



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇİMENTOLU MACUN DOLGULARDA ATIK VE
BAĞLAYICININ KISMİ İKAMESİ OLARAK KİREÇTAŞI VE
MİNERAL KATKILARIN KULLANILABİLİRLİĞİ**

(Doktora Tezi)

Nihat Utku GÜNER

**Danışman
Prof. Dr. Erol YILMAZ**

**RİZE
2024**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Prof. Dr. Erol YILMAZ danışmanlığında, Nihat Utku Güner tarafından hazırlanan *Çimentolu Macun Dolgularda Atık ve Bağlayıcının Kısmi İkamesi Olarak Kireçtaşı ve Mineral Katkıların Kullanılabilirliği* adlı bu tez çalışması, 18/12/2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Ünvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Prof. Dr. Ayberk KAYA	
Üye	: Prof. Dr. Erol YILMAZ	
Üye	: Prof. Dr. Hakkı Türker AKÇAY	
Üye	: Doç. Dr. Eren KÖMÜRLÜ	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ	

ETİK BEYAN

İnşaat Mühendisliği Doktora Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Çimentolu Macun Dolgularda Atık ve Bağlayıcının Kısmi İkamesi Olarak Kireçtaşı ve Mineral Katkıların Kullanılabilirliği” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

18/12/2024

Nihat Utku GÜNER

ÖN SÖZ

“Çimentolu Macun Dolgularda Atık ve Bağlayıcının Kısmi İkamesi Olarak Kireçtaşı ve Mineral Katkıların Kullanılabilirliği” başlıklı bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır. Tez kapsamında geoteknik, atık yönetimi ve dolgu laboratuvarında deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Doktora programı boyunca rehberliği, deneyimi ve teknik yardımları için danışmanım Prof. Dr. Erol YILMAZ’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez süreci boyunca değerli yardımları, bilgileri ve verdikleri destek için Prof. Dr. Ayberk KAYA ve Prof. Dr. Hakkı Türker AKÇAY teşekkür ederim.

Jüri üyesi olarak değerli zamanlarını ayırdıkları için Doç. Dr. Eren KÖMÜRLÜ ve Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ’a teşekkür ederim.

Tez çalışmaları sırasında bana verdikleri her türlü yardım, destek ve rehberlik için Prof. Dr. Servet KARASU’ya, Arş. Gör. Muhammet SARI’ya, Yüksek İnşaat Mühendisi Tuğrul KASAP’a, Yüksek İnşaat Mühendisi Tuğba KESKİN’e teşekkür ederim.

Cengiz Holding’in bir iştiraki olan Eti Bakır A.Ş. Küre Maden İşletme Müdürü Sayın Ünsal ARKADAŞ ve Proses Müdürü Sayın Fatih ENİSOĞLU’na tez boyunca verdikleri değerli yardım ve destekleri için teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında olduğu gibi tez çalışma dönemimde de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan annem Melek GÜNER’e, babam Mehmet Selçuk GÜNER’e, kardeşlerim Ahmet GÜNER ve Feyza GÜNER’e, hayatımın anlamları olan sevgili eşim Zeynep GÜNER ve kızım Canan Zümra GÜNER’e sonsuz teşekkür eder, en derin şükranlarımı sunarım.

Nihat Utku Güner
RİZE/2024

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
GİRİŞ	1
1. TEZİN AMACI VE GEREKÇESİ.....	7
2. TEZİN ÖZGÜN DEĞERİ	9
3. GENEL BİLGİLER	10
3.1. Maden Atıkları: Karşılaşılan Zorluklar ve Fırsatlar	10
3.1.1. Karşılaşılan Zorluklar	12
3.1.2. Karşılaşılan Fırsatlar	15
3.2. Yeraltı Madenlerinde Dolgu Uygulamaları	18
3.2.1. Çimentolu Maden/Macun Dolgu (ÇMD).....	19
3.2.1.1. Macun Dolguların Tasarımı	23
3.2.1.1.1. Maden Atıklarının Macun Dolguda Kullanımı	24
3.2.1.1.2. Macun Dolguda Kullanılan Bağlayıcılar	30
3.2.1.1.3. Macun Dolgularda Kullanılan Kimyasal Katkılar	34
3.2.1.1.4. Karışım Suyunun Macun Dolgular Üzerindeki Etkisi	35
3.2.1.2. Macun Dolguların Boru ile Yeraltına Transferi	36
3.2.1.3. Macun Dolguların Mekanik Özellikleri	38
4. MALZEME VE YÖNTEM	40
4.1. Çalışma Sahasının Tanıtımı	40
4.2. ÇMD bileşenlerinin karakterizasyonu	41
4.2.1. Proses atıklarının karakterizasyonu	41
4.2.2. Kırma Kireçtaşının Karakterizasyonu.....	46

4.2.3. Çimento ve Mineral Katkıların Karakterizasyonu	48
4.2.4. Karışım Suyunun Karakterizasyonu	49
4.3. ÇMD Karışımlarının Üretimi	49
4.4. Kullanılan Yöntemler	51
4.4.1. Tekrarlanabilir Mini-Çökme Testleri	51
4.4.2. Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (UPV) Ölçümleri	52
4.4.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımı (UCS) Testi	54
4.4.4. Mikroyapı Testleri	54
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	57
5.1. ÇMD'lerin Mekanik ve Elastik Özelliklerinin Değerlendirilmesi	57
5.2. ÇMD'lerin Gözenek Dağılımının Değerlendirilmesi	66
5.3. ÇMD'lerin XRD Sonuçlarının Değerlendirilmesi	71
5.4. ÇMD'lerin TG/DTG Sonuçlarının Değerlendirilmesi	73
5.5. ÇMD'lerin SEM Mikrograflarının Değerlendirilmesi	76
5.6. ÇMD'lerin UPV Sonuçlarının Değerlendirilmesi	81
5.7. ÇMD'lerin UCS ve UPV Değerleri Arasındaki İlişki	88
6. SONUÇLAR	92
KAYNAKÇA	97

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği
Tez Türü : Doktora Tezi
Danışman : Prof. Dr. Erol YILMAZ
Hazırlayan : Nihat Utku Güner
Yıl : 2024
Sayfa Sayısı : 131

ÖZET

ÇİMENTOLU MACUN DOLGULARDA ATIK VE BAĞLAYICININ KİSMİ İKAMESİ OLARAK KİREÇTAŞI VE MİNERAL KATKILARIN KULLANILABİLİRLİĞİ

Ülke ekonomileri için son derece önemli bir yere sahip olan madencilik sektöründe her yıl milyarlarca ton atık üretilmektedir. Değerli minerallerin elde edilmesi kadar potansiyel olarak ekonomik katkı sağlayabilecek bu devasa miktarlardaki atıkların da iyi yönetilmesi gerekmektedir. Hali hazırda atıkların etkin ve sürdürülebilir bir şekilde bertaraf edilmesi için kullanılan en yaygın yöntem çimentolu macun dolgu (ÇMD)'dur. Ancak atıklarının bertarafıyla bağlantılı sorunlar, çimento üretimiyle ilgili ekonomik ve ekolojik kaygılar ÇMD'lerde kullanılan malzemelere alternatif olarak düşük maliyetli ve etkin çözümler bulmayı zorunlu hale getirmiştir.

Tez çalışması kapsamında ÇMD'lerin gradasyon kaynaklı performans sorunlarını azaltmak, çimento maliyetlerini düşürmek ve atıkların farklı amaçlar için potansiyel kullanımı göz önüne alındığında kullanım miktarlarını sınırlandırmak amacıyla farklı mineral katkıların kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Bu amaçla atık ikamesi olarak kırma kireçtaşı (KK) ve çimento ikamesi olarak yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) kullanılarak kısa ve uzun vadeli ÇMD performansının artırılması ve çimento ile ilgili maliyetlerin düşürülmesi planlanmıştır. ÇMD'lerin kalite ve performansının değerlendirilmesi amacıyla mekanik (UCS: tek eksenli basınç dayanımı), ultrasonik (UPV: ultrasonik ses dalgası yayılma hızı) ve mikroyapısal (MIP: cıva porozimetresi, XRD, TG/DTG ve SEM) karakterizasyon özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Numuneler kısa ve uzun kürleme sürelerinde (3-180 gün), sabit katı (kütlece %72) ve çimento (kütlece %5) içeriklerinde hazırlanmıştır. ÇMD'lerde proses atık (agrega) ikamesi olarak altı farklı oranda kireçtaşı içeriği (atık/kireçtaşı: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) ve çimento ikamesi olarak altı farklı oranda mineral katkı içeriği (PÇ/YFC-UK: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) seçilmiştir. Ayrıca KK ile YFC ve UK farklı oranlarda (KK-YFC: %10 ve %30 ve KK/UK: %10 ve %30) ÇMD karışımlarında kullanılarak yapılan testler/analizler tekrar edilmiştir.

Sonuçlar, atık ikamesi olarak KK kullanımının ÇMD'lerin dayanımının 2,74 MPa'ya kadar iyileştirdiğini göstermiştir. Bu, KK'nın ÇMD'lerin iskelet yapısını iyileştirerek daha kompakt bir yapı oluşumunu desteklediğinin ve ince taneli atıklardan kaynaklı gradasyon sorunlarının azaltıldığının bir göstergesidir. Ayrıca, yüksek CaO içeriği (kütlece %54) nedeniyle KK, çimentonun hidratasyon reaksiyonlarına katkıda bulunarak uzun kür sürelerinde meydana gelebilecek asit/sızıntı oluşumlarını önlemektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda %30 kireçtaşı esaslı ÇMD'lerin (KK30) en iyi dayanımı değerlerine ulaştığı görülmüştür. ÇMD'lerin basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, 90 günlük kürlenme süresine kadar kademeli bir artış gözlemlenirken, 90. günden sonra tüm dolgu numunelerinin dayanımlarında önemli azalmalar meydana gelmiştir. Ancak, özellikle uzun dönemde KK ve YFC katkılı ÇMD'lerin diğer numunelere kıyasla dayanım kayıpları oldukça az olduğu tespit edilmiştir. Bu, KK'ya ek olarak YFC'nin de yüksek CaO içeriği (YFC: kütlece %32) nedeniyle hidratasyon reaksiyonlarını desteklediği ve uzun vadede dolgunun asitlenmesini önlediği şeklinde yorumlanmaktadır. Mikroyapı testleri göz önüne alındığında, optimum oranlarda kullanılan mineral katkıların (özellikle KK) ÇMD'lerin gradasyonunu iyileştirdiği ve çimento hidratasyonu için önemli kimyasal/mineralojik bileşenlere katkı sağlamıştır. Dahası, farklı mineral katkı türlerine bağlı olarak UCS ve UPV sonuçları arasında uyumlu korelasyonlar elde edildi. UPV ve UCS arasındaki ilişki değerlendirildiğinde, regresyon analizinin tüm ÇMD örnekleri için UCS sonuçlarını tahmin etmede başarılı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bu tez çalışması ile dolgu içinde atık ve bağlayıcının kısmi ikamesi olarak KK, YFC ve UK malzemelerinin kullanılabilirliği değerlendirilecek ve yeraltı metal madenleri için operasyonel olarak düşük maliyetli, kolay ve uygulanabilir bir dolgu tasarımı olanak tanıyacaktır.

Anahtar Kelimeler: Maden atıkları, Kırma kireçtaşı, Mineral katkıları, Dayanım, Mikroyapı.

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Civil Engineering Department
Thesis Type : Doctoral Thesis
Supervisor : Prof. Dr. Erol YILMAZ
Author : Nihat Utku Güner
Year : 2024
Pages : 131

ABSTRACT

**USABILITY OF LIMESTONE AND MINERAL ADDITIVES
AS PARTIAL REPLACEMENT FOR TAILINGS AND BINDER
IN CEMENTED PASTE BACKFILL**

The mining sector, which holds a critical position in national economies, generates billions of tons of tailings annually. Alongside the extraction of valuable minerals, handling this massive volume of tailings, which has the potential to provide economic benefits, must also be a priority. Currently, the most commonly used method for the efficient and sustainable disposal of tailings is cemented paste backfill (CPB). However, issues related to tailings disposal, coupled with economic and ecological concerns associated with cement production, have made it imperative to find low-cost and efficient alternatives to the materials used in CPBs.

Within the scope of the thesis study, the potential use of various mineral additives was investigated to mitigate performance issues in CPBs caused by gradation, reduce cement costs, and limit the use of tailings considering their potential utilization for diverse purposes. For this reason, it was planned to enhance the short- and long-term performance of CPB and reduce cement-related costs by using crushed limestone (KK) as a tailings replacement and ground granulated blast furnace slag (YFC) and fly ash (UK) as cement replacements. To evaluate the quality and performance of CPBs, mechanical (UCS: uniaxial compressive strength), ultrasonic (UPV: ultrasonic pulse velocity), and micro-structural (MIP: mercury intrusion porosimetry, XRD, TG/DTG, and SEM) characterization properties were examined experimentally. The samples were prepared with fixed solid (72% by weight) and cement (5% by weight) contents at short- and long-term curing periods (3-180 days). For CPBs, six different limestone content ratios (tailings/limestone: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, and 50/50) were selected as process tailings (aggregate) replacements, and six different mineral additive content ratios (PC/YFC-UK: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, and 50/50) were selected as cement replacements. Additionally, tests/analyses were repeated by incorporating KK with YFC and UK at different ratios (KK-YFC: 10% and 30%; KK/UK: 10% and 30%) in the CPB mixtures.

The results show that the use of KK as a tailings substitute improves the compressive strength of CPB up to 2.74 MPa. This indicates that KK improves the skeleton structure of CPBs, supporting the formation of a more compact structure and reducing gradation problems caused by fine-grained tailings. Additionally, due to its high CaO content (54% by weight), KK contributes to the hydration reactions of cement, preventing acid/leachate formation that may occur during long curing periods. In the experimental studies conducted, CPBs based on 30% limestone (KK30) achieved the best strength values. When the compressive strength results of CPBs were examined, a gradual increase was observed up to the 90-day curing period, after which there was a significant decrease in the strength of all the backfill samples. However, it was particularly noted that the strength losses in CPBs with KK and YFC additives were much smaller compared to the other samples. This is interpreted as the support of hydration reactions by YFC in addition to KK, due to its high CaO content (YFC: 32% by weight), preventing the acidification of the backfill in the long term. Considering the microstructure tests, it was found that the mineral additives used in optimal ratios (especially KK) improved the gradation of CPBs and contributed to important chemical/mineralogical components for cement hydration. Furthermore, appropriate correlations between UCS and UPV results were obtained depending on the type of mineral additives. When the relationship between UPV and UCS was evaluated, it was observed that the regression analysis successfully predicted the UCS results for all CPB samples. As a result, this thesis study will assess the feasibility of using KK, YFC, and UK materials as partial replacements for tailings and binder in the backfill, allowing for the development of a low-cost, easy-to-apply backfill design for underground metal mines.

Keywords: Mine tailings, Crushed limestone, Mineral additives, Strength, Microstructure.

KISALTMALAR

ÇMD	:	Çimentolu maden/macun dolgusu
PÇ	:	Portland çimentosu
KK	:	Kırma Kireçtaşı
YFC	:	Yüksek fırın cürufu
UK	:	Uçucu kül
UCS	:	Tek eksenli basınç dayanımı
UPV	:	Ultrasonik ses dalgası yayılma hızı
MIP	:	Cıva porozimetresi
XRD	:	X-ışını kırınımı
TG/DTG	:	Termal gravimetrik analiz
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Atıkların ince tane oranına göre sınıflandırılması	27
Tablo 2. Literatürdeki farklı değirmen atıklarına ait bazı fiziksel özellikler	27
Tablo 3. Maden atıklarının ana mineralojik bileşimleri	29
Tablo 4. UK ve YFC'lerin ana mineralojik bileşimleri	33
Tablo 5. Test malzemelerin fiziksel karakteristikleri	41
Tablo 6. ÇMD bileşenlerinin kimyasal kompozisyonları.....	43
Tablo 7. ÇMD bileşenlerinin SEM-EDX sonuçları	45
Tablo 8. Karışımın suyunun kimyasal analiz sonuçları.....	49
Tablo 9. ÇMD numunelerine ait reçete	50
Tablo 10. ÇMD'lerin kür süresine göre UCS sonuçları	61
Tablo 11. ÇMD'lerin kür süresine göre EM sonuçları	66
Tablo 12. ÇMD'lerin kür süresine göre UPV sonuçları	83
Tablo 13. ÇMD'lerin korelasyon sonuçları.....	90

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Küresel madencilik aktivitesi	10
Şekil 2. Madencilik faaliyetleri ile üretilen atıklar ve miktarları	11
Şekil 3. Farklı ülkelerdeki atık barajı kazaları ve etkileri 1915-2020	14
Şekil 4. Atık barajı kazaları: Çin (a); ABD (b); Macaristan (c); ve Türkiye (d)	15
Şekil 5. Maden atıklarının farklı sektörlerde hammadde olarak kullanımı	17
Şekil 6. Yeraltı madenciliğinde üretim süreçleri	18
Şekil 7. Yeraltında madenlerinde uygulanan farklı dolgu yöntemleri	19
Şekil 8. Dolgu çeşitleri ve tarihçesi	20
Şekil 9. Dünya çapında macun dolgu uygulamasının kronolojisi	21
Şekil 10. Tipik ÇMD üretim tesisi.....	22
Şekil 11. Macun dolguları etkileyen içsel ve dışsal faktörler.....	23
Şekil 12. Katı ve değirmen atıklarının ÇMD’de kullanımı	25
Şekil 13. Bakır atıklarının tane şekline ait dijital görüntü.....	28
Şekil 14. Katı ve değirmen atıklarının ÇMD’de kullanımı	29
Şekil 15. ÇMD’lerde alternatif çimento malzemeleri	31
Şekil 16. Puzolanik katkıların kimyasal bileşimi	33
Şekil 17. ÇMD’ler boru hattı ile yeraltına iletimi	38
Şekil 18. Çalışma sahasının lokasyonu.....	40
Şekil 19. ÇMD bileşenlerinin tane boyu dağılım eğrileri: tüm bileşenler (a); YFC (b); UK (c); PÇ (d); PA (e); ve KK (f).....	42
Şekil 20. Proses atığı ve kırma kireçtaşı ait XRD profilleri	43
Şekil 21. ÇMD bileşenlerinin SEM mikrografları: YFC (a); UK (b); PÇ (c); PA (d) ve KK (e)	44
Şekil 22. Proses atıklarının kıvam limitleri	45
Şekil 23. Zamanın bir fonksiyonu olarak atıkların su salınımı.....	46
Şekil 24. Öğütülmüş ve elenmiş KK’nın tane boyu dağılım eğrileri	47
Şekil 25. ÇMD numunelerinin hazırlanması ve test aşamaları	51
Şekil 26. Mini ve standart çökme konisi ile çökme ölçümleri	52
Şekil 27. UPV yönteminin detaylı şeması	53
Şekil 28. MIP cihazı ve penetrometreleri	55

Şekil 29. KK ikameli ÇMD'lerin dayanım sonuçları değerleri.....	58
Şekil 30. YFC (a) ve UK (b) içeren ÇMD'lerin dayanım sonuçları.....	60
Şekil 31. KK, YFC ve UK katkılı ÇMD'lerin dayanım gelişimi	63
Şekil 32. ÇMD'lerin UCS-şekil değiştirme (a) ve elastisite modül (b) grafikleri.....	65
Şekil 33. 90 günlük ÇMD'lerin gözenek dağılımları: KK30 (a); KK30-YFC10 (b); KK30-UK10 (c); PÇ (d); YFC10 (e); ve UK10 (f).....	67
Şekil 34. ÇMD'lerin toplam gözenekliliğinde meydana gelen değişimler: toplam gözeneklilik-kür süresi ilişkisi (a); ve toplam gözeneklilik-UCS ilişkisi (b)	69
Şekil 35. KK içeren (a) ve KK içermeyen (b) ÇMD'lere ait XRD sonuçları.....	72
Şekil 36. KK içeren ÇMD numunelerin TG/DTG grafikleri.....	74
Şekil 37. KK içermeyen ÇMD numunelerinin TG/DTG grafikleri.....	75
Şekil 38. 90 günlük KK30'un yüzey morfolojisi	77
Şekil 39. 90 günlük KK30-YFC10'nun yüzey morfolojisi	78
Şekil 40. 90 günlük KK30-UK10'nun yüzey morfolojisi	79
Şekil 41. 90 günlük PÇ'nin (kontrol) yüzey morfolojisi.....	80
Şekil 42. 90 günlük YFC10'nun yüzey morfolojisi.....	80
Şekil 43. 90 günlük UK10'nun yüzey morfolojisi	81
Şekil 44. KK ikameli ÇMD'lerin UPV sonuçları.....	82
Şekil 45. YFC (a) ve UK (b) içeren ÇMD'lerin UPV sonuçları	84
Şekil 46. KK, YFC ve UK katkılı ÇMD'lerin UPV gelişimi	86
Şekil 47. ÇMD numunelerinin UCS ve UPV arasındaki ilişki: KK (a); YFC (b); UK (c); ve KK-YFC/KK-UK (d).....	88
Şekil 48. KK içeren (a) ve içermeyen (b) ÇMD'lerin ölçülen ve hesaplanan UCS değerleri arasındaki ilişki.....	91

GİRİŞ

Madencilik, değerli minerallerin çıkarılması ve değerlendirilmesi açısından dünya ekonomisi için çok önemli bir endüstridir (Qi ve Fourie, 2019). Çeşitli cevher türlerinin (Cu, Zn, Au, Ag, Pb, Co, Cd, Cr ve kömür vb.) işlenmesi sonucu geriye kalan malzemeler (atıklar), sürdürülebilir madencilik açısından çevre açısından ciddi sorunlar oluşturmaktadır (Li vd., 2022a). Özellikle madencilik işletmelerinde düşük tenörlü cevherlerden konsantre üretim ihtiyacı dünya çapında yılda 5-7 milyar ton atık üretimine neden olmaktadır (Araya vd., 2021). Üretilen büyük miktarda ve türde atıkların uygun şekilde bertarafı, çevre ve sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır (Akhavan ve Golchin, 2021). Tehlikeli maden atıklarının güvenli bir şekilde bertarafı, geleneksel atık barajı ve/veya denizaltı atık bertarafı gibi yaklaşımlarla gerçekleştirilir (Edraki vd., 2014). Bu yaklaşımlar ekonomik, çevresel ve jeoteknik nedenlerle birçok soruna neden olabilir (Dong vd., 2020). Özellikle, kükürt içeren atıkların yer üstünde geleneksel olarak arıtılması veya depolanması, H₂O ve O₂ varlığında asidik sızıntı suyu üretimine yol açarak çevreye önemli zararlar vermektedir (Kefeni ve Mamba, 2021). Tehlikeli atıklar uygun şekilde yönetilmez ve sürdürülebilir yenilikçi bir sistemle desteklenmezse, çevreye ve halk sağlığına zarar vermesi kaçınılmazdır (Mensah vd., 2021). Bu durum göz önüne alındığında, günümüzde etkili maden atıkları bertaraf yöntemleri veya teknolojileri üzerine araştırma ve geliştirme çabaları kaçınılmaz hale gelmiştir (Kwong vd., 2019).

Çimentolu maden/macun dolgusu (ÇMD) yeşil madencilik için temel tekniklerden biri olup, sağladığı faydalar nedeniyle dünya çapında giderek daha popüler hale gelmektedir (Zhang vd., 2023a). Özellikle atıkların yaklaşık %60'ının depolanarak çevresel zararın en aza indirilmesi, yeraltında cevher çıkarılması sonucu oluşan boşlukların doldurulmasıyla yerel destek sağlanması ve yeraltında ikincil destek sağlanarak cevher çıkarılmasının kolaylaştırılması gibi katkıları nedeniyle ÇMD yöntemi sürdürülebilir madencilik için vazgeçilmez bir tekniktir (Sari vd., 2023a). En genel tanımıyla ÇMD, boru hattı içerisinde transfer edilebilen (pompalanabilen) homojen ve akışkan bir malzemedir. ÇMD'nin temel malzemeleri maden atığı (kütlece %70-85), çimento (kütlece %3-7) ve karışım suyudur (musluk/proses). Atıkların yeterli inceliği sayesinde, yeraltı iletimi sırasında dolgunun

ayırışma ve sedimantasyona uğramaması bu yöntemi kullanışlı hale getirir ve birçok madencilik şirketi tarafından tercih edilir (Liu vd., 2020a).

Maden atıklarının fiziko-kimyasal ve mineralojik özellikleri dolguların performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Kasap vd., 2022a). Genel olarak atıkların barındırdığı zayıf mineralojik (örn. FeS_2), kimyasal (örn. sülfürlü bileşiklerin varlığı) ve fiziksel (örn. tane boyutu ve şekli) özellikler kısa ve uzun vadede maden dolgusunun performansını istenmeyen şekilde etkileyebilir (Xu vd., 2020a). Özellikle tehlikeli maden atıklarından oluşan ÇMD karışımları su ve oksijene maruz kaldığında, asitler ve sülfatlar gibi çevreye zararlı ürünlerin oluşumuna neden olmaktadır (Lounate vd., 2020). Asit maden drenajı gibi çevresel zararlara ek olarak, bu ürünler ÇMD karışımlarında kullanılan çimentonun hidrasyonunu da olumsuz etkiler ve hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek sülfat ataklarıyla genişleyen fazlar oluşturur (Koohestani vd., 2018a). Bu durumun maden dolgusunun uzun vadede bazı dayanım sorunları ve stabilite kaybına neden olduğu bildirilmiştir (Dong vd., 2019). Ayrıca son zamanlarda ekonomiye daha fazla cevher kazandırma isteği ve düşük dereceli madenlerin işletilmesi atıkların tane boyutunun çok zayıf olmasına neden olmakta ve bu da ÇMD'lerin dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Yan vd., 2022a). ÇMD'lerde bu tarz dayanım kayıplarının azaltılması ve kalitesinin artırılması amacıyla karışım içerisinde kullanılan çimento oranı arttırılmaktadır (Jia vd., 2016). Karışım içinde kullanılan çimento miktarının arttırılması hem ÇMD maliyetlerini (çimento ÇMD maliyetinin yaklaşık %75'ini oluşturur) doğrudan arttırmakta hem de çevresel birçok soruna neden olmaktadır. Özellikle inşaat sektöründe yaygın kullanımıyla sıradan Portland çimentosunun (PÇ) üretimi dünya çapında ciddi CO_2 emisyonuna neden olmaktadır. Bir tonluk PÇ üretimi için ortalama 0,9 ton CO_2 salınmaktadır ve bu da Dünya atmosferi için büyük bir sorun teşkil etmektedir (Piasta, 2017).

ÇMD'lerde atıkların zararlı etkilerini sınırlandırmak, çimento miktarını ve ilgili maliyetleri azaltmak amacıyla uçucu kül, cüruf ve çok sayıda farklı malzeme (mermer ve tuğla atıkları, çimento fırını tozu, kireç taşı, silika dumanı, inşaat-yıkım atıkları ve kum vb.) sıklıkla kullanılmaktadır (Tariq ve Nehdi, 2007; Yılmaz vd., 2018, 2020; Huang vd., 2021; Shehata vd., 2021). Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu (UK ve YFC), özellikle çimento imalatında yaygın olarak kullanılan iki temel katkı

maddesi olup, üretildikleri malzemenin özelliklerine göre değişen puzolanik özelliklere sahip malzemelerdir (Liu vd., 2020b). Uçucu kül (UK), kömürün termal reaktörde yakılması sonucu elde edilen ince boyutlu bir atık türü olup, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 ana kimyasal bileşenlerinin miktarına göre C veya F sınıfı (toplamları %70'ten fazlaysa F sınıfı, %50'den fazlaysa C sınıfı) olarak adlandırılır (Xie ve Kayali, 2016). Öte yandan Yüksek fırın cürufu (YFC), demir-çelik endüstrisinin atıkları olup pirometalurjik işlemlerde büyük miktarlarda üretilmektedir (Phiri vd., 2022). YFC'ler demir cevheri, kok, kireç gibi maddelerin yüksek sıcaklıklarda (1450–1550 °C) indirgenmesi sırasında oluşur ve karışımlarda farklı formlarda (örneğin katkı maddesi, hidrolik bağlayıcı ve cüruf çimentosu) kullanılır (Jiang vd., 2020a). YFC kimyasal bileşenlerine ek olarak yüksek miktarda CaO ve MgO içerirler (Fang vd., 2018). UK ve YFC'ler betonun işlenebilirliğini artırma, taze betonda terleme ve hidratasyon ısını azaltma, sülfat ataklarına direnme ve farklı yapı malzemelerinin hammaddesi olarak kullanılma gibi çok sayıda olumlu özelliğe sahiptir (Cavusoglu vd., 2021a; Mocharla vd., 2022). Bunlara ek olarak agrega; harç ve beton gibi çimentolu malzemelerin üretiminde kullanılan çakıl ve kum gibi çeşitli mineralojik bileşimlere sahip inorganik maddeler çimentolu karışımların yüksek dayanıma ulaşmasına katkıda bulunurlar (Kim, 2022). Agregası, gradasyon, maksimum parçacık boyutu, su emme kapasitesi, özgül ağırlık, parçacık şekli, yüzey özellikleri, yabancı madde türü ve miktarı, donma direnci ve termal özelliklerine göre karışımlara farklı özellikler katabilir (Coban vd., 2022). Özellikle tane şekli (açısal, yuvarlak) ve boyutları sayesinde çimento karışımlarında oluşacak geçirgenliği ve iç kuvvetleri (sürtünme, kesme) büyük ölçüde etkileyerek karışımın nihai davranışını belirler (Cao vd., 2020).

Kum-çakıl parçacıklarının özellikleri, şekli ve boyutu kaya yatağının doğası ve tabakalaşma derecesi, kullanılan kırma tesisi tipi ve boyut küçültme oranı gibi farklı parametrelere bağlı olarak değişir (Altuhafi vd., 2016). Kırma/öğütme yoluyla elde edilen kum-çakıl, boşluk oranı, akışkanlık özellikleri, geçirgenlik ve pompalanabilirlik gibi çimentolu karışımların özellikleri üzerinde birçok etkisi vardır (Jiao vd., 2017). Özellikle iyi derecelenmiş kum-çakıl, çimentolu karışımların boşluk oranının azalmasına katkı sağlayarak nihai dayanımları önemli ölçüde arttırmaktadır (Shi vd., 2021). Kum-çakıl tane boyutunun artması, parçacıklar arasındaki sürtünmeyi artırmak için, çimentolu malzemelerin dayanımı gelişimini olumlu şekilde etkilemektedir

(Vangla ve Latha, 2015). Aslında, yuvarlak şekilli kum-çakıl parçacıkları aynı yoğunluğa sahip köşeli parçacıklardan daha yavaş çöker ve bu durum incelenen karışımın drenajını, konsolidasyonunu ve dayanım performansını etkiler (Zheng vd., 2016). Yukarıdaki bilgiler göz önüne alındığında, kum-çakılın tane boyutu, şekli, mineralojik ve kimyasal yapısının ÇMD'lerin taze/sertleştirilmiş özelliklerini büyük ölçüde etkileyebileceği yorumu yapılabilir (Cao vd., 2020). ÇMD'de kum-çakıl kullanımı, işletme, çevre ve maliyet açısından önemli bir araştırma konusudur (Zhou vd., 2021). Tüm bu faktörlerin ÇMD performansına önemli bir katkıda bulunacağı düşünüldüğünde, bunun dikkatlice incelenmesi gerekir (Rahman vd., 2014). Bunun yanında, literatürde ÇMD'lerin farklı yönlerini ele alan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Sun vd. (2018), kum esaslı ÇMD karışımlarının dayanım değerlerini farklı yönlerden (örneğin su içeriği, çimento dozajı, kum ve uçucu kül) incelemiştir. ÇMD karışımına %5 kütle oranında kum eklenmesinin, atık ve kumdan oluşan 28 günlük kürlenmiş dolguların mikro yapısında büyük bir azalmaya (beş kat) yol açtığını bulmuşlardır. Yang vd. (2020), 5 mm'nin altındaki parçacıklara sahip çimentolu Gobi kumu ve atıklarının pratik gerilme kayıplarını tahmin etmek için akış döngüsü deneylerini sunmuşlardır. Agreganın boyutu ve dökme yoğunluğu arttıkça yüksek basınç düşüşlerinin olacağını bu nedenle karışımlardaki ideal kum oranının doğru bir şekilde belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Zhou vd. (2021), kum esaslı dolgulara cam elyaf (3-15 mm uzunluğunda; %0,5-1,5 dozaj) ekleyerek dayanım testini gerçekleştirmiştir. Cam elyaf içermeyen kum esaslı dolgu ile karşılaştırıldığında, cam elyaf esaslı dolguların basınç/çekme/kesme dayanımlarını sırasıyla %24, %181 ve %60 oranında arttığını belirtmişlerdir. Deng vd. (2021), ÇMD'lerde Gobi kumunun agreganın ve çimento/katı içeriklerinin farklı oranlarda etkisini araştırdı. Çimento içeriği %20 kütlece ve atık-Gobi kumu 1/4 olduğunda, karşılık gelen dayanımın 5,6 MPa'ya ulaştığı sonucuna vardılar. Fridjonsson vd. (2013), bir zemin destek aracı olarak atık-kum esaslı ÇMD'nin gözenek yapısını ve çimento hidratasyon sürecini gözlemlediler. Kumun dolguda yoğunlaştığı alanlarda daha büyük gözeneklerin oluştuğu ve bunun ÇMD'nin geçirgenliğini önemli ölçüde etkilediği sonucuna vardılar. Zhu vd. (2021), çeşitli gerilmelere maruz kalan kum bazlı dolgunun hidrolik iletkenliğindeki değişimi araştırdılar. Artırılmış eksenel basınçlarla birlikte, karşılık gelen hidrolik iletkenliğin zamanla azaldığını gözlemlediler. Zhao vd. (2020), üç farklı kireç-kum oranı altında

tantal-niobyum atıklarından üretilen ÇMD'nin dayanım/akustik özelliklerini araştırdılar. Tek eksenli sıkıştırma koşulu altında, 1/4 kireç/kum oranına sahip ÇMD'ler için maksimum akustik emisyon sayısının, tepe gerilimden 200 saniye sonra elde edildiğini belirlediler. Yi vd. (2015), dolgu kararlılığını artırmak için kumlu silt atıklarıyla ve polipropilen liflerle hazırlanan ÇMD karışımların performansını incelediler. Lif takviyeli ÇMD'lerin üç kata kadar daha fazla sünek davranış sergilediğini ve dayanım kayıplarını azalttığını belirttiler.

ÇMD'lerde UK, YFC ve kum kullanımı literatürde farklı şekillerde tartışılmıştır. Yin vd. (2022), ÇMD'lerde daha ince bir agrega fraksiyonu olarak UK kullanımının dolguların davranışı ve performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Dolguların dayanımı kısa kürlenme yaşlarında %30 Uçucu kül(UK) içeriğinde artarken, dayanım ve çökme değerlerinin önce arttığını ve ardından 28 günlük kürlenmeden sonra azaldığını bulmuşlardır. Feng vd. (2022), çimento esaslı uçucu kül-kömür gang dolgusunun elektrik direncini ve akışkanlığını incelemiştir. Değişen akış hızlarına bağlı olarak gerçekleştirilen testler sonucunda, düz, eğimli olmayan boru hattındaki dolgunun basınç düşüşünün akış hızıyla eşdeğer şekilde arttığını, elektrik direncinin ise agrega içeriğiyle arttığını bulmuşlardır. Jiang vd. (2022), alkali aktive edilmiş cüruf bazlı dolguların değişen aktivatör içerikleri ve silika modülleri üzerindeki sıcaklık etkisini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, sıcak kürleme rejimlerinin dolgunun dayanımını artırdığını, ancak bu ilerlemenin erken kürleme yaşlarında azaldığını belirtmişlerdir. Sari vd. (2022), cevher zenginleştirmesinden sonra açığa çıkan çeşitli pH değerlerine sahip proses atıklarının ve farklı UK ve YFC oranları kullanılarak hazırlanan maden dolgularının performansını deneysel olarak araştırdılar. YFC içeren dolgu örneklerinin, atık türünden bağımsız olarak UK içeren dolgulardan daha iyi dayanım sonuçları verdiğini belirttiler.

Mevcut literatürde ÇMD karışımlarında çeşitli mineral katkıların ayrı ayrı veya birlikte kullanımına yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. ÇMD'lerin kalite ve performansının değerlendirilmesi yönelik yapılan deneyler (reolojik, mekanik ve mikro yapı) göz önüne alındığında, ÇMD'lerde atık ikamesi olarak kullanılan kireçtaşı ile YFC ve UK etkileşimi hala eksiktir ve titizlikle araştırılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasının amacı, atıkların tane boyutundaki büyük azalmanın neden olduğu

dayanım kayıplarını ortadan kaldırmak ve kireçtaşıını ÇMD karışımlarına dahil ederek çimento ile ilgili maliyeti düşürmektir. Kireçtaşıının yüksek CaO içeriği sayesinde, atıkların neden olduğu uzun vadeli sorunları (örneğin asit ve sızıntı suyu oluşumları) giderilmesi mümkündür. Ayrıca YFC ve UK'nın ÇMD imalatında kumla birlikte kullanılması sonucunda, dolguların uzun vadeli dayanım performansının iyileştirilmesi ve dolayısıyla maliyet tasarruflarının artırılması hedeflenmektedir. Tez çalışması kapsamında ÇMD'lerin kalite ve performansının değerlendirilmesi amacıyla fiziksel, dayanım(UCS), mekanik, ultrasonik (UPV, ultrasonik ses dalgası yayılma hızı) ve mikroyapısal (MIP, XRD, TG/DTG ve SEM) karakterizasyon özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Numuneler kısa/uzun kürleme sürelerinde (3-180 gün), sabit katı (kütlece %72) ve çimento (kütlece %5) içeriklerinde hazırlanmıştır. ÇMD'lerde proses atık (agrega) ikamesi olarak altı farklı oranda kireçtaşı içeriği (atık/kum: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) ve çimento ikamesi olarak altı farklı oranda mineral katkı içeriği (PÇ/YFC-UK: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) seçilmiştir. Ayrıca kırma kireçtaşı (KK) ile YFC ve UK farklı oranlarda (KK-YFC: %10 ve %30 ve KK/UK: %10 ve %30) ÇMD karışımlarında kullanılarak yapılan testler/analizler tekrar edilmiştir. Testlerden/analizlerden elde edilen nihai çıktılar sunulan tez çalışmasında ayrıntılı olarak incelenmiştir.

1. TEZİN AMACI VE GEREKÇESİ

Madencilik sektöründe üretilen atıklarının operasyonel ve maliyet yönünden etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında lokal veya bölgesel zemin tahkimatı sağlayarak güvenli madencilik temin etme, problemlı atıkların neden olduğu teknik ve çevresel sorunları azaltma gibi sağladığı birçok fayda nedeniyle çimentolu maden/macun dolgu (ÇMD) yöntemi gelişmiş maden sahalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Günümüzde ÇMD'ler için genellikle çimento ikamesi olarak uçucu kül, cüruf, mermer ve tuğla atıkları, çimento fırın tozu, kireç taşı, silis dumanı, inşaat ve moloz atıkları gibi birçok malzeme kullanılmaktadır. Ancak son zamanda endüstriye fazla miktarlarda cevher kazandırma isteğinin bir sonucu olarak düşük tenörlü cevherlerin işletilmesi ile proses atıklarının tane çaplarında ciddi bir azalma olmaktadır. Bu durum ÇMD'lerde önemli derecede dayanım kayıplarına sebep olarak kullanılan çimento miktarını arttırmaktadır. Çimento miktarındaki artış maden işletmeleri için ekonomik kayıplara neden olmakla birlikte çevresel sorunlarında (CO₂ emisyonunda ciddi artışlar) artmasını tetiklemiştir. Ayrıca gelecek yıllarda hızla gelişen teknolojik altyapıyla atıkların düşük maliyetlerle potansiyel olarak ikincil hammadde kaynağı olarak tekrardan kullanılabilmesi mümkün olacaktır. Bu yüzden atıklar maden işletmeleri için bir sorun olmaktan ziyade önemli bir ekonomik yatırım olarak öne çıkmakta ve dolgu içinde kullanımı sınırlandırılmaktadır. Bu nedenle ÇMD içinde çimento ikamesi olarak kullanılan katkı maddelerinin yanı sıra atıkların neden olduğu sorunlarını azaltmaya yönelik alternatif malzemelerin atık (agrega) ikamesi olarak kullanımı gerekli hale gelmektedir.

Bu düşünceler ışığında tez çalışmasının ana amacı ÇMD'lerin atıklardan kaynaklı performans sorunlarını, çimento maliyetlerini ve çevresel etkilerini, atıkların potansiyeli düşünüldüğünde kullanım miktarlarını azaltacak alternatif malzemelerin kullanımının benimsenmesidir. Bu amaç doğrultusunda başta kırma kireçtaşı olmak üzere uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) katkı maddeleri yardımıyla ÇMD'lerin kalite ve performansının artırılması planlanmaktadır. Ayrıca, farklı test ve analiz yöntemleri yardımıyla ÇMD'lerin kalite ve performansının kısa ve uzun vadede değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında belirlenen hedefler şu şekildedir:

- 1) Kırma kireçtaşı'nın ÇMD'lerin kalite ve performansının üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi,
- 2) ÇMD'lerde atık ikamesi olarak kırma kireçtaşı kullanımıyla operasyonel ve maliyet yönünden yenilikçi bir dolgu sisteminin benimsenmesi,
- 3) Kırma kireçtaşı'na ek olarak UK ve YFC gibi katkı maddelerin birlikte kullanımıyla birlikte özellikle uzun vadede yüksek performanslı ve düşük maliyetli dolgu tasarımının gerçekleştirilmesi,
- 5) ÇMD'lerde kullanılan atıkların gradasyonundan kaynaklı performans kayıplarının azaltılarak çimento maliyetlerinin ve çevresel etkilerinin düşürülmesi,
- 6) Gelecekte potansiyel hammadde veya ikincil kaynak olarak düşünülen proses atıklarının kullanımının azaltılması,
- 7) Düşük maliyetli, kolay ve uygulanabilir ÇMD tasarımları oluşturularak daha uzun ömürlü, çevresel ve ekonomik bir dolgu sisteminin benimsenmesi, böylelikle literatüre ve endüstriye, bilimsel ve teknolojik katkı sağlanması.

2. TEZİN ÖZGÜN DEĞERİ

Mevcut literatür incelendiğinde, farklı bileşenleri ve çeşitli test yöntemlerini konu alarak ÇMD performanslarının değerlendirildiği birçok çalışmanın varlığı göze çarpmaktadır. Bu çalışmaların çoğunun da özellikle birim çimento maliyetlerini azaltmaya ve çimento yerine daha ekonomik/sürdürülebilir ürünler kullanılarak yüksek kaliteli ÇMD'ler oluşturmaya yönelik olduğu görülmektedir. Öyle ki son zamanlarda çimentonun ikamesi olarak farklı kayaç türlerinden elde edilen kumları konu alan birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Ancak çimento ikamesine kıyasla bu tür malzemelerin atığın ikamesi olarak kullanımı yeterince ele alınmamıştır. Özellikle düşük tenörden daha çok cevher kazanım isteği sonucu macun dolgu karışımlarını oluşturan atığın gradasyonundaki değişim (azalma) düşünüldüğünde, ÇMD'nin yeterli performansı sağlaması için atığın yerine agrega olarak farklı malzemelerin kullanımı detaylıca ele alınması gereken işletme, çevre ve maliyet açısından önemli bir araştırma konusudur.

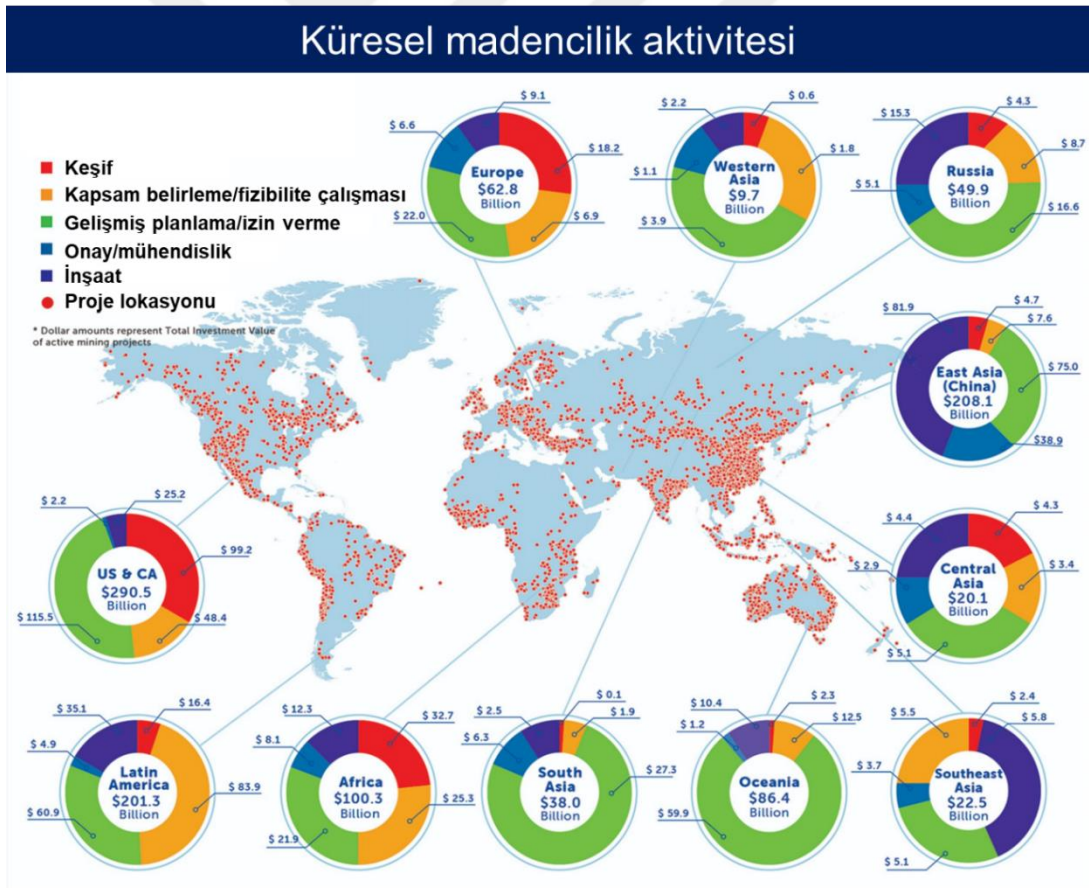
Bu tez çalışması kapsamında kırma kireçtaşıdan elde edilen örneklerin ÇMD içerisinde atığın kısmi yer değiştirmesi olarak kullanımı ele alınarak, performansına etkisi çeşitli test ve analizlerle incelenmiştir. Özellikle farklı iklim ve topoğrafyaya sahip bölgelerde yüksek miktarda kireçtaşına rastlanması bu özgün tez çalışmasını ortaya çıkarmıştır. Kırma kireçtaşının ÇMD içerisinde kullanımını geniş kapsamda araştıran ve konu hakkında detaylı bir portföy sunan benzer bir çalışmanın henüz literatürde bulunmaması, bu tez çalışmasının özgün değerini ortaya koymaktadır. Ayrıca ÇMD içerisinde kırma kireçtaşı kullanıma ek olarak uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) katkılarının birlikte kullanımıyla birlikte özellikle uzun kür sürelerinde ÇMD'lerde meydana gelen performans kayıplarının azaltılması ve maliyetlerin önemli ölçüde düşürülmesi planlanmıştır.

Sonuç olarak bu tez çalışması yardımıyla kırma kireçtaşı ve mineral katkı maddeleri (UK ve YFC) ile laboratuvar ortamında üretilen ÇMD'lerin performansı farklı kür süreleri ve karışım oranları dikkate alınarak değerlendirilmiş, literatürde bu konuyla ilgili boşluklar giderilmiştir.

