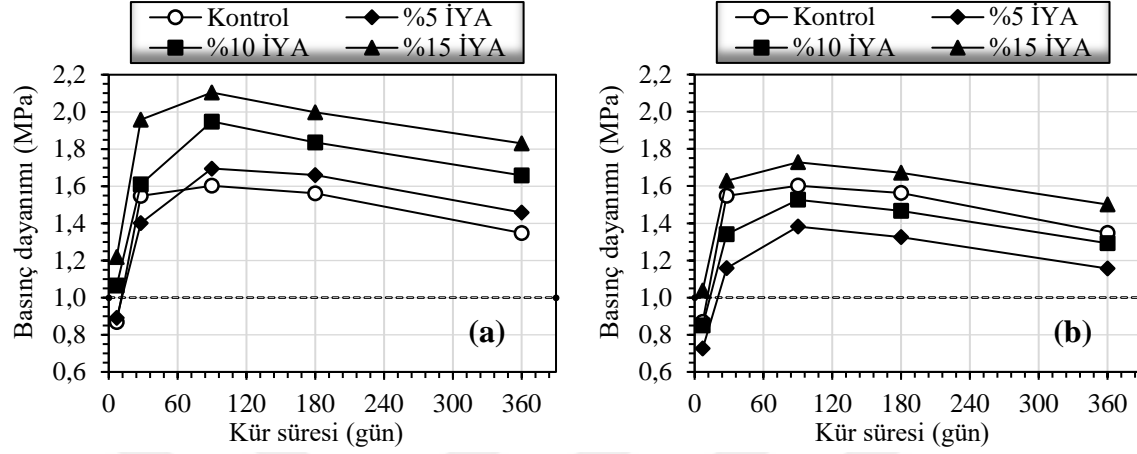
%15,82 sülfür içeriğine sahip atık malzeme yerine %5, %10 ve %15 oranında İYA ikamesinin %7,5 ve %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin 7-360 günlük kür süresi aralığındaki TEBD gelişimine etkisi Şekil 3.24'te sunulmuştur.

Tüm ÇMD numunelerinin basınç dayanımlarının 90 güne kadar hızlı bir şekilde arttığı ve en yüksek seviyelere ulaştığı Şekil 3.24a,b'den açıkça görülebilirken, sonrasında TEBD değerlerinde düşme eğilimi gözlenmiştir. %8,5 bağlayıcı oranında, İYA içeren tüm ÇMD numuneleri (28 gündeki %5 İYA içeren ÇMD numuneleri hariç) kür süresinden bağımsız olarak kontrol numunelerine göre %40,3'e kadar daha yüksek basınç dayanımı üretmiştir (Şekil 3.24a). Ayrıca, her iki bağlayıcı oranında, İYA ikame oranının artması ile ÇMD numunelerinin TEBD değerleri artmıştır. Bunlara ek olarak, %7,5 bağlayıcı oranında

hazırlanan %15 İYA içeren ÇMD numunelerinin bile %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan kontrol numunelerinden %5,3-19,5 oranlarında daha yüksek TEBD üretmesi oldukça önemli bir bulgudur (Şekil 3.24b). Bu durum, karışım içerisindeki ince İYA tanelerinin daha iri olan atık taneleri arasındaki boşlukları doldurarak su gereksiniminin azalmasını sağlaması ve dolayısıyla dayanım artışıyla sonuçlanan daha düşük poroziteli ve daha yoğun bir matriks oluşmasıyla ilişkilendirilmiştir (Şekil 2.7) (Yılmaz vd., 2018). İri atık malzemesi içerisindeki ince tane miktarının yetersizliği ile bağlantılı olarak kontrol ÇMD karışımında daha büyük boşluk oranı meydana gelmesi sebebiyle kontrol karışımının su içeriği (su/çimento oranı) artmıştır (Tablo 2.8). İnce öğütülmüş İYA tanelerinin, su içeriğinin azalması için boşlukları doldurması vasıtasıyla ÇMD karışımının su ihtiyacı azalmıştır. Bu bulgularla uyumlu olarak iri taneli atık malzeme yerine öğütülmüş KT'nin ikame olarak kullanılmasının ÇMD'nin dayanım, mikroyapı ve işlenebilirlik parametrelerine etkisini araştıran Zheng vd. (2016) %10'a kadar KT kullanımının ÇMD karışımının işlenebilirliğini artırdığını belirtmiş ve bu bulguyu, ince KT'nin boşlukları doldurma etkisi (filler etkisi), inceliği ve su bırakma gibi yüzey özellikleri ile ilişkilendirmiştir.

Daha önceki araştırmacılar (Topçu ve Şengel, 2004; Rao vd., 2011; Çakır, 2014; Uygunoğlu vd., 2014; Özalp vd., 2016) geri dönüşüm agregasından (GDA) üretilen beton numunelerinin normal (doğal) agregalı betonlara kıyasla daha düşük (%5-40) basınç dayanımı ürettiklerini rapor etmişlerdir. Ayrıca, araştırmacılar iri boyutlu GDA'nın miktarının artması ile betonun dayanımının azaldığını belirtmişler ve dayanım düşüşünün arkasındaki sebebi, beton üretiminde kullanılan iri boyutlu GDA'nın zayıflığı, sahip olduğu kırıklar ve %5-15 oranında daha fazla su ihtiyacının olması ile açıklamışlardır (Topçu ve Şengel, 2004; Jabir, 2012). Betonun tam tersine, %5-15 İYA içeren ÇMD numuneleri aynı bağlayıcı oranında kontrol numunelerine göre daha yüksek TEBD üretmiştir. Dahası, karışım içerisindeki İYA miktarı arttıkça numunelerin dayanımı artmıştır. İYA içeren ÇMD numunelerinde elde edilen daha yüksek dayanım kazanımı, aynı akışkanlık değerinin (19,05 cm) muhafaza edilmesi için  $6600 \text{ cm}^2/\text{g}$  özgül yüzey alanı değerine sahip İYA'nın daha düşük su gereksinimine sahip olması ve bunun sonucunda daha yoğun ve daha düşük gözenekli bir yapı ile daha yüksek katı oranı ve daha düşük su-çimento oranının meydana gelmesine bağlanmıştır (Tablo 2.8). Ayrıca, öğütme işlemleri sonucu İYA içindeki çatlak ve kırıkların bertaraf edilmesi de dayanım kazanımına yapılan katkının sebepleri arasında gösterilebilir. Tüm bunlara ek olarak, İYA içinde bulunan tuğla atığı taneleri, tuğla atığının  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile puzolanik aktivitesi sonucu bağlayıcı özellikleriyle ilave C-S-H yapıları

üretmek İYA içeren ÇMD'nin dayanım gelişimini desteklemiştir (Wild vd., 1997; Toledo Filho vd., 2007; Ercikdi vd., 2015; Yılmaz vd., 2018).



Şekil 3.24. İYA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılığına etkisi

ÇMD'de uzun dönemde (90-360 gün) meydana gelen ve sülfürlü minerallerin oksidasyona uğrayarak asit-sülfat oluşumuna sebep olması sonucu hidrasyon ürünlerinin zayıflaması ve çözünmesine bağlanan (Tariq ve Nehdi, 2007; Ercikdi vd., 2015; Cihangir ve Akyol, 2018; Yin vd., 2018) dayanım kaybı problemleri incelendiğinde, %8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranlarında hazırlanan %15 İYA ikameli numunelerde kontrol numunesine kıyasla daha düşük (%13,02-13,14<%16) dayanım kaybının meydana geldiği belirlenmiştir. Bu bağlamda, İYA ikamesinin uzun dönemde yaşanan dayanım kayıplarını azaltma konusunda daha başarılı olduğu ortaya konmuştur (Şekil 3.24a,b). Bu çalışmadaki dayanım kaybı değerlerinin aksine %12,5 PÇ oranında, %15 sülfür içerikli atık ile üretilen numunelerde uzun dönemde %32,7 oranında dayanım kaybı oluşmuştur (Dong vd., 2019).

Atık yerine belirli oranda kısmi yer değiştirme olarak İYA kullanımı sonucunda kısa dönemde daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiş (Şekil 3.24a,b), uzun dönemde daha düşük dayanım kayıpları oluşması sağlanmış ve bağlayıcı (çimento) tüketiminde önemli tasarruf sağlamıştır (Ek Tablo 1). Kontrol numuneleri ile kıyaslandığında, %7,5 bağlayıcı oranında hazırlanan 1,0 m<sup>3</sup> dolgu karışımının üretiminde %15 İYA içeren ÇMD numunelerinin %12 oranında daha düşük çimento içerdiği belirlenmiştir. Böylece, bağlayıcı sarfiyatının, ÇMD işletme maliyetlerinin yaklaşık %50-80'ini kapsadığı düşünülürse (Kesimal vd., 2005; Yılmaz ve Guresci, 2017), bağlayıcı tüketiminde sağlanan tasarruf ile

İYA'nın boyut küçültme (kıırma ve öğütme) işlemleri yüzünden ÇMD işletme maliyetlerinde meydana gelebilecek artış ortadan kaldırılabilir (Yılmaz vd., 2018).

Yeraltı maden işletmelerinde gerçekleştirilen ÇMD uygulamalarında, cevheri alınmış üretim açıklıklarına yerleştirilen dolgunun kendi duraylılığını sağlayarak komşu cevher odalarının üretimi esnasında cevher seyrelmesinin engellenmesi ve güvenli çalışma koşullarının sağlanması için gerekli sınır dayanım değerini (28-360 gün arasında  $TEBD \geq 1,0$  MPa) tüm (kontrol ve İYA içeren) ÇMD numunelerinin sağladığı görülmektedir (Şekil 3.24a,b) (Yumlu, 2001).

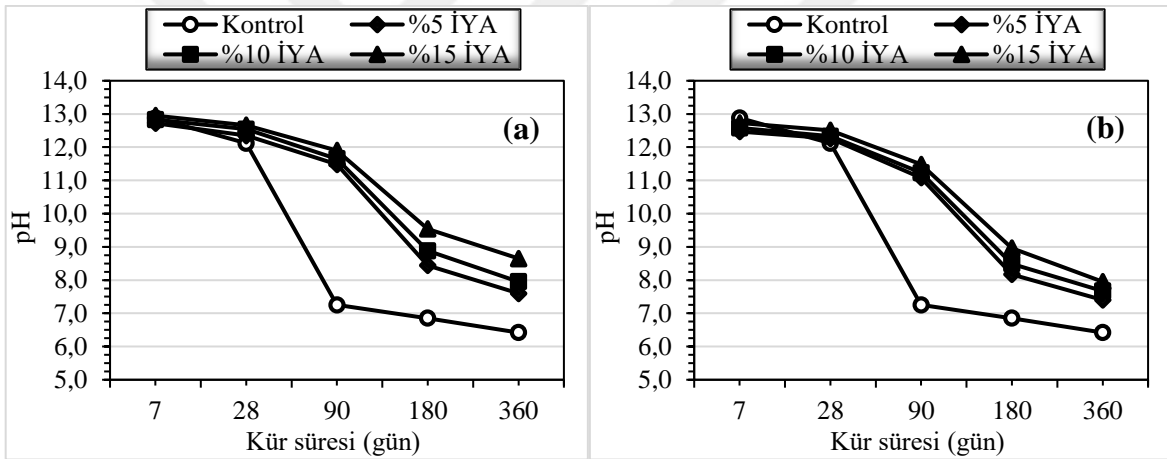
### 3.6.2. Asit (pH) ve Sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) Oluşumuna Etkisi

%8,5 bağlayıcı oranında PÇ kullanılarak hazırlanan kontrol numuneleri ve iki farklı PÇ oranında (%7,5 ve %8,5) sülfürlü atık yerine %5-15 oranında ikame olarak öğütülmüş İYA içeren ÇMD numunelerinin 7-360 günlük kür süresi aralığındaki asit (pH) oluşumu ve sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) içerikleri sırasıyla Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da gösterilmiştir.

