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

ENDÜSTRİYEL KATI ATIK İKAMELİ ÇİMENTOLU MACUN DOLGULARIN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ TESTLER KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Tuğba KESKİN

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, Tuğba KESKİN tarafından hazırlanan *Endüstriyel Katı Atık İkameli Çimentolu Macun Dolguların Karakteristik Özelliklerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testler Kullanılarak Değerlendirilmesi* adlı bu tez çalışması, 27/06/2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri		**Ünvanı, Adı SOYADI**	**İmza**
Başkan	:	Prof. Dr. Erol YILMAZ	
Üye	:	Doç. Dr. Eren KÖMÜRLÜ	
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ	

ETİK BEYAN

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim "Endüstriyel Katı Atık İkameli Çimentolu Macun Dolguların Karakteristik Özelliklerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testler Kullanılarak Değerlendirilmesi" 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 anlaşılacak bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.
27/06/2024

Tuğba KESKİN

ÖN SÖZ

“Endüstriyel Katı Atık İkameli Çimentolu Macun Dolguların Karakteristik Özelliklerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testler Kullanılarak Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Tez kapsamında geoteknik, atık yönetimi ve dolgu laboratuvarında deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Yüksek lisans programı boyunca rehberliği, deneyimi ve teknik yardımları için danışmanım Prof. Dr. Erol YILMAZ’a en içten teşekkürlerimi sunarım. Jüri üyesi olarak değerli zamanlarını ayırdıkları için Doç. Dr. Eren KÖMÜRLÜ ve Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ’e teşekkür ederim.

Tez çalışmaları sırasında bana verdikleri her türlü yardım, destek ve rehberlik için Arş. Gör. Muhammet SARI ve Yüksek İnşaat Mühendisi Tuğrul KASAP’a teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen ve her daim yanımda olan sevgili annem, babam ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

Tuğba KESKİN
RİZE/2024

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY I
ETİK BEYAN II
ÖN SÖZ III
İÇİNDEKİLER IV
ÖZET VII
ABSTRACT VIII
KISALTMALAR IX
TABLOLAR LİSTESİ X
ŞEKİLLER LİSTESİ XI
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 6
1.1. Maden Atıklarının Geri Dönüşümü ve Yeniden Kullanımı 6
1.2. Yeraltı Dolgu Yöntemleri 7
1.3. Çimentolu Macun Dolgu Yöntemi 10
1.3.1. Atık Susuzlaştırma, Karıştırma ve İletim 12
1.3.2. Dolgu Barikatı, İzleme ve Yönetim 15
1.4. Çimentolu Macun Dolgu Performansını Etkileyen Faktörler 17
1.4.1. Maden Atıkları 17
1.4.1.1. Maden Atıklarının Fiziksel Özellikleri 17
1.4.1.2. Maden Atıklarının Mineralojik ve Kimyasal Bileşimi 19
1.4.2. Macun Dolguda Kullanılan Diğer Endüstriyel Katı Atıklar 21
1.4.2.1. Kömür Atıkları 21
1.4.2.1.1. Kömür Atıklarının Özellikleri 24
1.4.2.2. Granüle Yüksek Fırın Cürufu 31
1.4.2.2.1. Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Özellikleri 33
1.4.2.3. Belediye Katı Atıkları 38
1.4.2.3.1. MSW Taban ve Uçucu Küllerinin Özellikleri 40
1.4.2.4. Biyokütle Atıkları 46
1.4.2.4.1. Biyokütle Atıklarının Özellikleri 50
1.4.3. Bağlayıcılar 52

1.4.3.1. Bağlayıcı Çeşitleri ve Oranı 52
1.4.3.2. Tamamlayıcı Çimento Malzemeleri 53
1.4.3.3. Kimyasal Katkı Maddeleri 56
1.4.4. Karışım Suyu 57
1.5. Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) Yöntemi 57
1.5.1. UPV'nin Temel Prensipleri 58
1.5.2. Ultrasonik Darbe Hızı Test Yöntemleri 61
1.5.2.1. Doğrudan Yöntem 61
1.5.2.2. Yarı Doğrudan Yöntem 61
1.5.2.3. Dolaylı Yöntem 62
1.5.3. Ultrasonik Darbe Hızını Etkileyen Faktörler 62
1.5.3.1. Agrega Boyutu ve Türü 62
1.5.3.2. Su/Çimento Oranı ve Nem İçeriği 63
1.5.3.3. Çimento ve Katkı Tipi 63
1.5.3.4. Kür Süresi 63
1.5.3.5. Sıcaklık 64
1.5.3.6. Donatı ve Çelik Lif Hacmi 64
1.5.3.7. Diğer Faktörler 65
2. MALZEME VE YÖNTEM 65
2.1. ÇMD Bileşenleri 65
2.1.1. Piritik Maden Atıkları 65
2.1.2. Çimento, Cüruf ve Uçucu Kül 69
2.1.3. Boşluk ve Musluk Suyu 70
2.2. ÇMD Karışımlarının Üretim Aşamaları 70
2.3. Kullanılan Yöntemler 72
2.3.1. Tekrarlanabilir Mini Çökme Testleri 72
2.3.2. UPV Ölçümleri 73
2.3.3. UCS Testleri 74
2.3.4. MIP Testleri 74
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 76
3.1. Farklı pH Değerlerine Sahip Atıklar ile Hazırlanan Mineral Katkılı ÇMD'lerin Gözenek Yapısının Değerlendirilmesi 76

3.2. UCS Sonuçları ve Toplam Porozite ile İlişkisi 82
3.3. UPV Ölçüm Sonuçları ve Toplam Porozite ile İlişkisi 87
3.4. UCS ve UPV Arasındaki Korelasyon 91
4. SONUÇLAR 96
KAYNAKÇA 98
EKLER 98

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği
Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi
Danışman : Prof. Dr. Erol YILMAZ
Hazırlayan : Tuğba KESKİN
Yıl : 2024
Sayfa Sayısı : 118

ÖZET

ENDÜSTRİYEL KATI ATIK İKAMELİ ÇİMENTOLU MACUN DOLGULARIN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ TESTLER KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Madencilik sektöründe sıklıkla kullanılan çimentolu macun dolgu (ÇMD), geleneksel olarak maden atıkları, hidrolik bağlayıcılar ve karışım suyundan elde edilir. ÇMD'nin gözeneklilik/gözenek bağlantısı ve mukavemet özelliklerini anlamak, onun nihai tasarımı için esastır. ÇMD'nin kalitesini ve performansını etraflıca değerlendirebilmek için daha kolay ve az maliyetli teknik ve uygulamalara yönelim artmıştır. Performans değerlendirme uygulamalarından bir tanesi ultrasonik darbe hızı (UPV) yöntemidir. UPV basitçe malzemelerin içyapısını ve bütünlüğünü değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Ultrasonik dalgalar, malzeme içine gönderilir ve yansıyan dalgaların hızı ölçülerek malzemenin yoğunluğu, elastik modülü ve mukavemeti hakkında bilgi elde edilir. ÇMD gibi kompozit malzemelerde, bu yöntem sayesinde boşluklar, çatlaklar ve diğer iç hasarlar tespit edilebilir. Bu çalışmada UPV tekniği kullanılarak ÇMD'nin mukavemet gelişimi ve gözenek yapısındaki değişimin değerlendirilmesi ve ayrıca tahribatlı bir yöntem olan tek eksenli basınç dayanımı (UCS) testi ile UPV arasında bir korelasyon oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak iki tip atık (düşük pH, DPA ve yüksek pH, YPA) sabit katı içeriği (ağırlıkça %72) ve bağlayıcı oranlarında (ağırlıkça %4-6-8) hazırlanmıştır. Dolgunun mikro yapı, mekanik ve ultrasonik özellikleri arasındaki bağlantıyı araştırmak için çimento (OPC) ikamesi olarak sabit oranda uçucu kül (UK)-cüruf (YFC) (OPC/YFC-UK: 70/30) kullanılmıştır. Oluşturulan bu numuneler farklı kür süreleri (3-90 gün) sonunda deneylere tabii tutulmuştur. Yapılan bu deneyler sonucunda YPA içeren dolgu numunelerindeki toplam gözenekliliğinin, DPA içeren numunelere kıyasla daha düşük (%56'ya kadar) olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca DPA'ların ÇMD'lerin mukavemetini olumsuz yönde etkileyerek mikro yapısını bozduğu tespit edilmiştir. Düşük pH değerinden kaynaklı mikro yapıdaki bu bozulmaların bağlayıcı dozajının arttırılması ve cüruf ikamesi ile azaldığı gözlemlenmiştir. Dolgu numunelerinde artan bağlayıcı oranı ve yaşla birlikte toplam gözenekliliğin azaldığı tespit edilmiştir. Farklı atık ve mineral katkı türüne bağlı olarak UPV ve UCS arasında mükemmel korelasyon eğrileri bulunmuştur. Hem ölçülen hem de beklenen mukavemet değerleri büyük ölçüde tutarlı olup çoğu veri % 95 güven aralığında yer almıştır. Sonuç olarak, bu tez çalışmasının yeraltı madenlerinde başarıyla kullanılan ÇMD'nin daha etkin, hızlı ve az maliyetli bir şekilde performansının tespit edilmesine imkân sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Düşük/yüksek pH atık, Çimentolu macun dolgu, Ultrasonik darbe hızı, Tek eksenli basınç dayanımı, Mikroyapı, Performans değerlendirmesi

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies
Department : Civil Engineering
Thesis Type : Master's Thesis
Supervisor : Prof. Dr. Erol YILMAZ
Author : Tuğba KESKİN
Year : 2024
Pages : 118

ABSTRACT

EVALUATION OF CHARACTERISTIC FEATURES OF INDUSTRIAL SOLID WASTE SUBSTITUTED CEMENTED PASTE BACKFILLS USING DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTS

Cemented paste backfills (CPB), frequently employed in the mining industry, is traditionally obtained from mine tailings, hydraulic binders and mixing water. Understanding CPB's porosity/pore connection and strength features is essential for its ultimate design. To thoroughly assess CPB's quality and performance, the trend towards easier and less costly techniques and applications has increased in recent years. One of the performance evaluation applications is the ultrasonic pulse velocity (UPV) method. It is simply a method employed to evaluate the internal structure and integrity of materials. Ultrasonic waves are sent into the material and by measuring the speed of the reflected waves, information about the density, elastic modulus and strength of the material is obtained. In composite materials such as CPB, voids, cracks and other internal damages can be detected thanks to this method. In this study, it was aimed to assess the strength development and change in pore structure of CPB by using the UPV technique, and also to establish a correlation between uniaxial compressive strength (UCS) test, which is a destructive method, and UPV. For this purpose, two types of tailings (low pH, LPT and high pH, HPT) were made with constant solid content (72% by weight) and binder ratios (4-6-8wt% by weight). A fixed ratio of fly ash (FA)-slag (GBFS) (OPC/GBFS-FA:70/30) was used as cement (OPC) substitute to explore the link between microstructure, mechanical and ultrasonic properties of backfilling. These specimens were subjected to experiments after different curing periods (3-90 days). As a result of these experiments, it was observed that the total porosity of the backfill samples containing HPT was lower (up to 56%) compared to the samples containing LPT. Besides, it has been determined that LPT negatively affects the strength of CPBs and disrupts their microstructure. It was observed that these deteriorations in the microstructure caused by low pH value decreased by increasing the binder dosage and slag substitution. It was determined that the total porosity decreased with increasing binder ratio and age in the fill specimens. Excellent correlation curves were found between UPV and UCS depending on different types of tailings and mineral additives. Both measured and expected strength values were largely consistent, with most data falling within the 95% confidence interval. As a result, it is thought that this thesis study will enable the determination of CPB performance, which is used successfully in underground mines, in a more effective, faster and less costly way.

Keywords: Low/high pH tailings, Cemented paste backfill, Ultrasonic pulse velocity, Uniaxial compressive strength, Microstructure, Performance assessment

KISALTMALAR

AMD	:	Asit maden drenajı
ASTM	:	American test materyallerinin standardı
BET	:	Brunauer-emmett-teller
$Ca(OH)_2$	:	Portlandit
CaO	:	Kalsiyum oksit
C_c	:	Eğrilik katsayısı
CH	:	Kalsiyum hidroksit
ÇMD	:	Çimentolu macun dolgu
C-S-H	:	Kalsiyum-Silikat-Hidrat
C_u	:	Üniformluk katsayısı
EC	:	Elektriksel iletkenlik
Eh	:	Redoks potansiyeli
FA/UK	:	Uçucu kül
GBFS/YFC	:	Yüksek fırın cürufu
G_s	:	Özgül ağırlık
HPA	:	Yüksek pH proses atığı
DPA	:	Düşük pH proses atığı,
ICP-OES	:	İndüktif olarak eşleşmiş plazma optik emisyon spektroskopisi yöntemi
MDD	:	Maksimum kuru yoğunluk
MIP	:	Cıva intrüzyon porozimetrisi
OMC	:	Optimum nem içeriği
OPC	:	Standard Portland çimentosu
PSD	:	Tane boyu dağılımı
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
SO_4^{-2}	:	Sülfat
SSA, S_s	:	Özgül yüzey alanı
UCS	:	Tek eksenli basınç dayanımı
XRD	:	X-Işını Difraktometresi
XRF	:	X-Işını floresans spektrometresi

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Kömür uçucu külünün (CFA) fiziksel özellikleri 26
Tablo 2. Farklı ülkerlerdeki CBA'ların fiziksel özellikleri 27
Tablo 3. Farklı kömürlerden elde edilen CFA'ların kimyasal özellikleri 30
Tablo 4. GBFS'nin fiziksel özellikleri 35
Tablo 5. GBFS'nin kimyasal özellikleri 37
Tablo 6. Çelik cürufun ana mineralojik bileşenleri 38
Tablo 7. MSW-BA'nın kimyasal özellikleri 44
Tablo 8. MSW-FA'nın kimyasal özellikleri 45
Tablo 9. Biyo-küllerin kimyasal özellikleri 51
Tablo 10. Farklı tip atıkların karakteristik özellikleri 67
Tablo 11. Boşluk ve musluk suyunun kimyasal/jeokimyasal parametreleri 70
Tablo 12. ÇMD numunelerinin reçetesi 71
Tablo 13. Tüm ÇMD numunelerinin farklı korelasyon sonuçları 92

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Maden metodunun şematik gösterimi 9
Şekil 2. Dolgu tipleri: kaya (a); hidrolik (b) ve macun (c) 10
Şekil 3. ÇMD'lerin ana bileşenleri 11
Şekil 4. ÇMD çökme testi adımları: koninin doldurulması (a); koninin kaldırılması (b); ve çökme değeri ölçümü (c) 11
Şekil 5. Farklı maden atıklarının tipik tane boyu dağılım eğrileri 12
Şekil 6. Tipik bir macun dolgu tesisinin akış şeması 13
Şekil 7. Macun dolgu boru hattı iletimi: macun dolgu boru askıları (a); göğüs plakası (b); boru hattı basıncı (c); ve macun dolgusu 14
Şekil 8. Barikat imalatı: delikli cıvata (a); kablo + tel örgü (b); püskürtme beton + reçine cıvata (c); ve püskürtme (d) 16
Şekil 9. Kömür uçucu külün üretim ve kullanım miktarları 23
Şekil 10. CFA'nın SEM görüntüleri: tip F (a-b); ve tip C (c-d) 25
Şekil 11. Doğal (a) ve öğütülmüş (b) formdaki CBA 27
Şekil 12. Kömür taban külünün (CBA) SEM görüntüleri 28
Şekil 13. Kömür taban külünün (CBA) SEM görüntüleri 29
Şekil 14. Dünyadaki yüksek fırın cürufu üretimi 32
Şekil 15. GBFS'nin 6 farklı boyuttaki SEM görüntüsü 34
Şekil 16. Çimentolu malzemelerin CaO-Al_2O3-SiO_2 üçlü diyagramı (A); ve CaO-Al_2O_3-SiO_2 sistemindeki hidrat fazları (B) 37
Şekil 17. Farklı ülkelerdeki MSW üretimi ile küresel nüfus arasındaki ilişki 39
Şekil 18. MSW yakılmış taban külünün tane boyutu profilleri 41
Şekil 19. MSW-FA'nın SEM görüntüleri 43
Şekil 20. Bazı biyokütle atık türleri 47
Şekil 21. Farklı ülkelerde biyokütle kül üretimi 49
Şekil 22. UPV test yönteminin teorik ve pratik gösterimi 59
Şekil 23. UPV iletim yöntemleri: doğrudan(a); dolaylı(b); ve (c) yarı doğrudan 62
Şekil 24. ÇMD bileşenlerinin tane boyu dağılım grafikleri: DPA (a); YPA (b); OPC (c); YFC (d); ve UK (e) 66
Şekil 25. Casagrande yöntemi ile elde edilen likit limit sonuçları 68

Şekil 26. Yüksek ve düşük pH atıkların standart ve modifiye proktor testleri 69
Şekil 27. ÇMD üretim aşamaları 72
Şekil 28. MIP cihazı ve test sırasında uygulanan penetrometreleri 75
Şekil 29. Tüm ÇMD numunelerinin toplam porozite sonuçları 77
Şekil 30. Çimento dozajına bağlı olarak mezo ve makro porozite sonuçları: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c) 79
Şekil 31. Tüm ÇMD'lerin kritik (a) ve eşik (b) gözenek çapı değişimi 80
Şekil 32. Çimento dozajına bağlı tüm ÇMD'lerin mukavemet gelişimi: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c) 83
Şekil 33. Çimento dozajına göre UCS ve toplam porozite arasındaki ilişki: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c) 86
Şekil 34. Çimento dozajına bağlı tüm ÇMD'lerin UPV gelişimi: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c) 88
Şekil 35. Çimento dozajına göre UPV ve toplam porozite arasındaki ilişki: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c) 90
Şekil 36. DPA içeren ÇMD numunelerinin UPV ve UCS sonuçları arasındaki ilişki 93
Şekil 37. YPA içeren ÇMD numunelerinin UPV ve UCS sonuçları arasındaki ilişki 94
Şekil 38. ÇMD'lerin ölçülen ve öngörülen mukavemetleri arasındaki bağlantı 95

GİRİŞ

Çimentolu macun dolgu (ÇMD), mineral işlemeden kaynaklanan ve çevreye zarar veren atıkların bertarafı için yeraltı metal madenlerinde kullanılan etkili bir maden atık sistemidir (Kasap vd., 2022a; Qui vd., 2019). ÇMD 'nin ana bileşenlerini atıklar (ağırlıkça %75-85), su (ağırlıkça %15-25) ve bağlayıcı (ağırlıkça%2-7) oluştururken (Zhao vd., 2023; Libos vd., 2021), bu yöntemde ekonomik, çevresel ve mukavemet ihtiyaçlarına bağlı olarak çeşitli katkı maddeleri (mineral/kimyasal) de tercih edilebilir (Behera vd., 2020; Keskin vd., 2024a). Sülfür açısından zengin piritik atıkların su ve oksijenle teması sonucu oluşan oksidasyon, asit maden drenajı (AMD), özellikle toprak ve su kirliliği gibi birçok çevresel komplikasyona yol açmaktadır (Fall vd., 2017; Kasap vd., 2022b). Bu nedenle, ÇMD yöntemi madencilik işletmeleri tarafından oluşturulan sorunlu atıkların güvenilir, sürdürülebilir ve temiz bir şekilde bertarafını sağlamak (Zhou vd., 2022a; Cao vd., 2019) ve ayrıca maden cevherinin verimli bir şekilde çıkarıldığı maden duraklarının zeminlerini ve yan duvarlarını desteklemek için aktif olarak uygulanmaktadır (Song vd., 2022a). Boru hattıyla yeraltı boşluklarına taşınan ÇMD'nin (Cui vd., 2017) çevresel etkilere karşı yeterli direnç göstermesi (Cavusoglu vd., 2021) ve dolgu mukavemetlerinin doğru ve etkili bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Lu vd., 2020).

Çimentolu matrislerin dayanım özelliklerinin belirlenmesi, yapı güvenliği ve yapıyı oluşturan elemanların maliyeti açısından son derece kritiktir (Quin vd., 2021). Çimento, su, katkı maddeleri ve agregalar arasındaki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşan çeşitli bileşiklerin malzemeye mekanik katkısı günümüzde farklı yöntemlerle belirlenebilmektedir (Patil vd., 2021; Fall vd., 2010; Chen vd., 2022a). Bu yöntemlerden biri de şüphesiz numunelerin basınç dayanımlarını belirlemek için verimli bir şekilde kullanılan tek eksenli basınç dayanımı (UCS) testidir (Fang ve Cui, 2022). Laboratuvarda uygulanan UCS testi sıklıkla tercih edilmesine ve doğru sonuçlar vermesine rağmen (Wang vd., 2022a; Qi vd., 2019a) özellikle optimizasyon test çalışmalarında yüksek maliyet ve zaman tüketimi açısından dezavantaj yaratabilmektedir (Wang vd., 2019; Zhang vd., 2022a). Kür koşullarının ve diğer çevresel etkilerin laboratuvar ortamına tam olarak yansıtılamadığı durumlar da yanıltıcı sonuçlara neden olabilmektedir (Fusade vd., 2019). Ayrıca bu test, saha

testlerinden elde edilen örnek numunelere uygulanabildiği için mevcut yapılardaki malzeme ve yapısal hasar göz ardı edilir (Almasaeid vd., 2022). Çimentolu bileşenlerin performansı hem tahribatsız (darbe/darbe yankısı, akustik emisyon, dalga yansıması ve mikrodalga absorpsiyon yöntemleri) hem de tahribatlı yöntemlerle (UCS) tespit edilebilir (Xue ve Yilmaz, 2022; Dolinar vd., 2019; Liv d., 2022). UPV (ultrasonik darbe hızı), hızlı, güvenilir, ucuz ve doğrudan uygulanabilir bir yöntem olması nedeniyle özellikle betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çok yaygın bir kullanıma sahiptir (Bogas vd., 2013). Ölçülecek malzemenin şekli ve boyutundan bağımsız olarak kullanılabilmesi ve tekrarlanabilir olması, bu yöntemin uygulanabilirliğini artırmaktadır (Mihaljević vd., 2019). En genel tanımıyla UPV, ultrasonik dalgaların yapı içindeki difüzyon mesafesinin iletim süresine oranıdır (Yan vd., 2022). Dalgalar, elektro-akustik dönüştürücüler tarafından üretilir ve dönüştürücünün incelenen yapının yüzeyiyle temas etmesiyle sisteme aktarılır (Wiciak vd., 2017). Yapı boyunca iletilen dalgalar başka bir dönüştürücü tarafından alınır ve dalga enerjisi, iletim süresini belirlemek için elektrik enerjisine dönüştürülür (Sun vd., 2020a). Malzemenin temas yüzeylerinin jel gibi iletkenlerle kaplanması, dönüştürücülerin iyi performans göstermesini ve başarılı ölçümler yapılmasını sağlar (Jiang vd., 2020a). Dalga iletiminin önemli olduğu bu yöntemde, malzeme yüzeylerine ve dönüştürücülerin yönüne bağlı olarak üç ana iletim türü (doğrudan/yarı doğrudan/dolaylı) vardır (Benaicha vd., 2015). Doğrudan iletim tüm iletim türleri arasında en nüfuz edici olanı iken, dolaylı en küçük hassasiyete sahiptir ve genellikle malzemenin yalnızca bir yüzeyinin kullanıldığı ve yüzey kalitesinin incelendiği çalışmalarda tercih edilir (Vasanelli vd., 2017). UPV tekniğinde, yapıdaki dalgaların iletimini ve buna bağlı olarak test sonuçlarını etkileyen çeşitli parametreler vardır (Czarnecki vd., 2021). Çimentolu kompozitlerin homojenliğinin yanı sıra, çimento, agrega, katkı maddesi, karıştırma suyu ve varsa donatının özellikleri, miktarları ve zaman içindeki değişimleri bu parametreler arasındadır (Lee vd., 2020; Sepehrinezhad vd., 2018). Ayrıca üretilen ultrasonik dalgaların iletim hattını malzemedeki büyük boşluklardan değil, en kısa mesafeyi oluşturan katı parçacıklar üzerinden tamamlama isteği, malzemenin boşluklarının ve çatlaklarının göz ardı edilmemesini gerektirir (Zhang vd., 2022b). Çok sayıda boşluk ve çatlak, ultrasonik dalgaların iletim sürelerinde artışa neden olarak UPV değerlerinde azalmaya neden olur (Qiu vd., 2020).

Sonuç olarak, çimentolu örneklerin gözenek yapısı doğru bir şekilde belirlenmeli ve çimento hidratasyonu ve ürünlerinin dalga iletimi ile yakın ilişkisi açıkça gösterilmelidir.

Birçok sektörde (özellikle inşaat) sıklıkla kullanılan UPV yöntemi, son yıllarda ÇMD kalitesinin değerlendirilmesinde de kullanılmakta olup, literatürde bu konu ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Jiang vd., 2020b; Liu vd., 2022; Qi vd., 2018). Tian ve Xu, (2022) tahribatsız UPV yöntemiyle çeşitli çimento/su oranlarında ve katı içeriklerinde hazırlanan ÇMD'lerin mukavemet ilerlemesini incelemişlerdir. UPV gelişiminin çimento/su oranı ve katı içeriğiyle doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. Qiu vd, (2020) farklı inceliklerde yapay silikon artıklarıyla yapılan ÇMD numunelerinin akışkanlığını UPV, UCS ve mikro yapı testleri ile değerlendirmişlerdir. Artan atık inceliğinin su filmi kalınlığı ile ÇMD akışkanlığını azalttığını ve UCS/UPV değerlerini arttırdığını bulmuşlardır. Yan vd., (2020) UPV yöntemiyle farklı bağlayıcı oranlarında ve sertleştirme sıcaklıklarında değerlendirilen ÇMD numunelerinin sertleştirme sürecini değerlendirmişlerdir. Silis dumanı katkısının eklenmesiyle ÇMD'nin gözenek yapısının iyileştiğini ve ultrasonik P dalga hızıyla boyutunun arttığını vurgulamışlardır. Sun vd., (2021) mikrodalga radyasyonuna maruz kalan ÇMD'nin ultrasonik, mekanik ve termal gelişimini incelemişlerdir. Mikrodalga enerjisinin ÇMD numunelerinin mukavemet ve UPV değerlerini arttırdığının altını çizmişlerdir. Cao ve Song, (2017) UCS ve UPV yöntemlerini kullanarak ÇMD üzerindeki doldurma süresi aralığının etkisini incelemişlerdir. Doldurma süresi aralığının artmasıyla ÇMD örneklerinin UCS/UPV değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Wu vd., (2016a) farklı katı içerik/kürleme süresine bağlı olarak farklı dozajlarda uçucu kül kullanarak kömür gangı içeren dolguların mekanik performansını araştırmışlardır. Katı içeriği ve uçucu kül dozajı arttıkça, UPV ve UCS'nin de arttığını bulmuşlar ve aralarında üstel bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Yang vd., (2022) farklı kürleme sürelerinde ÇMD'nin sertleşme özelliklerini ve dolgunun hasar alma aşamaları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tahribatsız UPV yönteminin de kullanıldığı bu çalışmada, ÇMD'nin hasar modelinin farklı sertleşme anlarındaki mikro yapı özelliklerine bağlı olduğunu ve hasar modellerinin su miktarı azaldıkça değiştiğini belirtmişlerdir. Ji vd., (2022) hem mineral katkı maddesinin hem de

kürleme sıcaklığının UPV ve dolgu numunelerinin mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda UPV'nin farklı katkı miktarlarına ve kürleme sıcaklıklarına tepkisinin UCS kadar fazla olmadığı sonucuna varmışlardır. Xu vd., (2020a) çeşitli mekanik ve mikro yapı deneyleriyle ÇMD üzerindeki yaş/sıcaklık etkisini araştırmışlardır. Çimento esaslı dolgu örneklerinin UCS ve UPV sonuçları arasında doğrusal bir bağlantı olduğunu belirlemişlerdir.

Atıkların dolguların UCS/UPV sonuçları üzerindeki etkisi ve aralarındaki ilişki şimdiye kadar birçok çalışmada tartışılmıştır (Wu vd., 2020; Ercikdi vd., 2014; Xue vd., 2021; Yu vd., 2022). Ancak, aynı cevher hazırlama tesisinde, cevher tiplerine ve cevher zenginleştirme yollarına bağlı olarak üretilen atıkların farklı özelliklerinin (pH açısından), UPV test sonuçlarını nasıl etkilediği hala araştırılması gereken bir konudur. Ayrıca, ÇMD'lerin mikro yapısal özellikleri birçok araştırmacı tarafından farklı yöntemler kullanılarak tartışılmış ve gözenek yapısının dolgu özelliklerini, özellikle de dayanımı nasıl etkilediği literatürde açık bir şekilde sunulmuştur (Wang vd., 2022b; Zhao vd., 2022a; Liu vd., 2020a; Hu vd., 2020; Xu vd., 2020b). Ancak, daha önceki çalışmaların çoğu yalnızca ÇMD'yi oluşturan bileşenlerin özelliklerine, kürleme koşullarına ve dolguların gözenek yapısını belirlemede uygulanan laboratuvar test yöntemlerine (MIP, NMR) odaklanmıştır.

Bu nedenle, bu araştırmanın temel amacı ve önemi, ÇMD'lerin MIP testleri ile elde edilen gözenek yapısı ile tahribatsız bir yöntem olan UPV testi arasındaki ilişkiyi incelemektir. Böyle bir çalışma daha önce hiç ele alınmamıştır ve bu nedenle bu çalışma, ÇMD'nin gözenek yapısının UPV testi ile desteklendiği ve aralarındaki bağlantının açıkça gösterildiği ilk çalışma niteliğindedir. Bu çalışma, düşük 4.72 ve yüksek 10.41 pH değerlerine ve farklı mineral katkı maddelerine (uçucu kül/cüruf) dayalı piritik atıklar içeren ÇMD malzemelerinin UPV sonuçlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. ÇMD numuneleri, ağırlıkça %72 sabit katı içeriği ve ağırlıkça %4, 6 ve 8 üç farklı çimento oranı kullanılarak laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Cüruf ve uçucu kül katkı maddeleri, dolgu karışımlarında çimento için bir ikame olarak kullanılmıştır. ÇMD'ler üzerinde yapılan önceki çalışmalara dayanarak, tüm çimentolu macun dolgu numuneleri için %30'luk bir çimento ikame oranı seçilmiştir (Sari vd., 2022). 3 ila 90 gün arasında değişen farklı kürleme sürelerinde hazırlanan ÇMD numunelerinin mukavemet özellikleri UCS (tek eksenli basınç dayanımı) testi

ile belirlenirken, gözenek yapısı cıva intrüzyon porozimetre (MIP) testinin desteğiyle belirlenmiştir. Bu testlere ek olarak, UPV (ultrasonik darbe hızı) testi baskın olarak kullanılmış olup UPV ve UCS değerleri arasında bir korelasyon belirlenmiştir.

Araştırma kapsamı, çeşitli laboratuvar cihazları kullanılarak farklı macun dolgu numuneleri için basınç dayanımı, kürlenme süresi, ikame oranları, atık türü, reoloji ve mikro yapının detaylı incelemesini kapsamaktadır. Bu tezde, spesifik olarak, düşük ve yüksek pH'lı piritik artıklara sahip ÇMD'lerde mineral katkılarının mukavemet ve yapı gelişimi üzerindeki etkisini incelemek için bir girişimde bulunulmuştur.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Maden Atıklarının Geri Dönüşümü ve Yeniden Kullanımı

Madencilik sektöründe düşük tenörlü cevherlerden konsantre üretim ihtiyacı kaçınılmaz olarak yüksek miktarlarda atık üretimine yol açmaktadır. Kinnunen ve Kaksonen (2019), 1 ton değerli cevherin çıkarılması sonucunda yaklaşık 2-12 ton maden atığı oluştuğunu belirtmişlerdir. Örneğin Şili'de maden atığı üretimi günde 1,6 milyon tondur (Araya vd., 2020) ve Güney Afrika'da altın madenlerinden 17,7 milyon ton maden atığı üretildiği tahmin edilmektedir (Haywood vd., 2019). Çin'deki madencilik faaliyetleri 33.000 hektar alanı etkilemekte ve bunun %13'ü atık barajlarından kaynaklanmaktadır (Manca vd., 2021). Avustralya'da 52.535'ten fazla terk edilmiş maden olduğu rapor edilmiştir (Kolala vd., 2020). Avrupa Birliği'nde yıllık ortalama 5-15 milyar ton atık üretildiği tahmin edilmektedir (Manjarrez ve Zhang, 2018). Atıkların çok fazla türde ve miktarda salınması, hava, su ve toprak kirliliğinin yanı sıra doğal kaynakların tükenmesi, iklim değişikliği gibi sorunlara yol açarak tüm canlılar için tehdit oluşturmaktadır. Bu atıkların sürdürülebilir ve yenilikçi sistemlerle doğru yönetilip desteklenmemesi halinde çevre ve halk sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratacağı açıktır. Madencilikte geleneksel atık yönetim sistemlerine ek olarak atıkların çevresel, sosyal ve ekonomik sonuçlarını iyileştirmeyi amaçlayan alternatif yaklaşımlar da bulunmaktadır. Bunları üç ana yaklaşım altında sunmak mümkündür; i) susuzlaştırılmış atıklar, ii) atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve arıtılması ve iii) proaktif entegre atık yönetimi.

Geleneksel yaklaşımlar çerçevesinde oluşturulan değerli cevherin güvenli bir şekilde çıkarıldığı metalik maden atıkları, atık havuzlarında, yerüstü barajlarında ve yeraltı duraklarında depolanmaktadır. Çimentolu macun dolgu olarak yeraltında depolanan atıklar hem zemin desteği hem de madenlerdeki atıkların ortadan kaldırılmasını sağlayarak sürdürülebilir madenciliğe olumlu yönde etki etmektedir. Atık bertarafı için kullanılan entegre macun teknolojisi (hem dolgu hem de depolama amaçlı), AB Komisyonu tarafından mevcut en iyi tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir (Garbarino vd., 2020). Ayrıca atıklar yerüstü dolgu sahalarında veya barajlarda bertaraf edilmektedir. Ancak atıkların barajlarda bertarafı hem jeoteknik (baraj yıkılması ve sızıntı gibi) hem de çevresel (asit/sızıntı suyu oluşumu gibi) riskler

taşır. Bunlar arasında en ciddi çevre sorunu asit maden drenajıdır (AMD). AMD'nin oluşumu madencilik faaliyetleri sırasında ve madenler kapatıldıktan uzun süre sonra da devam ederek, uzun vadeli çevresel etki riskini artırır. İspanya (Aznalcollar), Romanya (Baia Mare), Kanada (Mt Polley) ve Brezilya'da (Fundao) son zamanlarda ciddi atık barajı kazaları buna örnek verilebilir.

Maden atıklarının bertarafına ilişkin sıkı yasal düzenlemeler, maden işletmelerini daha sıkı kontrol edilmeye ve çok daha kontrollü hareket etmeye zorlamaktadır. Bunun nedeni olası bir çevre felaketi durumunda madencilik işletmelerine ciddi bir ekonomik yük getirmesi ve geri dönüşü olmayan risklerden kaynaklanmasıdır. Atık barajlarının bu gibi olumsuz yönleri göz önüne alındığında, madencilikte çevresel açıdan riskli ve sürdürülemez olan sülfitçe zengin atıkların geleneksel yönetim sistemlerine yenilikçi ve etkili alternatifler geliştirilmesi zorunludur.