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Maden Atıkları: Karşılaşılan Zorluklar ve Fırsatlar

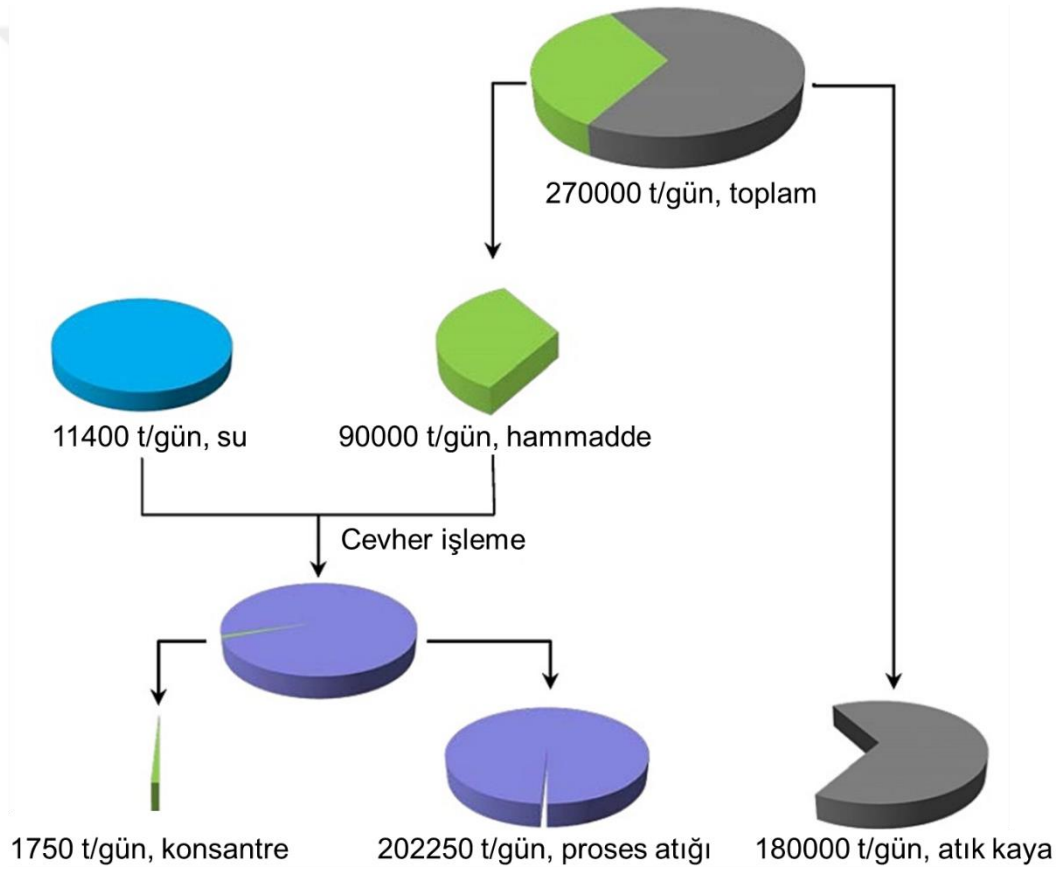
Çeşitli madencilik faaliyetleri (örn. madenlerin aranması, çıkarılması, hazırlanması ve zenginleştirilmesi) sonucu ortaya çıkan maden atıkları (işlenmiş proses atığı ve atık kaya), çevre ve güvenlik sorunları nedeniyle madencilik sektöründe uzun zamandır bir endişe kaynağı olmuştur. Ancak madencilik endüstrisi toplumumuz için kaçınılmazdır ve modern insan varlığı için hayati öneme sahiptir. Madenlerin çıkarılması küresel ekonomiye önemli bir katkı sağlar ve Şekil 1'de vurgulandığı gibi madencilik bir trilyon doların üzerinde bir endüstri olduğu tahmin edilmektedir. Madencilik endüstrisinin en büyük zorluklarından biri, milyarlarca tona ulaşan büyük miktarda atık üretimidir.



Şekil 1. Küresel madencilik aktivitesi (Govreau, 2022)

Madencilik endüstrisi tarafından üretilen yıllık katı maden atığının 20 milyar tonun üzerinde olduğu tahmin edilmektedir (Edraki vd., 2014). Kanada gibi ülkeler

yılda 600 milyon tondan fazla atık üretmekte ve çevreyi kirletme potansiyellerinin yüksek olması nedeniyle bu atıkları etkili bir şekilde yönetmek için 10 milyar dolardan fazla para harcanmaktadır. Avrupa Birliği'ndeki madencilik ve taş ocağı atıkları, yalnızca 2020 yılında ekonomik faaliyetlerden ve hanelerden kaynaklanan toplam atığın yaklaşık %25'ini temsil etmektedir. Çin Toprak ve Kaynak Ekonomisi Akademisi Çin'in 2018 itibarıyla 20 milyar tondan fazla maden atığı yığın stoğuna sahip olduğunu bildirmiştir (Adesina, 2025). Genel olarak, yıllık 50-80 milyon ton atık kaya üretilmektedir (Zhu vd., 2021). Şekil 2, örnek bir bakır madeninde üretilen proses atığı ve atık kaya miktarları gösterilmektedir.



Şekil 2. Madencilik faaliyetleri ile üretilen atıklar ve miktarları (Fang vd., 2023)

Sonuç olarak, madencilik endüstrisi bu atıkların güvenli ve etkili bir şekilde bertaraf edilmesi konusunda giderek daha fazla endişe duymaktadır. Bu zorluğa yanıt olarak, endüstri etkili atık yönetim sistemlerinin uygulanmasını sağlamak için adımlar atmıştır. Bu sistemler, maden atıklarını güvenli ve istikrarlı bir şekilde depolamanın bir yolunu sunmayı ve böylece bertaraflarıyla ilişkili olası çevresel etkileri azaltmayı

amaçlamaktadır. Küresel madencilik endüstrileri tarafından üretilen devasa miktarlardaki maden atıkları, doğal çevreyi kirletme ve ekosistemi bozma potansiyelleri konusunda önemli rol oynamaktadır. Bazı durumlarda, belirli cevherlerin madenciliği üretilen toplam atık kütesinin %90'ına kadarını oluşturabilir (Adiansyah vd., 2015, Obenaus-Emler vd., 2020). Bu maden atıkları çevre, ekonomik ve sosyal ilerleme açısından önemli zorluklar teşkil ederken, sürdürülebilir kalkınma ve yenilikçi teknolojilerin gelişen manzarası bunların kullanımı için fırsatlar ortaya çıkarmaktadır.

3.1.1. Karşılaşılan Zorluklar

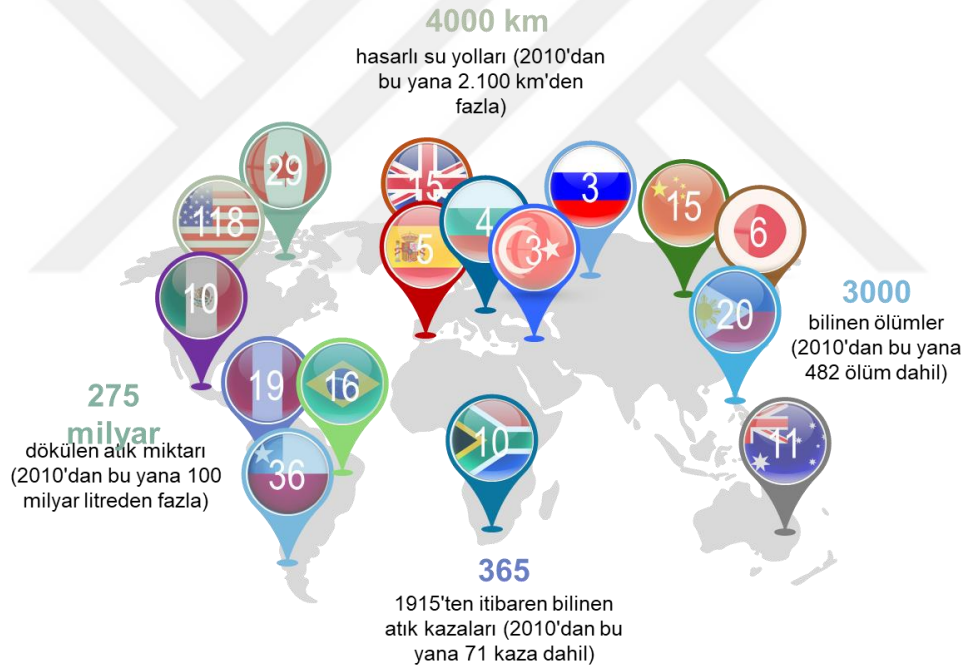
Maden atıkları (örn. atık ilerleme kayaları ve işlenmiş proses atıkları) çevresel ve operasyonel açıdan ciddi sorunlar oluşturarak sürdürülebilir madenciliği tehdit etmektedir. Özellikle cevhere ulaşmak için kazılan örtü tabakaları ve yan kayaçlar (örn. atık ilerleme kayaları) maden işletme alanlarında büyük hacimlerde yığın birikimine neden olmaktadır. Ayrıca çıkarılan atık kaya ve moloz yığınları depolanma koşullarına bağlı olarak birçok çevresel (örn. su, hava ve toprak kirliliği) sorunu tetiklemektedir (Belle vd., 2021). Bunun yanı sıra cevherlerin zenginleştirme ve hazırlama işlemleri sonucu üretilen ve değerli metaller kazanmak amacıyla kullanılan kimyasallar nedeniyle tehlikeli olarak sınıflandırılan işlenmiş proses atıklarının geleneksel yöntemler ile bertarafı başta doğal kaynakların bitmesi ve iklim değişikliği gibi sorunların yanı sıra tüm canlılar için de bir tehdit oluşturmaktadır. Değerli cevherlerin kimyasal süreçler ile zenginleştirilmesi sonucu ortaya çıkan maden atıkları (proses atıkları) potansiyel olarak tehlikeli elementleri içermektedir. Bu kimyasal atıklar tehlikeli elementler içerdiğinden çevreye sızdıklarında yeraltı ve yüzey sularını önemli ölçüde kirletebilir. Yüzey ve yeraltı sularının bu kimyasallar ve elementlerle kirlenmesi, çevre ve ekosistem için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Del Rio-Salas vd., 2019). Dahası, bu atıkların önemli bir kısmı sülfürlü mineraller ve ağır metal içerdiğinden çevre için önemli bir risk oluşturmaktadır. Sülfür bileşikleri içeren mineraller su ve oksijenle temas ettiğinde oksidasyon olarak bilinen bir kimyasal reaksiyon meydana getirmektedir (Park vd., 2019). Bu süreç çevredeki ortamın asitlenmesine neden olur ve bu da ekosistem üzerinde zararlı etkilere sahip olabilir. Asitlenme, etkilenen bölgede yaşayan bitkilere ve hayvanlara zarar verebilecek alkali

ortamın bozulmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, atıklardan kaynaklı zararlı sonuçları önlemek için sülfürlü minerallerin salınımını izlemek, kontrol etmek ve atıkların çevre dostu ve uygun maliyetli bir şekilde yönetimi veya bertarafı hayati önem taşımaktadır (Kossoff vd., 2014).

Sürdürülebilir atık yönetimi için farklı yaklaşımlar olmasına rağmen, doğrudan ve dolaylı bertaraf olmak üzere iki yöntem bulunmaktadır (Adiansyah vd., 2015). Doğrudan bertaraf yöntemi atıkların doğrudan nehirlerle, göllere ve okyanusa boşaltılması içermektedir. Geri döndürülemez çevresel etkisi ve sürdürülebilir olmaması nedeniyle, Endonezya ve Papua Yeni Gine gibi birkaç ülke dışında doğrudan bertaraf nadiren uygulanmaktadır (Angel vd., 2013, Rusdinar vd., 2013). Buna karşılık, genellikle atıkların depolama tesislerine (örn. yerüstünde atık barajlarında havuz ya da göletlerde veya pasa depolama alanlarında) boşaltılmasını içeren dolaylı bertaraf, daha uygun bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir (Qi ve Fourie, 2019). Ancak depolama altyapılarının uzun vadeli istikrarını sağlamak büyük bir zorluktur, çünkü bu depolama altyapılarının küçük bir istikrarsızlığı bile ciddi çevresel, insani ve ekonomik maliyetlerle gelebilir (Mahmood ve Elektorowicz, 2015; Cacciuttolo vd., 2023). Ek olarak depolama tesislerinin yüzyıllar boyunca istikrarını sağlamak önemli bir mühendislik ve çevre sorunudur. Maden atıklarının uygun şekilde depolanması için madencilik şirketleri her yıl milyonlarca dolar para harcamaktadır. Atık depolama tesislerinin sürekli izlenmesi ve bakımı, şirketlerin genel kârlarını engelleyebilecek ve ciddi sonuçlara yol açabilecek finansal kaynaklar gerektirmektedir. Ayrıca bu atıkların uygunsuz şekilde depolanması ve yönetilmesi önemli çevresel hasarlar veya kazalara sebebiyet vererek madencilik şirketlerinin yasal sorumluluklarla karşı karşıya kalmasına neden olabilir (Adesina, 2025).

Günümüzde çevre koruma konusunda artan kamu bilinci, atık barajlarını içsel dezavantajları nedeniyle daha az tercih edilir hale getirmiştir. Öncelikle, atıkların açığa çıkması kimyasal bileşenlerin (örneğin pirit) oksidasyonuna yol açar ve bu da asit maden drenajının ana tetikleyicisidir. Asit maden drenajının oluşması su kaynaklarını kirletecek ve bu da suyu evsel ve tarımsal kullanımlar için uygunsuz hale getirecektir. Daha da kötüsü, ağır metal sızıntısından kaynaklanan toksisite nedeniyle biyotik bozulma meydana gelecektir (Skousen vd., 2017). Ayrıca, atık barajlarının inşası geniş arazi alanları gerektirir. Örneğin, şu anda Çin'de yaklaşık 2000 hektarlık araziyi

kaplayan 12.000'den fazla atık havuzu bulunmaktadır (Wang vd., 2017). Başka bir örnek ise 2011 yılında Alberta'da (Kanada) atık çamuru barajından 130 km²'den fazla arazinin etkilenmiş olmasıdır. Çevresel sorunların yanı sıra, genellikle atık bulamacındaki aşırı miktarda sudan kaynaklanan (Fourie, 2009) atık barajı kazaları, yerel toplulukların güvenliği için önemli tehditler oluşturmaktadır. *Şekil 3*, 1915'ten 2020'ye kadar meydana gelen atık barajı kazalarını göstermektedir (Drif vd., 2021). Bu kazalar arasında 2019'da Brezilya'da meydana gelen atık barajı yıkılmasında 249 kişi hayatını kaybetmiştir (Fang vd., 2023). Atık kayaların bertarafı, proses atıklarının bertarafıyla aynı dezavantajlara sahiptir. Atık kayaların yüzeyde depolanması yalnızca araziyi işgal etmekle kalmaz (133 km²), aynı zamanda kükürt dioksit ve karbon oksitler gibi birçok zararlı gazın da salınmasına olanak tanır (Zhou vd., 2020).



Şekil 3. Farklı ülkelerdeki atık barajı kazaları ve etkileri 1915-2020 (Drif vd., 2021)

Dünya çapında, 2010 yılından bu yana atık barajlarından kaynaklanan yaklaşık 3000 ölüm gerçekleşmiştir ve bu sayı katlanarak artmaktadır. 2008 yılında Çin'de (Shanxi eyaleti- *Şekil 4a*) bir atık barajının çökmesi yüzlerce kişinin ölümüne neden olmuştur (Wu, 2020). Romanya'da (Baia Mare şehri) bir atık barajının çökmesi çevreye önemli miktarlarda siyanür salmış, yüzey/yer altı su kaynaklarını önemli ölçüde kirletmiş ve birçok hayvanın ölümüne neden olmuştur (Brid vd., 2008). Amerika Birleşik Devletleri'nde (Tennessee'deki Kingston Fosil Enerji Santrali- *Şekil*

4b), 2008 yılında bir kömür külü barajının yıkılması 300 hektarlık verimli araziye kirletmiştir. Bu atıkların neden olduğu kirliliğin temizlenmesi 6 yıl sürmüş ve hükümete 1,2 milyar dolarlık zarara neden olmuştur (EPA, 2014).



Şekil 4. Atık barajı kazaları: Çin (a); ABD (b); Macaristan (c); ve Türkiye (d)

2009 yılında Rusya'da (Magadan bölgesi) altın atıklarının depolandığı bir baraj çökmüş ve çevredeki yaklaşık 25 eve zarar vermiştir. İki kişi ölmüş ve atıklar önemli çevresel sorunlara neden olmuştur (Glotov vd., 2018). 2010 yılında Macaristan'daki bir atık barajında (Ajka alümina tesisi - Şekil 4c) meydana gelen bir kazada yaklaşık 1 milyon ton atık çevreye yayılmış ve 2 kişi hayatını kaybetmiştir. Hükümet bu atıkların çevresel etkilerini gidermek için 103,4 milyon dolar harcamıştır (Mayes vd., 2016). 2012 yılında Filipinler'de meydana gelen bir baraj kazası sonucu 13 milyon m³ atık çamurunu çevreye salmıştır (Islam ve Murakami, 2021). 2021 yılında Türkiye'de (Giresun İli Şebinkarahisar İlçesi - Şekil 4d) kurşun-çinko-bakır tesisinde bir atık barajı çökmüş 4 bin 500 ton kimyasal atık çevreye yayılmıştır. Bunun sonucunda bölgede birçok tarla, göl ve hayvan zarar görmüştür.

3.1.2. Karşılaşılan Fırsatlar

Maden atıkları çevresel, sosyolojik ve ekonomik yönden önemli zorluklara neden olmakla beraber günümüzde sürdürülebilir uygulamalar ve yenilikçi

teknolojiler sayesinde bu zorlukları fırsatlara dönüşmektedir. Araştırma ve geliştirmeye doğru yatırımlar ile maden atıkları sorunlu bir atık olmaktan önemli çevresel ve ekonomik faydaları olan bir kaynağa dönüşümüne yardımcı olmaktadır. Madencilikte şu anda kullanılan geleneksel atık yönetim sistemlerine (örn. yer üstü atık barajlarında/göletlerinde depolama) ek olarak, atıkların sosyoekonomik/çevresel açıdan daha etkili kullanımı için atıkların susuzlaştırılması, dolgu olarak geri dönüşümü/yeniden kullanımı ve entegre atık bertaraf gibi sürdürülebilir birçok teknik mevcuttur (Adewuyi vd., 2024).

Bu yaklaşımlar arasında cevher üretimi sırasında oluşan yeraltı açıklıklarının duraylılığını korumak, yeraltı işçileri, ekipmanları ve yapıları için güvenli çalışma platformu sağlamak ve cevher zenginleştirmeden hemen sonra oluşan atıkların işlenmesi için bir bertaraf alanı oluşturmak gibi sağladığı birçok fayda nedeniyle madencilik sektöründe yeraltı dolgu yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolgu uygulamalarına ek olarak günümüzde teknolojinin ilerlemesi, ortaya çıkan yeni teknikler ve metodik çalışmalar yoluyla maden atıkları potansiyel bir ham madde kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Cheng vd., 2023). Atıklardaki değerli kritik metaller yeniden değerlendirilebilir ve maden ekonomisine önemli katkılar sağlanabilir (Yu vd., 2024).

Atıkların farklı sektörlerde hammadde olarak yeniden değerlendirilmesi, çevresel sorunları önemli ölçüde azaltacaktır. Böyle bir dairesel ekonomi süreci kaynak verimliliğini artırabilir ve çeşitli iş sektörlerinin yaratılmasına olanak tanıyabilir (Amar vd., 2022). Artık değersiz kabul edilen atıkların çeşitli yaratıcı uygulamalarla işlenmesi ve değerli ürünlere dönüştürülmesi madencilik sektörü için bir dönüm noktası olacaktır. Atıkların, özellikle inşaat sektöründe çimento ikamesi olarak ve tarım, enerji, kimya ve çevre gibi sektörlerde bir hammadde kaynağı olarak düşünülmektedir ve bu amaçla teknolojik ilerlemeler kaydedilmektedir (*Şekil 5*). Metal madeni atıklarının çeşitli özellikleri, çeşitli uygulama ve kullanımlara olanak tanır. Örneğin, demir, bakır, çinko ve altın madenciliğinden elde edilen atıklar, tuğla, fayans ve hafif agregalar dahil olmak üzere çeşitli ürünler için kullanılabilir (Pappu vd., 2007). Özellikle bakır atıkları, yol ve otoyol kaldırım betonlarında ve tuğla üretiminde başarıyla kullanılabilir (Olusawasola vd., 2015). Bakır cürufu, çatı kiremitleri, maden dolgu malzemeleri ve granül malzemelerin üretiminde

kullanılabilir (Da Silva vd., 2014). İnce granülasyonları ve yüksek silika, demir oksit, alümina ve diğer küçük mineraller içeriğiyle karakterize edilen demir cevheri atıkları, özellikle inşaat endüstrisinde kullanıma uygundur (Gorai ve Jana, 2003). Atıklar, kaldırım ve duvar blokları üretmek için etkili bir şekilde kullanılabilir. Ek olarak, manganez açısından zengin atıkların tarımsal ormancılıkta, yapı malzemelerinde ve kaplamalarda uygulamaları vardır; boksit atıkları ise şap üretiminde değerlendirilebilir (Lottermoser, 2011).

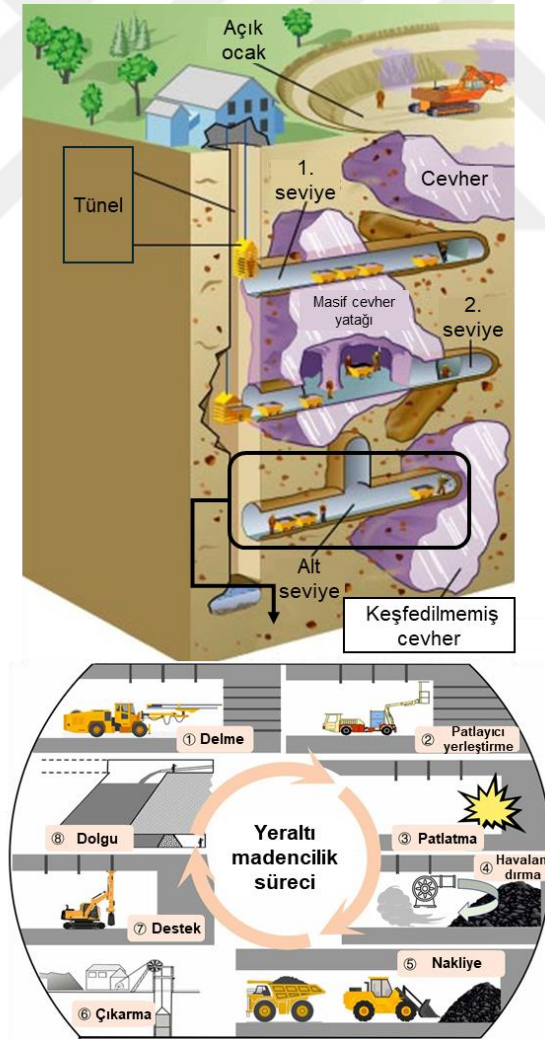


Şekil 5. Maden atıklarının farklı sektörlerde hammadde olarak kullanımı

Ancak atıkların hammadde veya ikincil kaynak olarak yeniden işlenmesinde kullanılacak teknolojik altyapının getirdiği yüksek yatırım maliyetleri, maden işletmeleri için önemli derecede ekonomik sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle çoğu maden işletmesi günümüzde atıkların yeniden işlenmesi için yatırım yapmaktan kaçınarak genellikle atıkların hacmini ve çevresel zararlarını azaltmak amacıyla yeraltı dolgu uygulamalarını tercih etmektedir. Yeraltı maden dolgularını günümüzde operasyonel ve maliyet yönünden en etkin ve sürdürülebilir atık yönetimin stratejilerinden biridir. Özellikle dolgu yöntemleri arasında çimentolu maden/macun dolgu yöntemi birçok faydası nedeniyle ÇMD gelişmiş maden sahalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca ÇMD yöntemi atıkların bertarafı için Avrupa Birliği ve Dünya çapında mevcut en iyi tekniklerden birisi olarak değerlendirilmektedir (Garbarino vd., 2020).

3.2. Yeraltı Madenlerinde Dolgu Uygulamaları

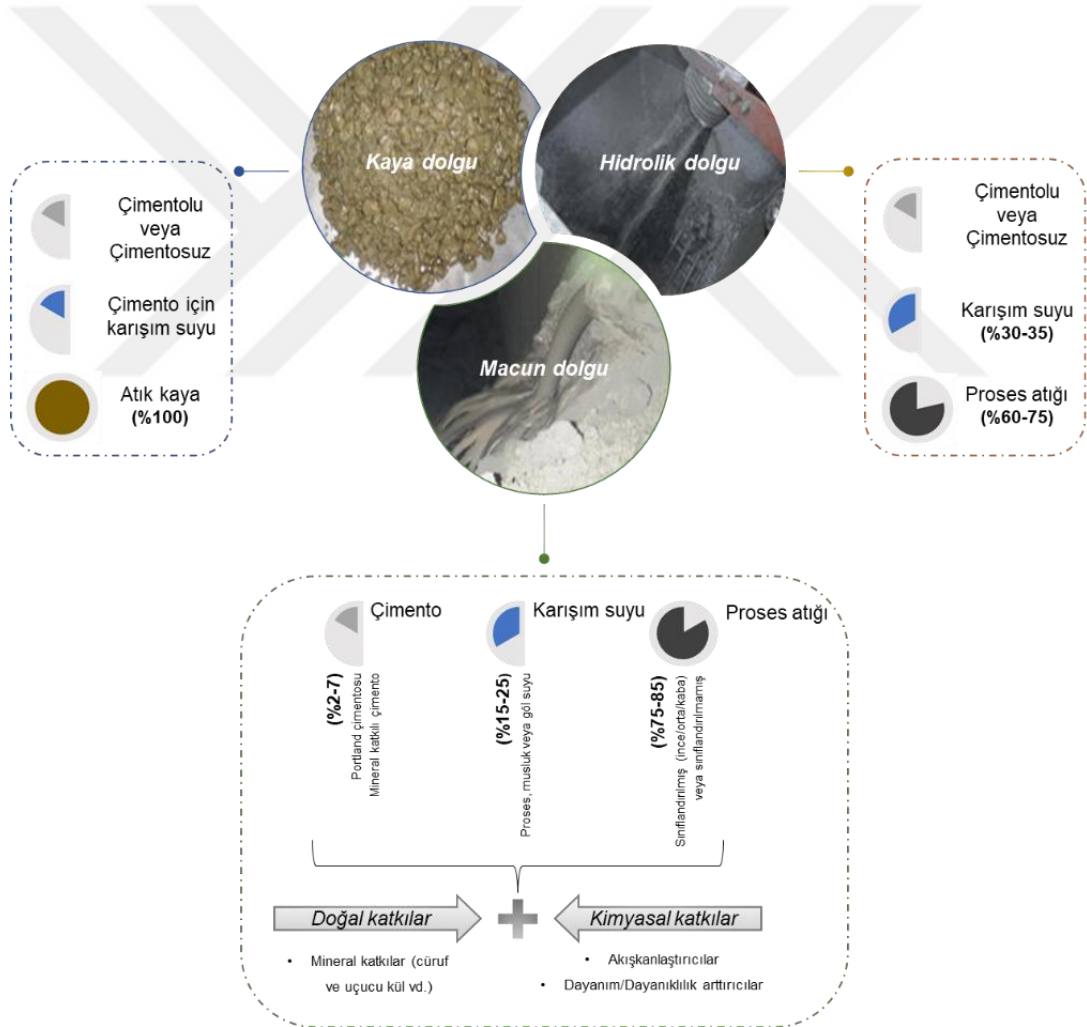
Yeraltı madenciliğinde, üretim süreci Şekil 6'da gösterildiği birçok aşamadan (örn. delme, patlatma, havalandırma, nakliye ve dolgu) oluşmaktadır. Bu süreçler arasında dolgu, ekonomik olarak güvenli çalışma koşulları oluşturmak ve sürdürmek amacıyla yeraltındaki boşluklara doldurulan malzeme olarak tanımlanmaktadır (Thomas vd., 1979). Ayrıca daha spesifik olarak maden dolgusu, bertaraf veya mühendislik işlevi gerçekleştirmek amacıyla yeraltı maden boşluklarına yerleştirilen herhangi bir atık malzeme olarak tanımlanabilir (Grice, 1998). Dolgu ilk olarak 125-130 yıl önce madenlerde kullanılmıştır. O zamandan beri dolgu, hidrolik ve kaya dolgusundan modern macun dolgusuna doğru evrilmiştir (Şekil 7). Literatürden toplanan çeşitli dolgu tipleri ve bunların vaka geçmişleri Şekil 8'de sunulmuştur (Landriault, 2001; Senepati vd., 2013; Qin vd., 2024).



Şekil 6. Yeraltı madenciliğinde üretim süreçleri (Liu vd., 2024)

3.2.1. Çimentolu Maden/Macun Dolgu (ÇMD)

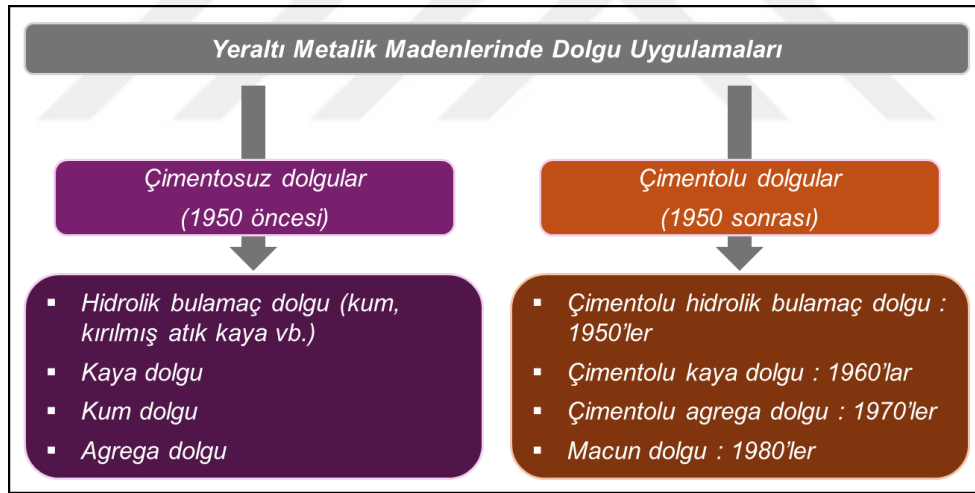
Modern madencilikte, değerli mineraller çıkarıldıktan sonra atık malzeme genellikle yeraltı boşluklarına veya açık ocaklara geri doldurulur. Bu tür geri doldurma uygulaması çeşitli madencilik yöntemlerinde (örn. kes-doldur, alt seviye açma durdurma ve açık ocak madenciliği) iyi bir şekilde benimsenmiştir (Henderson, 1998; Emad vd., 2015; Lu vd., 2018). Dolgu yöntemi, maden atıklarının kalıcı yönetimi için çevre dostu, maliyet açısından verimli ve olgun bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır (Potvin vd., 2005). Dahası, pasif destek sağlayabilir ve çevredeki kaya kütlelerini stabilize edebilir. Macun dolgu uygulamalarında genellikle çimento kullanıldığından, çimentolu maden/macun dolgusu (ÇMD) olarak da adlandırılır.



Şekil 7. Yeraltında madenlerinde uygulanan farkı dolgu yöntemleri

ÇMD, ilk olarak 1957'de Falconbridge Nickel Mines tarafından Kanada'nın Sudbury kentindeki Hardy madeninde ve 1970'lerin sonlarında Almanya'daki Bad

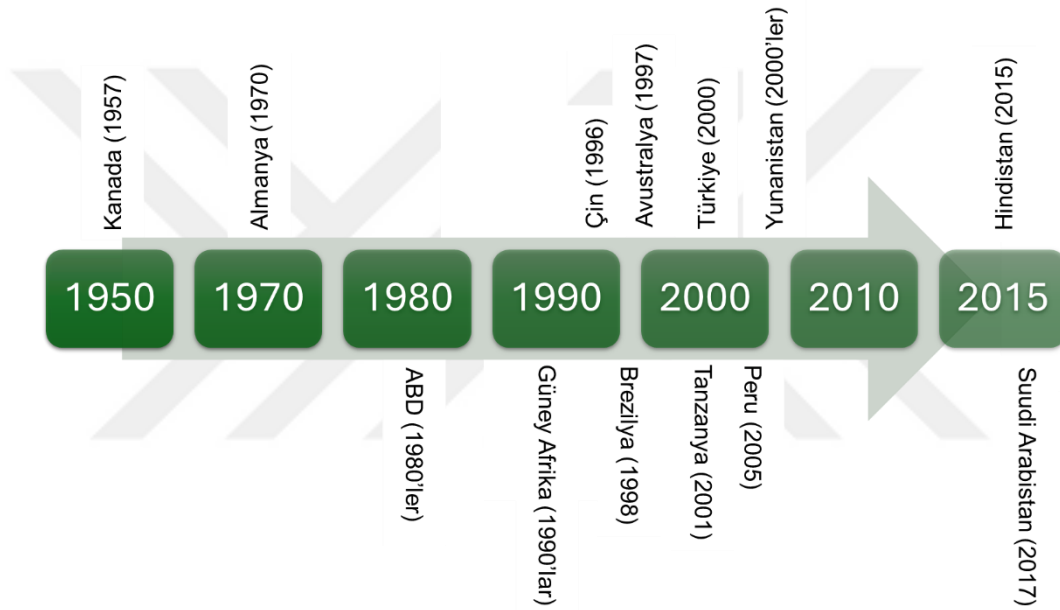
Grund madeninde (ince değirmen agregası ve siltli filtrelenmiş maden atıkları) kullanılmıştır (Robinsky, 1975). Daha sonra ABD'deki Lucky Friday madeninde uygulanmıştır. ÇMD, 1990'larda Kanada'da ve Avustralya'da bulunan farklı madenlerde başarıyla kullanıldı ve ÇMD'yi kaya dolgusu ve hidrolik dolgu için uygulanabilir bir alternatif haline getirdi (Rankine ve Sivakugan, 2007). Maden macunu dolgu uygulamalarını daha sonra ABD, Güney Afrika, Çin ve Avustralya tarafından takip edildi. Çin'de macun teknolojisi uygulaması 1996 yılında Jinchuan Group Co. tarafından başlatıldı. 2006 yılında ise Çin'de yer alan Huize Kurşun-Çinko madeninde ÇMD uygulaması ilk kez derin konik tikiner ile gerçekleştirildi (Wu vd., 2017). Brezilya'daki ilk macun dolgu tesisi 1998'de kuruldu ve daha sonra 2000'lerde Türkiye, Tanzanya, Arjantin ve Peru bunu izledi. Hindistan, ilk macun dolgu tesisini 2015 yılında Rajasthan'daki Hindusthan Zinc Limited'in (HZL) Sindesar Khurd (SK) madeninde kuruldu (Behera vd., 2021). Şekil 9'da dünya çapında farklı ülkelerde macun dolgu uygulamalarının başlangıcından bu yana tarihsel gelişimi görülmektedir.



Şekil 8. Dolgu çeşitleri ve tarihçesi (Behera vd., 2021)

Son yıllarda ÇMD uygulamaları teknik, çevresel ve ekonomik faydaları nedeniyle hem akademide hem de endüstride daha fazla ilgi görmektedir. ÇMD'nin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir: (i) suyu, işlem reaktiflerini ve enerjiyi geri kazanmak; (ii) maden atıklarının yoğunluğunu en üst düzeye çıkarmak ve bu sayede atıkların geleneksel bertarafını (örn. atık havuzları/göletleri) azaltmak; (iii) atıkların geleneksel bertarafı sonucu meydana gelebilecek kaza riskini en aza indirmek; (iv) cevher geri kazanım oranını artırmak ve cevher seyrelmesini azaltmak; (v) yeraltı

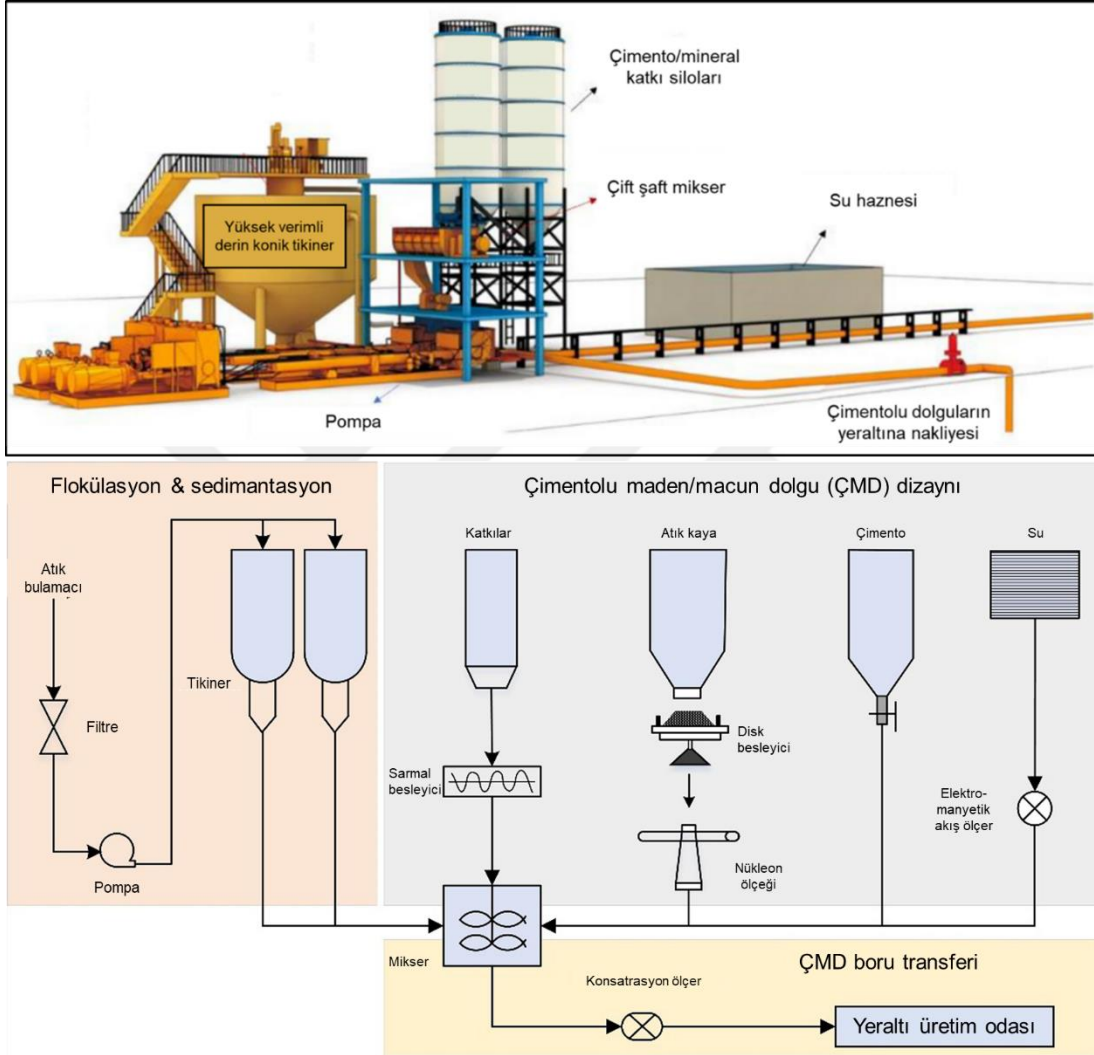
boşluklarının duraylılığını arttırarak madencilik güvenliğini, verimliliğini ve üretkenliğini arttırmaktır (Edraki vd., 2014; Deb vd., 2017). Avantajlarının yanı sıra ÇMD'lerin en büyük dezavantajı ise nispeten yüksek işletme maliyetidir. ÇMD harcamaları tüm madencilik maliyetlerinin %20'sine karşılık gelmekte ve bunların arasında çimento ÇMD maliyetinin yaklaşık %75'ini oluşturmaktadır (Edraki vd., 2014). Bu nedenle, madencilik sektöründe ÇMD kullanımındaki en önemli zorluk, ÇMD tasarımı sırasında her sürecin kontrollü olması ve potansiyel maliyet analizlerinin yapılmasıdır.



Şekil 9. Dünya çapında macun dolgu uygulamasının kronolojisi (Behera vd., 2021)

ÇMD, susuzlaştırılmış maden atıklarının (örn. tikiner atıkları, kırılmış gang veya kum; kütle oranı %70~85), bağlayıcının (genellikle Portland çimentosu, cüruf ve/veya uçucu külle karışımı; %3~7) ve suyun (örn. musluk, proses veya göl/dere suyu) bir karışımı olarak üretilmektedir. Maden atıkları, kalıntıların flokülantlar yardımıyla filtrelendiği veya susuzlaştırıldığı değirmenden gelmektedir. Bazı durumlarda ÇMD karışımlarına bağlayıcılar ve suyla karıştırılmadan önce maden atıklarının tane boyu dağılımının iyileştirilmesi amacıyla kırılmış atık kaya eklenir. En yaygın kullanılan bağlayıcı, sıradan Portland çimentosudur (PÇ). ÇMD uygulamasında PÇ kısmen değiştirilebilir veya maliyet tasarrufu için kireç, uçucu kül, cüruf veya diğer alkali katalizörler gibi farklı katkı maddeleriyle birlikte kullanılabilir (Xue vd., 2018). İstenilen ve uygun mekanik özelliklere sahip ÇMD karışımlarının

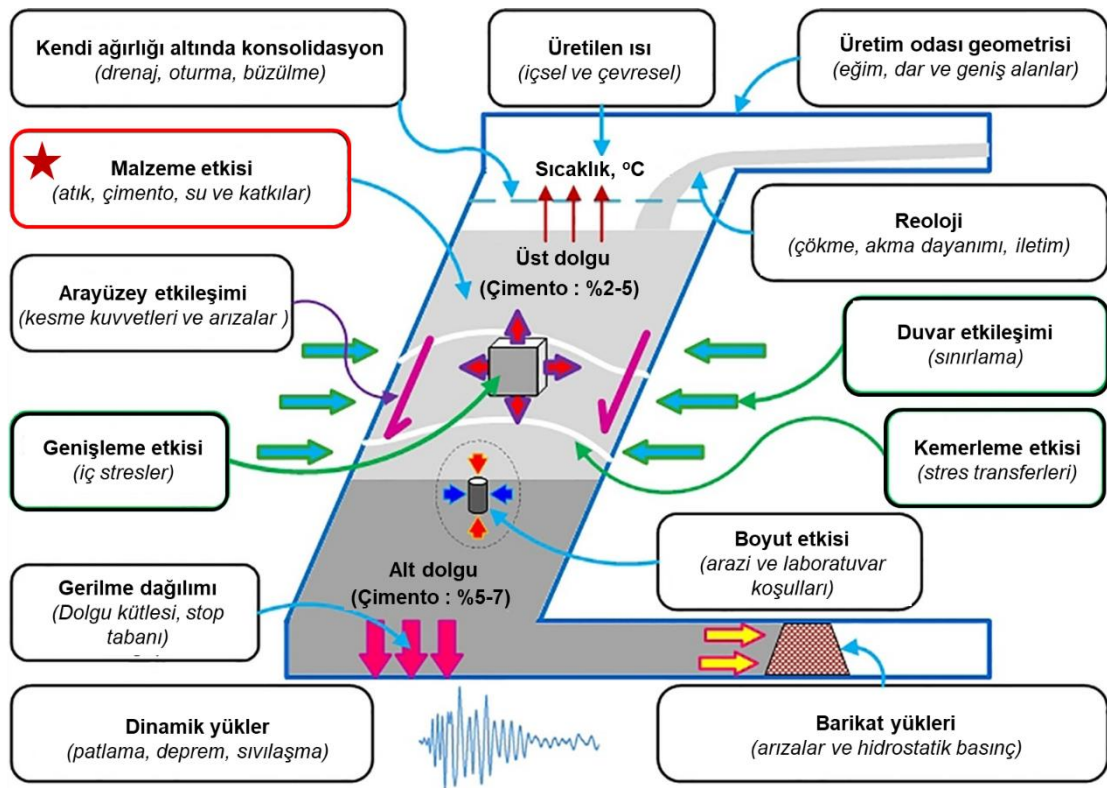
üretilmesi amacıyla her bileşenin uygun tasarımın belirlenmesi gerekmektedir. Son olarak, taze ÇMD bulamacı maden yüzeyinde hazırlanır bir tesiste hazırlanarak yeraltına boru hatları yardımıyla taşınır (Belem ve Benzaazoua, 2008, Qi vd., 2018a). Şekil 10, tipik bir ÇMD üretim tesisini göstermektedir.



Şekil 10. Tipik ÇMD üretim tesisi (Qi ve Fourie, 2019; Wang vd., 2023)

Yapılan çalışmalar, ÇMD uygulamasında yüksek dayanım ve duraylılık sunan bir dolgu karışımı tasarımının tüm maden firmaları için genellenemeyeceğini göstermiştir (Hassani vd., 2001; 2007; Fahey vd., 2009; Jafari ve Grabinsky). Bu nedenle, her bir dolgu uygulaması için en uygun karışım tasarımı, her bir spesifik dolgu elemanı ve madenlerdeki test koşulları dikkate alınarak ayrı ayrı belirlenmelidir (Khudyakov ve Vashchenko, 2020). En uygun ÇMD karışımlarını belirlemek için, macun dolgularının dayanımını/kararlılığını etkileyen parametreleri bilmek ve

kapsamlı bir şekilde incelemek gerekir (Şekil 11). Bunlar iki ana koleksiyon etrafında toplanabilir; iç parametreler dolgunun kendisini oluşturan malzemelerdir (Helinski vd., 2007a; 2007b). Dolgunun performansı, özellikle bu malzemeler ve kürlenme sırasında birbirleriyle olan etkileşimleri nedeniyle önemlidir (Deschamps vd., 2008). Bir diğer önemli etki faktörü ise dolgunun yeraltına yerleştirildikten sonraki performansını belirleyen dolgu kaya etkileşimi, kürlenme koşulları, konsolidasyon, drenaj, yeraltı suyu, dinamik veya aktif yükler gibi dış parametrelerdir. (Yılmaz vd., 2015a; Mbonimpa vd., 2019; Libos vd., 2021)



Şekil 11. Macun dolguları etkileyen içsel ve dışsal faktörler (Yılmaz vd., 2015b)

3.2.1.1. Macun Dolguların Tasarımı

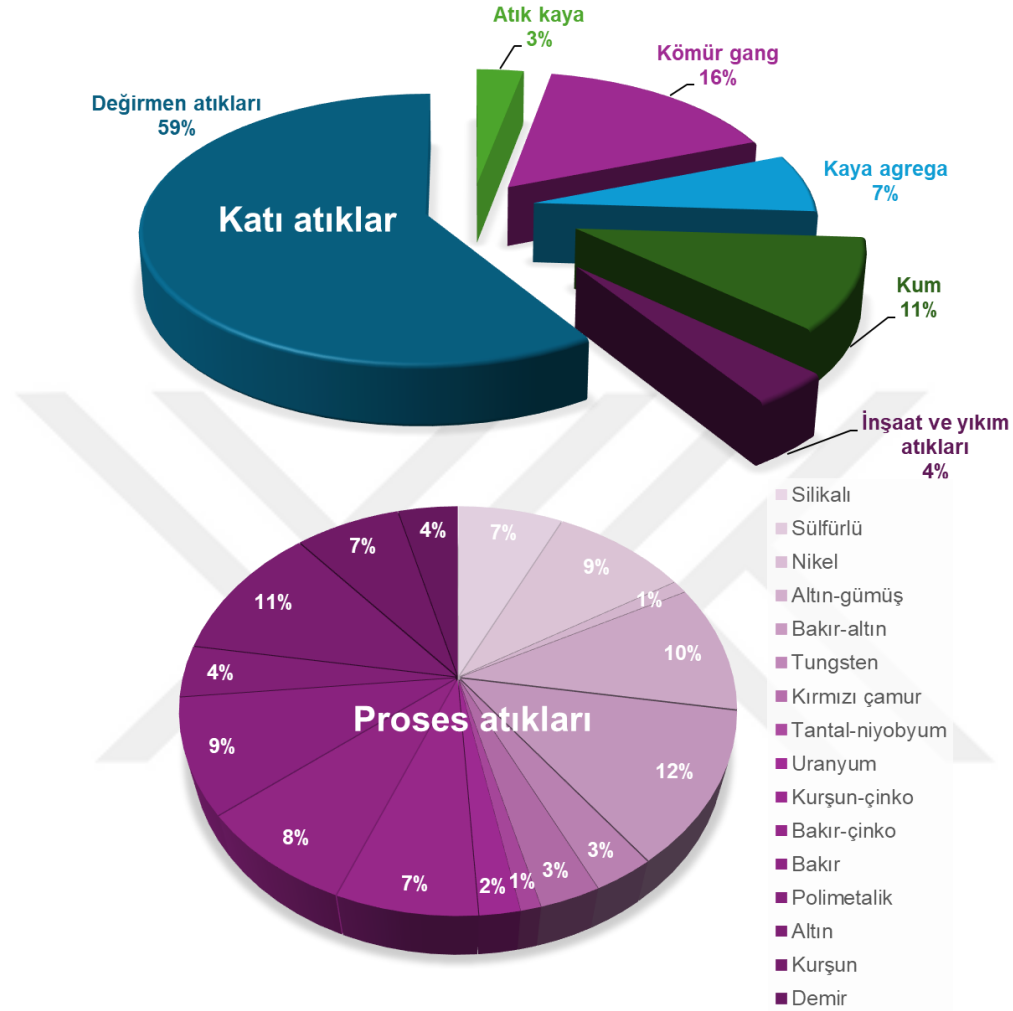
Çimentolu macun dolgu (ÇMD) atıkların (örn. değirmen atıkları veya kırılmış gang ve kum, kütle oranı %70~85), bağlayıcının (genellikle Portland çimentosu, %3~7) ve suyun serbest akışlı karışımı olarak hazırlanan kompozit bir malzemedir (Koohestani vd., 2021, Li vd., 2022b). Her bir ÇMD bileşenin karakteristiği ve oranı (reolojik özellikler dikkate alınarak), karışımın gerekli ve istenen mekanik özelliklere ulaşması amacıyla uygun şekilde belirlenmelidir. Örneğin, atıkların gradasyonu ve

özgül yüzey alanı, su moleküllerinin adsorpsiyon yeteneğini belirler. Genel olarak, ince parçacıkların (<20 um) kütle yüzdesi, ÇMD'lerin yeraltına nakliye sırasında ayrışmasını önlemek için %15'ten yüksek olmalıdır (Landriault, 2001). Ayrıca, ÇMD'lerin dayanımı için atıkların ince parçacıkların optimum oranının kütlece %25-30 oranları arasında olması gerekmektedir (Fall vd., 2005). ÇMD karışımların üretiminde farklı malzemeler (yani, uçucu kül, cüruf, çimento veya bunların karışımı) bağlayıcı olarak kullanılabilir ancak bunların arasında en yaygın kullanılanı Portland çimentosudur (PÇ). ÇMD'lerde kullanılan çimento miktarı yalnızca dolguların yatırım maliyetini belirlemekle kalmaz aynı zamanda karışımlarda ana bağlayıcı madde olarak görev yapan kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) miktarını etkileyerek mekanik dayanımın gelişimini kontrol eder (Fall vd., 2010). Ayrıca, ÇMD'lerin akışkanlığını sağlamak için su/çimento (s/ç) oranı 2,7 ile 20,2 arasında olmalıdır (Belem ve Benzaazoua, 2008). Su, çimento hidratasyonu söz konusu olduğunda da gerekli bir bileşendir, çünkü su eksikliği bağlayıcının eksik hidratlanmasına yol açar. Sonuç olarak yukarıda da bahsedildiği gibi uygun mühendislik özelliklerine sahip ÇMD'ler üretilmesi amacıyla dolgu bileşenlerinin karakteristik özelliklerinin etraflıca araştırılması ve buna göre reçetelerin optimize edilmesi gerekmektedir.