Tüm ÇMD numunelerinin asit oluşumu 28 güne kadar oldukça düşük ( $pH \geq 12,0$ ) iken, kontrol (%100 sülfürlü atık) ve İYA içeren ÇMD numunelerinde sırasıyla 28 ve 90 günden sonra asit oluşumu (pH düşüşü) hızlanmıştır. Bağlayıcının hidrasyon reaksiyonu sonucu üretilen kalsiyum hidroksit ( $Ca(OH)_2$ ) 28 güne kadar tüm numunelerde alkali koşulların (yüksek pH) oluşmasını sağlamıştır (Şekil 3.25) (Yılmaz vd., 2018). Kontrol ve %5-15 İYA ikameli ÇMD numunelerinin 28 ve 180 günlük kür süreleri sonundaki XRD profilleri, pH değerlerindeki azalmanın sorumlusu olan piritin oksidasyonunun bir göstergesi olarak kür süresiyle pirit içeriğinde düşüş meydana geldiğini göstermiştir (Ek Şekil 3a ve Ek Şekil 7). Kontrol numunelerinin 180 ve 360 günlük kür süresi aralığındaki pH düşüşü oldukça keskin olurken, İYA ikameli (%5, %10 ve %15) numuneler sırasıyla kontrol numunesini takip etmiştir. Ercikdi vd. (2015) nötralizasyon potansiyelini arttıran %55'ten fazla CaO içeriğine sahip mermer artığı içeren ÇMD numunelerinin 180 günlük kür süresi sonunda bile 12,15'in üzerindeki yüksek pH değerlerini devam ettirebilmeyi başardıklarını belirtmiştir. Benzer şekilde, Jones ve Çetin (2017) pH değeri 2-4 arasında değişen AMD çözeltilisinin içerisinde tane boyutu  $75 \mu m - 10 mm$  arasında değişen ve farklı CaO içeriğine (%37,9-55,8) sahip geri dönüşüm agregaları (GDA) ilave edilmesiyle pH değerlerinin 11'in üzerine yükseltildiğini vurgulamış ve bunu GDA'nın içerisinde bulunan kireç (CaO) ve kalsit ( $CaCO_3$ ) gibi çimentomsu bileşenlerin çözünmesine bağlamıştır. 180 günlük kür süresi sonunda, %5-15



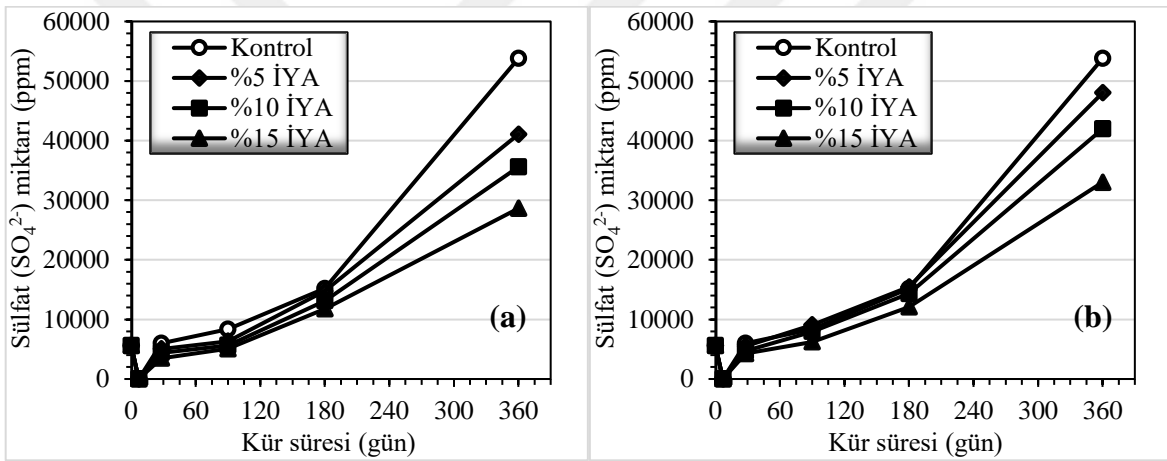
İYA içeren ÇMD numunelerinin mermer artığına kıyasla daha düşük (8,17-9,54<12,15) pH değerlerine sahip olmaları, İYA'nın nötralizasyon özelliği gösterebilmesi için en az %25 CaO içermesinin önerilmesine (Jones ve Çetin, 2017) rağmen İYA içerisinde oldukça düşük CaO (%12,23) bulunması ile ilişkilendirilmiştir. Fakat, İYA içeren ÇMD numuneleri 360 gün sonunda nispeten daha yüksek pH ( $\geq 7,40$ ) seviyesinde kalmayı başarabilirken, kontrol numunelerinin pH'ı 6,42 seviyesine kadar düşmüştür. İYA içeren numunelerin kontrol numunelerine kıyasla asit oluşumuna karşı nispeten yüksek direnç göstermesi kür süresinin ilerlemesiyle kalsitin çözünmesi sonucu OH<sup>-</sup> iyonlarının salınımı ile açıklanabilir (Tozsın vd., 2014a) (Ek Şekil 7). Buna ek olarak, İYA'nın çimentosu bileşenler içerisindeki CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> ve Ca taşıyan minerallerin çözünmesi ÇMD numunelerinin pH değerlerindeki artışın muhtemel sebebidir (Jones ve Çetin, 2017).



Şekil 3.25. İYA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin asit (pH) oluşumuna etkisi

Şekil 3.26, jips ve etrenjit gibi sülfat içeren yapıların muhtemel oluşumundan dolayı suda çözünen sülfatın başlangıçta azaldığını göstermektedir. ÇMD numunelerinin TEBD değerlerinde gözlemlenen belirgin düşüşün başlangıcıyla uyumlu olarak (Şekil 3.24), 90 günden sonra daha dikkat çekici olan kür süresinin artmasıyla sülfat salınımının arttığı belirlenmiştir. Sülfürlü atık yerine ikame edilen İYA miktarının artmasıyla sülfat miktarının azaldığı açıkça görülmektedir. Sülfat içeriğinde 7 günden sonra meydana gelen devamlı artış, piritin oksidasyonunu şiddetlendiren hava ve suya maruz kalan ÇMD içerisinde piritin oksidasyona devam etmesinin göstergesidir (Şekil 3.26a,b) (Yılmaz vd., 2018). Tüm ÇMD numunelerinin pH değerlerinin 6,42–8,65 arasına düşmesi ve sülfat miktarlarının 28624-

53788 ppm arasına yükselmesine rağmen, 90-360 gün arasında TEBD değerlerindeki düşüşün sadece %13-16 arasında olmasıyla birlikte ÇMD numunelerinin duraylılığındaki bozulmaların nispeten düşük olduğu görünmektedir. Basınç dayanımındaki düşüş esas olarak asit ve sülfat atak sonucu hidrasyon ürünlerinin zayıflamasına ve genişleme, çatlama ve yapısal bütünlüğün bozulmasına sebep olan ikincil yapıların oluşumuna bağlanabilir. Bu bağlamda, tüm numunelerinin XRD profillerinde jipsten daha düşük su içerikli kalsiyum sülfat ( $\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})$ ) yapısı olan bassanit minerali tespit edilmiştir (Ek Şekil 7). Horkoss vd. (2016) bassanit mineralinin varlığında  $20^\circ\text{C}$  sıcaklıkta küre tabi tutulan çimento pastası numunelerinde bazı genişlemeler gözlemlenmiştir. Buna rağmen, ÇMD numunelerinde görünür kırık, çatlak vb. sorunlara rastlanmamıştır.



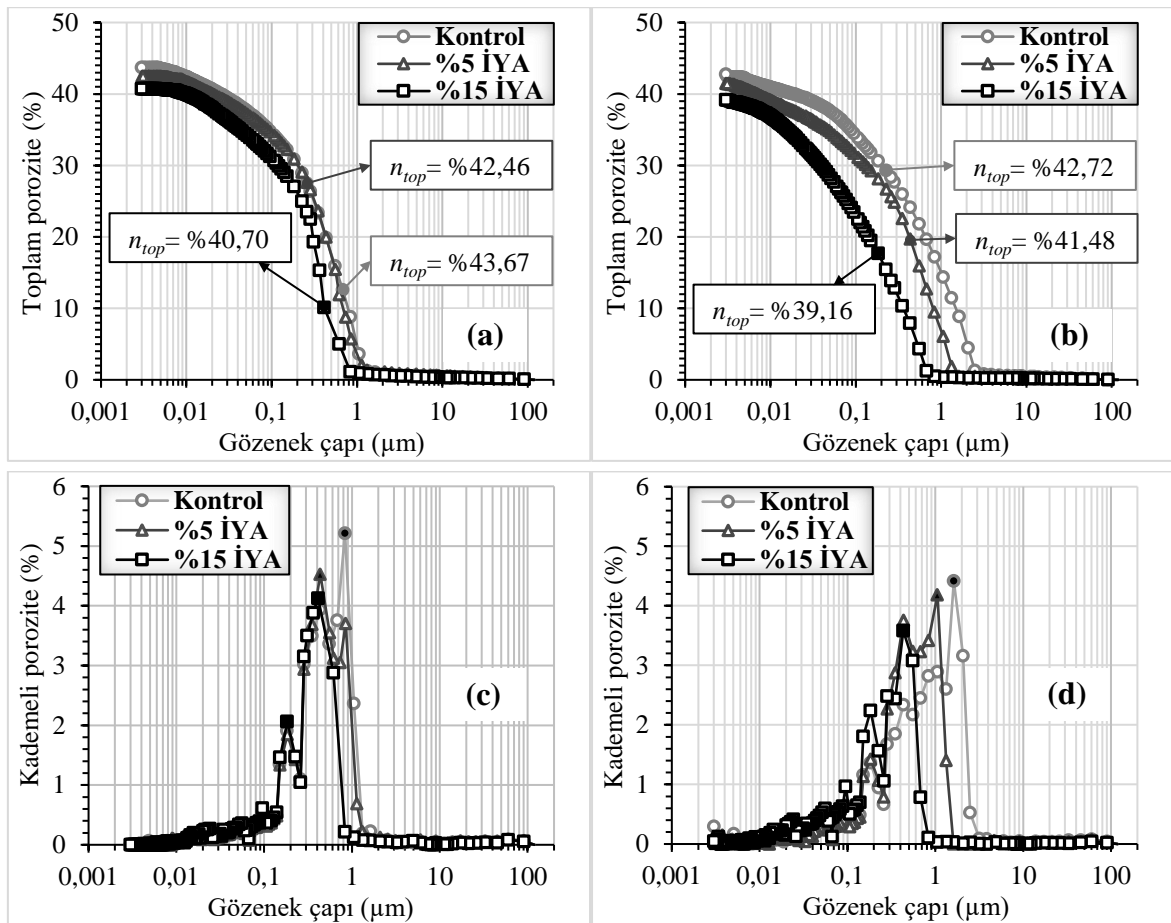
Şekil 3.26. İYA ikamesinin %8,5 (a) ve %7,5 (b) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) konsantrasyonuna etkisi

### 3.6.3. Porozite (MIP) Gelişimine Etkisi

Şekil 3.27, %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan kontrol numunesi ve atık malzeme yerine ikame olarak %5 ve %15 İYA kullanılarak üretilen ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki toplam ( $n_{top}$ ) ve kademeli porozite değişimlerini göstermektedir.

Karışım özelliklerinden bağımsız olarak kür süresinin artmasıyla ÇMD numunelerinin azaldığı gözlemlenmiştir. 28 günde  $n_{top}$  değerleri %43,67-40,70 arasında değişirken, kür süresinin 180 güne çıkmasıyla %2,2-3,8 oranında bir düşüş meydana gelmiş ve  $n_{top}$  değerleri %42,72-39,16 arasında ölçülmüştür (Şekil 3.27a,b). Daha önce kür süresinin toplam porozite gelişimine etkisini inceleyen araştırmacılar farklı kür sürelerinde (7-150 gün, 7-28 gün ve 7-

90 gün) gerçekleştirdikleri porozite testleri sonucunda, kür süresi artışının poroziteyi azalttığını bildirmişler (Ghirian ve Fall, 2014; Yılmaz vd., 2014; Mangane vd., 2018) ve sonuçlar bu çalışmadaki bulgularla uyumlu çıkmıştır. Buna ek olarak, kür süresi artışı tüm numunelerin kademeli porozite değerlerini de azaltmıştır (Şekil 3.27c,d). ÇMD'nin mekanik performansının mikroyapı (porozite) gelişimi tarafından doğrudan etkilendiği bilgisi doğrultusunda (Mangane vd., 2018), kür süresi artışıyla tüm numunelerin toplam porozite değerlerinde meydana gelen düşüşün basınç dayanımında meydana gelen artışlar ile uyum gösterdiği belirlenmiştir (Tablo 3.6, Şekil 3.27a ve Şekil 3.24a,b).



Şekil 3.27. İYA ikamesinin ÇMD'nin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam (a,b) ve kademeli (c,d) porozite (gözeneklilik) değişimlerine etkisi

İYA'nın etkisi değerlendirildiğinde, ince öğütülmüş İYA'nın atık malzeme yerine %5-15 oranında ikame edilmesi ÇMD'nin mikroyapı (porozite) gelişimine büyük bir katkı sağladığı Şekil 3.27 ve Tablo 3.6'dan açıkça görülmektedir. Kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında, %5 ve %15 İYA içeren numunelerin  $n_{top}$  değerlerinin 28 günde %2,8 ve

%6,8 azalmayla %43,67'den sırasıyla %42,46 ve %40,70'e düşerken, 180 günde sırasıyla %2,9 ve %8,3 azalmayla %42,72'den %41,48 ve %39,16'ya düştüğü belirlenmiştir (Şekil 3.27a,b). İYA'nın  $n_{top}$  değerlerinin azalmasına yaptığı olumlu etkinin sebebi; İYA'nın sülfürlü atık malzemeye kıyasla daha ince tane boyutuna (Şekil 2.7a) ve daha yüksek özgül yüzey alanına (Tablo 2.5) sahip olmasından dolayı filler etkisi olarak nitelendirilen iri boyutlu atık taneleri arasındaki boşlukları doldurması ve bu sayede aynı akışkanlıkta karışım içinde istenen su miktarının azalmasıyla sonuçlanan katı oranının artması (%73,87-74,56>%73,70) ve su/çimento oranının azalması (4,16-4,01<4,20) olarak gösterilebilir (Tablo 2.8) (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Yılmaz vd., 2018).