Son yıllarda maden atıklarının geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması Birleşmiş Milletler'in sürdürülebilir kalkınma hedefleri (SDG) arasında yer almaktadır. Maden işletmeleri, atıklarını en aza indirerek Sürdürülebilir kalkınma hedefinin “sürdürülebilir şehirler ve topluluklar” ve “sorumlu tüketim ve üretim” ilkelerine katkıda bulunabilir (Nieva vd., 2018). Atıkların yeniden kullanılması, bunların olumlu bir şekilde uygulanmasını sağlarken geri dönüşüm, kaynak bileşenlerini ortadan kaldırır veya bunları değerli malzemelere dönüştürür. Tercihen atıkların yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi, ekonomik varlıklara, doğal kaynakların sınırlı tükenmesine, atık üretiminin azalmasına, yenilikçi endüstrilere ilham vermesine, yeni işlerin kurulmasına ve çevre konusunda hesap verebilirliğin oluşturulmasına yol açar. Ayrıca atıkların yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi, insanların veya diğer ekolojik alıcıların kirli ürünlere maruz kalmasını engelleyebilir. Yeraltı dolgusu, yol inşaatı, tuğla/seramik imalatı, tamamlayıcı çimentolu malzemeler ve jeopolimer gibi bazı yeniden kullanım/geri dönüşüm seçenekleri atıklar için mevcuttur.

1.2. Yeraltı Dolgu Yöntemleri

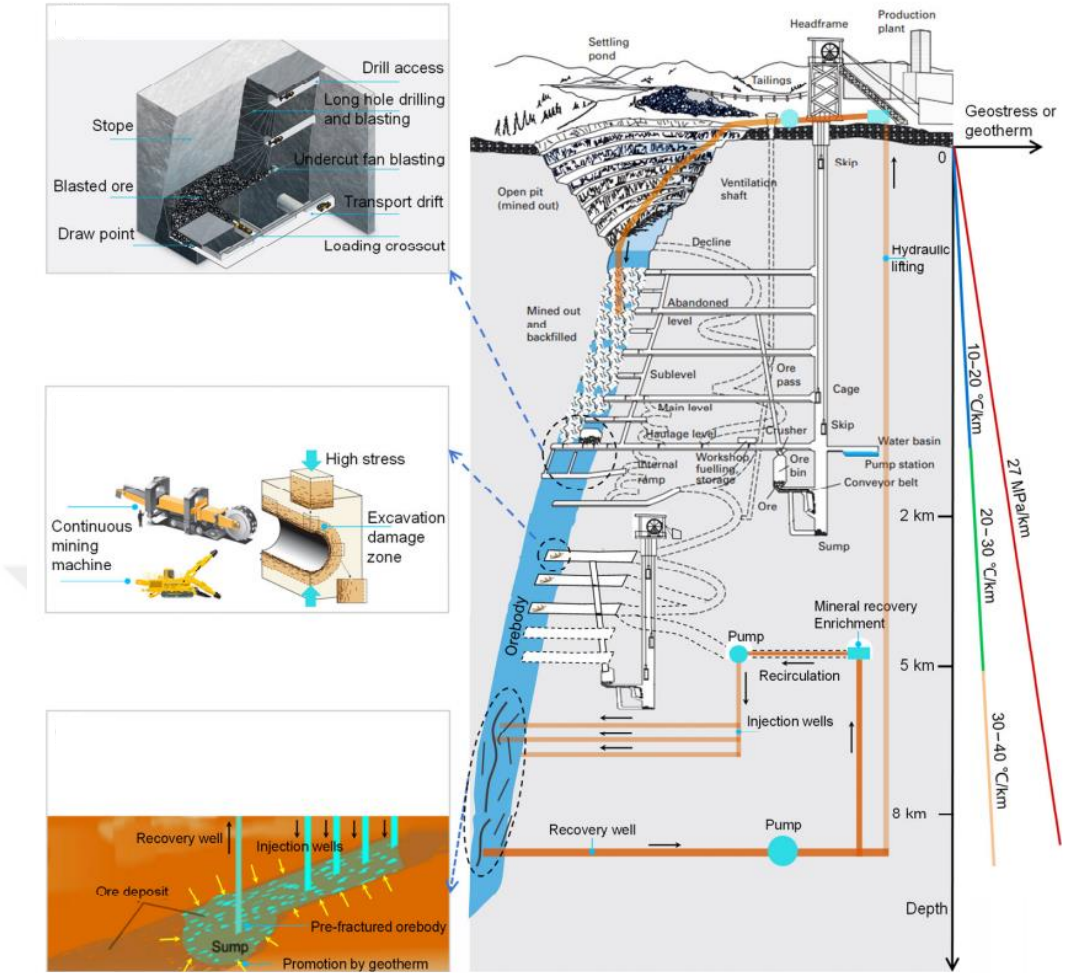
Cevher üretimi sırasında oluşan yeraltı açıklıkları, (i) komşu madencilik inşaatlarına destek sağlamak, (ii) çalışanlar ve/veya aletler için güvenli çalışma

platformu sağlamak; (iii) cevher zenginleştirmesinden hemen sonra oluşan atıkların işlenmesi için bir depolama alanı oluşturmak ve (iv) yüzey oluşumlarındaki olası çökmeleri önlemek veya en aza indirmek amacıyla doldurulmalıdır (Alp vd., 2009; Singh vd., 2011). ÇMD, yeraltı cevher üretimi nedeniyle oluşan boşlukların uygun bir ürün kullanılarak doldurulması için önemli bir süreçtir (Zhengfu vd., 2010; Bascetin vd., 2021). Ocaklardan elde edilen belirli miktarda suyu alınmış (yoğunlaştırıcı ve filtre yoluyla) atık, kum, iri kaya parçaları ve agregalar dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Dudeney vd., 2013; Belem vd., 2016). Ayrıca yeraltı boşluklarına dolgu yerleştirilmesi genellikle atıklara belli miktarda bağlayıcı ve su ilave edilerek gerçekleştirilir. **Şekil 1**, günümüzde uygulanan örnek bir madencilik yöntemini şematik olarak göstermektedir (Wang vd., 2019).

Dolgu işlemi ilk kez 1864 yılında Kuzey Amerika'nın Pensilvanya kentinde bir kilisenin yüzey göçmeleri nedeniyle çökmesini önlemek amacıyla kullanılmıştır. İlk çimentolu dolgu uygulaması 1957 yılında Sudbury Falconbridge nikel madeninde başarıyla uygulanmış ve çimento olarak kolay bulunabilirliği ve ucuz olması nedeniyle Portland çimentosu tercih edilmiştir. 1970'li yıllara gelindiğinde atıkların çimento ile dolgu olarak yeraltına yerleştirilmesi işlemi endüstriyel bir uygulama haline gelmiştir.

Geçmişten günümüze maden dolguları içerdikleri malzeme türlerine, madencilik yöntemlerine ve nihai işlevlerine göre üçe ayrılmaktadır. Bunlar; i) kaya dolgu, ii) hidrolik dolgu ve iii) macun dolgudur (Rankine vd., 2006; Stone, 2007; Nasir ve Fall, 2010; Sivakugan vd., 2015). Her dolgu tipinin farklı özellikleri bulunmaktadır ve günümüzde hem birim maliyet hem de maksimum fayda dikkate alındığında macun dolgu diğer yöntemlere göre daha fazla maden sahasında kullanılma imkânı bulmuştur (Yılmaz, 2015).

Kaya dolgusu, cevher çıkarma esnasında oluşan boşlukları doldurmak için yüzeyden veya yeraltından elde edilen, genellikle 40 mm boyutuna kadar kırılmış atık kaya parçalarının çimento ve su ile karıştırılmasıyla oluşur (Şekil 2a; Yılmaz vd., 2011a; Hane vd., 2017). Kaya dolgunun başlıca avantajları, dolgunun tonajının üç kat, hacminin ise iki kat artması, mukavemetin artması ve bağlayıcı (çimento) tüketiminin %2'nin altına düşürülmesi olarak sıralanabilir. Kaya dolgu uygulamasında kullanılacak malzemenin taş ocağı gibi yerlerden temin edilmesi durumunda ise maliyet ciddi oranda artabilmektedir (Jiang vd., 2019a).



Şekil 1. Maden metodunun şematik gösterimi (Wang vd., 2019)

Hidrolik dolgu, atık malzemenin su ile taşınması, oluşan boşluğun yeniden doldurulması, fazla suyun katı dolgu malzemesinden ayrıştırılarak sertleştirilmesi düşüncesiyle oluşturulmuştur (Şekil 2b; Yılmaz vd., 2011a). Hidrolik dolgu genellikle ağırlıkça %70'e kadar katı madde oranında hazırlanır ve gerekli geçirgenliği uygun şekilde sağlamak için 10µm'nin altındaki atık malzemesi miktarının ağırlıkça %10'dan fazla olması gerekmez. İdeal olarak hidrolik dolgunun serbest drenaj özelliğine sahip olması gerekir, böylece içindeki su mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde uzaklaştırılabilir ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşmaz (Sivakugan vd., 2013). Sonuç olarak, hidrolik dolgu uygulamalarında kategorize edilmiş atık malzemelerinin kullanılması tercih edilmektedir (Pirapakaran ve Sivakugan, 2007). Çoğu maden işletmesi, uygulamasının kolay ve maliyetin düşük olması nedeniyle hidrolik dolgu kullanmaktadır.

Çimentolu macun dolgu (ÇMD), cevher zenginleştirmesinden elde edilen büyük miktarda susuz atık malzemesi (genellikle %15'ten fazlası <20 μm), su ve bağlayıcıdan oluşur (Şekil 2c; Yılmaz vd., 2011a). Bağlayıcı içeriği %3-9 arasında, katı oranı ise %70-85 arasındadır (Simms ve Grabinsky, 2009; Yılmaz vd., 2009; Cui ve Fall, 2016; Jiang vd., 2019a). Bu bileşenler yer üstünde harmanlanır, karıştırılır ve kot farkı kullanılarak ya da pompalama yoluyla yeraltına gönderilir.

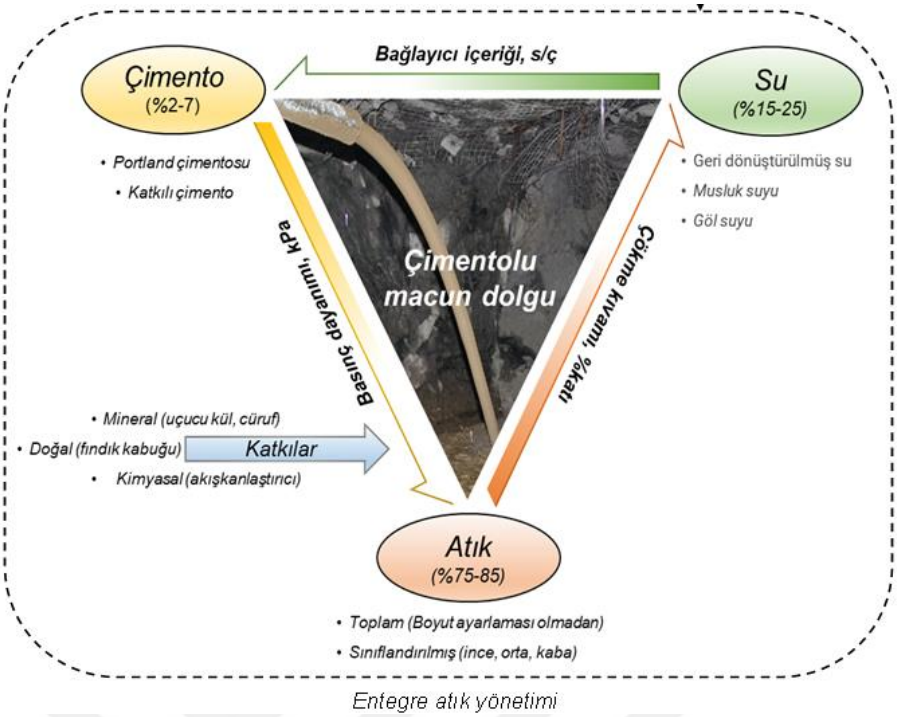


Şekil 2. Dolgu tipleri: kaya (a); hidrolik (b) ve macun (c)

1.3. Çimentolu Macun Dolgu Yöntemi

Çimentolu macun dolgu (ÇMD), standart bir akma gerilimi/viskozite sağlayan, homojen, ayrışmayan ve yüksek yoğunluklu bir malzemedir ve farklı amaçlarla yeraltı duraklarına, atık barajlarına, açık ocaklara ve zemin çökme alanlarına etkili bir şekilde taşınabilmektedir (**Şekil 3**). Kullanılan atıkların tane boyutu dağılımına ve özgül ağırlığına bağlı olarak, sert kaya metalli madenler için ÇMD'nin yoğunluğu ağırlıkça %75 ile ağırlıkça %85 arasında değişmektedir (Jiang vd., 2020; Keskin vd., 2024a). ÇMD kritik bir akış hızına sahip olmadığından, hattı tıkamadan bir boru hattında 4-5 saate kadar boşta kalabilir.

Bir boru hattında boşta kalan ÇMD'yi yeniden harekete geçirmek için uygun akma gerilimine ihtiyaç vardır. Esasen, ÇMD akışının yeniden başlatılması nispeten yüksek bir akma gerilmesi yaratır. Dolgu malzemesini boruya itmek için yeterli enerji ve pompalama kapasitesi yoksa hattaki tıkanmalar maliyetli olabilir, bu da önemli üretim gecikmelerine neden olabileceği gibi, boruyu onarmak için ekstra bir iş gücüne ihtiyaç duyulmasına da neden olabilir. Bu nedenle, dolgunun akma geriliminin ölçülmesi, işlenebilirliğinin tahmin edilmesinde büyük önem taşımaktadır. ASTM C143 standardına göre ölçülen bir çökme testi (**Şekil 4**), çoğunlukla dolgu uygulamalarında, dolgunun işlenebilirliğini kontrol etmek için kullanılır.



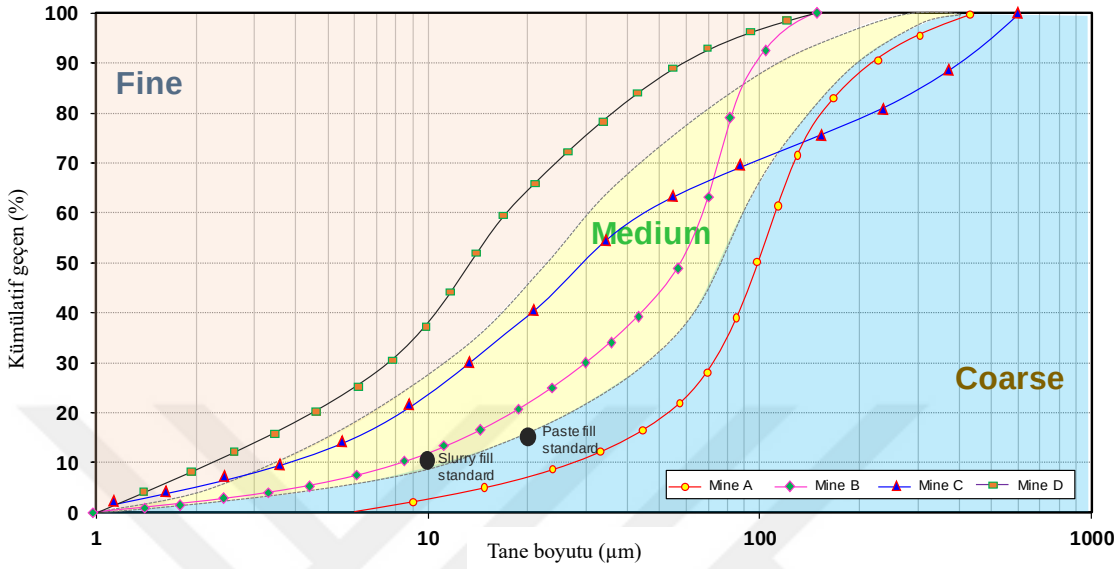
Şekil 3. ÇMD'lerin ana bileşenleri



Şekil 4. ÇMD çökme testi adımları: koninin doldurulması (a); koninin kaldırılması (b); ve çökme değeri ölçümü (c)

Tutarlı bir ÇMD akışı sergilemek için, artıkların tipik olarak 20 mikronu geçen minimum %15'lik bir tane boyutu dağılımına sahip olması gerekir (Hustrulid ve Bullock, 2001). İnce içerikli dolguda akışı sağlamak için belirli bir nemi korumaya ihtiyaç duyulur. Genel olarak ince parçacıklar boru hattının yan duvarlarına temas ederek kaba parçacıkların çökmeden ve ayrılmadan, ortasından ve daha yüksek bir hızda taşınmasına olanak tanır. Bu nedenle, ayrışmayan davranış sergileyen ÇMD diğer maden doldurma teknikleriyle (hidrolik ve kaya) karşılaştırıldığında çeşitli operasyonel avantajlar sunar. **Şekil 5**'te ÇMD imalatında kullanılan çeşitli ince, orta ve iri taneli maden atıklarının tipik tane boyutu dağılım eğrileri gösterilmektedir. Dolgu üretiminin nihai amacının, ÇMD'nin iletim miktarını ve mukavemetini

maksimuma çıkarırken ince tane içeriğini azaltarak çimento tüketimini optimize etmek (çimento maliyetlerini azaltmak) olduğu unutulmamalıdır.



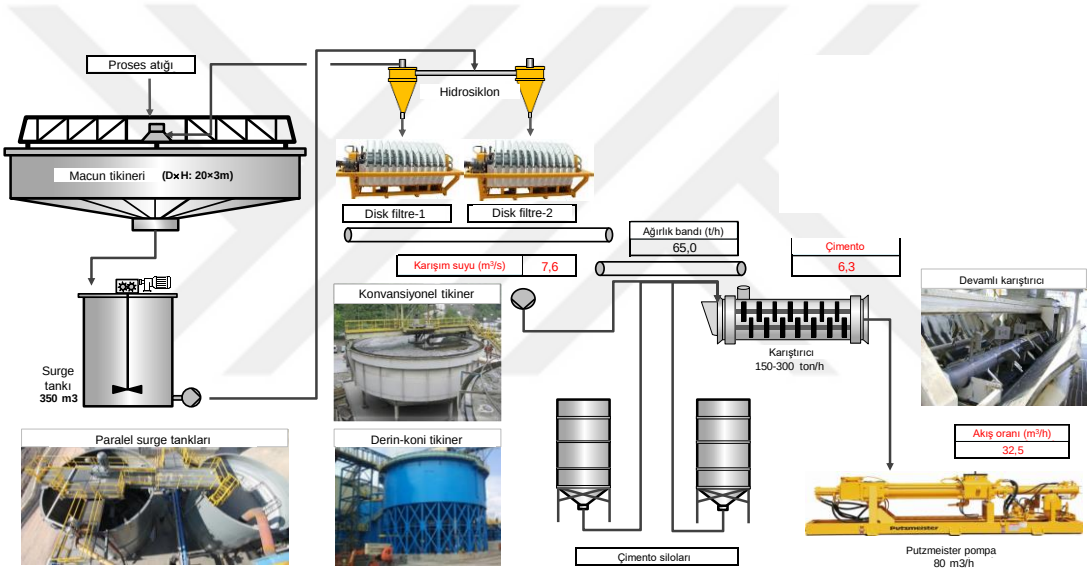
Şekil 5. Farklı maden atıklarının tipik tane boyu dağılım eğrileri

Tipik bir macun dolgu işlemi temel bileşenleri, susuzlaştırma, karıştırma, iletim ve izleme aşamalarından oluşur. Bir sonraki bölümde ÇMD malzemesinin üretim, iletim ve yerleştirme aşamaları ele alınmaktadır. Tipik bir macun dolgusu yönetiminin temel bileşenleri de ayrıca burada sunulacaktır.

1.3.1. Atık Susuzlaştırma, Karıştırma ve İletim

Macun dolgu esas olarak işletme ve/veya baraj atıkları, hidrolik bağlayıcılar, mineral ve/veya kimyasal katkılar ve su ile üretilir. Yeraltı madenlerindeki nihai işlevine (zemin desteği veya atık bertarafı olarak) bağlı olarak macun dolgu, basınç ve eğilme mukavemetlerini iyileştirmek için kum ve elyaf gibi takviye ürünleri de içerebilir (Zhou vd., 2020; Huang vd., 2021; Qin vd., 2021). Dolgunun büyük bir kısmını oluşturan atıkların iki önemli özelliği vardır: parçacık boyutu ve mineraloji. Yüksek yüzey alanına sahip ince taneli atıklar, dolgu içerisinde çok daha fazla su tutabildiği için zamanla stabilitenin azalmasına neden olur. Atıkların su tutma kabiliyetini ve macun dolguyu oluşturmak için gereken katı içeriğini etkileyen mineraloji, aynı zamanda dolgunun nihai stabilitesini de etkileyebilir. Dolgu üretimi için kum eklenmesi, yüksek dolgu mukavemeti ile yakından ilişkili olan yoğunluğun ve su/çimento oranının artmasına neden olur. Ayrıca bağlayıcı türüne ve miktarına

bağlı olarak dolgunun mukavemetini de arttırır. Dolgu imalatında kullanılan tipik bağlayıcı türü, kolayca erişilebilen ancak oldukça pahalı olan standart Portland çimentosudur. Çimentoyla ilgili maliyetleri azaltmak amacıyla uçucu kül, cüruf, süngertaşı ve obsidyen gibi bazı yapay ve/veya doğal puzolanik malzemeler de dolgu için kullanılır. pH değeri, arsenik veya siyanür gibi potansiyel olarak tehlikeli bileşenlere bağlı olarak, macun dolgusu üretiminde geri dönüşüm, belediye ve göl gibi farklı karışım suyu türleri de kullanılır. **Şekil 6**, geleneksel veya derin konik yoğunlaştırıcıları, dengeleme tanklarını, hidro-siklonları/disk filtreleri (isteğe bağlı), çimento silolarını, karıştırıcıyı ve pozitif deplasmanlı pompayı kapsayan tipik bir macun dolgu akış şemasını göstermektedir.

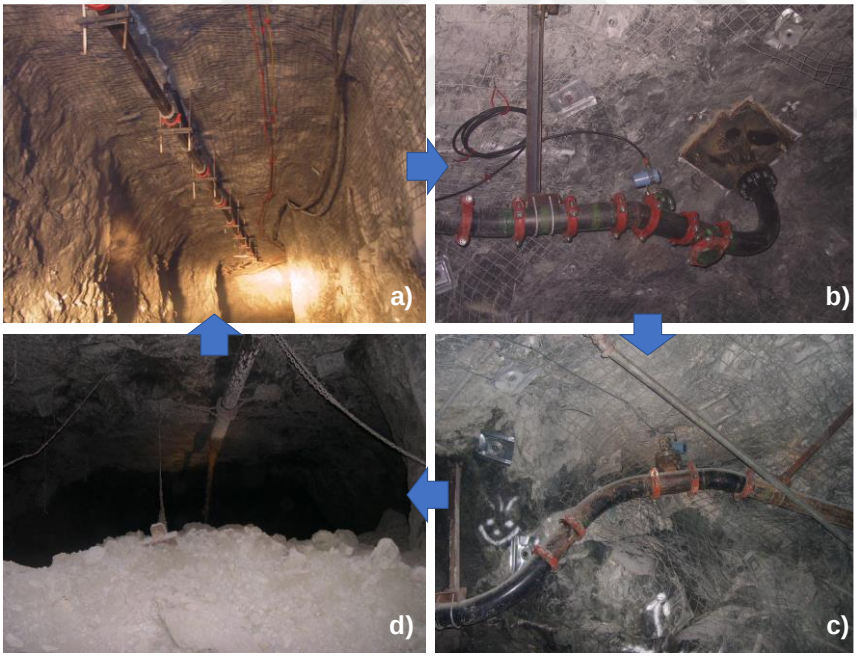


Şekil 6. Tipik bir macun dolgu tesisinin akış şeması

Dolguda kullanılacak atıkların suyunun alınması, katı madde içeriğini artırmak için önemli bir adımdır. Konvansiyonel/derin konik yoğunlaştırıcı, siklon ve filtre gibi susuzlaştırma sistemleri mevcuttur. Farklı kimyasalların kullanımıyla, geleneksel yoğunlaştırıcılar, ağırlıkça %55-70 katı yoğunluğuna sahip bir alttan akışlı bulamaç oluşturur (Qi ve Fourie, 2019). Siklon ve disk filtrelerin bir kombinasyonu tipik olarak yüksek yoğunluklu bir dolgu malzemesi üretmek için kullanılır. Ancak yüksek işletme maliyetleri nedeniyle (örneğin, filtre bezlerinin ve siklon aparatlarının sık sık değiştirilmesi), madencilik firmaları son yıllarda alternatif susuzlaştırma sistemlerine yönelmiştir. Bunlardan biri, temelde hem siklon hem de disk filtre ihtiyacını ortadan kaldırabilen derin konik yoğunlaştırıcıların kullanılmasıdır. Tipik olarak ekstra

yükseklikleri ve küçültülmüş çapları ile kategorize edilirler, bu da daha yüksek bir tutma süresine ve daha fazla su çıkarmak ve yüksek katı içeriğine sahip alttan akışlı bulamaç oluşturmak için katıların ağırlığını artıran sıkıştırma bölgesine izin verir. Derin konik yoğunlaştırıcılar maden atıklarının yüzeyden uzaklaştırılmasında etkili bir şekilde kullanılırken, artık yeraltı dolgu hazırlamada yaygın kullanım alanı bulmuştur.

Karıştırma işlemi ÇMD için en önemli kısımdır. Yeraltı boşluklarına taşınmadan önce homojen bir macun dolgu malzemesi oluşturmak için tüm bileşenler, güvenilir ve tutarlı atık özelliklerine çok uygun olan sürekli karıştırıcıda doğru miktarlarla birlikte harmanlanır. Karıştırıcılar, suyu alınmış atıkları yeterli şekilde parçalamak ve iyice karıştırmak için birkaç bıçağın bulunduğu tipik iki şafta sahiptir. Karıştırma sisteminin kontrolü, karıştırma kanatlarını çalıştıran motordaki güç çekişinin değerlendirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Karışım kontrolünün temel amacı, iletim ağ sistemini tıkamadan maksimum katı içeriğine ve akma gerilimine sahip bir ÇMD malzemesi oluşturmaktır.



Şekil 7. Macun dolgu boru hattı iletimi: macun dolgu boru askıları (a); göğüs plakası (b); boru hattı basıncı (c); macun dolgusu (d)

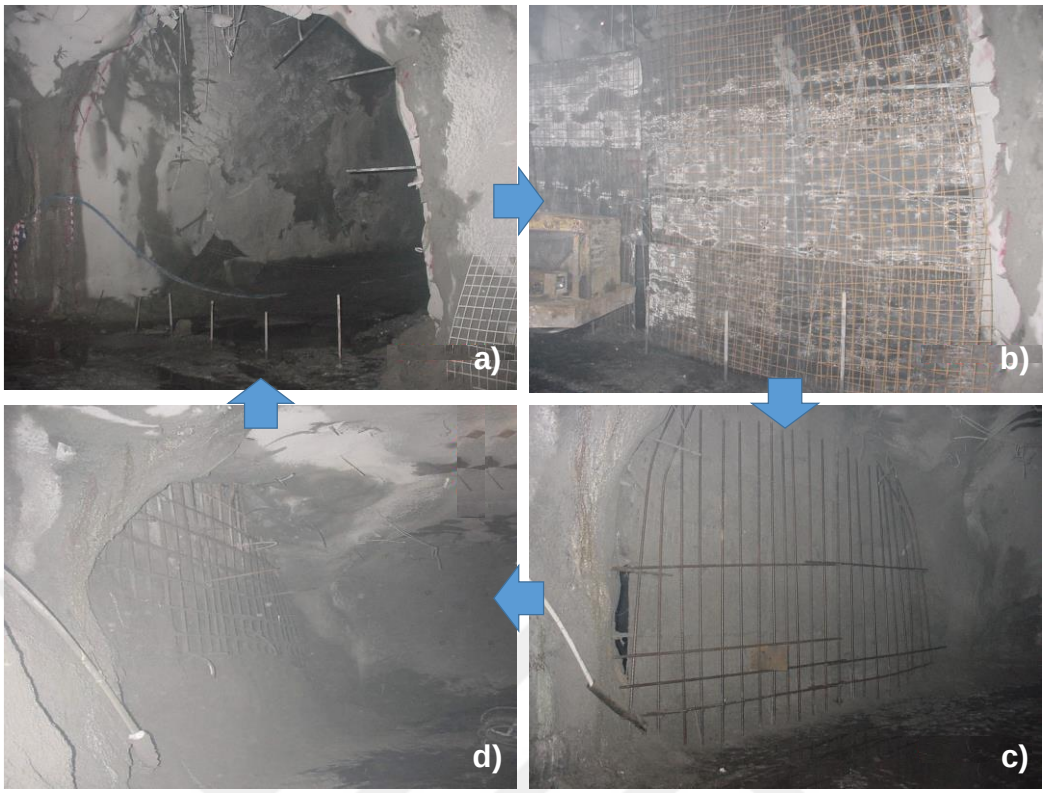
Üretilen macun dolgular, yerçekimi/pompalama veya yerçekimi etkili sistem kombinasyonu ile duraklara iletilir. Pozitif deplasmanlı pistonlu pompaların (boru hatları) kullanılmasını önlemek için, dünya çapındaki birçok macun dolgu tesisi, pompalama basınçlarının olmaması veya düşük olması ve dağıtım boru hattındaki

sürtünme kayıpları nedeniyle yerçekimiyle tahrik edilen akış sistemleri olarak tasarlanmıştır. Yeraltı dağıtım sisteminin tasarımında şebeke, boru boyutu ve tipi kritik öneme sahiptir. Boru hattında oluşan yüksek basınçlar tıkanmalara ve hatta kırılmalara neden olabilmekte, bu da boruların onarılması ve dökülen malzemelerin temizlenmesi için zaman almaktadır. Madenin topoğrafyası ve dolgu tesisinin konumu uygun değilse gerekli dağıtım enerjisini sağlayacak pompalama sistemlerine ihtiyaç duyulur. **Şekil 7**'de yüzeyde hazırlanan ve boru hatlarıyla yeraltı duraklarına gönderilen macun dolgusunun taşınması görülmektedir.

Vardiyanın macun dolgusu çalışmasının sonunda veya planlı bir kapatma öncesinde, boru hattının temizlenmesi için basınçlı hava ve su uygulanır. Boru hattı ağına bağlı olarak, her yıkama işlemi için verilecek hava ve su miktarı 0.5-5 m^3 arasında değişebilir. Yıkama yapılmaması halinde boru hatları içerisinde yapışkan macun dolgusu birikmesine neden olacak ve bir süre sonra hattın kesiti daralarak boru basınçlarının artmasına ve hatta boruların patlamasına neden olacaktır. Bu durum sonuçta ciddi iş kayıplarına ve üretim gecikmelerine neden olacaktır.

1.3.2. Dolgu Barikatı, İzleme ve Yönetim

Cevherin yeraltı ocağından çıkarılmasından sonra, macun dolgu malzemesini tutmak için çekme noktalarında barikat inşa edilmelidir. Çoğu durumda, başlangıçta 7 m'ye kadar (ağırlıkça %5-7 çimento içeriğine sahip) bir tıkaç dolgu yeraltı duraklarına dökülür ve daha sonra 30 m'ye kadar (ağırlıkça %2-5 çimento içeriğine sahip) kalan dolgu dökülerek yerleştirilir. Barikat üzerinde aşırı basıncı (100 kPa'dan az) önlemek için, tıkaç dolgusu genellikle kalan dolgudan önce kürlenmesi için 2-7 gün bekletilir (Yılmaz, 2018). Bu tür kademeli macun dolgu, maden operatörlerinin durakları kısıtlama olmadan daha fazla doldurmasına olanak tanıyabilir. Yaygın olarak kullanılan uygulama, başlangıçta akışkan olan dolguyu tutmak için alttan kesme boyunca inşa edilen çelikle güçlendirilmiş püskürtme beton barikatıdır. Püskürtme betonla inşa edilen barikatlar, kontrplaklı ahşap çerçeveyi, çerçeve boyunca delinmiş inşaat demiri kesme pimlerine bağlanan gömülü takviye inşaat demirlerini ve 40 cm kalınlığında püskürtme betonunu kapsar. **Şekil 8**, macun dolgu uygulamaları için püskürtme beton barikatlarının yapımının tüm aşamalarını göstermektedir.



Şekil 8. Barikat imalatı: delikli cıvata (a); kablo + tel örgü (b); püskürtme beton + reçine cıvata (c); püskürtme (d)

Macun dolgu mukavemetlerine ek olarak, zemin desteği için yeterli bir dolgu sistemi tasarlamadaki bir diğer kritik faktör, inşa edilen barikatın dolgu içinde oluşan basınçları arıza olmadan karşılaması gereken kesintisiz geri doldurma işlemidir. Bu nedenle, barikatlar üzerindeki dolgunun gerçek yüklerini, dolgu içinde toprak basınç hücreleri ve barikat içinde bir sınır hücresi kullanarak ölçmek gerekir.

Her bir dolgu işlemi benzersizdir ve maden sahipleri, planlamacılar, mühendisler, ekipler, denetçiler, tesis operatörleri, bakım ekipleri, malzeme tedarikçileri, yükleniciler ve danışmanlar arasındaki etkileşimi kapsayan nispeten çok yönlü bir işlemdir. Bir macun dolgu yönetim planının geliştirilmesi, ortak bir bilgi oluşturulması ve operasyonda en iyi uygulamaların sürdürülmesi açısından çok önemlidir. Tüm paydaşların, üretiminden çıkarıldığı alanlardaki nihai kullanıma kadar tüm dolgu operasyonunun temel yönleri hakkında iyi bir ortak anlayışa sahip olması hayati önem taşımaktadır. Operatörler, denetçiler, mühendisler ve bakım ekibi tarafından kullanılan yönetim planı, aynı zamanda macun tesisi ve yeraltı dağıtım ve yerleştirmeye ilişkin arka plan bilgilerini, işletme ve kontrol stratejisinin ayrıntılarını da sunar.

1.4. Çimentolu Macun Dolgu Performansını Etkileyen Faktörler

Yapılan çalışmalar, ÇMD uygulamasında yüksek mukavemet ve stabilite sunan bir dolgu karışımı tasarımının tüm madencilik firmaları için genellenemeyeceğini göstermiştir (Hassani vd., 2001; 2007; Fahey vd., 2009; Jafari ve Grabinsky, 2021; Jia vd., 2021). Bu nedenle her dolgu uygulaması için en uygun karışım tasarımı, madenlerdeki her bir spesifik dolgu elemanı ve test koşulları dikkate alınarak ayrı ayrı belirlenmelidir (Khudyakov ve Vashchenko, 2020). En uygun ÇMD karışımlarını belirlemek için macun dolguların mukavemetini/stabilitesini etkileyen parametreleri bilmek ve iyice incelemek gerekir (Yılmaz vd., 2015a). Bunlardan iç parametreler, dolgunun kendisini oluşturan malzemeler ve birbirleriyle etkleşimi olarak söylenebilir (Helinski vd., 2007a; 2007b; Jiang vd., 2020b; Ait-Mokhtar vd., 2002). Özellikle malzemeler ve kürlenme sırasında birbirleriyle etkileşimleri nedeniyle dolgu performansı için önemlidir (Benkendorff, 2006; Dirige ve de Souza, 2007; Deschamps vd., 2008). Performansı etkileyen bir diğer önemli faktör ise dolgu-kaya etkileşimi, kür koşulları, konsolidasyon, drenaj, yeraltı suyu, dinamik veya aktif yükler gibi dolgunun yeraltına yerleştirildikten sonraki performansını belirleyen dış parametrelerdir (Yılmaz vd., 2015; Mbonimpa vd., 2019; Libos vd., 2021).