3.2.1.1.1. Maden Atıklarının Macun Dolguda Kullanımı

Madencilikte çimentolu macun dolgu (ÇMD) uygulamalarından bu yana, dolgu malzemesi olarak kullanılmak üzere farklı endüstriyel katı atıklar üzerinde araştırmalar devam etmektedir. Macun dolgusunda kullanılacak atık türü, madenin yakın çevresinde bulunabilirliğine ve erişilebilirliğine bağlı olarak değişmektedir. *Şekil 12*, 1990'dan bugüne kadar ÇMD'lerde çeşitli endüstriyel katı atıkların kullanım miktarları hakkında bilgi vermektedir. Literatürde macun dolgusu için en çok değirmen atıklarının kullanıldığı, ardından kömür gang, kum, kaya agregası, inşaat yıkım atığı ve atık kayanın geldiği görülmektedir. Cevherlerin zenginleştirilmesi ile devasa üretim hacimlerine ulaşan değirmen atıkları ÇMD'ler için kullanımının fazla olması (%59) ana nedenlerindendir (*Bölüm 3.1*'de detaylı olarak bahsedilmiştir). Bunun yanı sıra dolguda atık kayaların, kaya agregaların, inşaat ve yıkım atıklarının daha az kullanılması, bu atıkların iri tane boyutundan ve istenen tane boyutunu elde etmek için ek kırma ve eleme gereksiniminden kaynaklanmaktadır. Bu ek kırma ve

eleme gereksinimi doğrudan ÇMD işletme maliyetlerini önemli ölçüde arttırdığından maden şirketlerine maddi yük bindirmektedir.



Şekil 12. Katı ve değirmen atıklarının ÇMD’de kullanımı (Behera vd., 2021)

Çıkarılan cevhere bağlı olarak değirmen atıklarının farklı tipleri vardır. Demir cevheri, silika, nikel, altın-gümüş, bakır-altın, tungsten, kırmızı çamur, tantal-niyobyum, uranyum, kurşun-çinko ve sülfür açısından zengin değirmen atıkları ÇMD’lerde kullanılan küresel büyük değirmen atıklarıdır. Ancak literatürde ÇMD’lerde genel olarak bakır-altın, altın-gümüş, altın, bakır-çinko ve bakır atıklarının kullanımı daha yaygındır. Bunun yanı sıra nikel, tantal-niyobyum cevher atıkları, uranyum ve kurşun-çinko değirmen atıkları sadece birkaç çalışmada kullanılmıştır (Şekil 12).

Herhangi bir atık malzemeyi ÇMD karışımlarında kullanmadan önce fiziksel kimyasal ve mineralojik özelliklerinin araştırılması son derece önemlidir. Özellikle ÇMD karışımlarının fiziksel özellikleri (örn. özgül ağırlık, gradasyon ve yoğunluk) esas olarak dolguların kalitesi ve performansı üzerinde son derece etkilidir. Dolgu karışımlarının özgül ağırlığı doğrudan cevher türüyle ilgilidir ve ÇMD'lerin bağlayıcı oranını belirleyen en önemli faktörlerdendir. Bunun yanı sıra gradasyon (tane boyu dağılımı) dolgu karışımlarının gözenekliliğini, geçirgenliğini, kompaktlığını, mikro yapısını ve çimento hidrasyon sürecini belirlemektedir. Fiziksel özelliklere ek olarak kalite, dayanım ve maliyet gibi birçok parametre dolguların mikroyapısal (örn. geçirgenlik ve boşluk oranı) özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Benzer şekilde, dolgu karışımlarının morfolojisinin, kimyasal ve mineral bileşiminin önemi de göz ardı edilmemelidir.

Herhangi bir dolgu karışımının özgül ağırlığı, kullanılacak bağlayıcı miktarını belirlemekte hayati bir rol oynamaktadır (Sivakugan, 2006). Özgül ağırlık cevher türüne göre değişmekle beraber farklı cevherlerin zenginleştirilmesi sonucu oluşan farklı atık türleri çeşitli özgül ağırlıklara sahip olacaktır (Zheng vd., 2016). ÇMD'lere yönelik yapılan çalışmalarda atıkların inceliği ve yoğunluğunun karışımların su ihtiyacını, dayanımını, mikroyapısal özelliklerini ve dolgu maliyetini önemli ölçüde etkilediği ortaya konulmuştur (Fall vd., 2005; Abdul-Hussain ve Fall, 2011). ÇMD'lerin gradasyonu ve bu gradasyona bağlı olarak değişen özgül yüzey alanı karışımlarının performansı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yani karışımdaki malzemelerin inceliğinde artış doğrudan özgül yüzey alanının büyümesine ve çimento hidrasyon reaksiyonlarına daha fazla su molekülü katılmasına destek olur (Sun vd., 2021; Wang vd., 2024). Su moleküllerinin bu yüksek adsorpsiyonu, ince partiküllerin suda çökmesi gibi atıkların birçok özelliğini etkileyecektir.

ÇMD'lerde ince tanelerin oranı ($<20 \mu\text{m}$), karışımların gözenekliliği, drenajı ve dayanımı üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. *Tablo 1*'de belirtildiği gibi maden atıkları ince fraksiyona bağlı olarak kaba (15-35% ince), orta (35-60% ince) ve ince ($>60\%$ ince) olarak kategorize edilebilir (Qi vd., 2018b). İnce oranı ÇMD karışımlarının bileşenlerinin birbirinden ayrışmasını önlemek için önemli bir parametredir. Macun dolgudaki ince fraksiyonun varlığı karışımların su tutma kapasitesini artırır, fazla suyun sızmasını önler ve daha iri parçacıkların taşınmasını

kolaylaştırır. Literatürde ÇMD’lerde ince fraksiyonun miktarı (<20 µm), gerekli akış özelliklerini karşılamak için %15’ten fazla olması gerektiği vurgulanmaktadır (Landriault, 2001; Haiqiang vd., 2016).

Tablo 1. Atıkların ince tane oranına göre sınıflandırılması (Qi ve Fourie, 2019)

Atık Kategorisi	İnce tanelerin oranı, kütlege %	Dayanım gelişimi (sabit s/ç oranı)	Katı konsantrasyonu, kütlege % (Çökme: 178 mm)
Kaba	15-35	Yüksek	78-85
Orta	35-60	Düşük	70-78
İnce	>60	Çok düşük	55-70

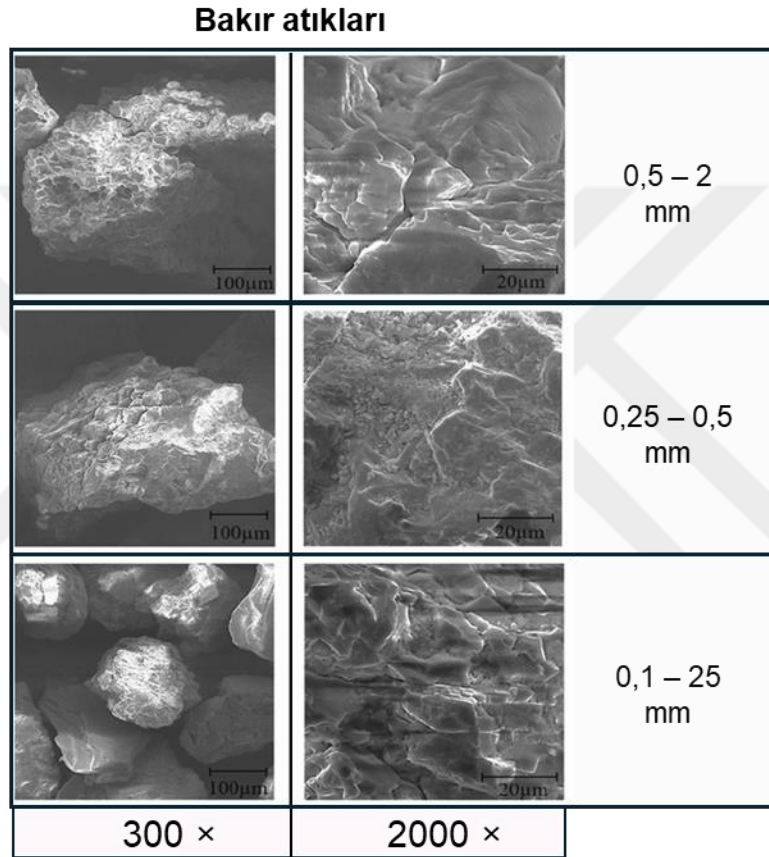
Maden atıkların tane gradasyonun temsil edilmesi amacıyla çeşitli sınıflandırma modelleri önerilmiş ve çeşitli parametreler tanımlanmıştır. Yaygın olarak kullanılan sınıflandırma modelleri arasında güç yasası modeli (power law model), değiştirilmiş A&A modeli (modified A&A model) ve Rosin-Rammler (R-R) modeli bulunmaktadır (Mehdipour ve Khayat, 2018). Bu modellere ek olarak, ÇMD’lerin gradasyonunu daha iyi temsil etmesi için üniformluk katsayısı ($C_u = D_{60}/D_{10}$) ve derecelenme katsayısı ($C_c = D_{30}^2/(D_{60} \times D_{10})$) önerilmektedir. C_u ve C_c denklemleri D_{10} (malzemenin %10’nunun geçtiği tane boyutu), D_{30} (malzemenin %30’unun geçtiği tane boyutu) ve D_{60} (malzemenin %60’ının geçtiği tane boyutu) değerlerine göre hesaplanmaktadır (Lamorski vd., 2014).

Tablo 2, literatürde bildirilen çeşitli maden atık türlerinin özgül ağırlık ve tane boyu dağılım sonuçlarını göstermektedir. Buradan atıkların özgül ağırlıklarının 2,7-4,13, partikül boyutunun 0,1-500 µm, D_{50} değerinin 16,2-46,9 µm, C_u değerinin 4,33-16,6 ve C_c değerinin 2,42- 8,46 aralığında değiştiği görülmektedir.

Tablo 2. Literatürdeki farklı değirmen atıklarına ait bazı fiziksel özellikler

Referans	Atık tipi	ÖA	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	D_{90}	C_u	C_c
Fall vd. (2010)	Polimetalik	3,70	3,70	10,8	22,4	32,5	121	8,78	4,17
Fall ve Pokharel (2010)	Silika	2,70	1,90	9,01	22,5	31,5	88,9	16,6	8,46
Cihangir vd. (2012)	Bakır-çinko	4,13	1,70	6,8	16,2	22,8	58,4	13,4	6,77
Kasap vd. (2022)	Bakır	3,55	6,20	22,5	43,8	59,1	—	9,53	5,24
Sari vd. (2022)	Bakır	3,79	4,59	23,7	41,4	60,2	—	13,1	6,20
Panchal vd. (2018)	Uranyum	2,83	3,45	12,4	22,6	32,7	112	9,48	4,53
Wang vd. (2020)	Kurşun-çinko	3,09	7,38	17,5	46,0	—	—	—	—
Ouffa vd. (2020)	Altın-gümüş	2,72	3,96	17,2	46,9	71,0	204	17,9	7,85
Behera vd. (2020)	Kurşun-çinko	2,91	11,7	22,4	37,9	50,7	89,1	4,33	2,42

Maden atıklarının dokusu genellikle pürüzlü ve düzensiz köşeli şekillerden (Şekil 13) oluştuğu için dolguların yeraltına nakliyesi esnasında boru hattında yüksek aşınma ve yıpranmaya neden olmaktadır. Bu da doğrudan dolguların boru hattının dayanıklılığını olumsuz şekilde etkilemekte ve maden işletmelerine önemli maddi yükler getirmektedir (Fall vd., 2005). Dolgu parçacıklarının şekli ayrıca dolgunun konsolidasyonu ve çökmesi üzerinde önemli etkilere sahiptir (Mishra ve Das, 2010).



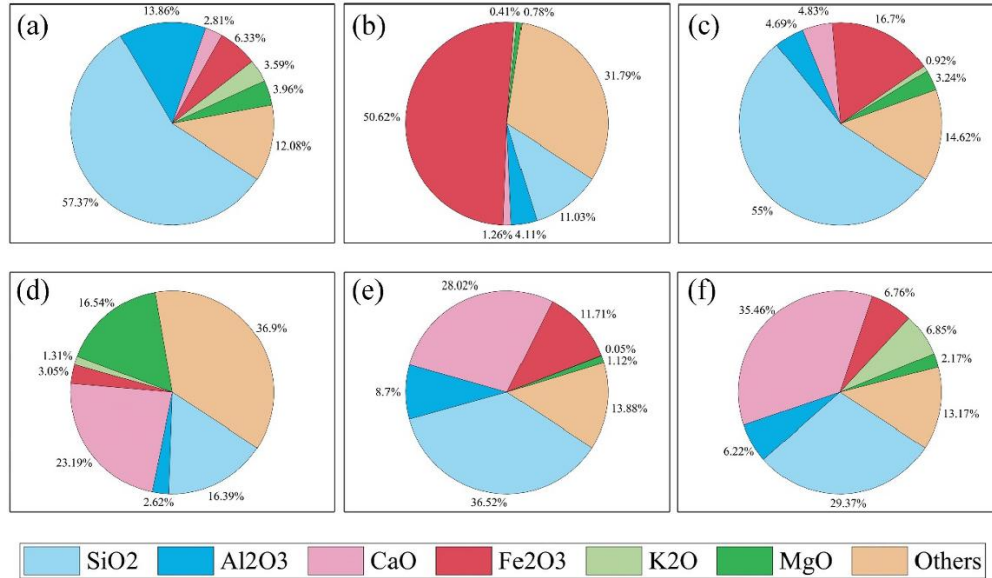
Şekil 13. Bakır atıklarının tane şekline ait dijital görüntü (Yang vd., 2019)

Maden atıklarının mineralojik özellikleri dolguların mekanik (örn. dayanım) ve reolojik (örn. işlenebilirlik) özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir (Sivakugan vd., 2006; Qi ve Fourie, 2019). Örneğin, atıklardaki yüksek oranda kil minerali ve kuvarsın varlığı dolguların su tutma kapasitesini ve aşındırıcı özelliğini (boru aşınması ve yıpranması) arttırmaktadır (Qi vd., 201). Benzer şekilde, atıkların yüksek miktarda sülfür içermesi uzun vadede dolguların mekanik özelliklerini olumsuz şekilde etkilemektedir. Bu durum sülfür açısından zengin atıkların suyla reaksiyona girmesi ve asidik ortam oluşturarak karışımlardaki ana hidrasyon ürünlerine (kalsiyum-

silikat-hidrat, C-S-H) zarar vermesinden kaynaklanmaktadır (Rao ve Reddy, 2006). Değirmen atıklarının birincil mineralojik bileşimi *Tablo 3*'te sunulmuştur. Değirmen atıklarında genellikle atık türüne bağlı olarak belirgin kuvars, hematit, kalsit, dolomit ve pirit gibi mineralojik fazlar görülmektedir (Coussy vd., 2011; Behera vd., 2021).

Tablo 3. Maden atıklarının ana mineralojik bileşimleri

Atık türü	Mineral türleri	Referans
Bakır-çinko atıkları	Pirit, dolomit, kaolinit, sfalerit, barit ve nantokit	Kesimal vd. (2004)
Altın atıkları	Klorit, mika, amfibol, kuvars, feldispat, kalsit ve pirit fazları	Rao ve Reddy (2006)
Altın atıkları	Albit, ankerit, kalsit, klorit, ettringit, götit, jips, muskovit, paragonit, pirit, kuvars ve sfalerit	Ouellet vd. (2006)
Altın atıkları	Kuvars, albit, ankerit, kalsit, klorit, muskovit ve pirit	Coussy vd. (2011)
Atıklar	Pirit, kuvars, klorit, kalsit, muskovit ve albittir	Ercikdi vd. (2015)
Bakır atıkları	Kuvars, kalsit, dolomit, siderit, hematit, pirit, muskovit, klinoklor ve jips	Zheng vd. (2016)
Kurşun-çinko atıkları	Kuvars, zinnwaldit, grunerit, pirit, dolomit, hematit, kalsit ve ankerit	Behera vd. (2020)



Şekil 14. Katı ve değirmen atıklarının ÇMD'de kullanımı (Qi ve Fourie, 2019)

ÇMD karışımlarının silika (SiO₂), kalsiyum oksit (CaO), alümina (Al₂O₃), magnezyum oksit (MgO) ve demir oksit (Fe₂O₃) içeriği, dolguların mekanik özelliklerinin (özellikle dayanım) gelişiminde oldukça önemli bir yere sahiptir. Farklı

değirmen atıklarının kimyasal bileşimleri arasındaki karşılaştırma *Şekil 14*'te sunulmuştur. Literatürde değirmen atıklarının ana kimyasal bileşenleri SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO ve Fe_2O_3 'ten oluşturmaktadır. *Şekil 14*'te görüldüğü üzere genel olarak atıkların kimyasal bileşimleri birbirine benzemekle beraber gözlenen küçük farklılıklar kaya türü/kökeni, çıkarılan cevher tipi ve bölgesel jeolojideki çeşitlikten kaynaklanmaktadır.

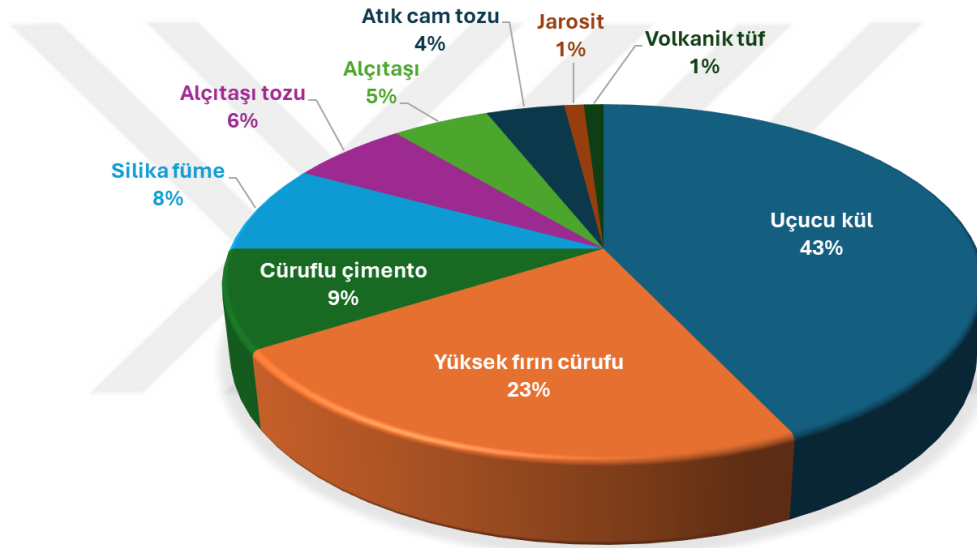
3.2.1.1.2. Macun Dolguda Kullanılan Bağlayıcılar

Çimentolu macun dolgularda (ÇMD) kullanılan bağlayıcının türü ve miktarı dolguların dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir (Xu vd., 2020b). Portland çimentosu (PÇ) ÇMD'lerde yaygın olarak kullanılan bir bağlayıcıdır ve işletme maliyetlerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Portland çimentosu ÇMD'lerde maden atıklarının kütle olarak %3-7'sini oluşturur ve hidrasyon sürecine doğrudan katıldıkları için kritik bir bileşendir. Bu nedenle dolgulara yeterli seviyede mekanik özellik kazandırmak, bağlayıcı maliyetini düşürmek ve atık kaynakla kirleticileri kontrol altına almak için çimentonun optimizasyonu oldukça önemlidir (Fall ve Samb, 2008). Hidratasyon reaksiyonlarının verimliliği ve etkisi çimento miktarına göre belirlediğinden, çimento içeriğinin ÇMD'lerin dayanımı üzerinde önemli bir rol oynadığı açıktır. Çimento içeriğinin arttırılmasıyla birlikte dolgu dayanımlarının kademeli olarak artacağı bilinmektedir (Fall vd., 2008, Qi vd., 2018c).

ÇMD'ler için PÇ çok önemli bir bileşen olmasına rağmen dolgu maliyetinin %30-70'ini oluşturmaktadır. PÇ'nin kullanım maliyeti oldukça yüksek olmakla birlikte özellikle ince taneli atıklardan kaynaklı dayanım düşüşlerinin telafisi işletmelerde PÇ oranının arttırılmasıyla gerçekleştirilmekte ve bu da maliyetleri katlamaktadır (Wu vd., 2024). Ekonomik sorunların yanı sıra PÇ üretim süreci, çok sayıda doğal kil mineralinin çıkarılması, bitki örtüsünün tahrip edilmesi ve karbondioksit emisyonları dahil olmak üzere çeşitli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Çin, dünyadaki en büyük PÇ üreten ülkelerden biri olmakla beraber üretilen çimento ülkede toplam karbon emisyonlarının %10'una katkıda bulunmakta ve her bir ton klinker üretimi yaklaşık 0,85-0,90 ton karbondioksit neden olmaktadır (Gao vd., 2015). Bu nedenle, sürdürülebilir ve çevreci dolgu yöntemi kapsamında potansiyel puzolanik aktiviteye sahip katı atıkların kullanılmasını önerilmektedir (Fall ve Samp, 2008). Bu yaklaşım

sayesinde dolgu malzemesi maliyetini önemli ölçüde düşürmek, katı atıkların yüksek değerli kullanımını teşvik etmek, karbon emisyonlarını azaltmak ve çevreyi korumak mümkündür.

Günümüzde uçucu kül, cüruf, kireç, silis dumanı, kireçtaşı tozu, atık cam, jarosit ve volkanik tüf gibi puzolanlar ÇMD'lerde alternatif bağlayıcı olarak başarıyla kullanılmaktadır. Şekil 15, 1990'dan bugüne kadar ÇMD'lerde Portland çimentoya alternatif olarak kullanılan alternatif bağlayıcı çeşitlerini ve oranlarını göstermektedir. Şekil 15'te görüleceği üzere ÇMD'lerde alternatif bağlayıcı olarak çoğunlukla uçucu kül ve cüruf (uçucu kül + cüruf = %66) kullanılmaktadır (Behera vd., 2021).



Şekil 15. ÇMD'lerde alternatif çimento malzemeleri

Bir termik santral atığı olan uçucu kül (UK), genellikle yuvarlak ve şekilsiz ferro alümino silikatlardan oluşur (Blissett ve Rowson, 2012). CSA (Canadian Standards Association-Kanada Standartlar Birliği) A3001'e göre UK, az kireçli form (CaO içeriği %8'in altında), orta kireçli form (CaO içeriği %8-20) ve yüksek kireçli form (CaO içeriği %20'den yüksek) olarak sınıflandırılır. ASTM C 618'e göre, yanmış kömür türünün kimyasına bağlı olarak C ve F tipi UK olarak sınıflandırılmaktadır. C ve F tipi UK'lar sırasıyla toplam oksit oranı ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) %50 ve %70'ten az olmamak koşuluyla birbirinde ayrılmaktadır. C formu uçucu küller çimento/puzolanik özelliklere sahiptir ve yüksek kalsiyum (Ca) içeriği nedeniyle atıkların asidik ortamına karşı koyabilir. F formu uçucu kül ise $< \%10$ CaO içerir ve antrasit/bitümlü kömürlerden yanması sonucu oluşur (Yazıcı ve Arel, 2012; Giergiczny, 2019). TS EN

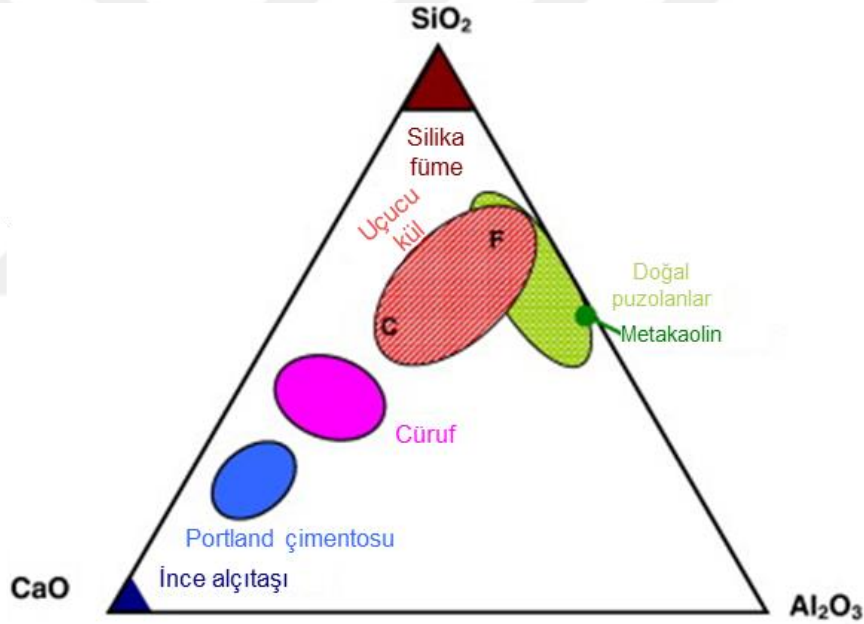
197-1'e göre ise UK'lar silisli (V) ve kalkerli (W) uçucu küller olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılır. V tipi küller, puzolanik özelliklere sahip yuvarlak taneler içeren siltli bir toz olarak nitelendirilir. Bu küllerin %10'dan az kalsiyum oksit ve %25'ten fazla silikon dioksit içermesi gerekmektedir. W tipi küller ise hidrolik/puzolanik özelliklere sahip ince bir toz olarak nitelendirilir. Bu küllerin %10'dan fazla kalsiyum oksit ve %25 fazla silikon dioksit içermesi beklenir.

C tipi uçucu külün PÇ ikamesi olarak kullanılması ÇMD üretiminde maliyetleri önemli ölçüde düşürür ancak dolguların mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Ali vd., 2021, Cavusoglu vd., 2021a). Bununla birlikte, C tipi uçucu külün dolgularda kullanımı sonucu özellikle uzun vadede sülfat etkisi azaltma eğilimi vardır. Kimyasal ve mineralojik analizler sayesinde, atıklarda sülfatların varlığı çimento hidrat fazlarının erimesine ve şişmesine neden olarak ÇMD'lerin yapısının bozulmasına neden olduğu bilinmektedir (Jafari vd., 2021). PÇ, uzun vadede C3A kompozitinin oluşumu nedeniyle yüksek sülfatlı atıklar ile üretilen ÇMD'lerde dayanım ve dayanıklılığı sağlamak için doğru bir çimento türü değildir. Bununla birlikte, PÇ ile C formu uçucu külün birlikte kullanımı uzun kür süresinde dayanıma fayda sağlayacaktır (Cavusoglu vd., 2021b).

Yüksek fırın cürufu (YFC) demir/çelik üretimi sonucu ortaya çıkan ve metalik olmayan bir yan üründür. YFC'ler genellikle silikatlardan oluşur. Temel olarak, yüksek fırında Fe ile eş zamanlı olarak eritilen, amorf granül taneler oluşturmak için suda hızlı bir şekilde ısıtılarak sıvı içinde soğutulan çimento inceliğinde veya daha ince malzemelerdir. PÇ ve YFC'nin birlikte kullanımı ile çimentonun içinde bulunan C formu hidratlaşmaya başlar ve ardından çözeltideki Ca/Al iyonlarını serbest bırakarak cürufuyla reaksiyona girer. YFC daha sonra alkali hidroksit ve Ca(OH)_2 tepkimeye girerek daha fazla CSH jeli oluşumunu destekler (Ustabaş vd., 2021). Dayanım gelişimi diğer bağlayıcılarla hazırlanan karışımlara kıyasla YFC içeren ÇMD'lerde daha verimlidir. Ancak YFC içeren dolgu karışımlarında gözenek boyutunun incelenmesi nedeniyle ÇMD'lerin hidrolik iletkenliği azalır (Kou vd., 2020). Ayrıca, YFC'lerin ince taneli yapısı gereği macun dolguların gözenekliliğini azaltır ve buna bağlı olarak dayanımları yükseltir (Ouellet vd. 2007). Sonuç olarak UK ve YFC'ler kükürt açısından zengin atıklarla hazırlanan dolguların uzun vadeli dayanım kazanımını artırır ve dolgu maliyetlerini önemli derecede düşürür.

Tablo 4. UK ve YFC’lerin ana mineralojik bileşimleri

Malzeme türü	Atık türü	Mineral türleri	Referans
Kömür külü	Uçucu kül	Kuars, kaolinit, manyetit, mullit, hematit	Sarkar vd. (2006)
	Uçucu kül	Kuars, hematit, anhidrit, periklaz, maghemit, portlandit, gehlenit, magnezioferrit, kireç, silvit ve rutil	Koukouzas vd. (2007)
	Baraj külü ve uçucu kül	Kuars, mullit, hematit, manyetit.	Mishra ve Das (2010)
	Cüruf	Kuars, manyetit, mullit ve hematit	Rashad vd. (2013)
Cüruf	Kurşun-çinko cürufu	Görünür kristal fazları olmayan camsı hal	Mao et vd. (2019)
	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	Cam fazlı siliko alüminat mineralleri	Zheng vd. (2016)

**Şekil 16.** Pozolanik katkıların kimyasal bileşimi

Uçucu kül (UK) yüksek fırın cürufundan (YFC) nispeten daha hafif ve daha incedir. UK’lar kömür kaynağına ve santralin yanma verimliliğine, YFC’ler ise metal çıkarma işlemine bağlı olarak farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Genel olarak UK parçacıklarının büyük kısmı 10–80 µm boyut aralığındadır ancak bazı durumlarda parçacıklarının maksimum boyutu 100 µm’ye kadar çıkmaktadır (Singh vd., 2019). UK’ya kıyasla YFC’ler daha büyük parçacıklara (100 ile 1000 µm arasında) sahiptir ve bu büyüklük çimentolu malzemelerde daha düşük dayanım gelişimine sebebiyet verebilir. Ancak YFC’leri kırma ve/veya öğütme yoluyla 80 µm’nin düşürmek macun

dolguların dayanımına önemli katkı sağlamasına yardımcı olabilir. UK'ların dokusu genel olarak küresel ve pürüzsüzdür. UK'ya kıyasla YFC'ler ise belirgin pürüzlere ve kenarlara sahip yarı yuvarlak veya köşeli morfoloji özellik göstermektedir (Sarkar vd., 2006; Behera vd, 2020). Tablo 4, farklı tip UK ve YFC'lere ait başlıca mineralojik bileşimleri göstermektedir. *Şekil 16*, UK, YFC ve farklı puzolanların kimyasal bileşimini göstermektedir. Genellikle dolguda alternatif bağlayıcı malzemeler olarak kullanılan UK ve YFC'nin ana kimyasal bileşenlerini SiO_2 , Al_2O_3 , CaO oluşturur.

3.2.1.1.3. Macun Dolgularda Kullanılan Kimyasal Katkılar

Kimyasal katkı maddeleri yaygın olarak beton ve harçlarda kullanılmaktadır. Bu katkılar genellikle beton harcına, karıştırmadan önce veya karıştırma sırasında eklenmektedir. Kuzey Amerika'daki inşaat sektöründe üretilen farklı tip betonların %80'i bir veya daha fazla kimyasal katkı maddesi içermektedir. Katkı maddeleri genel olarak betonun performansını ve dayanıklılığını iyileştirmek amacıyla kullanılır. Çimentolu macun dolgular (ÇMD) betona kıyasla oldukça az çimento içermesine rağmen kimyasal katkıların kullanımı betona benzerdir (Mangane vd., 2018; Saedi vd., 2021). Betona benzer şekilde kimyasal katkı maddelerinin kullanımının dolgu performansını artırabileceği ve çimento ile ilgili maliyetleri azaltabileceği düşünülmektedir (Jin vd., 2022).

Genel olarak ÇMD'lere yönelik karşılaşılan sorunlar büyük bir kısmı dolgu hazırlama, taşıma ve yerleştirme sırasında ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle kimyasal katkı maddelerinin ÇMD'lerde kullanımı optimum bir karışım tasarımı oluşturmaya yardımcı olur. ÇMD'lerde kimyasal katkı maddelerinin kullanımı ile: (i) Erken ve uzun kür süresinde dolgu karışımlarının dayanımı artar; (ii) basınç ve eğilme dayanımı ve buna bağlı olarak kohezyon artar; (iii) Hidrolik ve macun dolgulara su içeriği ve ayrışma azalır; (iv) Pompalanabilirlik, işlenebilirlik, kıvam ve akışkanlık artar; ve (v) Büzülme, çatlak oluşumu ve aşınma azalır (Koohestani vd., 2018b; Jiang vd., 2020b).

Literatür incelendiğinde, çimentolu kaya dolgusu, çimentolu hidrolik dolgu ve çimentolu macun dolgu için kullanılan kimyasal katkı maddelerinin dayanımlarının gelişimi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Kimyasal katkı kullanımı ile kıyaslandığında katkı maddesi içermeyen dolguların yaklaşık %50 daha düşük dayanım değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Kimyasal katkıları ayrıca

dolguların su içeriğini azaltmış ve pompalanabilirliği artırmıştır (Quattara vd., 2018; Ouffa vd., 2022). Sonuç olarak kimyasal katkı maddelerinin kısa/uzun vadede kükürt açısından zengin atık içeren ÇMD'lerin dayanımı, dayanıklılığını ve çimento ile ilgili maliyetleri düşürme konusunda önemli katkılar sağlayabileceği düşünülebilir. Kimyasal katkı maddelerinin ÇMD karışımlarına kullanımıyla birlikte enerji ve çimento tüketiminin azaltılması, su kullanımının sınırlandırılması, boru tıkanıklıklarının önlenmesi ve tesis bakım maliyetlerinin önemli ölçüde azaltılması mümkündür. Ancak kimyasal katkıların doğru kullanım oranların tespit edilerek optimum ÇMD karışım tasarımlarının titizlikle yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde kimyasal katkı kullanımı faydadan ziyade işletmelere önemli zararlar verebilir.

3.2.1.1.4. Karışım Suyunun Macun Dolgular Üzerindeki Etkisi

Çimentolu macun dolgularda (ÇMD) karışım suyu olarak belediye/musluk, proses (mineral işleme), yeraltı ve göl/dere suyu yaygın olarak kullanılmaktadır. Karışım suyunun çimentolu karışımların kalite ve performansı üzerinde birçok etkisi vardır. Genellikle karışım suyu, su/çimento (s/ç) oranı veya katı içeriği ile temsil edilmektedir ve hidrasyon süreci ile bağlantılı olarak ÇMD'lerin mikroyapısını doğrudan etkiler. Çimentolu karışımların matrisindeki az miktarda su hidrasyon sürecine zarar verir çünkü çimentonun hidrate olabilmesi için s/ç oranının en az 0,4 olması gerekmektedir (Lin ve Meyer, 2009). ÇMD'ler genel olarak su eksikliği gibi bir duruma maruz kalmaz çünkü dolgu karışımlarının yeraltına uygun şekilde nakliye edilebilmesi için yeterli kıvam ve akışkanlığa sahip olmasını gerekmektedir. Bu nedenle ÇMD'ler 2,7-20,2 arasında değişen bir s/ç oranına sahiptir (Belem ve Benzaazoua, 2008). Az su kullanmanın aksine fazla su kullanımı da başta ÇMD'ler olmak üzere tüm çimentolu karışımlar için oldukça zararlıdır. Çok fazla su ÇMD'lerin kılcal gözenekliliğini arttırarak dayanımına zarar verebilir. Bu nedenle ÇMD'lerin ortam şartlarına uygun ve yeterli reolojik özelliklere sahip olması beklenmektedir (Qi ve Fourie, 2019).

ÇMD karışımlarında kullanılacak su miktarının belirlenmesi kadar karışım sularının kalitesi de son derece önemlidir. Karışım sularının kalitesi jeo-kimyasal parametreler tarafından belirlenir. Karışım sularının jeo-kimyasal özellikleri

hidratasyon sürecinin başlaması ve düzgün şekilde ilerlemesi için kritik öneme sahiptir. Hidratasyon sürecinin uygun koşullar altında gerçekleşmesi ÇMD'lerde dayanımın gelişiminin sürdürülebilir şekilde ilerlemesi için elzemdir. Karışım sularının önemli kimyasal özellikleri arasında OH^- - H^+ (pH) konsantrasyonu, redoks potansiyeli (Eh), özgül iletkenlik (SCW) ve SO_4^{2-} (sülfat) - Ca^{2+} (kalsiyum) konsantrasyonu bulunmaktadır. Örneğin SO_4^{2-} veya Ca^{2+} 'nin karışım suyunda yüksek oranda bulunması, saf su adsorpsiyonuna kıyasla su adsorpsiyon sürecini kaçınılmaz olarak etkileyecektir. Ayrıca, karışım suyunun jeokimyası bağlayıcı türüyle de ilişkilidir. Örneğin cüruf bazlı bağlayıcılarla üretilen çimentolu karışımlar suda çözünen sülfatlara karşı daha dayanıksızdır (Benzaazoua vd., 2002).

Bunun yanı sıra SO_4^{2-} içeriğinin ÇMD'lerin dayanım gelişimi üzerindeki olumsuz etkileri bulunmaktadır. Özellikle maden atıklarındaki gözenek suyu genellikle toplam karıştırma suyunun %75-80'ini oluşturmaktadır. Bu nedenle özellikle sülfürlü cevherlerin flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesinde ve ayrıca sülfat konsantrasyonu bakımından zengin kimyasalların kullanımı nedeniyle ÇMD karışımları sülfat konsantrasyonu bakımından zengindir. Ancak dolgu karışımlarına eklenen musluk suyu, karışımındaki sülfat konsantrasyonunu önemli ölçüde seyreltmektedir (Wu vd., 2015; Li vd., 2020a). Ek olarak bazı işletmeler karışım suyu olarak geri dönüştürülmüş proses suyunu maddi ve çevresel nedenler doğrultusunda tasarruf amacıyla kullanmaktadır. Yapılan çalışmalarda proses suyu ile hazırlanan ÇMD'lere kıyasla musluk/göl suyu kullanımı ile daha yüksek dolgu stabilitesi elde edilmiştir (Ouellet vd., 2007).

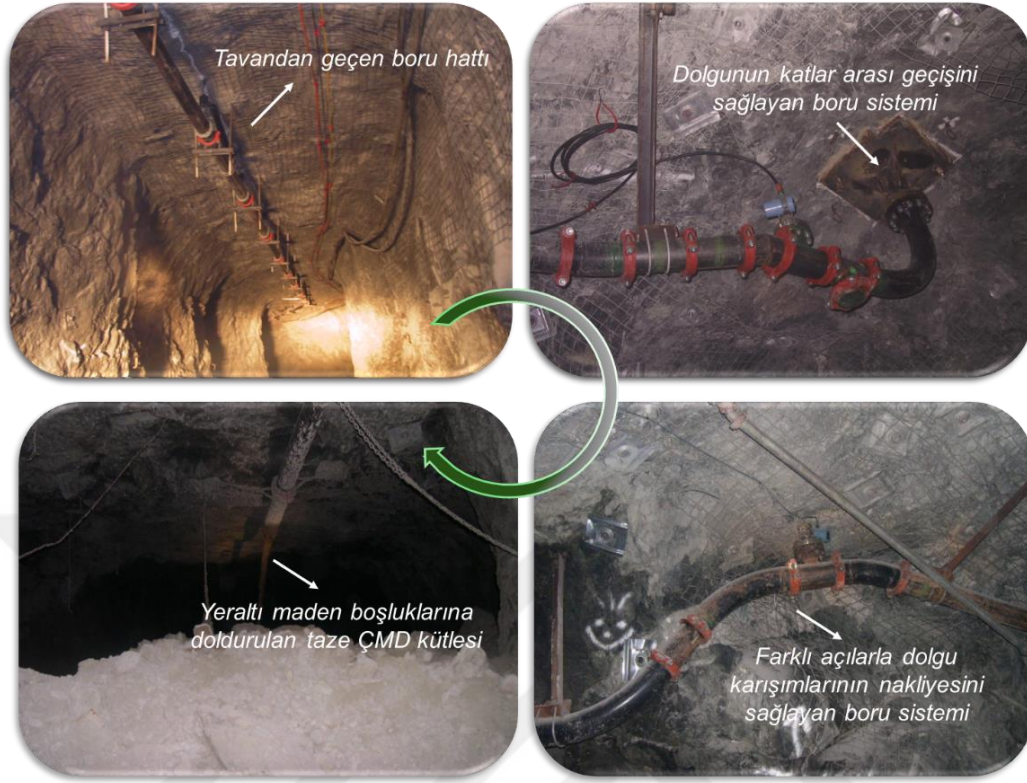
3.2.1.2. Macun Dolguların Boru ile Yeraltına Transferi

Yerüstündeki dolgu tesisinde optimum reçeteler baz alınarak hazırlanan karışımlar (*Şekil 10*) boru hattı yardımıyla yeraltındaki üretim odalarına taşınmaktadır (*Şekil 17*). ÇMD bulamacının borularla hidrolik olarak yeraltına taşınması, yıl boyunca kullanılabilirlik, düşük bakım maliyetleri ve çevre dostu olma gibi avantajları nedeniyle giderek daha popüler hale gelmektedir (Kumar vd., 2003, Ravelet vd., 2013). ÇMD karışımları yeraltına yerçekimi/pompalama, yerçekimi ve pompalama/yerçekimi sistemleri olmak üzere üç olası boru taşıma sistemi yardımıyla taşınmaktadır. Yerçekimi/pompalama ve pompalama/yerçekimi arasındaki fark,

bulamacın ilk olarak yerçekimi veya pompalama ile taşınmasını içermektedir. Halihazırda, pompalama/yerçekimi sistemi kolay kurulum, denetim ve bakım kolaylığı gibi birçok avantajı nedeniyle diğer yöntemlere kıyasla daha çok tercih edilmektedir (Belem ve Benzaazoua, 2008, Qi vd., 2018b). Ancak, karmaşık jeolojik koşullarla karşılaşıldığında bu farklı sistemler birbirleri ile entegre şekilde kullanılabilir.

Yüksek konsantrasyonlu Newtonian olmayan bir akışkan olan taze ÇMD bulamacının boru ile taşınması tamamen reolojik özellikleri tarafından kontrol edilmektedir (Belem ve Benzaazoua, 2008). Newtonian olmayan akışkan, uygulanan kayma gerilimi ile oluşan deformasyon hızı (kayma hızı) arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı akışkan türü olarak ifade edilmektedir. Genel olarak akma gerilmesi ve viskozite, ÇMD karışımlarının taşınabilirliğini değerlendirmek için dikkat edilen iki ana özelliktir (Roshani ve Fall, 2020). Katı madde içeriği, agreganın (atık) gradasyonu, suyun miktarı ve pH'ı, kimyasal katkı maddeleri ve dış koşullar dahil olmak üzere birçok faktör ÇMD'nin reolojik özelliğini etkiler. Özellikle, hidrodinamik etkiler nedeniyle, daha yüksek katı madde içeriği daha yüksek viskoziteye neden olmaktadır (Naguleswaran vd., 2018). Buna ek olarak, agreganın şekli ve gradasyonu ÇMD'nin kayma gerilimi üzerinde etkilidir. Çünkü partikül şekli (örn. atık dokusu pürüzlü ve düzensiz köşelidir) boru hattındaki dirsekleri aşındırır, artan ince partiküller katıların spesifik yüzey alanını genişletir böylece partiküllerin yüzeyindeki su miktarını azaltır ve akışı zorlaştırır (Mehdipour ve Khayat, 2018).

Reolojik özellik, karışım suyuna göre iki mekanizma aracılığıyla değişir: (i) su içeriği–artan su miktarı akışkanlığın/işlenebilirliğin iyileştirilmesine fayda sağlamaktadır ve (ii) suyun pH değeri, parçacıklar arasındaki etkileşimleri değiştirebilen ve kayma gerilmesini etkileyen Zeta potansiyelinin (Zeta potansiyeli tanecikler arasındaki itme veya çekme değeri ölçümü olarak ifade edilir) evrimini etkilemektedir (Johnson vd., 2000). Ek olarak, farklı katkı maddeleri ve dış koşullar ÇMD'lerin akışkanlığını etkilemektedir. Örneğin, akışkanlaştırıcılar parçacıklar arasındaki elektrostatik itme kuvvetini artırarak ÇMD'lerin reolojisini önemli ölçüde iyileştirebilir (Delphine vd., 2018, Ouattara vd., 2018). Bununla birlikte sıcaklıktaki artış, çimento hidrasyon derecesini değiştirerek ÇMD'lerin kayma gerilmesini artırabilir (Haiqiang vd., 2016).



Şekil 17. ÇMD’ler boru hattı ile yeraltına iletimi

3.2.1.3. Macun Dolguların Mekanik ve Elastik Özellikleri

Çimentolu macun dolguların temel işlevi zemin desteği sağlamaktır ve bu nedenle mekanik kararlılık dolgular için en önemli tasarım kriterlerinden biridir (Fall vd., 2007). ÇMD’lerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla oldukça basit ve ekonomik bir yöntem olan tek eksenli basınç dayanım (UCS) testleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. UCS basit ve ekonomikliğinin yanı sıra uzun yıllar süren deneyimler ve dolguların mekanik özelliklerinin belirlenmesindeki doğruluğu neticesinde kabul görmüştür (Qi vd., 2018c). Bu nedenle, ÇMD reçete tasarımlarında esas olarak dikkate alınan en önemli özellik UCS’dir. Ancak bazı durumlarda akma dayanımı, Elastiste modülü ve çekme dayanımı gibi diğer mekanik özellikler de dikkate alınmaktadır (Fall vd., 2010, Qi vd., 2018d).

ÇMD’ler için gereken tasarım dayanımı, amaçlanan işlevler ve ortam koşulları (örn. kayaç türü/tipi, jeolojik oluşumlar) nedeniyle bölgesel olarak farklılık göstermektedir. Örneğin, ÇMD’lerin öncelikli olarak atık bertarafı amacıyla

kullanıldığı durumlarda erken kür sürelerinde sıvılaşma olasılığını azaltmak için 150 ila 300 kPa arasında bir UCS'ye sahip olması gerektiği belirtilmiştir (Bloss, 2002).

Buna karşılık, ÇMD'lerin zemin desteği olarak kullanıldığı özel durumlarda 4 MPa'dan büyük bir dayanıma ihtiyaç duyulacağı söylenmiştir (Grice 1998). Özetlemek gerekirse, ÇMD'lerin UCS gelişimi, bağlayıcı türü/içeriği, su/çimento oranı, katkı maddeleri, kürleme süresi/sıcaklığı ve kürleme stresi gibi birçok faktöre bağlıdır (Fall ve diğerleri, 2005, Ghirian ve Fall, 2016, Kesimal ve diğerleri, 2005, Simms ve Grabinsky, 2009). Bu gibi faktörler dikkate alınarak ÇMD'ler için istenilen tasarım dayanımı amaçlanan işlevler ve ortam koşulları dikkate alınarak belirlenmelidir.



4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Çalışma Sahasının Tanıtımı

Çalışma alanı Ankara'ya 312 km, Kastamonu şehir merkezine 60 km uzaklıktaki Küre ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır (*Şekil 18*). Maden sahası 1959 yılında Etibank tarafından bakır pirit tesisi olarak işletmeye alınmıştır. 1988 yılında konsantratör tesisleri işletmeye alınarak bakır ve pirit konsantreleri üretilmeye başlanmıştır. 2004 yılına kadar kamu işletmesi olarak faaliyetlerini sürdüren maden işletmesi o tarihten itibaren özel bir kuruluş tarafından faaliyetlerini sürdürmektedir.

Maden daha verimli bir üretim süreci sağlamak için yatırım yapmaya devam etmektedir. 2013 yılı sonu itibariyle 546.400 metre sondaj tamamlanmış olup, Ar-Ge yatırımları 50 milyon ABD dolarına ulaşmıştır. Diğer yatırımlarla birlikte toplam tutar 60 milyon ABD dolarına ulaşmıştır. Küre tesisi her yıl 1.350.000 ton ham bakır cevheri, 170.000 ton bakır konsantresi ve 400.000 ton pirit konsantresi üretmektedir. Oluşan proses atıklarının yaklaşık %20'si yeraltından çıkarılan stoplara çimentolu macun dolgu (ÇMD) olarak tekrar gönderilmekte, kalan atıkların %80'i ise atık barajında depolanmaktadır.