ÇMD numunelerine ait gözenek boyut dağılımı,  $n_{Büyük}$ ,  $n_{Orta}$ ,  $d_{eş}$  gibi teknik parametreler Tablo 3.6'da sunulmuştur. Teknik parametreler incelendiğinde, büyük boyutlu porozite ( $n_{Büyük}$ ) miktarlarının kür süresi artışıyla birlikte azaldığı ve orta boyutlu porozite ( $n_{Orta}$ ) değerlerinin kontrol numunesi haricinde arttığı tespit edilmiştir. İYA ikamesinin  $n_{Büyük}$  ve  $n_{Orta}$  gelişimine etkisi değerlendirildiğinde, 28 günde İYA'nın katkısı nispeten düşük seviyede olurken, 180 günde %5 ve %15 İYA içeren numunelerin  $n_{Büyük}$  miktarları kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %7,8 ve %24,9 oranında azalmıştır. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında, İYA içeren numuneler daha fazla miktarda orta boyutlu porozite ve daha düşük miktarda büyük boyutlu porozite üretmişlerdir ve bu değerler özellikle 180 gündeki %15 İYA içeren ÇMD numunelerinde daha belirgin olmuştur (Tablo 3.6). Bu çalışmadaki bulgularla uyumlu sonuçların elde edildiği daha önceki çalışmada düşük sülfür içerikli (%5 S) atık malzemeye %10 ve %22,5 oranında öğütülmüş KT ikamesinin 28 günlük ÇMD numunelerinin  $n_{Büyük}$  miktarlarını (%16,3-15,6<%20,4) önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir (Zheng vd., 2016).

ÇMD'nin hidrolik iletkenlik özelliklerini kontrol eden eşik gözenek çapının ( $d_{eş}$ ) kür süresinin artması sonucu büyüdüğü/genişlediği Tablo 3.6'dan açıkça görülmektedir. ÇMD karışımı içerisine yapılan İYA ikamesinin ise kür süresinden bağımsız olarak  $d_{eş}$  değerlerini önemli derecede küçülttüğü belirlenmiştir. %5 ve %15 İYA içeren numunelerin  $d_{eş}$  değerlerinin kontrol numunesine kıyasla 28 ve 180 günde sırasıyla %48-51 ve %35-73 oranlarında küçüldüğü tespit edilmiştir. Özellikle %15 İYA içeren ÇMD numunesinin 180 gün sonundaki eşik gözenek çapının %73 oranında küçülmesi/daralması, 180 ve 360 gün sonunda üretilen sülfat iyonu konsantrasyonunun kontrol numunesine kıyasla %23 ve %47 oranlarında azalmasına katkı sağlamıştır (Şekil 3.26a). Daha iri boyutlu atık taneleri arasındaki boşlukların daha ince İYA taneleri ile doldurulması aynı akışkanlıkta karışımın

katı oranının artmasına ve su/çimento oranının azalmasına sebep olarak gözenek yapısını önemli ölçüde iyileştirmiş ve özellikle %15 İYA içeren ÇMD’de farkedilebilir bir biçimde daha ince ve yoğun bir mikroyapı oluşmuştur. Dahası, %5 ve %15 İYA ikameli numuneler kontrol numunesine kıyasla daha yüksek katı oranı (%73,87-74,56>%73,70) ve daha düşük su/çimento oranına sahiptir (Tablo 2.8). Katı oranındaki artış ve su/çimento oranındaki azalmanın ÇMD’nin toplam porozitesinin azalmasıyla sonuçlandığı bildirilmiştir (Yılmaz vd., 2011; Yılmaz ve Ercikdi, 2016). Bu bağlamda, İYA içeren ÇMD’nin daha yüksek mekanik performans sağlaması ve asit-sülfat atağa karşı daha fazla direnç göstermesi, iri boyutlu atık taneleri arasındaki boşlukların ince öğütülmüş İYA taneleri tarafından doldurulması sayesinde mikroyapının iyileştirilmesi (porozitenin düşmesi, gözenek yapısının iyileştirilmesi vb.) ve oksidasyona sebep olan sülfürlü atık yüzeyinin küçültülmesiyle numune içerisine nem ve hava girişinin kısıtlanarak pirit oksidasyonunun azaltılması ile ilişkilendirilebilir (Mangane vd., 2018; Yılmaz vd., 2018).

Tablo 3.6. Kontrol ve İYA ikameli numunelerin porozite testine ait teknik parametreler

Karışım Tipi	Kür Süresi (gün)	Toplam Porozite (%)	Kümülatif Porozite (%)		TEBD (MPa)	$d_{eş}$ ( $\mu$ m)	Kademeli Porozite (%)
			$n_{Orta}$	$n_{Büyük}$			
Kontrol		43,67	6,08	37,59	1,55	0,836	5,21
%5 İYA	28	42,46	5,28	37,18	1,40	0,435	4,53
%15 İYA		40,44	6,23	34,21	1,96	0,413	4,13
Kontrol		42,72	5,23	37,49	1,56	1,628	4,41
%5 İYA	180	41,48	6,89	34,59	1,66	1,056	4,18
%15 İYA		39,16	10,98	28,18	1,98	0,433	3,58

#### 4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, 6 farklı ANP'ye sahip endüstriyel atık/artık malzemelerinin (yüksek fırın cürufu (YFC), mermer artığı (MA), C-sınıfı uçucu kül (C-UK), kalsitik kireçtaşı (KK), dolomitik kireçtaşı (DK) ve inşaat yıkıntı atığı (İYA)) sülfürce zengin (%15,82 S<sup>2-</sup>) cevher zenginleştirme atığı yerine belirli oranlarda (%5, %10 ve %15) kullanılmasının ÇMD'nin dayanım-duraylılık özelliklerine, asit ve sülfat oluşumuna ve mikroyapı özelliklerine (toplam porozite, gözenek boyut dağılımı vb.) etkileri araştırılmıştır. Ayrıca 6 farklı asit nötralizasyon malzemesi (ANM) kullanımı ile üretilen 1,0 m<sup>3</sup> ÇMD karışımında bağlayıcı oranının azaltılması sonucunda çimento sarfiyatında meydana gelen tasarruf miktarları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Sülfürlü maden atığı (pirit atık) ve 6 farklı asit nötralizasyon edici endüstriyel atık/artık malzemelerinin (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) yapılan asit-baz hesaplama (ABH) testleri sonucunda pirit atığın asit üretme potansiyelinin yüksek (NNP= -486 kg CaCO<sub>3</sub>/ton atık) olduğu, buna karşın ANP bulunan malzemelerin asit oluşumu konusunda nötralizasyon potansiyellerinin genel olarak oldukça yüksek (NNP>90-988 kg CaCO<sub>3</sub>/ton atık) olduğu tespit edilmiştir.
2. Bağlayıcı oranı, ikame oranı ve karışım özelliklerinden bağımsız olarak MA ikameli numuneler haricinde bütün ÇMD numunelerinin basınç dayanımları 90 güne kadar artarken, 90 günden sonra (90-360 gün) numunelerin TEBD değerlerinde düşüş eğilimi meydana gelmiştir.
3. Sülfürlü atık yerine yapılan ANM (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) ikame oranı arttıkça tüm karışım tiplerinde ve bağlayıcı oranlarında TEBD'nin arttığı belirlenmiştir. YFC ve C-UK gibi puzolanik özelliği bulunan malzemelerin ikame edilmesiyle %8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD numuneleri tüm ikame oranlarında (%5, %10 ve %15) ve kür sürelerinde (7, 28, 90, 180 ve 360 gün) kontrol ÇMD numunelerine kıyasla sırasıyla %44-519 ve %0,4-405 oranlarında daha yüksek TEBD değerleri üretirken, diğer malzemeler (MA, KK, DK ve İYA) ile genellikle %15 ikame oranında hazırlanan ÇMD numunelerinin TEBD değerlerinin kontrol numunesine kıyasla nispeten yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

4. ÇMD uygulamasının kullanıldığı yeraltı maden işletmelerinde cevher üretiminin yapıldığı bölgelere komşu olan cevheri alınmış üretim açıklıklarına yerleştirilmiş olan dolgunun duraylılığını koruyarak yeraltında güvenli çalışma koşullarının tesis edilmesi ve üretim döngüsünün sorunsuz devam etmesi için 28-360 gün arasında istenen 1,0 MPa basınç dayanımını %7,5 bağlayıcı oranında hazırlanan %5 MA, %5 KK ve %5 DK ikameli ÇMD numuneleri dışındaki tüm numuneler sağlamıştır. Ayrıca, üretilen dolgunun tavan (zemin) tahkimatı olarak kullanılabilmesi için aynı kür süreleri boyunca istenen 5,0 MPa dayanım değerini, bağlayıcı oranından bağımsız olarak sadece %15 ikame oranında hazırlanan YFC ve C-UK içeren numunelerin sağladığı tespit edilmiştir.
5. ÇMD'deki uzun dönem (90-360 gün) duraylılık problemleri (dayanım kaybı) değerlendirildiğinde, %8,5 bağlayıcı oranına sahip kontrol ÇMD numunelerinin dayanım kaybının %15,92 olduğu, buna karşın, iki farklı bağlayıcı oranında (%8,5 ve %7,5) hazırlanan özellikle %15 ANM (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) ikameli ÇMD numunelerinde gerçekleşen dayanım kaybı bağlayıcı oranına göre sırasıyla %6,75 ve %8,90'a kadar azalmıştır.
6. %7,5 bağlayıcı oranında ve sülfürlü atık yerine %15 oranında YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA ikame edilerek hazırlanmış olan tüm ÇMD numunelerinin %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan kontrol (%100 sülfürlü atık) ÇMD numunelerine kıyasla daha yüksek mekanik performans gösterdiği ve böylece bağlayıcı oranının %1 azaltılması sonucu 1,0 m<sup>3</sup> ÇMD üretiminde %12,0-15,1 arasında değişen oranlarda bağlayıcı tasarrufu sağlandığı belirlenmiştir.
7. Bağlayıcı oranı, ikame oranı ve karışım özelliklerinden bağımsız olarak bütün ÇMD numunelerinin pH değerleri erken kür sürelerinde ( $\leq 28$  gün) alkali seviyelerde (pH=10,35-12,90) seyrederken, daha sonra (28-360 gün) numunelerin asit oluşumu artmıştır. ANP'nin oldukça yüksek olduğu (NNP>319-988 kg CaCO<sub>3</sub>/ton atık) (İYA hariç) belirlenen malzemelerin (YFC, MA, C-UK, KK, DK) %5-15 ikamesinin bağlayıcı oranı ve kür süresinden bağımsız olarak kontrol numunesine kıyasla asit oluşumunu azalttığı (pH değerlerini arttırdığı) gözlenmiştir. 360 gün sonunda kontrol numunesinin pH değeri asidik seviyeye (6,42) düşerken, %8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranında hazırlanan özellikle %15 ANM ikameli numunelerin pH değerleri sırasıyla 8,35-9,88 ve 7,95-9,50 arasında kalmayı başarabilmiştir.

8. Atık malzeme içerisinde başlangıçta bulunan sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) iyonlarının bağlayıcı bileşenleri tarafından tüketilmesi kaynaklı karışım özelliklerinden bağımsız olarak tüm ÇMD numunelerinde 7 gün sonunda sülfat iyonuna rastlanmamıştır. Tüm ÇMD numunelerinde hidrasyon süreci devam ettiği için 28-90 gün aralığında  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonları konsantrasyonu yavaş artarken, 90 günden sonra sülfat iyonu salınımında daha hızlı artış gözlemlenmiştir. Atık malzeme yerine yapılan ANM ikame oranı arttıkça bağlayıcı oranı ve karışım özelliklerinden bağımsız olarak sülfat iyonu oluşumunun azaldığı ve kontrol ÇMD numuneleriyle karşılaştırıldığında özellikle %15 ANM ikameli ÇMD numunelerinin sülfat konsantrasyonunun tüm kür sürelerinde %72,1 oranına kadar azaldığı belirlenmiştir.
9. Tüm ÇMD (kontrol ve %5-15 ANM ikameli) numunelerinin toplam ( $n_{top}$ ) porozite değerlerinin kür süresinin artmasıyla birlikte azaldığı tespit edilmiştir. ÇMD karışımı içerisinde sülfürlü atık yerine kullanılan ANM ikame oranının artması numunelerin  $n_{top}$  değerlerini azaltmıştır. Kontrol ÇMD numunesiyle karşılaştırıldığında, kür süresinden bağımsız olarak KK ve DK malzemeleri sadece %15 ikame oranında daha düşük  $n_{top}$  değerleri üretebilmişken, diğer malzemeler (YFC, MA, C-UK ve İYA) tüm ikame oranlarında (%5 ve %15) toplam porozitenin önemli ölçüde (%12,43'e kadar) azalmasını sağlamıştır.
10. Porozite testine ait teknik parametrelerden olan büyük boyutlu ( $n_{Büyük}$ ) porozite değerleri kür süresinin artmasıyla azalırken, orta boyutlu ( $n_{Orta}$ ) porozite değerlerinin genel olarak arttığı anlaşılmıştır.  $n_{top}$  değerlerinde olduğu gibi %5-15 oranında ANM ikamesinin  $n_{Büyük}$  değerlerinin azalmasını ve  $n_{Orta}$  değerlerinin artmasını sağlayarak porozite gelişimine (toplam ve kademeli porozite) gözle görülür derecede olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir.
11. Bir diğer parametre olan eşik gözenek çaplarının ( $d_{eş}$ ) kür süresi artışıyla birlikte genel olarak büyümesine/genişlemesine rağmen, ANM ikameli ÇMD numunelerinin  $d_{eş}$  değerlerinin kür süresinden bağımsız olarak kontrol numunesine kıyasla nispeten daha küçük olduğu ve özellikle %15 ANM ikamesinin eşik gözenek çapını 28 ve 180 günde sırasıyla %33,7-78,1 ve %66,0-88,8 oranlarında küçülttüğü belirlenmiştir.
12. Mekanik performans, asit ve sülfat oluşumuna karşı direnç, mikroyapı (porozite vb.) ve bağlayıcı tasarrufu parametreleri değerlendirildiğinde en faydalı ve kullanışlı malzemenin C-UK olduğu anlaşılmıştır.