1.4.1. Maden Atıkları

Dolgunun özelliklerini belirleyen en önemli unsurlardan biri olarak kabul edilen atıkların fiziko-minerolojik özellikleri, başta dayanımlar olmak üzere dolgunun birçok özelliğini etkilemektedir. Bu nedenle geniş bir şekilde çalışılmaları gerekmektedir (Aubertin vd., 1996; Consoli vd., 2006; 2007; Kiventera vd., 2020; Simonsen vd., 2020; Xiaolong vd., 2021).

1.4.1.1. Maden Atıklarının Fiziksel Özellikleri

Atıkların fiziksel özellikleri arasında boyut dağılımı, parçacık şekli, yoğunluk, spesifik yüzey ve gözeneklilik gibi birçok faktör bulunmaktadır (He vd., 2021). Çimento ve su ile etkileşimi belirler ve ÇMD kalitesine etki ederler (Fourie vd., 2006; 2007; Qi vd., 2018; Pan vd., 2021; Qin vd., 2022).

Dolguda kullanılan atıkların en önemli özelliği tane boyutu ve şeklidir (Nasharuddin vd., 2021; Qin vd., 2021; Wang vd., 2022a). Genellikle ince tane içeriği

arttıkça dolgudaki suyun akışı zorlaşır (Kesimal vd., 2002). Ayrıca dolgunun boru sistemi içerisinde yeraltındaki duraklara kadar rahatça taşınabilmesi için ince tane miktarı da oldukça önemlidir (Cooke, 2007; Koupoli vd., 2016; McLean vd., 2021). İnce tane içeriği macun dolgu kıvamını etkilediğinden aynı zamanda boru içindeki dolgu iletimini de etkileyerek boruların zarar görmesine neden olur (Qi vd., 2018; Wang vd., 2022b). ÇMD'de kullanılan madencilik atıklarının, hafif kütle oluşturmak ve yeterli suyu muhafaza etmek için ağırlıkça %15 oranında 20 μm'den az olmayan ince taneler içermesi gerekir (Kesimal vd., 2005; Cheng vd., 2020). Ayrıca dolguda kullanılan atıklar, ince tane içeriklerine ve 20 μm'nin altındaki katı dozajına göre ince, orta ve kaba atık olarak sınıflandırılmaktadır (Clayton vd., 2003; Fall ve Benzaazoua, 2005).

Dolgudaki büyük parçacıklar arasındaki boşlukları iyi dağılmış ince parçacıklar doldurur (Yılmaz vd., 2013). Böylece hacmi azaltır ve bağlayıcı ile daha güçlü bağ oluşumuna yol açar. İnce parçacıklar kaba parçacıklarla birlikte boru içinde bulamaç halinde çökmeden akar. İnce tanelerin sayısı aynı zamanda borularda taşıma sırasında dolgunun yapışması için de hayati öneme sahiptir (Fall vd., 2007; Cao vd., 2021a). Dolgunun parçacık boyutlarını yönetmek için üniformluk (C_u) ve eğrilik (Cc) katsayıları kullanılır. Zheng vd., (2016), yüksek ince tane içeriğinin, madencilik atıklarının daha düzgün tane boyutu dağılımına sahip olmasını sağladığını belirtmişlerdir. Denklem 1 C_u ve Cc'nin formülasyonunu verir. Birkaç çalışma C_u değerinin 4 ila 6 arasında olmasının macun dolgu numunelerinin yüksek mukavemete sahip olacağını göstereceğini göstermiştir (CaO vd., 2018; Chen vd., 2022b).

$$C_u = D_{60}/D_{10} \;\; ; \;\; C_C = (D_{30})^2/(D_{60} \times D_{10}) \quad (1)$$

Atıklardan ince parçacıkların uzaklaştırılması, bunların akışkanlığını, mineralojik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirir. İnce tane içeriği arttıkça atıkların spesifik yüzeyleri artar ve atıkların yüzey kısımları çimento ile kaplanarak ıslanır. Buna bağlı olarak bağlayıcı tüketiminde nispeten yüksek tasarruf elde edilir. 20 μm'nin altındaki malzeme içeriği optimum seviyede değilse ince malzeme uzaklaştırmanın her zaman mukavemeti net bir şekilde etkilemediği düşünülür (Kesimal vd., 2003a; Jiang vd., 2020b).

Atıkların parçacık boyutu, toplam gözeneklilik ve boşluk oranı gibi dolgunun mikroyapısal özellikleri açısından önemlidir. Daha önce yapılan çalışmalarda atıkların

ince tane içeriğinin arttırılmasıyla dolgunun toplam gözenekliliğinin azaldığı ortaya çıkmıştır. İnce tane içeriği %45'ten fazla olmadığında atıkların yoğunluğu azalır. Düşük kütle konsantrasyonu, atık taneleri arasındaki daha büyük boşluklarla bağlantılıdır ve bu alan, çimento hidratasyonunun geliştirilmesi için kullanılabilir (Yılmaz vd., 2015b; Siddique ve Jang, 2020). Macun dolgunun geçirgenliği tane boyutu dağılımına göre belirlenir. Yüksek ince parçacık içeriğine sahip ÇMD, düşük geçirgenliğe sahiptir (Niroshan vd., 2018). ÇMD'nin içerdiği nem genellikle atık tane boyutu inceldikçe artar. Ayrıca atıkların tane boyutu inceliği arttıkça akışkanlığı da düşmektedir (Ke vd., 2016).

Atıkların tane şekli/özgül ağırlığı, dolgunun davranışını ve özelliklerini büyük ölçüde etkileyebilir (Kesimal vd., 2003b). Cevherin çıkarılması ve işlenmesi sırasında maruz kaldığı patlatma, kırma ve öğütme işlemleri nedeniyle atık parçacık şekli çokgen ve pürüzlü bir dokuya sahiptir. Düz şekilli mineral parçacıkları çoğunlukla eşdeğer özgül ağırlığa sahip yuvarlak tanelere göre daha yavaş çöker. Bu durum dolgunun sertleşmesini, konsolidasyonunu ve drenaj periyodunu önemli ölçüde etkiler (Henderson ve Revell, 2005). Ayrıca tane şekli, sıvının iletilmesini ve tutulmasını sağlayan boşlukların boyutunu etkiler. Dolgunun mukavemeti özgül ağırlık özelliği ile orantılıdır. Çimento genellikle karışımdaki atıkların katı madde içeriğine göre macun dolguya eklenir. Bu nedenle, daha yüksek özgül ağırlık daha fazla bağlayıcı gerektirecektir. Ancak artan bağlayıcı miktarı ÇMD'nin işletme maliyetini artıracaktır (Panchal vd., 2018). Ayrıca dolgu maliyetinin artmasıyla birlikte dolgu üretim tesisinin ekonomikliği azalmaktadır (Nasir ve Fall, 2010). Atıkların inceliği ve yoğunluğu da ÇMD'nin özellikleri arasında yer alan sertleşme sürecini ve su talebini önemli ölçüde etkilemektedir.

1.4.1.2. Maden Atıklarının Mineralojik ve Kimyasal Bileşimi

Atıkların mineralojik/kimyasal özellikleri dolgu karışımlarının performansını ve kalitesini doğrudan etkiler. Ayrıca bu özellikler macun dolgu numunelerinin su salınımı, stabilite, taze dolgu özellikleri ve aşındırıcılık gibi özelliklerini de değiştirebilmektedir (Lindsay vd., 2015; Kasap vd., 2022c). Kil, mika ve muskovit mineralleri, dolguda suyun daha iyi tutulmasına yardımcı olur (Yao vd., 2019). Kuvars gibi silikat mineralleri çok aşındırıcıdır ve boru sistemine zarar verir. Bu nedenle ideal durum, atıktaki mineral dağılımının homojen olmasıdır (Krishna vd., 2021). Ayrıca

atık malzemelerinde bulunan pirit gibi sülfür mineralleri ÇMD karışımının mukavemetini ve stabilitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca atık tanelerindeki özgül yüzey alanı eşit oranda arttıkça, uygun sıcaklık ve oksijen varlığında kükürt oksit miktarı da artar (Yılmaz vd., 2004; Toubri vd., 2022). Çimentolu dolguda kullanılan atıkların oksidasyonu ihmal edilebilir, çünkü atıklar bir bağlayıcı ile karıştırıldıktan sonra yüksek doyma dereceleri nedeniyle macundaki oksijen difüzyonunu engeller. Ek olarak macun dolgu malzemelerindeki sülfatın temeli, kükürt bakımından zengin atıklar hariç, altın madenciliği sırasında siyanürü uzaklaştırmak için kullanılan hava ve kükürt dioksit olabilir (Xiapeng vd., 2019).

Sülfatın macun dolgunun mukavemeti/dayanıklılık özelliği üzerindeki etkisi kür süresine, sülfat konsantrasyonuna, çimento bileşimine ve içeriğine bağlıdır (Cui ve Fall, 2020). Ayrıca macun dolgu malzemesinde bulunan sülfat, önceden oksitlenmiş atıkların varlığından da kaynaklanabilir. Ayrıca erken dönemde (28 günden az) bazı sülfat konsantrasyonlarında (<2000 ppm) minör çimento hidratasyon malzemelerinin çökelmesi sonucu oluşan çökeltiler ÇMD içindeki boşlukları doldurarak dolgunun mukavemetini arttırabilmektedir (Zheng ve ark., 2019). Tipik olarak %80 pirit içeren atıkların proses suyunda 24000 ppm'e kadar sülfat konsantrasyonları belirlenmiştir (Benzaazoua vd., 2008).

Pirit, asit/sülfat oluşturmak üzere mevcut su/oksijen içinde oksitlenir (Denklem 2). Asit saldırıları, sülfit atıklarının oksidasyonu ve CSH bağlantılarının konfigürasyonunun bozulması sonucu meydana gelir (Kesimal vd., 2004). Dolayısıyla oksidasyon nedeniyle açığa çıkan asit, çimento hidratasyon malzemelerinin ($CSH/Ca(OH)_2$) bağlayıcılık özelliklerini kaybetmesine neden olarak dolgunun mukavemetini/dayanıklılığını azaltır (Coussy vd., 2011; Yılmaz vd., 2014b).

$$4FeS_2 + 15O_2 + 8H_2O \rightarrow Fe_2O_3 + 8SO_4^{-2} + 16H^+ \quad (2)$$

ÇMD kütlesi içerisinde çimento türü alçı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ve anhidrit ($CaSO_4$) sülfat içerebilmektedir. Bu malzemeler klinkerdeki çimento prizini kontrol etmek için eklenir ve bu nedenle karışımda az miktarda sülfat geçişi olur. Atıkların türüne ve mineral içeriğine bağlı olarak en önemli sülfat kaynağı pirittir (Sari vd., 2022). pH düştüğünde ÇMD numunelerinde asit oluşabilir ve çimento miktarının artması asitlik gelişimini azaltır. Çimento miktarını artırmanın faydası; dolgunun çimento bileşiminde ve asit saldırılarına karşı koruma hacminde artış nedeniyle hidratasyon

ürünlerinin miktarında bir artış meydana getirir. Ayrıca çimento miktarındaki artış, atık yüzeyinin tamamen hidratasyon ürünleriyle kaplanmasını sağlayarak reaksiyon/oksidasyon için gerekli atık yüzeyinin azalmasını sağlar (Koohestani vd., 2020). Sülfat bakımından zengin atık suyundan ve piritin oksidasyonundan üretilen sülfat, portlandit ve kalsiyum alüminatın çözünmesiyle oluşturulan serbest Ca iyonlarıyla reaksiyona girer. Böylece denklem 3 ve 4'te görüldüğü gibi ikincil jips/etrenjit oluşumu gerçekleşir (Yang vd., 2020).

$$Ca(OH)_2 + SO_4^{-2} + 2H_2O \rightarrow Ca_2SO_4.H_2O + OH^- \text{ (Jips)} \quad (3)$$

$$CaO.Al_2O_3 + 3CaSO_4.2H_2O + 30H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \text{ (Etrenjit)} \quad (4)$$

1.4.2. Macun Dolguda Kullanılan Diğer Endüstriyel Katı Atıklar

Genel olarak endüstriyel katı atıklar/küller, elektrik ve termik güç tesislerinde yakılan toz haline getirilmiş kömür, biyokütle, evsel atıklar veya bunların bir karışımıdır. Bu küller, fosil yakıtların ve diğer enerji temellerinin yakılmasıyla ortaya çıkan başlıca atıklar olarak ifade edilebilir (Li vd., 2022a; Keskin vd., 2024a). Günümüzde, endüstriyel küllerin üretimi sonucu düzenli depolama alanlarının miktarının azalması, çevre refahı için son derece önemli bir konu haline gelmektedir. Ancak, endüstriyel küllerin bertarafı ve potansiyel kullanımları için bu küllerin özelliklerinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Özellikle, birlikte yakmadan kaynaklanan endüstriyel külün karakterizasyonu (fiziksel, mineralojik, kimyasal) kapsamlı bir şekilde belirlenmelidir.

1.4.2.1. Kömür Atıkları

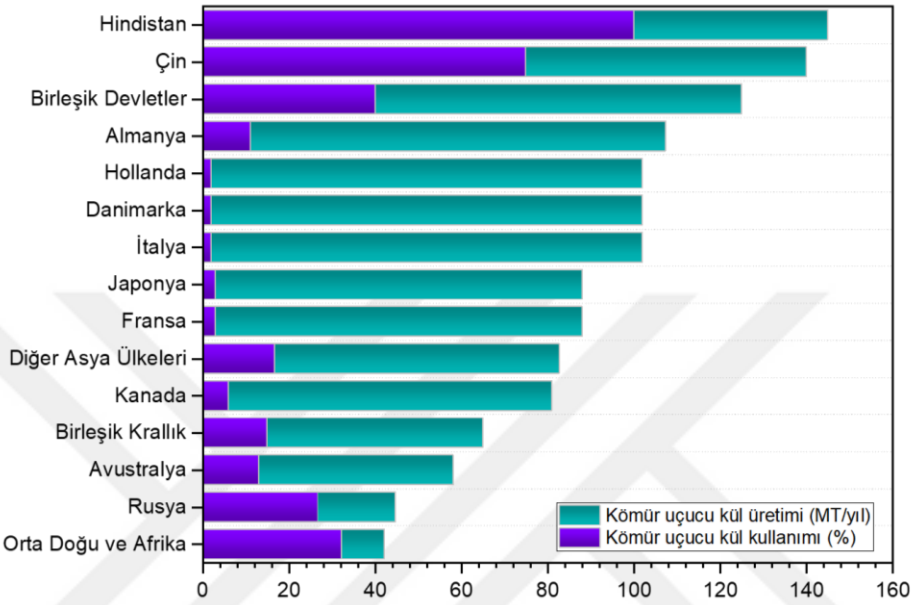
Kömür taban külü (CBA) ve kömür uçucu külü (CFA), kömürün enerji santrallerinde yakılmasıyla oluşan iki önemli atık türüdür. Bu nedenle, kömür küllerinin özellikleri kül yapımında kullanılan tekniğin türüne bağlıdır (Brink vd., 2016). Baca dumanlarının tahliyesinden önce küllerin oluşturulması ve salınması için iki kazan türü kullanılmaktadır. Bunlar geleneksel pülverize kömür ve akışkan yataklı kazanlardır (Rafieizonooz vd., 2022). Bahsedilen kömür yakma yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılan yöntem pülverize kömür yakma yöntemidir. Sürüklenmiş faz veya süspansiyon yakıtlı yakma olarak da adlandırılan pülverize kömür yöntemi, büyük ölçekli enerji üretimi için avantajlıdır (De Rises vd., 2022). Enerji üretim

istasyonu farklı kömür yakma yöntemleri için değişiklik gösterse de genel yerleşim planı benzerdir. Pulverize kömür yakma, ateş çekirdeği bölgelerinin bulunduğu yanma alanının yüksek sıcaklıklarında (1450ºC-1600ºC) kömürü beslemek için toz brülörleri kullanılarak gerçekleştirilir. İstenen verimi elde etmek için toz haline getirilmiş kömür yanma boşluğunda döndürülür (Cai vd., 2020). Kazan içindeki ısı genellikle çoğu bileşenin erime noktasından daha yüksek olsa da malzemelerin yaklaşık %50'si erimeden açığa çıkar (Watanabe ve Yamamoto, 2015). Kömür, hava ile elektrik üretim istasyonunun fırın olarak da bilinen kaynama alanına gönderilmeden önce öğütme değirmenlerinde toz haline getirilir. Yanma bölgesinde kömürün yanıcı elementleri (C, H, O) tutuşur. Sonuç olarak, su gibi büyük gerilimli sıvıyı kapsayan boru hatlarına taşınan büyük bir sıcaklık toplamı oluşur. Bu yüksek basınçlı sıvı kaynatılarak buhar haline getirilir ve daha sonra buhar elektrik üretmek için bir türbinden geçer.

Kömür içinde bulunan SiO_2, $CaCO_3$, $CaSO_4.2H_2O$, FeS_2 ve kil/feldspat mineralleri gibi yanmayan mineraller fırın içinde akar ve küçük sıvı damlaları oluşturur. Bunların %85-95'i baca buharları ile kaynama bölgesinden iletilir ve hızla soğuyarak boşluktan kurtulduklarında küçük/küresel parlak taneler oluştururlar. Mekanik/elektrikli çökelticiler daha sonra bunları baca buharlarından ayırmak için kullanılır ve kömür uçucu külünün oluşmasına neden olur. Yanmayan yan ürünlerin yaklaşık %5-15'i iri tanecikli olup, kazanın tabanındaki su dolu hazneye düşer ve CBA olarak adlandırılır. CBA, koyu gri, geçirgen ve kum özelliklerine sahip malzeme türüdür. Taban külü besleme haznesinde biriktiğinde, akışı olumsuz etkileyen bu birikmiş kütle bir su jeti kullanılarak uzaklaştırılır. CBA daha sonra kanal yolları ile bir bertaraf havuzuna veya geri dönüşüm tesisine taşınmaktadır.

Kömür yakımı dünya çapında tüm elektrik üretiminin yaklaşık %40'ını temsil etmektedir ve aktif ve/veya atıl durumda 13.000'den fazla kömürle çalışan ünite olduğu düşünülmektedir (USEIA, 2014). BP (British Petroleum) dünya enerji istatistiksel analiz raporuna göre, en yüksek kömür üretimi/tüketimi Asya bölgesinde gerçekleşmektedir. Ayrıca, 2020 yılında bir ülkenin toplam birincil enerjisi içindeki kömür tüketim oranı Çin, Hindistan, Japonya ve ABD için sırasıyla %56, %55, %26 ve %10'dur (BP, 2022). Küresel enerji ihtiyacını karşılamak için kömürün bu yoğun kullanımı, muazzam miktarlarda kömür külü üretimiyle sonuçlanmaktadır. Nitekim 2005 yılında 500 milyon tona (MT) ulaşan kömür külü üretimi, 2015 yılında

katlanarak 750 MT'ye yükselmiştir (USEIA, 2014). Kömür külü genellikle üretimde kullanılan kömürün %5-20'sine karşılık gelir ve esas olarak kaba boyutlu taban külü ve ince boyutlu uçucu kül formlarında üretilir. Genel olarak, üretilen toplam kömür külünün %85-95'i ince uçucu külden oluşmaktadır (Kumar ve Singh, 2020).



Şekil 9. Kömür uçucu külün üretim ve kullanım miktarları (Bhatt vd., 2019)

IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) raporunda, 2024 yılında kömür talebinin (kömürlü termik santrallerden) yaklaşık 21.000 MT olacağı ve uçucu kül üretiminin 720 MT'ye ulaşacağı tahmin edilmektedir (IEA, 2020). İstatistiksel verilerle birlikte, küresel uçucu kül üretimi 2020 yılında 7575 MT'ye ulaşmıştır. Bu üretimin en büyük kısmı 3760 MT ile Çin'den gelirken, onu Hindistan (760 MT), Endonezya (564 MT) Avustralya (493 MT), ABD (485 MT), ve Rusya (398 MT) takip etmiştir (Sanjuán ve Argiz, 2022). Amerikan Kömür Külü Birliği raporunda belirtildiği üzere, 2021 yılında kömür termik santrallerinden yaklaşık 30 MT CFA ve 9 MT CBA üretilmiştir (ACAA, 2022). Ayrıca, en büyük üretici ülkelerden biri olan Hindistan'da 1993 ve 1994 yılları arasında kömür üretimi 40 MT iken, CFA kullanımı sadece %3 (1 MT) olmuştur. Kömür külüne verilen değerin artmasıyla birlikte 2015-2016 döneminde 107.77 MT kömür üretimine kıyasla CFA kullanımı yaklaşık %60 seviyesine ulaşmıştır. Dünya genelinde 2019 yılında toplam kömür üretimi önceki yıllara göre %1.5 oranında (toplam 600 MT) artmıştır. Bu durumun bir sonucu olarak yaklaşık 500 MT uçucu kül üretilmiştir (CEA, 2021). Yukarıdaki bilgiler ışığında, kömür küllerinin küresel

kullanımı toplam üretim miktarının yaklaşık 1/4'üne karşılık gelmektedir. **Şekil 9**, ülkelere göre uçucu kül üretim ve kullanım verilerini özetleyen grafiği göstermektedir.

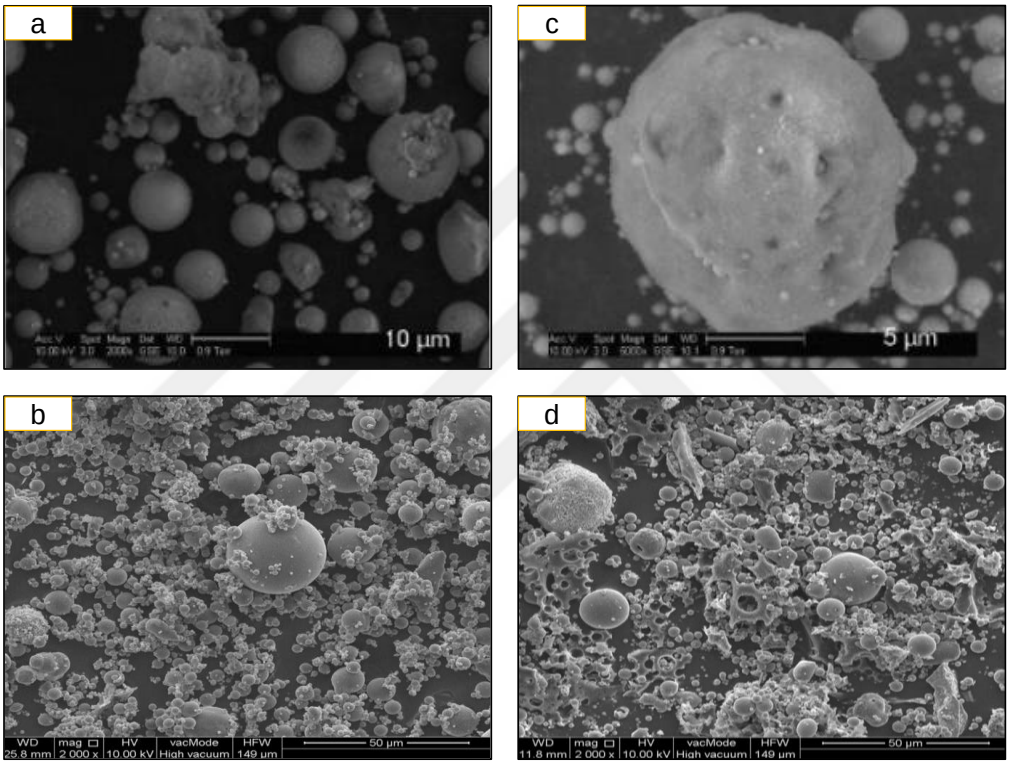
1.4.2.1.1. Kömür Atıklarının Özellikleri

Kömür küllerinin karakterizasyonu genel olarak kömürün doğasına ve yakma işlemine göre farklılık göstermektedir. Farklı kömür türleri ve kaynakları da dahil olmak üzere birçok faktör, kömür küllerinin oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle küllerinin kaynağını oluşturan kömürün cinsi ve değişkenliği; kömürün yakılmadan önce öğütülme (toz haline getirilme) derecesi, kazan tipi, yanma ısısı, kül toplama-giderme sistemlerinin özellikleri, kömüre eklenen katkı maddeleri ve zamanla değişebilen unsurlardan kaynaklanan özellikler gibi parametrelere bağlıdır. Ayrıca, kömürlü termik santrallerde kullanılan başta alt bitümlü ve linyit olmak üzere diğer bileşik seviyedeki kömürler, değişken karbon içerikleri nedeniyle kömür külünün çeşitliliğini doğrudan etkilemektedir. Antrasit kömürü (%86-97) ve bitümlü kömür (%40-80) en yüksek karbon içeriğine sahiptir (Al Biajawi vd., 2022). Her kömürün ve külün özellikleri ülkeden ülkeye değişmekle birlikte, kömürün ana bileşenleri ASTM D388-18 ve ASTM D4326-13'e göre belirlenmektedir (ASTM, 2013; ASTM 2018). Kömür türlerindeki değişiklikler, başta kimyasal özellikler olmak üzere kömür külünün fiziksel/mineralojik özelliklerinde de farklılıklara neden olmaktadır.

İnşaat ve inşaat mühendisliği gibi diğer sektörlerde kullanılmak üzere önemli bir atık ürün ve hammadde olarak dikkate alınan kömür külü, genellikle atık havuzlarına atılmakta veya yüzeyde inşa edilen baraj yapılarında depolanmaktadır. Kömür küllerinin yapısı ve depolanması çevre için ciddi bir risk oluştursa da insan sağlığı üzerindeki zararlı etkileri göz ardı edilmemelidir. Sonuç olarak, kömür külünün özelliklerinin anlaşılması, külün yeniden kullanımı ve bertarafı için son derece önemli bir konudur.

Kömür uçucu külünün (CFA) fiziksel özellikleri genellikle kömür çeşidine, karbon miktarına, yanma sıcaklığına ve kazan tipine/özelliklerine bağlı olarak değişir. CFA partiküllerinin üretimi, yanma sırasında (1400-1700 °C) kömür minerallerinin oksidasyonu sonucu başlar. CFA partikülleri, baca gazı ile süspansiyon halinde katı forma geçerken küresel bir şekil alır. Sonuç olarak CFA, bileşik reaksiyonların dışında

farklı boyutlarda parlak ince taneler halinde bulunur (Ju vd., 2021). Genellikle donuk veya serttirler. Bu camsı tanelerin rengi, CFA'daki yanmamış C toplamının bir fonksiyonu olarak siyah, gri veya bej olabilir. Linyit ve/veya bitümlü kömürlerin yanması nedeniyle açık kahverengi veya gri renkli CFA partiküller meydana gelmektedir (Yao vd., 2015). **Şekil 10**, farklı boyutlarda yanmış-yanmamış kömür taneleri ve camsı küresel taneler içeren CFA örneklerinin SEM görüntülerini göstermektedir.



Şekil 10. CFA'nın SEM görüntüleri: tip F (a-b); ve tip C (c-d) (Amran vd., 2021; Grabias-Blicharz ve Franus, 2022)

Bununla birlikte, CFA'ları değerlendirmek için önemli fiziksel göstergeler olan tane boyutu ve spesifik yüzey alanı, kömürdeki inorganik malzemelerin oluşum biçimlerine ve yanma yöntemlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. CFA'ların baskın tane boyutu dağılımı çoğunlukla 1-100 µm arasında değişmektedir (Belviso, 2018; Sari vd., 2022). İri taneler (>75 µm) genellikle linyit/bitümlü kömür üretimi sırasında mekanik toplayıcılardan elde edilir. Ayrıca, organik CFA tanelerindeki ince mineraller (0.02-0.2µm) kül oluşumunu desteklerken, inorganik minerallerin parçalanması 0.2-10µm boyutunda tane oluşumuna neden olmaktadır (Blissett ve Rowson, 2012).

Tablo 1. Kömür uçucu külünün (CFA) fiziksel özellikleri (Amran vd., 2021)

Özellik	Kömür uçucu külü (CFA)
Renk	Kırmızımsı/siyah/gri-beyaz
Özgül ağırlık	1.9-2.6
Özgül yüzey alanı, S_s, (m^2/g)	5-10
Yoğunluk (g/cm^3)	2.1-3.0
Maksimum kuru yoğunluk (g/cc)	0.9-1.6
Optimum su içeriği (%)	38.0-18.0
Tane boyutu (μm)	1-100
Gözeneklilik (%)	30-65
pH	1.2-12.5
C_u (Üniformluk katsayısı)	3.1-10.7
Geçirimlilik (cm/s)	8×10^{-6} - 7×10^{-4}
C_c (Eğrilik katsayısı)	0.05-0.4
C_v (Konsolidasyon katsayısı, cm^2/s)	1.75×10^{-5} – 2.01×10^{-3}
Sürtünme açısı (j)	300^o-400^o
Kohezyon (kN/m^2)/Plastisite	İhmal edilebilir/Plastik olmayan
Erime sıcaklığı (^oC)	1200-1500
Termal stabilite	0.42-17.32

İnce CFA taneleri, çoğunlukla geniş özgül yüzey sayesinde daha yüksek reaktiviteye neden olur. Özellikle bu taneciklerin hidroksit saldırısına maruz kalması ve yanma alanı sonrasında hızlı soğuması bu durumun başlıca nedenlerindendir. Genel olarak CFA'ların yüzey alanı 5-10 m^2/g arasında değişmektedir, ancak linyit kömüründen elde edilen CFA'ların özgül yüzeyi 200 m^2/g'a ulaşabilmektedir. Ayrıca, elektrostatik çöktürücülerden elde edilen CFA'ların S_s değerlerinin 1200 m^2/g'a kadar ulaşabileceği öngörülmektedir (Xu ve Shi, 2018). CFA'ların yoğunlukları 2.1-3 g/cm^3 arasında, özgül ağırlık değerleri ise 1.90-2.55 aralığında değişmektedir. Ss değerinin büyüklüğü, CFA'ların sorbent ve/veya katalizör olarak kullanıma uygunluğunu keskin bir şekilde göstermektedir (Gollakota vd., 2019). **Tablo 1**, CFA'ların genel fiziksel özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir.

CFA'ya kıyasla kömür taban külü (CBA) ise iri taneli (>100 μm), gözenekli ve heterojen bir ürün olup hava akımı yoluyla kömür kazanlarının en alt kısmında birikir. CBA'nın fiziksel özellikleri büyük ölçüde partiküllerinin boyutuna ve şekline bağlıdır. CBA'nın oluşumu sırasındaki yanma sıcaklığı ve pulverizasyon hızı da fiziksel özellikleri etkilemektedir (Mangi vd., 2019). CBA, CFA'dan daha iri boyutta olmasına rağmen, hafif bir madde olarak nitelendirilebilir. Genel olarak, CBA'ların tane boyutu, düşük silt ve kil içeriğine sahip ince agregaların tane çapına benzer. İnce agregalara kıyasla düşük oranda orta-kaba kum ve daha yüksek oranda ince kum içerir. Ayrıca CBA, CFA'dan daha düşük bir yoğunluğa sahiptir (1200-1620 kg/m^3) (Singh ve

Bhardwaj, 2020). CBA'nın fiziksel varlığı griden siyaha değişse de süngerimsi bir dokuya, köşeli ve düzensiz bir yapıya sahiptir (**Şekil 11**). CBA'nın süngerimsi ve gözenekli yapısı, onu sıradan kumlardan daha sert hale getirmektedir. Ayrıca 0.075-20 mm tane boyutuna sahip ince agregalar ile neredeyse benzer bir tane dağılımına sahiptir (Zhou vd., 2022b).



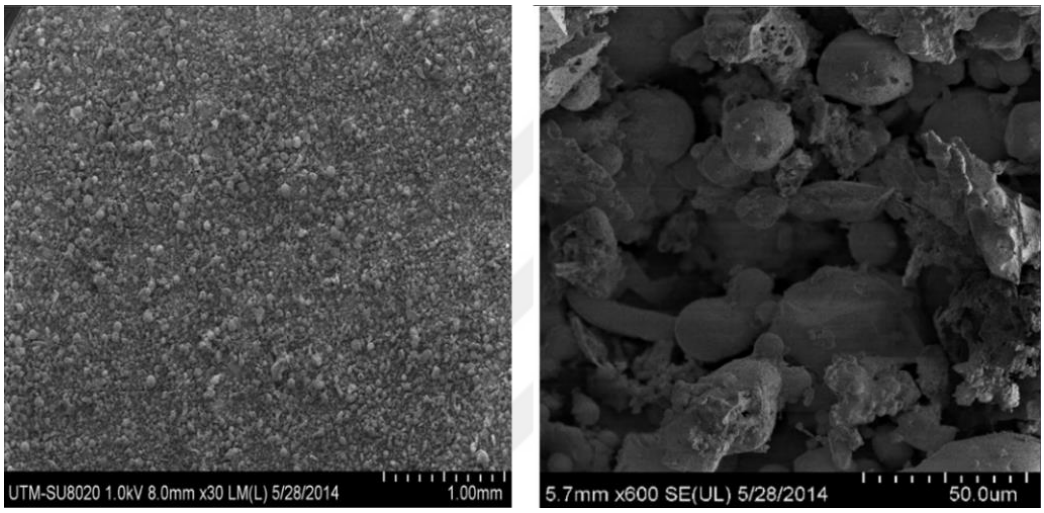
Şekil 11. Doğal (a) ve öğütülmüş (b) formdaki CBA (Ankur ve Singh, 2021)

Tablo 2. Farklı ülkerlerdeki CBA'ların fiziksel özellikleri (Zhou vd, 2022)

Özellikler	**Kömür kaynağı**				
	Türkiye	**Çin**	**Hindistan**	**Malezya**	**Güney Kore**
Özgül ağırlık	2.2	2.2	1.9	2.6	1.9
Özgül yüzey alanı (m^2/kg)	93	-	600	316	-
İncelik modülü	-	1.8	2.4	2.9	5.6
Su içeriği, ω (%)	-	28.9	8.1	1.0	4.1

Tablo 2, farklı ülkelerde üretilen CBA ürünlerinin genel fiziksel özelliklerini (incelik modülü, özgül ağırlık, özgül yüzey alanı ve su içeriği) göstermektedir. CBA'nın özgül ağırlığı 1.39 ile 2.60 arasında değişmektedir. Özgül ağırlıktaki bu düşük değerler, esas olarak CBA'nın gözenekli yapısının ve kömürün yanma şeklinin bir sonucudur. Ayrıca, yüksek porozite doğal ince agregalara kıyasla daha yüksek su emilimine (%11.61-32.23) neden olmaktadır. CBA'nın incelik modülü 1.97 ile 3.55 arasında değişmektedir. Bu incelik modülü değerleri ince agregalar için iyi bir uyum içindedir (Muthusamy vd., 2020). CBA tanelerinin yüzey alanı büyüklüğü ülkeden ülkeye değişmekle birlikte kırma-öğütme ile geliştirilebilir. Yüksek özgül yüzey değerleri CSH ve CASH gibi hidrasyon malzemelerinin oluşumunu artıracağından, CBA'nın taneleri ve kimyasallar arasındaki tepkiyi geliştirir. Önceki bilimsel

çalışmalara göre, CBA için bilinen en büyük yüzey alanı değeri 7799 m^2/kg iken, tipik bir OPC için yüzey alanı yaklaşık 4050 m^2/kg'dır (Gooi vd., 2020). **Şekil 12**, CBA partiküllerinin SEM mikrograflarını göstermektedir. Buradan, taze CBA'nın tanelerinin pürüzlü ve kum-çakıl boyutunda olduğu açıkça görülmektedir. Bu düzensizlik çoğunlukla CBA'nın içerdiği yanmamış karbon, anhidrat ve kalsit miktarına göre değişmektedir. Ayrıca, CBA üretiminde kullanılan yöntemlerin (durulama, sinterleme, alkali füzyon) bir dereceye kadar mikroyapısal değişime neden olabileceği düşünülmektedir.