Şekil 18. Çalışma sahasının lokasyonu

4.2. ÇMD bileşenlerinin karakterizasyonu

4.2.1. Proses atıklarının karakterizasyonu

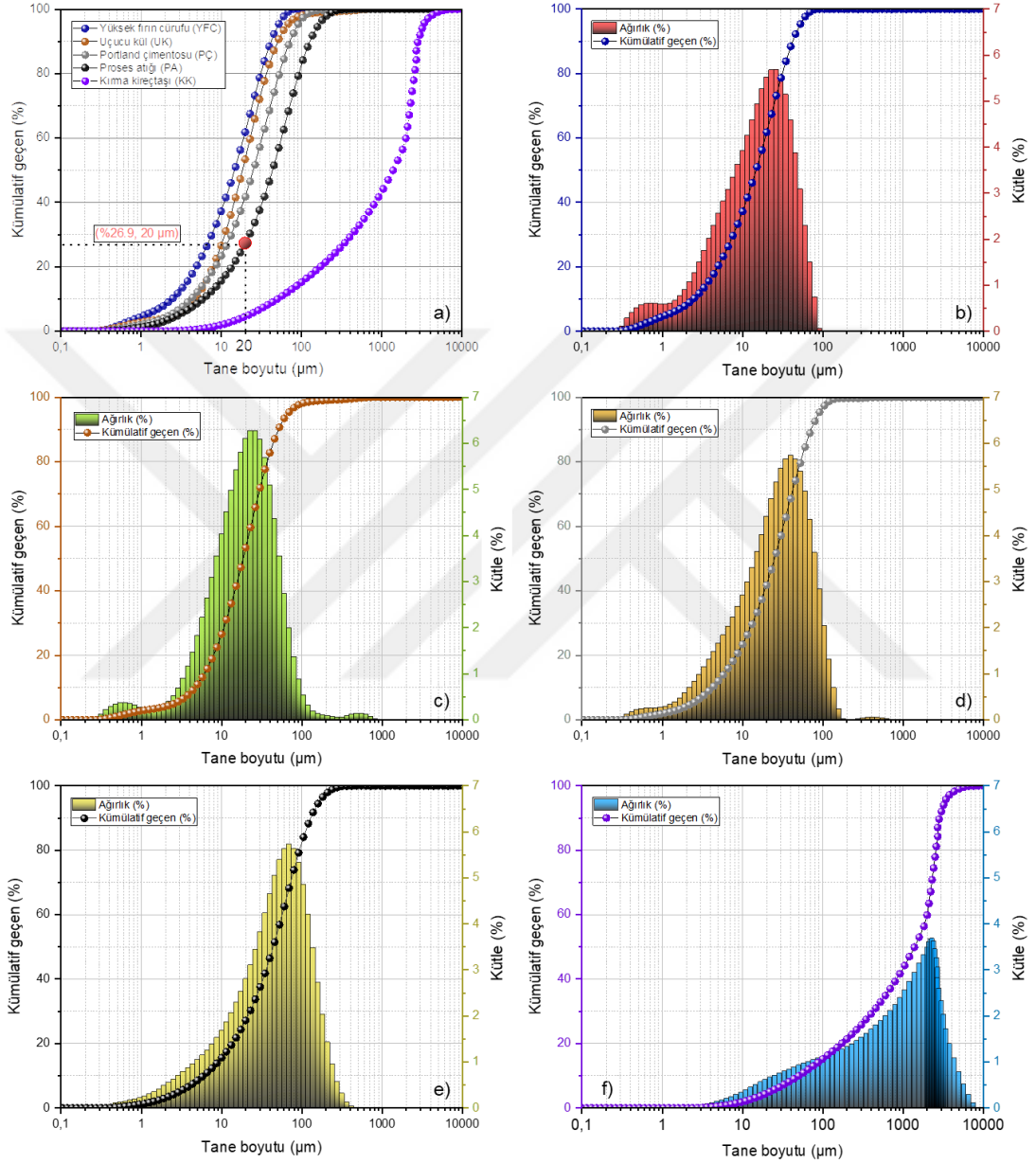
Çimentolu macun dolguların (ÇMD) ana bileşenlerinden biri olan proses atıklarının (PA) karakterizasyonu, dolgu kalitesinin doğru yorumlanması için son derece önemlidir. Bu nedenle PA'ların fiziksel (örn. parçacık şekli/boyutu ve özgül yüzey alanı/ağırlık) kimyasal (örn. oksit içeriği) ve mineralojik özelliklerinin en doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. PA'ların tane boyu dağılımı, Malvern Mastersizer 3000 lazer difraksiyonu partikül boyut analiz cihazı (ölçüm aralığı: 10nm-3,5mm) kullanılarak belirlenmiştir. (Şekil 19). PA'ların macun kıvamı oluşturmak ve yeterli suyu tutmak için 20 µm'nin altındaki ince malzeme içeriğinin en az %15 olması gerekmektedir (Nassani vd., 2021). Yapılan analizlerden, PA'ların 20 µm'nin altındaki malzeme içeriğinin (%26,9) dolguyu oluşturmak için gereken sınır değerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Tablo 5'de PA'ların farklı fiziksel özellikleri detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5. Test malzemelerin fiziksel karakteristikleri

Fiziksel karakteristik	PA (%)	KK (%)	PÇ (%)	YFC (%)	UK (%)
Özgül ağırlık, G_s	3,68	2,71	3,09	2,91	2,68
Özgül yüzey alanı, S_s (m ² /g)	2,85	0,64	0,39	0,67	0,75
Üniformluk katsayısı, C_u	9,44	36,9	7,88	7,29	5,01
Derecelenme katsayısı, C_c	1,35	1,60	1,29	1,35	1,12
D_{10} (µm)	6,11	53,6	4,09	2,49	4,59
D_{30} (µm)	22,0	420	14,1	7,66	10,7
D_{50} (µm)	44,2	1439	25,4	13,9	17,9
D_{60} (µm)	57,5	2065	33,2	18,2	23,0

PA'ların özgül ağırlığı (G_s), Quantachrome Ultrapyc 1200e helyum gazı (0,25 nm çapındaki girinti ve gözeneklere girebilen gaz) piknometresi kullanılarak 3,68 olarak belirlenmiştir. Ayrıca PA'ların özgül yüzey alanı (S_s), Quantachrome Quadrosorb SI tek noktalı BET (Brunauer-Emmett-Teller) cihazıyla belirlenmiş ve 2,85 m²/g olarak bulunmuştur. Test sonuçlarından, atık malzemenin tane boyutu küçüldükçe ve asit miktarı arttıkça, toplam özgül yüzey alanının arttığı görülmüştür. Özgül yüzey alanı arttıkça, uygun sıcaklık ve oksijen varlığında atık içindeki sülfürlü minerallerin oksidasyonu da artmaktadır. Bu ise çimentolu macun dolguların özellikle orta ve uzun dönemde dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Benzaazoua vd.

2004). PA'ların ortalama tane boyutu (D_{50}) 44,2 μm olarak bulunmuştur. PA'lara ait C_u (Derecelenme katsayısı: 9,44) ve C_c (üniformalite katsayısı: 1,35) incelendiğinde, atıkların iyi derecelenmiş olduğu görülmektedir.



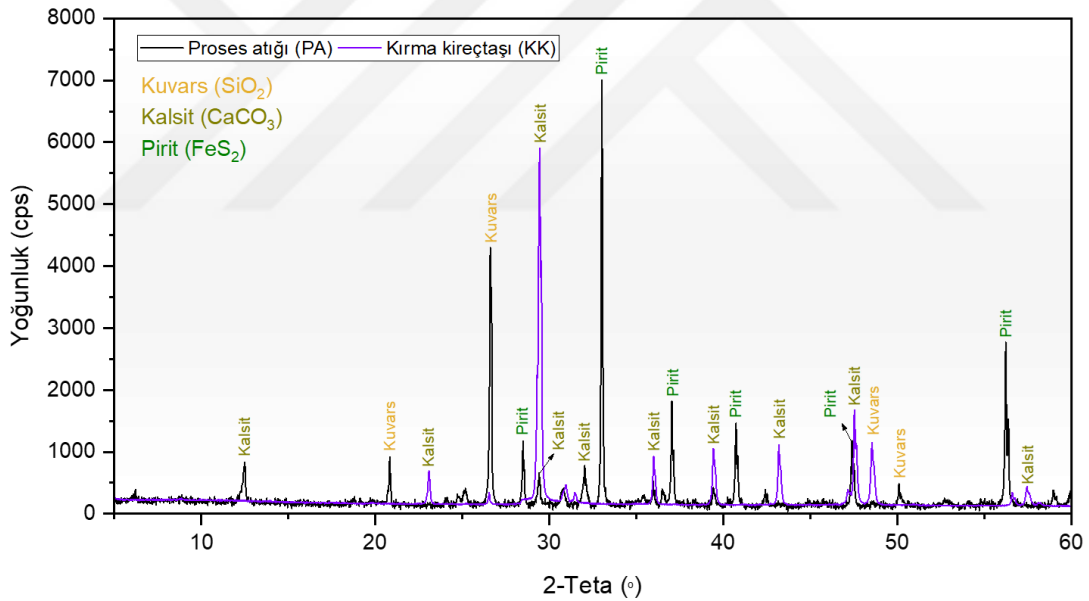
Şekil 19. ÇMD bileşenlerinin tane boyu dağılım eğrileri: tüm bileşenler (a); YFC (b); UK (c); PÇ (d); PA (e); ve KK (f)

Atıkların en önemli kimyasal özelliklerinden biri olan oksit içerikleri, PANalytical/Zetium XRF (X-ışını floresan spektrometrisi) tekniği kullanılarak belirlenmiştir ve *Tablo 6* kimyasal analizlerin sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlardan, Fe_2O_3 ve SiO_2 PA'larda baskın bileşiktir. Fe_2O_3 ve SiO_2 içerikleri

sırasıyla %41,3 ve %24,6 olarak ölçülmüştür. Bu değerler, pirit ve kuvarsın atıklarda ana faz olarak tespit edildiği XRD sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur (Şekil 20).

Tablo 6. ÇMD bileşenlerinin kimyasal kompozisyonları

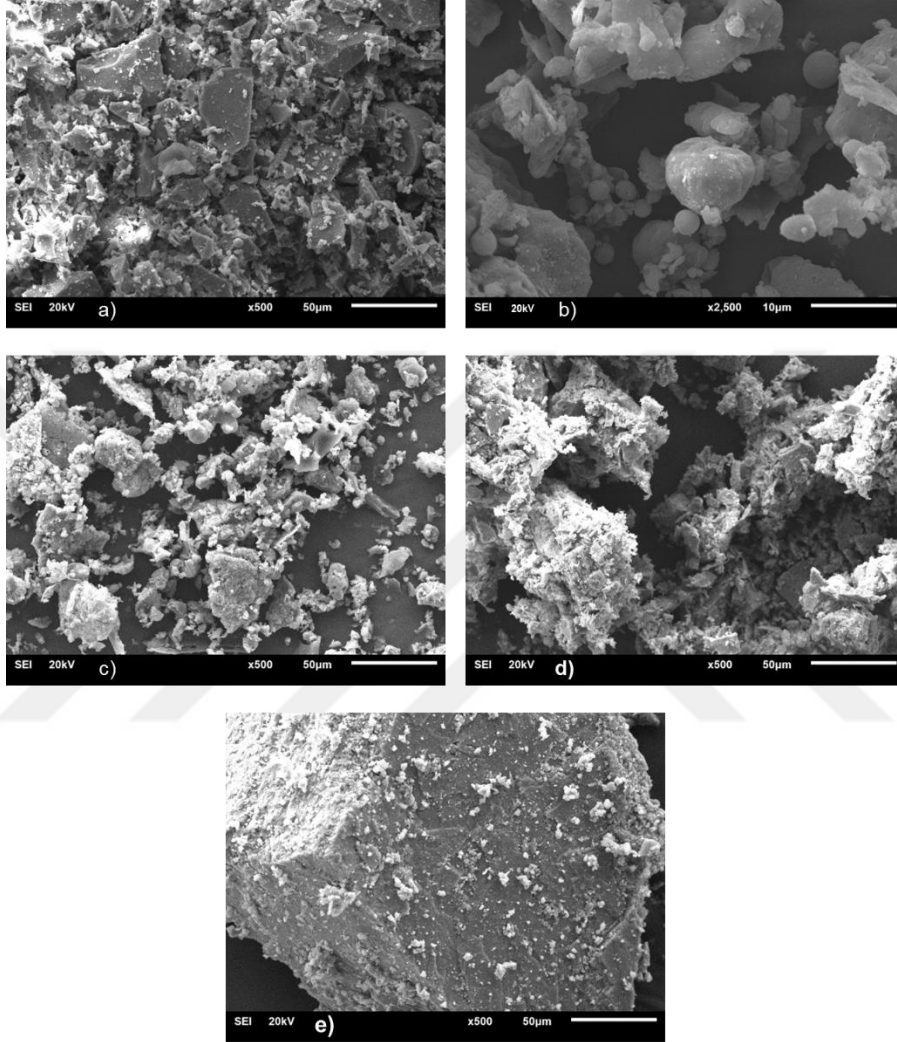
Kimyasal içerik	PA (%)	KK (%)	PÇ (%)	YFC (%)	UK (%)
Fe ₂ O ₃	43,14	0,40	3,10	1,40	6,29
Mn ₃ O ₄	0,15	0,07	0,11	2,94	0,10
BaO	0,09	0,07	0,12	0,44	0,23
TiO ₂	0,39	0,08	0,22	1,38	0,62
CaO	2,68	53,77	63,82	32,26	26,12
K ₂ O	0,34	0,20	0,93	0,86	1,49
SO ₃	0,42	0,75	3,46	2,43	5,42
P ₂ O ₅	0,13	0,08	0,10	0,07	0,17
SrO	0,09	0,08	0,13	0,11	0,14
SiO ₂	23,24	1,96	17,82	39,91	37,83
Al ₂ O ₃	7,86	1,54	5,85	11,96	17,40
MgO	2,54	0,73	1,22	6,13	1,33
Na ₂ O	0,19	0,07	0,32	0,35	1,06
Kızdırma kaybı (LOI)	20,31	41,25	3,92	0,49	2,52



Şekil 20. Proses atığı ve kırma kireçtaşı ait XRD profilleri

Sülfürlü PA'ların 500 kat büyütme altındaki SEM mikrografları Şekil 21'de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere atık taneleri ince boyutlu olup nispeten daha gözenekli bir yapı oluşturmaktadır. Tablo 7, PA'ların SEM-EDX analiz sonuçlarını içermektedir. Bu tablodan PA'ların S (kükürt) içeriğinin ortalama %21,4 olduğu görülmektedir. Bu durum diğer test sonuçları ile de benzerlik göstermektedir. Pirit gibi demir minerallerinin oksitlenmesiyle asiditesi yükselen drenaj suları bünyesinde karbonatlı kayaçları da çözündürüp asit tüketimiyle ortam pH'ı yükselme eğilimine

girmektedir. Ortamın nötrleşmesinde etkin mineraller arasında kalsit gibi bazik mineraller vardır. Ek olarak PA'ların Fe (demir) içeriğinin ortalama %29,35 olduğunu ve daha önce yapılan XRD ve XRF analizleri ile örtüştüğü görülmüştür.



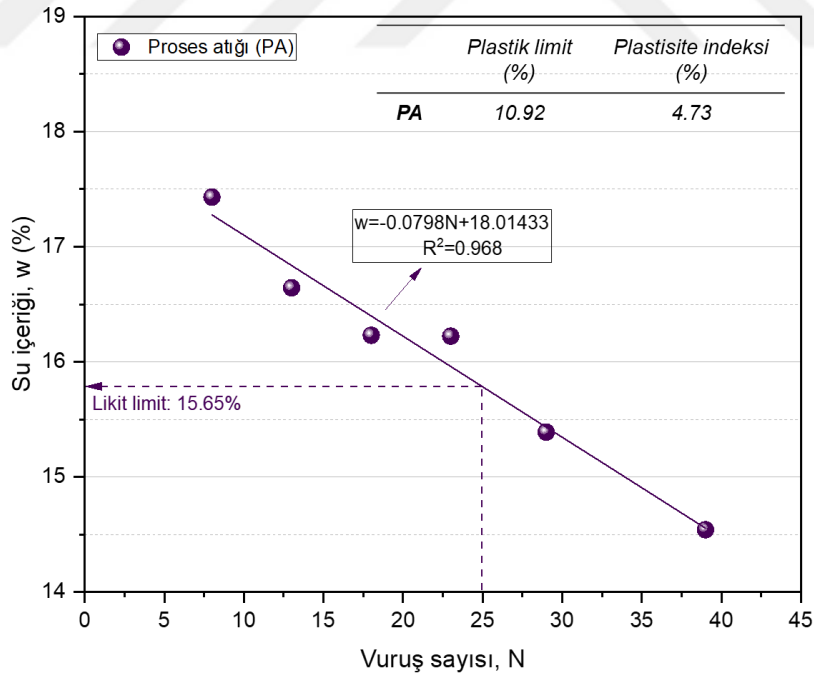
Şekil 21. CMD bileşenlerinin SEM mikroagrafları: YFC (a); UK (b); PÇ (c); PA (d) ve KK (e)

Proses atıklarının sıvılaşma ve büzülme performansı gibi kıvam değerleri CMD'lerin stabilitesini doğrudan etkilemektedir. Bu tez çalışmasında da kullanılan proses atıklarının likit limitleri Casagrande tekniği ile tespit edilmiş (ASTM D4318) ve Şekil 22'de sunulmuştur. PA'nın limit değerli %15,65 olarak bulunmuştur. PA'ların plastik limit değeri %10,92 ve plastisite indeksi %4,73 olarak belirlenmiştir. Bu plastik limit ve indeks değerleri, XRD analizi ile de tespit edilen nispeten düşük kil minerali miktarları ile uyumludur (Kasap vd., 2022b). Ayrıca, ölçülen likit ve plastik limit

değerleri literatürde rapor edilen diğer metalik maden atıkları ile iyi bir uyum içindedir (Yan vd., 2022b; Song vd., 2022).

Tablo 7. ÇMD bileşenlerinin SEM-EDX sonuçları

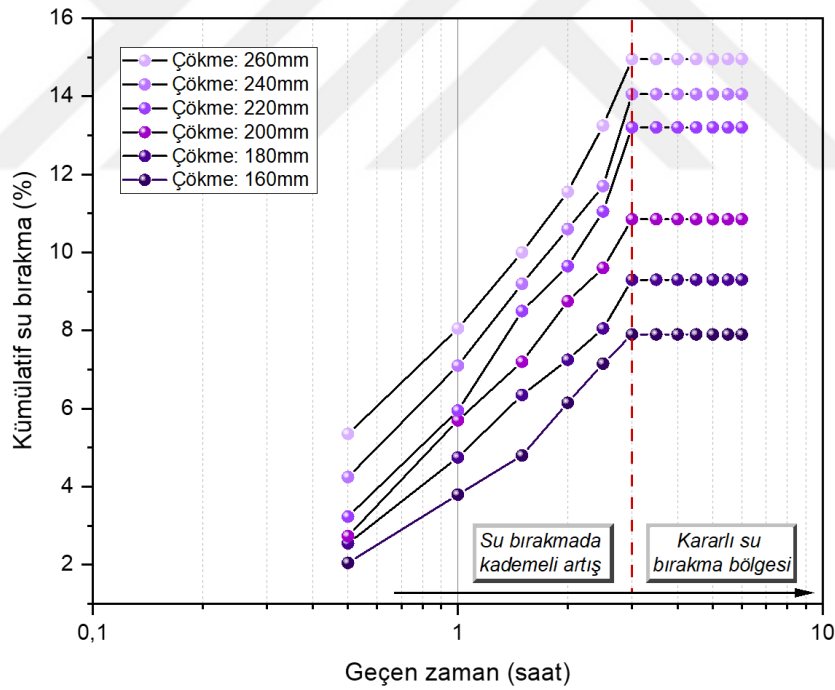
Örnek	O	Fe	S	C	Si	Al	Ca	K	Mg	Cu	Zn	Ti	Mo
Proses atığı (PA)													
# 1 (%)	33.4	27.5	21.7	-	7.0	4.7	2.9	1.0	0.8	0.6	0.3	-	-
# 2 (%)	33.1	31.2	21.3	-	6.8	3.1	1.1	0.4	1.4	0.4	0.2	-	-
Ortalama (%)	33.25	29.35	21.4	-	6.9	3.9	2.0	0.7	1.1	1.0	0.25	-	-
Portland çimentosu (PÇ)													
# 1 (%)	36.8	1.5	-	22.3	4.2	1.3	29.9	0.7	0.4	-	-	-	2.9
# 2 (%)	33.8	1.0	-	33.9	3.6	0.9	23.3	0.7	0.2	-	-	-	2.7
Ortalama (%)	35.3	1.25	-	28.1	3.9	1.1	26.6	0.7	0.3	-	-	-	2.8
Yüksek fırın cürufu (YFC)													
# 1 (%)	38.8	0.5	-	18.5	13.6	4.7	17.7	0.5	2.9	-	-	0.9	-
# 2 (%)	39.7	0.5	-	21.1	12.0	4.0	15.5	0.5	2.7	-	-	0.5	1.9
Ortalama (%)	39.25	0.5	-	19.8	12.8	4.35	16.6	0.5	2.8	-	-	0.7	0.95
C-Tipi Uçucu kül (UK)													
# 1 (%)	41.7	3.0	-	29.2	13.1	6.5	1.3	0.9	1.3	-	-	-	3.1
# 2 (%)	47.2	5.3	-	18.7	16.0	7.7	1.6	1.1	2.5	-	-	-	-
Ortalama (%)	44.45	4.15	-	23.95	14.55	7.1	1.45	1.0	1.9	-	-	-	1.55
Kırma Kireçtaşı (KK)													
# 1 (%)	48.5	-	-	14.4	0.8	0.5	33.9	-	0.5	-	-	-	1.3
# 2 (%)	53.2	0.4	-	13.9	1.5	1.0	29.6	-	0.4	-	-	-	-
Ortalama (%)	50.35	0.2	-	14.15	1.15	0.75	31.75	-	0.45	-	-	-	0.65



Şekil 22. Proses atıklarının kıvam limitleri

PA'ların kolloidal özelliklerine bağlı olarak yeraltında taşınırken boru hattındaki davranışının (reoloji) daha iyi anlaşılabilmesi için su tutma testi de yapılmıştır. Su tutma testi için, 150-250 mm çökmeye sahip atık malzeme beher

içerisine yerleştirilmiş ve beher üzerinde toplanan suyun belirli zamanlarda şırınga ile çekilmesi ile toplam su salınımı ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar *Şekil 23*'te sunulmuştur. Genel olarak 3 saatlik bir sürenin ardından atık malzemenin çökeldiği ve atık içerisindeki fazla suyun yüzeyde toplandığı gözlemlenmiştir. Bu sürenin sonunda su salınım eğrisi kararlı hale gelmiştir. Su salınımı için ilk ölçüm 30 dakika sonra alınmış ve zamana bağlı olarak dolgudan ayrılan su miktarında göreceli bir artış gözlenmiştir. 150-250 mm çökme aralıkları için, atıkların toplam su salınımı %8-15 arasında değişmiştir. Testlerden, dolgu malzemesi boru hattında en az 3 saatlik bir süre boyunca hareketsiz kalsa bile, tıkanmadan su bırakabileceği (çimentolu atıkların kürlenmesi/sertleşmesi sonucunda) yorumu yapılabilir. Bu 3 saatlik sürenin, dolgu tesisinde herhangi bir teknik arıza veya operasyonel sorun olması durumunda operatörlerin hattı güvenli bir şekilde tahliye etmesine olanak sağlayacağını göstermektedir.



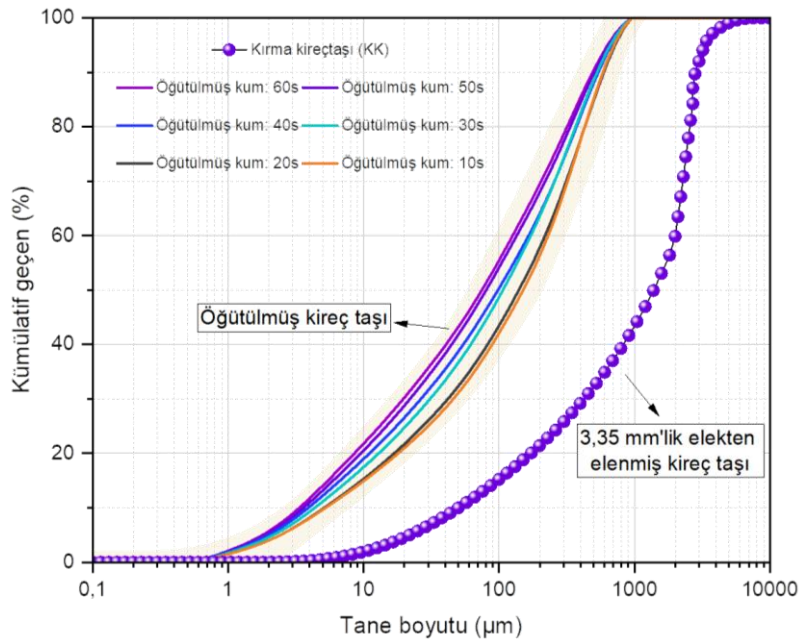
Şekil 23. Zamanın bir fonksiyonu olarak atıkların su salınımı

4.2.2. Kırma Kireçtaşının Karakterizasyonu

Çimentolu macun dolguların dayanım performansını arttırmak ve maliyetleri düşürmek ve kötü derecelenmiş çok ince taneli atık malzemesinin boyut dağılımını iyileştirmek amacıyla agrega olarak daha iri taneli kum-çakıl eklenebilir. Nispeten iri

taneli kum-çakıl eklenmesi, daha yüksek yoğunluklu ve daha az su içeren karışım oluşturur. Bu durum macun dolguda daha az çimento oranı kullanımı ile sonuçlanabilir. Ancak, atık içine agrega olarak eklenen iri kum-çakıl malzemelerinin maliyeti arttırmamasına dikkat edilmeli, ince taneli atık malzemenin etkin yönetimini gerekli kıldığı için bir ön çalışma yapılmalı ve en uygun ikame oranları tespit edilmelidir. Ayrıca, kum-çakıl bileşenlerinin karışımlarda kullanılmasının diğer bir kritik yönü, boyutlandırmanın akış davranışına müdahale etmemesini sağlamaktır. Sıklıkla kullanılan temel bir kural, maksimum tane boyu en az boru hattı/sondaj deliği çapının beşte biri ile sınırlamaktır, ancak bu kum-çakıl özelliklerinin tane boyu dağılımına ve şekline bağlıdır.

Tez çalışmasında kullanılan kırma kireçtaşı (KK), proses atıkların alındığı madenin yakınındaki bir taş ocağından temin edilmiştir. KK'nın özellikleri, tane boyutunun azalması, işlenen ürünün spesifik yüzeyinin-amorf fazının artması ve mineralojik bileşiminin değişmesi nedeniyle kırma türüne bağlı olarak değişmektedir. Kullanılan KK ilk olarak laboratuvarında bilyalı değirmen kullanılarak 10, 20, 30, 40, 50 ve 60 dakikalık sürelerde öğütülmüştür. Ön testlerden sonra, numunenin yüksek CaO içeriği nedeniyle çok kısa sürelerde bile çok ince tane boyutuna (toz) ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, atıkların tane/parçacık boyutu dağılımını iyileştirmek için herhangi bir öğütme yapılmadan KK kullanılmıştır.



Şekil 24. Öğütülmüş ve elenmiş KK'nın tane boyu dağılım eğrileri

Kullanılan kireçtaşı, maksimum tane boyutu boru hattı/delik çapının en az beşte biri olacak şekilde 3,35 mm'lik elekten elenerek tane boyu dağılım analizleri yapılmıştır. Bu elek boyutu, bir boru hattı aracılığıyla yeraltı duraklarına taşınabilen macun dolgu karışımlarında izin verilen maksimum parçacık boyutunu yansıtmaktadır. *Şekil 24*'te öğütülmüş ve elenmiş KK'nın tane boyu dağılım eğrileri verilmiştir. Ayrıca *Tablo 5*'de KK'ya ait diğer temel fiziksel özellikler detaylı olarak görülmektedir. Test edilen KK, derecelenme katsayısı (C_c : 1.60) 1 ila 3 arasında değiştiğinden iyi derecelendirilmiştir ve üniformaluk katsayısı (C_u : 36,9) 6'dan yüksektir. KK'nın özgül ağırlığı ve yüzey alanı ise sırasıyla 2,71 ve 0,64 m²/g olarak bulunmuştur.

Tablo 6'da KK'nın kimyasal bileşimi görülmektedir. KK içindeki ana oksidin kalsiyum oksit (CaO: %53,77) olduğu, KK içindeki küçük fazların ise silisyum dioksit (SiO₂: %1,96) ve alüminyum oksitten (Al₂O₃: %1,54) oluştuğu açıkça görülmektedir. Bu, kalsitin KK'da ana faz olarak tanımlandığı XRD sonuçlarıyla uyumludur. Ayrıca XRD sonuçlarda küçük bir faz olarak kuvarsta bulunmaktaydı (*Şekil 20*). Kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan üretilen KK'nın yüksek oranında CaO içeriğine sahip olması özellikle çimentolu dolgu yapısında dayanıma pozitif katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Şekil 21e'de KK'nın 500 kat büyütme altında SEM mikrografını göstermektedir. KK içinde farklı çapta taneler olduğu açıkça görülmektedir ve büyüklükleri 0,5 µm – 3,35 mm arasında değişen düzensiz şekilli, köşeli ve küresel olan tanelerden oluşmaktadır. Ayrıca *Tablo 7*'deki SEM-EDX sonuçları incelendiğinde KK'nın yüksek oranda oksijen (O: %50,35) ve kalsiyum (Ca: 31.75) içerdiği görülmektedir.

4.2.3. Çimento ve Mineral Katkıların Karakterizasyonu

Bu tez çalışmasında, çimento tipi olarak CEM I 42.5R (PÇ-Baştaş/Ankara) kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu (YFC-Karçimsa) ve uçucu kül (UK-Eren enerji) katkı maddeleri çimento ikamesi olarak kullanılmıştır. Bu malzemelerin tane boyu dağılım eğrileri *Şekil 19*'da, diğer temel fiziksel özellikleri ise *Tablo 6*'da detaylı olarak verilmiştir. PA'dan bağımsız olarak ÇMD bileşenleri arasında PÇ'nin özgül ağırlığının en yüksek (3,09), UK'nin özgül ağırlığının ise en düşük (2,68) olduğu

belirlenmiştir. Benzer şekilde, PÇ'nin özgül yüzey alanı en düşük (0,39 m²/g), UK'nın özgül yüzeyi en yüksekti (0,75 m²/g). PÇ, YFC ve UK'nin ortalama tane boyutları (D₅₀) sırasıyla 25,4, 13,9 ve 18,2 µm olarak bulunmuştur.

Tablo 7, dolguda kullanılan PÇ, YFC ve UK'nin XRF yöntemiyle belirlenen oksit analizi sonuçlarını içermektedir. Tüm analizlerde baskın bileşenlerin CaO ve SiO₂ olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca oksit analizi sonucunda kullanılan UK'nin SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ toplamı %71,4 olarak bulunmuştur. Bu değerin %50'den fazla olması kullanılan UK'nin C sınıfı olduğunun göstergesidir. YFC (*Şekil 21a*) ve UK (*Şekil 21b*) mineral katkıları ile PÇ'nin (*Şekil 21c*) SEM mikrografları *Şekil 21*'de verilmiştir. YFC, UK ve PÇ 500/2500 kat büyütme altında incelenmiştir. Hem cüruf hem de Portland çimentosu öğütme ürünleri olduğundan, düzensiz şekildedirler ve SEM mikrografları benzerlik göstermektedir. Bunun yanı sıra UK'ların morfolojisi genel olarak ince ve küresel tanelerden oluştuğu açıkça görülmektedir.

4.2.4. Karışım Suyunun Karakterizasyonu

Su kalitesi, çimentolu macun dolguların (ÇMD) karışım ve taşıma özelliklerini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Özellikle su-çimento oranı dolgunun dayanımını/kararlılığını doğrudan etkilemektedir. Ek olarak, ÇMD'lerde kullanılan çimentonun hidratasyonu, karışıma eklenen suyun kimyası tarafından önemli ölçüde yönetilmektedir. Tipik olarak, tatlı ve/veya geri dönüştürülmüş formda 3 farklı (musluk suyu, göl suyu ve proses suyu) su ÇMD karışımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar arasında musluk suyu tez çalışması kapsamında ÇMD numunelerinin üretimi için karışım suyu olarak kullanılmıştır. *Tablo 8*, musluk suyunun jeo-kimyasal/kimyasal analiz sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 8. Karışımın suyunun kimyasal analiz sonuçları

	Jeo-kimyasal parametreler			Kimyasal parametreler (mg L ⁻¹)						
	pH	EC (µS/cm)	Eh (V)	SO ₄ ²⁻	Ca	K	Cl	Mg	Si	Fe
Musluk suyu, (TW)	7,69	0,14	0,48	4,89	40,1	0,48	0,41	2,11	0,77	0,049

4.3. ÇMD Karışımlarının Üretimi

Malzeme karakterizasyonun ardından laboratuvar ortamında farklı çimentolu macun dolgu (ÇMD) numunelerinin tasarımları için gerekli malzeme miktarları

hesaplanarak dolgu hazırlıklarına başlandı. *Tablo 9*'da görüleceği üzere ÇMD tasarımları için numuneler kısa/uzun kürleme yaşlarında (3-180 gün), sabit katı (kütlece %72) ve çimento (kütlece %5) içeriklerinde hazırlanmıştır. Ayrıca ÇMD'lerde agrega ikamesi olarak altı farklı oranda kireçtaşı içeriği (atık/kireçtaşı: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) ve çimento ikamesi olarak altı farklı oranda mineral katkı içeriği (PÇ/YFC-UK: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) seçilmiştir.

Tablo 9. ÇMD numunelerine ait reçete

Numune ID	Katı oranı (%)	Çimento dozajı (%)	Atık (agrega) ikame oranı (%)		Bağlayıcı ikame oranı (%)			Çökme-slamp (cm)	Kür süresi (gün)
			PA	KK	PÇ	UK	YFC		
1. adım									
Kontrol	72	5	100	-	100	-	-	25	3-180
KK10	72	5	90	10	100	-	-	25	3-180
KK20	72	5	80	20	100	-	-	25	3-180
KK30	72	5	70	30	100	-	-	25	3-180
KK40	72	5	60	40	100	-	-	25	3-180
KK50	72	5	50	50	100	-	-	25	3-180
UK10	72	5	-	-	90	10	-	25	3-180
UK20	72	5	-	-	80	20	-	25	
UK30	72	5	-	-	70	30	-	25	3-180
UK40	72	5	-	-	60	40	-	25	
UK50	72	5	-	-	50	50	-	25	3-180
YFC10	72	5	-	-	90	-	10	25	3-180
YFC20	72	5	-	-	80	-	20	25	
YFC30	72	5	-	-	70	-	30	25	3-180
YFC40	72	5	-	-	60	-	40	25	
YFC50	72	5	-	-	50	-	50	25	3-180
2. adım									
KK10-UK10	72	5	90	10	90	10	-	25	3-180
KK10-UK30	72	5	90	10	70	30	-	25	3-180
KK30-UK10	72	5	70	30	90	10	-	25	3-180
KK30-UK30	72	5	70	30	70	30	-	25	3-180
KK10-YFC10	72	5	90	10	90	-	10	25	3-180
KK10-YFC30	72	5	90	10	70	-	30	25	3-180
KK30-YFC10	72	5	70	30	90	-	10	25	3-180
KK30-YFC30	72	5	70	30	70	-	30	25	3-180

ÇMD numunelerinin hazırlanma aşamasında öncelikle atıklar ve kireçtaşı, UTEST marka 10 litrelik laboratuvar tipi mikserde üç dakika karıştırıldı. Daha sonra bağlayıcı ürünler (PÇ, YFC ve UK) ve musluk suyu ilave edilerek dört dakika daha karıştırılmıştır. Orta hızda çalıştırılan mikserde numunelerin hedef çökme değerlerine ulaşması için gereken süre toplamda 7-10 dakika olarak belirlendi. Karıştırma sonrasında ÇMD numunelerinin çökme değerini kontrol etmek için mini çökme konisi (15 cm yüksekliğinde) kullanıldı. Her kür periyodu için 3 adet plastik numune kabı (D×H: 5×10 cm, 498 numune) doldurularak hedef kürlenme süreleri (3-180 gün)

beklenmek üzere kür kabinine yerleştirildi. Kür kabini, yeraltı maden koşullarını iyi temsil etmek için 25°C ve %95 nem oranına ayarlanmıştır. ÇMD hazırlama/test aşamaları Şekil 25'te ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



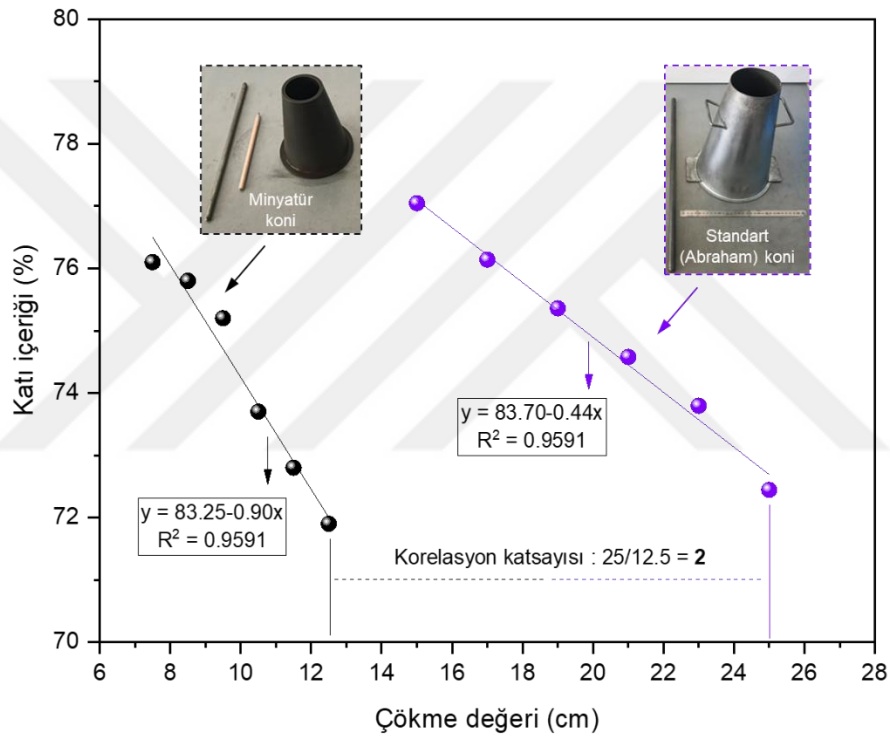
Şekil 25. ÇMD numunelerinin hazırlanması ve test aşamaları

4.4. Kullanılan Yöntemler

4.4.1. Tekrarlanabilir Mini-Çökme Testleri

Kırma kireçtaşı (KK) içeren veya içermeyen çimentolu macun dolgu (ÇMD) numunelerinin çökmesi ASTM C143 standardına göre minyatür bir çökme konisi (15 cm yükseklik; Şekil 26) ile ölçülmüştür. Tipik olarak beton akışkanlığının bir ölçüsü olarak kullanılan standart çökme (Abraham) konisi (30 cm yükseklik) yerine, minyatür çökme konisi kullanılarak yapılan testler küçük hacimli dolgu malzemelerine ihtiyaç

duyar ve operatörlerin kısa sürede çok sayıda test yapmasına olanak tanır (Malusis vd., 2008; Jia vd., 2016). Yapılan testler sonucunda standart ve minyatür çökme konileri arasında oldukça güçlü bir ilişkiyi olduğu bilinmektedir. Genel olarak minyatür çökme konisinden elde edilen çökme değeri, standart çökme konisi ile ölçülen çökme değerinin yarısına eşittir. Yani minyatür çökme konisi ile belirlenen çökme 50 mm olarak ölçülürken, standart çökme konisi ile belirlenen çökme değeri 100 mm olarak ölçülmektedir. ÇMD karışımlarının hedef çökme değeri, kütlece %72 katı madde içeriği için 250 mm olarak belirlenmiştir.

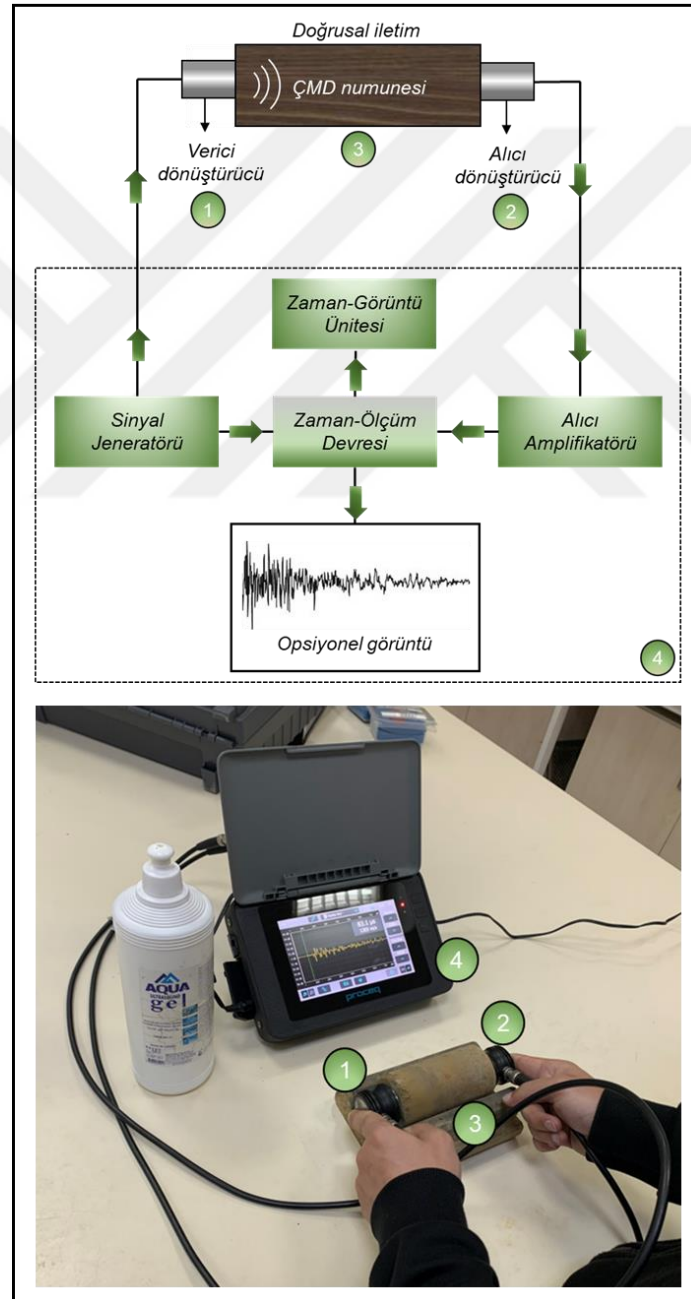


Şekil 26. Mini ve standart çökme konisi ile çökme ölçümleri

4.4.2. Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (UPV) Ölçümleri

UPV (ultrasonik ses dalgası yayılma hızı), çimentolu malzemelerin dayanımı/homojenliği hakkında pratik bilgi vermektedir. Bu nedenle çimentolu macun dolguların (ÇMD) fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Tablo 9'daki reçeteye göre hazırlanan ve kür süresini tamamlamış ÇMD numunelerinin UPV ölçümleri, Proceq Pundit Lab 200 cihazı kullanılarak (ASTM C 597-16 standardı ile uyumlu) gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz dönüştürücüler (verici-alıcı) arasındaki ultrasonik ses dalgasının (24-500 kHz) yayılma süresini

yakalayarak (örnekleme süresi: 0,1 μ s) sonuç vermektedir (Şekil 27). UPV testine geçilmeden önce dönüştürücü ve ÇMD numuneleri arasındaki temasın artırılması amacıyla numune kalıplarından çıkarılan dolguların alt ve üst yüzeyleri keskin bir jilet yardımıyla düzeltilmiştir. Ardından ÇMD numunelerinin yüzeyleri ile dönüştürücüler arasında sıkı bir arayüz sağlanması ve dalga iletiminin güçlendirilmesi amacıyla ultrasonik jel kullanılmıştır. Son olarak verici ve alıcı paralel olacak şekilde sabit kuvvet uygulanarak (5-10 kN) UPV ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 27. UPV yönteminin detaylı şeması

UPV ölçümleri tüm numuneler için üç kez tekrarlanmış ve ortalama UPV sonucu dikkate alınmıştır. UPV değerleri $UPV (X, T) = X/T$ denklemi yardımıyla hesaplanmıştır. Burada P dalgasının ÇMD numuneleri içindeki hızı (m/s) $UPV (X, T)$; X dönüştürücüler arası mesafe; ve T verici-alıcı arasındaki dalga yayılım süresidir.

4.4.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımı (UCS) Testi

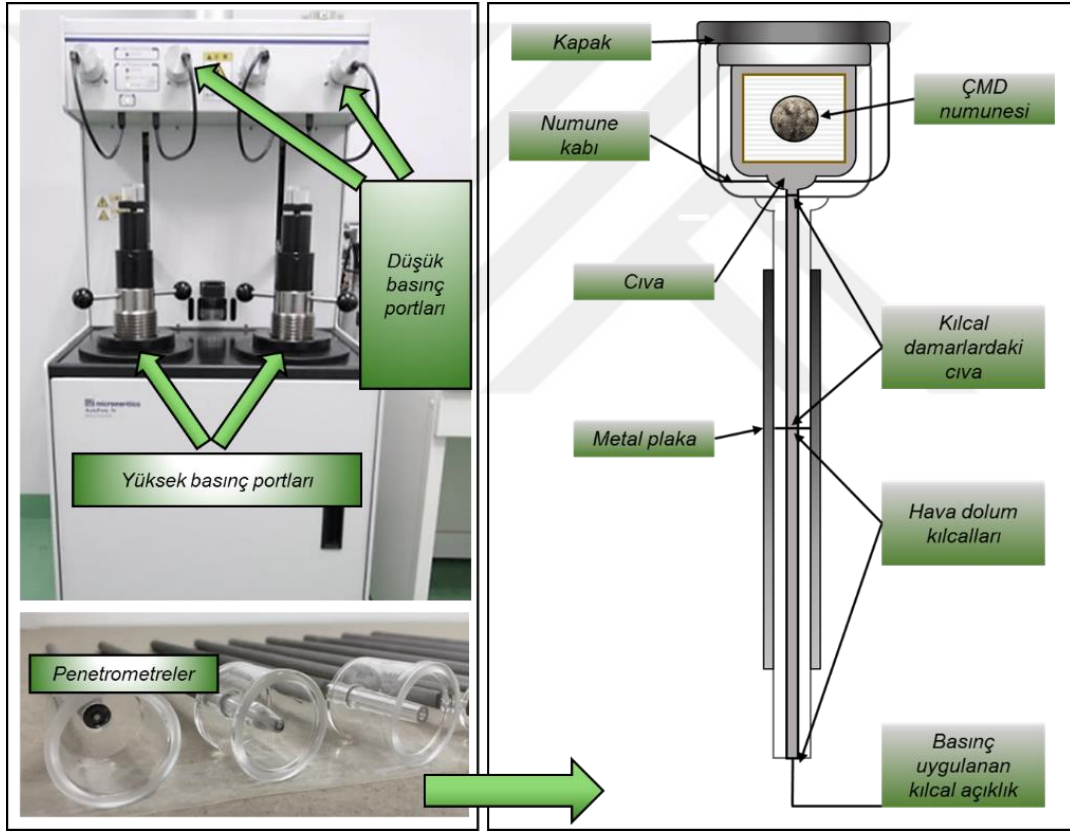
Çimento macun dolgularda (ÇMD) dayanım esaslı tasarımların yaygın olarak kullanılması nedeniyle tek eksenli basınç dayanımı (UCS) çok önemli bir parametredir. Hedeflenen kür süresine (3, 14, 28, 56, 90, 120 ve 180) ulaşan ÇMD'lerin UCS testleri UTEST marka otomatik yükleme presi (kapasite: 50kN, yükleme hızı: sabit 1mm/dk) kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 25). Testlerde UCS değerleri ve gerilme-şekil değiştirme davranışları otomatik olarak ölçülüp kayıt altına alındı. Test sonuçlarının doğrulunun artırılması amacıyla her kür süresi için üç test (ASTM C39'a göre) gerçekleştirildi ve ortalaması dikkate alındı. Ayrıca teste başlamadan önce numunelerin üst yüzeyleri düz hale getirilerek pürüzlü yüzeyden kaynaklanacak gerilme konsantrasyonu en aza indirildi.

4.4.4. Mikroyapı Testleri

Bu tez çalışmasında, sertleşmiş (hedef kür süresine ulaşmış) ÇMD numuneleri üzerinde hidrasyon ve gözenek yapılarının değerlendirilmesi için farklı mikroyapısal testler yapılmıştır. Mikroyapı evriminin değerlendirilmesi amacıyla hedef kür süresine (90 gün) ulaşan ÇMD numuneleri, yaklaşık 50°C sıcaklığa sahip fırında iki gün boyunca kurutuldu. Ardından ÇMD'lerin gözenek yapısı ve hidrasyon gelişimi Hg intrüzyon porozimetresi (MIP), termo-gravimetri/diferansiyel termo-gravimetri (TG/DTG), taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) gibi çeşitli testler yardımıyla incelenmiştir.

MIP testleri, 414 MPa'ya kadar basınç oluşturan ve 0,003 µm gözenek çapına kadar ölçüm yapabilen Micromeritics Autopore III 9420 cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 28). Bu cihaz makro ve mezo gözenekli çimentolu malzemelerin yüksek çözünürlükte yüzey alanı dağılımı, parçacık boyutu dağılımı ve yığın yoğunluğu gibi parametrelerin belirlenmesine olanak tanımaktadır. ÇMD'lerin gözenekliliğinin değerlendirilmesi amacıyla cihaz ilk aşamada numunelerin içerisindeki gaz fazını

düşük basınç altında boşaltarak cıva ile doldurur ve 7-345 MPa basınç üretir. Ardından basıncı kademeli olarak yükselterek (345-414 MPa) gözeneklere nüfuzu önemli ölçüde artırır. Tüm bu süreç 8 saatlik bir döngüde gerçekleşmektedir. Yapılan tüm testler 130° temas açısı ve 485 dynes/cm'lik yüzey gerilmesi altında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ÇMD'ler üzerinde yapılan tüm MIP testlerinde %25-90 cıva hacminin elde edilmesine dikkat edilmiştir. Şekil 28'de MIP test düzeneğini ve basınç altında kullanılan penetrometreler gösterilmektedir. Her bir ÇMD numunesi için iki farklı MIP testi gerçekleştirilmiş olup gözenekliliğinin çok küçük oranda değiştiği ve cıva nüfuzunun neredeyse aynı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 28. MIP cihazı ve penetrometreleri

XRD testleri, ÇMD numunelerinin farklı kürlenme sürelerinden sonra hidrasyon ürünlerinin ve oluşan kristalli maddelerin içeriğini tanımlamak için kullanılmaktadır. X-ışını difraktometre tekniğinden önce dolgu numuneleri toz haline getirilmiş ve analiz için hazırlanmıştır. Analiz için Rigaku SmartLab CuK α radyasyon cihazı (emisyon akımı: 40 mA, çalışma voltajı: 40 kV, radyasyon: CuK α , tarama aralığı: 2 θ ila 5° ila 60°) kullanılmıştır (Şekil 25).