Sonuç olarak ÇMD karışımı içerisinde sülfürlü atık yerine %5-15 oranında ANP'ye sahip endüstriyel atık/artık malzemelerinin (YFC, MA, C-UK, KK, DK ve İYA) kullanımı sonucu ÇMD'nin mekanik performansının (dayanım ve duraylılık) ve asit-sülfat oluşumuna karşı direncin arttırılabileceği, mikroyapı özelliklerinin (toplam ( $n_{top}$ ) porozite, gözenek boyut dağılımı, büyük boyutlu porozite ( $n_{büyük}$ ), orta boyutlu porozite ( $n_{orta}$ ), eşik gözenek çapı ( $d_{eş}$ )) iyileştirilebileceği ve ÇMD tesisi işletme maliyetleri konusunda oldukça önemli bir parametre olan bağlayıcı (çimento) giderlerinde tasarruf sağlanabileceği ortaya konmuştur.



## 5. ÖNERİLER

1. Puzolanik özelliği ve yüksek CaO içeriği bulunan YFC ve C-UK ikamesiyle %8,5 ve %7,5 bağlayıcı oranlarında hazırlanan ÇMD numunelerinden oldukça yüksek mekanik performans elde edilmesinden dolayı daha düşük (<%6) bağlayıcı oranlarının ÇMD performansına etkisi detaylı bir şekilde araştırılmalı ve üretilen dolgunun ekonomik analizi yapılmalıdır.
2. Sülfürlü atık malzemeye ikame olarak belirli oranlarda (%5-15) kullanılan öğütülmüş malzemelerin detaylı olarak öğütülebilirlik testleri gerçekleştirilmeli ve üretilen ÇMD'nin ekonomik analizinin daha gerçekçi olarak yapılması sağlanmalıdır.
3. Üretilen ÇMD'nin kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılık performansının, asit ve sülfat oluşumuna karşı direncinin ve mikroyapı gelişiminin daha fazla iyileştirilmesi amacıyla puzolanik özelliğe sahip malzemeler (YFC, C-UK vb.) ile yüksek CaO içeriğine sahip malzemeler (MA, KK vb.) toplam ikame oranına bağlı olarak belirli oranlarda (25:75, 50:50 ve 75:25 gibi) karıştırılarak yeni ÇMD üretimi araştırılmalıdır.
4. Yeraltı üretim boşluklarında depolanan ÇMD'nin statik ve kinetik testleri yapılarak özellikle uzun dönemde asit ve sülfat oluşumu kaynaklı yeraltı su kalitesine (ağır metal salınımı vb.) etkisi incelenmelidir.
5. ÇMD'de meydana gelmesi muhtemel oksidasyonun detaylı bir şekilde araştırılması için yeraltında (in-situ) karot numuneleri alınarak incelenmelidir. Ayrıca, yeraltından veya gözlem kuyularından alınacak su örnekleri oksidasyon kaynaklı asit-sülfat oluşumu ve ağır metal salınımı açısından detaylı bir şekilde değerlendirilmelidir.

## 6. KAYNAKLAR

- Açıkgöz, A., 2015. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflu Betonların Hidratasyon Sıcaklığının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 82 s.
- Aden, A.M., 2017. Effect of FA and GGBFS on the Properties of Geopolymer Mortar, Master Thesis, Hasan Kalyoncu University Graduate School of Natural & Applied Sciences, Gaziantep, 61 p.
- Akbulut, H. ve Gürer, C., 2007. Use of Aggregates Produced from Marble Quarry Waste in Asphalt Pavements, Building and Environment, 42,5, 1921-1930.
- Aliabdo, A.A., Elmoaty, A.E.M.A. ve Auda, E.M., 2014. Re-use of Waste Marble Dust in the Production of Cement and Concrete, Construction and Building Materials, 50, 28-41.
- Alp, İ., Deveci, H., Yılmaz, E., Yılmaz, A.O. ve Kesimal, A., 2003. Investigation of the Potential Use of the Quarry Product from Taşhane-Terme as Trass Raw material in Cement Industry, Proceedings of the International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, September, İstanbul, Proceedings Book: 553-559.
- Alyamaç, K.E. ve Aydın, A.B., 2015. Concrete Properties Containing Fine Aggregate Marble Powder, KSCE Journal of Civil Engineering, 19,7, 2208-2216.
- Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21,1, 193-203.
- Aruntaş, H.Y., Gürü, M., Dayı, M. ve Tekin, I., 2010. Utilization of Waste Marble Dust as an Additive in Cement Production, Materials & Design, 31,8, 4039-4042.
- ASTM C39/C39M-16b, 2016. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 143, 2008. Standard Test Method for Slump of Hydraulic - Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 265-08, 2008. Standard Test Method for Water-Extractable Sulfate in Hydrated Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618-17a, 2017. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA

- ASTM C 1580-09, 2009. Standard Test Method for Water-Soluble Sulfate in Soil, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4404-18, 2018. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4972-01, 2007. Standard Test Method for pH of Soils, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4980-89, 2003. Standard Test Methods for Screening of pH in Waste, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aytekin, S., 2009. Uçucu Küllerinin Killi Zeminlerin Islahında Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 83 s.
- Babajide, O., Musyoka, N., Petrik, L. ve Ameer, F., 2012. Novel zeolite Na-X synthesized from Fly Ash as a Heterogeneous Catalyst in Biodiesel Production, Catalysis Today, 190,1, 54-60.
- Başar, H.M., Pelitli, V. ve Güzel, B., 2016. Termik Santrallerden Kaynaklanan Küllerin Yönetimi-Uygulama Örnekleri, TÜBİTAK MAM ÇTÜE, Teknik Sunum, Ekim, Ankara, 21s.
- Başçetin, A. ve Eker, H., 2018. Uçucu Külün, Çimentolu Macun Dolgunun Mekanik Dayanımına Etkisi, Kapadokya Yerbilimleri Sempozyumu, Ekim, Niğde, Bildiriler Kitabı: 218-225.
- Belem, T., Bussière, B. ve Benzaazoua, M., 2001. The Effect of Microstructural Evolution on the Physical Properties of Paste Backfill. In Proceedings of the 8th International Tailings and Mine Waste Conference, January, Fort Collins, Colorado, Proceedings Book: 365-374.
- Belem, T. ve Benzaazoua, M., 2004. An Overview on the Use of Paste Backfill Technology as a Ground Support Method in Cut-and-fill Mines. In Proceedings of the 5th International Symposium on Ground support in Mining and Underground Construction, September, Perth, Proceedings Book: 637-650.
- Belem, T. ve Benzaazoua, M., 2008. Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology. Geotechnical and Geological Engineering, 26,2, 147–174.
- Belem, T., El Aatar, O., Bussière, B. ve Benzaazoua, M., 2016. Gravity-driven 1-D Consolidation of Cemented Paste Backfill in 3-m-high Columns, Innovative Infrastructure Solutions, 1,1, 37.
- Benzaazoua, M., Belem, T. ve Bussiere, B., 2002. Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill, Cement and Concrete Research, 32,7, 1133-1144.

- Benzaazoua, M., Fall, M. ve Belem, T., 2004. A Contribution to Understanding the Hardening Process of Cemented Pastefill, Minerals Engineering, 17,2, 141-152.
- Bestgen, J., Cetin, B. ve Tanyu, B. F., 2016. Effects of Extraction Methods and Factors Leaching of Metals from Recycled Concrete Aggregates, Environmental Science and Pollution Research, 23,13, 12983-13002.
- Bilgin, N., Yeprem, H.A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E. ve Marşoğlu, M., 2012. Use of Waste Marble Powder in Brick Industry, Construction and Building Materials, 29, 449-457.
- Binici, H., Kaplan, H. ve Yilmaz, S., 2007. Influence of Marble and Limestone Dusts as Additives on Some Mechanical Properties of Concrete, Scientific Research and Essays, 2,9, 372-379.
- Binici, H., Shah, T., Aksogan, O. ve Kaplan, H., 2008. Durability of Concrete Made with Granite and Marble as Recycle Aggregates, Journal of Materials Processing Technology, 208,1-3, 299-308.
- Blissett, R.S. ve Rowson, N.A., 2012. A Review of the Multi-Component Utilisation of Coal Fly Ash, Fuel, 97, 1-23.
- Celik, K., Jackson, M.D., Mancio, M., Meral, C., Emwas, A.H., Mehta, P.K. ve Monteiro, P.J.M., 2014. High-volume Natural Volcanic Pozzolan and Limestone Powder as Partial Replacements for Portland Cement in Self-compacting and Sustainable Concrete, Cement and Concrete Composites, 45, 136-147.
- Chen, J., Bradshaw, S., Benson, C.H., Tinjum, J.M. ve Edil, T.B., 2012. pH-dependent Leaching of Trace Elements from Recycled Concrete Aggregate, In Proceedings of GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, March, Oakland, California, Proceedings Book: 3729-3738
- Chen, Y.T., Li, J.T., Chen, L.X., Hua, Z.S., Huang, L.N., Liu, J., Xu, B.B., Liao, B. ve Shu, W.S., 2014. Biogeochemical Processes Governing Natural Pyrite Oxidation and Release of Acid Metalliferous Drainage, Environmental Science & Technology, 48,10, 5537-5545.
- Chen, Q., Zhang, Q., Qi, C., Fourie, A. ve Xiao, C., 2018. Recycling Phosphogypsum and Construction Demolition Waste for Cemented Paste Backfill and Its Environmental Impact, Journal of Cleaner Production, 186, 418-429.
- Cihangir, F., 2011. Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufunun Macun Dolguda Bağlayıcı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 181 s.
- Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Turan, A. ve Deveci, H., 2012. Utilisation of Alkali-Activated Blast Furnace Slag in Paste Backfill of High-Sulphide Mill Tailings: Effect of Binder Type and Dosage, Minerals Engineering, 30, 33-43.

- Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Deveci, H. ve Erdemir, F., 2015. Paste Backfill of High-sulphide Mill Tailings using Alkali-activated Blast Furnace Slag: Effect of Activator Nature, Concentration and Slag Properties, Minerals Engineering, 83, 117-127.
- Cihangir, F. ve Akyol, Y., 2018. Mechanical, Hydrological and Microstructural Assessment of The Durability of Cemented Paste Backfill Containing Alkali-Activated Slag. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 32,2, 123-143.
- Çakır, Ö., 2014. Experimental Analysis of Properties of Recycled Coarse Aggregate (RCA) Concrete with Mineral Additives, Construction and Building Materials, 68, 17-25.
- Çetiner, E.G., Ünver, B. ve Hindistan, M.A., 2006. Maden Atıkları ile İlgili Mevzuat: Avrupa Birliği ve Türkiye, Madencilik, 45,1, 23-34.
- Çolak, C., 2018. Mechanical and Durability Properties of Alkali Activated Slag Concrete, Master Thesis, İstanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul, 89 p.
- Demir, E., 2017. Bir Mermer Ocağından Çıkarılan Blok Mermer ile Mermer Fabrikasından Çıkan Ürünlerin Maliyet Analizi; Barla Mermer Ocağı ve Fabrikası Örneği, Eğirdir-Isparta, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 125 s.
- Dhokte, A.O., Khillare, S.L., Lande, M.K. ve Arbad, B.R., 2011. Synthesis, Characterization of Mesoporous Silica Materials from Waste Coal Fly Ash for the Classical Mannich Reaction, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 17,4, 742-746.
- Dong, Q., Liang, B., Jia, L. ve Jiang, L., 2019. Effect of Sulfide on the Long-term Strength of Lead-zinc Tailings Cemented Paste Backfill, Construction and Building Materials, 200, 436-446.
- Dudeney, A.W.L., Chan, B.K.C., Bouzalakos, S. ve Huisman, J.L., 2013. Management of Waste and Wastewater from Mineral Industry Processes, Especially Leaching of Sulphide Resources: State of The Art, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 27,1, 2-37.
- Eguchi, K., Teranishi, K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K. ve Narikawa, M., 2007. Application of Recycled Coarse Aggregate by Mixture to Concrete Construction, Construction and Building Materials, 21,7, 1542-1551.
- Engelsen, C.J., Van Der Sloot, H.A., Wibetoe, G., Petkovic, G., Stoltenberg-Hansson, E. ve Lund, W., 2009. Release of Major Elements from Recycled Concrete Aggregates and Geochemical Modelling, Cement and Concrete Research, 39,5, 446-459.

- Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009. Utilization of Industrial Waste Products as Pozzolan Material in Cemented Paste Backfill of High Sulphide Mill Tailings, Journal of Hazardous Materials, 168,2-3, 848-856.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A. ve Deveci, H., 2012. Tesis Atıklarının Yönetiminde Macun Dolgu Teknolojisi, Madencilik Türkiye, 24, 54-59.
- Ercikdi, B., Baki, H. ve İzki, M., 2013. Effect of Desliming of Sulphide-Rich Mill Tailings on the Long-Term Strength of Cemented Paste Backfill, Journal of Environmental Management, 115, 5-13.
- Ercikdi, B., Yılmaz, T. ve Külekci, G., 2014. Strength and ultrasonic properties of cemented paste backfill. Ultrasonics, 54,1, 195-204.
- Ercikdi, B., Külekci, G. ve Yılmaz, T., 2015. Utilization of Granulated Marble Wastes and Waste Bricks as Mineral Admixture in Cemented Paste Backfill of Sulphide-rich Tailings, Construction and Building Materials, 93, 573-583.
- Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A. ve Deveci, H., 2017. Practical Importance of Tailings for Cemented Paste Backfill, In Paste Tailings Management, Editors: Erol Yılmaz ve Mamadou Fall, Springer International Publishing, Cham/ Switzerland, 7-32.
- Erçikdi, B., 2009. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 128 s.
- Erçikdi, B. ve Yılmaz, T., 2019. Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım ve Mikroyapı Özellikleri; C-Sınıfı Uçucu Külün Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 21,61, 15-23.
- Erkan, Y., 1998. Metamorfik Petrografi. Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayını, No: 28, Ankara, 202 s.
- Erol, M., Küçükbayrak, S. ve Ersoy-Mericboyu, A., 2008. Comparison of the Properties of Glass, Glass-Ceramic and Ceramic Materials Produced from Coal Fly Ash, Journal of Hazardous Materials, 153,1-2, 418-425.
- European Commission, 2009. Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities, 427-435.
- Everett, D.H., 1972. IUPAC Manual of Symbols and Terminology, Appendix 2, Part 1, Colloid and Surface Chemistry, Pure and Applied Chemistry, 31, 578-621.
- Fall, M. ve Benzaazoua, M., 2005. Modeling the Effect of Sulphate on Strength Development of Paste Backfill and Binder Mixture Optimization. Cement and Concrete Research, 35,2, 301-314.

- Fall, M., Belem, T., Samb, S. ve Benzaazoua, M., 2007. Experimental Characterization of the Stress-Strain Behaviour of Cemented Paste Backfill in Compression, Journal of Materials Science, 42, 3914-3922.
- Fall, M., Adrien, D., Celestin, J.C., Pokharel, M. ve Toure, M., 2009. Saturated Hydraulic Conductivity of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 22,15, 1307-1317.
- Fall, M. ve Samb, S.S., 2009. Effect of High Temperature on Strength and Microstructural Properties of Cemented Paste Backfill, Fire Safety Journal, 44,4, 642-651.
- Fall, M. ve Nasir, O., 2010. Mechanical Behaviour of the Interface between Cemented Tailings Backfill and Retaining Structures under Shear Loads, Geotechnical and Geological Engineering, 28,6, 779-790.
- Fall, M. ve Pokharel, M., 2010. Coupled Effects of Sulphate and Temperature on the Strength Development of Cemented Tailings Backfills: Portland Cement-Paste Backfill, Cement and Concrete Composites, 32,10, 819-828.
- Feng, D., Van Deventer, J.S.J. ve Aldrich, C., 2004. Removal of pollutants from Acid Mine Wastewater Using Metallurgical By-Product Slags, Separation and Purification Technology, 40,1, 61-67.
- Fernández-Caliani, J.C. ve Barba-Brioso, C., 2010. Metal Immobilization in Hazardous Contaminated Minesoils after Marble Slurry Waste Application. A Field Assessment at the Tharsis Mining District (Spain), Journal of Hazardous Materials, 181,1-3, 817-826.
- Fernández-Naranjo, F.J., Alberruche, E., Rodríguez, V., Arranz, J.C. ve Vadillo, L., 2016. Recycled Construction and Demolition Waste in Mining Rehabilitation. Proceedings of the 8th International Conference on Waste Management and the Environment, June, Valencia, Proceedings Book: 27-36.
- Genty, T., Bussière, B., Potvin, R., Benzaazoua, M., ve Zagury, G.J., 2012. Dissolution of Calcitic Marble and Dolomitic Rock in High Iron Concentrated Acid Mine Drainage: Application to Anoxic Limestone Drains, Environmental Earth Sciences, 66,8, 2387-2401.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Kocabağ, M.E., Bayram, V. ve Mermerdaş, K., 2012. Fresh and Hardened Characteristics of Self Compacting Concretes Made with Combined Use of Marble Powder, Limestone Filler, and Fly Ash, Construction and Building Materials, 37, 160-170.
- Ghirian, A. ve Fall, M., 2014. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical–Chemical Behaviour of Cemented Paste Backfill in Column Experiments: Part II: Mechanical, Chemical and Microstructural Processes and Characteristics, Engineering Geology, 170, 11-23.



- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S. ve Demir, İ., 2008. Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4,2, 85-94.
- Guo, J., Bao, Y. ve Wang, M., 2018. Steel Slag in China: Treatment, Recycling, and Management, Waste Management, 78, 318-330.
- Gürü, M., Akyüz, V. ve Akın, E., 2005. Mermer Tozu Polyester Kompozitlerde Dolgu Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi, Politeknik Dergisi, 8,3, 271-275.
- Hassani, F. ve Archibald, J., 1998. Mine backfill, Canadian Institute of Mine, Metallurgy and Petroleum, Published on CD-ROM Proceedings, Canada, 263 p.
- Hassani, F.P., Ouellet, J. ve Hossein, M., 2001. Strength Development in Underground High-Sulphate Paste Backfill Operation, CIM Bulletin, 94,1050, 57-62.
- Horkoss, S., Escadeillas, G., Rizk, T. ve Lteif, R., 2016. The Effect of the Source of Cement  $SO_3$  on the Expansion of Mortars, Case Studies in Construction Materials, 4, 62-72.
- Işık, A., 2018. Farklı Mineral Katkı İçeren Harç Numunelerinin Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 110 s.
- Jones, S.N. ve Cetin, B., 2017. Evaluation of Waste Materials for Acid Mine Drainage Remediation, Fuel, 188, 294-309.
- Karaca, F.M., 2012. İstanbul Tuzla-Aydınlı İnşaat ve Yıkıntı Atıkları Geri Kazanım Tesisi İşletimi. Atık Yönetimi Sempozyumu, Nisan, Antalya, Bildiriler Kitabı: 12-28.
- Karapınar, N., 2009. Maden Atık Yönetimi; Macun Teknolojisi Kullanımı, Bilimsel Madencilik Dergisi, 48,1, 31-42.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Ercikdi, B., Alp, I. ve Deveci, H., 2005. Effect of Properties of Tailings and Binder on the Short-and Long-term Strength and Stability of Cemented Paste Backfill, Materials Letters, 59,28, 3703-3709.
- Kırgız, M.S., 2016. Fresh and Hardened Properties of Green Binder Concrete Containing Marble Powder and Brick Powder, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 20,1, 64-101.
- Külekçi, G., Yılmaz, A.O., 2018. İnşaat Atıklarından Elde Edilen Geri Kazanılmış Agreganın Madencilik Yöntemlerinde Kullanılması, Kapadokya Yerbilimleri Sempozyumu, Ekim 2018, Niğde, Bildiriler Kitabı: 212-217.
- Li, W. ve Fall, M., 2018. Strength and Self-Desiccation of Slag-Cemented Paste Backfill at Early Ages: Link to Initial Sulphate Concentration, Cement and Concrete Composites, 89, 160-168.

- López-Badillo, C.M., López-Cuevas, J., Gutiérrez-Chavarría, C.A., Rodríguez-Galicia, J.L. ve Pech-Canul, M.I., 2013. Synthesis and Characterization of  $BaAl_2Si_2O_8$  Using Mechanically Activated Precursor Mixtures Containing Coal Fly Ash, Journal of the European Ceramic Society, 33,15-16, 3287-3300.
- Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z. ve Hu, Y., 2018. A New Procedure for Recycling Waste Tailings as Cemented Paste Backfill to Underground Stopes and Open Pits, Journal of Cleaner Production, 188, 601-612.
- Mangane, M.B.C., Argane, R., Trauchessec, R., Lecomte, A. ve Benzaazoua, M., 2018. Influence of Superplasticizers on Mechanical Properties and Workability of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 116, 3-14.
- Manoharan, V., Yunusa, I.A.M., Loganathan, P., Lawrie, R., Skilbeck, C.G., Burchett, M.D., Murray, B.R. ve Eamus, D., 2010. Assessments of Class F fly ashes for Amelioration of Soil Acidity and their Influence on Growth and Uptake of Mo and Se by Canola, Fuel, 89,11, 3498-3504.
- Martínez, P.S., Cortina, M.G., Martínez, F.F. ve Sánchez, A.R., 2016. Comparative Study of Three Types of Fine Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste (CDW), and their Use in Masonry Mortar Fabrication, Journal of Cleaner Production, 118, 162-169.
- Memon, A.H., Radin, S.S., Zain, M.F.M. ve Trottier, J.F., 2002. Effects of Mineral and Chemical Admixtures on High-Strength Concrete in Seawater, Cement and Concrete Research, 32,3, 373-377.
- Mikhailova, O., Yakovlev, G., Maeva, I. ve Senkov, S., 2013. Effect of Dolomite Limestone Powder on the Compressive Strength of Concrete, Procedia Engineering, 57, 775-780.
- Moon, G.D., Oh, S., Jung, S.H. ve Choi, Y.C., 2017. Effects of the Fineness of Limestone Powder and Cement on the Hydration and Strength Development of PLC Concrete, Construction and Building Materials, 135, 129-136.
- Mylona, E., Xenidis, A. ve Paspaliaris, I., 2000. Inhibition of Acid Generation from Sulphidic Wastes by the Addition of Small Amounts of Limestone, Minerals Engineering, 13,10-11, 1161-1175.
- Nath, P. ve Sarker, P., 2011. Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete, Procedia Engineering, 14, 1149-1149.
- Okumuşoğlu, D., 2009. The Investigation of the Influence of Mining Activities on Surface and Subsurface Water Quality, Master Thesis, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 138 p.
- Onargan, T., Köse, H. ve Deliormanlı, A.H., 1992. Mermer, Üretimi, Kesme Teknolojisi, Ekonomisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, İzmir, 220 s.

- Orejarena, L. ve Fall, M., 2010. The Use of Artificial Neural Networks to Predict the Effect of Sulphate Attack on the Strength of Cemented Paste Backfill, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 69,4, 659-670.
- Ouattara, D., Belem, T., Mbonimpa, M. ve Yahia, A., 2018. Effect of Superplasticizers on the Consistency and Unconfined Compressive Strength of Cemented Paste Backfills, Construction and Building Materials, 181, 59-72.
- Ouellet, S., Bussière, B., Aubertin, M. ve Benzaazoua, M., 2007. Microstructural Evolution of Cemented Paste Backfill: Mercury Intrusion Porosimetry Test Results. Cement and Concrete Research, 37,12, 1654-1665.
- Özalp, F., Yılmaz, H.D., Kara, M., Kaya, Ö. ve Şahin, A., 2016. Effects of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Wastes on Mechanical and Permeability Properties of Paving Stone, Kerb and Concrete Pipes, Construction and Building Materials, 110, 17-23.
- Özbay, E., Erdemir, M. ve Durmuş, H.İ., 2016. Utilization and Efficiency of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Concrete Properties–A review, Construction and Building Materials, 105, 423-434.
- Özdemir, Ö. ve Öz Saraç, U., 2015. Demir-Çelik Metalürjisi, Ders Notu, Sakarya Üniversitesi, Subu-Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 33 s.
- Özer, Y.F., 2012. Bazı Endüstriyel Atıkların Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 106 s.
- Quispe, D., Pérez-López, R., Acero, P., Ayora, C., Nieto, J. M. ve Tucoulou, R., 2013. Formation of a Hardpan in the Co-Disposal of Fly Ash and Sulfide Mine Tailings and its Influence on the Generation of Acid Mine Drainage, Chemical Geology, 355, 45-55.
- Panchal, S., Deb, D. ve Sreenivas, T., 2018. Mill Tailings Based Composites as Paste Backfill in Mines of U-bearing Dolomitic Limestone Ore, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10,2, 310-322.
- Pandey, V.C. ve Singh, N., 2010. Impact of Fly Ash Incorporation in Soil Systems, Agriculture, Ecosystems & Environment, 136,1-2, 16-27.
- Parlak yıldız, M., 2008. Hammadde Olarak Kireçtaşı ve Üretilen Kirecin Standartlara Uygunluğunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 91 s.
- Plante, B., Bussière, B. ve Benzaazoua, M., 2014. Lab to Field Scale Effects on Contaminated Neutral Drainage Prediction from the Tio Mine Waste Rocks, Journal of Geochemical Exploration, 137, 37-47.