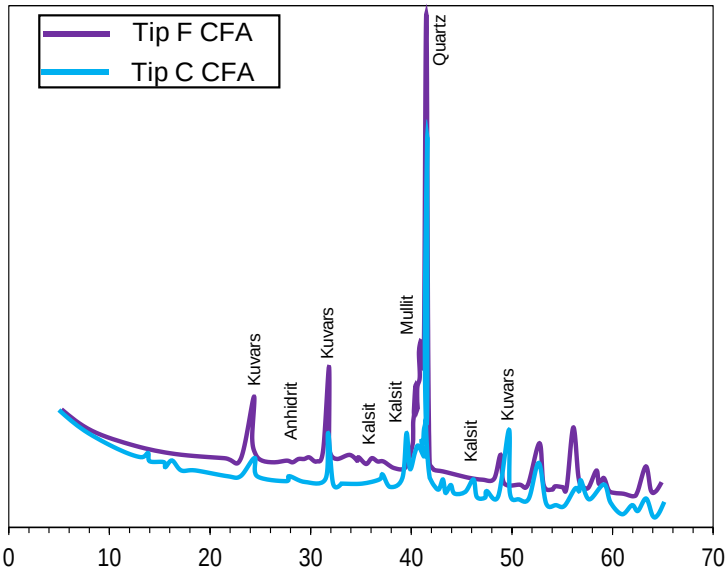


Şekil 12. Kömür taban külünün (CBA) SEM görüntüleri (Rafieizonooz vd., 2016)

CFA'lar genellikle çok bileşenli ve heterojen bileşime sahip karmaşık bir malzemedir. Faz bileşimi olarak yapısında organik (%1-9) ve inorganik (%90-99) malzemeler içerir. Ayrıca yapısında eser miktarda sıvı bileşenler (<%0,5) bulunmaktadır (Grabias-Blicharz ve Franus, 2022). Tipik olarak, yanmamış karbon organik bileşenlerini oluşturur. Yapısal olarak, çoğunluğu temsil eden inorganik bileşenler amorf faz ve kristal faz (kuvars, mullit, götit ve kalsit) ile karakterize edilir. CFA yapısal bileşenleri tektonik veya doğal kökenlidir (Belviso, 2018). Bu bileşenler şu şekilde sınıflandırılabilir:

- ✓ Sülfatlar, karbonatlar, oksitler, silikatlar ve fosfatlar (kömür mineralleri/fazları),
- ✓ Kömürün yanması sırasında oluşan mineral fazlar,
- ✓ CFA'nın depolanması ve taşınması sırasında oluşması beklenen mineraller (kalsit, alçıtaşı, portlandit ve dolomit).

CFA'nın temel mineral unsuru amorf alüminosilikat cam fazlarıdır (**Şekil 13**). Yapısında ayrıca demir oksitler (siderit, manyetit), yanmamış kömür taneleri ve kriptokristalin fazlar (kireç, kuvars ve mullit) bulunmaktadır. CFA içeriğindeki amorf fazlar reaktivite potansiyelini, jeopolimer gelişimini ve toksik element salınımını doğrudan etkilemektedir. Bu amorf fazın oluşumu nedeniyle CFA aynı zamanda puzolanik özellikler de sergilemektedir (Gollakota vd., 2019).



Şekil 13. Kömür taban külünün (CBA) SEM görüntüleri (Rafieizonooz vd., 2016)

CFA'ların yapısı/elemental grupları, kömürde bulunan inorganik hammaddeler (oksit, kil, kuvars ve feldispat) nedeniyle dünyanın üst kabuğundaki kayalara benzer özellik gösterir. Bu nedenle, CFA'nın kimyasal bileşimini, kömür yataklarının kaynağını ve jeolojik etkilerini anlamak genellikle kilit öneme sahiptir (Belviso, 2018). Tipik olarak CFA'dan kaynaklanan temel bileşenler silika, alümina, demir oksit, kalsiyum oksittir ve miktarları uçucu külün türüne göre değişir. CFA'daki C (karbon) miktarı kömür türüne ve yakma şekline göre değişmekte ve ana bileşenlerin miktarını değiştirmektedir. Alkali oksitler (MgO ve SO_3) de CFA içerisinde minör bileşenler olarak bulunur. CFA genellikle SiO_2 (%25-60), Al_2O_3 (%10-30), Fe_2O_3 (%1-15) ve CaO (%1-40) değerlerinde bazik oksitler içerir. Bu farklı değerler uçucu külün türünü karakterize eder. Ancak, kömür farklı yerlerden elde edildiği için uçucu külün kimyasal yapısı farklılık gösterir. Uçucu külün temel bileşenleri tipik olarak alüminanın yanı sıra silika olarak tanımlanır. Bitümlü kömürün yanması sonucu oluşan

CFA'ların CaO içeriği linyit kömüründen daha düşüktür, ancak Fe_2O_3 bakımından daha zengindir (Franus vd., 2015). **Tablo 3**, farklı kömür yapılarına göre üretilen CFA'ların kimyasal içeriğini göstermektedir.

Tablo 3. Farklı kömürlerden elde edilen CFA'ların kimyasal özellikleri (Arent vd., 2011)

Kimyasal bileşen (%)	Kömür tipi			
	Bitümlü	Alt-bitümlü	Linyit	Antrasit
SiO_2	20-60	40-60	15-45	28-57
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15	3-16
Al_2O_3	5-35	20-30	10-25	18-36
CaO	1-12	5-30	15-40	1-27
MgO	0-5	1-6	3-10	1-4
SO_3	0-4	0-2	0-10	0-9
Na_2O	0-4	0-2	0-6	0-1
K_2O	0-3	0-4	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5	1-8

CFA gibi CBA'nın kimyasal içeriğide kömürün kaynağı, türü ve yanma koşullarından doğrudan etkilenmektedir. Özellikle linyitin yanması ve alt bitümlü kömür nedeniyle, kalsiyum ve alkali elementler açısından zengin CBA oluşumu meydana gelmektedir. Alkali elementlerin varlığı CBA'ların alkali (bazik) özellik göstermesine neden olur. CBA'nın alkalinitesi hafif bazik (6,5-7,5), orta bazik (7,5-8,5) ve yüksek bazik (8,5<) olmak üzere üç farklı kategoride değerlendirilmektedir (Zhou vd., 2022).

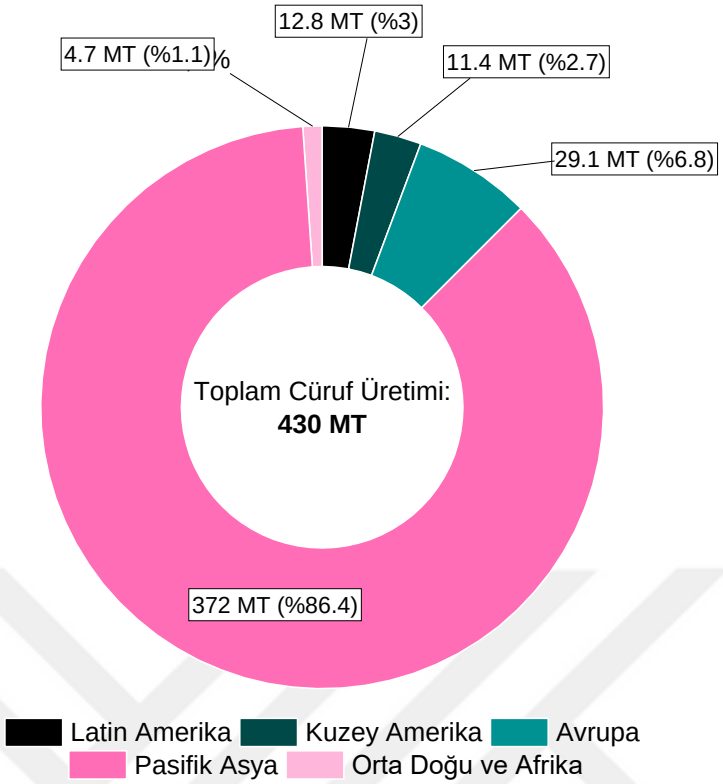
Anstrasit kömüründen elde edilen CBA'lar düşük kalsiyum ve yüksek demir içeriğine sahiptir. Genel olarak, CBA bileşimi silika (%45-75) ve alüminadan (%10-35) oluşur. Bu bileşim, CBA'nın ASTM C618 standartlarında belirtildiği gibi puzolanik bir ürün olarak kabul edilmesini sağlar. CBA'nın reaktif kireç içeriği (7%) ve LOI değeri (<%8) nedeniyle ASTM C618-15'e göre F tipi olarak kabul edildiği de söylenebilir (Ankur ve Singh, 2021). Silisyum oksit (SiO_2), CBA'ları oluşturan ana oksitlerden biridir ve Fe/Al/Mg/Ca gibi oksitleride de önemli ölçüde yapısında

bulundurabilir. Bu oksitler arasında SiO_2 ve Al_2O_3 puzolanik reaktivite için en önemli oksitlerdir ve CFA ile benzer oranlarda bulunurlar. Ayrıca, yüksek miktarda SiO_2 içeren CBA'ların partikülleri genellikle hidrofilik özellikler gösterme eğilimindedir (Rafieizonooz vd., 2016).

Mineralojik özellikler açısından incelendiğinde, CBA'ların temel bileşenleri C, Si, Ca ve Al'dur. Eser elementler arasında en yüksek konsantrasyona sahip elementler Co, Pb, Hg ve Se'dir. Ayrıca As, Hg, Sb ve Se, CBA'dan ziyade CFA tanelerinin yüzeyinde yoğunlaştıkları için uçucu eser elementler olarak tanımlanmaktadır (Singh ve Bhardwaj, 2020). CFA ile ilgili başlıca çevresel sorunlar genellikle metallerin (Co, Ni, Cu, Zn ve Pb) ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Kömür termik santrallerindeki yakma işlemi sayesinde, CBA'da başta kuvars olmak üzere filosilikatlar, sülfürler ve karbonatlar oluşur. Bunlar arasında kuvars, silisyum fosfat ($SiPO_4$) ve mullit ($Al_6Si_2O_3$) CBA'daki baskın kristal yapılardır. Ayrıca, CBA'larda demir (Fe) çoğunlukla manyetit (Fe_3O_4) ve hematit (Fe_2O_3) formlarında bulunur (Kim, 2015).

1.4.2.2. Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu, demir cevherinin eritilip yüksek fırınlarda erimiş pik demire dönüştürüldüğünde meydana gelmektedir. Temel olarak Ca, Mg, Mn ve Al silikatları ile diğer oksitlerin farklı kombinasyonlarından oluşmaktadır (Birol ve Saridede, 2013). Yüksek fırın cürufunun performansı tamamen demiri meydana getiren hammadelerin kalitesine bağlıdır. Cüruf üretim miktarı üretilen pik demir tonu başına yaklaşık 300 kg'dır ve Japonya'da yıllık yüksek fırın cürufu üretimi 24 milyon tonu aşmaktadır. Yüksek fırın cürufları soğutma yöntemine bağlı olarak granüle yüksek fırın cürufu (GBF) ve hava soğutmalı yüksek fırın cürufu (ACBF) olmak üzere ikiye ayrılır. Son yıllarda, tesislerin çoğu soğutma için granüle yöntemi kullanırken, az sayıda tesis hala hava soğutmalı yöntemleri kullanmaktadır (Durinck vd., 2008; Gan vd., 2012). 2016 yılında, dünyadaki cüruf üretimi 430 milyon ton olup, toplam hacmin %66'sını GBF cürufu, %34'ünü ise ACBF cürufu oluşturmaktadır. Cüruf üretim verilerinin dünya bazında dağılımı **Şekil 14**'te gösterilmektedir. Küresel olarak, toplam cürufun %32'si Çin'de üretilmektedir, bu da yaklaşık 139 milyon tondur (Tripathy vd., 2020).



Şekil 14. Dünyadaki yüksek fırın cürufu üretimi (Tripathy, 2020)

Çelik cürufu Japonya, Avrupa, Amerika Birleşik Devletleri ve Çin'de büyük ölçüde yol yapımı, çimento üretimi, iç geri dönüşüm, inşaat mühendisliği ve tarımda kullanılmaktadır. Japonyada çelik cürufunun %30.9'u kıyı koruma dolguları, yumuşak zemini düzeltmek için toprak kaplamalar, yol zeminleri ve setler dahil olmak üzere sivil uygulamalarda kullanılmıştır. Dünyada çelik cürufu kullanımı 2012 yılında yaklaşık 21.8 milyon tona ulaşırken kullanım oranı ise %87'de sınırlı kalmıştır. Almanya ve Fransa gibi bazı Avrupa ülkelerinde çelik cürufu kullanım oranı %90'ın üzerindedir. U.S. Geological Survey (2013) verilerine göre, Amerika Birleşik Devletleri'nde 2013 yılında çelik cürufu üretimi 7.8 milyon tona ulaştığı belirtilmiştir. Bu çelik cürufunun yaklaşık %49.7'si yol yapımında, %16'sı ise asfalt betonu yapımında kullanılmıştır. Buna ek olarak ABD çelik cürufunun yalnızca %15.6'sı nihai olarak düzenli depolama sahasına gönderilmiştir. Çin'de çelik cürufu üretimi 2013 yılında 100 milyon tona ulaşmıştır. Çelik cürufu kullanımı çok düşük olduğundan, birikmiş 300 milyon ton çelik cürufu atıl halde kalmıştır. Çin, yol ve tarım için çelik cürufu kullanımında diğer ülkelerin oldukça gerisinde kalmaktadır (Guo vd., 2018).

Granüle ve hava soğutmalı yöntemler cürufun soğutulması için kullanılan başlıca yöntemlerdir. GBF cürufu, eritilen hammaddenin kalitesine ve üretim

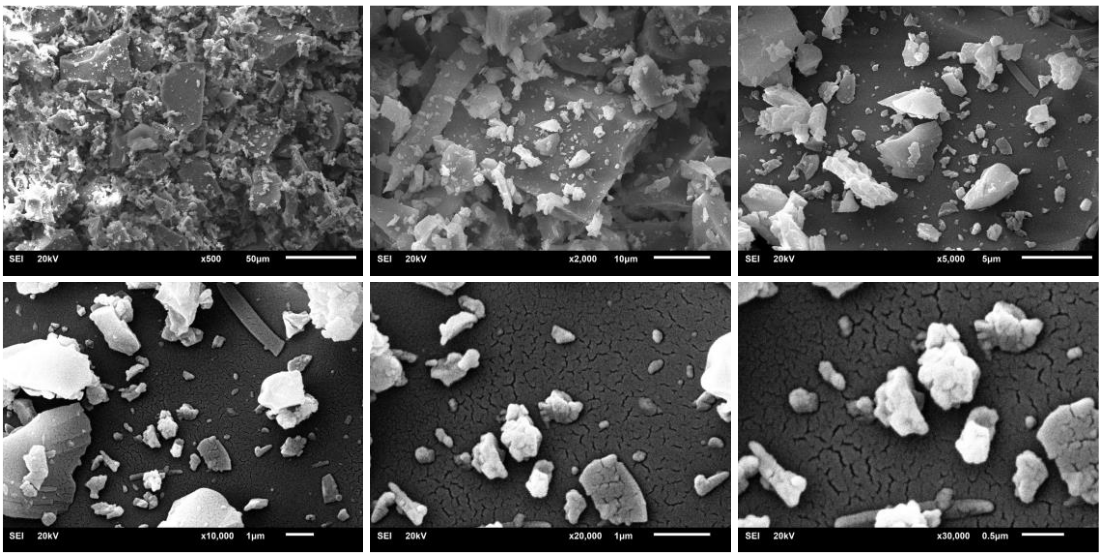
yöntemine bağlı olarak kaynaktan kaynağa değişen kristal olmayan granüler bir malzemedir. Sıvı cüruf soğutulur ve minimum kristalleşme olasılığı olan camsı bir malzeme oluşturmak için hızlı su verme ile katılaştırılır. Cürufun bu hızlı su verme işlemi, minimum miktarda klinker benzeri malzeme ile kum boyutunda ince parçacıkların oluşmasına neden olur (Tripathy vd., 2020). GBF cürufunun fiziksel özellikleri ve granülometrisi elementel bileşime, soğutma şekline ve cürufun operasyonel parametrelerine bağlıdır. Cürufun granülasyonu, erimiş cürufun yakınında tasarlanmış bir granülasyon çukurunda yüksek basınçlı bir su jeti aracılığıyla dökülmesiyle elde edilir. Granülasyon süreci, cürufun soğuk suda kontrollü bir şekilde hızlıca söndürülmesidir ve kristal büyümesi için minimum kapsam sağlar. Bu ortamda hızlandırılmış soğumayı kolaylaştırmak için erimiş cüruf üzerine büyük miktarda su (10:1 su ve erimiş cüruf oranında) dökülür ve kum boyutunda amorf parçacıklara dönüştürülür (Miyamoto vd., 2015; Václavík vd., 2012). Benzer şekilde, ACBF cürufu, sıvı cürufun yataklara dökülmesi ve ardından atmosferik koşullarda yavaşça soğutulmasıyla üretilir. Yavaş soğutma işlemi sırasında, sert topaklı bir kütleye sahip kristal partiküller oluşur ve daha sonra işlemek için kırma ve boyutlandırma gerekir. ACBF cürufu pürüzlü, gözenekli, camsı pürüzsüz, konkoidal kırıklar gibi köşeli, kübik şekilli ve farklı dokusal desenlere sahip olabilir. Bu cürufların fiziksel özellikleri, demir üretim sürecine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir (Miyamoto vd., 2015; Václavík vd., 2012).

1.4.2.2.1. Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Özellikleri

ACBF ve GBF cüruflarının birincil kullanım alanı genellikle yapı malzemeleridir (Miyamoto vd., 2015). ACBF, bileşimi (bol miktarda gehlenit ve akermanit içeren kristalize Ca-Al-Mg silikatlar) nedeniyle Portland çimentosunun yanı sıra bağlayıcısız uygulamalarda ve asfalt betonlarında iyi performans gösteren dayanıklı bir agrega üretir (Kalalagh vd., 2005; Sadek, 2014). ACBF cürufu 1930'lardan beri inşaatlarda kaba agrega olarak kullanılmaktadır, ancak çimento üretimine uygun hidrolik özellikleri sınırlıdır (Mostafa vd., 2001; Tripathy vd., 2020). Ayrıca, hafif beton üretiminin yanı sıra duvar bloklarında kullanılmak üzere hafif agrega üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. ACBF cürufu yavaş soğuması

nedeniyle sert ve yoğun bir kütle olma eğilimindedir ve bu da farklı beton uygulamalarında ve diğer beton bazlı ürünler için kullanışlıdır.

GBFS'nin çimentoda kullanımı uzun bir geçmişe sahiptir. İlk ticari kullanımı 150 yıl öncesine, Almanya'da kireç cüruflu çimentonun ticari olarak üretildiği 1865 yılına dayanmaktadır. 1901 yılına gelindiğinde, Portland çimentosunda maksimum %30 GBFS kullanılırken, 1907 yılında %85'e varan GBFS içeriğine sahip çimento üretilmeye başlanmıştır. O zamandan bu yana, çimento üretiminde birkaç önemli avantaja sahip önemli bir tamamlayıcı çimento malzemesi (SCM) olmuştur. Klinker ile aynı şekilde işlenebilir, taşınabilir ve diğer SCM'lerden daha yüksek ikame oranlarında kullanılabilir. Ayrıca çimento üretiminde kullanılmak üzere dünya çapında yaygın olarak mevcuttur. GBFS betonun hidratasyon ısısını düşürür ve bu durum betonun çatlama riskini azaltır. Ayrıca GBFS, alkali-silika reaktivitesinin neden olduğu hasar riskini azaltırken, kimyasal olarak agresif ortamlara karşı daha yüksek direnç sağlar. Sonuç olarak, GBFS betonun daha uzun ömürlü olması ve kullanım ömrü boyunca daha az bakım gerektirmesine neden olur. Diğer taraftan, GBFS klinkere göre çok daha sert ve aşındırıcı bir malzemedir bu da öğütülmesini daha zor hale getirir. GBFS betonun priz alması standart Portland çimentosundan daha yavaştır ve uygun kürleme gerektirir, bu da daha düşük erken mukavemetlere ve potansiyel olarak daha uzun inşaat sürelerine neden olur. Ayrıca karbonatlaşmaya karşı daha düşük dirence sahiptir, bu da beton içerisinde çeliğin korozyon riskini artırır.



Şekil 15. GBFS'nin 6 farklı boyuttaki SEM görüntüsü

Tablo 4. GBFS'nin fiziksel özellikleri

	Fiziksel özellikler		
	Özgül ağırlık	Su tutma (%)	Sertlik (Morhs)
Grubesa vd., 2016	3.2-3.6	3'ten büyük	6-7
Lim vd., 2019	3.56	1.5	-
Saxena ve Tembhurkar, 2018	2.64	0.8-1.6	-
Pang vd., 2016	3.42	3.31	-

Cürufun fiziksel görünümü veya özellikleri, erimiş cürufun üretim süreciyle doğrudan ilişkilidir. Erimiş cüruf hava ile soğutulduğunda, yeniden kristalleşmek için yeterli zamana sahip olur ve topaklı formlarda katılaşır. GBFS'nin yavaş hava soğutması, kırılmış kayanın kaba bir agregasına benzer sert, yoğun ve kristalli bir ürün üretir. Cüruf üretim süreci sırasında su jetine maruz kalarak 1-4 mm tanecik boyutunda granüle hale gelir. Bu süreçte cüruf camsı hale gelir ve hızlı katılaşma nedeniyle küçük parçalara ayrılır. Granüle cüruf, metastabil camsı fraksiyonların varlığı nedeniyle daha reaktiftir (Nath vd., 2022).

GBFS'nin özgül ağırlığı, yaklaşık olarak çimentonun özgül ağırlığına eşittir ve bu değer 2.5 ila 2.9 arasında değişmektedir. GBFS'nin emme kapasitesi %1.2 olarak bildirilmiştir ve bu da betonun akışkanlığını olumsuz yönde etkilemektedir. GBFS, 1.18 mm ila 0.10 mm arasında bir tane boyutu aralığına sahiptir ve malzemenin %62'si bu iki boyut arasındadır (Bilir, 2012). GBFS'nin yığın yoğunluğu 1200 ila 1670 kg/m^3 arasında değişmektedir ve kabaca 1440 kg/m^3 de çimentoya eşittir. GBFS'nin yüzey alanı 4250 ile 4700 cm^2/g arasında değişmektedir ve bu da çimentonun yüzey alanından (3310 cm^2/g) önemli ölçüde daha fazladır. Ek olarak genellikle cürufların yoğunluğu 3.3-3.6 g/cm^3 arasında değişmektedir (Gencel vd., 2021; Ahmad vd., 2022). Bununla birlikte, literatürdeki araştırmalar GBFS'nin farklı fiziksel özelliklerini bildirmiştir (**Tablo 4**). GBFS'nin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri **Şekil 15**'te verilmektedir. Bu görüntüden GBFS'yi oluşturan parçaların köşeli formda olduğu ve yüzeyinin pürüzlü olduğu görülmektedir.

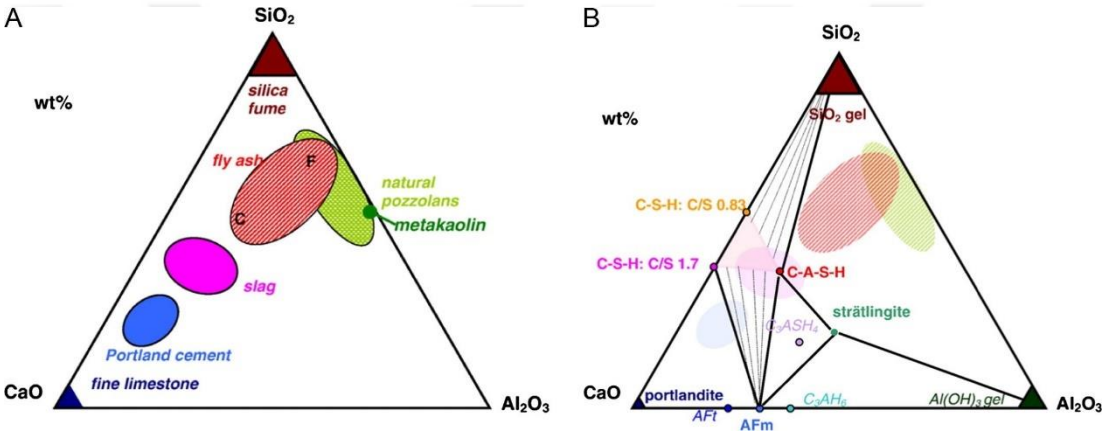
Çelik cürufunun oluşumu genellikle eritme işlemine, silisyum (Si) içeriğine ve dolomit kullanımına bağlıdır (Gao vd., 2017). CaO/SiO_2 oranı genellikle gerekli kireç

miktarını belirlemek için temel olarak kullanılır. Kireç, cürufun miktarını, kimyasal ve mineral bileşimini kontrol etmede kritik bir rol oynar (Kitamura vd., 2009). **Tablo 5**, farklı ülkelerdeki çelik cürufunun kimyasal bileşiminin tipik örneklerini göstermektedir. Çelik cürufunun ana bileşenleri CaO, Fe, SiO_2, MgO ve MnO'dur. Ayrıca çelik cürufu, %38-48 CaO ve %11-20 oranında SiO_2 içerir. Çelik cürufun içerisinde demir (Fe), çelik, demir oksit ve demir içeren mineraller şeklindedir. Bu bileşenler, sinter ve yüksek fırın için manyetik ayırma yoluyla çelik cürufundan ayrılabilir veya çelik üretiminde kullanılabilir. Buna ek olarak, çelik cürufundaki yüksek CaO, MgO ve MnO içeriği, demir ve çelik üretim maliyetini azaltmak için kireçtaşı, dolomit ve manganez cevherinin yerine kullanılabileceği anlamına gelir (Shen vd., 2003; Guo et al., 2018).

Yüksek fırın cürufunun bileşimi, cevherlere, flaks taşına ve yüksek fırına beslenen kok kömüründeki safsızlıklara bağlı olarak değişir. Normalde, yüksek fırın cürufunun bileşiminde silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijen %95'ten fazladır. Cürufun daha iyi hidrolik aktivitesi için kimyasal bileşimi çok önemlidir. Kimyasal olarak cüruflar baziklik indekslerine göre sınıflandırılabilir. Hidrolik aktivite cürufun bazikliğine bağlıdır, cüruf ne kadar bazik olursa, alkali aktivatörlerin varlığında hidrolik aktivitesi o kadar yüksek olur (Pal vd., 2003). Baziklik sabit tutulduğunda, Al_2O_3 içeriğinin artırılması mukavemeti artırır ve CaO'daki bir eksiklik daha fazla miktarda alümina ile telafi edilebilir. CaO yerine MgO'nun etkisi hem baziklikten hem de cürufun MgO içeriğinden etkilenebilir. MgO içeriğindeki yaklaşık %8-10'a kadar olan sapmalar mukavemet gelişimi üzerinde önemli ölçüde etki göstermezken, %10'dan fazla MgO mukavemeti olumsuz yönde etkileyebilir (Pal vd., 2003). Ayrıca, hidrolik aktivitenin artan kalsiyum, alüminyum ve magnezyum oksit içeriği ile arttığı ve artan SiO_2 içeriği ile azaldığı belirtilmiştir. TS EN 197-1 ve İngiliz Standartlarına göre, CaO+MgO kütlesinin SiO_2 kütlesine oranı 1.0'ı geçmesi gerekmektedir. Bu oran, cürufun hidrolik olarak inaktif olacağı yüksek alkaliniteyi gösterir (Pal vd., 2003; Lothenbach vd., 2011; Özbay vd., 2016). CaO-SiO_2-Al_2O_3 sisteminde gelişen GBFS ve hidrasyon fazlarının kimyası **Şekil 16'**da gösterilmiştir (Lothenbach vd., 2011). GBFS'nin Portland çimentosu ve su ile temel hidratasyon ürününün **Şekil 16B**'de görüldüğü gibi kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) olduğu araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir (Lothenbach vd., 2011).

Tablo 5. GBFS'nin kimyasal özellikleri (Özbay vd., 2016)

Kimyasal bileşen (%)	USA	Güney Afrika	Türkiye
CaO	29-50	30-40	34-41
SiO_2	30-40	30-36	34-36
Al_2O_3	7-18	9-16	13-19
Fe_2O_3	0.1-1.5	-	0.3-2.5
MgO	0-19	8-21	3.5-7
MnO	0.2-1.5	-	1-2.5
S	0-2	1-1.6	1.2
SO_3	-	0	-



Şekil 16. Çimentolu malzemelerin CaO-Al_2O3-SiO_2 üçlü diyagramı (A); ve CaO-Al_2O_3-SiO_2 sistemindeki hidrat fazları (B) (Lothenbach vd., 2011)

Belirli bir cürufun amorf içeriği, erimiş cürufun soğutma işlemine bağlıdır. Su ile söndürme, su jetinden geçirme gibi yöntemlerle hızlı bir şekilde soğutulduğunda çoğunlukla camsı (amorf) hale gelir, daha fazla metastabil fraksiyonun varlığı nedeniyle cüruf reaktivitesini artırır. Erimiş cüruf yavaş bir soğutma işlemi ile katılaşırken, bol miktarda kristal faz oluşur (Rai vd., 2002; Sezer ve Gülderen, 2015). Bu nedenle, hızlı soğutma ve ardından granülasyon, granüle yüksek fırın cürufunun reaktivitesini iyileştirmek için yaygın olarak benimsenen bir süreçtir. Ayrıca, cüruf mineralojisi yalnızca erimiş cürufun soğutulması sürecine değil, aynı zamanda cürufun kimyasal bileşenlerine de bağlıdır. Ek olarak GBFS'nin reaktivitesinin sadece amorf miktarına değil, aynı zamanda camsı kısmın ve kalan kristal fazların kimyasal bileşimine de bağlı olduğu gösterir. İki benzer cürufun reaktivitesi bile bileşimlerindeki değişiklikler nedeniyle değişebilir (Nath vd., 2022).

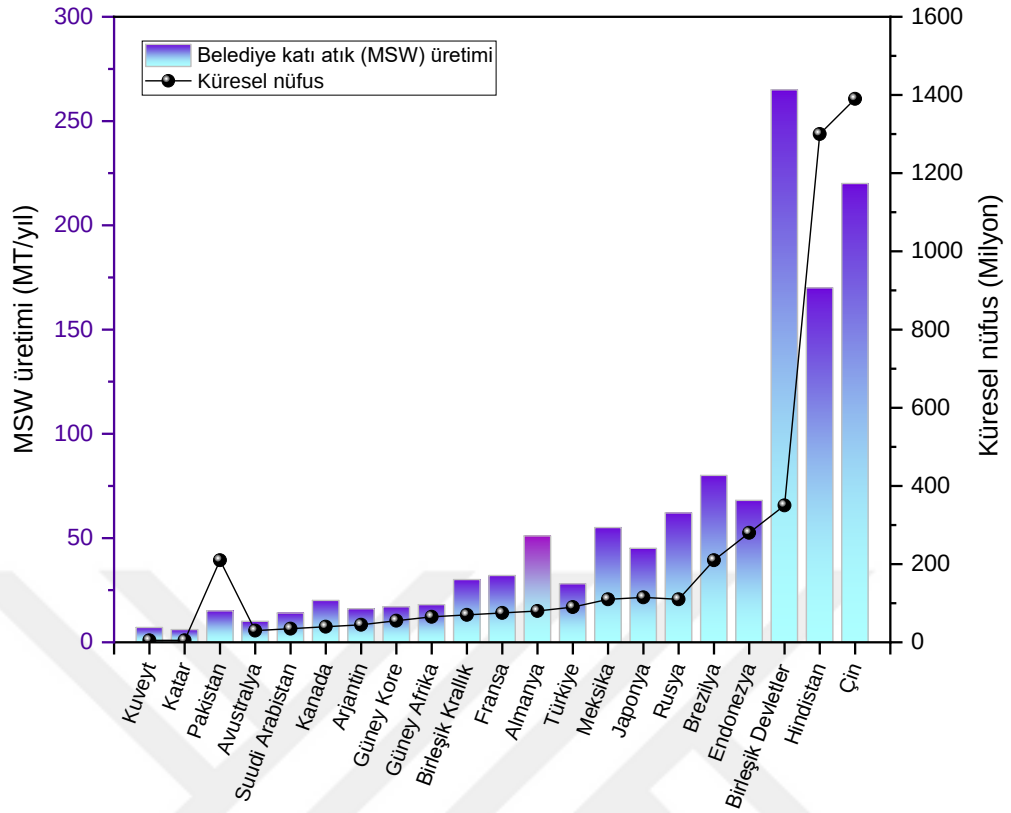
Çelik cürufunun kristal fazları temel olarak kimyasal bileşiminden ve işleme sırasında uygulanan yavaş soğutma hızından kaynaklanmaktadır (Tossavainen vd., 2007). Çelik cürufunun ana mineral bileşenleri **Tablo 6**'da gösterildiği gibi C_3S, C_2S, magnezyokalsiowustit, dikalsiyum alüminoferrit ($Ca_2(Fe, Al, Ti)_2O_5$, RO (R magnezyum, demir ve manganez oksitlerinin oluşturduğu katı bir çözeltiyi temsil eder) ve kireçtir (CaO). Çelik cürufu, mineralojisindeki kararsız bir fazın varlığı nedeniyle hacimsel kararsızlık gösterir (Wang vd., 2010a). Bu kararsızlık serbest-CaO ve serbest-MgO'nun varlığından ve β-C2S'nin γ-C2S'ye dönüşümünden kaynaklanır. Serbest CaO, çelik cürufunun stabilitesini etkileyen en önemli faktördür (Motz ve Geiseler, 2001).