TG/DTG testleri, ÇMD'lerin sıcaklık değişimlerini ölçmek için kullanılmıştır. Bu yöntemle, dolgu hidrasyon ürünlerinin oluşumu ve miktarlarındaki değişimler incelenmektedir. TG/DTG testleri yüksek saflıkta azot atmosferi altında alüminyum potalara yerleştirilen 10 ± 4 mg toz numunelerle Linseis/STA TG-DSC/DTA PT1600 cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 25). $10^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızına dayalı olarak 25 ila 1000°C arasında değişen bir ısıtma sıcaklığı kullanılmıştır.

SEM testleri, genellikle hidrasyon ürünlerinin tayini ve çimentolu karışımlarında meydana gelen yenilmelerin nedenini açıklamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. ÇMD'lerin mikro yapısını/kompozisyonunu test etmek için x5 ile x300.000 büyütme oranına ($128\text{ mm} \times 96\text{ mm}$ görüntü boyutu) ve 3 nm ile 15 nm çözünürlüğe sahip JEOL/JSM-6610 cihazı kullanıldı (Şekil 25). Ayrıca cihaz 0,9 nA akım emisyonuna ve 20 kV hızlandırma voltajına sahiptir. Mikroyapı çalışmaları için, hedef kür süresine ulaşan ÇMD numuneleri küçük parçalara bölünmüş ve doğru bir ölçüm elde etmek için 50°C 'de iki gün boyunca kurutulmuştur. Ardından ÇMD numuneleri Au (altın) film ile sıkıca kaplanmış ve SEM cihazında 50-9.000 amplifikasyonda gözlemlenmiştir. Ayrıca, SEM sonuçlarının görselleştirilmesini ve yorumlanmasını daha da geliştirmek için MountainsLab yazılımı da kullanılmıştır.

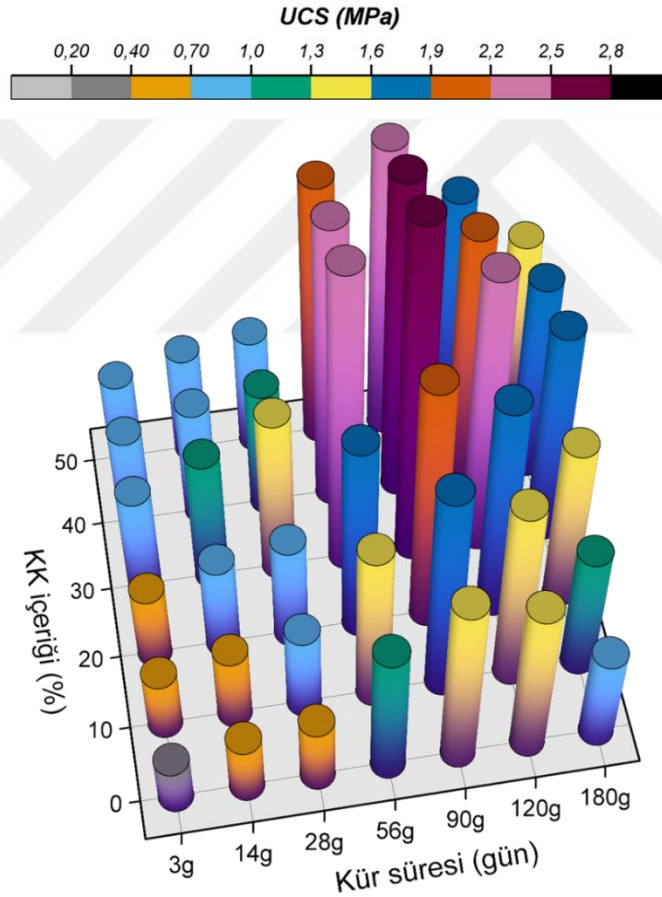
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. ÇMD'lerin Mekanik ve Elastik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Şekil 29 ve *Tablo 10*, farklı kırma kireçtaşı (KK) oranları (%0, %10, %20, %30, %40 ve %50), sabit bağlayıcı (kütlege %5) ve katı (kütlege %72) içeriğinde hazırlanmış farklı kür sürelerindeki çimentolu macun dolgu (ÇMD) numunelerinin basınç dayanımlarını göstermektedir. Genel olarak ÇMD'lerin dayanımlarını artan kür süresine paralel olarak artmıştır. Ancak 90 kür süresinden itibaren tüm ÇMD numunelerinde gözle görülür şekilde dayanım düşüşleri meydana gelmiştir. Bu durumun arkasındaki neden hem atıkların kimyasından hem de yetersiz hidrasyon ortamından kaynaklandığı söylenebilir. Özellikle kükürt bakımından zengin piritik atıklar macun dolgu karışımlarının sülfat konsantrasyonunu artırdığından çimentonun hidrasyonu engellenmekte ve dayanım düşüşlerine neden olmaktadır (Kasap vd., 2022c;2022d). Ayrıca uzun kür sürelerinde etrenjit gibi hidrasyon ürünlerinin kırılması/hasar görmesi de bu durumun sebeplerinden biri olabilir. ÇMD numunelerinin ulaştığı maksimum dayanım değeri (90 gün – KK30) 2,74 MPa, minimum dayanım (3 gün - kontrol) değeri 0,39 MPa olarak belirlenmiştir.

KK'nın atık ikamesi olarak kullanımı ÇMD'lerin dayanıma önemli katkılar sağladığı açıktır. KK içeren ÇMD'lerin kontrol numunesine (PÇ) kıyasla daha yüksek dayanım değerlerine ulaşması, KK'nın dolgunun tane dağılımını ve boşluk yapısını iyileştirmesi, kimyasal hidrasyon sürecine katkıda bulunmasından kaynaklanmaktadır (Kasap vd., 2023). Ayrıca, ikame KK'nın tane boyutunun proses atığına kıyasla daha büyük olması dolgu karışımının taneleri arasındaki temas alanını arttırmaktadır. Bu durum taneler arasındaki sürtünmeyi artırarak dış gerilmelere karşı etkili bir direnç kuvveti oluşturmaktadır. Direnç kuvvetinin etkisi altında, KK içeren ÇMD numunelerinin kontrol numunesine göre daha yüksek basınç dayanımı kapasitesine sahip olduğu düşünülmektedir. Ek olarak özellikle uzun dönem dayanımlarındaki düşüşler karışımlarda kullanılan KK miktarına bağlı olarak olumlu şekilde değişmiştir. Karışımlarda atık yerine kullanılan KK miktarı arttıkça, kireçtaşının yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği nedeniyle uzun vadeli dayanım kayıpları azalmaktadır (Tozsın vd., 2014; Jones ve Cetin, 2017).

Neredeyse tüm ÇMD numunelerinde KK miktarı arttıkça dayanım artışları gözlenmiştir. Özellikle ÇMD numunelerindeki KK miktarının %30'a kadar artırılması dayanıma önemli katkılar sağlamıştır. Örneğin 28 gün kürlenmiş kontrol ÇMD numunesinin dayanım değeri 0,57 MPa iken aynı kürleme süresi için KK30 dolgu numunesinin dayanım değeri 1,39 MPa olarak bulunmuştur. Ancak, Şekil 29'dan da açıkça görülebileceği gibi dayanımdaki bu artışlar %30 KK ikame oranından sonra yavaşlamış ve kireçtaşı miktarındaki artış ÇMD karışımları olumsuz etki yaratmıştır. Örneğin, %30 KK ikame oranına sahip ÇMD numunesinin (KK30) 90 günlük dayanım değeri 2,74 MPa'ya ulaşırken aynı kür süresi %50 KK ikame oranına sahip dolgunun (KK50) dayanımı 2,31 MPa olmuştur.



Şekil 29. KK ikameli ÇMD'lerin dayanım sonuçları değerleri

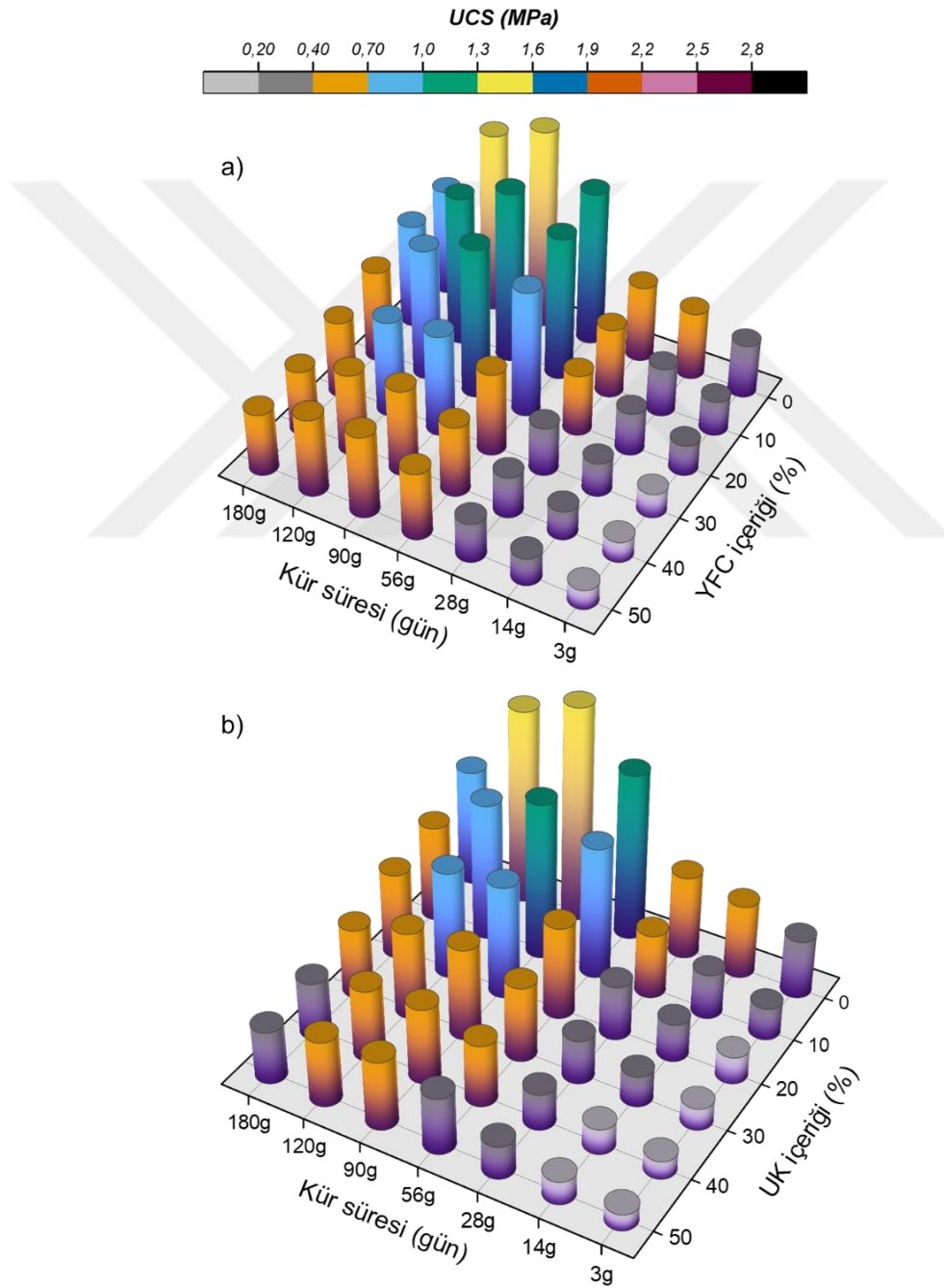
Dayanımdaki artışın belirli bir KK ikame oranıyla (%30) sınırlı kalmasının nedeni taze ÇMD karışımlarının segregasyona (ayrışmaya) uğrayarak dolgu reolojisini olumsuz şekilde etkilemesi ile açıklanabilir. Proses atıklarının ince partikül boyutu, dolguların dayanımı ve yeraltına nakliyesi için önemli bir faktördür (Cao vd., 2021).

Bu nedenle, karışıma atık yerine ikame olarak KK eklenmesi, ÇMD'lerin reolojik ve mekanik parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Karışımlardaki ince ve kaba partiküller arasındaki uyum, dolgudaki boşlukları azaltır ve böylece dayanımı artırır (Yin vd., 2022). Ancak karışımlarda iri agreganın fazla olması durumunda dolguda ayrışmalar (segregasyon) meydana gelmekte ve rijit bir yapının oluşması engellenmektedir (Wang vd., 2021a). Özellikle artan iri malzeme miktarı karışımlarda homojen bir yayılım göstermemekle birlikte KK taneleri ile çimento arasındaki aderansı (yüksek özgül yüzey alanı) zayıflatmakta ve segregasyonu tetiklemektedir (Zheng ve Li, 2020). Ayrıca boru hattıyla birlikte yeraltında depolanan ÇMD karışımlarında iri boyutlu malzeme miktarı arttıkça nakliye borularında korozyon ve özellikle dirseklerde tıkanmalar meydana gelmektedir (Liu vd., 2019; Li vd., 2020b). KK miktarı ve boyutundan kaynaklanabilecek bu sorunlar, kireçtaşının öğütme gibi farklı işlemlere tabi tutulmasıyla azaltılabilir ancak işletme maliyetlerinde önemli artışlar olabileceği göz ardı edilmemelidir.

Şekil 30 ve Tablo 10, çimento yerine kullanılan ve altı farklı ikame oranına sahip uçucu kül (UK) – yüksek fırın cürufu (YFC) mineral katkıların (PÇ/YFC-UK: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) farklı kür sürelerinin (3-180 gün) bir fonksiyonu olarak ÇMD dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Kür süresi arttıkça, azalan boşluk oranı ve zamanla artan hidrasyon ürünlerinin bir sonucu olarak dolgunun dayanım gelişiminde kesintisiz bir artış gözlenmiştir. 28 günlük kontrol numunesine kıyasla aynı kür süresi için farklı YFC ikamesine (%10, %20, %30, %40 ve %50) sahip ÇMD karışımlarının dayanımları %8,70-%49,0 oranında azalmıştır (*Şekil 30a*). Benzer şekilde, UK içeren ÇMD'lerin dayanım değerleri kontrol numunesine kıyasla %22,8-%60,5 oranında düşmüştür (*Şekil 30b*). Kontrol numunesinden bağımsız olarak çimento ikamesi yerine kullanılan her iki mineral katkı (YFC ve UK) için de maksimum dayanım değeri (90. günde YFC: 1,26 MPa ve UK: 1,07 MPa) %10 ikame oranında, minimum (3. günde YFC: 0,14 MPa ve UK: 0,11 MPa) ise %50 ikame oranında gözlemlenmiştir.

Bilindiği gibi, ÇMD ve beton gibi çimentolu karışımların basınç dayanımı artan çimento içeriği ile iyileşmektedir. Ancak çimento yerine ikame edilen YFC ve UK gibi mineral katkılar erken yaşlardaki ÇMD'lerin dayanımında büyük bir düşüşe neden olmaktadır (Liv d., 2021). Bu durum genellikle sabit bağlayıcı dozajında

kullanılan çimento miktarının azalması ve buna karşılık gelen su/çimento (s/ç) oranının artması ile bu mineral katkıların (YFC ve UK) PÇ'nin içerdiğinden daha az puzolanik ürün içermesiyle ilişkilendirilmektedir (Behere vd., 2021). Buna ek olarak, ÇMD'nin mekanik dayanımındaki düşüşün, Portland çimentosundan (PÇ) daha düşük kalsiyum oksit içeriği içeren katkı maddeleri nedeniyle yetersiz hidratasyon ürünlerinin oluşmasından kaynaklandığı varsayılmaktadır.



Şekil 30. YFC (a) ve UK (b) içeren ÇMD'lerin dayanım sonuçları

Tablo 10. ÇMD’lerin kür süresine göre UCS sonuçları

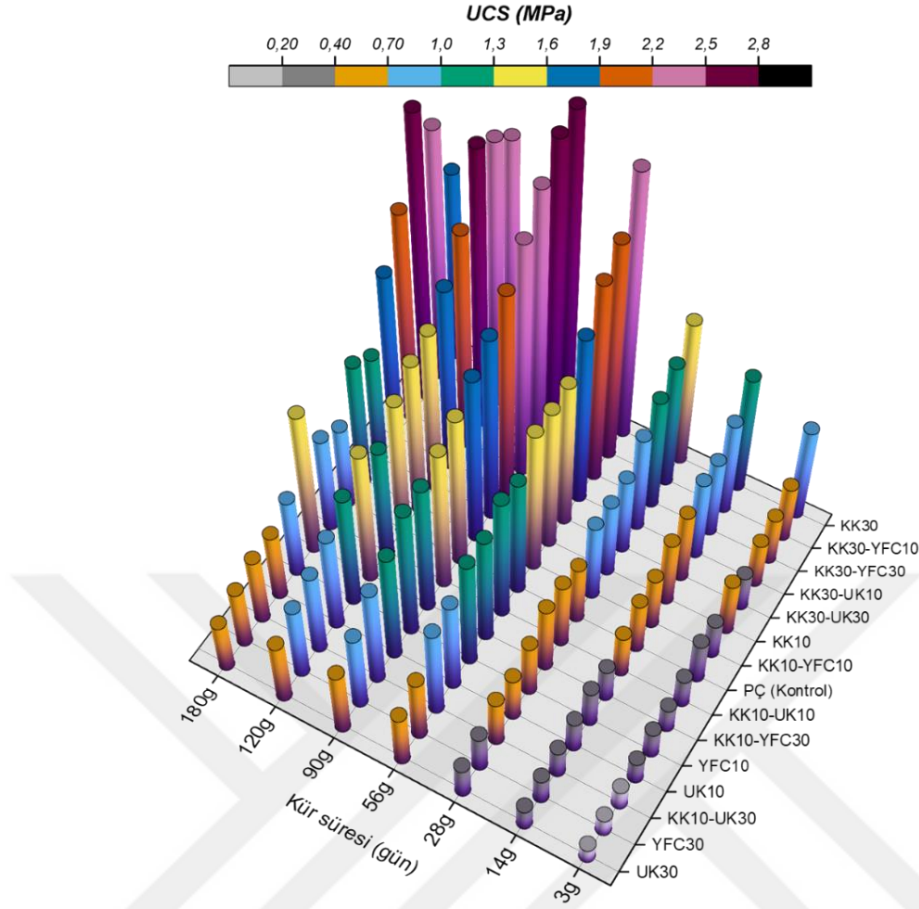
Numune ID	Atık (agrega)		Bağlayıcı			UCS (MPa)						
	ikame oranı (%)		ikame oranı (%)									
	PA	KK	PÇ	UK	YFC	3g	14g	28g	56g	90g	120g	180g
Kontrol (PÇ)	-	-	100	-	-	0,40	0,51	0,57	1,14	1,48	1,33	0,80
KK10	90	10	100	-	-	0,52	0,64	0,73	1,37	1,78	1,56	1,06
KK20	80	20	100	-	-	0,64	0,81	0,90	1,67	2,06	1,82	1,38
KK30	70	30	100	-	-	0,89	1,13	1,39	2,48	2,75	2,28	1,77
KK40	60	40	100	-	-	0,82	0,98	1,06	2,30	2,55	2,07	1,62
KK50	50	50	100	-	-	0,74	0,89	0,96	2,11	2,31	1,86	1,45
YFC10	-	-	90		10	0,26	0,36	0,52	1,06	1,27	1,11	0,78
YFC20	-	-	80		20	0,23	0,32	0,46	0,94	1,11	0,98	0,68
YFC30	-	-	70		30	0,18	0,25	0,36	0,61	0,75	0,71	0,57
YFC40	-	-	60		40	0,15	0,21	0,31	0,52	0,64	0,61	0,49
YFC50	-	-	50		50	0,15	0,20	0,29	0,50	0,61	0,58	0,46
UK10	-	-	90	10		0,22	0,31	0,44	0,90	1,07	0,94	0,66
UK20	-	-	80	20		0,19	0,26	0,37	0,63	0,77	0,74	0,59
UK30	-	-	70	30		0,15	0,21	0,30	0,51	0,63	0,59	0,48
UK40	-	-	60	40		0,12	0,17	0,25	0,42	0,51	0,49	0,39
UK50	-	-	50	50		0,11	0,16	0,22	0,38	0,47	0,45	0,36
KK10-YFC10	90	10	90	-	10	0,35	0,51	0,76	1,39	1,63	1,49	1,21
KK10-YFC30	90	10	70	-	30	0,24	0,33	0,65	1,06	1,27	1,30	1,40
KK30-YFC10	70	30	90	-	10	0,55	0,90	1,20	2,07	2,70	2,45	2,32
KK30-YFC30	70	30	70	-	30	0,46	0,75	1,08	1,91	2,48	2,57	2,64
KK10-UK10	90	10	90	10	-	0,28	0,42	0,64	1,20	1,38	1,10	0,92
KK10-UK30	90	10	70	30	-	0,20	0,27	0,46	0,87	0,97	0,81	0,65
KK30-UK10	70	30	90	10	-	0,44	0,78	0,93	1,63	2,22	2,05	1,98
KK30-UK30	70	30	70	30	-	0,35	0,68	0,75	1,40	1,97	1,75	1,63

Önceki çalışmalarda da görüldüğü üzere, ÇMD karışımlarında kullanılan cüruf içeriğindeki hafif bir artış, dayanımlardaki düşüşü tetiklemiştir (Jiang vd., 2020a; Chowdary, 2021). ÇMD dayanımlarındaki düşüş cürufun yavaş hidratasyon hızı (kısa vadedeki dayanım değerlerinin uzun kür sürelerine kıyasla daha düşük olması) ve düşük kalsiyum-silikat (C-S) içeriği ile ilişkilidir. Bu, Portland çimentosuna (PÇ) kıyasla cürufun bağlayıcı özelliğinin oldukça düşük olduğunun göstergesidir. Ayrıca YFC’nin PÇ’ye kıyasla daha ince tane boyutuna sahip olması, dayanımlarda meydana gelen düşüşlerin bir başka nedenidir (*Şekil 18*). YFC’ye benzer şekilde UK içeriğindeki artış ÇMD dayanımını olumsuz yönde etkilediği rahatlıkla söylenebilir. Tüm ÇMD’ler arasında gözlemlenen en düşük dayanımlar UK bazlı dolgulardan elde edilmiştir (*Şekil 30b*). UK’nın düşük su adsorbe etme özelliği nedeniyle aynı kıvam değerlerinde artan s/ç içeriği ve çimento hidratasyon reaksiyonuna nispeten yavaş

katılımı bu sonucu desteklemektedir (Cavusoglu vd., 2021a). YFC gibi UK'nın tane boyutunun PÇ'den daha küçük olması da bu sonuca katkı sağlamaktadır (*Şekil 18*). UK gibi puzolanların aktivitesi, puzolanın en fazla bağlayabileceği Ca(OH)_2 miktarına göre belirlenir. Bu sebeple, Ca(OH)_2 'nin doğal puzolanların puzolanik aktivitesi üzerinde genel etkileri bulunur. Uçucu külün puzolanik özelliğini gösterememesi kalsiyum oksit (Ca(OH)_2) ile uygun reaksiyon ortamının olmaması ve atıkların kimyasal bileşimindeki değişikliklerden kaynaklandığı söylenebilir. Özellikle atıkların sülfürlü yapısı oksitlenmeyi arttırarak puzolanların hidrasyon ortamını bozma eğilimindedir.

Yukarıda bahsedilen dayanım sonuçları dikkate alınarak, ÇMD karışımları için optimum KK oranı %30, YFC ve UK oranı ise %10 olarak belirlenmiştir. Ayrıca tez kapsamında yapılan tüm test/analiz sonuçlardaki artış-azalış eğilimlerinin daha net anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi amacıyla KK için %10, YFC ve UK için %30 ikame oranları da değerlendirilmiştir. Bu bölümden sonra verilecek diğer tüm test/analiz (özellikle mikroyapı) sonuçları belirlenen optimum karışım oranları (KK10/KK30, YFC10/YFC30 ve UK10/UK30) ÇMD dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 31 ve *Tablo 10*, atık yerine agrega kaynağı olarak farklı ikame oranlarında (%10 ve %30) KK ile hazırlanan ÇMD'lerin dayanım sonuçlarını göstermektedir. Ek olarak *Şekil 31*'de PÇ yerine %10 ve %30 ile değiştirilen YFC ve UK'nın KK içeren/KK içermeyen ÇMD'ler üzerindeki etkisi sunulmaktadır. Yapılan önceki testlere benzer şekilde ÇMD numuneleri için maksimum dayanımların 90 günlük kür süresinde ortaya çıktığı ve her bir ÇMD numunesinin bu kürleme yaşına kadar farklı oranlarda dayanım artışı gösterdiği gözlemlenmiştir. Sadece KK içeren ÇMD'lerden bağımsız olarak maksimum dayanım değeri (2,70 MPa) 90 günlük KK30-YFC10 numunesinde meydana gelirken, en düşük dayanım değeri (0,20 MPa) 3 günlük KK10-UK30 numunesinde meydana gelmiştir. Özellikle uzun kür sürelerinde (56-180) KK ile mineral katkıların kullanımı ÇMD numunelerin dayanım artışına önemli katkılar sağlamıştır. Örneğin 180 günlük KK30-YFC30 numunesi 2,63 MPa, 120 günlük KK30-UK30 numunesi 1,75 MPa değerine ulaşmıştır. KK ve mineral katkıların birlikte kullanımıyla birlikte ÇMD'lerde kısa ve uzun vadede önemli dayanım gelişimleri gözlenmiştir.

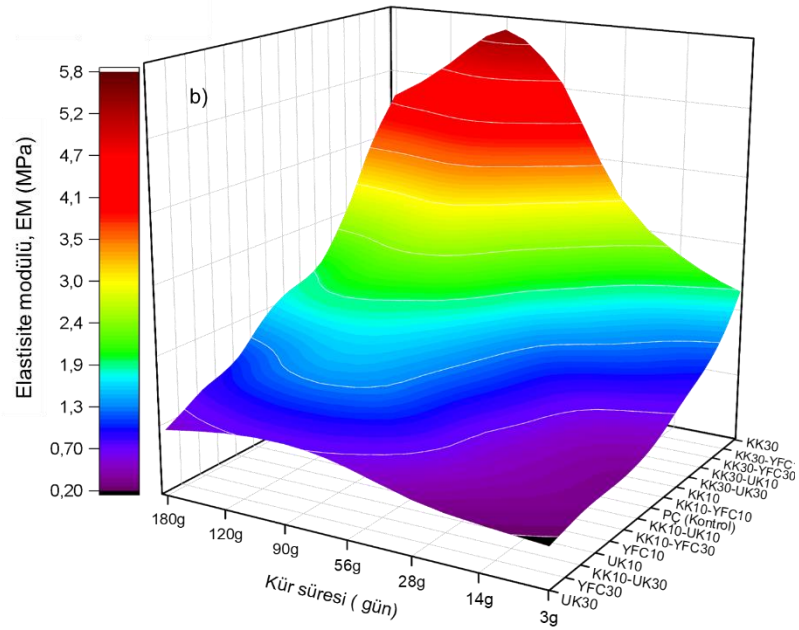
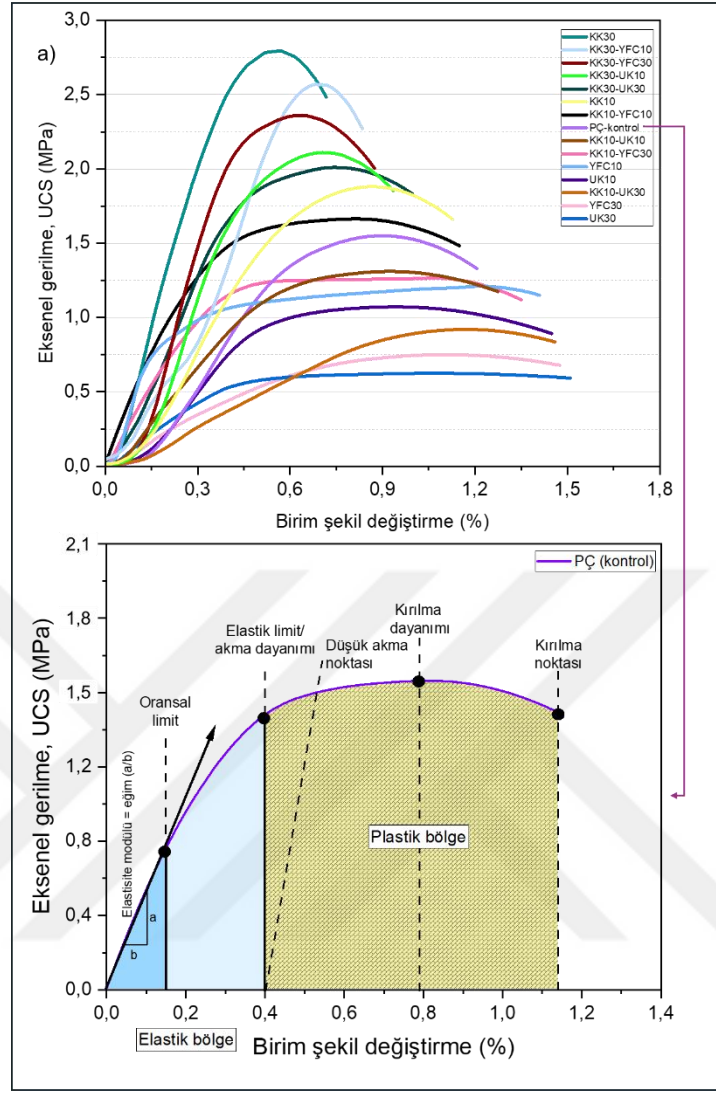


Şekil 31. KK, YFC ve UK katkılı ÇMD'lerin dayanım gelişimi

Özellikle ÇMD numunelerinde kullanılan YFC ve UK mineral katkılarından kaynaklı dayanım düşüşleri farklı oranlarda KK kullanımı ile önemli derecede artmıştır. Örneğin YFC ve UK kullanımıyla birlikte ÇMD numunelerinde dayanım gelişimi sırasıyla 1,27 ve 1,07 MPa'da sınırlı kalırken (%10 katkı ve 90 gün) %30'a kadar KK kullanımı ile bu değerler sırasıyla 2,70 ve 2,21 MPa'ya kadar yükselmiştir. Ayrıca kısa dönemlerde (3-28 gün) YFC ve UK'nin PÇ'ye kıyasla ÇMD karışımları üzerindeki negatif etkisi (önemli dayanım düşüşleri) KK kullanımı ile önemli derecede değişmiştir. Örneğin YFC30 ve UK30 numunelerinin 28 günlük dayanımları sırasıyla 0,36 ve 0,30 MPa iken düşük KK içeriğine sahip KK10-YFC30 ve KK10-UK30 numunelerinin dayanımları sırasıyla 0,65 ve 0,47 MPa (%80 ve %56 artarak) değerlerine ulaşmıştır. Bunun yanı sıra uzun kür sürelerinde PÇ'ye kıyasla mineral katkıların (YFC ve UK) dayanımına katkısının daha iyi olması ve yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriğine sahip KK kullanımı ile ÇMD'lerin performansı önemli şekilde artmıştır. Özellikle 56 günlük kür süresinden sonra diğer numunelere kıyasla YFC, UK ve KK katkılı dolguların dayanımları önemli derecede yüksektir. Örneğin yüksek

oranlarda KK ve YFC kullanımı sonucu KK30-YFC30 numunesinin 56, 90, 120 ve 180 günlük dayanım değerleri sırasıyla 1,91, 2,48, 2,57 ve 2,63 MPa'dır. Yukarıda bahsedilen sonuçlardan da görüleceği üzere proses atıkların (agrega olarak) yerine kullanılan KK'nın dolguların parçacık boyut dağılımını iyileştirerek hidrasyon reaksiyonlarını desteklemesi (yüksek miktarda CaO içermesi nedeniyle) dayanım artışlarının ana nedenidir. Ayrıca ÇMD karışımlarında YFC ve UK'nın KK ile birlikte kullanımı sonucu mineral katkıların tek başına göstermiş oldukları zayıf özellikler (Örn. YFC ve UK'nın kısa vadede dayanıma olumsuz katkısı, tane boyutlarının oldukça küçük olması vb.) ortadan kaldırılarak kısa-uzun dönemde dolguların dayanım özellikleri önemli ölçüde iyileşmiştir. Ek olarak farklı oranlarda YFC, UK ve KK kullanımı ile ÇMD'lerin tane boyutunun daha iyi derecelendirilmiş olduğu ve bu sayede hem daha kompakt bir yapı oluşturdukları hem de birbirleriyle uyum içinde hareket ettikleri için dayanıma olumlu katkıda bulundukları düşünülmektedir.

Şekil 32a 90 günlük kürlenmiş ÇMD numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerini göstermektedir. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerinden dolguda kullanılan KK katkısının ikame oranı arttıkça (%0'dan %30'a), numunelerin gevrekleştiği ve birim şekil değiştirmenin oldukça azaldığı açıkça görülmektedir. En yüksek gerilme değerine (KK30: 2,74 MPa) karşılık birim şekil değiştirme miktarı %0,55 olarak elde edilmiştir. KK içermeyen ÇMD numunelerinin (YFC ve FA içeren) daha sünek bir davranış sergilediği ve düşük gerilme değerlerine sahip olduğu açıktır. KK içeren numunelerin KK içermeyen dolgu numunelerine göre daha iyi sonuç vermesi, karışım içinden tane boyutunun artmasından kaynaklanmaktadır. Dayanıma katkıda bulunan ince atığın nispeten daha kalın KK ile değiştirilmesi, parçacık boyut dağılımını olumlu yönde etkilemiştir. Genel olarak, iyi derecelendirilmiş çimentolu karışımlar, hem daha kompakt bir yapı oluşturdukları hem de birbirleriyle uyumlu hareket ettikleri için dayanıma olumlu katkıda bulunurlar (Behera vd., 2021). Tane boyutu PÇ'ye yakın olmasına rağmen, YFC ve UK içeren dolgu karışımlarının daha sünek olması bu malzemelerin puzolanik özelliklerindeki değişiklikten, yani farklı hidrasyon özelliklerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır (Yan vd., 2020; He vd., 2021). Ancak YFC ve UK içeren sünek ÇMD'lere KK ilave edilmesi hem gerilme değerlerini arttırmış hem de numunelerde meydana gelen deformasyonları azaltarak daha rijit bir yapı oluşumunu desteklemiştir.



Şekil 32. ÇMD'lerin UCS-şekil değiştirme (a) ve elastisite modül (b) grafikleri

Tablo 11. ÇMD’lerin kür süresine göre EM sonuçları

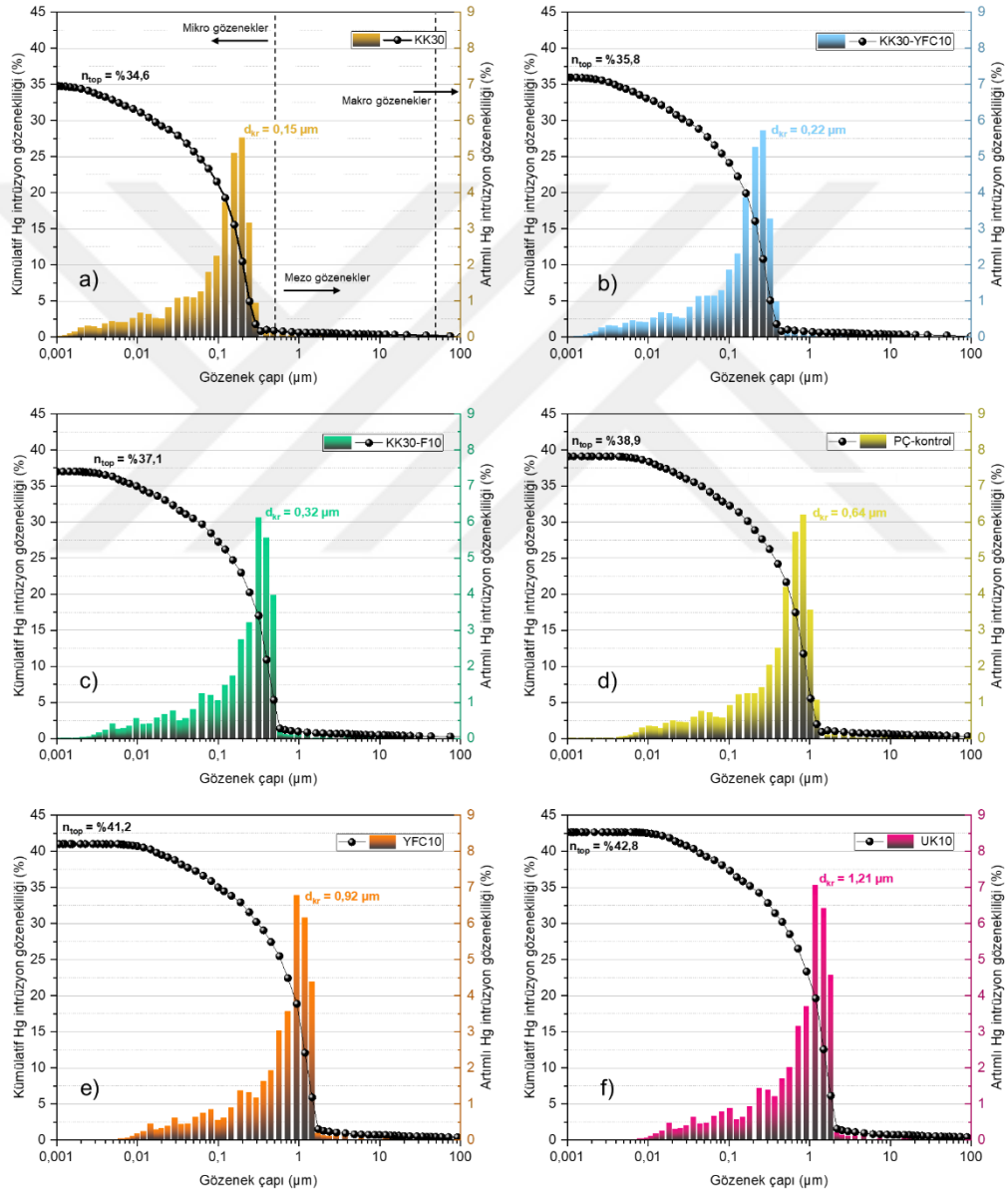
Numune ID	Atık (agrega)		Bağlayıcı			EM (MPa)						
	ikame oranı (%)		ikame oranı (%)			3g	14g	28g	56g	90g	120g	180g
UK30	100	-	70	30	-	0,18	0,25	0,36	0,61	0,75	0,71	0,57
YFC30	-	-	70	-	30	0,20	0,28	0,40	0,68	0,83	0,79	0,63
KK10-UK30	90	10	70	30	-	0,30	0,41	0,69	1,31	1,45	1,21	0,98
UK10	100	-	90	10	-	0,31	0,43	0,62	1,26	1,50	1,31	0,92
YFC10	100	-	90	-	10	0,31	0,44	0,62	1,28	1,52	1,33	0,93
KK10-YFC30	90	10	70	-	30	0,31	0,46	0,85	1,38	1,65	1,59	1,45
KK10-UK10	90	10	90	10	-	0,38	0,47	0,95	1,46	1,77	1,91	1,67
PÇ (kontrol)	100	-	100	-	-	0,44	0,56	1,03	1,55	1,84	2,00	1,83
KK10-YFC10	90	10	90	-	10	0,57	0,69	1,05	1,66	1,95	2,11	1,81
KK10	90	10	100	-	-	0,78	0,96	1,10	1,90	2,68	2,34	1,82
KK30-UK30	70	30	70	30	-	0,90	1,25	1,58	2,08	2,94	2,61	2,42
KK30-UK10	70	30	90	10	-	1,01	1,33	1,81	2,21	3,22	2,96	2,68
KK30-YFC30	70	30	70	-	30	1,22	1,46	1,94	3,06	3,96	3,68	3,55
KK30-YFC10	70	30	90	-	10	1,48	1,71	2,31	3,11	4,33	3,99	3,95
KK30	70	30	100	-	-	1,87	2,37	2,93	5,21	5,77	4,79	4,01

Şekil 32b ve Tablo 11, ÇMD numunelerinin elastisite modüllerinin değişimini göstermektedir. UCS sonuçlarına benzer şekilde en yüksek elastik modül (EM: 5,77 MPa), 90 günlük KK30 numunesinde belirlenmiştir. En düşük EM değerleri ise sırasıyla YFC30 ve UK30 numunelerinde gözlenmiştir. YFC ve UK’ya farklı oranlarda KK eklenmesi ile EM değerleri önemli ölçüde artmıştır. Örneğin 56 günlük YFC30 ve UK30 numunesine kıyasla kırma kireçtaşı ikameli KK30-YFC30 ve KK30-UK30 numunelerinin EM değerleri sırasıyla 2,38 ve 1,47 MPa daha yüksekti. Kür süresi ve karışımdaki KK oranının belirli bir seviyeye kadar yükselmesi dolguların daha kırılğan/gevrek özellik göstermesine neden olsa da uzun kür süreleri (> 90 gün) ve yüksek kireçtaşı içeriği (>%30) ÇMD numunelerinin EM değerlerini olumlu şekilde etkilemiştir.

5.2. ÇMD’lerin Gözenek Dağılımının Değerlendirilmesi

ÇMD’lerin mekanik özellikleri yapısındaki gözeneklerin boyutu, şekli, dağılımı ve hacminden önemli derecede etkilenmektedir. Tez çalışması kapsamında katkıların (kırma kireçtaşı/KK, yüksek fırın cürufu/YFC, uçucu kül/UK) ve kür süresinin (3-180) ÇMD’lerin gözenek yapısının gelişimi üzerindeki etkisi toplam gözeneklilik, mikro gözenekler (0,002 µm'den az), mezo gözenekler (0,002-0,5 µm),

makro gözenekler ($>0,05 \mu\text{m}$) ve kritik gözenek boyutu gibi çeşitli parametreler kullanılarak değerlendirilmiştir. Şekil 33, farklı mineral katkı maddeleri (Kırma kireçtaşı/KK, yüksek fırın cürufu/YFC, uçucu kül/UK) ve optimum dozajlarda (KK: %30, YFC/UK: %10) hazırlanan 90 günlük ÇMD numunelerinin kümülatif/artımlı gözenek dağılımlarını göstermektedir. Şekil 33'ten, genel olarak tüm ÇMD numunelerinin mezo-gözenek sınıfında değerlendirilebileceği görülmektedir.



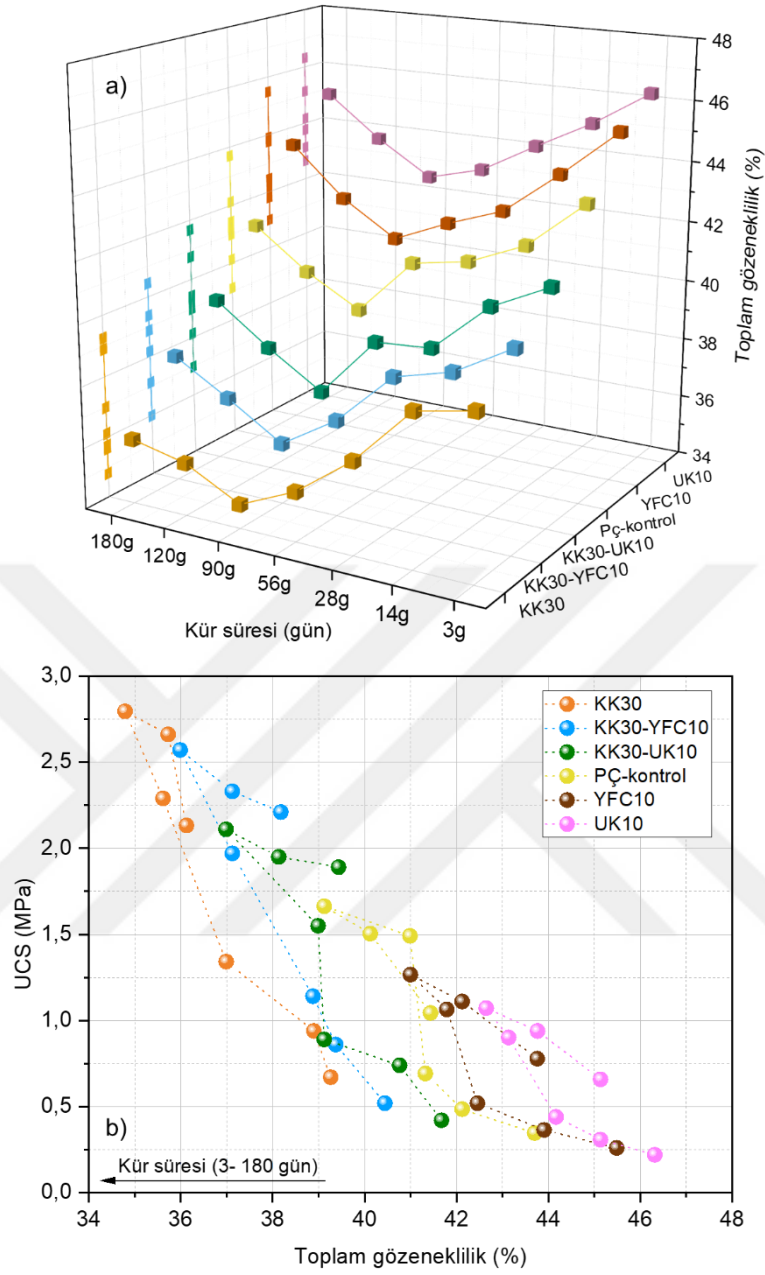
Şekil 33. 90 günlük ÇMD'lerin gözenek dağılımları: KK30 (a); KK30-YFC10 (b); KK30-UK10 (c); PÇ (d); YFC10 (e); ve UK10 (f)

KK, YFC ve UK kullanımının ÇMD gözenek dağılımları üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıktır. Toplam gözeneklilik değerleri incelendiğinde en düşük

gözeneklilik değeri (%34,6) KK30 numunesinde, en yüksek gözeneklilik değeri ise (%42,8) ise UK10 numunesinde görülmektedir. Özellikle, iyi derecelendirilmiş KK, proses atığının tane boyu dağılımını iyileştirerek boşluk oranı önemli ölçüde azalmıştır. Çimentolu karışımlarda tane boyutu ve dağılımı, kimyasal reaksiyonlar ve hidrasyon ürünlerinin gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Önceki çalışmalar, ÇMD içindeki atıkların inceliğinin artması ile gözenekliliğinin olumsuz şekilde etkilendiğini vurgulamaktadır (Ke vd., 2016; Qiu vd., 2020a). Maden atıklarının inceliğinin artması dolgudaki gözenekliliğin makro seviyeye ulaşmasına ve ciddi yapısal problemlere ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Atıkların inceliğinin neden olduğu sorunlar, gözenekliliği önemli ölçüde azaltacak kireçtaşı gibi iri taneli katkıların kullanılması ile çözülebilir (Li vd., 2020b; Shi vd., 2021).

Şekil 33'ten KK30, KK30-YFC10 ve KK30-UK10 numunelerinin mikro gözenek sınıfına oldukça yaklaştığı, hatta KK30 numunesinin tam sınırdaki olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca PÇ'ye (kontrol numunesi) kıyasla KK ile YFC ve UK katkılarının birlikte kullanımı sonucu oldukça yüksek verim elde edilmiştir. YFC ve UK'nın KK ile kullanımı sonucu ÇMD'lerin ince gözeneklerinin bile çimento hidrasyon ürünleriyle dolmasına neden olarak daha kompakt bir yapı oluşumunu desteklemiştir. Ancak uzun vadede (90) çimentoya ikamesi olarak sadece YFC ve UK katkılarının kullanımı sonucu gözeneklilik önemli derecede artmıştır. Bu durum YFC ve UK'nın çimentoya kıyasla düşük reaktivitesi ve karışımdaki kullanım miktarından kaynaklanmaktadır. Bu durum ÇMD gözeneklerinin çimento hidrasyon ürünleri ile dolmamasına ve gözeneklilik oranını diğer numunelere kıyasla yüksek olmasına neden olmuştur.

Kritik gözenek boyutu (d_{kr}), ÇMD'lerin gözenek yapılarının değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer önemli faktördür. *Şekil 33*'te farklı numunelerin kümülatif/artımlı gözenek dağılımlarına ek olarak d_{kr} değerlerini göstermektedir. d_{kr} değeri artımlı MIP (cıva porozimetresi) grafiğinin tepe noktasına denk gelen gözenek çapını temsil eder (Chen vd., 2021a). Bu parametre, dolgu numunelerinin tanecikleri arasındaki ilişkinin anlaşılması ve geçirgenliğinin değerlendirilmesi için önemli olan maksimum gözenek çapını ifade eder (Jiang vd., 2022).