- Potgieter-Vermaak, S.S., Potgieter, J.H., Monama, P. ve Van Grieken, R., 2006. Comparison of Limestone, Dolomite and Fly Ash as Pre-treatment Agents for Acid Mine Drainage, Minerals Engineering, 19,5, 454-462.
- Ramezaniyanpour, A.M. ve Hooton, R.D., 2014. A Study on Hydration, Compressive Strength, and Porosity of Portland-limestone Cement Mixes Containing SCMs, Cement and Concrete Composites, 51, 1-13.
- Rashad, A.M., 2018. An Overview on Rheology, Mechanical Properties and Durability of High-volume Slag Used as a Cement Replacement in Paste, Mortar and Concrete, Construction and Building Materials, 187, 89-117.
- Rong, H., Zhou, M. ve Hou, H., 2017. Pore Structure Evolution and its Effect on Strength Development of Sulfate-containing Cemented Paste Backfill, Minerals, 7,1, 8.
- Sadek, D.M., El-Attar, M.M. ve Ali, H.A., 2016. Reusing of Marble and Granite Powders in Self-Compacting Concrete for Sustainable Development, Journal of Cleaner Production, 121, 19-32.
- Saputra, E., Muhammad, S., Sun, H., Ang, H.M., Tadé, M.O. ve Wang, S., 2012. Red Mud and Fly Ash Supported Co Catalysts for Phenol Oxidation, Catalysis Today, 190,1, 68-72.
- Sardinha, M., de Brito, J. ve Rodrigues, R., 2016. Durability Properties of Structural Concrete Containing Very Fine Aggregates of Marble Sludge, Construction and Building Materials, 119, 45-52.
- Semerci, F., 2008. Mardin Kireçtaşının Yapı Taşı Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 124 s.
- Shaikh, F.U.A. ve Supit, S.W.M., 2015. Compressive Strength and Durability Properties of High Volume Fly Ash (HVFA) Concretes Containing Ultrafine Fly Ash (UFFA), Construction and Building Materials, 82, 192-205.
- Shim, M.J., Choi, B.Y., Lee, G., Hwang, Y.H., Yang, J.S., O'Loughlin, E.J. ve Kwon, M.J., 2015. Water Quality Changes in Acid Mine Drainage Streams in Gangneung, Korea, 10 Years after Treatment with Limestone, Journal of Geochemical Exploration, 159, 234-242.
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. ve Smith, R.M., 1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. Industrial Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US EPA 600/2-78-054, 203 p.
- Sun, W., Wang, H. ve Hou, K., 2018. Control of Waste Rock-Tailings Paste Backfill for Active Mining Subsidence Areas, Journal of Cleaner Production, 171, 567-579.

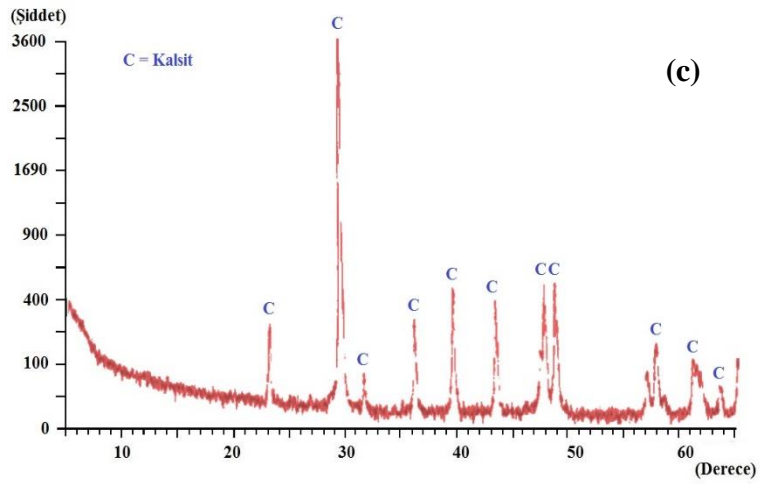
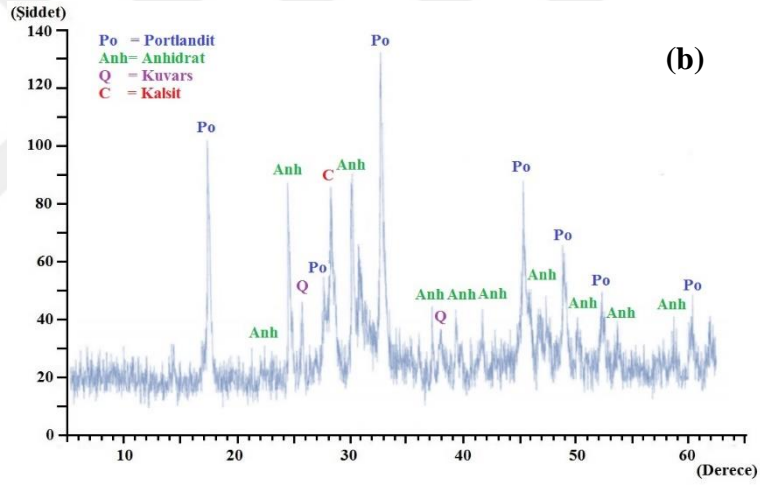
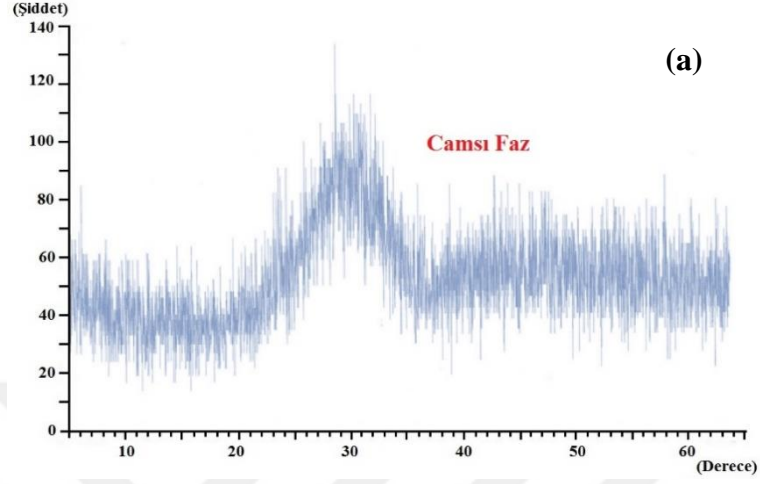
- Tangüler Bayramtan, M., 2015. Characterization of Fly Ashes from Thermal Power Plants in Turkey, Master Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 119 p.
- Tabsh, S.W. ve Abdelfatah, A.S., 2009. Influence of Recycled Concrete Aggregates on Strength Properties of Concrete, Construction and Building Materials, 23,2, 1163-1167.
- Tariq, A. ve Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings, Waste Management Research, 160,4, 155–166.
- Topçu, İ.B. ve Şengel, S., 2004. Properties of Concretes Produced with Waste Concrete Aggregate, Cement and Concrete Research, 34,8, 1307-1312.
- Tozsin, G., Arol, A.I., Oztas, T. ve Kalkan, E., 2014a. Using Marble Wastes as a Soil Amendment for Acidic Soil Neutralization, Journal of Environmental Management, 133, 374-377.
- Tozsin, G., Oztas, T., Arol, A. I., Kalkan, E. ve Duyar, O., 2014b. The Effects of Marble Wastes on Soil Properties and Hazelnut Yield, Journal of Cleaner Production, 81, 146-149.
- Tozsin, G., 2016. Inhibition of Acid Mine Drainage and Immobilization of Heavy Metals from Copper Flotation Tailings Using a Marble Cutting Waste, International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 23,1, 1-6.
- Tur, Ş., 2007. Afyonkarahisar’da Mermer Artıklarının Depolanması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 122 s.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinoğlu, A., 2009. Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), AR-GE Enstitüsü, Ankara, s. 114.
- Uygunoğlu, T., Topçu, İ.B. ve Çelik, A.G., 2014. Use of Waste Marble and Recycled Aggregates in Self-compacting Concrete for Environmental Sustainability, Journal of Cleaner Production, 84, 691-700.
- Vadapalli, V.R., Klink, M.J., Etchebers, O., Petrik, L.F., Gitari, W., White, R. A., Key, D. ve Iwuoha, E., 2008. Neutralization of Acid Mine Drainage Using Fly Ash, and Strength Development of the Resulting Solid Residues, South African Journal of Science, 104,7-8, 317-322.
- Wang, X.Y. ve Park, K.B., 2015. Analysis of Compressive Strength Development of Concrete Containing High Volume Fly Ash, Construction and Building Materials, 98, 810-819.
- Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Ngamjarrojana, A. ve Chaipanich, A., 2014. Compressive Strength and Chloride Resistance of Self-compacting Concrete

Containing High Level Fly Ash and Silica Fume, Materials & Design, 64, 261-269.

- Xenidis, A., Mylona, E. ve Paspaliaris, I., 2002. Potential Use of Lignite Fly Ash for the Control of Acid Generation from Sulphidic Wastes, Waste Management, 22,6, 631-641.
- Xu, G. ve Shi, X., 2018. Characteristics and Applications of Fly Ash as a Sustainable Construction Material: A State-of-the-art Review, Resources, Conservation and Recycling, 136, 95-109.
- Yao, Z.T., Ji, X.S., Sarker, P.K., Tang, J.H., Ge, L.Q., Xia, M.S. ve Xi, Y.Q., 2015. A Comprehensive Review on the Applications of Coal Fly Ash, Earth-Science Reviews, 141, 105-121.
- Yılmaz, T., 2013. Numune Boyutunun Macun Dolgu Dayanımına ve Ultrasonik P-Dalga Hızına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 91 s.
- Yılmaz, T. ve Ercikdi, B., 2016. Predicting the Uniaxial Compressive Strength of Cemented Paste Backfill from Ultrasonic Pulse Velocity Test, Nondestructive Testing and Evaluation, 31,3, 247-266.
- Yılmaz, T., Erçikdi, B. ve Cihangir, F., 2017. Yüksek Fırın Cürufu ve Perlit İkamesinin Çimentolu Macun Dolgunun Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32,2, 239-252.
- Yılmaz, T., Erçikdi, B. ve Cihangir, F., 2018. Mermer Artıklarının Macun Dolguda Sülfürce Zengin Atık Malzemeye İkame Olarak Kullanımı, Uluslararası Madencilik ve Çevre Sempozyumu (ISME 2017), Eylül, Bodrum-Muğla, Bildiriler Kitabı: 855-868.
- Yılmaz, T., Ercikdi, B. ve Deveci, H., 2018. Utilization of Construction and Demolition Waste as Cemented Paste Backfill Material for Underground Mine Openings, Journal of Environmental Management, 222, 250-259.
- Yılmaz, E., Belem, T., Bussière, B. ve Benzaazoua, M., 2011. Relationships between Microstructural Properties and Compressive Strength of Consolidated and Unconsolidated Cemented Paste Backfills, Cement and Concrete Composites, 33,6, 702-715.
- Yılmaz, E., Belem, T. ve Benzaazoua, M., 2014. Effects of Curing and Stress Conditions on Hydromechanical, Geotechnical and Geochemical Properties of Cemented Paste Backfill, Engineering Geology, 168, 23-37.
- Yılmaz, E. ve Fall, M., 2017. Introduction to Paste Tailings Management, In Paste Tailings Management, Editors: Erol Yılmaz ve Mamadou Fall, Springer International Publishing, Cham/Switzerland, 1-5.