Tablo 6. Çelik cürufun ana mineralojik bileşenleri (Guo vd., 2018)

Fazlar	**Ağırlıkça %**
Trikalsiyum silikat (C_3S), Ca_3SiO_5	0-20
Dikalsiyum silikat (C_2S), Ca_2SiO_4	30-60
Diğer silikatlar	0-10
Magnezyokalsiowustit	15-30
Dikalsiyum alüminoferrit ($Ca_2(Fe, Al, Ti)_2O_5$	10-25
(Fe, Mn, Mg, Ca)O	0-5
Kireç (Ca, Fe)O	0-15
Periklaz (Mg, Fe)O	0-5
Florit CaF_2	0-1

1.4.2.3. Belediye Katı Atıkları

Belediye katı atıkları (MSW) temel olarak toplama, bahçe, endüstriyel, hastane ve tehlikeli çöplerden oluşmaktadır. Kentleşme, yaşam tarzının iyileşmesi ve nüfus artışı nedeniyle bu atıkların üretimi son zamanlarda önemli ölçüde artmıştır. Dünya Bankası (The World Bank, 2019) verilerine göre, günde toplam 3.5 milyon ton MSW üretilmektedir. Bu rakamın 2030 yılında iki katından fazla artacağı da tahmin edilmektedir. MSW'deki bu aşırı üretim her yıl katlanarak artmaya devam etmekte ve 2025 yılına kadar 2.5 milyar tona ulaşacağı öngörülmektedir. Bu da dünya genelinde kişi başına 1.45 kg'lık bir artışa tekabül etmektedir ki bu durum sürdürülebilir kalkınma için acilen etkili bertaraf yöntemlerinin geliştirilmesi ve kullanılması gerektiğini göstermektedir (Obe vd., 2017).



Şekil 17. Farklı ülkelerdeki MSW üretimi ile küresel nüfus arasındaki ilişki (Al-Ghouti vd., 2021)

Şekil 17, çeşitli ülkelerin MSW üretim miktarlarını göstermektedir ve en yüksek üretimin ABD'de olduğu görülmektedir. ABD'nin küresel olarak diğer tüm ülkelerden çok daha fazla MSW üretmesine rağmen, geri dönüşüm oranının diğer ülkelere göre önemli ölçüde düşük olduğu bilinmektedir (OECD Yıllık Raporu, 2007). ABD'de toplam MSW üretimi her yıl 250 milyon ton artarak muazzam miktarlara ulaşmıştır. Bu atığın sadece %35'i geri dönüştürülmekte, %12'si enerji üretiminde kullanılmakta, kalan %53'ü ise belirli noktalarda belirlenmiş rezerv alanlarında depolanmaya devam etmektedir (EPA, 2011). Çin'de üretilen MSW miktarı 2018 yılında 200 milyon tonun üzerine çıkmıştır ve her yıl düzenli olarak artmaya devam etmektedir (China NBS, 2019). Dünya genelinde mevcut MSW üretimi 2 milyar tondan fazladır ve bu miktarın 2050 yılına kadar iki katından fazla artacağı tahmin edilmektedir. Dolayısıyla, ülkelerin sürdürülebilir kalkınması için alternatif etkin kullanım yollarına ihtiyaç olduğu gözükmektedir (Kaza vd., 2018).

MSW yönetiminde, atık üretim hacmindeki kademeli artışı azaltmak için yakma teknolojisi benimsenmektedir (ağırlık ve hacim olarak sırasıyla yaklaşık %60 ve %90 oranında). MSW'nin etkili bir şekilde bertaraf edilmesi için düşünülen

yöntemlerden biri olan yakma, genellikle 3 temel parçadan oluşur: yakma, enerji geri kazanımı ve hava çöpü kontrolü (Sing vd., 2011; Zhang vd., 2021b). Son birkaç on yılda, MSW yakma sadece bir atık bertaraf stratejisinden, atık önerisi ve enerji geri kazanımı gibi ikili avantajlara sahip bir stratejiye dönüşmüştür. Modern MSW yakma tesisleri halihazırda enerji geri kazanım üniteleri ile donatılmıştır ve bu sayede mali avantajlar sağlanmaktadır. Ayrıca, MSW yakmanın fosil yakıt tasarrufu, MSW'nin düzenli depolama sahalarında bertarafının azaltılması, riskli elementlerin stabilizasyonu ve besin maddelerinin geri dönüşümü dahil birçok çevresel faydası vardır. Yakma tesisinde MSW, özelliklerine ve yakma tesisinin amacına bağlı olarak ana yakıt ya da ek yakıt olarak kullanılabilir. MSW'nin yakılması, Japonya, İsveç, Danimarka gibi dünya çapındaki çoğu modern ülke için başlıca bertaraf yöntemidir.

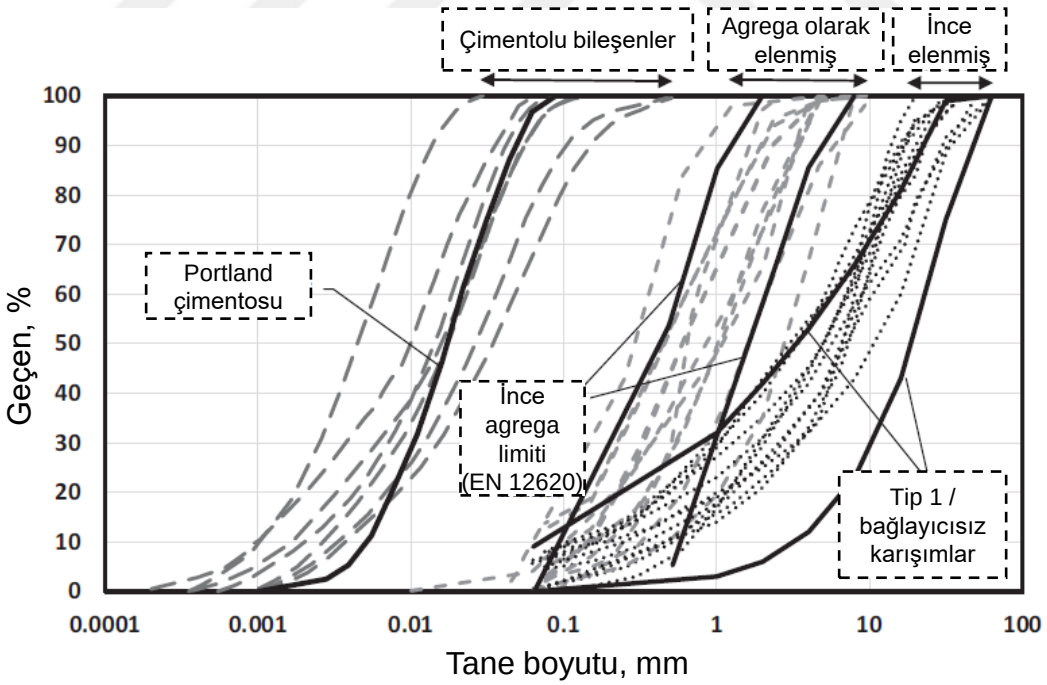
Tipik bir MSW yakma tesisinde depolama bunkerinden gelen MSW, yakma işleminin gerçekleştiği ızgaralı fırına atılır. Izgaralı fırında MSW yakma süresi genellikle 30 ila 120 dakika arasında değişir ve 850-1150°C sıcaklıklarda ve 35-75 bar basınçlarda buhar üretir. Kömür üretim tesisinde olduğu gibi, elektrik üreten bir buhar türbini ünitesini beslemek için yüksek sıcaklıkta buhar üretilir. Ayrıca buhar, ısıtma amacıyla kazan suyu gaz giderme işleminde de kullanılır. Çoğu modern MSW yakma fırınında, ızgara/kazan/kauçuk/torba külleri de dahil olmak üzere bazı ayrı küller de oluşur. MSW yakma işleminin bir sonucu olarak, küller uçucu/taban kül olarak sınıflandırılabilir. Taban külü, tabanda nispeten ağır olduğu için gazlarla birlikte yükselmeyen topaklanmış bir yanma kalıntısı olarak tanımlanabilir. MSW'nin yakılması boyunca şekillenen taban külü esasen ana katı fraksiyondur ve tüm birleşik kül akışının yaklaşık %75-80'ini oluşturur. MSW yakma taban külü esas olarak gözenekli, grimsi ve az miktarda yanmayan organik madde ve metal kısımları içeren ızgara külü (%90'dan fazla) içerir.

1.4.2.3.1. MSW Taban ve Uçucu Küllerinin Özellikleri

MSW atıklarının yakılmasıyla taban ve uçucu kül olmak üzere iki ana kül türü ortaya çıkmaktadır. MSW taban külü yakılan MSW kütlesinin %25'ini oluşturur ve özellikleri MSW'nin kendi özelliklerine, yakma işleminin gerçekleştirildiği fırının türüne ve yanma verimliliğine bağlı olarak değişir. Ayrıca, baca buharından oluşan malzeme tipik olarak uçucu kül olarak adlandırılır ve filtrelerde toplanan kalıntıları

oluşturur. Aynı yakma ünitesinden elde edilen küllerin bile özellikleri kendi aralarında farklılık gösterebildiğinden, bu küllerin değişken parametrelere bağlı özelliklerinin belirlenmesi ve çalışmalara göre yorumlanması son derece önemlidir. MSW küllerinin fiziksel/kimyasal/elemental/mineralojik özellikleri aşağıda sunulmuştur.

MSW'den kaynaklanan toplam katı atığın büyük bir kısmını (ağırlıkça %80) oluşturan MSW-taban külü (MSW-BA), silt ve kil gibi ince boyutlardan çakıla kadar değişen partikül boyutu ile heterojen bir yapıya sahiptir. Bu kül türü farklı atıkların (cüruf, metal, taş, cam ve seramik ve yanmamış organik madde) bir kombinasyonudur ve katı granüler olarak ifade edilebilir. Taban külü fraksiyonunun yaklaşık %60-90'ı kum ve çakıldan, %5-15'i silt ve kilden, geri kalanı ise 10 mm'den büyük ince partiküllerden oluşmaktadır (Dou vd., 2017). BA'nın partikül boyutu 100 mm'ye kadar olabilir, ancak bu durumda standardı karşılamak için boyut küçültme ve eleme uygulanabilir. Ayrıca, partikül boyutları **Şekil 18**'de gösterildiği gibi külün değerlendirileceği farklı alanlara göre (ince agrega veya çimento bileşeni olarak) eleme ve öğütme gibi uygulamalara tabi tutulabilir.



Şekil 18. MSW yakılmış taban külünün tane boyutu profilleri (Dhir vd., 2018)

MSW-BA temel olarak cam/seramik (ağırlıkça %15-30), demir/demir dışı metaller (ağırlıkça %2-5), mineraller (ağırlıkça %50-70) ve diğerlerini içerir (Nithiya

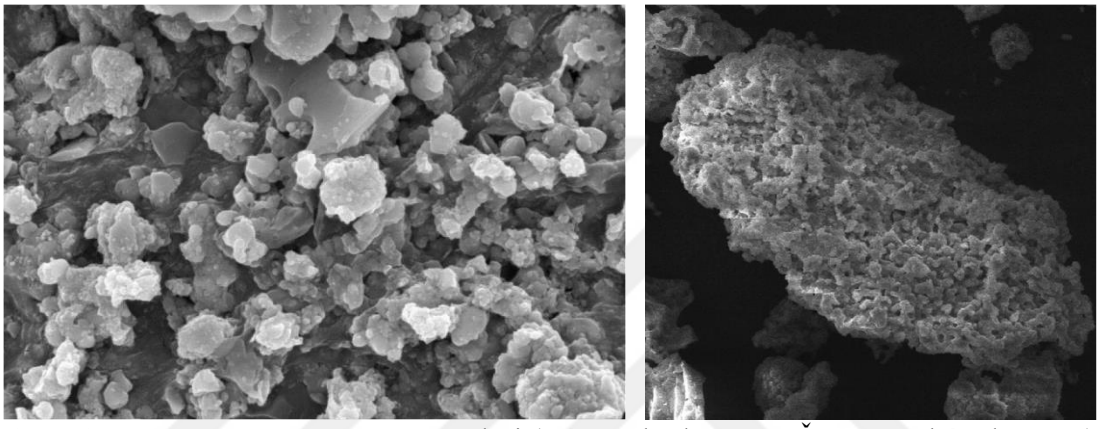
vd., 2018). Taban külü temel olarak alümina, amorf silika ve CaO'dan oluşur. Kömür-BA ve MSW-BA karşılaştırıldığında, her iki külün de morfolojik ve fiziksel olarak koyu, köşeli, düzensiz ve taneli bir dokuya sahip olduğu söylenebilir, ancak bu özellikler külün kaynağına ve yakma işleminin operasyonel durumlarına bağlı olarak farklılık gösterebilir.

MSW-BA, kütle özgül ağırlık değeri sayesinde doğal kum ve agregalara kıyasla daha hafif bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Yığın özgül ağırlık değerleri agregalar için yaklaşık 2.6-2.8, ince agrega/kum boyutlu malzemeler için 1.5-2.2 ve iri agregalar için 1.9-2.4 iken, MSW-BA için bu değerler 1.8 ila 2.8 arasında değişmekte olup ortalama değeri 2.3'tür (Lynn vd. 2017). MSW atıklarının yakılması sırasında ısınma/soğuma etkisiyle şekillenen buhar köpükleri, taban küllerinin morfolojisini büyük ölçüde etkiler ve düzensiz, kaba dokulu parçaların oluşmasına neden olur. Bu durum aynı zamanda taban külünün gözenekliliğini de değiştirdiği için BA gözenekli bir yapıya sahiptir ve su emme kapasitesi artan incelikle (yüzey alanındaki artış nedeniyle) artar. BA'nın su tutma özelliği sıradan agregalarınkinden daha fazladır ve çoğu uygulama için %9.3 ile %9.7 arasında olduğu bulunmuştur (Dhir vd. 2018).

MSW taban külüne kıyasla uçucu kül (MSW-FA), MSW'nin yanma yan ürünlerinin (küçük ölçekli yanmış veya kısmen yanmış organik partiküller) yaklaşık %3'ünü ve yakılan toplam atık kütle hacminin yaklaşık %5-20'sini oluşturmaktadır (Huang vd. 2022). Üretilen FA miktarı, taban külü gibi fırın türünden büyük ölçüde etkilenmektedir. MSW-FA, küçük tane çapları (1-500μm) ve aşırı büyük spesifik yüzey/güçlü hidrofiliklik ile gri veya koyu gri toz görünümüne sahiptir. Buna ek olarak, MSW-FA düşük su içeriğine, eşit olmayan forma ve düzensiz tane boyutuna sahiptir. Ortalama tane boyutu 10 ila 150 μm arasında değişir ve genellikle 250μm'dan küçüktür (Bernasconi vd. 2022). FA taneciklerinin küçük olması, bu küllerin havaya dağılmasını kolaylaştıran ve insan sağlığını etkileyen bir neden olarak gösterilebilir (Wu vd., 2016b).

Uçucu kül çoğunlukla küreseldir ve yanma koşullarına bağlı olarak farklı kristal oluşumlara sahip olabilir. **Şekil 19** literatürde bulunan bazı MSW-FA örneklerinin SEM görüntülerini göstermektedir. SEM görüntülerine bakarak, MSW-FA oluşumunun gevşek bir şekilde paketlenmiş taneler içerdiği ve birbirleri arasında

büyük açıklıklar olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Bu morfoloji, metallerin kül partikülleri arasından kayarak çevreye sızmasını tetikleyebilir. MSW-FA'nın yoğunluğu 1.7 ile 2.4 t/m^3 arasında değişmektedir ve bu değer standart kumunkinden (2.65 t/m^3) daha düşüktür. MSW-FA'nın yüksek özgül yüzeyi, Pb, Cd gibi bazı uçucu metallerin yüzeylerine kolayca adsorbe edilmesini sağlar (Kirkelund vd., 2020). Buna ek olarak, MSW-FA, metallerin atmosfere kolayca nüfuz etmesini kolaylaştıran küçük gözeneklerden oluşan geçirgen bir yapıya sahiptir.



Şekil 19. MSW-FA'nın SEM görüntüleri (Rémond vd., 2002; Čarnogurská vd., 2015)

Genellikle, çeşitli faktörler (atıkların farklı kimyasal bileşimleri, yakma işleminin gerçekleştirildiği fırının türü ve özellikleri) nedeniyle MSW-BA'nın kimyasal özelliklerini tam olarak belirlemek çok zordur. Dolayısıyla, bu zorluklar nedeniyle, taban külünün kimyasal özelliklerine ilişkin çalışmalar arasında bazı farklılıklar ortaya çıkabilmektedir. Doğada yaygın olarak bulunan alkalinlerden biri olan taban külü, oldukça toksik organik maddelerden oluşmaktadır (Li vd., 2016). MSW-BA'nın temel bileşeni SiO_2 olup CaO, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 diğer önemli bileşenlerdir. Taban külünün oksitlenmiş bileşenlerinin belirlenmesi, özellikle öğütme işleminden sonra, çeşitli malzemelerin (çimento ve seramik) yapımında kullanılmaları açısından son derece önemlidir. **Tablo 7**'de literatürdeki çeşitli çalışmalardan elde edilen bazı kimyasal sonuçlar sunulmaktadır.

Dhir vd., (2018)'e göre, çok sayıda MSW-BA numunesinden (toplam 187) elde edilen veriler ışığında: taban külünde bol miktarda bulunan oksitlerin ortalama içerikleri: SiO_2 (silikon oksit, %37.4), CaO (kalsiyum oksit, %22.2), Al_2O_3 (alüminyum oksit, %10.2), Fe_2O_3 (demir III oksit, %8.3), Na_2O (sodyum oksit, %2.8),

SO_3 (sülfür trioksit, %2.7), P_2O_5 (fosfor pentoksit, %2.3), MgO (magnezyum oksit, %2.0) ve K_2O (potasyum oksit, %1.4) şeklindedir.

Taban külünde en bol bulunan (birincil) elementlerin (Si, Ca, Fe ve Al) miktarları tane boyutuyla yakından ilişkilidir ve yakma tesislerine göre değişiklik gösterir. Taban külünü oluşturan ana bileşenler Al, Ca, Fe, K, Mg, Na ve S olmasına rağmen, bazı eser elementler (Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Se, Sr ve V) de az miktarda mevcuttur. Bunların dışında, uçucu elementler (Cd, Zn, Pb, As ve Sb) buharlaşma nedeniyle MSW külünden taban külüne karışmayabilir. Taban külü, uçucu küle göre daha az toksik olmasına rağmen, bazı zararlı metalleri (Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, Cd) barındırabilir. Değişen çevre koşullarıyla birlikte bu metaller taban külünden ayrılabilir ve tehlikeli bir ortama neden olabilir. Liç olarak tanımlanan bu durum, BA'nın fiziksel özelliği (tane boyutu) ve ortamdaki su içeriği ile yakından ilişkilidir.

Tablo 7. MSW-BA'nın kimyasal özellikleri

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
Gao vd., 2017	19.12	12.04	9.31	43.12	2.12	2.40	2.36	0.85
Kuo vd., 2018	24.84	8.42	30.63	27.80	1.50	-	-	-
Tang vd., 2016	35.98	9.00	11.54	19.34	1.81	4.95	1.35	1.15
Zhen vd., 2013	22.75	4.16	5.91	24.40	2.32	2.96	1.71	1.26

MSW-FA'nın başlıca elementleri Ca, Si, A1, C1, Na, K, S, Fe, Mg ve P'dir. Bu elementlere ek olarak, MSW-FA'daki yüksek miktardaki çözünebilir bileşenler, bu kül türünün kimyasal olarak inert davranış sergilememesine neden olmaktadır. Taban külünün aksine, MSW-FA yanma sırasında farklı elementlerin buharlaşması veya yoğunlaşması nedeniyle daha yüksek konsantrasyonlarda metal (Pb, Cd, Hg, Mo, Ni ve Se), tuz, asit ve diğerlerini (dioksinler, furanlar, sülfat ve klorür) içerir (Yu vd., 2015).

MSW-FA, içerdiği yüksek değerdeki zararlı çözünebilir bileşenler nedeniyle ham ürün olarak kullanılamaz ve birçok ülkede riskli bir atık olarak görülmektedir. Sonuç olarak, MSW-FA'nın depolanması ya da bertarafı çevre ve insan sağlığı açısından bazı endişelere yol açabilir. Çünkü FA'nın depolanması sırasında meydana gelebilecek herhangi bir hata, FA'da bulunan zararlı ağır metal kirleticilerin çevreye

zarar vermesine neden olacaktır. Uçucu külün kimyasal bileşenlerinin belirlenmesi konusunda sayısız çalışma yapılmıştır. **Tablo 8** literatürde yer alan bazı sonuçları göstermektedir.

Tablo 8. MSW-FA'nın kimyasal özellikleri

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
Fan vd., 2021	2.10	0.40	0.80	45.30	1.20	8.60	9.90	8.20
Chen vd., 2022c	3.10	1.20	-	41.80	1.70	4.20	7.30	-
Xinghua vd., 2016	23.00	7.30	2.10	36.90	3.30	14.80	-	-
Cristelo vd., 2020	3.25	2.31	0.39	38.70	1.67	4.59	11.57	8.35

MSW-FA'nın temel oksit bileşenleri SiO_2, CaO ve Al_2O_3 olup, kullanılan yakma fırını türü MSW-FA'nın yapısını etkileyen en temel konulardan biridir (Chen vd., 2019a). Literatürdeki veriler incelendiğinde, FA'nın yüksek CaO içeriğinin yakma işlemi sonrasında açığa çıkan zararlı (asidik) gazları azaltmak (nötralize etmek) için kullanılan kireçli suyun fazla olmasından, klor içeriğinin ise plastik ve mutfak atıklarının fazla olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

XRD analizi, MSW-BA'nın mineral tayini için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. MSW-BA'nın temel kristal fazları SiO_2 (en bol bulunan), $CaCO_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4 ve gehlenittir ($Ca_2Al[AlSiO_7]$). Anhidrit, kalsiyum klorür hidroksit ve ek olarak Cl ile ilişkili tuzlar diğer ana kristalleri oluşturur (Tang vd., 2016). Buna ek olarak, daha az yaygın olarak tanımlanan 30'dan fazla çeşitli mineral (alüminatlar, silikatlar, sülfatlar, oksitler, fosfatlar ve çeşitli tuzlar) vardır (Lynn vd. 2017).

MSW-BA farklı çevresel koşullar altında çeşitli mineralojik özellikler sergileyebilir. Açık havada depolanan taban külü, havadaki CO_2 ile reaksiyona girmesi nedeniyle karbonatlaşmaya veya biyolojik bozunmaya uğrayabilir. Taban külünün değişen mineralojisi sayesinde külün pH özellikleri değişebilir ve kül içindeki farklı bileşenlerin hareketi kısıtlanabilir. Özellikle liç özellikleri üzerinde etkili olan bu durum, uçucu küle göre daha az kirletici olmasına rağmen yüksek miktarda ağır metal içeriğine sahip olan taban külünün çevresel etkisini belirlemektedir.

MSW-BA'ya kıyasla MSW-FA'nın mineralojik yapısı genellikle kristalin/amorf fazların bir karışımını yansıtır. FA'nın mineralleri evsel katı atıkların yanması sırasında meydana gelen çeşitli olaylar (buharlaşma, erime, kristalleşme,

sıkışma ve çökelme) nedeniyle oluşur. FA'nın mineralojik yapısının belirlenmesindeki temel zorluklar, kül mineralojisinin karmaşıklığı/heterojenliği ve MSW'nin çeşitliliği sayesindedir. MSW-FA'nın mineralojik yapısını inceleyen ve külün esas olarak amorf klor tuzları ve sülfatlardan oluştuğunu gösteren birçok çalışma vardır (Tan vd., 2022, Fan vd. 2021). İki farklı sahadan elde edilen uçucu külün XRD sonuçları kireçli ham maddeler ($Ca(OH)_2$, CaClOH, $CaCO_3$, $CaSO_4$) ve klorür tuzları (NaCl, KCl) bakımından zengin şekilsiz fazlar içerdiğini göstermiştir (Liu vd., 2023). Wang vd., (2010b), CaClOH'un HCl'nin devreye girmesiyle oluşan bir geçiş aşaması olduğunu ve $CaCO_3$'ün külün kısmi, erken karbonizasyonu nedeniyle oluşabileceğini belirtmiştir. Ayrıca Cristelo vd., (2020) yaptıkları XRD analizi ile MSW-FA'yı karakterize etmiş ve sonuç olarak uçucu külün silvit (KCl), halit (NaCl) ve kalsitten ($CaCO_3$) oluştuğu ve $Ca(OH)_2$, anhidrit ($CaSO_4$) ve CaO bileşenlerinin izlerine rastlandığı sonucuna ulaşmışlardır. Başka bir çalışmada ise MSW-FA'nın Ca ve Cl bakımından zengin olduğu ve bu elementlerin mineral fazlarının temelini oluşturduğu söylenmiştir (Nikravan vd. 2020).

1.4.2.4. Biyokütle Atıkları

Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında, termik santrallerde biyokütlenin yakılması, elektrik üretmenin başlıca verimli ve sürdürülebilir yöntemlerinden biridir (Briones-Hidrovo vd., 2021). Enerji santrallerinde elektrik için artan biyokütle kullanımı (yılda %8'lik bir artış) çoğu modern sanayileşmiş ülke tarafından benimsenmiştir. Biyokütle kullanılarak üretilen elektriğin küresel katkısı 130 GW olup, en yüksek üretime sahip kıtalar sırasıyla Asya, Afrika ve Amerika'dır. Biyokütle yakma, kömür yakma ile aynı süreci kullanarak enerji veya elektrik üretir, ancak biyokütle yakma tesisleri kömür yerine bitki, odun ve organik atık gibi biyokütle materyallerini yakar. Kömürle karşılaştırıldığında biyokütle yine de yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Biyokütle hammaddeleri çeşitli özelliklere sahiptir ve bazı besleme stokları orman/odun atıkları; tarımsal atıklar (mısır koçanı ve buğday samanı); kentsel odun atıkları (ambalaj kasaları ve paletler) ve gıda işleme atıklarıdır (IRENA, 2012). **Şekil 20** bazı biyokütle kaynaklarını göstermektedir.

Tüm bitki bazlı atıklar dahil olmak üzere, biyokütle 4 temel gruba ayrılmaktadır: otlar, odunsu bitkiler, su bitkileri ve gübreler. Biyokütle besleme

stokları olarak da adlandırılan biyokütle malzemeleri canlı organizmalardan elde edilir ve bu nedenle ilk olarak güneşten elde edilen enerjiyi içerirler. Biyokütle enerjisi, dünya enerji arzının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Örneğin, 2010 yılında toplam biyokütle enerji arzı 50 EJ'nin üzerindedir ve bu da o yılki toplam dünya enerji arzının yaklaşık %10'una karşılık gelmektedir (IRENA, 2013). Biyokütleden elde edilen enerji (biyoenerji), tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının yaklaşık %70'ine katkıda bulunması nedeniyle önemli bir yere sahiptir.



Şekil 20. Bazı biyokütle atık türleri

Geçtiğimiz on yıllar boyunca, biyokütleden ısı ve güç üretmeye yönelik teknolojiler, doğrudan biyokütle yakma, kömür/biyokütle gazlaştırma ile yakmayı kapsayacak şekilde gelişmiştir. 2017 yılında biyokütle enerjisinin %91'i katı biyokütleden, %7'si sıvı biyoyakıttan ve %2'si biyogazdan elde edilmektedir (Dünya Biyoenerji Birliği, 2020). 2012 yılında, biyokütle bazlı kombine sıcaklık ve termik santrallerin verimliliği %70 ile %90 arasında değişmiştir (Eisentraut ve Brown, 2012) ve bu oran teknolojinin gelişmesiyle birlikte sürekli olarak artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından belirtildiği gibi, biyokütleden potansiyel enerji üretimi

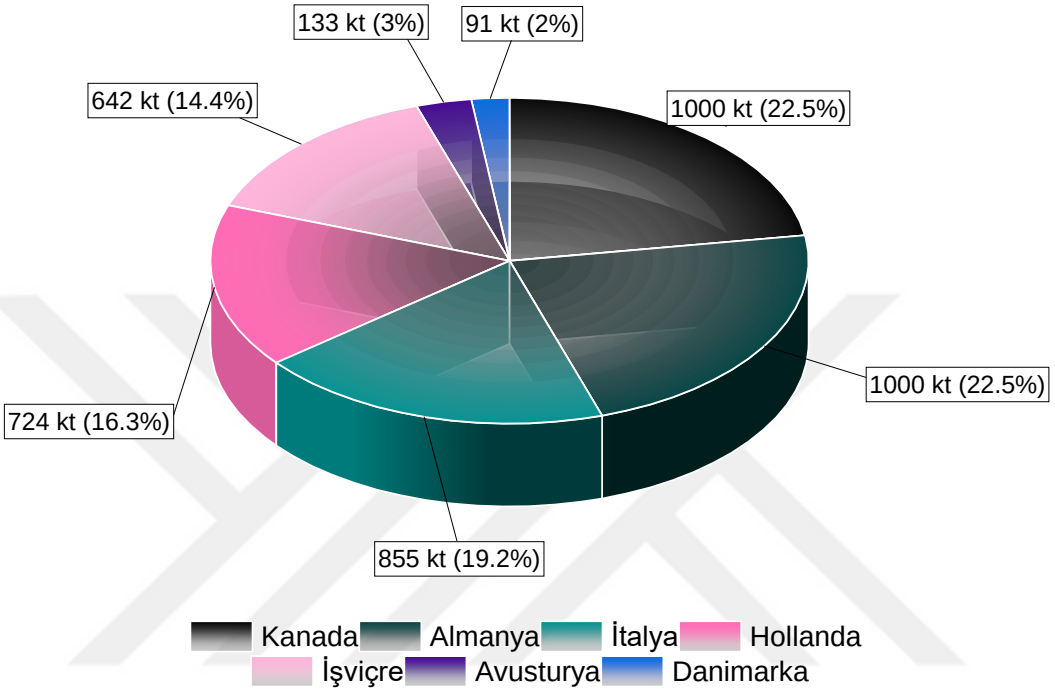
şu anda yılda 120 EJ civarındadır ve bu değerin 2050 yılına kadar biyokütlede öngörülen önemli bir artışla yılda 300 EJ'ye yükseleceği tahmin edilmektedir (Uluslararası Enerji Ajansı, 2012).

Biyokütle özelliklerini iyileştirmek ve biyokütle işleme, taşıma ve dönüştürmeyi daha verimli ve uygun maliyetli hale getirmek için çeşitli ön arıtma teknolojileri kullanılabilir. Yaygın olarak kullanılan ön işlem teknolojileri arasında kurutma, peletleme ve briketleme, torrefaksiyon ve piroliz yer almaktadır. Ön işlemden sonra, biyokütle besleme stokları biyokütle yakımı için biyokütle yakıtlı enerji santraline nakledilebilir. Kompakt kazan tasarımı, değişken yakıt türlerini yakma imkânı, yüksek yanma verimliliği ve azaltılmış kirletici emisyonu gibi diğer yakma teknolojilerine kıyasla bazı avantajlara sahip olan kabarcıklı akışkan yatak teknolojisi, biyokütleyi iyi bir şekilde enerjiye dönüştürmektedir (Żukowski vd., 2023).

Biyokütle yakmanın önemli ekolojik faydaları olduğu ölçülse de yakma işleminde kullanılan yöntemlerin etkinliğini azaltan ve kazan temizliği için ek maliyetlere neden olan büyük miktarda kül üretmesi ve bunlara ek olarak biyokütle malzemelerinin yakmada daha fazla kullanılmasını engellemesi gibi bazı zayıf yönleri de vardır (Wang vd., 2012). Kül yapımı iyi bir şekilde gerçekleştirilmediği takdirde soruna neden olabilir. Genel olarak, biyokütle yanması sırasında iki tür kül oluşur: biyokütle taban/uçucu külleri. İlki esas olarak toplam kül akışının kaba kısmından oluşur ve kum parçacıkları (kuvars) ve diğer mineral safsızlıklardan oluşan yanma odasında üretilir (Modolo vd., 2013). Buna karşılık, ikincisi (uçucu kül) yanma alanının dışındaki buhar akımından ayrılan kül partiküllerini içerir. Bu ince partikülleri tutarak zararlı buharlarının havaya salınmasını engellemek için özel olarak tasarlanmış ekipmanlar kullanılır (Maschio vd., 2011). Biyokütle uçucu külü, küllerin en ince kısmından oluşur ve inert kısım ile hafif bir bitki kısmı içerir.

Bazı kül geri kazanım stratejileri, yanma sonucu oluşan taban/uçucu külü yakalamak için kullanılabilir. Taban külü akışkan yataklı fırınlarda somut olarak parçalanırken, bu fırınlar dışında yerçekimi ile oluşur. Uçucu kül unsurları da çökeltme odalarında yerçekimi ile oluşturulabilir. Ancak, baca buharından çok ince uçucu külü ayırmak için filtre gibi ekipmanlar kullanılmalıdır (Koppejan ve Van Loo, 2012). Biyokütlenin yakılmasında çeşitli biyokütle hammaddeleri kullanılabildiğinden,

biyokütle küllerinin miktarı ve sınıfı değişiklik göstermektedir. Kullanılan yakma tekniği ve yakma çalışma koşulları da kül oluşumunu etkilemektedir. Örneğin, odunun yakılması otsu biyokütleye göre daha az miktarda biyokütle külü oluşturur çünkü otsu biyokütle daha fazla kül içeriğine sahiptir (Koppejan ve Van Loo, 2012).



Şekil 21. Farklı ülkelerde biyokütle kül üretimi (IEA, 2018)

Birçok ülke düşük karbon emisyonu ve ekonomisine geçiş aşamasında olduğundan, mevcut yıllık biyokütle kül üretim miktarları düzenli olarak yayınlanmamakta ve üretimde değişiklikler olmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir yakıtlardan kül üretim miktarlarının tahmin edilmesini zorlaştırmaktadır. Bildirilen bazı üretim verileri, biyokütle kül miktarına ek olarak biyokütlenin kömürle kısmi yanmasından kaynaklanan külü de içerdiğinden, durum daha da karmaşıklaşmaktadır (IEA, 2018). Bununla birlikte, biyokütle üretim verilerinin güvenilir bir şekilde doğrulandığı bölgelerde kül üretimi de değerlendirilebilir. Sonuç olarak, dünya genelinde yıllık biyokütle külü üretiminin 500 milyon ton olduğu söylenebilir (Cruz vd., 2019). Üretilen külün özellikleri, biyokütlenin doğal yapısının yanı sıra yanma koşullarına göre de değişmektedir. Böylece üretilen külün özellikleri kullanım amacına göre şekillendirilebilmektedir. Izgaralı/akışkan yataklı yakma, kül yapımında en yaygın kullanılan yöntem olup, ızgaralı yakmada verim düşükken, akışkan yataklı

yakmada verim yüksektir. Bazı biyokütle külleri diğerlerine göre daha fazla toksik element içerir ve bu nedenle bu küller uygun şekilde incelenmeli ve en uygun şekilde bertaraf edilmelidir. Bazı ülkelerin tahmini biyokütle külü üretimi **Şekil 21**'de verilmiştir.

1.4.2.4.1. Biyokütle Atıklarının Özellikleri

Biyokütle termik enerji tesislerinde üretilen biyokütle külleri (BFA ve BBA), biyokütlenin yakılmasından sonra oluşan kalıntıları ifade eder. Bunlar oksitlenmiş formda çeşitli mineral maddeler ve yanmamış organik maddeler içerir. Bu organik maddeleri (%20'ye kadar) karbonhidratlar, lignin, lipitler ve proteinler olmak üzere 4 temel bileşene ayırmak mümkündür ve çoğu biyokütle atığının lignoselülozik bazlı olduğu söylenebilir (Wang ve Tester, 2023). Üretilen külün miktarı, verimi ve özellikleri çeşitli faktörlere (biyokütle türü, yakma odası türü, yakma sıcaklığı ve çalışma koşulları gibi) bağlı olarak değişmektedir (Munawar vd., 2021). Yanma odası ızgarasının altında biriken BBA genellikle koyu kum gibi en ağır kısımdır ve yan ürünleri oluşturur, BFA ise yanma ve gazlaştırma nedeniyle baca gazlarında asılı kalan en ince kısımdır.