Şekil 34. ÇMD'lerin toplam gözenekliliğinde meydana gelen değişimler: toplam gözeneklilik-kür süresi ilişkisi (a); ve toplam gözeneklilik-UCS ilişkisi (b)

Şekil 33'ten, kritik gözenek çapı değerlerinin KK kullanımı ile önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. d_{kr} değerleri KK30, KK30-YFC10 ve KK30-UK10 numunelerinde sırasıyla 0,15, 0,22 ve 0,32 μm olarak belirlenirken, PÇ-kontrol, YFC10 ve UK10 numunelerinde 0,64, 0,92 ve 1,21 μm olarak belirlenmiştir. Şekil 33e ve Şekil 33f incelendiğinde çimento ikamesi olarak kullanılan YFC ve UK katkılarının ÇMD'lerin gözenekliliğini ve d_{kr} değerlerini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Bu katkıların kullanımı sonucunda çimento dozajındaki azalma ve su/çimento oranındaki

artış, toplam gözenekliliğin azalmasının ana nedenlerinden biri olarak düşünülebilir (Zhou vd., 2022). Ayrıca hem su içeriği hem de hidrasyon ürünleri gözeneklilik dağılımından doğrudan etkilenmektedir (Zhang vd., 2022). PÇ, YFC10 ve UK10 ile karşılaştırıldığında, 90 günlük kürlenmiş KK30, KK30-YFC10 ve KK30-UK10 dolgu örneklerinde oluşan hidrasyon ürünleri (örn. CSH-Ca(OH)₂) taneler arasındaki boşlukları tamamen doldurarak kompakt bir yapı oluşumunu desteklemiş ve gözenek miktarını belirgin bir şekilde azaltmıştır. Bu olgu, *Şekil 31*'de verilen UCS sonuçları ve *Şekil 39-40*'da verilen SEM görüntüleri ile desteklenmektedir. YFC ve UK'nın tek başını kullanımı ÇMD'lerin gözenekliliği üzerinde belirgin bir etki göstermese de uzun kür sürelerinde (90 gün) ÇMD karışımlarında KK ile birlikte YFC ve UK kullanımı belirgin şekilde gözenekliliği azaltarak dolguların performansını önemli derecede arttırmıştır.

Şekil 34a tüm numunelerin kür süresine bağlı olarak tüm numunelerinin toplam gözenekliliğindeki değişimleri göstermektedir. Ayrıca *Şekil 34b* toplam gözenekliliğin ÇMD numunelerinin dayanımı üzerindeki etkisini ifade etmektedir. *Şekil 34a*'dan PÇ (kontrol), YFC10 ve UK10 numunelerinin tüm kürlenme süresi (3-180 gün) boyunca toplam porozitelerinin (%38,9-42,8) KK30, KK30-YFC10 ve KK30-UK10 numunelerinin toplam porozitelerine (%34,6-37,1) kıyasla oldukça düşük olduğu çıkarılabilir. *Şekil 34b*'de görüleceği üzere toplam gözenekliliğinin azalması tüm ÇMD numunelerinin dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır.

Önceki çalışmalar, atıklarda düşük puzolanik katkılar ve/veya yüksek sülfat içeriği nedeniyle dolgu ortamında şişme özelliğine sahip ikincil jips oluşumunun arttığını göstermiştir (Chen vd., 2019a; Tang vd., 2021). Bunun sonucu olarak, sülfat ataklarının özellikle uzun vadede dolguların yapısal bütünlüğünü bozduğu ve gözenekliliği önemli ölçüde artırdığı vurgulanmaktadır (Wang vd., 2020a). Ayrıca, piritik atıkların yüksek ince partikül boyutuna bağlı olarak partiküller arasındaki temas yüzeyinin artmasının, daha uzun yaşlarda dolgunun asit direncini azalttığı ve daha gözenekli bir yapıya neden olduğu yorumu da yapılabilir (Qiu v.d, 2020). Buna karşılık, birçok çalışma, dolgulardaki puzolanik madde içeriğindeki artışın ve/veya bazik maddelerin (örn. KK) kullanımının, gözenek çözeltisini tamponlayan OH⁻ (hidroksit) iyonlarını serbest bırakarak yüksek alkali koşulların oluşumunu desteklediğini göstermektedir (Hamberg vd., 201; Yang vd., 2020). OH⁻ salınımı

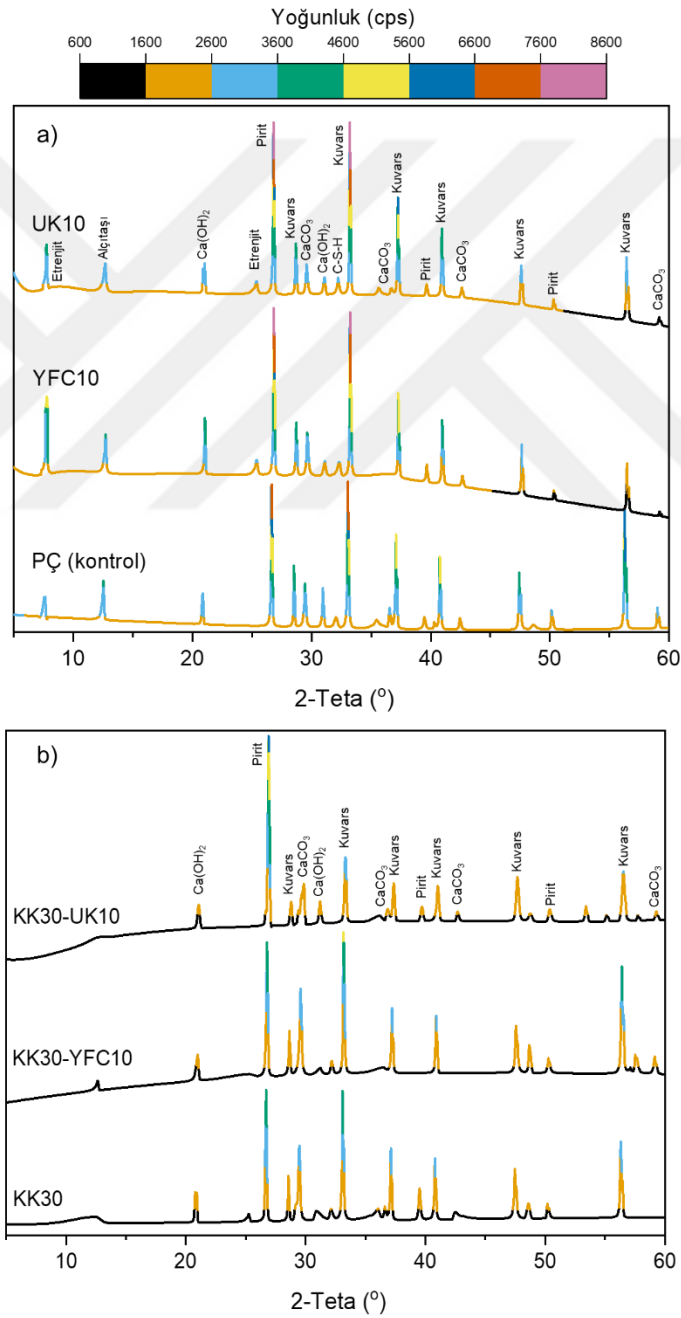
birincil C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) oluşumunu artırır ve dolguların porozitesini azaltır (Yue, 2021). Bir çalışmada, alkali dolgu ortamının portlandit oluşumunu arttırdığı ve puzolanik malzemelerle reaksiyona girerek ilave C-S-H ürettiği belirtilmektedir (Guo vd., 2021). Reaksiyonların bir sonucu olarak, gözeneklilik-geçirgenlik azalarak daha yoğun bir yapı oluşumunu desteklemekte ve dolgunun mikro yapısının iyileştirmektedir (Chen vd., 2022a).

5.3. ÇMD'lerin XRD Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında ÇMD'lerin hidrasyon ürünleri ve bu ürünlerin kristal fazları üzerindeki etkisini incelemek için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Hidrasyon ürünlerinin kristal fazları ÇMD'lerin mekanik/mikroyapısal özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. ÇMD'lerin hidrasyon ürünleri ve mineralojik yapısı, atık ikamesi olarak KK (kıırma kireçtaşı) ve çimento ikamesi olarak YFC (yüksek fırın cürufu) ve UK (uçucu kül) kullanılarak değerlendirilmiştir. Mineral bileşimlerinin araştırılması amacıyla 90 gün kürlenmiş ve optimum katkı oranlarında (KK: %30, YFC/UK: %10) hazırlanmış ÇMD'lerin XRD sonuçları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır (Şekil 35). ÇMD'lerin XRD sonuçları incelendiğinde ağırlıklı olarak FeS₂ (pirit) ve SiO₂ (silisyum oksit-kuvars) fazları (proses atıklarından kaynaklı) ile çimento hidrasyon malzemelerine (etrenjit, portlandit, alçıtaşı, CSH) rastlanmıştır. Ayrıca, dolgularda kullanılan mineral katkıların (KK, YFC ve UK) içerdiği yüksek SiO₂ ve CaO nedeniyle hidrasyon ürünlerine katkısı açıkça görülmektedir.

Genel olarak, tüm numunelerdeki yüksek yoğunluklu bileşenlerin kuvars (~8400 CPS) ve pirit (~8200 CPS) olduğu belirlenmiştir. FeS₂ ve SiO₂ yoğunlukları PÇ (kontrol), YFC10 ve UK10 numunelerinde, KK30, KK30-YFC10 ve KK30-UK10 numunelerine kıyasla daha yüksek bulunmuştur. PÇ (kontrol), YFC10 ve UK10 numunelerinin hidrasyon ürünlerinin diğer numunelere kıyasla daha düşük olduğu açık bir şekilde anlaşılmakla beraber Şekil 35a'daki XRD sonuçları bunu doğrulamaktadır (Aldhafeeri ve Fall, 2016). Bu olgu, uzun vadede piritik atıkların neden olduğu sülfidik ortam nedeniyle hidrasyon ürünlerinin bozulması ile açıklanabilir. Asidik (sülfidik) ortamın bir sonucu olarak oluşan sülfat iyonlarının varlığı, C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) ve Ca(OH)₂ (kalsiyum hidroksit) reaksiyonlarına ek olarak genellikle etrenjit oluşumlarını tetikleyerek ÇMD numunelerinde genleşme, çatlama, bozulma ve

parçalanma gibi durumlara neden olur (Li ve Fall, 2018; Helson vd., 2018; Liv d., 2019). Ayrıca asidik ortam C-S-H'nin sertliğini kaybetmesine ve çimento hamurunun bozulmasına neden olarak ÇMD'lerde önemli dayanım düşüşlerine yol açmaktadır (Yılmaz vd., 2020). Ek olarak, asidik ortam nedeniyle ÇMD'lerdeki bozulmalar çatlak oluşumuna neden olarak dolguların oksijenle temasını arttırmakta ve hidrasyon ürünlerinin reaktivitesini hızlandırmaktadır. Benzer sonuçlar önceki çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Kou vd., 2020; Chen vd., 2021b).



Şekil 35. KK içeren (a) ve KK içermeyen (b) ÇMD'lere ait XRD sonuçları

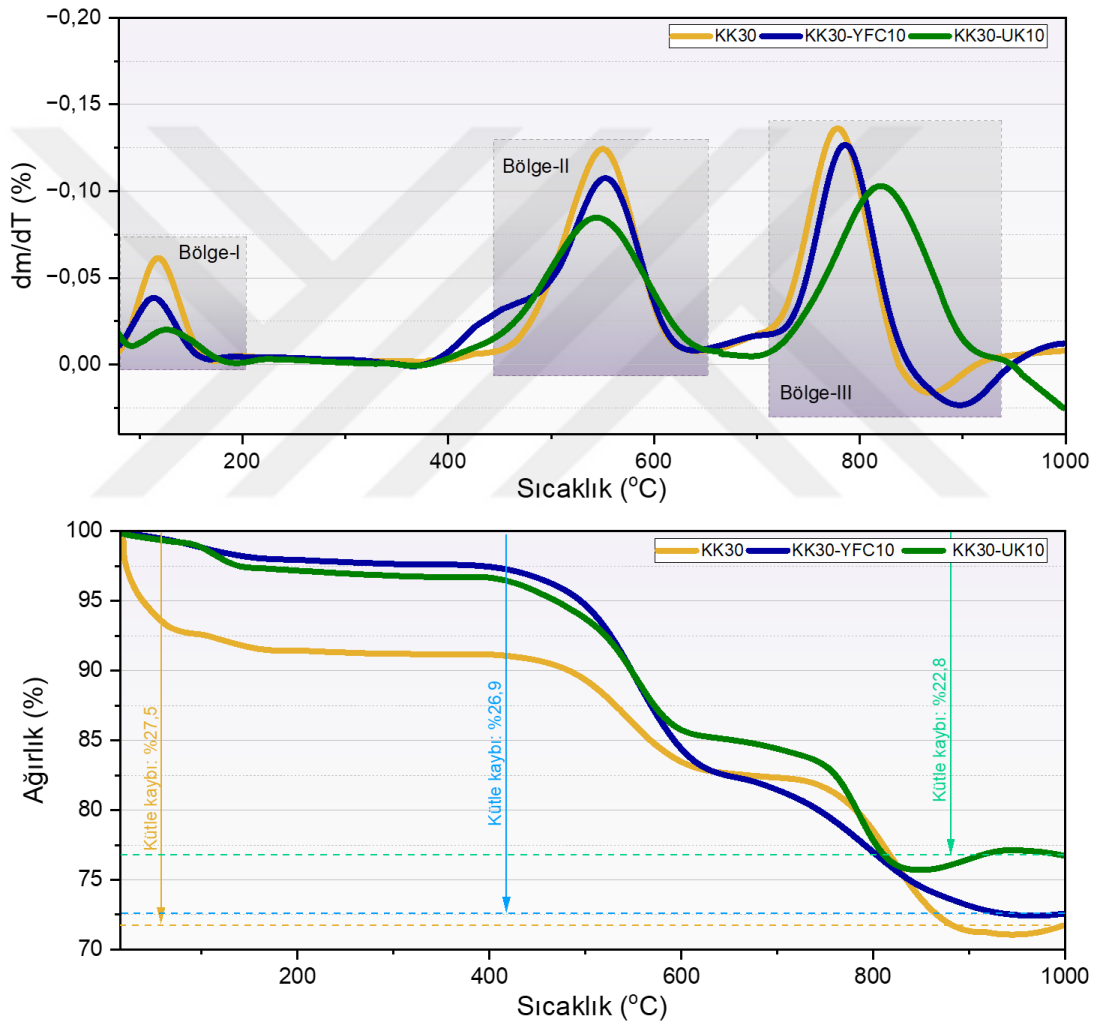
Öte yandan özellikle uzun dönemde YFC ve UK katkılarının KK ile kullanımı sonucu ÇMD numunelerinde dayanımı katkı sağlayan hidrasyon ürünlerinin daha yoğun olduğu görülmektedir (*Şekil 35b*). Yüksek CaO (kalsiyum oksit) içeriğine sahip mineral katkıların (örn. KK ve YFC) kullanılması, özellikle uzun vadede (90 gün) ÇMD'lerin hidrasyon ortamının bazikliğini artırmakta ve piritik atıkların neden olduğu olumsuz ortam koşullarını ortadan önemli derecede azaltmaktadır. Bu da doğrudan etrenjit ve alçıtaşı gibi genleşen ürünlerin neden olduğu yapısal hasarı sınırlandırmaktadır. Ayrıca karışımlarda kullanılan katkı maddelerinin (özellikle KK ve YFC) içerdiği fazla CaO'nun, ÇMD'lerin dayanım kazanması için son derece önemli bir ürün olan C-S-H oluşumunu hızlandırdığı ve miktarını arttırdığı söylenebilir (Li vd., 2021a). Çalışmada kullanılan kireçtaşının ve mineral katkılarının etkinliği XRD modellerinde görülmekle birlikte UCS (*Şekil 31*), TG/DTG (*Şekil 36*) ve SEM (*Şekil 38-40*) sonuçları ile de desteklenmektedir.

5.4. ÇMD'lerin TG/DTG Sonuçlarının Değerlendirilmesi

ÇMD karışımlarında kullanılan katkı maddelerinin puzolanik reaktivitesi, hidrasyon kinetiği ve numunelerin yapısal özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Termogravimetri/diferansiyel termogravimetri (TG/DTG) analizi, puzolanik aktivite sonucu oluşan ürünleri belirlemek için sıklıkla kullanılmaktadır. TG, ÇMD numunelerindeki kütle kayıplarını sıcaklığa göre değişimini, DTG ise numune bileşenlerinin belirli bir sıcaklık altında bozulmasını göstermektedir. Bu tez çalışmasında, farklı mineral katkı maddeleri (Kırma kireçtaşı/KK, yüksek fırın cürufu/YFC, uçucu kül/UK) ve optimum dozajlarda (KK: %30, YFC/UK: %10) hazırlanan 90 günlük ÇMD numunelerdeki hidrasyon ürünlerindeki farklılıklar TG/DTG analizleri ile iyi bir şekilde ifade edilmiştir.

Şekil 36, optimum ikame oranlarında 90 gün kürlenmiş ÇMD'lerin TG/DTG grafiklerini göstermektedir. Tüm TG/DTG grafikleri için üç farklı sıcaklık aralığında (Bölge-I, Bölge II ve Bölge III) önemli endotermik pik ve ağırlık kaybı gözlenmiştir (Liu vd., 2020c; Xu vd., 2020c). 20-200 °C'de (Bölge-I) meydana gelen ilk endotermik pik ve ağırlık kaybı serbest suyun buharlaşması, C-S-H'nin (kalsiyum-silikat-hidrat) dehidrasyonu ve etrenjit oluşumu ile ilişkilidir. Bu, önceki çalışmalarda ÇMD'ler için bildirilen TG/DTG sonuçlarıyla tutarlıdır (Koohestani vd., 2018a; Liang vd., 2022).

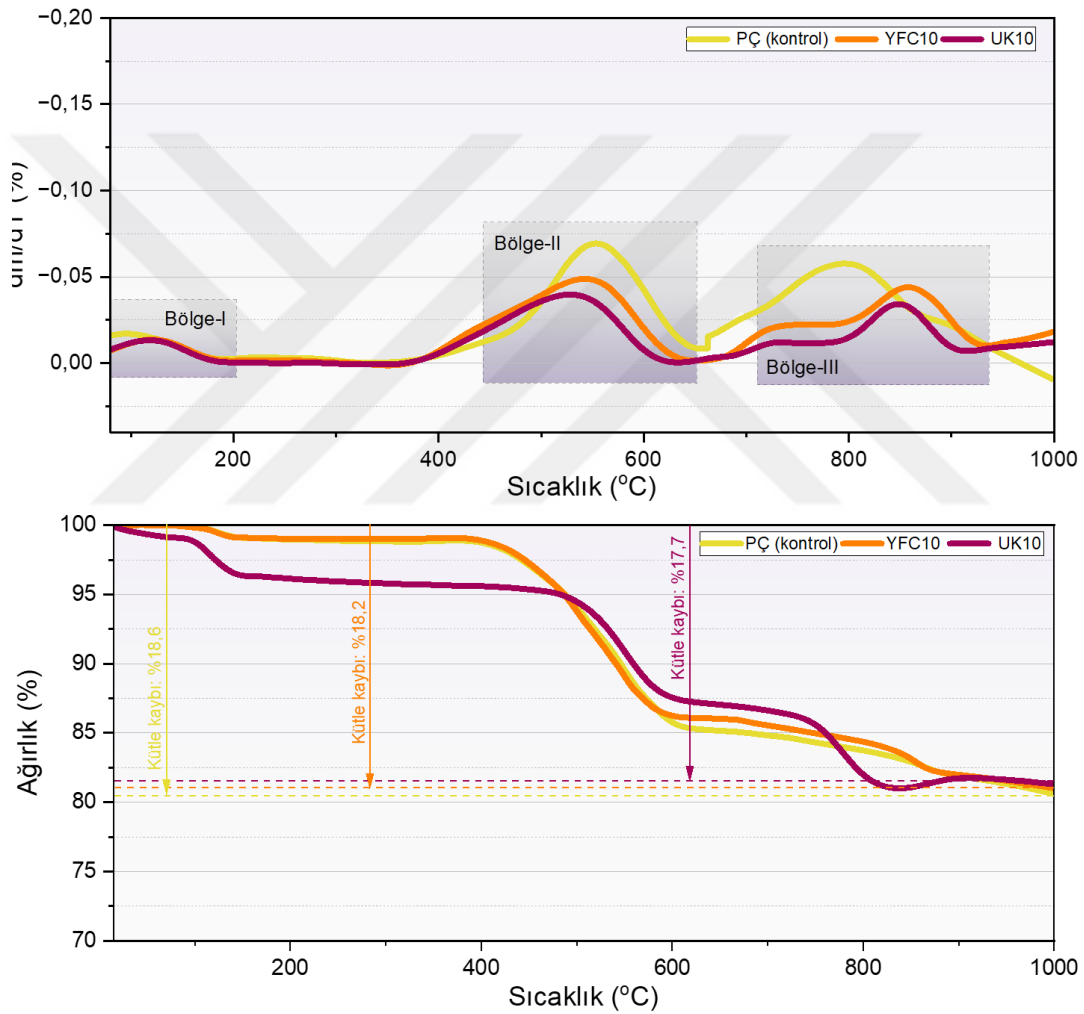
Bölge-I’de meydana gelen en yüksek pik değerleri sırasıyla KK30, KK30-YFC30 ve KK30-UK10 numunelerinde gözlenirken, diğer numunelerde (PÇ kontrol, YFC10 ve UK10) önemli bir pik değeri oluşmamıştır. En yüksek kütle kayıpları KK30, KK30-YFC30 ve KK30-UK10 numunelerinde sırasıyla %27,5, %26,9 ve %22,8 olarak bulunmuştur. Bu durum kullanılan katkı maddelerinin özellikle de KK mineral katkısının, bağlayıcıların hidrasyonunu hızlandırması ve yüksek miktarda C-S-H oluşumuna neden olmasıyla açıklanabilir.



Şekil 36. KK içeren ÇMD numunelerin TG/DTG grafikleri

Ayrıca dayanım sonuçlarıyla (Şekil 31) uyumlu olarak uzun vadede (90 gün) YFC'nin KK ile kullanımı ÇMD'lerde önemli yapısal iyileşmelere neden olduğu TG/DTG sonuçlarıyla desteklenmektedir. Kontrol numunesi (PÇ) ile karşılaştırıldığında, UK ile kireçtaşı ikamesinin ÇMD üzerinde kısmi iyileşmeye

neden olduğu ancak YFC gibi fayda sağlamadığı görülmektedir. Bu durum uçucu külün düşük reaktivitesi ve az miktarda hidratasyon ürünü oluşturması ile ifade edilebilir (Aldhafeeri vd., 2016). 90 günlük kür süresinin ardından KK içeren ÇMD’lerde etrenjit oluşumu XRD/SEM gözlemleriyle uyumlu olarak oldukça düşüktü. Bu durum KK30, KK30-YFC30 ve KK30-UK10 numunelerindeki düşük etrenjitin varlığı, oluşan piklerin temel nedeninin C-S-H jellerinde meydana gelen ayrışmalardan kaynaklandığı ispatlamaktadır.



Şekil 37. KK içermeyen ÇMD numunelerinin TG/DTG grafikleri

PÇ, YFC10 ve UK10 numunelerindeki pikler doğrudan etrenjit dehidrasyonu ile ilgilidir. Özellikle daha uzun kürlenme sürelerinde, fazla etrenjit matris içinde büyür, genişler ve mikro çatlaklara neden olur. Bu durum, numunelerin dayanımında düşüşlerin ve yapısal bozulmaların ana nedenlerindendir (Chen vd., 2019; Liu vd., 2020c). 440-640 °C'deki (Bölge-II) endotermik pik ve ağırlık kaybı genellikle

Ca(OH)₂'nin (portlandit) dehidrasyonu sonucu meydana gelir (Xiu vd., 2021). Ca(OH)₂'nin dehidrasyonu diğer numunelere kıyasla KK30, KK30-YFC30 ve KK30-UK10 numunelerinde daha yüksek olarak bulunmuştur. Ca(OH)₂ miktarı hidrasyon reaksiyonunun derecesini tahmin etmek için kullanılabilir (Chen vd., 2022b). Bu, ÇMD'lerde birlikte kullanılan KK, YFC ve UK mineral katkılarının hidrasyon reaksiyonunu hızlandırdığını doğrulamaktadır. Öte yandan yalnızca çimento ikamesi olarak kullanılan YFC ve UK katkıları ile üretilmiş ÇMD'lerde meydana gelen düşük Ca(OH)₂ dehidrasyonu hidrasyon ortamının önemli derecede bozulduğu kanıtlanmaktadır (*Şekil 37*).

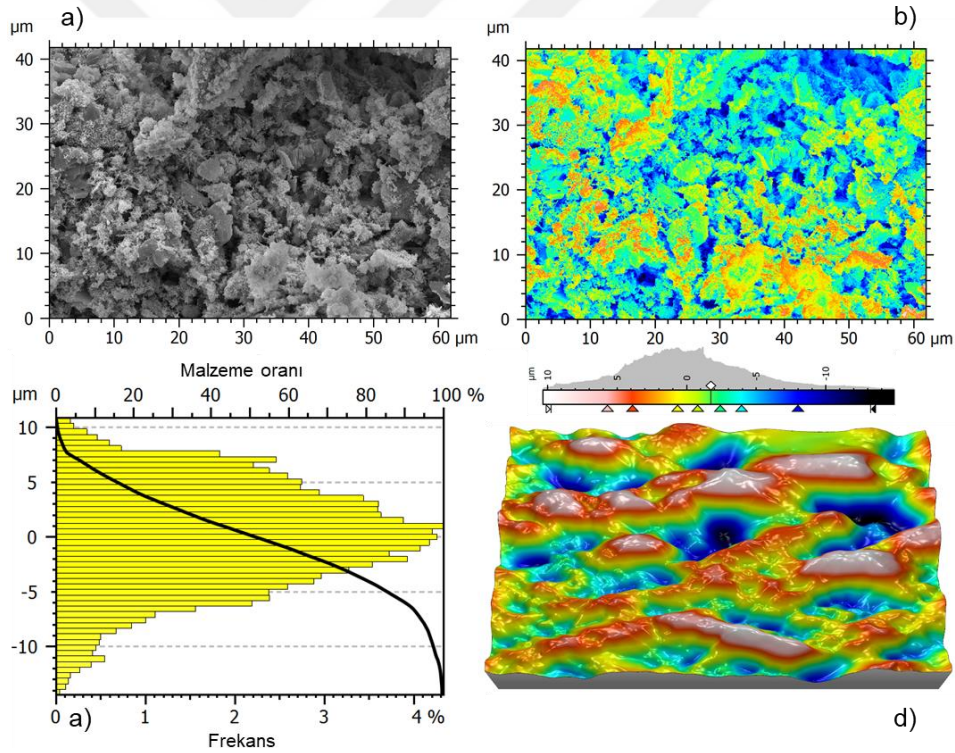
710-920 °C'deki (Bölge-III) ağırlık kaybı ve endotermik pik CaCO₃'ün (kalsiyum karbonat/kalsit) ayrışması/bozulması ile ortaya çıkar (Mobasher vd., 2014). Kalsit miktarı KK ve YFC'nin yüksek CaO (kalsiyum oksit) içeriği ile orantılıdır. Kalsit miktarının fazla olması ÇMD'lerde dayanıma katkı sağlayan bir parametre olarak düşünülebilir. Buna ek olarak, kalsit miktarının fazlalığı ÇMD numunelerinin uzun vadeli asidik ortamının iyileşmesine yardımcı olabilir. Çünkü CaO, kalsitin kalsinasyonu sonucu oluşur ve çimentonun ana bileşenlerindeki (silikatlar ve alüminatlar) en önemli oksitlerden biridir (Kaddah vd., 2022). KK30, KK30-YFC30 ve KK30-UK10 numuneleri ile karşılaştırıldığında, düşük kalsit içeriğine sahip YFC10 ve UK10 numunelerinde asitleşmeye bağlı korozyon oluşumu ve dayanım azalması açıkça görülmektedir. Ayrıca, uzun kür süresinde YFC ve UK katkılı dolguların iç yapısında önemli bozulmaların olduğu ve hidrasyon ürünlerin zarar gördüğü SEM mikrografları ile de desteklenmektedir (*Şekil 42-43*).

5.5. ÇMD'lerin SEM Mikrograflarının Değerlendirilmesi

Çimentolu malzemelerin yüzey morfolojisinin incelenmesi amacıyla görüntü işleme teknolojisinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Solaymani vd., 2018; Fattahi vd., 2020). Bu teknoloji sayesinde SEM mikrograflarından malzeme yüzeylerinin panoramik görüntülerini yüksek çözünürlükte ve kalitede elde etmek mümkündür (Ṫalu vd., 2019). Birçok çalışma, SEM mikrograflarından elde edilen topografik haritalar ile malzeme morfolojik özellikleri arasında güçlü bir korelasyon olduğunu vurgulamaktadır (Romaguera-Barcelay vd., 2021). Ayrıca, topografik haritalar fraktal veya multifraktal parametrelerin değerlendirilmesini mümkün

kılmaktadır (Das vd., 2021). Bu kapsamda görüntü işleme teknolojisi çimentolu macun dolguların (ÇMD) kalite ve performansının değerlendirilmesi için pratik çözümler sunabilir.

Bu tez çalışmasında, ÇMD numunelerinin yapısal değişimleri SEM mikrografları ve görüntü işleme teknolojisi kullanılarak incelenmiştir. SEM mikrografları/görüntüleri sayesinde, ÇMD numunelerindeki hidrasyon ürünlerinin ve yüzey morfolojisinin (örn. boşluk/çatlak ve gradasyon) değerlendirilmesi mümkündür. Hidratasyon reaksiyonları sonucunda ÇMD’lerde genellikle etrenjit, C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jelleri ve porlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) oluşumları gözlenmektedir. SEM görüntülerinde etrenjit ince, iğne benzeri ve iç içe geçmiş şekilde; C-S-H dal, lifli, küresel veya ağ şeklinde (özellikle etrenjit ile karıştırılır); $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandit) altıgen plaka şeklinde düzensiz bir yapıya sahiptir (Li vd., 2021b).

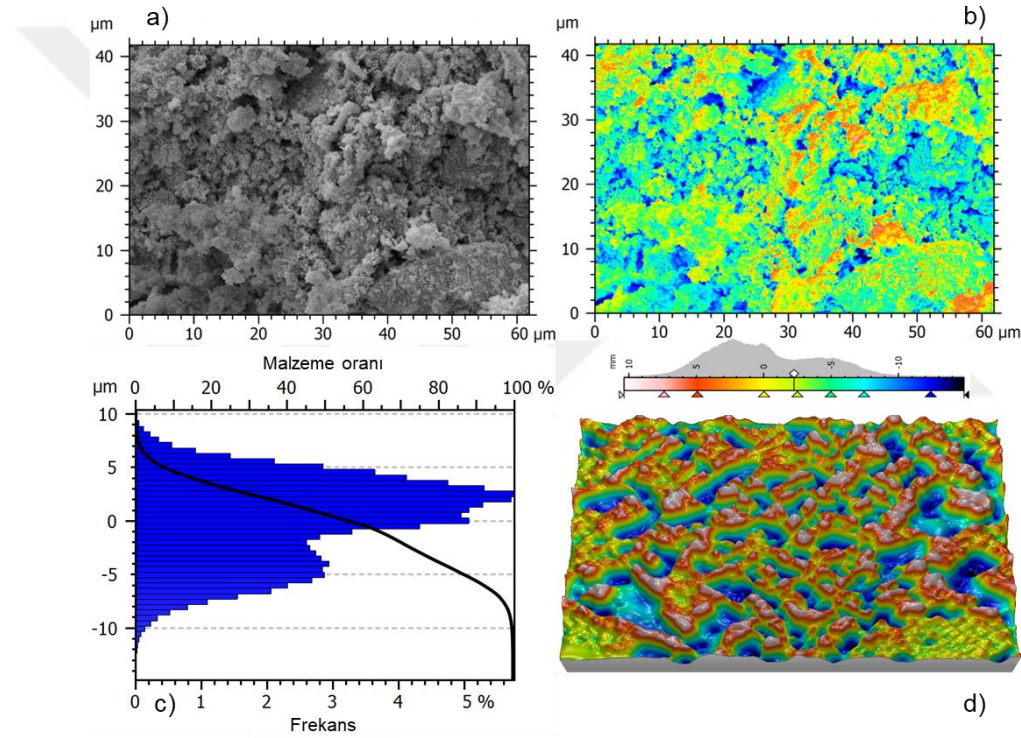


Şekil 38. 90 günlük KK30'un yüzey morfolojisi

Şekil 38-43, 90 gün kürlenmiş KK30, KK30-YFC10, KK30-UK10, PÇ (kontrol), YFC10 ve UK numunelerinin SEM mikrograflarına dayanan yüzey morfolojisinin ayrıntılı sonuçlarını göstermektedir. Şekil 38-43 (a) ÇMD numunelerinin $\times 2000$ büyütme altındaki SEM mikrograflarını göstermektedir. Şekil 38-43 (b ve d) SEM görüntülerinden elde edilen 2D ve 3D topografik görüntüler

yardımıyla ÇMD numunelerinin yüzey derinliğini sunmaktadır. Şekil 38-43 (c) görüntü işleme ile elde edilen topografik haritalar yardımıyla ÇMD numunelerinin tane boyutu/oranı dağılımının histogramını göstermektedir.

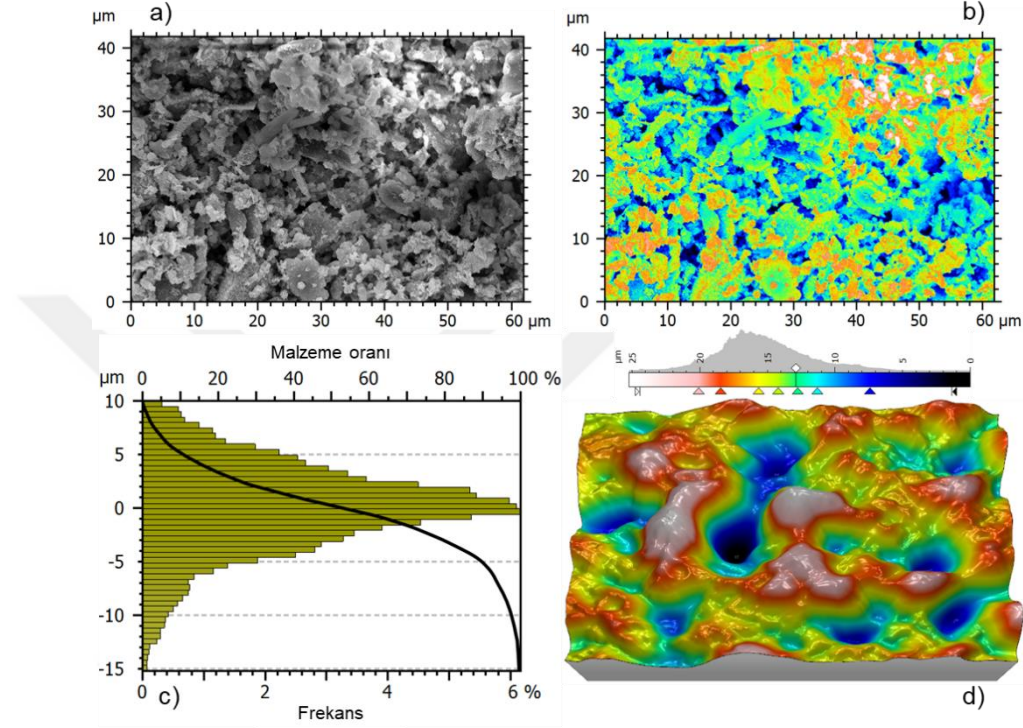
Numunelerin SEM mikrografları incelendiğinde, yoğun C-S-H oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca portlandit oluşumu ihmal edilebilir düzeydedir. Puzolanik reaksiyonlar nedeniyle özellikle uzun sürelerde portlandit mineralinin tüketilerek çimentolaşma formuna sahip C-S-H formasyonlarının oluşumunu desteklediği düşünülmektedir (Koohestani vd., 2021; Wang vd., 2021a). Ayrıca, SEM yardımıyla incelenen bölgelerde etrenjit varlığına rastlanmamıştır.



Şekil 39. 90 günlük KK30-YFC10'nun yüzey morfolojisi

Şekil 38-40 incelendiğinde ÇMD karışımlarına KK eklenmesinin hem karışımdaki tane boyu dağılımının iyileşmesine hem de C-S-H gibi ilave hidrasyon ürünlerinin oluşmasına katkı sağladığı söylenebilir. Ayrıca, atık yerine KK kullanılması kürlenme süresi boyunca oluşabilecek boşlukları (gözenekleri) ve çatlakları önemli ölçüde azaltmıştır. Bunun nedeni kireçtaşının atıkların inceliğinden kaynaklı sorunlara azaltarak daha kompakt bir yapı oluşumunu desteklediği şeklinde ifade edilebilir (Cao v.d, 2019). KK ve YFC'nin yüksek CaO (kalsiyum oksit) içeriği hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırarak uzun vadede daha kompakt bir yapı

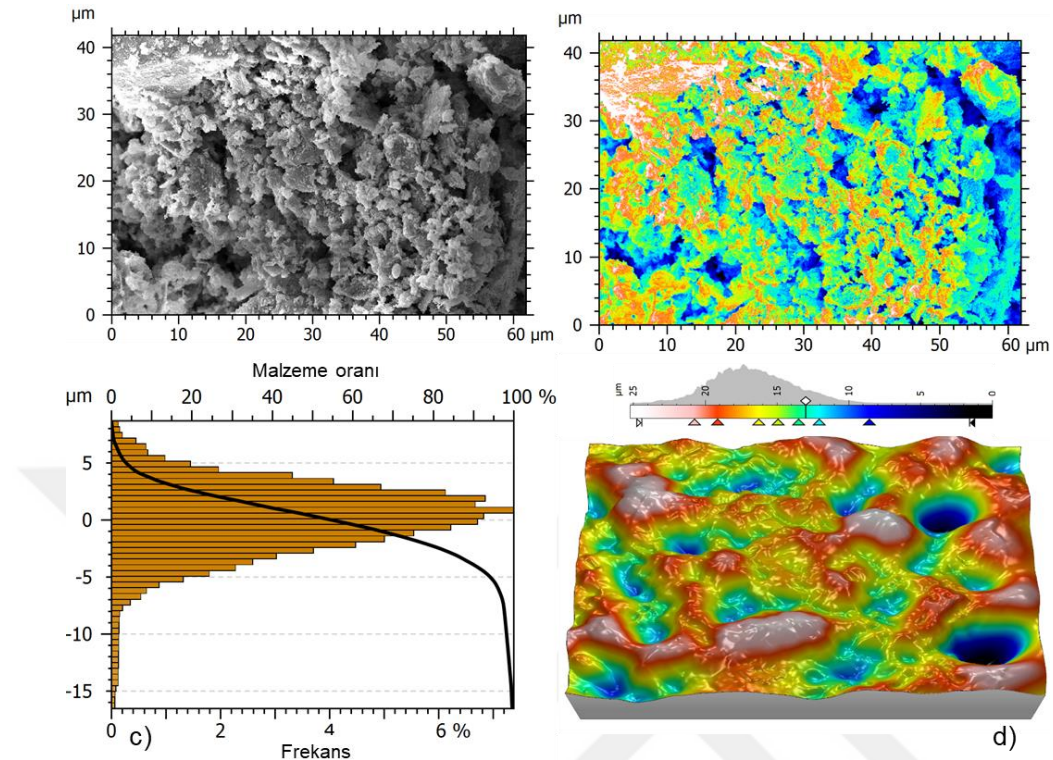
oluşmasını desteklemektedir (Xin v.d, 20229). Bunun yanı sıra YFC ve UK çimentolu karışımlar içerisinde portlandit (CaOH_2) ile reaksiyona girerek puzolanik özellik kazandığından, bu katkılar yüksek oranda CaO içeren KK'lı ÇMD'ler ile daha fazla puzolanik özellik kazanabilir (Yang vd., 2021).



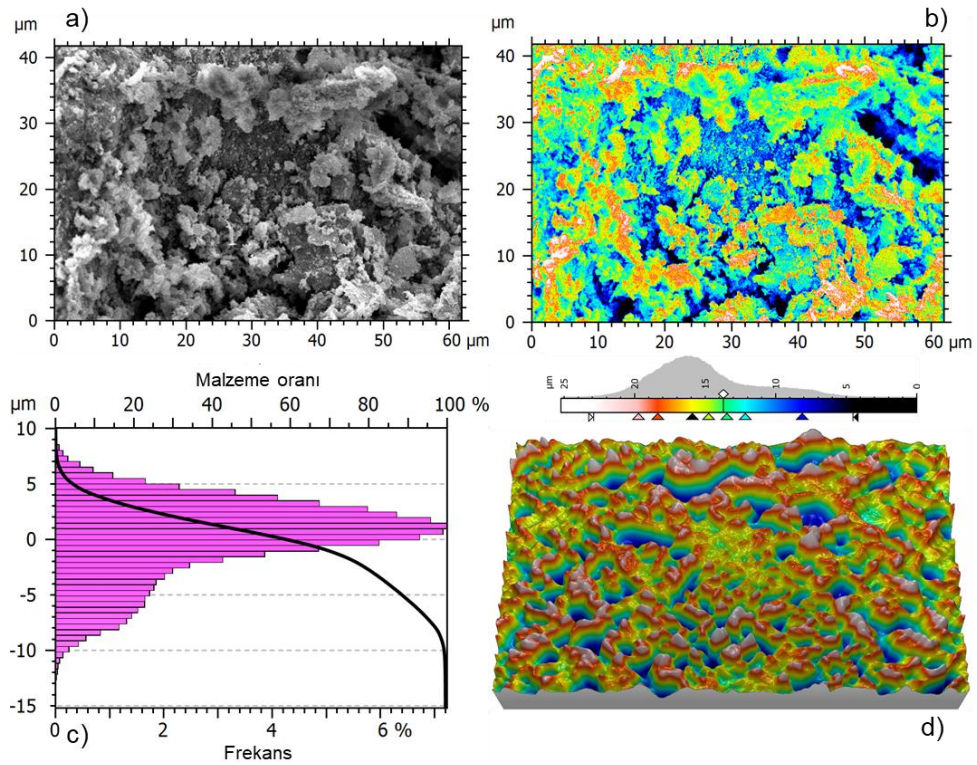
Şekil 40. 90 günlük KK30-UK10'nun yüzey morfolojisi

Nitekim Şekil 42 ve Şekil 43'ten açık şekilde görüleceği üzere KK içermeyen dolgu numunelerinde YFC veya UK kullanımı sonucu yeterli hidrasyon ürünün oluşmadığı görülmektedir. Ayrıca karışımdaki malzemelerin yüzeylerinin hidrasyon ürünleri kaplanmadığı, dolgu yüzeyindeki çatlakların ve boşlukların KK içeren numunelere kıyasla boyut olarak daha büyük görülmektedir. Boşluklu ve gevşek mikroyapıya sahip ÇMD'lerin nem ve hava girişine maruz kalması kaçınılmazdır. ÇMD numunelerinin neme ve havaya maruz kalması piritin oksidasyonunu kolaylaştırarak dolgunun sülfat saldırılarına karşı savunmasını önemli ölçüde azaltmaktadır (Jiang vd., 2017; Zhang vd., 2023b). Bu durum çalışmadaki daha önceki sonuçlarla (örn. UCS, MIP ve UPV) tutarlı olarak, KK içermeyen numunelerin kireçtaşı bazlı numunelere kıyasla daha kötü performans göstermesine bağlanabilir. Ayrıca incelenen tüm ÇMD numunelerine ait SEM mikrograflarının sıkı veya gevşek

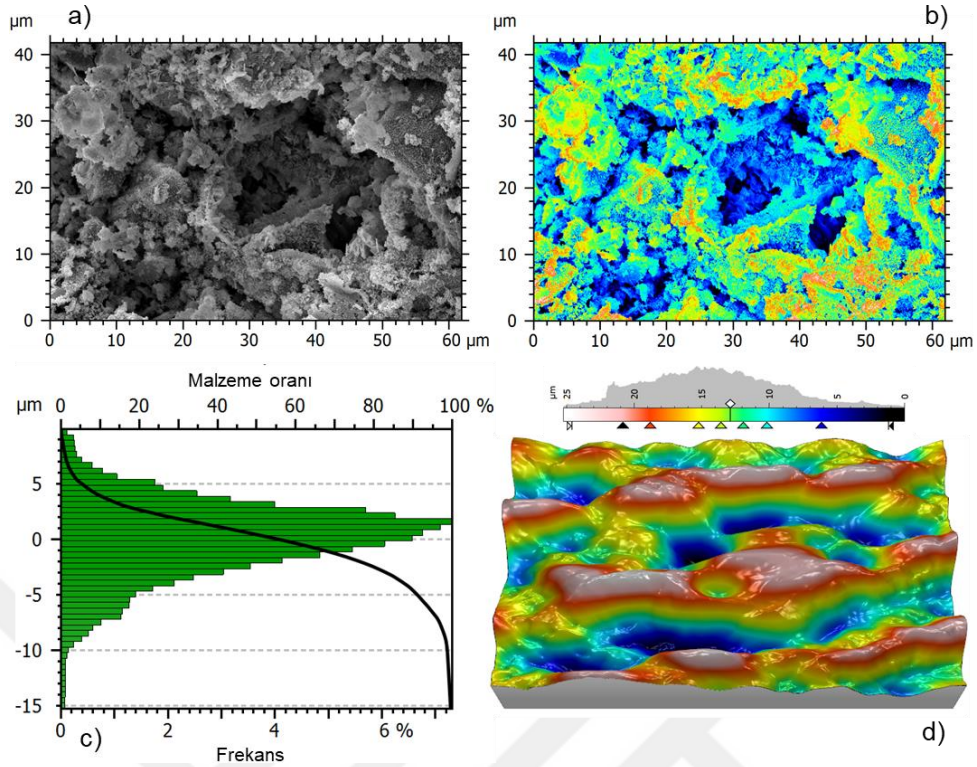
matris görüntüleri dikkate alındığında elde edilen sonuçların tüm testler ile uyumlu olduğu rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 41. 90 günlük PÇ'nin (kontrol) yüzey morfolojisi



Şekil 42. 90 günlük YFC10'nun yüzey morfolojisi

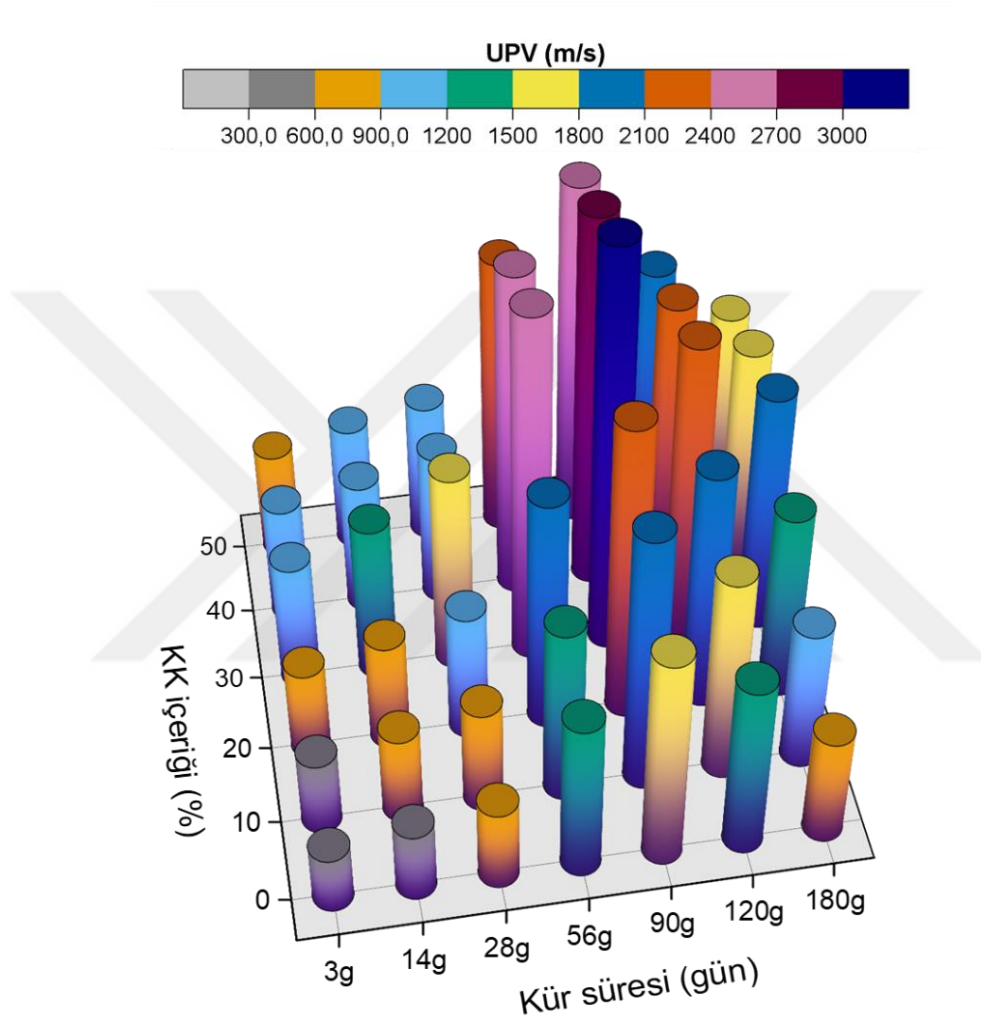


Şekil 43. 90 günlük UK10'nun yüzey morfolojisi

5.6. ÇMD'lerin UPV Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 44-46 ve Tablo 12, kür süresi ve mineral katkılarının tipine/oranına bağlı olarak ÇMD numunelerinin ultrasonik ses dalgası yayılma hızındaki (UPV) değişimleri göstermektedir. Şekil 44, atık ikamesi olarak farklı oranlarda (kütlece %10, %20, %30, %40 ve %50) KK (kırmı kireçtaşı) içeren ÇMD'lerin UPV değerlerini göstermektedir. Bu değerlere dayanarak, UPV'nin ince agregaların (proses atıkları) yerini KK'nın almasıyla belirgin bir şekilde arttığı söylenebilir. En büyük artış oranları, basınç dayanımında olduğu gibi kürlenmenin ilk 90 gününde meydana gelmiştir. ÇMD numunelerine kütlece %30 oranında eklenen KK (KK30) UPV değerlerini artırmada en büyük etkiye sahip olmuştur. Bu orandan sonra (kütlece %40 ve 50), agrega gradasyonunun aşırı büyümesi nedeniyle numunelerde kısmi ayrışma (segregasyon) gözlenmiştir. Segregasyon dolgu numunelerinde yapısal bozulmaya neden olur ve UPV değerlerini önemli ölçüde düşürür (Wang vd., 2021b). Ancak ne kadar segregasyon gözlenirse gözlensin, KK'lı ÇMD numuneleri kontrol (PÇ) ve PÇ ikamesi olarak farklı oranlarda (kütlece %10, %20, %30, %40 ve %50) YFC/UK içeren numunelere kıyasla daha yüksek UPV değerlerine ulaşmıştır. Dayanım

sonuçlarına benzer şekilde elde edilen UPV sonuçlarından, ÇMD numuneleri için %30 oranında ikame edilen KK optimum değer olarak belirlenmiştir. Tüm sonuçlar arasında en yüksek UPV değeri 90 günlük KK30 numunesinde (3113,9 m/s), en düşük değer ise 3 günlük UK50 (125,4 m/s) numunesinde elde edilmiştir.