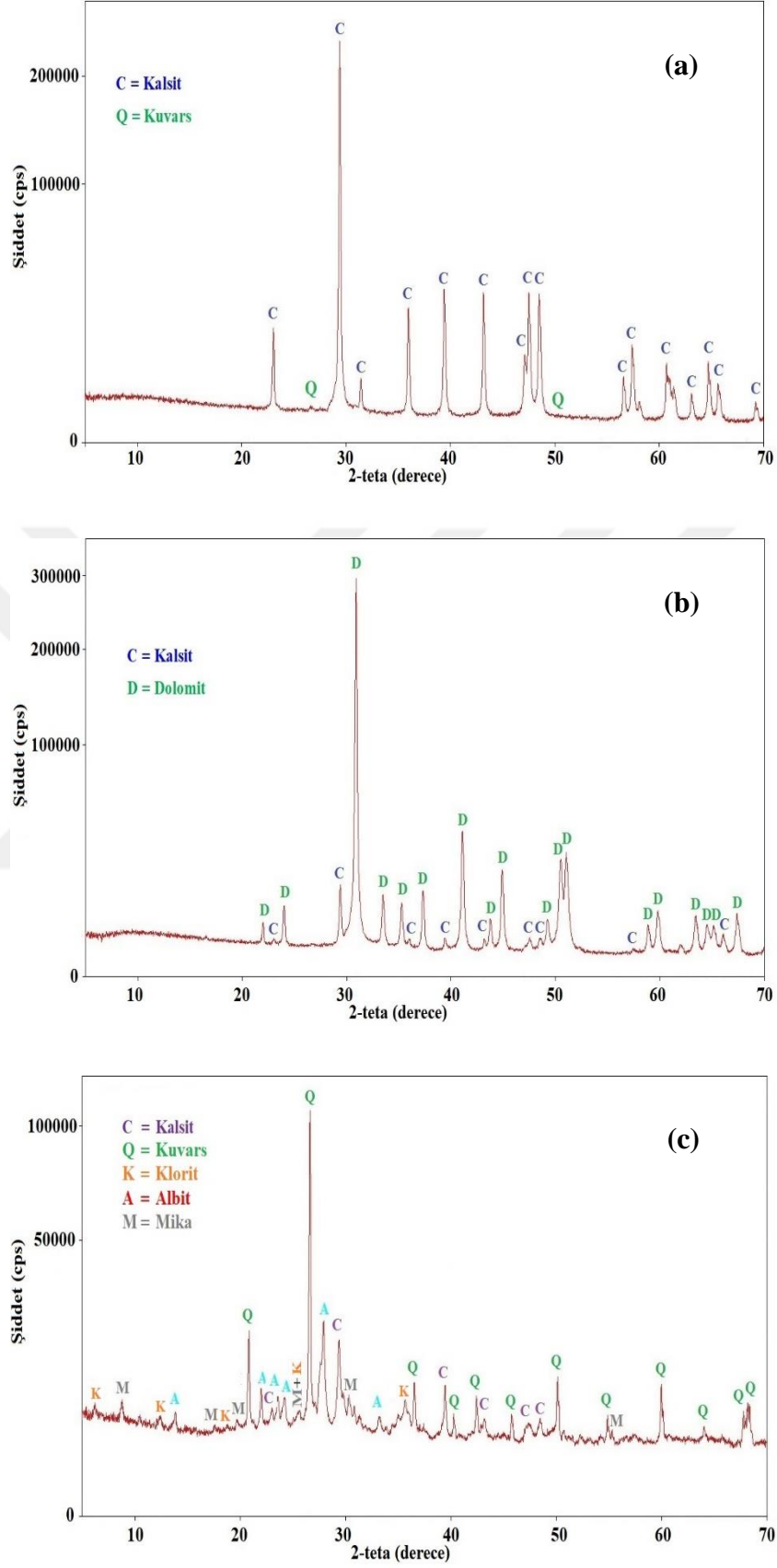
- Yilmaz, E. ve Guresci, M., 2017. Design and Characterization of Underground Paste Backfill, In Paste Tailings Management, Editors: Erol Yilmaz ve Mamadou Fall, Springer International Publishing, Cham/Switzerland, 111-144.
- Yin, S., Shao, Y., Wu, A., Wang, Y. ve Chen, X., 2018. Expansion and Strength Properties of Cemented Backfill Using Sulphidic Mill Tailings, Construction and Building Materials, 165, 138-148.
- Yumlu, M., 2001. Backfill Practices at Cayeli Mine. Proceedings of the International Mining Conference, June, Ankara, Proceedings Book: 333–339.
- Yumlu, M., 2010. Mining with Paste Fill. AusIMM Cobar Mining Seminar, 26p.
- Zheng, J., Zhu, Y. ve Zhao, Z., 2016. Utilization of Limestone Powder and Water-reducing Admixture in Cemented Paste Backfill of Coarse Copper Mine Tailings, Construction and Building Materials, 124, 31-36.
- Zheng, J., Guo, L., Sun, X., Li, W. ve Jia, Q. 2018. Study on the Strength Development of Cemented Backfill Body from Lead-Zinc Mine Tailings with Sulphide, Advances in Materials Science and Engineering, (*In Press*).
- URL-1, [https://en.wikipedia.org/wiki/Acid\\_mine\\_drainage/](https://en.wikipedia.org/wiki/Acid_mine_drainage/) 14.05.2017
- URL-2, <http://web.karabuk.edu.tr/myasar/demircelik/index.html> Demir Çelik Mamulleri. 19.10.2018.
- URL-3, <https://muratsezik.wordpress.com/2015/06/25/yuksekk-firinlar/> 03.05.2019
- URL-4, <http://chemtrailsmuststop.com/2015/08/u-s-government-dumping-tons-of-toxic-coal-fly-ash-into-atmosphere-via-chemtrails>. 12.11.2018

## 7. EKLER



Ek Şekil 1. YFC (a), C-UK (b) ve MA (c) malzemelerinin XRD görünüm





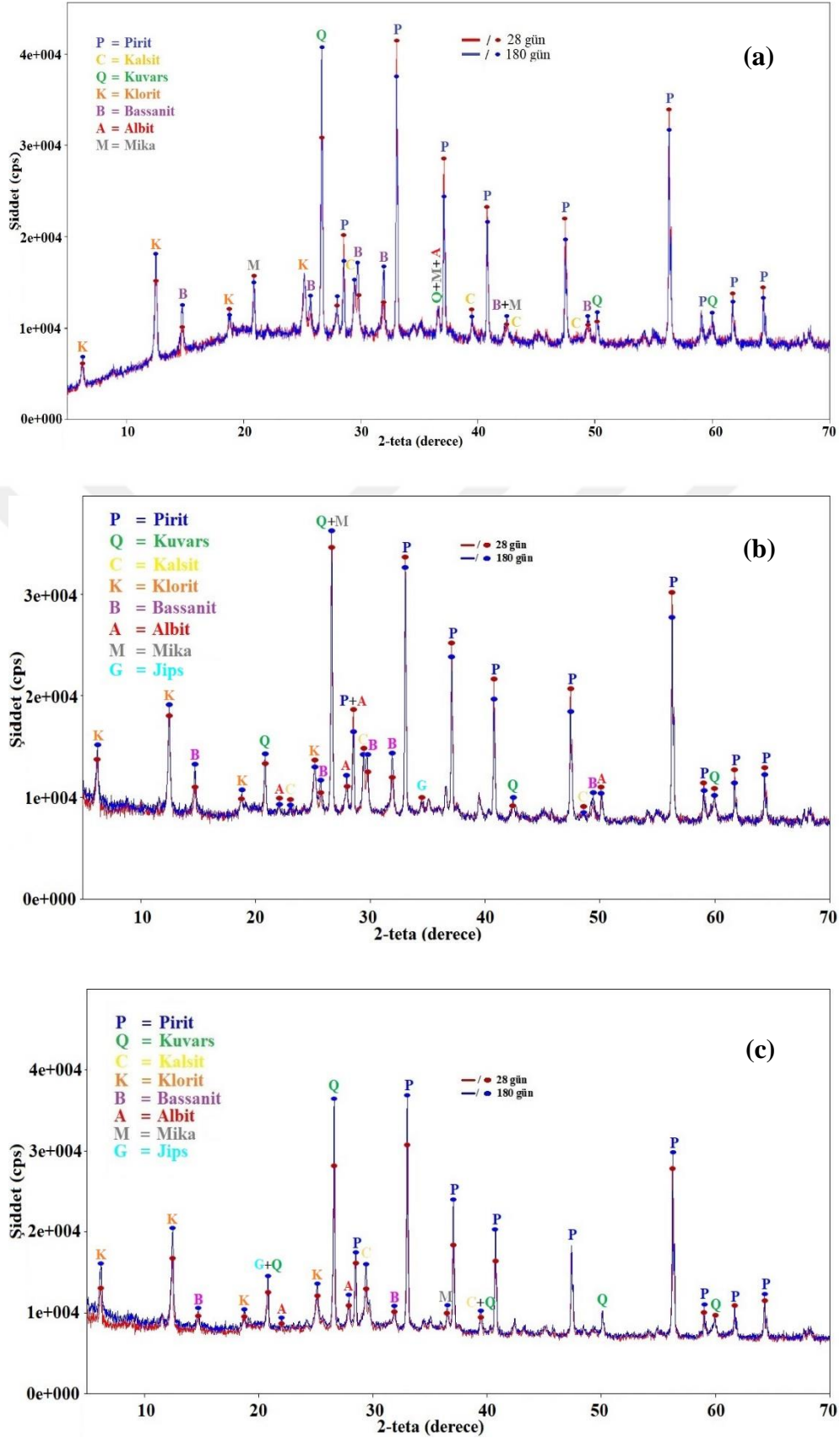
Ek Şekil 2. KK (a), DK (b) ve İYA (c) malzemelerinin XRD görünümü

Ek Tablo 1. 1,0 m<sup>3</sup> ÇMD karışımı için bağlayıcı maliyeti analizi

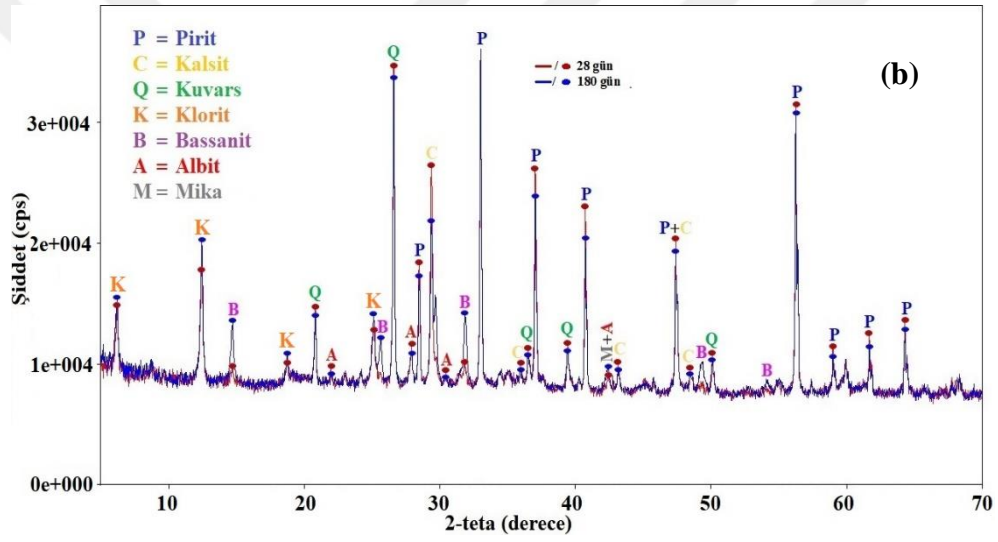
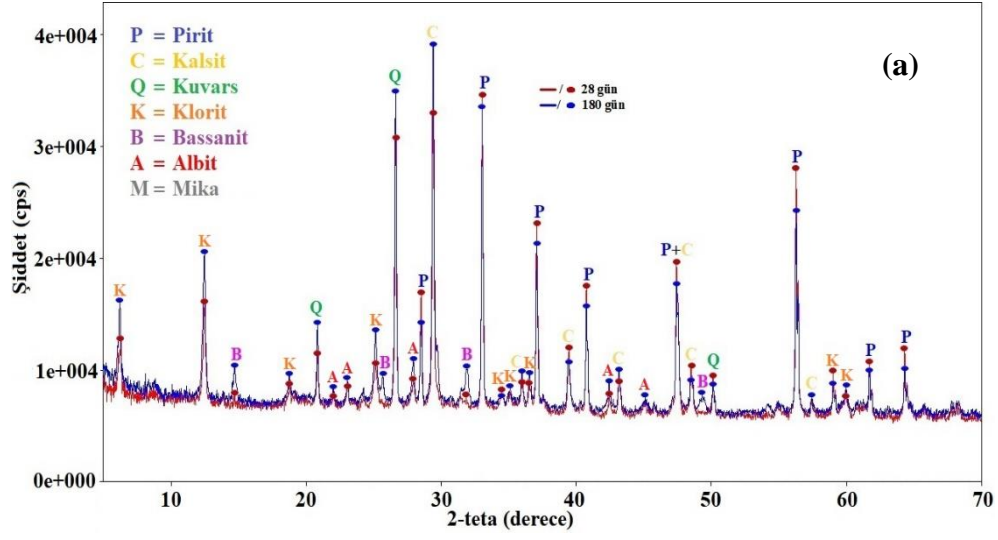
Özellikler	Karışım tipi						
	Kontrol	YFC	MA	C-UK	KK	DK	İYA
İkame oranı (%)	-			15			
Katı oranı (%)	73,70	74,19	73,94	73,66	73,58	73,91	74,13
Akışkanlık (cm)				19,05			
Birim hacim ağırlık (ton/m <sup>3</sup> )	2,070	2,051	2,025	2,020	2,001	2,028	2,058
<sup>(a)</sup> Dayanım kaybı (%)	15,92	14,23	-	10,32	10,57	8,90	13,14
<sup>(b)</sup> Dayanım kazanımı (%)	-	271-405	-	293-316	-	0-14	5-11
Bağlayıcı oranı (%)	8,5			7,5			
Bağlayıcı miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	130,0	114,12	112,30	110,59	110,43	112,42	114,4
Bağlayıcı tasarrufu (%)	-	12,2	13,62	14,93	15,05	13,52	12,0