Biyokütle küllerinin fiziksel özellikleri (tane boyutu, yoğunluk, su emilimi ve nem içeriği) yakılacak malzemenin özelliklerine ve biyoyakıt/biyokütlenin yakıldığı rezervuarın türüne bağlıdır (Odzijewicz vd., 2022). Biyokütle külü, kömür yakma külünden farklı olarak düzensiz şekilli parçacıklardan oluşur. Biyokütle küllerinin küresel olarak oluşmamasının nedeni, kömür yanma odalarına kıyasla biyokütle yanma ısısının düşük olmasıyla açıklanabilir. Partikül boyutu ve tane şekilleri BBA ve BFA arasında farklılık gösterir: BFA'nın maksimum nominal boyutu yaklaşık 200 μm iken (kömür FA gibi), BBA'nın maksimum nominal boyutları 2 ila 9 mm arasında değişebilir (Agrela vd., 2019). Rajamma vd., (2015), farklı yakma teknolojileri kullanılarak elde edilen odun/orman ve okaliptüs kabuğundan elde edilen BBA'nın ortalama tane boyutunu sırasıyla 52.92 μm ve 16.04 μm olarak bulmuştur. Bir diğer fiziksel özellik olan yığın yoğunluğu ise sırasıyla 2.59 g/cm^3 ve 2.54 g/cm^3 olarak belirlenmiştir. Eliche-Quesada vd., (2021), çam ve zeytin budama karışımının yakılmasıyla şekillendirilen BBA'nın ortalama tane boyutunu 258 μm olarak

belirtmiştir. Maschio vd., (2011) ve Modolo vd., (2013), BBA'nın odun ve okaliptüs kabuğu yoğunluklarını sırasıyla 2.60 g/cm^3 ve 2.65 g/cm^3 olarak bulmuştur.

Biyokütle atıklarının nem içeriği de bir diğer önemli fiziksel özellik olup, genellikle %30 sınır değerdir ve bu değerin altındaki kalıntılar kuru, üstündeki kalıntılar ise yaş olarak ifade edilebilir (Ravindiran vd., 2022). Pirinç samanı, ananas kabuğu ve karışık gıda atıkları için nem değerleri örnek olarak verilebilir ve bu değerler sırasıyla %11.7, %79.7 ve %76.5'tir (Chen vd., 2020). Biyokütle yakımından kaynaklanan BFA/BBA'nın kimyasal özellikleri biyokütle özelliklerine/kaynağına, hammaddenin ve fırının fiziksel yapısına, yakma koşullarına ve uygulanan tekniğe bağlıdır (Agrela vd., 2019; Cruz vd., 2019). Atık parçaları Si, Fe, Al, K, Ca, P, Mg ve Na bakımından zengindir. Bu elementlerin bileşimleri, biyokütle atıklarında bulunan inorganik bileşiklerden bağımsız olarak düşünülemez (da Costa vd., 2020). BBA ve BFA'nın kimyasal bileşimlerini inceleyen çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve bunlardan bazıları **Tablo 9**'da sunulmuştur. Külün özelliklerinin büyük ölçüde değiştiği ve bu nedenle biyokütle atığının türüne göre özel çalışmalar gerektirdiği yorumlanabilir.

Tablo 9. Biyo-küllerin kimyasal özellikleri (Vassilev vd., 2013; Modolo vd., 2015)

Kimyasal bileşen	BBA (%)		BFA (%)	
	Zeytin bitkisi	Orman biyokütlesi	Pirinç kabuğu	Mısır koçanı
SiO_2	6.84	72.20	94.38	27.65
Al_2O_3	2.73	3.32	0.21	2.49
Fe_2O_3	1.39	0.78	0.22	1.55
CaO	31.41	17.16	0.97	13.19
MgO	2.45	1.97	0.19	2.05
SO_3	-	-	0.92	7.14
K_2O	12.31	0.75	-	-

BFA'yı kömür-FA'ya benzer şekilde sınıflara (C ve F) ayırmak mümkündür. SiO_2, CaO, Al_2O_3, MgO ve Fe_2O_3 gibi bileşenleri içeren BFA, içerdiği CaO yüzdesine göre sınıflandırılır. Örneğin CaO yüzdesi yaklaşık %8 ise C, bu değerden düşük ise F sınıfı olarak adlandırılır (Agrela vd., 2019).

Biyokütlenin yakılması sonucu oluşan küller, suda çözünebilen zehirli elementler (Pb, Cd, Cr, Cu, As, Ni, Zn) ve bitkilerde bulunan elementleri içermektedir.

Bu elementler özellikle BFA'nın farklı uygulamalarda kullanılmasında etkili olmakla birlikte, sağlık sorunlarına neden olabildikleri için hayati önem taşımaktadırlar. Biyokütle külünün mineralojik yapısı çeşitli mineral fazlardan (silikat, sülfat, fosfat, karbonat, klorür gibi) oluşmaktadır (Vassilev vd., 2013). BBA/BFA'da bulunan oksit ve hidroksit grupları genellikle karbonatların, sülfatların, fosfatların, nitratların ve klorürlerin ayrışması/oksidasyonu nedeniyle oluşur. Biyokütlenin mineralojik yapısı, sahip olduğu organik maddelerin oksitleri ve yanma aşamasında açığa çıkan gazların etkileşimi ile tasarlanan sülfat ve fosfatların varlığı ile de ifade edilebilir. Örneğin, Fe_2O_3 (hematit) organik demirin oksidasyonu nedeniyle oluşur.

Çeşitli çalışmalarda başlıca mineraller: zeytin BA için arkanit ve kalsit (Beltrán vd., 2016); çam-zeytin budama BA için CaO, SiO_2 ve $CaCO_3$ (Eliche-Quesada vd., 2021); atık kağıt BA için kuvars (Cabrera vd., 2020); mısır sapı + fıstık kabuğu + talaş BA için kuvars +albit (Jin vd., 2022); odun BA için kuvars + portlandit (Fořt vd., 2021) bulunmuştur. Bu durumlar göz önüne alındığında, BBA ve BFA'nın mineralojik yapısının biyokütle türüne/yakma işlemlerine bağlı olarak şekillendiği ve değiştiği sonucuna varılabilir.

1.4.3. Bağlayıcılar

Bağlayıcı özellikleri, bağlayıcı türü ve oranı, mineral ve kimyasal katkılar ÇMD'nin kalite ve performansını etkileyen önemli etkileyen faktörlerdendir.

1.4.3.1. Bağlayıcı Çeşitleri ve Oranı

Bağlayıcı oranı ve türü, dolgunun mukavemeti/stabilitesi açısından en önemli faktörlerdir. ÇMD karışımlarında genellikle tip I Portland çimentosu kullanılır (Fall ve Pokharel, 2010; Wu vd., 2015). ÇMD'de bağlayıcı kullanmanın ana amacı, kohezyon/iç sürtünme açısı tarafından yönetilen basınç ve kesme kuvvetleri gibi mukavemet özelliklerini geliştirmektir. Ayrıca atıkların ekolojik yönetiminde kirletici iletimini azaltmak için statik/dinamik yüklemelere aykırı sertlik ve geçirgenliğin kontrolü de diğer amaçlar olarak söylenebilir (Yang vd., 2020; Ma vd., 2021). Macun dolguda kullanılan çimento miktarı ağırlıkça %2 ile %13 arasında değişmektedir. Ayrıca dolgu tesisi giderleri içerisinde çimento giderleri en önemli maliyet kalemidir. Bu nedenle bağlayıcı türü ve oranının belirlenmesi ÇMD tesisinin ekonomisi açısından

hayati önem taşımaktadır. Tip V olarak tanımlanan, sülfata dayanıklı başka bir standart Portland çimentosu (OPC) türü daha vardır. Büyük ölçüde OPC üretmek için işlenen ham mekanizmalardaki demir içeriğinin arttırılmasıyla oluşur. OPC-V genellikle sülfit artıklarından oluşturulan dolgularda çimento olarak kullanılır (Zheng vd., 2019; Cui ve Fall, 2017). Sülfatlar, hidratasyon sürecinde oluşan ve çöken sülfat ürünleriyle gözenek yapısını bağlayarak, azaltarak veya değiştirerek dolgunun erken stabilitesini artırabilir (Grabinsky vd., 2021). Bu olumlu etki sülfat ataklarından dolayı olumsuz etkilere yol açmaktadır (Li ve Fall, 2016). ÇMD karışımında bulunan sülfatlar veya kükürt açısından zengin bileşenlerden üretilen sülfatlar, sert harçlarda, betonlarda veya çimentolu dolgularda iç sülfat saldırılarına yol açabilir ve bunları bozabilir (Cui vd., 2020; Kasap vd., 2022b). Dolguda kullanılan bağlayıcı bileşimi de hayati öneme sahiptir. ÇMD'nin içsel bozulması düzenli olarak büyük C3A konsantrasyonlarıyla bağlantılıdır. Sülfata dayanıklı çimento OPC-V'deki düşük C3A değeri, etrenjit oluşma olasılığını azaltır. Genişleyen bir mineral olan etrenjit, harçlarda bulunan sülfatların tetiklediği zayıflamayı azaltır.

1.4.3.2. Tamamlayıcı Çimento Malzemeleri

Son yıllarda madencilik sektöründe OPC tüketimini azaltmak ve dolguların ürün performansını iyileştirmek amacıyla endüstriyel sektörün çeşitli puzolanik malzemeleri ve yan ürünleri kullanılmaktadır. Puzolanlar, doğası gereği camsı dışında şekilsiz olan ve yeterli büyüklükte olmayan silisli/alüminosilikat amorf ürünlere örnektir. Çözülemeyen çimentolu malzemeler oluşturmak için su ortamında kireçle yeniden birleşirler (Hossain vd., 2016). Puzolanlar, çok ince öğütüldüğünde bağlayıcı özelliklere sahip (CSH jeli) ürünler oluşturmak için normal sıcaklıklarda ve nem durumunda kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona giren silisli veya silisli-alüminli madde olarak sınıflandırılır.

Puzolanik malzemeler, çimentolu dolgu malzemelerinin dayanıklılık-mukavemet özelliği üzerinde faydalı bir etkiye sahiptir (Kulekci vd., 2016). Çimento hidratasyonu sırasında açığa çıkan portlanditin üretilmesine önemli ölçüde katkıda bulunur. Sülfat ataklarının neden olduğu kötüleşme, bağlayıcıdaki mono-sülfatın ve kalsiyum-alüminat hidratın tutulması/çıkarılmasıyla yönetilebilir (Zhang vd., 2021a). Bu, OPC'deki C3A içeriğini sınırlar veya çimento fraksiyonunun yapay/doğal

puzolanlar gibi uygun karıştırma ürünleriyle değiştirilmesiyle olabilir (Tuylu, 2019). Çimento kullanımının azalmasıyla birlikte karbon emisyonları da azamakta ürün performansı artmakta ve teknik fayda sağlanmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir kalkınma desteklenmektedir. Puzolanlar doğal ve yapay puzolanlar olarak ikiye ayrılır. Volkanik tüf/kül, kalsine kil ve şeyller ile pomza gibi doğal puzolanlar, harmanlanmış çimento üretiminde ÇMD için alternatif ve uygun maliyetli ürünler olarak kullanılabilir (Tariq ve Yanful, 2013; Qi vd., 2019b). Çimentolu karışımlarda puzolanların kullanılmasının başlıca nedenleri; işlenebilirliği arttırmak, gözenek/boşluk oranını ve geçirgenliği azaltmak, çimento maliyetini/tüketimini azaltmak, daha dayanıklı ürünler elde etmek ve sülfat etkisine karşı direnci arttırmaktır (Orejarena ve Fall, 2010; Xiao vd., 2021b). Doğal puzolanların eklenmesi, düşük C3A içeriğine sahip OPC'de alçı oluşumunu geciktirerek/önleyerek, sülfat direncini artırarak harçlardaki C-H'yi azaltır (Tarıq ve Yanful, 2013). Puzolanlı harçlar, sülfat bakımından zengin bölgelerde daha fazla dayanıklılık ortaya koymaktadır (Li vd., 2021). Normal ürünlerin puzolanik hareketi silika içeriğiyle yakından ilişkilidir. Ağırlıkça %10-30 oranında doğal puzolan kullanımı dolgunun mukavemet gelişim oranını yavaşlatır. Daha yüksek dozlarda (%30'un üzerinde) puzolan kullanımının, uzun süreli kürlemede ÇMD numunelerinin stabilitesini azalttığı bilinmektedir (Qi ve Fourie, 2019).

Bir termik santral atığı olan uçucu kül, genellikle yuvarlak, silt boyutunda ve şekilsiz ferroalüminosilikatlardan oluşur (Blissett ve Rowson, 2012). CSA A3001'e göre kül, F uçucu külden oluşan az kireç (%8'in altında CaO içeriği), CI'den orta kireç (%8-20 CaO içeriği) ve CH'den oluşan yüksek kireç (%20'den yüksek CaO içeriği) olarak sınıflandırılır. ASTM C 618'e göre, yakılan kömürün tipinin kimyasına bağlı olarak form C ve form F uçucu kül olarak sınıflandırılır. Form C ve F uçucu külleri sırasıyla %50 ve %70'ten az olmayan toplam oksit (SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3) içeriğini kapsamaktadır. TS EN 197-1'e göre iki tür uçucu kül vardır ve bunlar silika (V) ve kalkerli (W) uçucu küllerdir. V tipi kül, puzolanik özelliklere sahip yuvarlak tanelerden oluşan siltli bir tozdur ve ağırlıkça %10'dan az olmayan reaktif kalsiyum oksit, ağırlıkça %25'ten az olmayan reaktif silikon dioksit, alüminyum oksit, demir oksit ve diğer bileşiklere sahiptir. W tipi kül, hidrolik/puzolanik özelliklere sahip ince bir tozdur ve ağırlıkça %10'dan az olmayan reaktif kalsiyum oksit, ağırlıkça %25'ten az

olmayan reaktif silikon dioksit, alüminyum oksit, demir oksit ve diğer bileşiklere sahiptir. Form C uçucu kül, çimento/puzolanik özelliklere sahiptir ve yüksek Ca içeriği nedeniyle atıkların asitliğine direnebilir (Gierjikzny, 2019). Form F uçucu kül ise <%10 kalsiyum okside sahiptir ve antrasit/bitümlü kömürlerden oluşur (Yazıcı ve Arel, 2012).

OPC'nin C formu uçucu kül ile hafif bir şekilde değiştirilmesi, ÇMD üretimi için ekonomiktir ancak dayanım kazanımı için uygun değildir (Ali vd., 2021, Çavuşoğlu vd., 2021a). Ancak kullanımından dolayı dolguyu uzun vadede sülfatın etkisinden koruma eğilimi vardır. Kimyasal ve mineralojik analizler yoluyla atıklardaki sülfitlerin varlığı, çimento hidrat fazlarının erimesine ve şişmesine neden olarak ÇMD'lerin bozulmasına neden olur (Huang vd., 2021). OPC, C_3A kompozitinin yapısı nedeniyle yüksek sülfat dolgusu için uzun süre dayanıklılık sağlayacak doğru bir çimento değildir. Ancak uzun kür süresinde çimentonun C formu uçucu kül ile kullanılması durumunda dayanım kazanımı daha iyi olur (Çavuşoğlu vd., 2021b).

Demir yapımının metalik olmayan bir yan ürünü olan BFS, silikatlardan yapılır. Bunlar temel olarak yüksek fırında Fe ile aynı anda eritilen, amorf granül taneler oluşturmak için su ortamında hızlı ıslatma yoluyla sıvı içinde soğutulan çimento inceliğinde veya daha ince malzemelerdir. OPC'li bir cüruf bileşiminde, OPC ile cüruf hidratlaşmaya başlar ve daha sonra çözeltideki Ca/Al iyonlarını serbest bırakan cürufla reaksiyona girer. Cüruf daha sonra alkali hidroksite ve $Ca(OH)_2$'ye tepki vererek daha fazla CSH jeli oluşturur.

Çimento hidratasyonu sırasında alkali/hidroksil iyonu salınımı, çimento/cüruf sistemleri için hidrasyon tepkileri oluşturarak gözenek çözeltisinin pH'ını artırır. Silika özellikleri bazik çözeltide çözülebilir hale gelir ve OPC'nin hidrasyon ürünlerinin bıraktığı kılcal gözenekli boşluklar ikincil CSH ile doldurulur. OPC'ye uygun olarak, hidratasyon aşamasında Ca ilave edilerek çimento özellikleri tetiklenmezse cürufun etkinliği azalır (Jiang vd., 2020c).

GBFS içeren ÇMD karışımları, diğer bağlayıcılarla hazırlanan karışımlara göre dayanım parametreleri açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. Cüruf içeren dolgu karışımlarında gözenek boyutunun incelmesi nedeniyle ÇMD'nin hidrolik iletkenliği azalır (Kou vd., 2020; He vd., 2021). Ayrıca cüruf içeren çimento ile hazırlanan macun dolgu örnekleri en yüksek ince gözeneklere sahiptir ve yüksek UCS değerlerine ulaşır

(Ouellet vd., 2007). OPC'nin GBFS ile kısmen değiştirilmesi, 2-20°C'lik kürleme ısısında dolgu direncini arttırırken, ≥35 °C'lik kürleme ısısında direnci olumsuz yönde etkiler (Jiang vd., 2019b). Yüksek sülfürlü atıkların alkali aktif cüruf bağlayıcı ile ikame edilmesi, çimentoya kıyasla toplam gözeneklilikte %20'ye varan bir azalma da meydana getirir (Dai vd., 2022; Sari vd., 2022).

GBFS ve FA katkı maddeleri, kükürt bakımından zengin atık dolgusunun uzun vadeli mukavemet kazanımını artırır ve bir dolgu tesisinde çimento maliyetlerini azaltmak için uygun şekilde kullanılabilir.

1.4.3.3. Kimyasal Katkı Maddeleri

Kimyasal katkı maddeleri tipik olarak beton harcına karıştırmadan önce veya karıştırma sırasında eklenir. Kuzey Amerika'da inşaat sektöründe üretilen betonun %80'i bir veya daha fazla türde kimyasal katkı maddesi içermektedir. Katkı maddeleri betonun performansını iyileştirir. ÇMD, betona kıyasla çok daha az çimento içerir (Mangane vd., 2018; Saedi vd., 2021). Ancak çimento katkılarının kullanımının dolgu performansını artırabileceği ve çimento kullanımına ilişkin maliyetleri azaltabileceği düşünülmektedir (Haruna ve Fall, 2020; Jin vd., 2022). ÇMD ile ilgili potansiyel sorunların çoğu dolgunun hazırlanması, taşınması ve yerleştirilmesi sırasında ortaya çıkar.

Katkı maddelerinin eklenmesi, optimum karışım tasarımının oluşturulmasına yardımcı olur. ÇMD'de katkı maddelerinin kullanılmasının avantajları şunlardır:

- ❖ Erken ve uzun dönemde yüksek mukavemet üretilmesini sağlar.
- ❖ Basınç ve eğilme mukavemetini ve kohezyonu arttırır.
- ❖ Hidrolik ve macun dolgularda su içeriğini ve segregasyonu azaltır.
- ❖ Pompalanabilirliği, işlenebilirliği, kıvamı ve akışkanlığı arttırır.
- ❖ Büzülmeyi, sünme çatlamasını ve aşındırıcılığı azaltır (Jiang vd., 2020d).

Yapılan araştırmalar çimentolu kaya, hidrolik ve macun dolgularda kullanılan katkı maddelerinin mukavemetlerine olumlu etki yaptığını göstermektedir. Ayrıca karışım tasarımlarına göre katkısız dolguya göre yaklaşık %50 daha iyi dayanım elde edilmiştir. Katkı maddelerinin kullanımı su içeriğini azaltır, pompalanabilirliği arttırır

ve kürlenme süresini geciktirir (Quattara vd., 2018; Ouffa vd., 2022). Sonuçlar, kimyasal katkı maddelerinin kükürt bakımından zengin atık dolgusunun kısa/uzun vadede mukavemetini/stabilitesini ve çimento kullanımına ilişkin dolgu yapım maliyetlerini uygun şekilde azaltabileceğini beyan etmiştir. Madenlerdeki dolgu tasarımlarına kimyasal katkı maddeleri eklemenin faydaları sıklıkla görülür; enerji ve çimento tüketiminde, susuzlaştırma maliyetlerinde, arıza sürelerinde, boru tıkanıklıklarında ve tesis bakım maliyetlerinde azalma sağlanır. Katkı maddelerinin eklenmesi, dolgunun kalitesini ve birçok işletme maliyetini doğrudan etkiler.

1.4.4. Karışım Suyu

Çimento hamuru dolgu karışımında proses, yeraltı ve göl/nehir suları kullanılmaktadır. Musluk suyu laboratuvar çalışmalarında da kullanılabilir. Bu suların kimyasal bileşimleri de farklılık göstermektedir. Bu farklılık çimentonun hidratasyon sürecini, dolgunun aglomerasyon ve mukavemet özelliklerini etkiler. Atık gözenek suyu genel olarak toplam karışım suyunun %75-80'ini oluşturur ve özellikle sülfürlü cevherlerin flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmesinde, sülfat konsantrasyonu bakımından zengin hava ve kimyasalların kullanılması nedeniyle sülfat (SO_4^{-2}) konsantrasyonu bakımından zengindir. Karışıma eklenen musluk suyu, karışım suyundaki sülfat konsantrasyonunu seyreltir (Wu vd., 2015; Li vd., 2020). Proses suyunun kullanılması, şehir/göl suyu kullanımına kıyasla daha düşük dolgu stabilitesine neden olmuştur (Ouellet vd., 2007). Sülfat konsantrasyonu 4613 ve 7549 mg/L olan suyun kullanılması ise dolgunun gözenekliliğini azaltmış ve mukavemetini arttırmıştır (Ouellet vd., 2007). Ayrıca dolgunun mukavemet özelliği suyun kalitesinden de etkilenmektedir. Macun dolgunun mukavemeti esas olarak çimentonun hidratasyonuna bağlı olduğundan dolgunun tasarım ve işletme aşamalarını belirlerken su kalitesine dikkat edilmesi gerekmektedir (Cao vd., 2021c).

1.5. Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) Yöntemi

Ultrasonik darbe hızı (UPV) testi, beton, çelik veya ahşap gibi farklı malzemelerin kalitesini değerlendirmek için kullanılan tahribatsız bir test yöntemidir. Rus bilim adamı Sokolov, 1920 yılında metaldeki kusurları belirlemek için UPV testini kullanan ilk kişi olmuştur. Darbe tekniği ilk kez 1940'lı yıllarda Amerikalı bilim

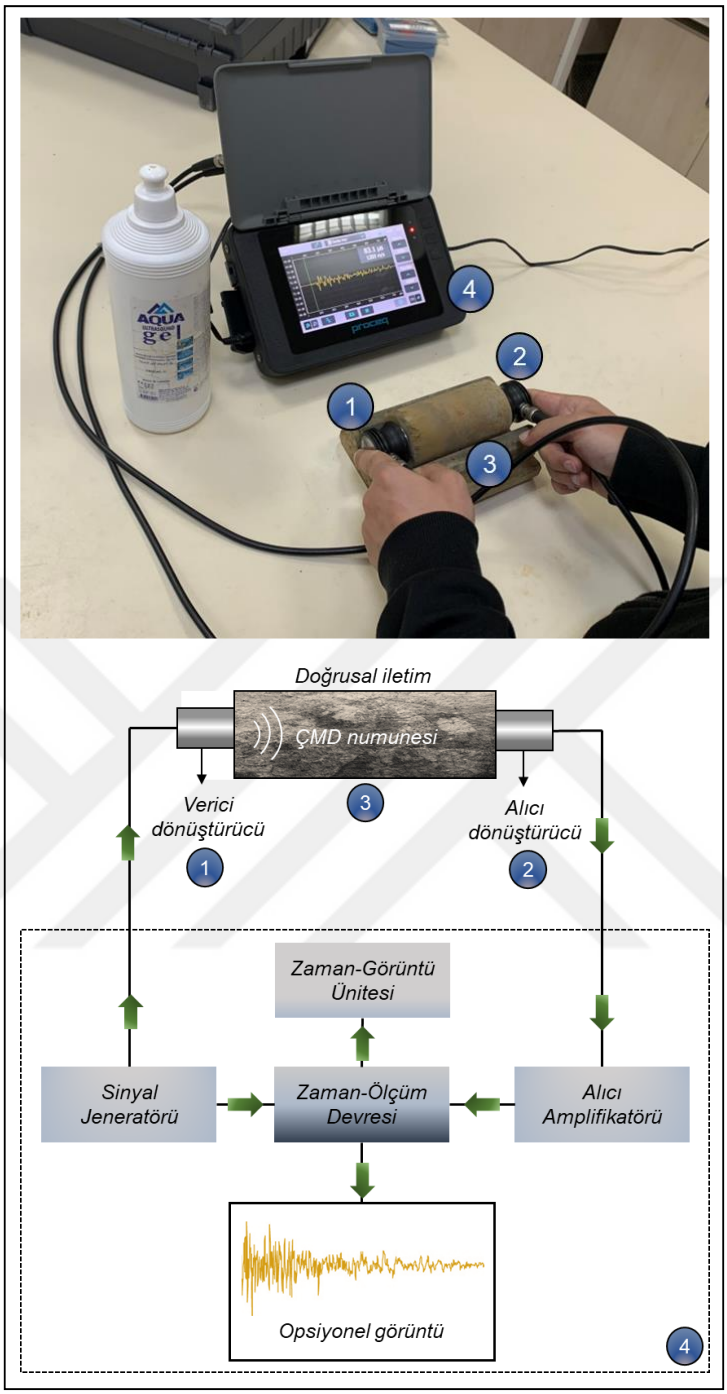
adamları tarafından mekanik olarak üretilen bir darbe yoluyla beton üzerinde kullanılmıştır ve hızın betonun elastik özelliklerine bağlı olduğunu bulmuşlardır. Daha sonra Kanada ve İngilizler tarafından daha doğru veriler sağlayan elektro-akustik dönüştürücüler geliştirilmiştir (Hannachi ve Guetteche, 2014).

Hasarsız testler, yapılarda kullanılan malzemelerin özelliklerini ayırt etmede ve incelemede koşulları değerlendirmek, kaliteyi tahmin etmek ve betonun dayanımını belirlemek için tercih edilmektedir. Ultrasonik darbe hızı yöntemi, yapı mühendisliğinde betonun mukavemeti gibi malzeme özelliklerini belirlemek için sıklıkla kullanılır. Yöntem aynı zamanda betonun tekdüzeliğini kontrol etmek, betondaki çatlakları ve boşlukları tespit etmek, betonun ve ürünlerinin kalitesini kontrol etmek (sonuçları benzer betonla karşılaştırarak), betonun bozulmasını ve durumunu tespit etmek ve betonun derinliğini tespit etmek için de kullanılabilmektedir. Bu özellikleri belirlemek için kullanılan dalga yayılımının özellikleri hız, sönüm, frekans ve enerjidir (Yaman vd., 2001). UPV testi, beton karakterizasyonunda kolay ve hızlı bir şekilde uygulanabilen, uygun maliyetli tahribatsız test yöntemlerinden biridir (Lawson vd., 2011).

1.5.1. UPV'nin Temel Prensipleri

UPV testi temel olarak bir elektrik darbe üretecinden, iki dönüştürücüden (verici dönüştürücü ve alıcı dönüştürücü), kalibrasyon çubuğu ve birleştirme jelinden oluşur (Hannachi ve Guetteche, 2014). Ultrasonik dalga, test malzemesiyle temas halinde olan daha karmaşık bir dönüştürücü tarafından, sıkıştırma dalgası veya kesme dalgası biçiminde üretilir. Bu dalgalar, test malzemesinin diğer yüzüne yerleştirilen ikinci dönüştürücü tarafından algılanır. Temel devre ve yaygın olarak kullanılan bir alet **Şekil 22'** de gösterilmektedir.

UPV test yöntemi, beton yapıların içindeki darbe hızının ve geçiş süresinin ölçülmesine dayanmaktadır. Dalgaların hızı betonun elastik özelliklerine bağlıdır. Yüksek frekanslı ses dalgaları, beton yüzeylerden biriyle temas halinde kalan bir dönüştürücü kullanılarak betonun içinden geçer. Dalgaların boyuna hızı betonun yoğunluğuna bağlıdır. Daha yüksek yoğunluk, daha hızlı dalga hızı anlamına gelir. İkinci dönüştürücü boylamsal dalgayı elektrik sinyallerine dönüştürür. Elektronik zamanlama devreleri geçiş süresinin ölçülmesine yardımcı olur.



Şekil 22. UPV test yönteminin teorik ve pratik gösterimi

Ultrasonik test sırasında, test edilen beton numunesi bir taraftan bir elektro-akustik dönüştürücü ile temas halinde olacak ve bu dönüştürücü, üç farklı tipte elastik dalga yayılımından oluşan bir darbe üretecektir. Bu dalgaların en hızlısı, uzunlamasına sıkışma veya P dalgası olarak bilinir ve bozulmayla aynı yönde hareket eden parçacık yer değiştirmeleriyle bilinir. İkincisi ise en yavaş olduğu bilinen ve eliptik parçacık yer değiştirmesine sahip olan yüzey dalgalarıdır. Son olarak, ilerleme yönüne dik açılarda

parçacık yer değiştirmesine sahip olan ve yüzey dalgalarından daha hızlı olan kayma veya enine dalgalardır. Dalga hızı malzemenin kütlesine ve elastik özelliklerine bağlıdır. Dalga yayılımının kütlesi ve hızı bilindiğinde malzemenin elastik özelliklerinin belirlenmesi kolaylaşır (Lawson vd., 2011). Sonsuz, izotropik elastik, homojen malzeme için sıkıştırma dalgası hızı, aşağıda verilen Denklem 5 kullanılarak belirlenebilir:

$$V_p = \sqrt{\frac{E\,(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \qquad (5)$$

Burada;

V_p= sıkıştırma dalga hızı (km/s), E= dinamik elastisite modülü (kN/mm^2), ν= dinamik poisson oranı ve ρ= yoğunluk (kg/m^3).

Temas testi uygulamaları yapılırken, ses enerjisinin dönüştürücü ile test edilen numune arasında iletilmesine yardımcı olmak için genellikle ultrasonik temas maddeleri kullanılır. Temas maddeleri genellikle viskoz, toksik olmayan sıvılar, jeller veya macunlardır (Olympus, 2024). Bu temas maddelerinin kullanımının birçok faydası vardır ve test sonuçlarını gerçekten iyileştirebilir. Tahribatsız testte kullanılan ultrasonik frekanslardaki ses enerjisi hava yoluyla etkili bir şekilde iletilmediğinden bunların kullanılması önemlidir. Dönüştürücü ile test edilen örnek arasındaki herhangi bir hava boşluğu, gerçekten ince olsa bile, verimsiz bir ses enerjisi iletimi ile sonuçlanacaktır. Numune ile dönüştürücü arasında hava boşluğu olduğunda geleneksel testin gerçekleşmesi temelde imkansızdır. Ultrasonik temas maddeleri olarak farklı uygulamalarda kullanılabilecek su, motor yağı, gres, saç jölesi gibi birçok alternatif bulunmaktadır. Ancak yüksek sıcaklık testi yapılırken, daha iyi sonuçlar için özel olarak formüle edilmiş temas maddeleri tavsiye edilir.

UPV testi, bir malzemenin özelliklerini belirlemek için 50kHz ila 10MHz arasındaki yüksek frekanslı dalgaları yayan akustik bir yöntemdir (Blyth vd., 2021). UPV testinin tahribatsız olduğu kabul edilir çünkü ultrasonik dalgalardan kaynaklanan gerilimler çoğu malzemenin akma geriliminin oldukça altındadır. Malzemenin mikroyapısal değişkenleri tarafından ultrasonik dalgalarda yapılan değişiklikler, malzemelerin özellikleri hakkında bilgi sağlar. Akustik bir darbe üretildiğinde, malzemenin mikroyapısal özellikleri enerji dağılım hızını belirler. Mikroyapısal özelliklere tanelerin ve gözenek boşluklarının mineralojisi, boyutu, şekli ve dağılımı

ve bunların göreceli düzenlemeleri örnek olarak verilebilir. Bu özellikler her bir numuneye özgüdür ve incelenen malzemeye göre uyarlanarak değiştirilmiş bir frekans spektrumu oluşturur. V_p ve V_s'yi etkileyen aynı mikroyapısal özellikler aynı zamanda malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini de yönetir. Bu ilişki dalga hızlarının malzemenin mekanik özellikleri için ultrasonik yaklaşımlar olarak kullanılmasına olanak sağlar (Aydın, 2014).

Uygulamada, betondaki darbe hızı ASTM C597 standardına göre Denklem 6 ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V = \frac{L}{t} \qquad (6)$$

Burada:

V = ultrasonik darbe hızı (m/s), L = dönüştürücü yüzlerinin merkezleri arasındaki mesafe (m) ve t = dalga geçiş süresi (s).

1.5.2. Ultrasonik Darbe Hızı Test Yöntemleri

UPV testini gerçekleştirmek için test yüzeylerinin erişilebilirliğine bağlı olarak üç farklı dönüştürücü çifti konfigürasyonu kullanılabilir. Bunlar doğrudan darbe iletimi, dolaylı yüzey hızı iletimi ve yarı doğrudan darbe iletimini içerir (**Şekil 23**).

1.5.2.1. Doğrudan Yöntem

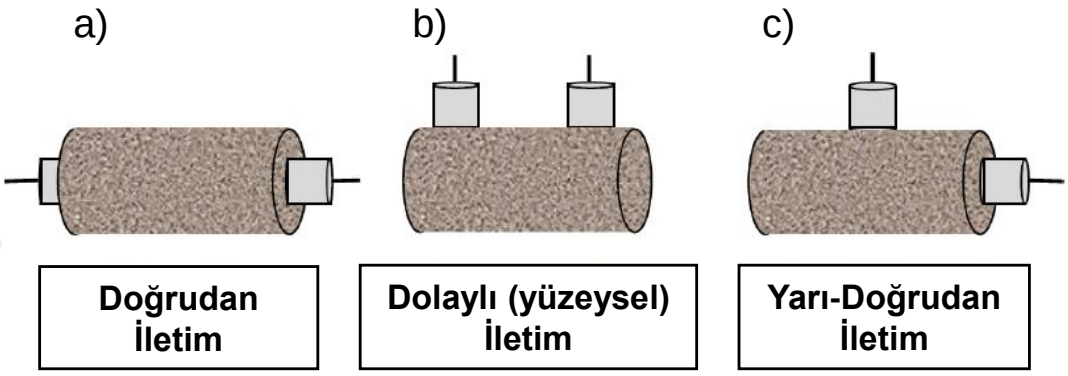
Doğrudan iletim, ultrasonik dalgaların bir numunenin karşıt yüzeyleri arasında düz bir çizgi boyunca yayılması olarak tanımlanır. Doğrudan darbe konfigürasyonunu kullanarak test yapmak, dönüştürücülerin karşılıklı paralel yüzlerini ve eş eksenli düzenlemesini gerektirir. Bu yöntemde iki dönüştürücü birbirine karşıt olarak yerleştirilir. UPV testini yapmanın en yaygın ve en tatmin edici olan yöntemidir. Direkt yöntemle doğru veri elde edilebilir. Bu yöntem maksimum darbe enerjisinin iletilmesi ve iletim yolunun daha net tanımlanması nedeniyle tercih edilmektedir. Doğrudan yöntem, test edilen malzemenin karşılıklı iki tarafına erişilebildiğinde kullanılır.