Şekil 44. KK ikameli ÇMD'lerin UPV sonuçları

Genel olarak KK, atıkların inceliğinden dolayı azalan gradasyonu iyileştirerek dolguların daha kompakt bir yapı oluşturmaya yardımcı olur. Ayrıca yüksek CaO (kalsiyum oksit) değeri sayesinde hidrasyon reaksiyonlarını da destekler. Bu, dolgu gözeneklerinin daha fazla hidrasyon ürünü ile dolmasına katkı sağlayarak katı fazın hacim oranını yükseltir. Sonuç olarak, katı fazdaki dolgunun yoğunluğu nedeniyle gözeneklilik azalır, UPV kademeli olarak artar. MIP (Şekil 33-34) XRD (Şekil 35a) TG/DTG (Şekil 36) ve SEM (Şekil 38-40) sonuçlarıyla tutarlı olarak, kireçtaşı bazlı

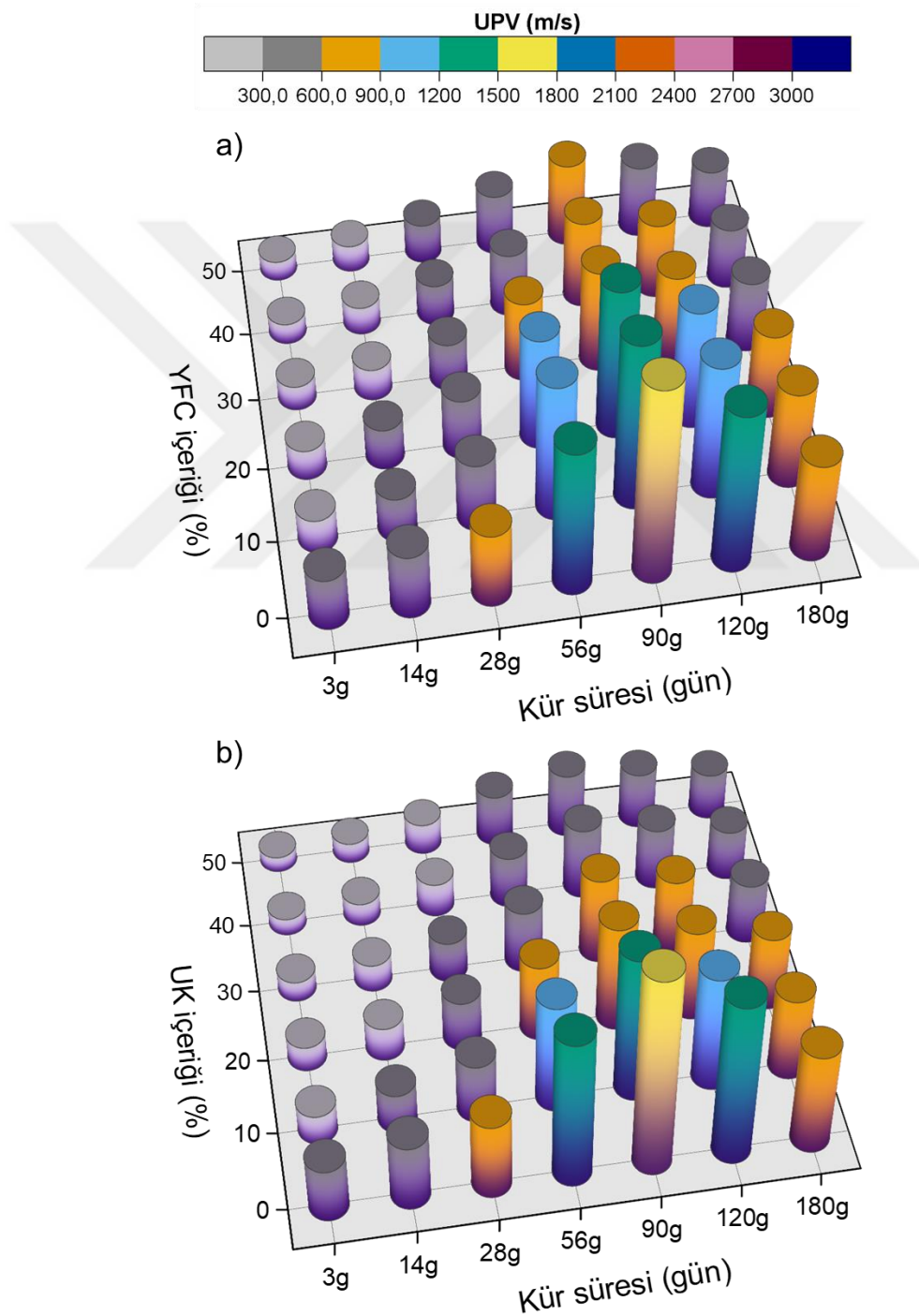
dolgu numunelerinin hidrasyon ilerlemesinin kontrol (PÇ) ve YFC/UK katkılı (YFC10/UK10) numunelere kıyasla oldukça yüksek olduğu açıktır. Özellikle SEM görüntülerinden de (Şekil 38-40) kireçtaşı bazlı dolgunun diğer numunelere kıyasla daha az gözenekli, boşluklu ve çatlaklı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Önceki çalışmalarda, iyi gradasyona sahip malzemelerin hem kompakt bir yapı oluşumunu desteklediği hem de çevresel etkilere karşı numunelerin direncini arttırarak UPV'ye olumlu katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir (Prasad ve Lakshmi, 2020; Kasinikota ve Tripura, 2021; Gao vd., 2023).

Tablo 12. ÇMD'lerin kür süresine göre UPV sonuçları

Numune ID	Atık (agrega)		Bağlayıcı			UPV (m/s)							
	ikame oranı (%)		ikame oranı (%)										
	PA	KK	PÇ	UK	YFC	3	14	28	56	90	120	180	
Kontrol (PÇ)	-	-	100	-	-	448	550	637	1244	1673	1364	847	
KK10	90	10	100	-	-	584	697	824	1389	2034	1615	1114	
KK20	80	20	100	-	-	712	854	1007	1825	2316	1874	1468	
KK30	70	30	100	-	-	1001	1231	1559	2699	3114	2331	1871	
KK40	60	40	100	-	-	919	1036	1194	2515	2865	2137	1718	
KK50	50	50	100	-	-	838	973	1085	2140	2638	1923	1516	
YFC10	-	-	90		10	290	383	583	1163	1421	1143	825	
YFC20	-	-	80		20	257	350	515	948	1271	1009	716	
YFC30	-	-	70		30	208	269	404	676	856	728	597	
YFC40	-	-	60		40	172	234	344	528	727	627	509	
YFC50	-	-	50		50	164	222	327	502	690	596	484	
UK10	-	-	90	10		248	336	495	911	1222	970	689	
UK20	-	-	80	20		208	283	417	640	880	759	617	
UK30	-	-	70	30		169	229	338	518	713	615	499	
UK40	-	-	60	40		139	189	278	427	587	506	411	
UK50	-	-	50	50		125	166	252	419	526	459	379	
KK10-YFC10	90	10	90	-	10	390	562	851	1403	1855	1540	1264	
KK10-YFC30	90	10	70	-	30	272	355	732	1073	1448	1345	1462	
KK30-YFC10	70	30	90	-	10	609	951	1343	2261	3028	2520	2462	
KK30-YFC30	70	30	70	-	30	520	814	1217	1934	2825	2657	2759	
KK10-UK10	90	10	90	10	-	327	449	718	1317	1569	1123	965	
KK10-UK30	90	10	70	30	-	222	287	518	953	1084	833	691	
KK30-UK10	70	30	90	10	-	508	830	1048	1790	2528	2086	2072	
KK30-UK30	70	30	70	30	-	389	743	833	1519	2237	1792	1724	

Şekil 45 ve Tablo 12, çimento yerine kullanılan ve altı farklı ikame oranına sahip mineral katkıların (PÇ/YFC-UK: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) farklı kür sürelerinin (3-180 gün) bir fonksiyonu olarak ÇMD'lerin UPV değerleri

üzerindeki etkisini göstermektedir. Kür süresi arttıkça, azalan boşluk oranı ve zamanla artan hidratasyon ürünlerinin bir sonucu olarak dolgunun UPV gelişiminde artış gözlenmiştir. 90 günlük kontrol numunesine (PÇ) kıyasla aynı kür süresi için farklı YFC ikamesine (%10, %20, %30, %40 ve %50) sahip ÇMD karışımlarının UPV değerleri %15,1-%58,7 oranında azalmıştır (Şekil 45a).



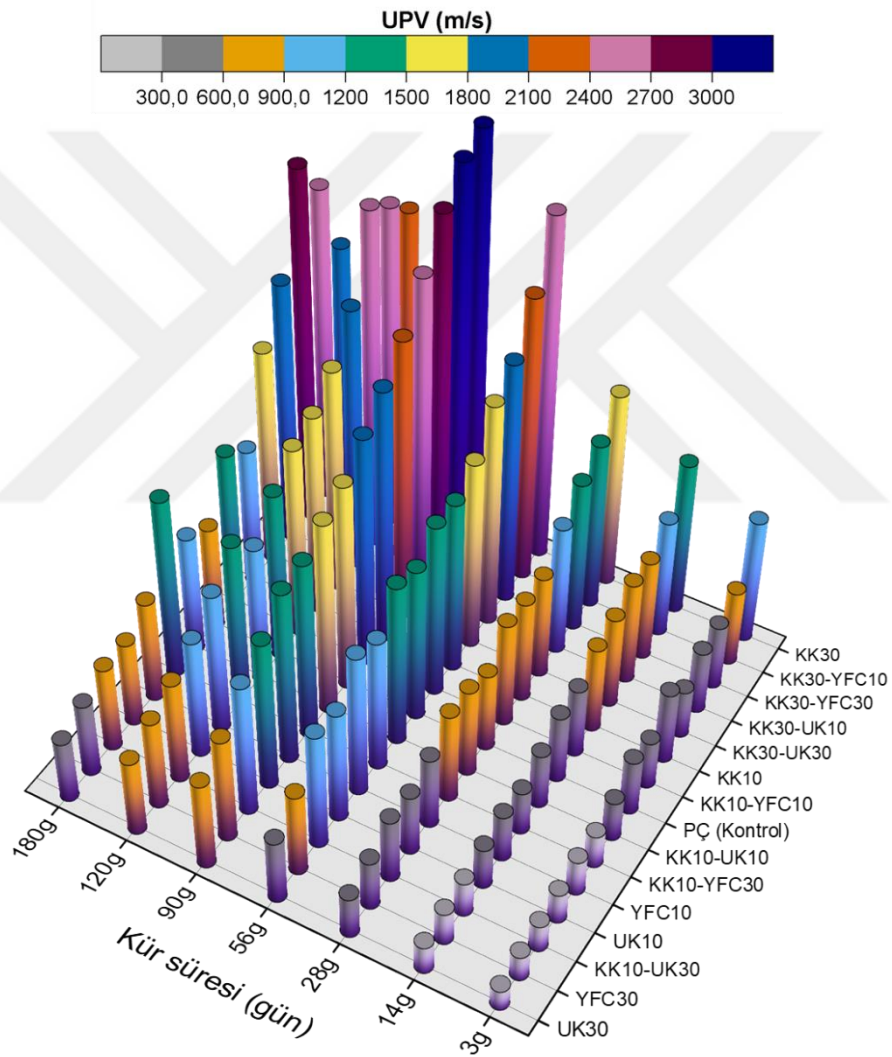
Şekil 45. YFC (a) ve UK (b) içeren ÇMD'lerin UPV sonuçları

Benzer şekilde, UK içeren ÇMD'lerin dayanım değerleri PÇ'ye kıyasla %27,0-%68,6 oranında düşmüştür (*Şekil 45b*). Kontrol numunesinden bağımsız olarak çimento ikamesi olarak kullanılan her iki mineral katkı (YFC ve UK) için de maksimum UPV değeri (90. günde YFC: 1420 m/s ve UK: 1221 m/s) %10 ikame oranında, minimum (3. günde YFC: 163,5 m/s ve UK: 125,4 m/s) ise %50 ikame oranında gözlemlenmiştir. ÇMD ve beton gibi çimentolu karışımların basınç dayanımı ile doğrusal orantıya sahip olan UPV değerleri artan çimento içeriği ile iyileşmektedir. Ancak çimento yerine ikame edilen YFC ve UK gibi mineral katkılar özellikle erken yaşlardaki ÇMD'lerin UPV'lerinde büyük bir düşüşe neden olmaktadır. Bu durum genellikle sabit bağlayıcı dozajında kullanılan çimento miktarının azalması ve buna karşılık gelen su/çimento (s/ç) oranının artması ile bu mineral katkıların (YFC ve UK) PÇ'nin içerdiğinden daha az puzolanik ürün içermesiyle ilişkilendirilmektedir. YFC ve UK içeren ÇMD'lerdeki düşük UPV değerleri KK içeren numunelere kıyasla daha az hidrasyon ürünü oluşumu ve daha yüksek gözeneklilik ile ilişkilidir. Bu da mikro çatlaklara ve boşluklu bir yapıya neden olarak darbe hızını düşürmektedir. YFC10 ve UK10'a ait SEM mikrografları (sırasıyla *Şekil 42-43*) UPV düşüşlerine ait yapılan yorumları desteklemektedir. Bu şekillerden de görüleceği üzere uzun vadede çimento ikamesi olarak YFC ve UK katkılarının kullanımı dolgularda daha gözenekli-boşluklu bir yapı oluşmasını desteklemekte ve hidrasyon ürünlerine zarar vermektedir.

Şekil 46 ve Tablo 12, atık yerine agrega kaynağı olarak farklı ikame oranlarında (%10 ve %30) KK ile hazırlanan ÇMD'lerin UPV sonuçlarını göstermektedir. Ek olarak *Şekil 46*'da PÇ yerine %10 ve %30 ile değiştirilen YFC ve UK'nın KK içeren/KK içermeyen ÇMD'ler üzerindeki etkisi sunulmaktadır. Yapılan önceki UPV ölçümlerine (*Şekil 44-45*) benzer şekilde ÇMD numuneleri için maksimum UPV değerlerinin 90 günlük kür süresinde ortaya çıktığı ve her bir ÇMD numunesinin bu kürleme yaşına kadar farklı oranlarda UPV artışı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Sadece KK içeren ÇMD'lerden bağımsız olarak maksimum UPV değeri (3027 m/s) 90 günlük KK30-YFC10 numunesinde meydana gelirken, aynı kürleme yaşı için en düşük UPV değeri (222,4 m/s) 3 günlük KK10-UK30 numunesinde meydana gelmiştir. Özellikle uzun kür sürelerinde (56-180) KK ile mineral katkıların kullanımı ÇMD numunelerin UPV artışına önemli katkılar sağlamıştır. Örneğin 120 günlük KK30-YFC30 numunesi 2657 m/s, 120 günlük KK30-UK30 numunesi 1792 m/s

değerine ulaşmıştır. KK ve mineral katkıların birlikte kullanımıyla birlikte ÇMD'lerde kısa ve uzun vadede önemli UPV gelişimleri gözlenmiştir. Özellikle ÇMD numunelerinde kullanılan YFC ve UK mineral katkılarından kaynaklı UPV düşüşleri farklı oranlarda KK kullanımı ile önemli derecede artmıştır. Örneğin YFC ve UK kullanımıyla birlikte ÇMD numunelerinde dayanım gelişimi sırasıyla 675,7 ve 518,1 m/s'de sınırlı kalırken (%30 katkı oranı ve 56 gün) %30'a kadar KK kullanımı ile bu değerler sırasıyla 1933 ve 1519 m/s'ye kadar yükselmiştir.



Şekil 46. KK, YFC ve UK katkılı ÇMD'lerin UPV gelişimi

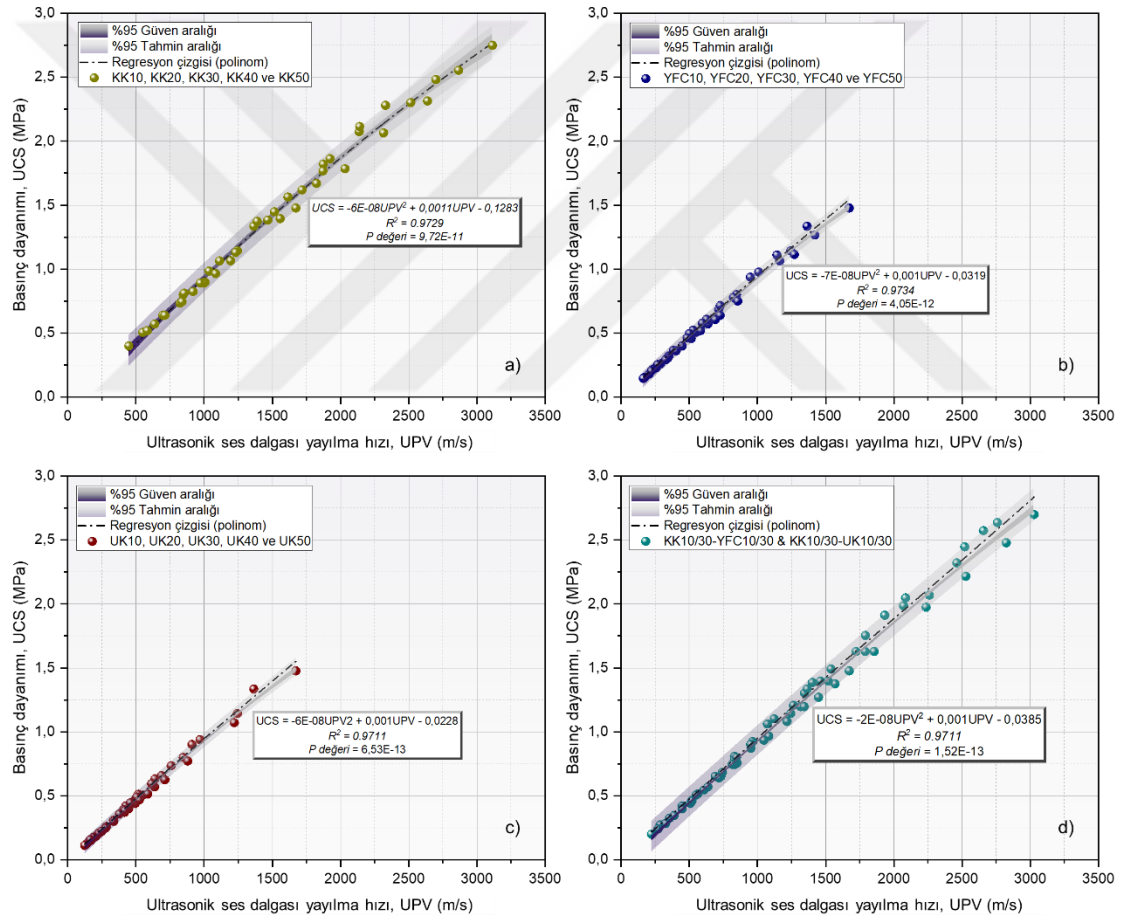
Şekil 44-46'de görülebileceği gibi, 90 günlük kür süresinden sonra tüm ÇMD numunelerinin UPV değerleri düşmüştür. Bu durum asidik maden atıklarının dolgu ortamını bozması ile ilişkilendirilebilir. Atıklar uzun vadede dolguların hidrasyon reaksiyonlarını bozar ve bağ oluşumunu engeller (Yılmaz vd., 2021). Özellikle uzun

vadede asidik ortam nedeniyle oluşan bağların bozulması ve yetersiz hidratasyon malzemeleri dolguda boşluklu bir yapı oluşturur (Sari vd., 2023b). Bu da UPV değerlerinde ciddi düşüslere neden olabilmektedir. Ancak kireçtaşı ikamesi, kontrol numunelerine kıyasla uzun vadeli UPV değerlerini bilinçli olarak artırmaktadır. Bunun nedeni, reaktif bir malzeme olan kireçtaşının yüksek CaO içeriğinin bir sonucu olarak asidik ortamın iyileştirilmesi ile açıklanabilir. Çünkü kalsiyum oksit, kalsitin kalsinasyonu nedeniyle oluşur ve silikatların/alüminatların (çimentoyu oluşturan temel bileşenler) başlıca oksit bileşiklerinden biridir (Shukla vd., 2023). Bu, dolgu ortamının bazikliğini artırarak ve hidrasyon için uygun bir ortamın oluşmasını teşvik ederek UPV verimliliğini artırır. Birçok çalışmada, asidik atıkların uzun vadeli olumsuz etkilerinin çimentoya yakın mineralojik bileşime sahip katkı maddeleri eklenerek azaltıldığı bildirilmiştir (Wang vd., 2020b; Kasap vd., 2023).

Mevcut literatür UPV'nin katı ortamlarda gözenekli ortamlara kıyasla daha hızlı yayıldığını bildirmektedir (Mahmutoğlu, 2017; Tian ve Xu, 2022). Ayrıca çalışmalar, çimentolu karışımların üniform ve yoğun olduğu koşullarda daha yüksek UPV elde edildiğini bildirmektedir (Liu vd., 2021; Raavi ve Tripura, 2021). Özellikle PÇ'nin dolgularda yüksek oranlarda kullanılması nedeniyle hidratasyon sürecinin iyileşmesi ve porozitenin azalması UPV'yi olumlu yönde etkilemektedir (Qiu vd., 2020b). Ayrıca mineral katkıları uzun vadede çimentolu malzemelerin yapısal özelliklerini iyileştirerek UPV değerlerini artırmaktadır (Ji vd., 2022). Buna karşılık, çalışmalar su/çimento oranındaki azalmaya bağlı olarak çimentolu malzemelerin gözenekliliğindeki artışın UPV'yi azalttığını bildirmektedir (Zhang vd., 2021). Ultrasonik dalgaların çimento matrisinde yayılması, özellikle gözenek yapısı nedeniyle numunelerin doygunluğuna çok duyarlıdır (Candelaria vd., 2020). Bu durum hem yoğunlukta hem de Young modülünde azalma ile ilişkilidir (de Araujo Thomaz vd., 2021). Mevcut literatürde UPV'nin çimentolu malzemelerin, özellikle de betonun aside maruz kalma derecesi ile önemli ölçüde azaldığı da bildirilmiştir (Siad v.d, 2016). Deneysel sonuçlar, sülfat saldırılarının neden olduğu yapısal bozulmanın gözenekliliği artırarak UPV'yi azalttığını göstermektedir (Mhaya vd., 2021). Ayrıca, asidik ortamın etkisi altında UPV değerlerindeki düşüş, çimentolu malzemelerin bozulması ve çatlak oluşumu ile yakından ilişkilidir (Nematzadeh ve Fallah-Valukolae, 2017).

5.7. ÇMD'lerin UCS ve UPV Değerleri Arasındaki İlişki

Ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV), çimentolu macun dolgu (ÇMD) gibi çimentolu karışımların basınç dayanımı (UCS) ile yakından ilişkilidir. UPV ve UCS arasındaki korelasyon karışım oranı, agrega/atıklar, mineral katkıları ve çimento tipinden doğrudan etkilenir (Qiu vd., 2020b). Kullanılan malzemeler için UCS ve UPV arasındaki regresyon eğrileri mevcut olduğu sürece, herhangi bir basınç dayanımını tahmin etmek mümkündür. Önceki çalışmalarda, ÇMD numuneleri için basınç ve ultrasonik ses dalgalarının yayılma hızı arasında birçok bağlantı sunulmuş ve önerilmiştir (Wu vd., 2016; Ji v.d, 2022).



Şekil 47. ÇMD numunelerinin UCS ve UPV arasındaki ilişki: KK (a); YFC (b); UK (c); ve KK-YFC/KK-UK (d)

Farklı mineral katkı (KK-kırma kireçtaşı, YFC-yüksek fırın cürufu ve UK-uçucu kül)) türlerine bağlı olarak, dolgu numunelerinin UPV ve UCS arasındaki bağlantılar en küçük kare regresyon yaklaşımı ile belirlenmiştir. Bu kapsamda beş farklı eğri uydurma yöntemi (doğrusal, polinom, logaritmik, üstel ve üssel)

değerlendirilmiş ve her yöntem için bağlantı sabitleri hesaplanmıştır. *Tablo 13*, mineral katkılı ÇMD numuneleri için oluşturulan eğri denklemlerini, korelasyon/belirleme katsayısı (R^2) değerlerini ve F testleri sonucu elde edilen P değerlerini göstermektedir. R^2 regresyonları karakterize etmek için kullanılan istatistiksel bir ölçüdür ve 0-1 arasında değerler alır (Raposo, 2016). R^2 0'a yaklaştıkça, uydurulan eğri ile hesaplanan veriler arasında bir ilişki olmadığı, R^2 1'e yaklaştığında ise uydurulan eğri yardımıyla hesaplanan verilerin tüm değişkenleri açıkladığı varsayılır. R^2 ne kadar büyükse (R^2 'nin 1'e yaklaştığı durumda), uydurulan eğri ve veriler arasındaki ilişki o kadar güçlüdür (Abdelkareem vd., 2022). Bu durum göz önünde bulundurularak, eğri uydurma yöntemleri arasında en yüksek R^2 değerlerine sahip olan 2. derece polinom eğri uydurma yöntemi dikkate alınmıştır (*Tablo 12*).

Şekil 47, KK (*Şekil 47a*), YFC (*Şekil 47b*), UK (*Şekil 47c*) ve KK-YFC/KK-UK (*Şekil 47d*) mineral katkılı ÇMD'lerin UPV ile UCS arasındaki korelasyonu göstermektedir. *Şekil 47*'den tüm ÇMD'ler için UPV ve UCS arasındaki ilişki polinom eğrisi yardımıyla oldukça uyumlu şekilde değerlendirilmiştir. *Tablo 13*'ten ÇMD numunelerinin test değişkenlerinin (KK, YFC, UK ve KK-YFC/KK-UK) hepsinde diğer eğri uydurma yöntemlerine kıyasla polinom eğrisinin en yüksek R^2 sonuçları (0,9694-0,9811) verdiği açık bir şekilde görülmektedir. Uygun eğriyi bulmanın yanı sıra, güven ve tahmin bandı regresyon modelini sezgisel olarak yorumlamaya yardımcı olmaktadır (Diquigiovanni vd., 2022; Telschow ve Schwartzman, 2022). Çalışma kapsamında mineral katkılı ÇMD'lere ait regresyon modellerinin daha iyi değerlendirilmesi ve yorumlanması amacıyla %95 güven ve tahmin bandı kullanılmıştır (*Şekil 47*). Güven aralığı, veriler için olası tüm uyum eğrisi sınırlarını göstermektedir. Başka bir deyişle, verilerin bir hata payının eklenip çıkarılmasına dayalı olarak makul bir değer aralığında olup olmadığını gösterir. *Şekil 47*'den tüm ÇMD numunelerinin UPV-UCS değerleri çoğunlukla %95 güven bandı içerisinde olduğu görülmektedir. Tahmin bandı ise belirtilen güven aralığı (%95) için tüm deneysel verileri nerede görmeyi bekleyebileceğimiz hakkında bilgi vermektedir. Yani, regresyon analizindeki tahmin bandı, beklenen yeni gözlemler için makul değer aralığını göstermektedir. Sabit bir terim aralığı ifade etmesinden dolayı güven bandından farklı bir işleve sahiptir. Bu nedenle, tahmin bandı genellikle güven bandından daha geniş bir veri setini temsil etmektedir.

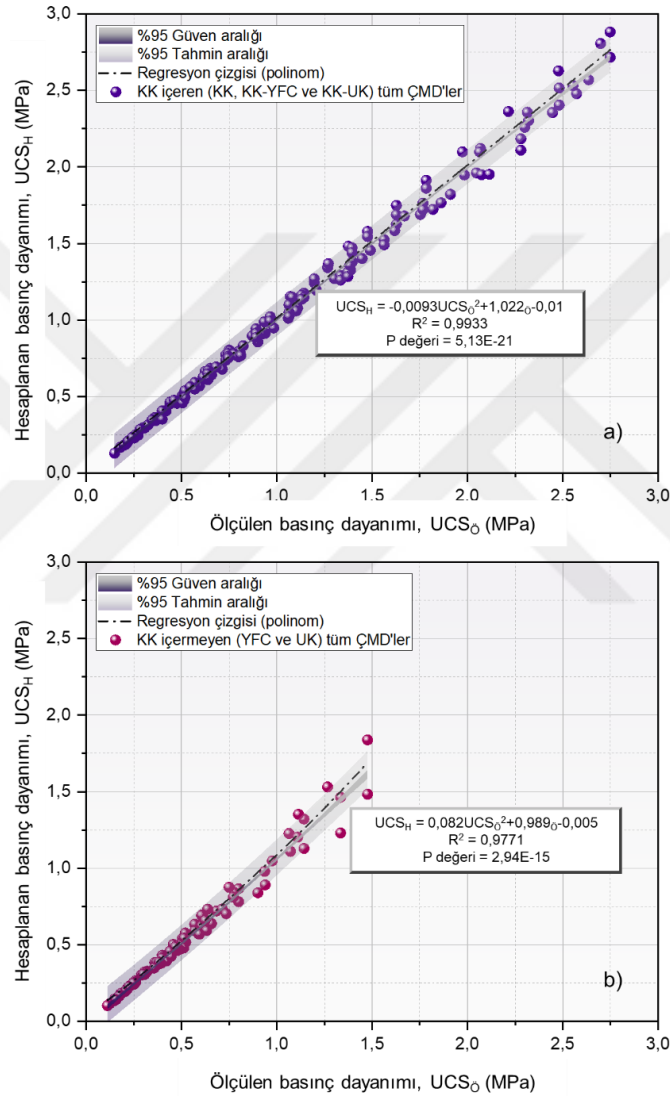
Tablo 13. ÇMD’lerin korelasyon sonuçları

Numune ID	Regresyon türü	Formül	R ²	Prob>F (P değeri)
KK10-50	Doğrusal	$UCS = 0,0009UPV + 0,0126$	0.9756	5,44E-11
	Polinom	$UCS = -6E-08UPV^2 + 0,0011UPV - 0,1283$	0.9811	9,72E-11
	Logaritmik	$UCS = 1,2624\ln(UPV) - 7,7042$	0.9298	2,20E-08
	Üstel	$UCS = 0,4356e^{0,0007UPV}$	0.8857	3,41E-07
	Üssel	$UCS = 0,0008UPV^{1,0155}$	0.9703	2,67E-11
YFC10-50	Doğrusal	$UCS = 0,0009UPV + 0,0039$	0.9623	2,20E-12
	Polinom	$UCS = -7E-08UPV^2 + 0,001UPV - 0,0319$	0.9694	4,05E-12
	Logaritmik	$UCS = 0,5497\ln(UPV) - 2,8672$	0.8907	2,34E-08
	Üstel	$UCS = 0,1867e^{0,0015UPV}$	0.8461	1,86E-06
	Üssel	$UCS = 0,0008UPV^{1,0172}$	0.9720	7,11E-12
UK10-50	Doğrusal	$UCS = 0,0009UPV + 0,0029$	0.9702	5,45E-12
	Polinom	$UCS = -6E-08UPV^2 + 0,001UPV - 0,0228$	0.9711	6,53E-13
	Logaritmik	$UCS = 0,4809\ln(UPV) - 2,4348$	0.8591	5,00E-05
	Üstel	$UCS = 0,1655e^{0,0017UPV}$	0.8067	7,07E-03
	Üssel	$UCS = 0,0008UPV^{1,0164}$	0.9688	1,41E-12
KK-YFC/KK-UK	Doğrusal	$UCS = 0,0009UPV - 0,0049$	0.9710	2,08E-12
	Polinom	$UCS = -2E-08UPV^2 + 0,001UPV - 0,0385$	0.9711	1,52E-13
	Logaritmik	$UCS = 0,9912\ln(UPV) - 5,7208$	0.8786	8,36E-10
	Üstel	$UCS = 0,3251e^{0,0009UPV}$	0.8529	1,21E-09
	Üssel	$UCS = 0,0008UPV^{1,0174}$	0.9703	4,39E-11

Güven-tahmin bandına benzer şekilde çalışma kapsamında yapılan regresyonların doğruluğunu değerlendirmek amacıyla F-testi için P (Prob > F) değerleri kullanılmıştır. P-değeri, bir hipotezde değerlendirilen verileri doğrulamak için kullanılan istatistiksel bir ölçüdür (Lundahl, 2011). P değeri, 0 ile 1 arasında değer alan bir olasılıktır. F testi için P değeri ne kadar küçükse (genellikle %5'ten az), regresyon analizinin doğruluğu o kadar artmaktadır. P-değeri aynı zamanda hipotez testleri için önceden seçilmiş güven düzeylerine (%95) bir alternatif sunmaktadır (Baduashvili vd., 2020). *Tablo 13*'ten tüm mineral katkılı ÇMD numunelerinin P değerlerinin %5'ten oldukça küçük olduğu görülmektedir. Bu, 2. derece polinom eğrisi aracılığıyla elde edilen denklemlerin uyumunun bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

Şekil 48, mineral katkılı ÇMD numunelerinin ölçülen (gerçek değerler) ve hesaplanan (UCS-UPV denklemleri yardımıyla) UCS sonuçları arasındaki bağlantıları göstermektedir. KK içeren (*Şekil 48a*) ve içermeyen (*Şekil 48b*) ÇMD'lere ait ölçülen ve hesaplanan değerlerin ilişkilendirilmesi amacıyla daha önceki regresyon analizleri dikkate alınan 2. derece polinom eğrisi kullanılmıştır. Bu eğrilerden KK içeren ve içermeyen ÇMD numunelerine göre R² değerlerinin sırasıyla 0,9933 ve 0,9771 olduğu bulunmuştur. Ayrıca, üretilen ve hesaplanan verilerin çoğu %95 güven aralığındadır. Ayrıca eğriler yardımıyla bulunan P değerleri (KK içeren: 5,13E-21 ve KK içermeyen: 2,94E-15) oldukça düşük çıkmıştır. UPV ve UCS arasındaki ilişki değerlendirildiğinde regresyon analizinin tüm ÇMD örnekleri için UCS sonuçlarını tahmin etmede başarılı

olduğu görülmektedir. Ayrıca, 2. derece polinom modelinin dolguların UCS performansını tahmin etmek için kullanılabilirliği UPV testi ile kanıtlanmıştır. Yapılan regresyon analizi sayesinde ÇMD'lerin kalitesini ve performansını değerlendirmek için daha pratik ve daha ucuz bir yöntem olan tahribatsız UPV testinin, ölçülen veriler yardımıyla UCS performansını tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 48. KK içeren (a) ve içermeyen (b) ÇMD'lerin ölçülen ve hesaplanan UCS değerleri arasındaki ilişki

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, katkı (kıрма kireçtaşı-KK, yüksek fırın cürufu-YFC ve uçucu kül-UK) maddelerinin çimentolu macun dolgular (ÇMD) üzerindeki kısa/uzun kür süresi etkisi kapsamlı olarak araştırılmıştır. ÇMD'lerin kalite ve performansının değerlendirilmesi amacıyla mekanik (UCS, gerilme-şekil değiştirme ve elastisite modülü), ultrasonik (UPV, ultrasonik ses dalgasının yayılma hızı) ve mikroyapısal (MIP, XRD, TG/DTG ve SEM) karakterizasyon özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Numuneler kısa/uzun kürleme sürelerinde (3-180 gün), sabit katkı (kütlece %72) ve çimento (kütlece %5) içeriklerinde hazırlanmıştır. ÇMD'lerde proses atık (agrega) ikamesi olarak altı farklı oranda kıрма kireçtaşı içeriği (atık/kireçtaşı: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) ve çimento ikamesi olarak altı farklı oranda mineral katkı içeriği (PÇ/YFC-UK: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50) seçilmiştir. Ayrıca KK ile YFC ve UK farklı oranlarda (KK-YFC: %10 ve %30 ve KK/UK: %10 ve %30) ÇMD karışımlarında kullanılarak yapılan testler/analizler tekrar edilmiştir.

Yapılan çalışmalar ışığında, boru hattındaki taşıma ve işletme koşulları dikkate alınarak optimum Portland çimentosu (PÇ) ikame oranı %10, optimum KK ikame oranı ise %30 olarak belirlenmiştir. 90 gün kürlenmiş ÇMD numunelerinin mikro yapısı (MIP, XRD, TG/DTG ve SEM) yalnızca optimum dolgu numuneleri için karakterize edilmiştir ve temel sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- ✓ ÇMD'lerin basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, 90 günlük kürleme süresine kadar kademeli bir artış gözlemlenirken, 90. günden sonra tüm dolgu numunelerinin dayanımlarında önemli azalmalar meydana gelmiştir. ÇMD numunelerinin ulaştığı maksimum dayanım değeri (90 gün – KK30) 2,74 MPa olarak tespit edilmiştir.
- ✓ Kıрма kireçtaşı (KK) atık ikamesi olarak kullanımı ÇMD'lerin dayanıma önemli katkı sağlamıştır. Dayanım sonuçlarından, ÇMD numuneleri için %30 oranında ikame edilen KK, optimum değer olarak belirlenmiştir. %30 kireçtaşı kullanımından sonra (kütlece %40 ve 50), agrega gradasyonunun aşırı büyümesi nedeniyle numunelerde kısmi ayrışma

(segregasyon) gözlenmiştir. Segregasyonun etkisi ile KK içeren ÇMD numunelerinin dayanımda önemli düşüşleri meydana gelmiştir.

- ✓ Kontrol ve kireçtaşı içeren numunelerden bağımsız olarak çimento yerine kullanılan her iki mineral katkı (YFC ve UK) için de maksimum dayanım değeri (90. günde YFC: 1,26 MPA ve UK: 1,07 MPA) %10 ikame oranında, minimum (3. günde YFC: 0,14 MPA ve UK: 0,11 MPA) ise %50 ikame oranında gözlemlenmiştir. Sadece KK içeren ÇMD'lerden bağımsız olarak maksimum dayanım değeri (2,70 MPA) 90 günlük KK30-YFC10 numunesinde meydana gelirken, en düşük dayanım değeri (0,20 MPA) 3 günlük KK10-UK30 numunesinde meydana gelmiştir
- ✓ 90 gün kürlenmiş ÇMD'lere KK ilave edilmesi ile elastisite modülünün önemli ölçüde arttığı ve numunelerin gevrekleştiği belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. YFC ve UK katkı maddeleri tek başına kullanıldığı durumlarda ÇMD'lerin eksenel deformasyonun fazla olması numunelerin oldukça sünek davranış sergilediğinin göstergesidir. Ancak YFC ve UK'nın KK ile birlikte kullanıldığı durumlarda numunelerdeki deformasyon daha sınırlıydı (daha sert/gevrek).
- ✓ MIP testlerine göre, ÇMD karışımlarına katkı maddelerinin eklenmesi sonucunda toplam gözeneklilik oranlarında ciddi azalmalar meydana gelmiştir. Özellikle KK kullanımı sonucu ince proses atıklarının neden olduğu gradasyon sorunları önemli derecede iyileşerek ÇMD karışımlarının toplam gözenekliliği pozitif şekilde etki sağlamıştır. KK, YFC ve UK kullanıldığında, çimento hidratasyonu uzun vadede desteklenmiş ve toplam gözeneklilik oranı %7,5-9,1 arasında azalmıştır.
- ✓ Toplam gözeneklilik değerleri incelendiğinde en düşük gözeneklilik değeri (%34,6) KK30 numunesinde, en yüksek gözeneklilik değeri ise (%42,8) ise UK10 numunesinde görülmektedir. PÇ (kontrol), YFC10 ve UK10 numunelerinin tüm kürlenme süresi (3-180 gün) boyunca toplam porozitelerinin (%38,9-42,8) KK30, KK30-YFC10 ve KK30-UK10 numunelerinin toplam porozitelerine (%34,6-37,1) kıyasla oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir.

- ✓ Kritik gözenek çapı (d_{kr}) değerlerinin KK kullanımı ile önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. d_{kr} değerleri KK30, KK30-YFC10 ve KK30-UK10 numunelerinde sırasıyla 0,15, 0,22 ve 0,32 μm olarak belirlenirken, PÇ-kontrol, YFC10 ve UK10 numunelerinde 0,64, 0,92 ve 1,21 μm olarak belirlenmiştir.
- ✓ XRD sonuçlarında tüm numunelerdeki yüksek yoğunluklu bileşenlerin kuvars (~ 8400 CPS) ve pirit (~ 8200 CPS) olduğu belirlenmiştir. FeS_2 ve SiO_2 yoğunlukları PÇ (kontrol), YFC10 ve UK10 numunelerinde, KK30, KK30-YFC10 ve KK30-UK10 numunelerine kıyasla daha yüksek bulunmuştur. XRD sonuçlarından PÇ (kontrol), YFC10 ve UK10 numunelerinin hidrasyon ürünlerinin diğer numunelere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ TG/DTG sonuçlarında en büyük pik değerleri KK30, KK30-YFC30 ve KK30-UK10 numunelerinde gözlenirken, diğer numunelerde (PÇ kontrol, YFC10 ve UK10) önemli bir pik değeri oluşmamıştır. En yüksek kütle kayıpları KK30, KK30-YFC30 ve KK30-UK10 numunelerinde sırasıyla %27,5, %26,9 ve %22,8 olarak bulunmuştur.
- ✓ TG/DTG sonuçlarından 20-200 °C'de KK içeren ÇMD'lerde etrenjit oluşumu oldukça düşük tespit edilmiştir. Ancak PÇ, YFC10 ve UK10 numunelerindeki pikler doğrudan etrenjit dehidrasyonu ile ilgili olduğu düşünülmektedir. 440-640 °C'deki Ca(OH)_2 'nin dehidrasyonu diğer numunelere kıyasla KK30, KK30-YFC30 ve KK30-UK10 numunelerinde daha yüksek olarak bulunmuştur. Bu, ÇMD'lerle birlikte kullanılan KK, YFC ve UK mineral katkılarının hidrasyon reaksiyonunu hızlandırdığını doğrulamaktadır. 710-920 °C'deki Kalsit miktarı KK ve YFC'nin yüksek CaO (kalsiyum oksit) içeriği ile orantılıdır. Kalsit miktarının fazla olması ÇMD'lerde dayanıma katkı sağlayan bir parametre olarak düşünülmektedir.
- ✓ SEM sonuçlarından ÇMD karışımlarına KK eklenmesinin hem karışımdaki tane boyu dağılımının iyileşmesine hem de C-S-H gibi ilave hidrasyon ürünlerinin oluşmasına katkı sağladığı görülmektedir. Ayrıca, atık yerine KK kullanılması kütleme süresi boyunca oluşabilecek boşlukları (gözenekleri) ve çatlakları önemli ölçüde azaltmıştır. SEM sonuçlarından YFC veya UK kullanımı sonucu yeterli hidrasyon ürününün oluşmadığı

görülmektedir. Ayrıca karışımdaki malzemelerin yüzeylerinin hidrasyon ürünleri kaplanmadığı, dolgu yüzeyindeki çatlakların ve boşlukların KK içeren numunelere kıyasla boyut olarak daha büyük görülmektedir

- ✓ UPV değerleri ince agregaların (proses atıkları) yerini KK'nın almasıyla belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür. En büyük artış oranları, basınç dayanımında olduğu gibi kürlenmenin ilk 90 gününde meydana gelmiştir. Tüm sonuçlar arasında en yüksek UPV değeri 90 günlük KK30 numunesinde (3113,9 m/s), en düşük değer ise 3 günlük UK50 (125,4 m/s) numunesinden elde edilmiştir.
- ✓ YFC ve UK gibi mineral katkıları özellikle erken yaşlardaki ÇMD'lerin UPV'lerinde büyük bir düşüşe neden olmuştur. Ancak ÇMD numunelerinde kullanılan YFC ve UK mineral katkılarından kaynaklı UPV düşüşleri farklı oranlarda KK kullanımı ile önemli derecede artmıştır. Örneğin YFC ve UK kullanımıyla birlikte ÇMD numunelerinde dayanım gelişimi sırasıyla 675,7 ve 518,1 m/s'de sınırlı kalırken (%30 katkı oranı ve 56 gün) %30'a kadar kireçtaşı kullanımı ile bu değerleri sırasıyla 1933 ve 1519 m/s'ye kadar yükseltmiştir.
- ✓ Farklı mineral katkı (KK-Kırma kireçtaşı, YFC-yüksek fırın cürufu ve UK-uçucu kül) türlerine bağlı olarak, dolgu numunelerinin UPV ve UCS arasındaki bağlantılar en küçük kare regresyon yaklaşımı ile belirlenmiştir. Bu kapsamda beş farklı eğri uydurma yöntemi (doğrusal, polinom, logaritmik, üstel ve üssel) değerlendirilmiş ve her yöntem için bağlantı sabitleri hesaplanmıştır. Eğri uydurma yöntemleri arasında en yüksek R^2 değerlerine sahip olan 2. derece polinom eğri uydurma yöntemi dikkate alınmıştır.
- ✓ ÇMD numunelerinin test değişkenlerinin (KK, YFC, UK ve KK-YFC/KK-UK) hepsinde diğer eğri uydurma yöntemlerine kıyasla polinom eğrisinin en yüksek R^2 sonuçları (0,9694-0,9811) verdiği açık bir şekilde görülmüştür. Tüm mineral katkılı ÇMD numunelerinin P değerleri %5'ten küçük bulunmuştur.
- ✓ KK içeren ve içermeyen ÇMD numunelerine göre R^2 değerlerinin sırasıyla 0,9933 ve 0,9771 olduğu bulunmuştur. Ayrıca, üretilen ve

hesaplanan verilerin çoğu %95 güven aralığında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca eğriler yardımıyla bulunan P değerleri (KK içeren: 5,13E-21 ve KK içermeyen: 2,94E-15) oldukça düşük çıkmıştır.

- ✓ UPV ve UCS arasındaki ilişki değerlendirildiğinde, regresyon analizinin tüm ÇMD örnekleri için UCS sonuçlarını tahmin etmede başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca, 2. derece polinom modelinin dolguların UCS performansını tahmin etmek için kullanılabilirliği UPV testi ile kanıtlanmıştır.