**(a):** 90-360 gün arasında gerçekleşen dayanım kaybı (%)

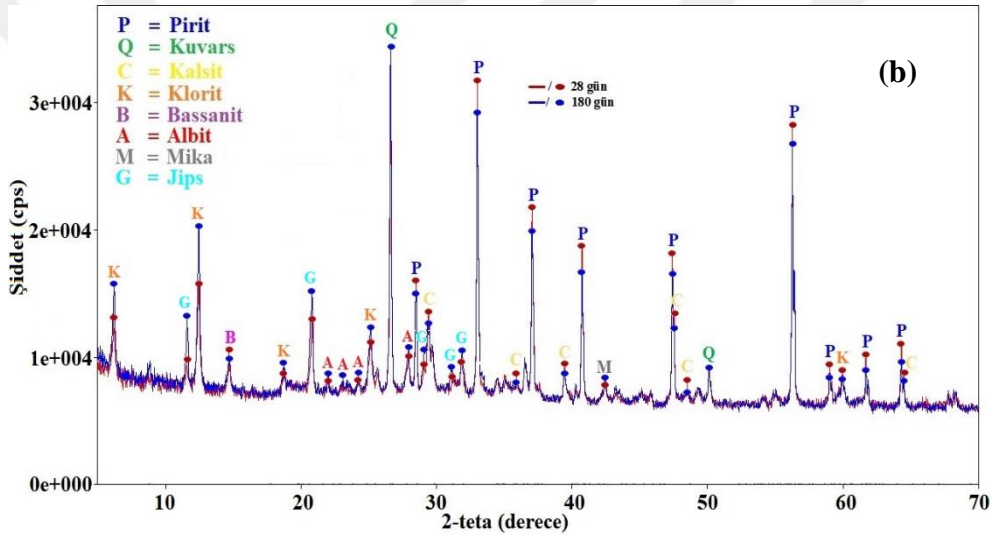
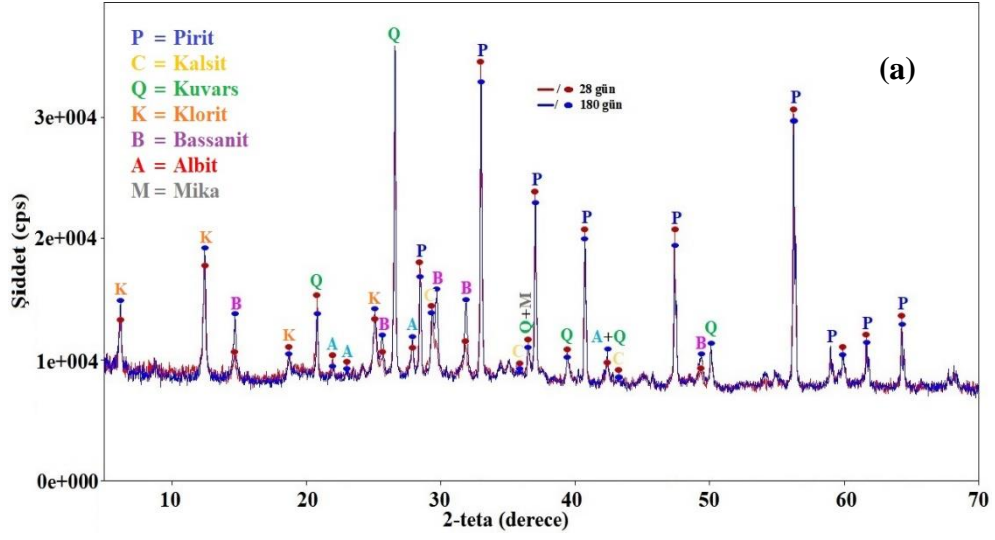
**(b):** 28-360 gün arasında kontrol ÇMD'sine kıyasla gerçekleşen dayanım kazanımı (%)



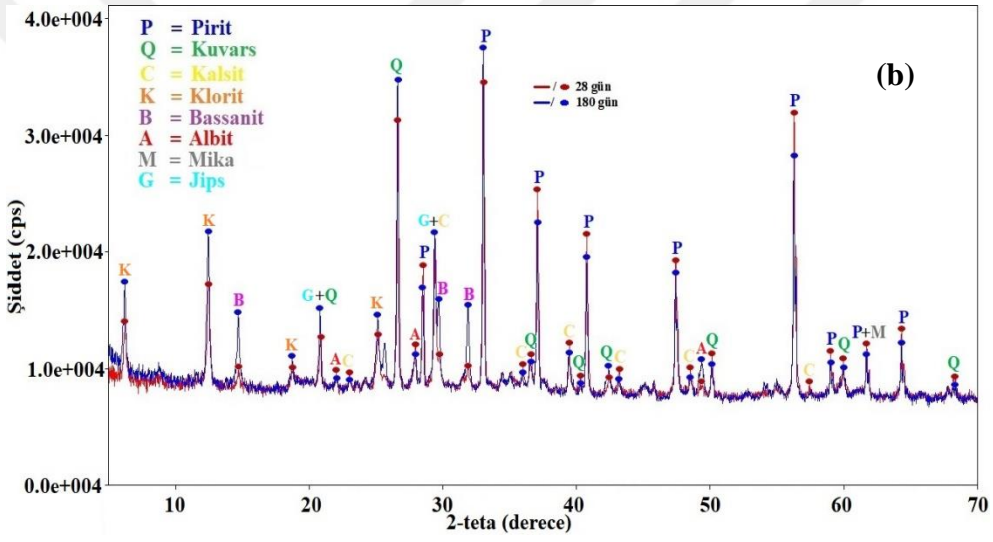
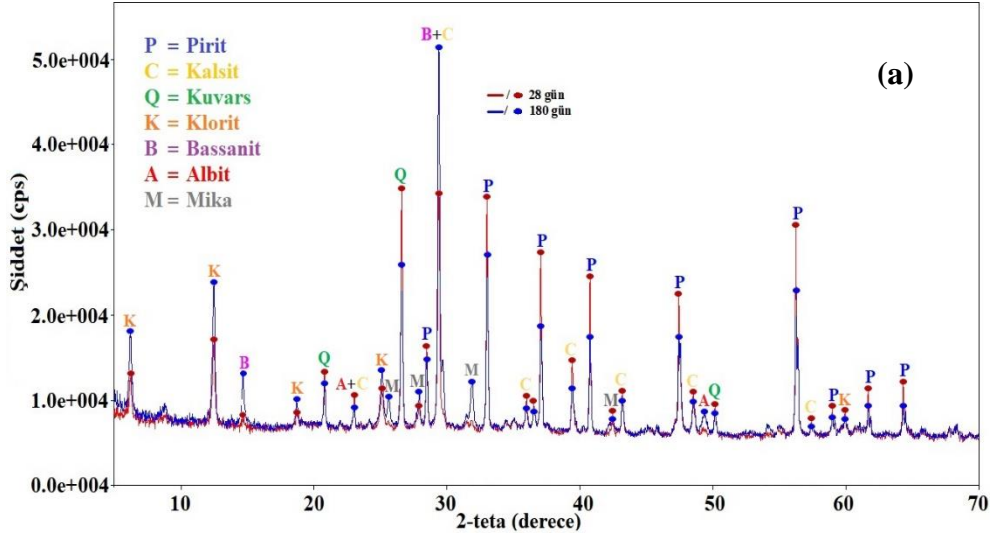
Ek Şekil 3. Kontrol (a), %5 YFC (b) ve %15 YFC (c) içeren ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki XRD profilleri



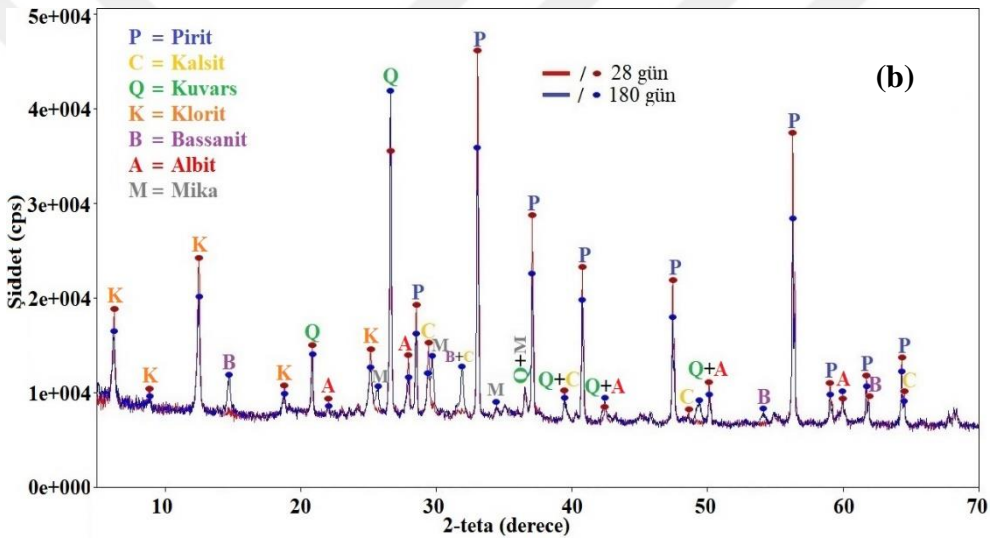
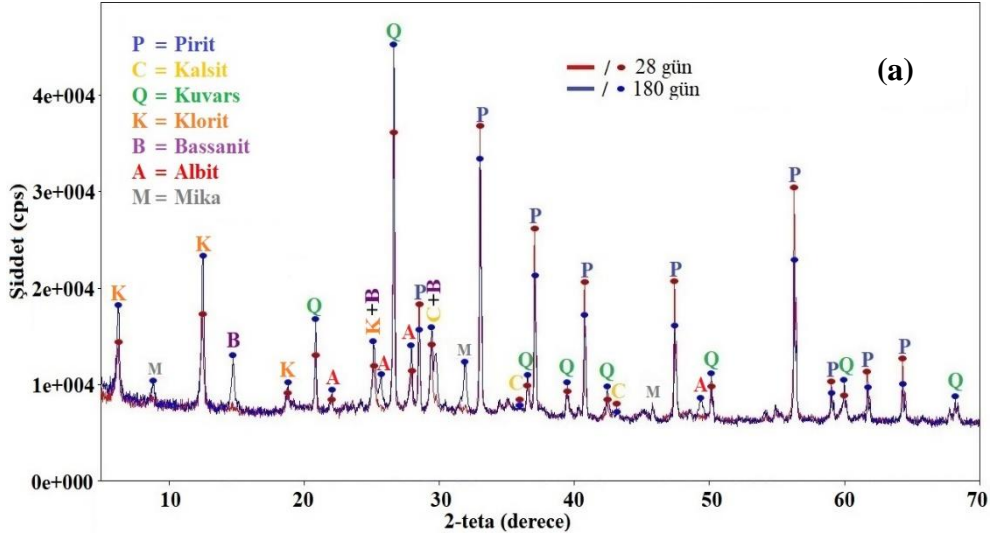
Ek Şekil 4. %5 MA (a) ve %15 MA (b) içeren ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki XRD profilleri



Ek Şekil 5. %5 C-UK (a) ve %15 C-UK (b) içeren ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki XRD profilleri



Ek Şekil 6. %5 KK (a) ve %15 KK (b) içeren ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki XRD profilleri



Ek Şekil 7. %5 İYA (a) ve %15 İYA (b) içeren ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonundaki XRD profilleri

## ÖZGEÇMİŞ

Tekin YILMAZ, 19.07.1986 tarihinde Ankara'nın Polatlı ilçesinde doğdu. 1992-1993 eğitim-öğretim yılında eğitim hayatına başladı ve 1997 yılında Şabanözü Köyü İlkokulu'nda ilkokul eğitimini, 2000 yılında Hikmet ULUĞBAY Pansiyonlu İlköğretim Okulu'nda ortaokul eğitimini ve 2004 yılında Polatlı (Y.D.A) Lisesi'nde lise eğitimini tamamladı. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nü kazanan yazar, 2009 yılında lisans eğitimini ve 2013 yılında K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2010 yılında Gümüşhane Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi (ÖYP) olarak çalışmaya başladı. Daha sonra sırasıyla Abdullah Gül Üniversitesi (ÖYP) ve Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde (ÖYP-35. madde) çalışmaya devam etti. Lisansüstü eğitimi süresince, çok sayıda uluslararası ve ulusal kongre, sempozyum ve konferansa katıldı. Ayrıca, uluslararası hakemli ve indeksli dergilerde (SCI, SCI-Expanded) 6 tane makale, ulusal hakemli dergilerde 3 tane makale ve 14 tanesi uluslararası olmak üzere 15 tane ulusal ve uluslararası bildirinin ortak yazarıdır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan yayınların listesi aşağıda sunulmuştur.

Halen Abdullah Gül Üniversitesi (ÖYP) Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışan Tekin YILMAZ evli olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.

### A. Uluslararası Hakemli Dergilerde (SCI, SCI-Expanded) Yayımlanan Makale(ler)

**A1. Yılmaz, T.,** Erçikdi, B., Devenci, H., 2018. Utilization of Construction and Demolition Waste as Cemented Paste Backfill Material for Underground Mine Openings. Journal of Environmental Management, 222, 250-259.

### B. Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makale(ler)

**B1. Yılmaz, T.,** Erçikdi, B., Cihangir, F., 2019. İnşaat Yıkıntı Atıkları için Yeni bir Uygulama Alanı; Yeraltı Üretim Boşluklarında Çimentolu Macun Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, (**Kabul edildi**).

**B2.** Erçikdi, B., **Yılmaz, T.,** 2019. Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım ve Mikroyapı Özellikleri; C-Sınıfı Uçucu Külün Etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 21 (61), 15-23.



### **C. Uluslararası Hakemli Kongre ve Konferanslarda Yayımlanan Bildiri(ler)**

- C1. Yılmaz, T.,** Erçikdi, B., Cihangir, F., 2017. Mermer Artıklarının Macun Dolguda Sülfürce Zengin Atık Malzemeye İkame Olarak Kullanımı, Uluslararası Madencilik ve Çevre Sempozyumu, pp.855-868, 27-29 Eylül, Muğla, TÜRKİYE.