1.5.2.2. Yarı Doğrudan Yöntem

Bu yöntem dönüştürücülerin dik kenarlara yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Yapının tüm kenarlarının görünmediği durumlarda yapılır. İletim yolu ve dönüştürücülerin açıları çok büyük olmamalıdır.

1.5.2.3. Dolaylı Yöntem

Bu yöntemde iki dönüştürücü aynı tarafa yerleştirilir. Genellikle bu yöntem yalnızca bir tarafa erişilebildiğinde gerçekleştirilir ve en son tercih edilen yöntemdir. Alınan sinyal genliği direkt yönteme göre %3 daha az olabilir (Hannachi ve Guetteche, 2014).



Şekil 23. UPV iletim yöntemleri: doğrudan (a); dolaylı (b); yarı doğrudan(c)

1.5.3. Ultrasonik Darbe Hızını Etkileyen Faktörler

UPV yöntemi çimentolu malzemelerin özelliklerini karakterize etmede etkili ve verimli bir teknik olmasına rağmen sonucu etkileyen bir dizi faktör vardır. Bu faktörler genellikle test edilen malzemeden kaynaklı ve teknik hatalardan dolayı açıdan ortaya çıkar. Teknik hatalar, dönüştürücülerin yanlış hizalanması, iki dönüştürücüye uygulanan değişken basınç, dönüştürücülerin pürüzlü yüzeye yerleştirilmesi ve yanlış yorumlamalar gibi dönüştürücülerin uygunsuz kullanımından kaynaklanan hatalardır. Doğru uygulamalarla bunların önüne geçilebilir. Öte yandan test edilen malzemeden kaynaklı somut davranışın neden olduğu faktörler aşağıda detaylandırılmıştır.

1.5.3.1. Agrega Boyutu ve Türü

Betondaki agreganın boyutu, derecesi, türü ve içeriği, ultrasonik darbe hızının belirleyicileri olan dinamik elastisite modülü, poisson oranı ve yoğunluğu ile yakından ilişkilidir. Agregaların türü ve miktarı ultrasonik darbe hızını önemli ölçüde etkiler. Bu durum, çimento hamurunun agregalara göre daha düşük darbe hızına sahip olması ve betonda farklı tipte agrega kullanıldığında darbe hızının değişmesi ile açıklanabilir. Dalga enerjisinde önemli bir azalmayı önlemek için maksimum agrega boyutu dalga

boyundan daha küçük olmalıdır. Aksi halde dönüştürücüde net bir sinyal algılanamayabilir. UPV test sonuçları mukavemetten ziyade agrega boyutu ve tipinden büyük ölçüde etkilenmektedir.

1.5.3.2. Su/Çimento Oranı ve Nem İçeriği

Betonun dayanımının belirlenmesinde betondaki nem içeriğinin etkisi oldukça önemlidir. Bu kapsamda Ye vd., 2004, tarafından farklı s/ç oranlarına (0,4, 0,45 ve 0,55) sahip üç beton numunesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda s/ç oranı arttıkça darbe hızı değerlerinin düştüğü görülürken s/ç oranı azaldıkça darbe hızı değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu durum da karışımlardaki katı madde miktarının yüksek olmasıyla ilişkili olabilir. Çünkü daha düşük s/ç oranına sahip numuneler daha fazla agrega içererek darbe hızı değerlerinin artmasına neden olacaktır. Betonun bileşiminde başka bir değişiklik yapılmaması kaydıyla, su/çimento arttıkça karşılık gelen darbe hızı azalır. Ayrıca darbe hızı için betonun doygunluk derecesi de dikkate alınmalıdır. Doymuş betonun darbe hızı kuru betona göre %5'e kadar daha yüksek olabilir (ASTM-C597). Gözeneklilikteki farklılık nedeniyle, nem içeriğinin yüksek dayanımlı betonun darbe hızı üzerinde düşük dayanımlı betona göre daha az etkisi vardır.

1.5.3.3. Çimento ve Katkı Tipi

Farklı çimento ve katkı türleri, farklı hidratasyon oranları üreterek darbe hızını etkiler. Hidratasyon derecesi arttıkça elastik modül artar, bu da ultrasonik darbe hızını artırır. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu çimentolu karışımlarda kullanılabilecek etkili endüstriyel katkılardan bazılarıdır. Bu mineral katkıların yanı sıra bazı kimyasal katkıların neden olduğu puzolanik reaksiyon nedeniyle çimentolu karışımların yoğunluğu artırılabilir. Bu tür katkılar boşlukları doldurma yetenekleri nedeniyle geçirgenliği azaltabilecekleri için etkilidirler. Bu nedenle gerek malzeme içerisindeki boşluk yapısını değiştirmeleri gerekse hidratasyon gelişimine sundukları katkılardan dolayı darbe hızı sonuçları üzerinde etkilidirler.

1.5.3.4. Kür Süresi

Kür süresi/yaşı arttıkça çimentolu karışım matrisinin güçlendiği bilinen bir gerçektir. Bunun nedeni boşlukların azalması ya da çimento hidratasyonuyla oluşan

jel/boşluk oranının artmasıdır. Boşluklardaki darbe hızı katı ve sıvılara göre daha az olduğundan, jel/boşluk oranı ne kadar büyürse (zamanla artar), gözeneklerin hacmi o kadar küçülür ve dolayısıyla malzeme boyunca yayılan darbenin hızı da büyük olur.

1.5.3.5. Sıcaklık

Çevredeki ortam sıcaklığının darbe hızı üzerinde önemli bir etkisi varken ortam sıcaklığının 5°C ile 30°C arasındaki değişiminin darbe hızı üzerinde bariz bir etkisinin olmadığı bilinmektedir. Ancak sıcaklık 5 °C'nin altına düştüğünde ve 30 °C'nin üzerine çıktığında ultrasonik hız değerlerinde bir düzeltme uygulanmalıdır. 40 °C ve 60 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda darbe hızındaki azalma, betonun içinde oluşan mikro çatlaklardan kaynaklanır. Bu sıcaklıklarda betonun basınç dayanımında buna karşılık bir azalma meydana gelmez. Darbe hızının donma noktasının altında artması ise beton içindeki suyun donmasından kaynaklanmaktadır.

1.5.3.6. Donatı ve Çelik Lif Hacmi

Betona gömülü donatı, UPV test ölçümleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yapılan ilk araştırmalar, takviye varlığının ultrasonik darbe hızını arttırdığını ortaya koymuştur. Bunun nedeni çelikteki darbe hızının donatısız betona göre 1,2 ila 1,9 kat daha yüksek olmasıdır. ASTM C597'ye göre, takviye çeliğinin yakınında ölçülen darbe hızı, aynı bileşime sahip donatısız betondan daha yüksektir ve mümkün olduğunca darbe yayılım yönüne paralel çeliğe yakın ölçümlerden kaçınılmalıdır. Bu nedenle, ASTM tavsiyesinden, denetçinin test sırasında yoğun inşaat demiri konumlarından kaçınması gerektiği açıktır. Ancak bazı durumlarda darbe hızı iletim yolunun yakınındaki çelik donatıdan kaçınmak mümkün değildir. Böyle durumlarda ölçülen değerlerde düzeltme yapılması gerekmektedir.

Ayrıca beton matrisine daha yüksek özgül ağırlığı olan çelik liflerin eklenmesinin, normal olarak yoğunluğu artırması beklenir. Dalga yayılım teorisine göre, malzeme yoğunluğu ne kadar yüksek olursa, içindeki dalganın hızı da o kadar yüksek olur. Bu nedenle daha yüksek yoğunluklu beton için darbe hızı değerinin de daha yüksek olması beklenir. Bununla birlikte, bazı durumlarda daha yüksek hacimli çelik fiberler için darbe hızının artmadığı ve hatta azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak, çelik

liflerin darbe hızını oldukça geciktiren boşluklar oluşturması ve bu liflerin homojen dağılmaması gösterilebilir.

1.5.3.7. Diğer Faktörler

Yukarıda belirtilen faktörlerin yanı sıra betonun kür şartları da malzeme özelliklerini etkileyerek darbe hızını etkiler. Numunede çatlakların veya bozulmaların varlığı darbe hızında bir azalmaya neden olabilir. Darbe hızı numunenin boyutlarına bağlı değildir ancak daha küçük numunelerdeki sınırlardan yansıyan dalgalar doğrudan iletilen darbenin süresini etkileyebilir. Bu nedenle numunenin minimum boyutu ultrasonik darbe dalga boyunu aşmalıdır. Ayrıca dönüştürücüler numunenin yüzeyleriyle iyi bir temas halinde olmalıdır. Bu yüzey teması iyi ve uygun bir birleştirme maddesiyle geliştirilebilir.

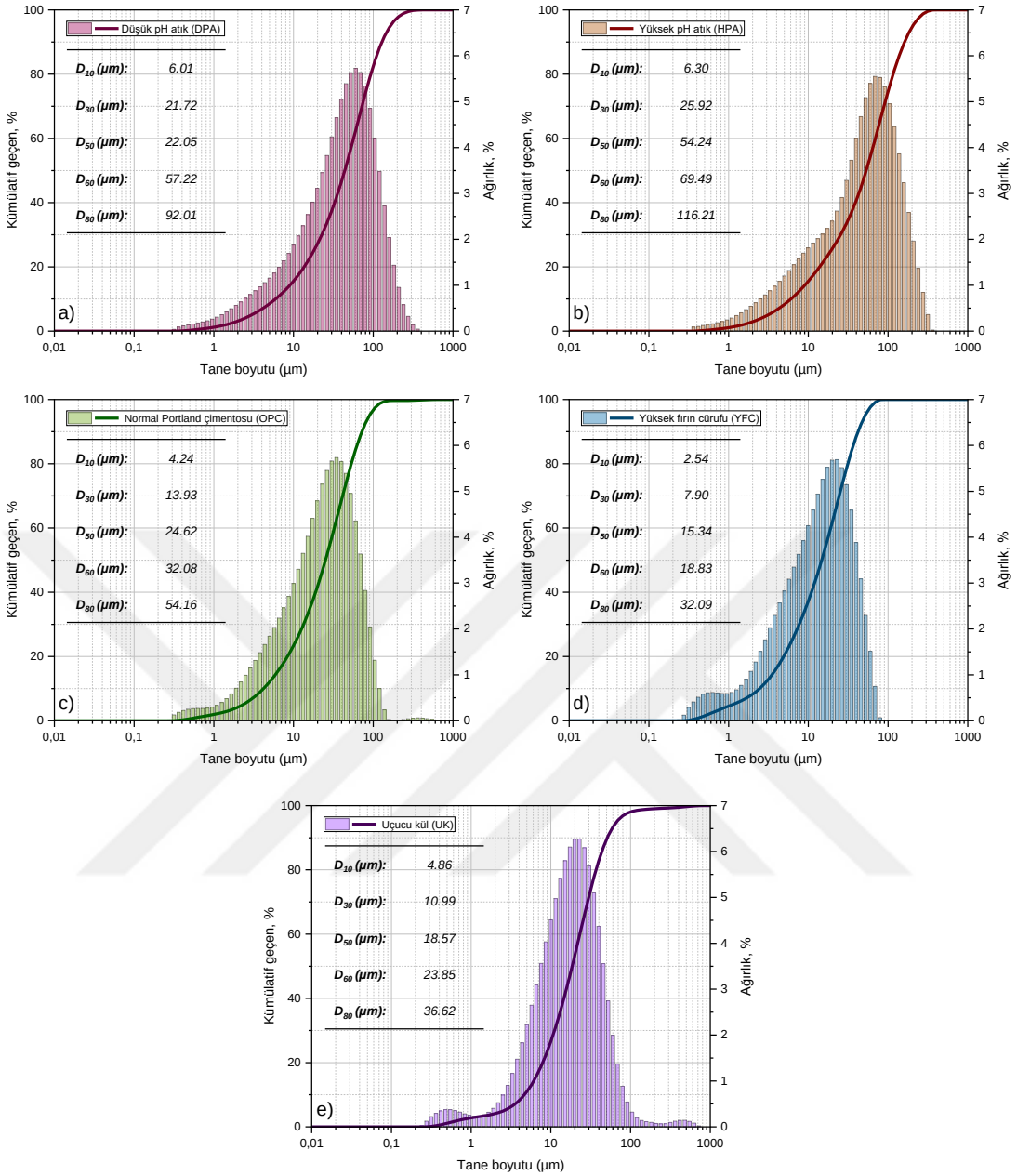
2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. ÇMD Bileşenleri

2.1.1. Piritik Maden Atıkları

Maden atıkları, Türkiye'nin kuzeyindeki bir yeraltı işletmesinin cevher hazırlama tesisinden alınmıştır. Bu tesiste, cevher zenginleştirme atıkları düşük ve yüksek pH'lı iki tip piritik atığa ayrılmıştır. Düşük pH'lı atıklar (DPA: 4.72), bakırın kazanılması sırasında sülfürik asit kullanılarak bulamacın pH'ının 4'ün altına düşürülmesi ve bastırılmış piritin aktive edilmesi nedeniyle oluşur. Yüksek pH'lı atıklar (YPA: 10.41) ise yüksek pH'lı pirit flotasyonu özelliğine sahip amin topraklı toplayıcılar kullanılarak şlamın pH değeri düşürülmeden pirit flotasyonu sonucu elde edilmektedir. Bu yöntem Türkiye'ye özgü bir teknik olmasına rağmen günümüzde de kullanılmaya devam etmektedir.

DPA ve YPA'nın tane boyu dağılım (PSD) analizi Malvern Mastersizer cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (**Şekil 24**). Bu analizden, her iki atığın da 20μm'nin altındaki malzeme içeriklerine göre (DPA: %26.9; ve YPA: %25.3) maden dolgu matrisi oluşturmak için gerekli eşik sınırının üzerinde olduğu belirlenmiştir. **Şekil 1**'den DPA numunelerinin tane boyutunun (d_{80} = 90.6 μm) YPA numunelerinden (d_{80} = 117.4 μm) daha düşük olduğu çıkarılabilir.



Şekil 24. ÇMD bileşenlerinin tane boyu dağılım grafikleri: DPA (a); YPA (b); OPC (c); YFC (d); ve UK (e)

Quantachrome Ultrapyc 1200e helyum gazı piknometresi kullanılarak, atık numunelerinin özgül ağırlıkları YPA ve DPA için sırasıyla 3.47 ve 3.79 olarak belirlenmiştir (**Tablo 10**). Maden atıklarının spesifik yüzeyi (S_s), tek noktalı BET teorisine dayanan (gaz moleküllerinin adsorpsiyonunu/desorpsiyonunu kullanır) Quantachrome'un Quadrosorb SI yüzey alanı ve gözenek boyutu analiz cihazı kullanılarak ölçülmüş, YPA ve DPA için sırasıyla 2.57 ve 2.83 m^2/g olarak bulunmuştur. Test sonuçlarından, atığın tane boyutu azaldıkça ve asit miktarı arttıkça

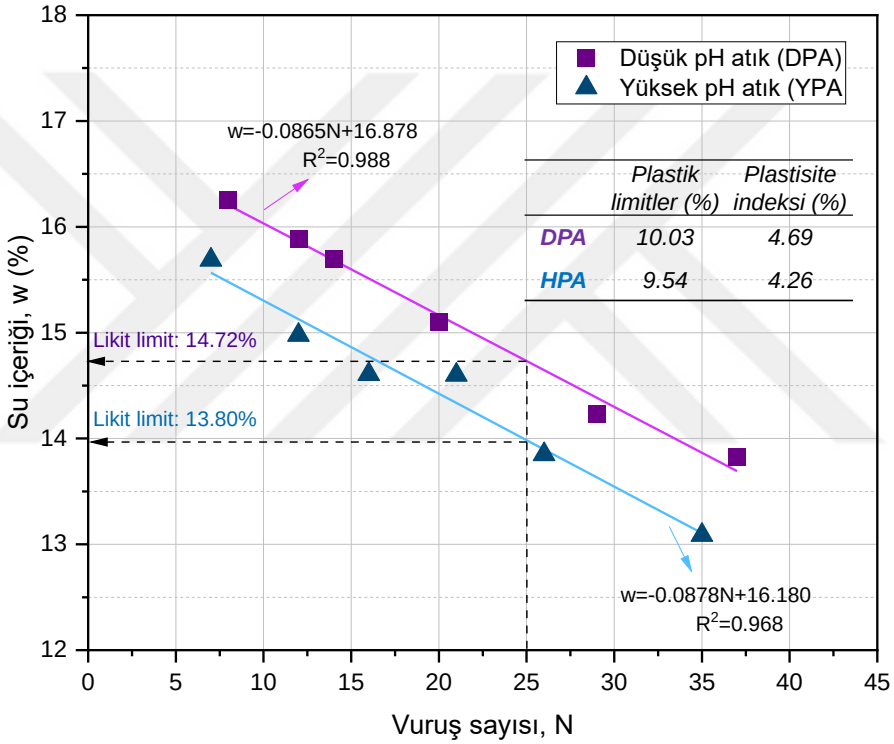
toplam G_s değerlerinin arttığı sonucuna varılabilir. Maden atıklarının kimyası PANalytical/Zetium XRF yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve **Tablo 10**'da temel sonuçlar sunulmuştur. Bu sonuçlara dayanarak hem Fe_2O_3 hem de SiO_2'nin piritik atıklarda baskın bileşikler olduğu sonucuna varılabilir. YPA ve DPA numunelerinin Fe_2O_3 içerikleri sırasıyla %36.71 ve %44.02 olarak ölçülmüştür. SiO_2 içerikleri için bu değerler sırasıyla %29.06 ve %21.11'dir.

Tablo 10. Farklı tip atıkların karakteristik özellikleri

Karakteristik özellik	**YPA**	**DPA**	**OPC**	**YFC**	**UK**
Fiziksel					
Özgül yüzey alanı (S_s), m^2/g	2.57	2.83	0.42	0.81	0.49
Özgül ağırlık (G_s)	3,47	3.79	3.21	2.88	2.52
Optimum nem içeriği (OMC), %	12.92	13.54	-	-	-
Maksimum kuru ağırlık (MDD), kg/m^3	2.58	2.82	-	-	-
Eğrilik katsayısı (C_c)	1.53	1.37	1.43	1.30	1.04
Üniformluk katsayısı (C_u)	11.03	9.52	7.56	7.41	4.91
Kimyasal					
Fe_2O_3 (%)	36.71	44.02	3.18	1.29	8.66
SiO_2 (%)	29.06	21.11	15.89	38.05	43.98
Al_2O_3 (%)	6.81	7.30	5.65	12.17	19.41
MgO (%)	1.77	2.08	1.33	5.90	1.45
CaO (%)	3.95	2.68	64.81	34.64	6.60
SO_3 (%)	0.49	0.49	3.54	2.58	2.09
K_2O (%)	0.36	0.40	0.78	0.77	1.04

Proses atıklarının sıvılaşma ve büzülme performansı gibi kıvam değerleri ÇMD'nin stabilitesini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada kullanılan proses atıklarının likit limitleri Casagrande tekniği ile tespit edilmiş ve **Şekil 25**'te sunulmuştur. YPA ve DPA likit limit değerleri sırasıyla %13.8 ve %14.7 olarak bulunmuştur. DPA plastik limit değeri %10.03 olarak ölçülmüş, diğer yandan plastisite

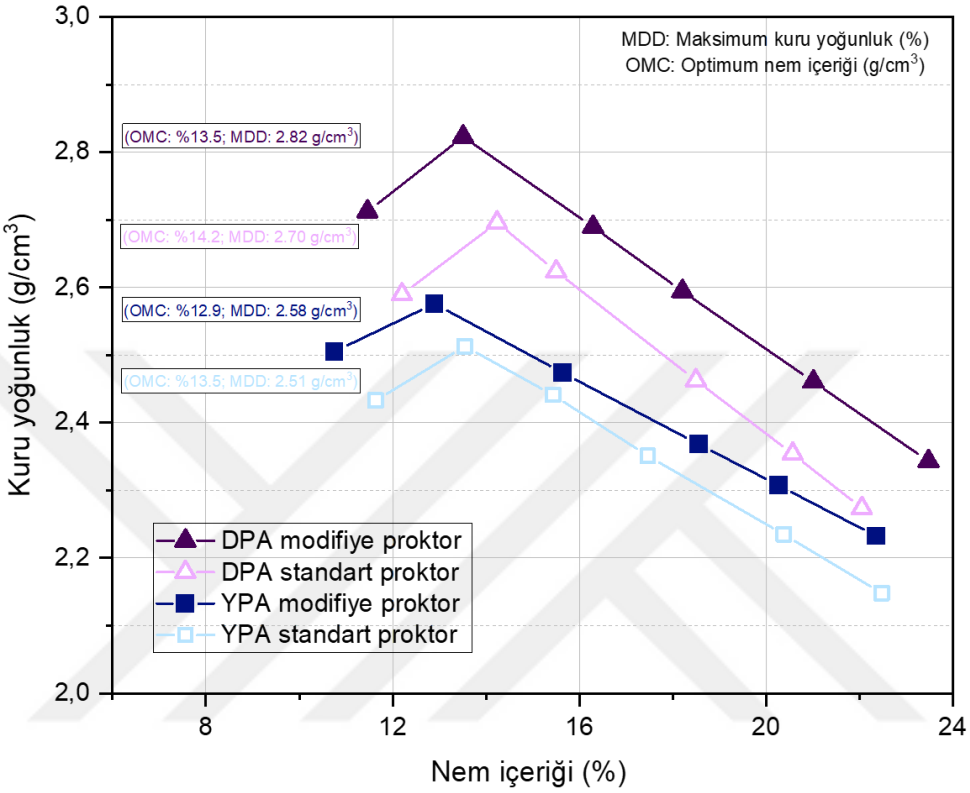
indeksi %4.69 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, YPA plastik limit değeri ve plastisite indeksi sırasıyla %9.54 ve %4.26 olarak hesaplanmıştır. Bu plastik limit ve indeks değerleri, XRD analizi ile de tespit edilen nispeten düşük kil minerali miktarları ile güvenilirdir (Kasap vd., 2022a). Ayrıca, ölçülen likit ve plastik limit değerleri literatürde rapor edilen diğer metalik maden atıkları ile iyi bir uyum içindedir (Yan vd., 2022; Song vd., 2022b). Baskın fazdaki (bağıl yoğunluğu artırma eğiliminde olan) piritik atıklardan elde edilen dolgu numunelerinin Atterberg limitleri, sülfür içermeyen atıklardan çok daha yüksek olacaktır.



Şekil 25. Casagrande yöntemi ile elde edilen likit limit sonuçları

Atık malzemesinin sıkıştırma (sıkıştırılabilirlik) değerleri ÇMD'nin stabilitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, incelenen piritik atıkların optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum kuru yoğunluk (MDD) değerlerinin belirlenmesi standart/modifiye proktor testleri ile ölçülmüş ve sonuçlar **Şekil 26**'da gösterilmiştir. Her iki atık numunesi (YPA ve DPA) için modifiye proktor testlerinden daha gerçekçi veriler elde edildiği söylenebilir. Buna göre, maksimum kuru yoğunluk YPA numunesi için optimum su içeriğinde (%12.92) 2.58 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, DPA'nın maksimum kuru yoğunluğu optimum su içeriğinde (%13.54) 2.82 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Açıkça görüldüğü üzere, DPA'nın sıkıştırılabilirliğinin YPA'ya

göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun arkasındaki temel neden, DPA'nın YPA'ya kıyasla nispeten daha düşük partikül boyutu dağılımına ve yüksek kil içeriğine sahip olmasıdır.



Şekil 26. Yüksek ve düşük pH atıkların standart ve modifiye proktor testleri

2.1.2. Çimento, Cüruf ve Uçucu Kül

Birincil çimento ürünü olarak CEM I 42.5R (standart Portland çimentosu, OPC) seçilmiştir. Başlıca OPC ikameleri uçucu kül (C tipi) ve yüksek fırın cürufudur. Bu malzemelerin PSD analizi **Şekil 24**'te verilmiştir. OPC, yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu külün (UK) ortalama parçacık boyutları (D_{50}) sırasıyla 24.62, 15.34 ve 18.57 µm olarak bulunmuştur. **Tablo 10** ayrıca bu malzemelerin temel fiziksel (örneğin PSD, G_s ve S_s) ve kimyasal özelliklerini de sunmaktadır. OPC'nin G_s değeri yüksek (3.21), UK'nin G_s değeri ise en düşük (2.52) olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, OPC'nin S_s değeri minimum (0.42 m^2/g), YFC'nin S_s değeri ise maksimum (0.81 m^2/g) olarak ölçülmüştür. CaO ve SiO_2 içerikleri kimyasal olarak OPC ve YFC için sırasıyla %64.81/%34.64 ve %15.89/%38.05 olarak belirlenmiştir. C tipi uçucu kül katkısının SiO_2 ve Al_2O_3 değerleri sırasıyla %43.98 ve %19.41 olarak bulunmuştur.

2.1.3. Boşluk ve Musluk Suyu

Bu çalışmada, musluk suyunun yanı sıra, atıklardan (DPA ve YPA) elde edilen gözenek suyu da karışım suyu olarak kullanılmıştır. Bu farklı su türlerinin kimyasal analizi, **Tablo 11**'de gösterildiği gibi ICP-OES (indüktif olarak eşleşmiş plazma optik emisyon spektroskopisi yöntemi) ile tespit edilmiştir. SO_4^{-2} (sülfat) ve Ca (kalsiyum), karışım suyundaki başlıca parametreler olarak bulunmuştur. Musluk suyunun sülfat ve kalsiyum konsantrasyonları, atıkların gözenek suyundaki değerlere kıyasla önemli ölçüde düşüktür.

Bu iki farklı karışım suyu türünün jeokimyasal analizi (pH, EC ve Eh) de SevenCompact™ Duo S213 cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir (**Tablo 11**). Musluk suyunun pH, Eh ve EC değerleri sırasıyla 7.81, 0.40 µS/cm ve 0.17 V'tur. YPA ve DPA gözenek sularının pH değerleri sırasıyla 10.41 ve 4.72, Eh değerleri 0.49 ve 0.29 µS/cm ve EC değerleri 4166 ve 5889 V olarak bulunmuştur.

Tablo 11. Boşluk ve musluk suyunun kimyasal/jeokimyasal parametreleri

	YPA gözenek suyu	**DPA gözenek suyu**	**Musluk suyu**
Kimyasal parametreler			
SO_4^{-2} (mg L^{-1})	4219	7403	5.23
Ca (mg L^{-1})	601	416	35.12
Si (mg L^{-1})	44.52	70.01	0.79
K (mg L^{-1})	39.13	20.23	0.58
Fe (mg L^{-1})	2.99	4.07	0.02
Mg (mg L^{-1})	2.24	1.57	2.11
Cl (mg L^{-1})	1.75	1.48	0.40
Al (mg L^{-1})	0.59	0.62	0.01
Cu (mg L^{-1})	0.19	0.14	0.93
Jeo-kimyasal parametreler			
pH	10.41	4.72	7.81
Eh (µS/cm)	0.49	0.29	0.40
Ec (V)	4166	5889	0.17

2.2. ÇMD Karışımlarının Üretim Aşamaları

ÇMD numuneleri, 10 litrelik mekanik bir karıştırıcıda farklı pH değerlerine sahip piritik atıkların ve bağlayıcıların (OPC, YFC ve UK) homojenleştirilmesiyle hazırlanmıştır. Karıştırıcıya çimentolu dolgu ekleme sırası ve sistematik karıştırma süreleri diğer çalışmalarda ayrıntılı olarak açıklanmıştır (Kasap vd., 2022b, 2022c). Dolgu numuneleri için ağırlıkça %4, 6 ve 8 çimento dozajı ve sabit ikame oranları

(OPC/YFC ve UK: 70/30) kullanılmıştır. ÇMD karışım reçeteleri **Tablo 12**'de verilmiştir. Özetle, musluk suyu kuru dolgu karışımına yavaşça dökülerek en az 8 dakika karıştırılmış ve çökme aparatı (mini çökme) kullanılarak %72'lik bir katı yüzdesi elde edilmiştir. Daha sonra, taze karışım yumuşak bir kapakla kapatılarak (buharlaşmayı önleyici) silindirik kalıplara (çap/yükseklik = D/H = 50/100 mm) dökülmüş ve kürleme kabinine yerleştirilmiştir. Kürleme sırasında suyun drenajını sağlamak için silindirik plastik kapların altına 8 delik açılmıştır. Bir mikrofiber filtre (47 mm çapında) kapların içindeki bu deliklerin üzerine hafifçe yerleştirilmiştir. Tüm çimentolu atık dolgu numuneleri 21±2 °C'de ve %90 bağıl nemde kürlenmeye bırakılmıştır.

Tablo 12. ÇMD numunelerinin reçetesi

Numune ID	Atık tipi	Katı İçeriği	Bağlayıcı dozajı	Karışım oranı			Çökme Değeri	Kür süresi
				OPC	YFC	UK		
DPA&C4	DPA	72	4	100	-	-	24	3,14,28,56,90
YPA&C4	YPA	72	4	100	-	-	24	3,14,28,56,90
DPA&C6	DPA	72	6	100	-	-	24	3,14,28,56,90
YPA&C6	YPA	72	6	100	-	-	24	3,14,28,56,90
DPA&C8	DPA	72	8	100	-	-	24	3,14,28,56,90
YPA&C8	YPA	72	8	100	-	-	24	3,14,28,56,90
DPA&CC4	DPA	72	4	70	30	-	24	3,14,28,56,90
YPA&CC4	YPA	72	4	70	30	-	24	3,14,28,56,90
DPA&CC6	DPA	72	6	70	30	-	24	3,14,28,56,90
YPA&CC6	YPA	72	6	70	30	-	24	3,14,28,56,90
DPA&CC8	DPA	72	8	70	30	-	24	3,14,28,56,90
YPA&CC8	YPA	72	8	70	30	-	24	3,14,28,56,90
DPA&CU4	DPA	72	4	70	-	30	24	3,14,28,56,90
YPA&CU4	YPA	72	4	70	-	30	24	3,14,28,56,90
DPA&CU6	DPA	72	6	70	-	30	24	3,14,28,56,90
YPA&CU6	YPA	72	6	70	-	30	24	3,14,28,56,90
DPA&CU8	DPA	72	8	70	-	30	24	3,14,28,56,90
YPA&CU8	YPA	72	8	70	-	30	24	3,14,28,56,90

Şekil 27, ÇMD hazırlama üretim aşamalarını ayrıntılı olarak göstermektedir. Kürlenmenin ardından sertleşen numuneler, fiziksel/mekanik/mikroyapısal özelliklerini belirlemek için UCS/UPV/MIP (tek eksenli basınç dayanımı/ultrasonik darbe hızı/civa intrüzyon porozimetrisi) gibi çeşitli testlere tabi tutulmuştur.



Şekil 27. ÇMD üretim aşamaları

2.3. Kullanılan Yöntemler

2.3.1. Tekrarlanabilir Mini Çökme Testleri

Geleneksel olarak, ÇMD numuneleri de dahil olmak üzere herhangi bir çimentolu malzemenin çökme ölçümleri standart çökme konisi (30 cm yüksekliğinde) testi kullanılarak yapılmaktadır. Ancak, ayrılan zaman ve gerekli malzeme göz önüne alındığında, standart çökme konisi testi saha testleri için uygundur ancak laboratuvar testleri için pratik değildir. Bunun yerine, mini çökme konisi testi, 30 cm

yüksekliğindeki çökme konisi testinin dolgu ürünlerinin %16'sına kadarını kullanır. Ayrıca mini çökme konisi ve standart koni ile son derece iyi bir korelasyona sahiptir. Mini çökme konisinin kullanılmasıyla, daha büyük miktarları daha kısa sürede test etmek mümkündür. Mini çökme konisi temel olarak alt ve üst uçları açık olan kısaltılmış bir konidir (alt çap: 100 mm, üst çap: 50 mm ve yükseklik: 150 mm). Bu çalışmada, mini ve standart çökme konisi testleri aracılığıyla çeşitli testler gerçekleştirilmiş ve bağlantı sabiti 2 olarak elde edilmiştir. Başka bir deyişle, mini çökme deneylerinden elde edilen çökme değeri 75 mm olarak bulunmuş, standart çökme deneylerinde ise bu değer 150 mm olarak elde edilmiştir. Mini çökme testleri sonucunda ÇMD numuneleri için en uygun katı madde içeriği ağırlıkça %72 olarak belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar standart çökme konisi ile uyumlu olmasına rağmen dolgu için 24 cm çökme değeri kullanılmıştır.

2.3.2. UPV Ölçümleri

Gelecek vaat eden tahribatsız test yöntemlerinden biri olan ultrasonik darbe hızı (UPV), ÇMD'nin fiziksel özelliklerini tahmin etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. **Tablo 12**'deki dolgu reçetelerine uygun olarak hazırlanan ve hedeflenen kürlenme süresine ulaşan kürlenmiş dolgu numunelerinin UPV değerleri, ASTM C 597-16 prosedüründe belirtildiği gibi, kullanışlı bir Proceq Pundit Lab 200 cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. **Şekil 22**'de gösterildiği gibi, verici ve alıcı arasındaki ultrasonik darbelerin yayılma süresini yakalar. Dönüştürücülerin frekansı 24 ila 500 kHz arasındadır ve örnekleme süresi 0,1μs'dir. UPV testinden önce, doğru bir UPV sonucu elde etmek için ÇMD örneklerinin üst/alt yüzeyleri düzeltilmiştir. Ayrıca, verici/alıcı transdüserleri arasında tam bir arayüz olduğunu onaylamak ve hava girişini önlemek için transdüserlere vazelin sürülmüştür. Ardından, transdüserler ile dolgu numuneleri arasında eşit bir basınç sağlamak için yaklaşık 5 ila 10 kN'luk sabit bir kuvvet uygulanmaya çalışılmıştır.