Sonuç olarak bu tez çalışması ÇMD numunelerindeki dayanım kayıplarının ve yapısal sorunlarının farklı oranlarda PÇ ve proses atıkları yerine kullanılacak mineral katkı maddeleriyle ortadan kaldırılabileceğini göstermiştir. Ayrıca karışımlarda kullanılan katkı maddelerinin miktarının doğru belirlenmesi ile işletme güvenliğinin sağlanması, endüstriyel atık (YFC ve UK) miktarının azaltılması, sülfürlü atıkların çevresel etkilerinin sınırlandırılması, sera gazı emisyonlarının kısıtlandırılması, enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve ekolojik birçok sorunun ortadan kaldırılması açısından son derece önemli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bu tez çalışması, ince taneli proses atıklarının KK gibi nispeten iri taneli malzemelerle birlikte kullanılması sonucu hem dolgu dayanımının artırılması hem de çimento maliyetinin düşürülmesi açısından önemli bir eksikliği giderecektir. Ek olarak bu çalışma ile YFC ve UK gibi endüstriyel atıkların ÇMD içerisinde kullanılmasıyla hem uzun vadeli sorunların (örn. asit ve sızıntı suyu oluşumları) ortadan kaldırılması hem de işletme maliyetlerinin önemli ölçüde azaltılması nedeniyle önemli katkılar sağlanması amaçlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abdelkareem, M. A., Soudan, B., Mahmoud, M. S., Sayed, E. T., Al Mallahi, M. N., Inayat, A., Radi, M. A., & Olabi, A. G. (2022). Progress of artificial neural networks applications in hydrogen production. *Chemical Engineering Research and Design*, 182, 66-86.
- Abdul-Hussain, N., & Fall, M. (2011). Unsaturated hydraulic properties of cemented tailings backfill that contains sodium silicate. *Engineering geology*, 123(4), 288-301.
- Adesina, A. (2025). Synthesis, characterization, and efficacy of alkali-activated materials from mine tailings: A review. *Waste Management*, 191, 23-46.
- Adewuyi, S. O., Anani, A., & Luxbacher, K. (2024). Advancing sustainable and circular mining through solid-liquid recovery of mine tailings. *Process Safety and Environmental Protection*, 189, 31-46.
- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. *Journal of cleaner production*, 108, 1050-1062.
- Akhavan, A., & Golchin, A. (2021). Estimation of arsenic leaching from Zn–Pb mine tailings under environmental conditions. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126477.
- Aldhafeeri, Z., & Fall, M. (2016). Time and damage induced changes in the chemical reactivity of cemented paste backfill. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 4038-4049.
- Aldhafeeri, Z., Fall, M., Pokharel, M., & Pouramini, Z. (2016). Temperature dependence of the reactivity of cemented paste backfill. *Applied geochemistry*, 72, 10-19.
- Ali, B., Yilmaz, E., Tahir, A., Gamaoun, F., El Ouni, M., & Murtaza Rizvi, S. (2021). The durability of high-strength concrete containing waste Tire steel fiber and coal fly ash. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 7329685.
- Altuhafi, F. N., Coop, M. R., & Georgiannou, V. N. (2016). Effect of particle shape on the mechanical behavior of natural sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12), 04016071.
- Amar, H., Benzaazoua, M., Elghali, A., Hakkou, R., & Taha, Y. (2022). Waste rock reprocessing to enhance the sustainability of phosphate reserves: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 381, 135151.
- Angel, B. M., Simpson, S. L., Jarolimek, C. V., Jung, R., Waworuntu, J., & Batterham, G. (2013). Trace metals associated with deep-sea tailings placement at the Batu

- Hijau copper–gold mine, Sumbawa, Indonesia. *Marine pollution bulletin*, 73(1), 306-313.
- Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2021). Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Journal of Environmental Management*, 284, 112060.
- Baduashvili, A., Evans, A. T., & Cutler, T. (2020). How to understand and teach P values: a diagnostic test framework. *Journal of Clinical Epidemiology*, 122, 49-55.
- Behera, S. K., Ghosh, C. N., Mishra, D. P., Singh, P., Mishra, K., Buragohain, J., & Mandal, P. K. (2020). Strength development and microstructural investigation of lead-zinc mill tailings based paste backfill with fly ash as alternative binder. *Cement and Concrete Composites*, 109, 103553.
- Behera, S. K., Ghosh, C. N., Mishra, K., Mishra, D. P., Singh, P., Mandal, P. K., Buragohain, J., & Sethi, M. K. (2020). Utilisation of lead–zinc mill tailings and slag as paste backfill materials. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-18.
- Behera, S. K., Mishra, D. P., Singh, P., Mishra, K., Mandal, S. K., Ghosh, C. N., Kumar, R., & Mandal, P. K. (2021). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. *Construction and Building Materials*, 309, 125120.
- Belem, T., & Benzaazoua, M. (2008). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26, 147-174.
- Belle, G., Fossey, A., Esterhuizen, L., & Moodley, R. (2021). Contamination of groundwater by potential harmful elements from gold mine tailings and the implications to human health: A case study in Welkom and Virginia, Free State Province, South Africa. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100507.
- Benzaazoua, M., Belem, T., & 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., & Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals engineering*, 17(2), 141-152.
- Bird, G., Brewer, P. A., Macklin, M. G., Balteanu, D., Serban, M., Driga, B., & Zaharia, S. (2008). River system recovery following the Novaț-Roșu tailings dam failure, Maramureș County, Romania. *Applied Geochemistry*, 23(12), 3498-3518.
- Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97, 1-23.

- Bloss, M. (2002). Below ground disposal (mine backfill). Paste and thickened tailings: A guide, 103-126.
- Cacciuttolo, C., Cano, D., & Custodio, M. (2023). Socio-environmental risks linked with mine tailings chemical composition: promoting responsible and safe mine tailings management considering copper and gold mining experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 11(5), 462.
- Candelaria, M. D. E., Kee, S. H., Yee, J. J., & Lee, J. W. (2020). Effects of saturation levels on the ultrasonic pulse velocities and mechanical properties of concrete. *Materials*, 14(1), 152.
- Cao, S., Xue, G., & Yilmaz, E. (2019). Flexural behavior of fiber reinforced cemented tailings backfill under three-point bending. *IEEE Access*, 7, 139317-139328.
- Cao, S., Xue, G., Yilmaz, E., & Yin, Z. (2021). Assessment of rheological and sedimentation characteristics of fresh cemented tailings backfill slurry. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(5), 319-335.
- Cao, S., Zheng, D., Yilmaz, E., Yin, Z., Xue, G., & Yang, F. (2020). Strength development and microstructure characteristics of artificial concrete pillar considering fiber type and content effects. *Construction and Building Materials*, 256, 119408.
- Cavusoglu, I., Yilmaz, E., & Yilmaz, A. O. (2021a). Additivity effect on properties of cemented coal fly ash backfill containing water-reducing admixtures. *Construction and Building Materials*, 267, 121021.
- Cavusoglu, I., Yilmaz, E., & Yilmaz, A. O. (2021b). Sodium silicate effect on setting properties, strength behavior and microstructure of cemented coal fly ash backfill. *Powder Technology*, 384, 17-28.
- Chen, Q., Tao, Y., Zhang, Q., & Qi, C. (2022a). The rheological, mechanical and heavy metal leaching properties of cemented paste backfill under the influence of anionic polyacrylamide. *Chemosphere*, 286, 131630.
- Chen, Q., Zhu, L., Wang, Y., Chen, J., & Qi, C. (2022b). The carbon uptake and mechanical property of cemented paste backfill carbonation curing for low concentration of CO₂. *Science of The Total Environment*, 852, 158516.
- Chen, X., Shi, X., Zhou, J., Du, X., Chen, Q., & Qiu, X. (2019). Effect of overflow tailings properties on cemented paste backfill. *Journal of Environmental Management*, 235, 133-144.
- Chen, X., Shi, X., Zhou, J., Li, E., Qiu, P., & Gou, Y. (2021b). High strain rate compressive strength behavior of cemented paste backfill using split Hopkinson pressure bar. *International journal of mining science and technology*, 31(3), 387-399.

- Chen, Y., Al-Neshawy, F., & Punkki, J. (2021a). Investigation on the effect of entrained air on pore structure in hardened concrete using MIP. *Construction and Building Materials*, 292, 123441.
- Cheng, Y., Qi, R., Hou, J., & Huang, Q. (2023). Feasibility study on utilization of copper tailings as raw meal and addition for low carbon Portland cement production. *Construction and Building Materials*, 382, 131275.
- Chowdary, M. V. S. S. P., & Asadi, S. S. (2021). Impact of material properties on characteristics of engineered cementitious composite. *Materials Today: Proceedings*, 42, 325-329.
- Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Turan, A., & 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.
- Coban, H. S., Cetin, B., Edil, T. B., & Sun, Q. (2022). Evaluation of mechanical degradation characteristics of recycled and natural aggregates under gyratory compaction effort. *Transportation Geotechnics*, 34, 100743.
- Coussy, S., Benzaazoua, M., Blanc, D., Moszkowicz, P., & Bussière, B. (2011). Arsenic stability in arsenopyrite-rich cemented paste backfills: a leaching test-based assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-3), 1467-1476.
- Da Silva, F. L., Araújo, F. G. S., Teixeira, M. P., Gomes, R. C., & Von Krüger, F. L. (2014). Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. *Ceramics International*, 40(10), 16085-16089.
- Das, A., Yadav, R. P., Chawla, V., Kumar, S., Țălu, Ș., Pinto, E. P., & Matos, R. S. (2021). Analyzing the surface dynamics of titanium thin films using fractal and multifractal geometry. *Materials Today Communications*, 27, 102385.
- de Araujo Thomaz, W., Miyaji, D. Y., & Possan, E. (2021). Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00645.
- Deb, D., Dey, G. K., & Panchal, S. (2017). Paste backfill technology: essential characteristics and assessment of its application for mill rejects of uranium ores. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70, 487-495.
- Del Rio-Salas, R., Ayala-Ramírez, Y., Loredó-Portales, R., Romero, F., Molina-Freaner, F., Minjarez-Osorio, C., Pi-Puig, T., Ochoa-Landín, L., & Moreno-Rodríguez, V. (2019). Mineralogy and geochemistry of rural road dust and nearby mine tailings: A case of ignored pollution hazard from an abandoned mining site in semi-arid zone. *Natural Resources Research*, 28, 1485-1503.
- Deng, D. Q., Liang, Y. H., & Huangfu, F. C. (2021). Properties of Gobi Aggregate and Sulfide-Rich Tailings Cemented Paste Backfill and Its Application in a High-Stress Metal Mine. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 6624915.

- Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., Aubertin, M., & Belem T. (2008). Microstructural and geochemical evolution of paste tailings in surface storage. *Minerals Engineering*, 21 (4), 341–353.
- Diquigiovanni, J., Fontana, M., & Vantini, S. (2022). Conformal prediction bands for multivariate functional data. *Journal of Multivariate Analysis*, 189, 104879.
- Dong, L., Deng, S., & Wang, F. (2020). Some developments and new insights for environmental sustainability and disaster control of tailings dam. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122270.
- Dong, Q., Liang, B., Jia, L., & 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.
- Drif, B., Taha, Y., Hakkou, R., & Benzaazoua, M. (2021). Integrated valorization of silver mine tailings through silver recovery and ceramic materials production. *Minerals Engineering*, 170, 107060.
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., & Moran, C. J. (2014). Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411-420.
- Emad, M. Z., Mitri, H., & Kelly, C. (2015). State-of-the-art review of backfill practices for sublevel stoping system. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(6), 544-556.
- Ercikdi, B., Külekci, G., & 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.
- Fahey, M., Helinski, M., & Fourie, A.B. (2009). Some aspects of the mechanics of arching in the paste backfilled stopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 46 (11), 1322-1336.
- Fall, M., & 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.
- Fall, M., & Samb, S. S. (2008). Pore structure of cemented tailings materials under natural or accidental thermal loads. *Materials Characterization*, 59(5), 598-605.
- Fall, M., Belem, T., Samb, S., & 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., Benzaazoua, M., & Ouellet, S. (2005). Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill. *Minerals engineering*, 18(1), 41-44.

- Fall, M., Benzaazoua, M., & Saa, E. G. (2008). Mix proportioning of underground cemented tailings backfill. *Tunnelling and Underground space technology*, 23(1), 80-90.
- Fall, M., Célestin, J. C., Pokharel, M., & Touré, M. (2010). A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill. *Engineering Geology*, 114(3-4), 397-413.
- Fang, G., Ho, W. K., Tu, W., & Zhang, M. (2018). Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 172, 476-487.
- Fang, K., Zhang, J., Cui, L., Haruna, S., & Li, M. (2023). Cost optimization of cemented paste backfill: State-of-the-art review and future perspectives. *Minerals Engineering*, 204, 108414.
- Fattahi, M., Nezafat, N. B., Tălu, Ș., Solaymani, S., Ghoranneviss, M., Elahi, S. M., Shafiekhani, A., & Rezaee, S. (2020). Topographic characterization of zirconia-based ceramics by atomic force microscopy: A case study on different laser irradiations. *Journal of Alloys and Compounds*, 831, 154763.
- Feng, G., Wang, Z., Qi, T., Du, X., Guo, J., Wang, H., Shi, X., & Wen, X. (2022). Effect of velocity on flow properties and electrical resistivity of cemented coal gangue-fly ash backfill (CGFB) slurry in the pipeline. *Powder Technology*, 396, 191-209.
- Fourie, A. (2009). Preventing catastrophic failures and mitigating environmental impacts of tailings storage facilities. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 1067-1071.
- Fridjonsson, E. O., Hasan, A., Fourie, A. B., & Johns, M. L. (2013). Pore structure in a gold mine cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 53, 144-151.
- Gao, B., Cao, S., & Yilmaz, E. (2023). Effect of content and length of polypropylene fibers on strength and microstructure of cementitious tailings-waste rock fill. *Minerals*, 13(2), 142.
- Gao, T., Shen, L., Shen, M., Chen, F., Liu, L., & Gao, L. (2015). Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants. *Journal of Cleaner Production*, 103, 160-170.
- Garbarino, E., Orveillon, G., & Saveyn, H. G. (2020). Management of waste from extractive industries: The new European reference document on the Best Available Techniques. *Resources Policy*, 69, 101782.
- Ghirian, A., & Fall, M. (2016). Long-term coupled behaviour of cemented paste backfill in load cell experiments. *Geomechanics and geoengineering*, 11(4), 237-251.
- Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 124, 105826.

- Glotov, V. E., Chlachula, J., Glotova, L. P., & Little, E. (2018). Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East. *Engineering Geology*, 245, 236-247.
- Gorai, B., & Jana, R. K. (2003). Characteristics and utilisation of copper slag—a review. *Resources, conservation and recycling*, 39(4), 299-313.
- Govreau, J. (2022). Mining industry embraces decarbonization sea change in 2022. *Engineering and Mining Journal*, 223(1), 18-24.
- Grice, T. (1998). Underground mining with backfill. 2nd Annual Summit æ Mine Tailings Disposal Systems, Brisbane, Nov, 696, 24-25.
- Guo, Z., Qiu, J., Jiang, H., Zhang, S., & Ding, H. (2021). Improving the performance of superfine-tailings cemented paste backfill with a new blended binder. *Powder Technology*, 394, 149-160.
- Haiqiang, J., Fall, M., & Cui, L. (2016). Yield stress of cemented paste backfill in sub-zero environments: experimental results. *Minerals Engineering*, 92, 141-150.
- Hamberg, R., Maurice, C., & Alakangas, L. (2018). The formation of unsaturated zones within cemented paste backfill mixtures—effects on the release of copper, nickel, and zinc. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 20809-20822.
- Hassani, F.P., Ouellet, J., & Hossein, M. (2001). Strength development in underground high-sulphate paste backfill operation. *CIM Bulletin*, 94 (1050), 57-62.
- He, Y., Liu, S., Zhang, X., Liu, W., Liao, G., & Xu, M. (2021). Influence of triethanolamine on mechanical strength and hydration performance of blended cement containing fly ash, limestone and slag. *Journal of Building Engineering*, 44, 102879.
- Helinski, M., Fahey, M., & Fourie, A. (2007a). Numerical modelling of cemented paste backfill deposition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 13 (10), 1308-1319.
- Helinski, M., Fourie, A.B., Fahey, F., & Ismail, M. (2007b). Assessment of the self-desiccation process in cemented mine backfills. *Canadian Geotechnical Journal*, 44 (10), 1148-1156.
- Helson, O., Eslami, J., Beaucour, A. L., Noumowe, A., & Gotteland, P. (2018). Durability of soil mix material subjected to wetting/drying cycles and external sulfate attacks. *Construction and Building Materials*, 192, 416-428.
- Henderson, A. (1998). The implementation of paste fill at the Henty gold mine. *Proc. Minefill'98*, 299-304.

- Huang, Z., Yilmaz, E., & Cao, S. Analysis of strength and microstructural characteristics of mine backfills containing fly ash and desulfurized gypsum, *Minerals* 11 (4)(2021) 409.
- Islam, K., & Murakami, S. (2021). Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. *Global Environmental Change*, 70, 102361.
- Jafari, M., & Grabinsky, M. (2021). Effect of hydration on failure surface evolution of low sulfide content cemented paste backfill. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 144, 104749.
- Jafari, M., Shahsavari, M., & Grabinsky, M. (2021). Drained triaxial compressive shear response of cemented paste backfill (CPB). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54 (6), 3309-3325.
- Ji, X., Gu, X., Wang, Z., Xu, S., Jiang, H., & Yilmaz, E. (2022). Admixture effects on the rheological/mechanical behavior and micro-structure evolution of alkali-activated slag backfills. *Minerals*, 13(1), 30.
- Jia, Q., Yang, Q., Guo, L., Knutsson, S., Xue, P., Liu, G., & Jiang, L. (2016). Effects of fine content, binder type and porosity on mechanical properties of cemented paste backfill with co-deposition of tailings sand and smelter slag. *Electron. J. Geotech. Eng*, 21(22), 7017-7032.
- Jiang, D., Li, X., Jiang, W., Li, C., Lv, Y., & Zhou, Y. (2020b). Effect of tricalcium aluminate and sodium aluminate on thaumasite formation in cement paste. *Construction and Building Materials*, 259, 119842.
- Jiang, H., Fall, M., & Cui, L. (2017). Freezing behaviour of cemented paste backfill material in column experiments. *Construction and building materials*, 147, 837-846.
- Jiang, H., Han, J., Li, Y., Yilmaz, E., Sun, Q., & Liu, J. (2020a). Relationship between ultrasonic pulse velocity and uniaxial compressive strength for cemented paste backfill with alkali-activated slag. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 35(4), 359-377.
- Jiang, Z. L., Pan, Y. J., Lu, J. F., & Wang, Y. C. (2022). Pore structure characterization of cement paste by different experimental methods and its influence on permeability evaluation. *Cement and Concrete Research*, 159, 106892.
- Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X., Liu, Y., & Li, H. (2017). Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. *Cement and concrete composites*, 83, 146-159.
- Jin, J., Qin, Z., Zuo, S., Feng, J., & Sun, Q. (2022). The role of rheological additives on fresh and hardened properties of cemented paste backfill. *Materials*, 15(9), 3006.

- Johnson, S. B., Franks, G. V., Scales, P. J., Boger, D. V., & Healy, T. W. (2000). Surface chemistry–rheology relationships in concentrated mineral suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, 58(1-4), 267-304.
- Jones, S. N., & Cetin, B. (2017). Evaluation of waste materials for acid mine drainage remediation. *Fuel*, 188, 294-309.
- Kaddah, F., Ranaivomanana, H., Amiri, O., & Rozière, E. (2022). Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates: Investigation on the microstructure and transport properties at cement paste and mortar scales. *Journal of CO2 Utilization*, 57, 101885.
- Kasap, T., Yilmaz, E., & Sari, M. (2022a). Effects of mineral additives and age on microstructure evolution and durability properties of sand-reinforced cementitious mine backfills. *Construction and Building Materials*, 352, 129079.
- Kasap, T., Yilmaz, E., Guner, N. U., & Sari, M. (2022c). Recycling dam tailings as cemented mine backfill: Mechanical and geotechnical properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 6993068.
- Kasap, T., Yilmaz, E., & Sari, M. (2022b). Physico-chemical and micro-structural behavior of cemented mine backfill: Effect of pH in dam tailings. *Journal of Environmental Management*, 314, 115034.
- Kasap, T., Yilmaz, E., Sari, M., & Karasu, S. (2023). Predicting long-term impact of cementitious mine fill considering sand as a copper-tailings substitution. *Powder Technology*, 428, 118887.
- Kasap, T., Yilmaz, E., Guner, N. U., & Sari, M. (2022d). Recycling dam tailings as cemented mine backfill: Mechanical and geotechnical properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 6993068.
- Kasinikota, P., & Tripura, D. D. (2021). Predicting the effect of crushed brick particle size on anisotropy, physical and mechanical properties of compressed stabilized earth blocks using ultrasonic pulse velocity. *Materials and Structures*, 54(3), 112.
- Ke, X., Zhou, X., Wang, X., Wang, T., Hou, H., & Zhou, M. (2016). Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 126, 345-350.
- Kefeni, K. K., & Mamba, B. B. (2021). Charcoal ash leachate and its sparingly soluble residue for acid mine drainage treatment: Waste for pollution remediation and dual resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128717.
- Kesimal, A., Yilmaz, E., & Ercikdi, B. (2004). Evaluation of paste backfill mixtures consisting of sulphide-rich mill tailings and varying cement contents. *Cement and concrete research*, 34(10), 1817-1822.

- Khudyakov, A. Y., & Vashchenko, S. V. (2020). Analysis of known dependences and the construction of new compaction equations for the fine-fraction materials of the mining and metallurgical complex. *Refractories and Industrial Ceramics*, 60(6), 618-626.
- Kim, J. (2022). Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Construction and Building Materials*, 328, 127071.
- Koohestani, B., Darban, A. K., & Mokhtari, P. (2018b). A comparison between the influence of superplasticizer and organosilanes on different properties of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 173, 180-188.
- Koohestani, B., Darban, A. K., Darezereshki, E., Mokhtari, P., Yilmaz, E., & Yilmaz, E. (2018a). The influence of sodium and sulfate ions on total solidification and encapsulation potential of iron-rich acid mine drainage in silica gel. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3520-3527.
- Koohestani, B., Mokhtari, P., Yilmaz, E., Mahdipour, F., & Darban, A. K. (2021). Geopolymerization mechanism of binder-free mine tailings by sodium silicate. *Construction and Building Materials*, 268, 121217.
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied geochemistry*, 51, 229-245.
- Kou, Y., Jiang, H., Ren, L., Yilmaz, E., & Li, Y. (2020). Rheological properties of cemented paste backfill with alkali-activated slag. *Minerals*, 10(3), 288.
- Koukoulas, N., Hämäläinen, J., Papanikolaou, D., Tourunen, A., & Jäntti, T. (2007). Mineralogical and elemental composition of fly ash from pilot scale fluidised bed combustion of lignite, bituminous coal, wood chips and their blends. *Fuel*, 86(14), 2186-2193.
- Kumar, U., Mishra, R., Singh, S. N., & Seshadri, V. (2003). Effect of particle gradation on flow characteristics of ash disposal pipelines. *Powder technology*, 132(1), 39-51.
- Kwong, Y. J., Apte, S. C., Asmund, G., Haywood, M. D., & Morello, E. B. (2019). Comparison of environmental impacts of deep-sea tailings placement versus on-land disposal. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(12), 287.
- Lamorski, K., Bieganski, A., Ryzak, M., Sochan, A., Sławiński, C., & Stelmach, W. (2014). Assessment of the usefulness of particle size distribution measured by laser diffraction for soil water retention modelling. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 803-813.
- Landriault, D. (2001). Backfill in underground mining. *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*, 601-614.

- Landriault, D. A., Counter, D., & Brown, R. (2000). Paste backfill study for deep mining at Kidd Creek. *CIM bulletin*, 93(1036), 156-161.
- Li, G., Hu, Z., Li, P., Yuan, D., Feng, Z., Wang, W., & Fu, Y. (2022a). Innovation for sustainable mining: Integrated planning of underground coal mining and mine reclamation. *Journal of Cleaner Production*, 351, 131522.
- Li, J., Cao, S., & Yilmaz, E. (2021b). Characterization of macro mechanical properties and microstructures of cement-based composites prepared from fly ash, gypsum and steel slag. *Minerals*, 12(1), 6.
- Li, J., Cao, S., Yilmaz, E., & Liu, Y. (2022b). Compressive fatigue behavior and failure evolution of additive fiber-reinforced cemented tailings composites. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29, 345-355.
- Li, J., Yilmaz, E., & Cao, S. (2020b). Influence of solid content, cement/tailings ratio, and curing time on rheology and strength of cemented tailings backfill. *Minerals*, 10(10), 922.
- Li, J., Yilmaz, E., & Cao, S. (2021a). Influence of industrial solid waste as filling material on mechanical and microstructural characteristics of cementitious backfills. *Construction and Building Materials*, 299, 124288.
- Li, J., Zhang, S., Wang, Q., Ni, W., Li, K., Fu, P., & Li, Z. (2020a). Feasibility of using fly ash-slag-based binder for mine backfilling and its associated leaching risks. *Journal of Hazardous Materials*, 400, 123191.
- Li, W., & 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.
- Li, X., Zhou, S., Zhou, Y., Min, C., Cao, Z., Du, J., Luo, L., & Shi, Y. (2019). Durability evaluation of phosphogypsum-based cemented backfill through drying-wetting cycles. *Minerals*, 9(5), 321.
- Liang, G., Liu, T., Li, H., & Wu, K. (2022). Shrinkage mitigation, strength enhancement and microstructure improvement of alkali-activated slag/fly ash binders by ultrafine waste concrete powder. *Composites Part B: Engineering*, 231, 109570.
- Libos, I., Cui, L., & Liu, X. (2021). Effect of curing temperature on time-dependent shear behavior and properties of polypropylene fiber-reinforced cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 311, 125302.
- Lin, F., & Meyer, C. (2009). Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure. *Cement and Concrete Research*, 39(4), 255-265.
- Liu, H., Zhang, J., Zhou, N., Guo, Y., Li, B., Yan, H., & Deng, X. (2020). Investigation of spatial stratified heterogeneity of cemented paste backfill characteristics in

- construction demolition waste recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119332.
- Liu, J., Sui, W., Zhang, D., & Zhao, Q. (2020b). Durability of water-affected paste backfill material and its clean use in coal mining. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119576.
- Liu, L., Fang, Z., Qi, C., Zhang, B., Guo, L., & Song, K. I. (2019). Numerical study on the pipe flow characteristics of the cemented paste backfill slurry considering hydration effects. *Powder technology*, 343, 454-464.
- Liu, S., Wang, L., Li, Q., & Song, J. (2020a). Hydration properties of Portland cement-copper tailing powder composite binder. *Construction and Building Materials*, 251, 118882.
- Liu, X., Sun, D., Liu, D., Meng, K., Ni, C., Shao, Z., & Sun, L. (2021). Simulation of ultrasonic propagation in porous cellular concrete materials. *Construction and Building Materials*, 285, 122852.
- Liu, X., Zhang, X., Wang, L., Qu, F., Shao, A., Zhao, L., Wang, H., Yue, X., Li, Y., Yan, W., & He, J. (2024). Research progress and prospects of intelligent technology in underground mining of hard rock mines. *Green and Smart Mining Engineering*.
- Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W., Keegan, A., Li, D., Pham, P. N., Huang, J., & Siddique, R. (2020c). Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties. *Journal of environmental management*, 262, 110352.
- Lottermoser, B. G. (2011). Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. *Elements*, 7(6), 405-410.
- Lounate, K., Coudert, L., Genty, T., Mercier, G., & Blais, J. F. (2020). Geochemical behavior and stabilization of spent sulfate-reducing biofilter mixtures for treatment of acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, 718, 137394.
- Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z., & 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.
- Lundahl, B. (2011). Analysis of dose distribution changes in radiation processing using a continuous variable F-test and p-value. *Radiation Physics and Chemistry*, 80(6), 755-760.
- M. Mhaya, A., Baghban, M. H., Faridmehr, I., Huseien, G. F., Abidin, A. R. Z., & Ismail, M. (2021). Performance evaluation of modified rubberized concrete exposed to aggressive environments. *Materials*, 14(8), 1900.

- Mahmood, A. A., & Elektorowicz, M. (2015). A review of sustainable management of mine tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 773, 1256-1260.
- Mahmutoğlu, Y. (2017). Prediction of weathering by thermal degradation of a coarse-grained marble using ultrasonic pulse velocity. *Environ Earth Sci* 76 (12): 785.
- Malusis, M. A., Evans, J. C., McLane, M. H., & Woodward, N. R. (2008). A miniature cone for measuring the slump of soil-bentonite cutoff wall backfill. *Geotechnical Testing Journal*, 31(5), 373-380.
- Mangane, M. B. C., Argane, R., Trauchessec, R., Lecomte, A., & Benzaazoua, M. (2018). Influence of superplasticizers on mechanical properties and workability of cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 116, 3-14.
- Mao, Y., Muhammad, F., Yu, L., Xia, M., Huang, X., Jiao, B., Shiao, Y., & Li, D. (2019). The solidification of lead-zinc smelting slag through bentonite supported alkali-activated slag cementitious material. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(7), 1121.
- Marchon, D., Kawashima, S., Bessaies-Bey, H., Mantellato, S., & Ng, S. (2018). Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research*, 112, 96-110.
- Mayes, W. M., Burke, I. T., Gomes, H. I., Anton, Á. D., Molnár, M., Feigl, V., & Ujaczki, É. (2016). Advances in understanding environmental risks of red mud after the Ajka spill, Hungary. *Journal of sustainable metallurgy*, 2, 332-343.
- Mbonimpa, M., Kwizera, P., & Belem, T. (2019). Mine backfilling in the permafrost, part II: effect of declining curing temperature on the short-term unconfined compressive strength of cemented paste backfills. *Minerals* 9 (3), 172.
- Mehdipour, I., & Khayat, K. H. (2018). Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review. *Construction and Building Materials*, 161, 340-353.
- Mensah, A. K., Marschner, B., Antoniadis, V., Stemn, E., Shaheen, S. M., & Rinklebe, J. (2021). Human health risk via soil ingestion of potentially toxic elements and remediation potential of native plants near an abandoned mine spoil in Ghana. *Science of The Total Environment*, 798, 149272.
- Mishra, D. P., & Das, S. K. (2010). A study of physico-chemical and mineralogical properties of Talcher coal fly ash for stowing in underground coal mines. *Materials characterization*, 61(11), 1252-1259.
- Mobasher, N., Bernal, S. A., Hussain, O. H., Apperley, D. C., Kinoshita, H., & Provis, J. L. (2014). Characterisation of Ba (OH) 2–Na₂SO₄–blast furnace slag cement-like composites for the immobilisation of sulfate bearing nuclear wastes. *Cement and Concrete Research*, 66, 64-74.

- Mocharla, I. R., Selvam, R., Govindaraj, V., & Muthu, M. (2022). Performance and life-cycle assessment of high-volume fly ash concrete mixes containing steel slag sand. *Construction and Building Materials*, 341, 127814.
- Nassani, A. A., Aldakhil, A. M., & Zaman, K. (2021). Ecological footprints jeopardy for mineral resource extraction: efficient use of energy, financial development and insurance services to conserve natural resources. *Resources Policy*, 74, 102271.
- Nematzadeh, M., & Fallah-Valukolaee, S. (2017). Erosion resistance of high-strength concrete containing forta-ferro fibers against sulfuric acid attack with an optimum design. *Construction and Building Materials*, 154, 675-686.
- Niroshan, N., Sivakugan, N., & Veenstra, R. L. (2018). Flow characteristics of cemented paste backfill. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(4), 2261-2272.
- Obenaus-Emler, R., Falah, M., & Illikainen, M. (2020). Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. *Construction and Building Materials*, 246, 118470.
- Oluwasola, E. A., Hainin, M. R., & Aziz, M. M. A. (2015). Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*, 2, 47-55.
- Ouattara, D., Belem, T., Mbonimpa, M., & 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., & Benzaazoua, M. (2007). Microstructural evolution of cemented paste backfill: Mercury intrusion porosimetry test results. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1654-1665.
- Ouellet, S., Bussière, B., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Aubertin, M. (2006). Reactivity and mineralogical evolution of an underground mine sulphidic cemented paste backfill. *Minerals engineering*, 19(5), 407-419.
- Ouffa, N., Benzaazoua, M., Belem, T., Trauchessec, R., & Lecomte, A. (2020). Alkaline dissolution potential of aluminosilicate minerals for the geosynthesis of mine paste backfill. *Materials Today Communications*, 24, 101221.
- Ouffa, N., Trauchessec, R., Benzaazoua, M., Lecomte, A., & Belem, T. (2022). A methodological approach applied to elaborate alkali-activated binders for mine paste backfills. *Cement and Concrete Composites*, 127, 104381.
- Panchal, S., Deb, D., & 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.

- Pappu, A., Saxena, M., & Asolekar, S. R. (2007). Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and environment*, 42(6), 2311-2320.
- Park, I., Tabelin, C. B., Jeon, S., Li, X., Seno, K., Ito, M., & Hiroyoshi, N. (2019). A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*, 219, 588-606.
- Phiri, T. C., Singh, P., & Nikoloski, A. N. (2022). The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review—Part I. *Minerals Engineering*, 180, 107474.
- Piasta, W. (2017). Analysis of carbonate and sulphate attack on concrete structures. *Engineering Failure Analysis*, 79, 606-614.
- Potvin, Y., Thomas, E., & Fourie, A. (2005). Handbook on mine fill. In Not available (p. 179). Australian Centre for Geomechanics.
- Prasad, C. V. S. R., & Lakshmi, T. V. (2020). Experimental investigation on bacterial concrete strength with *Bacillus subtilis* and crushed stone dust aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1111-1117.
- Qi, C., & Fourie, A. (2019). Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Minerals Engineering*, 144, 106025.
- Qi, C., Chen, Q., Fourie, A., & Zhang, Q. (2018c). An intelligent modelling framework for mechanical properties of cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 123, 16-27.
- Qi, C., Chen, Q., Fourie, A., Zhao, J., & Zhang, Q. (2018a). Pressure drop in pipe flow of cemented paste backfill: Experimental and modeling study. *Powder Technology*, 333, 9-18.
- Qi, C., Fourie, A., & Chen, Q. (2018b). Neural network and particle swarm optimization for predicting the unconfined compressive strength of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 159, 473-478.
- Qi, C., Fourie, A., Chen, Q., & Zhang, Q. (2018d). A strength prediction model using artificial intelligence for recycling waste tailings as cemented paste backfill. *Journal of Cleaner Production*, 183, 566-578.
- Qin, H., Cao, S., & Yilmaz, E. (2024). Grain-size composition effect on flexural response and pore structure of cementitious tail-rock fills with fiber reinforcement. *Developments in the Built Environment*, 20, 100558.
- Qiu, J., Guo, Z., Yang, L., Jiang, H., & Zhao, Y. (2020b). Effect of tailings fineness on flow, strength, ultrasonic and microstructure characteristics of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 263, 120645.

- Qiu, J., Guo, Z., Yang, L., Jiang, H., & Zhao, Y. (2020a). Effects of packing density and water film thickness on the fluidity behaviour of cemented paste backfill. *Powder Technology*, 359, 27-35.
- Raavi, S. S. D., & Tripura, D. D. (2021). Ultrasonic pulse velocity and statistical analysis for predicting and evaluating the properties of rammed earth with natural and brick aggregates. *Construction and Building Materials*, 298, 123840.
- Rahman, M. A., Imteaz, M., Arulrajah, A., & Disfani, M. M. (2014). Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials. *Journal of Cleaner Production*, 66, 75-84.
- Rankine, R. M., & Sivakugan, N. (2007). Geotechnical properties of cemented paste backfill from Cannington Mine, Australia. *Geotechnical and Geological Engineering*, 25, 383-393.
- Rao, S. M., & Reddy, B. V. (2006). Characterization of Kolar gold field mine tailings for cyanide and acid drainage. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24, 1545-1559.
- Raposo, F. (2016). Evaluation of analytical calibration based on least-squares linear regression for instrumental techniques: A tutorial review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 77, 167-185.
- Rashad, A. M., Bai, Y., Basheer, P. A. M., Milestone, N. B., & Collier, N. C. (2013). Hydration and properties of sodium sulfate activated slag. *Cement and concrete composites*, 37, 20-29.
- Ravelet, F., Bakir, F., Khelladi, S., & Rey, R. (2013). Experimental study of hydraulic transport of large particles in horizontal pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 45, 187-197.
- Robinsky, E. I. (1975). Thickened discharge. A new approach to tailings disposal.
- Romaguera-Barcelay, Y., Pedraça, A. S., Moreira, J. A., Almeida, A., Tavares, P. B., Brito, W. R., Matos, R. S., Pires, M. A., Pinto, E. P., & da Fonseca Filho, H. D. (2021). Evaluation of nanostructured BiZn_{0.5}Ti_{0.5}O₃ thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Materials Science and Engineering: B*, 267, 115090.
- Roshani, A., & Fall, M. (2020). Rheological properties of cemented paste backfill with nano-silica: Link to curing temperature. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103785.
- Rusdinar, Y., Edraki, M., Baumgartl, T., Mulligan, D., & Miller, S. (2013). Long term performance of hydrogeochemical riverine mine tailings deposition at Freeport Indonesia. *Mine Water and the Environment*, 1(32), 56-70.

- Saedi, A., Jamshidi-Zanjani, A., & Darban, A. K. (2021). A review of additives used in the cemented paste tailings: Environmental aspects and application. *Journal of Environmental Management*, 289, 112501.
- Sari, M., Yilmaz, E., & Kasap, T. (2023a). Long-term ageing characteristics of cemented paste backfill: Usability of sand as a partial substitute of hazardous tailings. *Journal of Cleaner Production*, 401, 136723.
- Sari, M., Yilmaz, E., Kasap, T., & Guner, N. U. (2022). Strength and microstructure evolution in cemented mine backfill with low and high pH pyritic tailings: Effect of mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 328, 127109.
- Sari, M., Yilmaz, E., Kasap, T., & Karasu, S. (2023b). Exploring the link between ultrasonic and strength behavior of cementitious mine backfill by considering pore structure. *Construction and Building Materials*, 370, 130588.
- Sarkar, A., Rano, R., Udaybhanu, G., & Basu, A. K. (2006). A comprehensive characterisation of fly ash from a thermal power plant in Eastern India. *Fuel Processing Technology*, 87(3), 259-277.
- Senapati, P. K., Mishra, B. K., & Parida, A. (2013). Analysis of friction mechanism and homogeneity of suspended load for high concentration fly ash & bottom ash mixture slurry using rheological and pipeline experimental data. *Powder technology*, 250, 154-163.
- Shehata, N., Sayed, E. T., & Abdelkareem, M. A. (2021). Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Science of The Total Environment*, 762, 143166.
- Shi, X. S., Gao, Y., & Ding, J. (2021). Estimation of the compression behavior of sandy clay considering sand fraction effect based on equivalent void ratio concept. *Engineering Geology*, 280, 105930.
- Shukla, A., Patwa, A., Parde, D., & Vijay, R. (2023). A review on generation, characterization, containment, transport and treatment of fecal sludge and septage with resource recovery-oriented sanitation. *Environmental Research*, 216, 114389.
- Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., & Hossain, K. M. A. (2016). Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 113, 163-173.
- Simms, P., & Grabinsky, M. (2009). Direct measurement of matric suction in triaxial tests on early-age cemented paste backfill. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(1), 93-101.
- Singh, P., Ghosh, C. N., Behera, S. K., Mishra, K., Kumar, D., Buragohain, J., & Mandal, P. K. (2019). Optimisation of binder alternative for cemented paste fill in underground metal mines. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-8.

- Sivakugan, N., Rankine, K. J., & Rankine, K. S. (2006). Study of drainage through hydraulic fill stopes using method of fragments. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24, 79-89.
- Skousen, J., Zipper, C. E., Rose, A., Ziemkiewicz, P. F., Nairn, R., McDonald, L. M., & Kleinmann, R. L. (2017). Review of passive systems for acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*, 36, 133-153.
- Solaymani, S., Kulesza, S., Țălu, Ș., Bramowicz, M., Nezafat, N. B., Dalouji, V., Rezaee, S., Karami, H., Malekzadeh, M., & Dorbidi, E. S. (2018). The effect of different laser irradiation on rugometric and microtopographic features in zirconia ceramics: Study of surface statistical metrics. *Journal of Alloys and Compounds*, 765, 180-185.
- Song, X., Hao, Y., Wang, S., Zhang, L., Liu, H., Yong, F., Dong, Z., & Yuan, Q. (2022). Dynamic mechanical response and damage evolution of cemented tailings backfill with alkalized rice straw under SHPB cycle impact load. *Construction and Building Materials*, 327, 127009.
- Sun, Q., Zhang, J., & Zhou, N. (2018). Early-age strength of aeolian sand-based cemented backfilling materials: experimental results. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43, 1697-1708.
- Sun, X., Zhao, Y., Tian, Y., Wu, P., Guo, Z., Qiu, J., Xing, J., & Xiaowei, G. (2021). Modification of high-volume fly ash cement with metakaolin for its utilization in cemented paste backfill: The effects of metakaolin content and particle size. *Powder Technology*, 393, 539-549.
- Țălu, Ș., Kulesza, S., Bramowicz, M., Pathak, S., & Jain, N. K. (2019). Multiscale surface texture and fractal analysis of straight bevel gears finished by PECH and PECF process. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(16), 1882-1887.
- Tang, Y., Zheng, J., Guo, L., & Zhao, Y. (2021). Effect of gypsum addition on the mechanical and microstructural performance of sulphide-rich cemented paste backfill. *Minerals*, 11(3), 283.
- Tariq, A., & Nehdi, M. (2007, November). Developing durable paste backfill from sulphidic tailings. In *Proceedings of the institution of civil engineers-waste and resource management* (Vol. 160, No. 4, pp. 155-166). Thomas Telford Ltd.
- Telschow, F. J., & Schwartzman, A. (2022). Simultaneous confidence bands for functional data using the Gaussian kinematic formula. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 216, 70-94.
- Thomas, E., Nantel, J., & Notely, K. (1979). *Fill Technology in Underground Metalliferous Mines* (International Academic Services, Ed.). Canada: International Academic Services.

- Tian, X., & Xu, W. (2022). Prediction of the mechanical performance of cemented tailings backfill using ultrasonic pulse velocity measurement. *Minerals*, 12(8), 986.
- Tozsin, G., Arol, A. I., Oztas, T., & Kalkan, E. (2014). Using marble wastes as a soil amendment for acidic soil neutralization. *Journal of environmental management*, 133, 374-377.
- US EPA and Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Release Site: Project Completion Fact Sheet U.S. Environmental Protection Agency, Atlanta, GA 2014.
- Ustabas, I., Erdogdu, S., Omur, I., & Yilmaz, E. (2021). Pozzolanic effect on the hydration heat of cements incorporating fly ash, obsidian, and slag additives. *Advances in Civil Engineering*, 2021.
- Vangla, P., & Latha, G. M. (2015). Influence of particle size on the friction and interfacial shear strength of sands of similar morphology. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1, 1-12.
- Wang, C., Harbottle, D., Liu, Q., & Xu, Z. (2014). Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. *Minerals Engineering*, 58, 113-131.
- Wang, J., Fu, J., Song, W., Zhang, Y., & Wang, Y. (2020a). Mechanical behavior, acoustic emission properties and damage evolution of cemented paste backfill considering structural feature. *Construction and Building Materials*, 261, 119958.
- Wang, J., Zhang, C., Fu, J., Song, W., & Zhang, Y. (2021a). Effect of water saturation on mechanical characteristics and damage behavior of cemented paste backfill. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 6624-6639.
- Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., & Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184, 594-600.
- Wang, X. Q., Wan, W., Yao, Z. L., Gao, R. G., Lu, Z. X., Tang, X. Y., & Fan, B. J. (2023). Study on strength characteristics and thickening characteristics of classified-fine cemented backfill in gold mine. *Scientific Reports*, 13(1), 8361.
- Wang, Y., Cao, Y., Cui, L., Si, Z., & Wang, H. (2020b). Effect of external sulfate attack on the mechanical behavior of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 263, 120968.
- Wang, Z., Qi, T., Feng, G., Bai, J., Pei, X., Cui, B., Song, C., & Ran, H. (2021b). Electrical resistivity method to appraise static segregation of gangue-cemented paste backfill in the pipeline. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 192, 104385.

- Wang, Z., Wu, A., Wang, S., & Hu, X. (2024). Effect and mechanism of time-dependent and economical expansion materials in improving the active roof-contact for cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 439, 137339.
- Wu, A. X., Cheng, H., Yang, Y., & Zhang, L. F. (2017, June). Development and challenge of paste technology in China. In *Paste 2017: Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings* (pp. 2-11). University of Science and Technology Beijing.
- Wu, A., Wang, Y., Wang, H., Yin, S., & Miao, X. (2015). Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill. *International Journal of Mineral Processing*, 143, 65-71.
- Wu, A., Wang, Y., Xiao, B., Wang, J., & Wang, L. (2024). Key theory and technology of cemented paste backfill for green mining of metal mines. *Green and Smart Mining Engineering*, 1(1), 27-39.
- Wu, D. (2020). *Mine waste management in China: Recent development*. Singapore: Springer.
- Wu, D., Zhang, Y., & Liu, Y. (2016). Mechanical performance and ultrasonic properties of cemented gangue backfill with admixture of fly ash. *Ultrasonics*, 64, 89-96.
- Xie, J., & Kayali, O. (2016). Effect of superplasticiser on workability enhancement of Class F and Class C fly ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 122, 36-42.
- Xin, J., Liu, L., Jiang, Q., Yang, P., Qu, H., & Xie, G. (2022). Early-age hydration characteristics of modified coal gasification slag-cement-aeolian sand paste backfill. *Construction and Building Materials*, 322, 125936.
- Xiu, Z., Wang, S., Ji, Y., Wang, F., Ren, F., & Nguyen, V. T. (2021). The effects of dry and wet rock surfaces on shear behavior of the interface between rock and cemented paste backfill. *Powder Technology*, 381, 324-337.
- Xu, W., Li, Q., & Liu, B. (2020c). Coupled effect of curing temperature and age on compressive behavior, microstructure and ultrasonic properties of cemented tailings backfill. *Construction and Building Materials*, 237, 117738.
- Xu, W., Zhang, Y., & Liu, B. (2020a). Influence of silica fume and low curing temperature on mechanical property of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 254, 119305.
- Xu, W., Zhang, Y., Zuo, X., & Hong, M. (2020b). Time-dependent rheological and mechanical properties of silica fume modified cemented tailings backfill in low temperature environment. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103804.

- Xue, G., Yilmaz, E., Song, W., & Cao, S. (2018). Compressive strength characteristics of cemented tailings backfill with alkali-activated slag. *Applied Sciences*, 8(9), 1537.
- Yan, B., Jia, H., Yilmaz, E., Lai, X., Shan, P., & Hou, C. (2022a). Numerical study on microscale and macroscale strength behaviors of hardening cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 321, 126327.
- Yan, B., Zhu, W., Hou, C., Yilmaz, E., & Saadat, M. (2020). Characterization of early age behavior of cemented paste backfill through the magnitude and frequency spectrum of ultrasonic P-wave. *Construction and Building Materials*, 249, 118733.
- Yan, Z., Yin, S., Chen, X., & Wang, L. (2022b). Rheological properties and wall-slip behavior of cemented tailing-waste rock backfill (CTWB) paste. *Construction and Building Materials*, 324, 126723.
- Yang, J., Zhang, Y., He, X., Su, Y., Tan, H., Ma, M., & Strnadel, B. (2021). Heat-cured cement-based composites with wet-grinded fly ash and carbide slag slurry: Hydration, compressive strength and carbonation. *Construction and Building Materials*, 307, 124916.
- Yang, Y., Wei, Z., Fourie, A., Chen, Y., Zheng, B., Wang, W., & Zhuang, S. (2019). Particle shape analysis of tailings using digital image processing. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(25), 2639.
- Yang, Y., Zhao, T., Jiao, H., Wang, Y., & Li, H. (2020). Potential effect of porosity evolution of cemented paste backfill on selective solidification of heavy metal ions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 814.
- Yazici, S., & Arel, H.S. (2012). Effects of fly ash fineness on the mechanical properties of concrete. *Sadhana*, 37(3), 389-403.
- Yi, X. W., Ma, G. W., & Fourie, A. (2015). Compressive behaviour of fibre-reinforced cemented paste backfill. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(3), 207-215.
- Yilmaz, E., Belem, T., & Benzaazoua, M. (2015b). Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions. *Engineering Geology*, 185, 52-62.
- Yilmaz, E., Belem, T., Bussière, B., Mbonimpa, M., & Benzaazoua, M. (2015a). Curing time effect on consolidation behaviour of cemented paste backfill containing different cement types and contents. *Construction and Building Materials*, 75, 99-111.
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., & Cihangir, F. (2020). Evaluation of the neutralization performances of the industrial waste products (IWPs) in sulphide-rich environment of cemented paste backfill. *Journal of Environmental Management*, 258, 110037.

- Yılmaz, T., Ercikdi, B., & Deveci, H. (2018). Utilisation of construction and demolition waste as cemented paste backfill material for underground mine openings. *Journal of environmental management*, 222, 250-259.
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., & Deveci, H. (2021). Evaluation of geochemical behaviour of flooded cemented paste backfill of sulphide-rich tailings by dynamic-tank leaching test. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(5), 336-355.
- Yin, S., Yan, Z., Chen, X., & Wang, L. (2022). Effect of fly-ash as fine aggregate on the workability and mechanical properties of cemented paste backfill. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01039.
- Yu, H., Zahidi, I., Fai, C. M., Liang, D., & Madsen, D. Ø. (2024). Mineral waste recycling, sustainable chemical engineering, and circular economy. *Results in Engineering*, 21, 101865.
- Yue, C. (2021). Low-carbon binders produced from waste glass and low-purity metakaolin for cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 312, 125443.
- Zhang, C., Wang, J., Song, W., & Fu, J. (2022). Pore structure, mechanical behavior and damage evolution of cemented paste backfill. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 2864-2874.
- Zhang, H., Cao, S., & Yilmaz, E. (2023b). Carbon nanotube reinforced cementitious tailings composites: Links to mechanical and microstructural characteristics. *Construction and Building Materials*, 365, 130123.
- Zhang, H., Kou, J., Sun, C., Wang, P., Lin, J., Li, J., & Jiang, Y. (2023a). Optimization of cemented paste backfill with carbon nanotubes as a sustainable treatment for lead-containing tailings. *Powder Technology*, 415, 118152.
- Zhang, Y., Aslani, F., & Lehane, B. (2021). Compressive strength of rubberized concrete: Regression and GA-BPNN approaches using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 307, 124951.
- Zhao, K., Yu, X., Zhu, S., Zhou, Y., Wang, Q., & Wang, J. (2020). Acoustic emission investigation of cemented paste backfill prepared with tantalum–niobium tailings. *Construction and Building Materials*, 237, 117523.
- Zheng, J., & Li, L. (2020). Experimental study of the “short-term” pressures of uncemented paste backfill with different solid contents for barricade design. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123068.
- Zheng, J., Zhu, Y., & 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.

- Zhou, N., Du, E., Zhang, J., Zhu, C., & Zhou, H. (2021). Mechanical properties improvement of Sand-Based cemented backfill body by adding glass fibers of different lengths and ratios. *Construction and Building Materials*, 280, 122408.
- Zhou, N., Yao, Y. N., Song, W. J., He, Z. W., Meng, G. H., & Liu, Y. (2020). Present situation and prospect of coal gangue treatment technology. *J. Min. Saf. Eng.*, 37(11).
- Zhou, Y., Fall, M., & Haruna, S. (2022). Flow ability of cemented paste backfill with chloride-free antifreeze additives in sub-zero environments. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104359.
- Zhu, C., Zhang, J., Zhou, N., Li, M., & Guo, Y. (2021). Permeability of Sand-Based Cemented Backfill under Different Stress Conditions: Effects of Confining and Axial Pressures. *Geofluids*, 2021(1), 6657662.