UPV değerleri tüm numuneler için 3 kez tekrarlanarak ortalama bir UPV sonucu elde edilmiştir. UPV ölçümünden sonra, taşınabilir dolgu süresi (T) ve transdüserler arasındaki boşluk (X) otomatik olarak kaydedilmiş ve UPV değerleri UPV (X, T) = X/T denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. ÇMD örneklerinin içinde

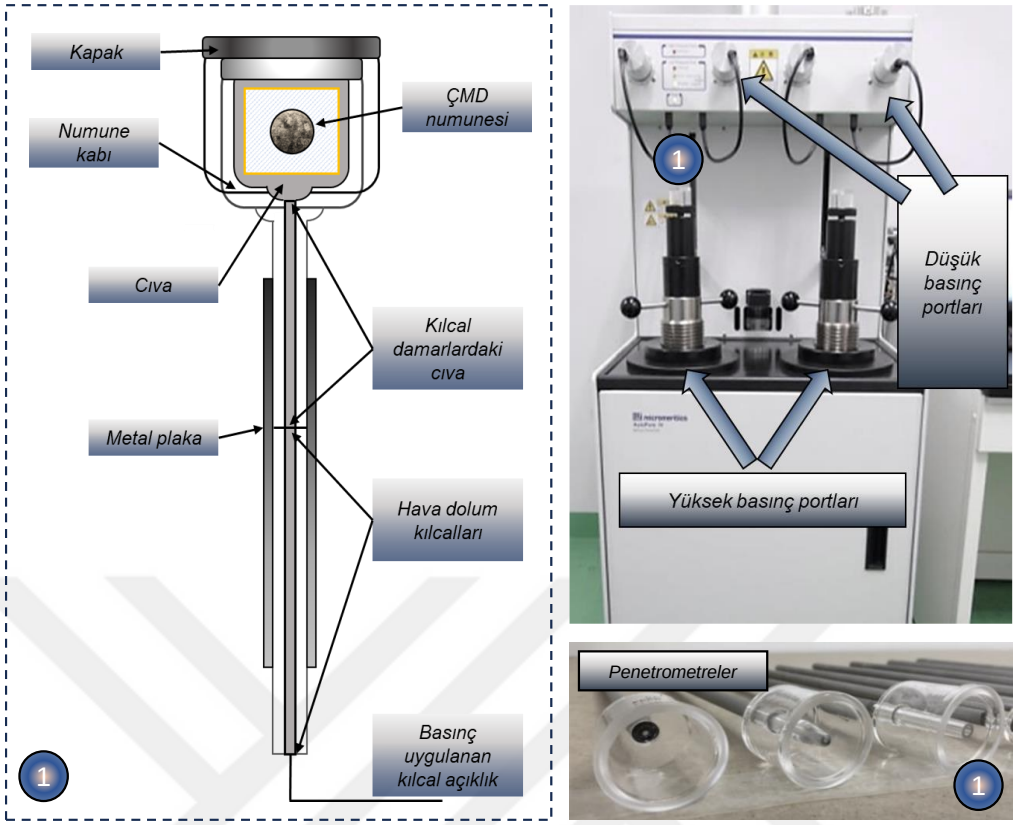
meydana gelen P dalgasının hızı (m/s) UPV (X, T), verici ve alıcı transdüserler arasındaki seyahat mesafesi 'X' ve ölçülen seyahat süresi 'T'dir.

2.3.3. UCS Testleri

Tahribatsız UPV testinden sonra, aynı dolgu numuneleri için tahribatlı UCS (sınırlandırılmamış basınç dayanımı) testi yapılmıştır. Dolguların UCS değerleri servo kontrollü ve tam otomatik bir pres (50kN kapasiteli; UTEST Multiplexer) kullanılarak araştırılmıştır. ÇMD numuneleri, iki paralel metal plaka arasına yerleştirilerek sürekli dislokasyon koşulları altında (0.00001-51 mm/dak dikey yer değiştirme) yüklenmiştir. Tüm test boyunca, dolgu numunelerinin basınç dayanımı, yer değiştirme ve gerilme/gerinim davranışları cihaz tarafından otomatik olarak kaydedilmiş ve raporlanmıştır. UCS değerleri 3 kez tekrarlanarak ortalama UCS değeri elde edilmiştir. ÇMD numunelerinin ortalama basınç dayanımlarında %5-10'luk bir standart sapma gözlenmiştir.

2.3.4. MIP Testleri

3-90 günlük kürlenme sürelerinin ardından, ÇMD numuneleri bir başka tahrip edici cıva intrüzyon porozimetri (MIP) testine tabi tutulmuştur. Deneyler, 414 MPa basınç üretebilen ve 0,003 μm gözenek çapına kadar ölçüm yapabilen bir cihaz (Micromeritics Autopore IV 9500) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz ilk olarak ÇMD içindeki gazları düşük basınçla boşaltır, numune tutucunun içini cıva ile doldurur ve 7 ila 345 MPa aralığında basınç üretir. Daha sonra yüksek basınçla 345 ile 414 MPa arasındaki değerlere yükselir. Bu düşük ve yüksek basınç işlemleri yaklaşık 8 saatlik bir süre boyunca gerçekleşir. Tüm testler için, yüzey gerilimi 485 dynes/cm olarak alınırken 130°'lik bir temas açısı dikkate alınmıştır. Buna ek olarak, testlerin %25 ila 90 arasında bir cıva gövdesi hacmi elde etmesi gerekmektedir. **Şekil 28**'de hem MIP cihazı hem de düşük ve yüksek basınç portu test aşamalarında kullanılan benzersiz penetrometresi gösterilmektedir. Aynı dolgu numunesi üzerinde gerçekleştirilen iki testin MIP gözenekliliğinde ±%1'lik bir fark gösterdiği ve cıva penetrasyon davranışının neredeyse aynı olduğu da bildirilmiştir.



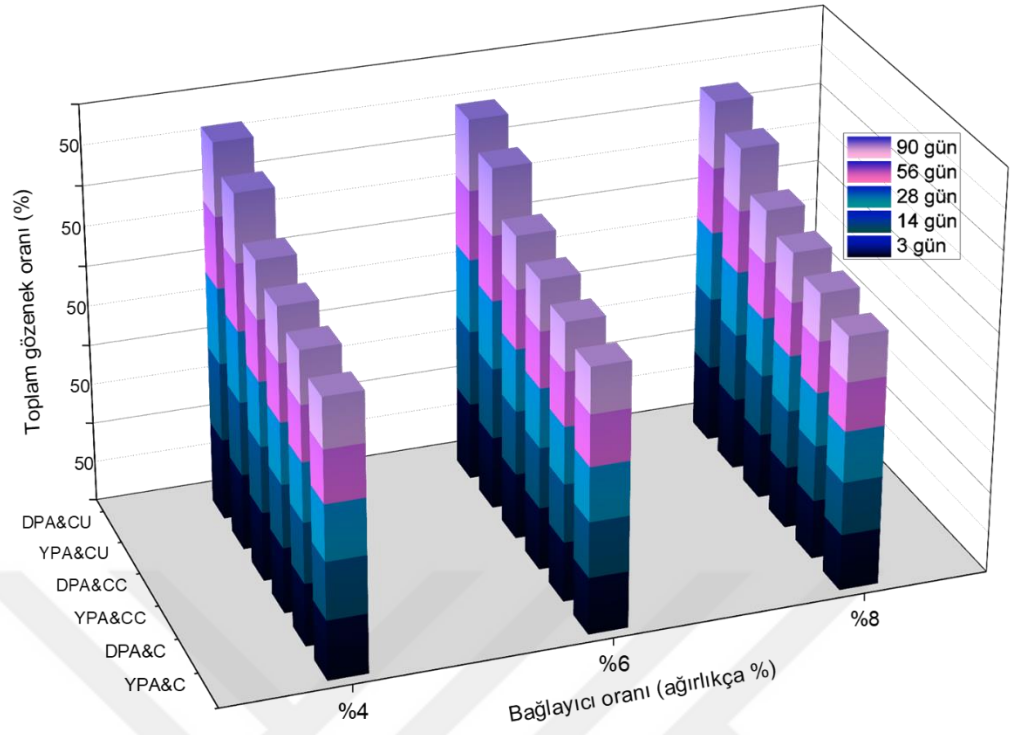
Şekil 28. MIP cihazı ve test sırasında uygulanan penetrometreleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Farklı pH Değerlerine Sahip Atıklar ile Hazırlanan Mineral Katkılı ÇMD'lerin Gözenek Yapısının Değerlendirilmesi

Asidik ve bazik piritik atıklardan oluşan ve farklı kür sürelerine (3-90 gün) maruz kalan ÇMD numunelerinin gözenek yapısı, IUPAC (uluslararası saf ve uygulamalı kimya birliği) sınıflandırmasına uygun olarak MIP testi ile incelenmiştir (IUPAC, 1972). Atıkların pH'ı, çimento içeriği, uçucu kül/cüruf ve kür süresinin ÇMD gözenek yapısının gelişimi üzerindeki etkileri, toplam gözeneklilik, mikro gözenekler (<0,002μm), mezo gözenekler (0,002-0,5μm), makro gözenekler (>0,05μm), kritik gözenek boyutu ve eşik çapı gibi çeşitli parametreler kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada mikro gözeneklerin etkisi dikkate alınmamıştır.

Şekil 29, ÇMD numuneleri için toplam porozite sonuçlarını göstermektedir. Maksimum sızma basıncının ve minimum gözenek boyutunun oluştuğu oranı ifade eden toplam porozite, bazik atıklarla hazırlanan ÇMD numunelerinde %45.12 ile %27.66 arasında değişirken, asidik atıklarla hazırlanan ÇMD numunelerinde %49.89 ile %28.83 arasında değişmektedir. Aynı kürleme süresi ve bağlayıcı içeriğinde, asidik atık içeren tüm ÇMD numuneleri bazik atık içerenlere göre daha yüksek toplam poroziteler vermiştir. Bu durumun arkasındaki nedenin çimento hidratasyonu için gerekli olan çevresel koşul olduğu söylenebilir. Düşük pH değerine sahip atıklar, diğer bir deyişle asidik atıklar, çimento malzemesi için elverişsiz bir ortam yaratır ve portlandit gibi hidrasyon ürünlerinin çözünmesine ve CSH (kalsiyum silika hidrat) bağlarının kopmasına neden olur (Cihangir vd., 2018). Bu da toplam gözenekliliği artırarak daha gözenekli ve geçirgen bir malzeme ortaya çıkarır. Ayrıca, dolgu iç yapısının sıkı bir form oluşturamamasından kaynaklanan hava ve su geçirgenliğindeki artış, piritik atıkların oksidasyonunu tetikler ve buna bağlı olarak dolgunun mekanik davranışını ve performansını olumsuz etkiler (Qin vd., 2022).

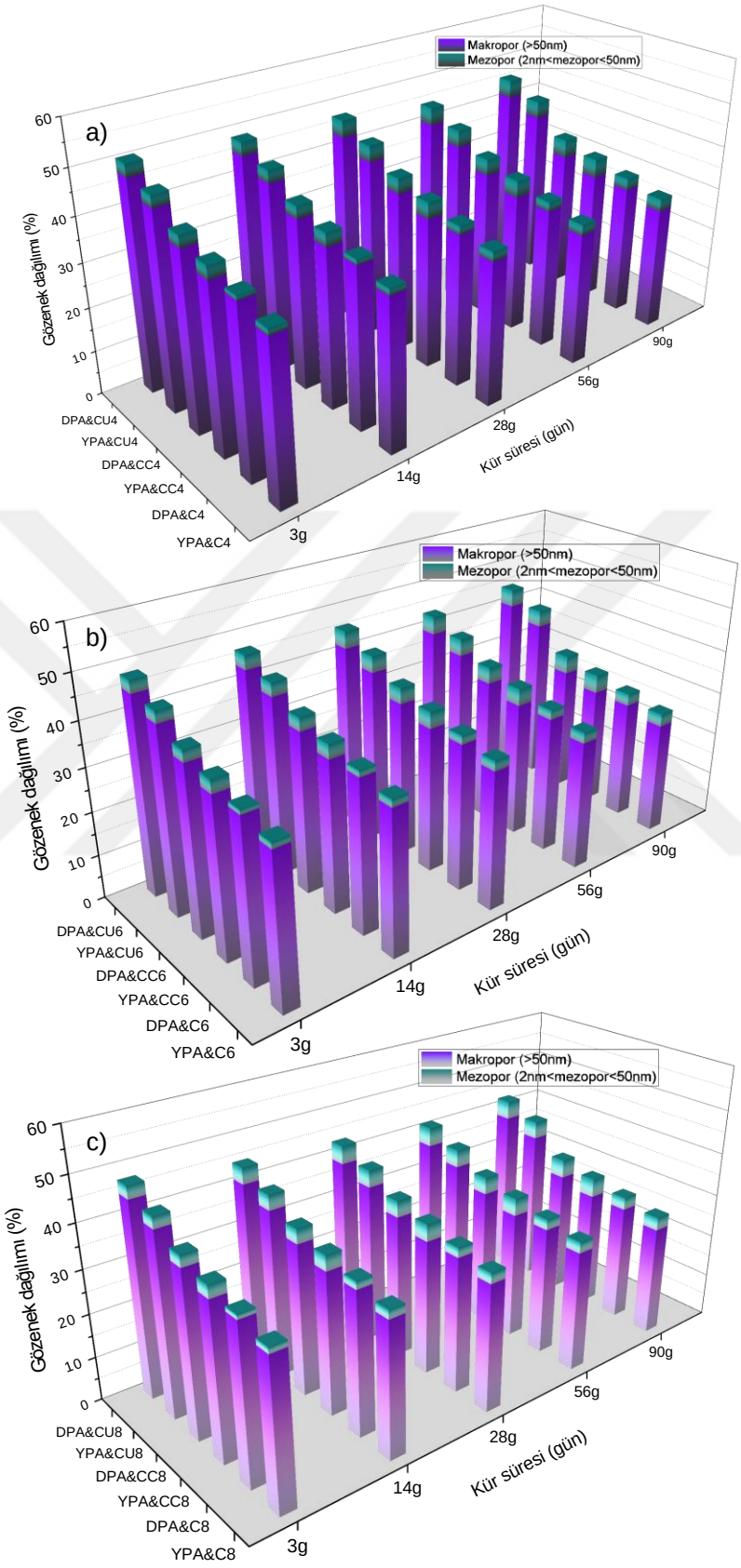


Şekil 29. Tüm ÇMD numunelerinin toplam porozite sonuçları

Şekil 29'dan, toplam porozite değerlerinin artan çimento dozajı ve kür yaşı ile azaldığı anlaşılmaktadır. Örneğin, 14 ve 56 günlük kür süreleri sonunda DPA&C4 kontrol numunesinin toplam porozite değerleri sırasıyla %36.95 ve %33.81 olarak bulunurken, aynı kür sürelerinde ağırlıkça %8 çimento içeriğine sahip kontrol numunesinde bu değerler sırasıyla %35.01 ve %30.98 olarak bulunmuştur. Belirli bir oranda (%30) standart Portland çimentosu yerine kullanılan mineral katkıların ÇMD'lerde toplam poroziteyi arttırdığı tespit edilmiştir. Toplam porozite, asidik atıklarla hazırlanan uçucu kül bazlı dolgularda %49.89'a, bazik atıklarla hazırlanan uçucu kül bazlı dolgularda ise %45.12'ye ulaşmıştır. Bu davranışın nedeni, puzolanik reaksiyonların çimento hidratasyon reaksiyonları kadar başarılı olmamasıdır (Bull ve Fall, 2020). Ayrıca, kürlenme süresi arttıkça azalan toplam porozite değerleri, maden dolgusunda kullanılan atık türünden bağımsız olarak cüruf ve uçucu kül katkıları arasında farklılık göstermektedir. Uçucu kül katkılı çimentolu maden dolgularının toplam porozitesinde özellikle uzun kür sürelerinde (90 gün) önemli artışlar gözlenirken, cüruf katkılı çimentolu maden dolgularında da önemli düşüşler devam etmektedir. Bu durum, cüruf katkısının puzolanik etkisinin çimentolu atık dolgu karışımlarında uçucu kül katkısına kıyasla daha uzun kür sürelerinde daha etkili olduğunu göstermektedir.

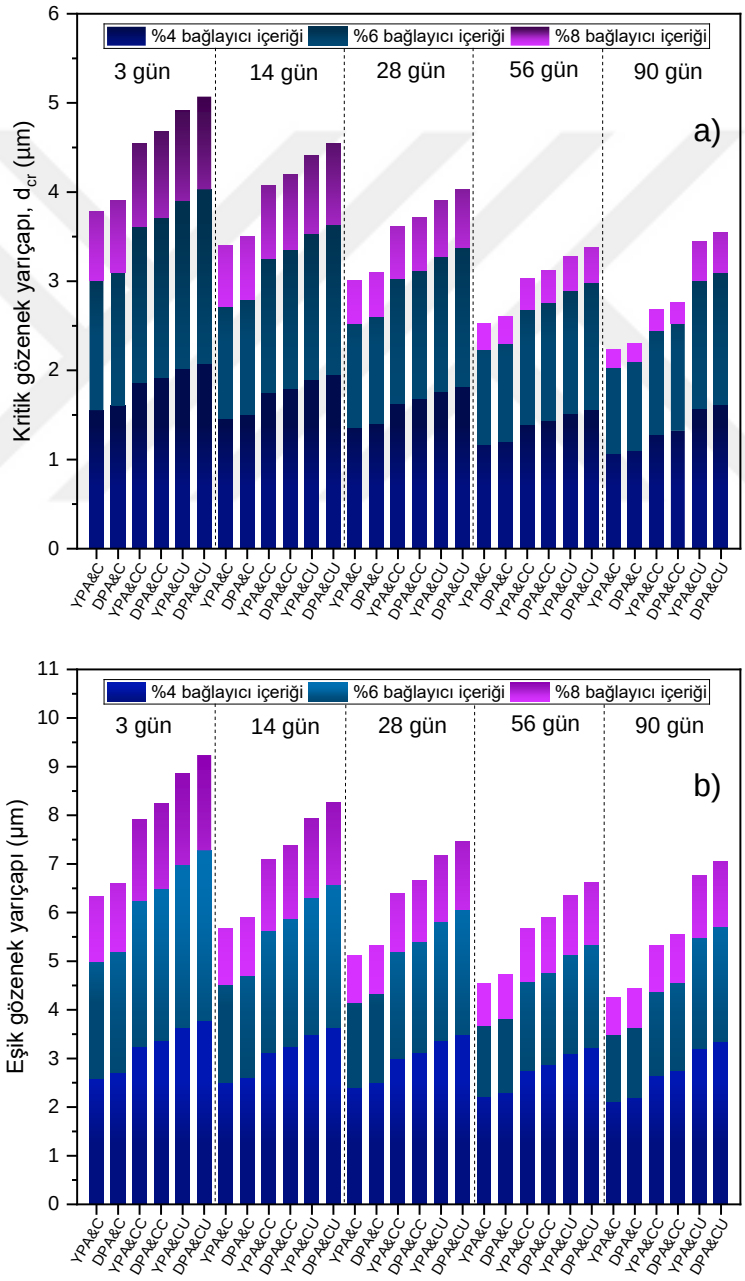
Şekil 30, sırasıyla ağırlıkça %4, 6 ve 8 çimento dozajında hazırlanan ÇMD numunelerinin mezo-porozite (gözenek çapı 2nm ile 50nm arasında değişen) ve makro porozite (gözenek çapı > 50nm) sonuçlarını göstermektedir. Toplam gözenekliliğe benzer şekilde, mezo-porozite sonuçları asidik atıklarla hazırlanan dolgularda bazik atıklarla hazırlananlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Atık türüne bakılmaksızın, tüm çimentolu maden dolgularının mezo-porozite sonuçları, bağlayıcı içeriği belirgin bir şekilde arttıkça anlamlı bir şekilde azalmıştır. YPA&CC4 numunesinin 28 günlük kür süresinden sonraki mezo-porozite değeri yaklaşık %33 iken, aynı kür süresi ve ağırlıkça %8 bağlayıcı içeriği için bu değer yaklaşık %29 olmuştur. Ayrıca, mezo-porozite değerlerinin artan kür süresiyle birlikte azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, YPA&CC6 numunesi için bu değer 3 günden 90 güne kadar %26.7 oranında azalmıştır. Ancak diğer numunelere kıyasla uçucu kül ikameli ÇMD numunelerinde, kür süresindeki artış belli bir güne kadar (56 gün) mezo-gözeneklerde azalmaya neden olurken, 56 günden sonra bu değerlerde artış görülmüştür. Bunun arkasındaki ana neden 56 günlük kür süresinden sonra uçucu kül katkılarının puzolanik özelliklerinin azalması olduğu söylenebilir (Li vd., 2021).

Şekil 30 incelendiğinde makro-porozite sonuçlarının mezo-porozite sonuçları ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Başka bir deyişle, kür süresi/çimento dozajı arttıkça, atıkların pH değerlerinden bağımsız olarak makro-porozite değerleri genellikle artmaktadır (90 günlük uçucu kül içeren dolgular hariç).



Şekil 30. Çimento dozajına bağlı olarak mezo ve makro porozite sonuçları: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c)

YPA&C8 kontrol numunesi 3 gün sonunda %1.46 makro-porozite değerine sahipken, aynı numune için bu değer 90 gün sonunda %3.01 olarak belirlenmiştir. Yüksek pH değerine sahip atıklarla hazırlanan ÇMD'lerin makro-porozite sonuçları, düşük pH değerine sahip atıklarla hazırlananlara kıyasla daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bu durum, ÇMD numunelerini oluşturan maden atıklarının pH değerlerinin ÇMD'nin gözenek yapısı üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 31. Tüm ÇMD'lerin kritik (a) ve eşik (b) gözenek çapı değişimi

Hem eşik çapı hem de kritik gözenek boyutu (d_{cr}), çimentolu dolguların gözenek yapılarının belirlenmesinde kullanılan diğer önemli faktörlerdendir. **Şekil 31**, ÇMD'lerin kür süresi (3-90 gün), atık türü (YPA ve DPA), bağlayıcı tipi (OPC, YFC ve UK) ve oranına (%4, 6, 8) bağlı olarak bu faktörlerin değişimini göstermektedir. Kritik gözenek boyutu, büyüyen MIP grafiğinin pik noktasında meydana geldiği gözenek çapını temsil eder (Chen vd., 2021). Bu parametre, dolgu numuneleri boyunca bağlantılı bir yol oluşturan ve geçirgenlik için önemli olan maksimum sürekli gözenek çapı olarak da ifade edilebilir (Jiang vd., 2022).

Şekil 31a'dan, kritik gözenek çapı değerlerinin kür süresi/çimento dozajı ile azaldığı görülmektedir. Örneğin, 3 ve 90 günlük kür süreleri sonunda DPA&CC4 numunesinin kritik gözenek çapı değerleri sırasıyla 1.85 µm ve 1.29 µm olarak bulunurken, aynı kür süreleri sonunda DPA&CC8 numunesinin değerleri sırasıyla 0.89 µm ve 0.27 µm olarak bulunmuştur. Ayrıca, bu parametre dolgu yapılarında kullanılan atıkların pH'ına bağlı olarak değişmektedir ve asidik atık içeren çimentolu maden dolgularında nispeten yüksek değerler elde edilmiştir (örn. 28 gün boyunca kürlenen DPA&CC6 numunesinin kritik gözenek çapı 1.39 µm'ye eşitken, YPA&CC6 numunesinde aynı kürleme süresi için bu değer 1.39 µm'ye eşittir). Bunun arkasındaki ana neden, atıkların hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlar üzerindeki pH etkisi olarak ifade edilebilir. Düşük pH değerlerinde daha az hidratasyon malzemesi (CSH jelleri) oluşması, malzemenin daha büyük bir boşluk yapısına sahip olmasına neden olmaktadır (Koohestani vd., 2020).

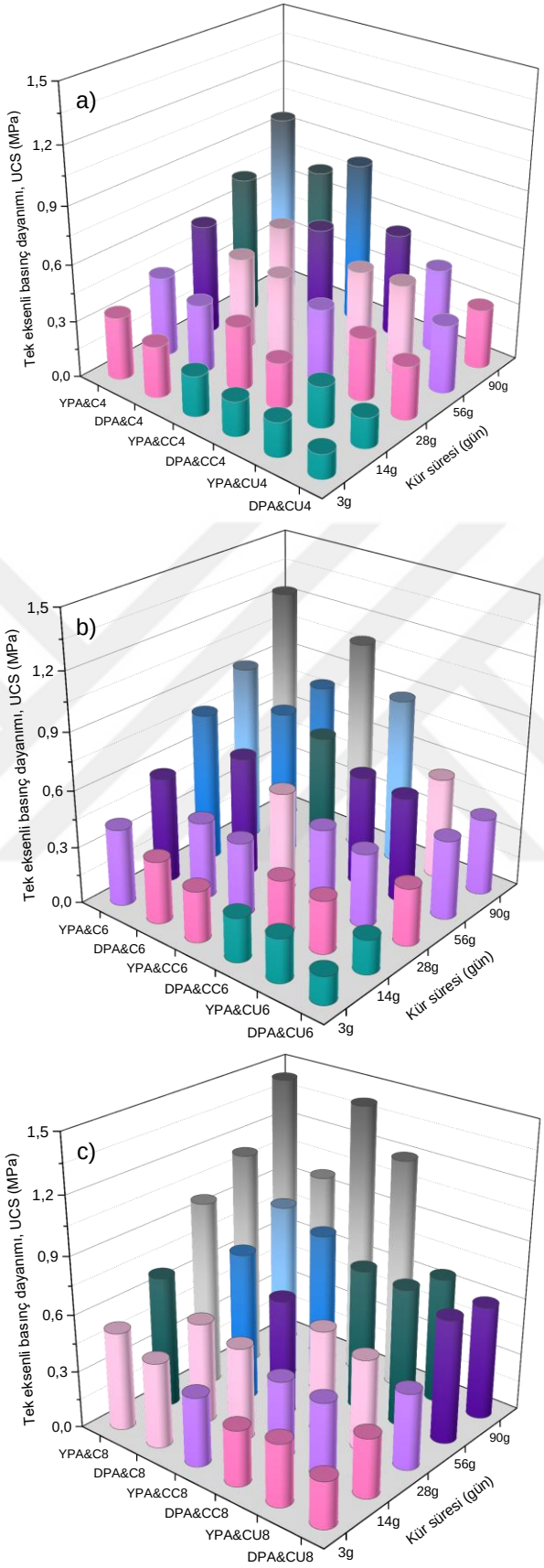
Eşik çapı, cıvanın numune gözeneklerine girdiği en büyük gözenek çapıdır ve sonuçlar **Şekil 31b**'de sunulmuştur. Eşik çapı değerleri, ÇMD numunelerindeki kritik gözenek boyutuna benzer şekilde, kür süresi ve bağlayıcı içeriği arttıkça azalmıştır. 28 günlük kürlenmiş DPA&CU numunelerinin ağırlıkça %4, 6 ve 8 çimento oranı için eşik çapları sırasıyla 3.45 µm, 2.62 µm ve 1.36 µm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, DPA&C8 numunesinin eşik çapı 3 gün sonra 1.39 µm iken, 90 gün sonunda bu değer %46 oranında azalarak 0.75 µm olarak bulunmuştur. Eşik çap değerinin azalan su/bağlayıcı oranları ve artan yaşla birlikte düştüğü farklı çalışmalarda da rapor edilmiştir (Wei vd., 2020). Farklı kür süresi ve bağlayıcı içerikleri incelendiğinde, en düşük eşik çap değerinin (0.75 µm) bazik atık içeren dolgu numunelerinde (90 günlük

YPA&C8), en yüksek sonucun ise (3.81 μm) asidik atık içeren maden dolgu numunelerinde (3 günlük DPA&CU4) gözlendiği görülmüştür.

Önceki çalışmalar, düşük puzolanik katkılar ve/veya atıklardaki yüksek sülfat içeriği nedeniyle dolgu ortamında şişme özelliğine sahip ikincil jips oluşumunun arttığını göstermiştir (Chen vd., 2019; Tang vd., 2021). Bunun sonucu olarak, sülfat ataklarının özellikle uzun vadede dolguların yapısal bütünlüğünü bozduğu ve gözenekliliği önemli ölçüde artırdığı vurgulanmaktadır (Wang vd., 2020). Piritik atıkların tane boyutunun oldukça ince olması nedeniyle partiküller arasındaki temas yüzeyi artmakta ve uzun kür sürelerinde ÇMD'lerin asit direncini azaltarak daha gözenekli bir yapı oluşumuna neden olmaktadır (Liu vd., 2020b; Qiu vd., 2020). Buna karşılık birçok çalışma, dolgulardaki puzolanik madde içeriğindeki artışın ve/veya bazik maddelerin (örn. YPA) kullanımının, gözenek çözeltisini tamponlayan OH- (hidroksit) iyonlarını serbest bırakarak yüksek alkali koşulların oluşumunu desteklediğini göstermektedir (Hamberg vd., 2018; Yang vd., 2022). OH- salınımı birincil C-S-H oluşumunu artırır ve dolguların gözenekliliğini azaltır (Yue, 2021). Bir çalışmada, alkali dolgu ortamının portlandit oluşumunu arttırdığı ve ilave C-S-H üretmek için puzolanik malzemelerle reaksiyona girdiği belirtilmektedir (Guo vd., 2021). Reaksiyonların bir sonucu olarak, daha yoğun ve kompakt bir dolgu matrisi oluşumu desteklenerek gözeneklilik ve geçirgenliği azalmakta, ÇMD'lerin mikro yapısı iyileşmektedir (Chen vd., 2022).

3.2. UCS Sonuçları ve Toplam Porozite ile İlişkisi

Şekil 32, farklı pH'larda atıklarla (YPA, DPA) hazırlanan ve mineral katkılar (YFC, UK) içeren ÇMD numunelerinin kürleme süresi ve bağlayıcı içeriğine göre UCS (tek eksenli basınç dayanımı) gelişimlerini göstermektedir. Katı madde içeriği (ağırlıkça %72) ve mineral katkı oranı (OPC/YFC ve OPC/UK: %70/30) test edilen tüm numuneler için sabit tutulmuştur. Sonuçlar, bağlayıcı türünden bağımsız olarak UCS değerlerinin bağlayıcı oranıyla birlikte arttığını açıkça göstermektedir. Önceki çalışmalar ile tutarlı olarak bu durum, yüksek bağlayıcı içeriğinin benzer yaşlarda daha fazla hidratasyon ürünü oluşumunu destekleyerek ÇMD numunelerinin mukavemetini artırdığının bir göstergesidir (Kiventerä vd., 2018; Li vd., 2022b; Zhang vd., 2023).



Şekil 32. Çimento dozajına bağlı tüm ÇMD'lerin mukavemet gelişimi: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c)

Kaçınılmaz olarak, tüm dolgu numunelerinin mekanik özellikleri, esas olarak gelişmiş CSH jelleri nedeniyle kür süresi ile iyileşmektedir. **Şekil 32**'den, kür süresindeki artışın ÇMD'lerin boşluk oranında zamanla bir düşüşü tetiklediği ve mukavemet gelişimini desteklediği çıkarılabilir (Wang vd., 2022c; Zhang vd., 2022c).

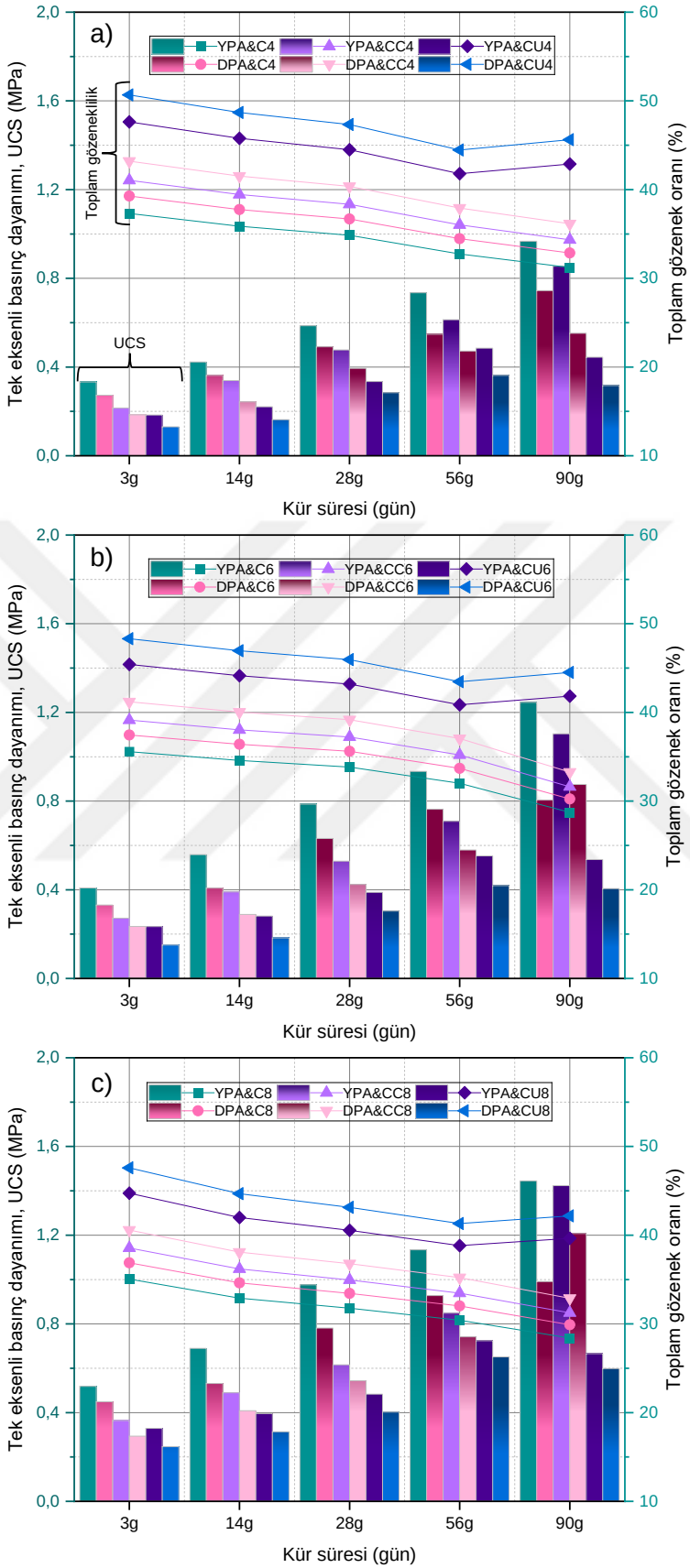
YPA ile hazırlanan ÇMD numunelerine kıyasla, DPA ile hazırlanan numunelerin dayanımları %27.13 ile %92.16 arasında daha düşüktür. Bu olgu DPA'daki pirit oksidasyonu ve asit oluşumu ile yorumlanabilir. Aynı kür sürelerinde, atıkların yüksek asidik içeriği hidratasyon sürecini yavaşlatarak çok gözenekli ve aşınmış bir yapının oluşumunu tetiklemiştir. Bu durum, **Şekil 33**'teki MIP sonuçlarıyla uyumlu olarak, DPA ile hazırlanan dolguların diğerlerine kıyasla %34.3'e kadar daha gözenekli bir yapı oluşturmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, daha önceki çalışmalarda asidik yapının hidrasyon ürünlerinin çözünmesine neden olduğu ve geçirgenliği (diğer bir deyişle hidrolik iletkenliği) artırdığı, dolayısıyla dolguların mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkilediği bildirmiştir (Müllauer vd., 2013; Jafari ve Grabinsky, 2021).

Yukarıda bahsedilen durumun aksine YPA, çimentolu dolgu numuneleri içerisinde çimento türevi alkali ortamı destekleyerek mukavemet artışı için verimli bir ortamın oluşmasına katkı sağlar. Bu durum çimentolu maden dolguları içerisinde oluşan hidratasyon ürünlerini arttırarak daha az boşluk/gözenek oluşumunu tetikler ve yüksek mekanik dayanım sonuçları sağlar. Çimento ikamesi olarak YFC ve UK içeren ÇMD numuneleri, kontrol numunelerine (DPA&C ve YPA&C) kıyasla özellikle erken kür sürelerinde (ilk 28 gün) daha düşük dayanımlar verdiği gözlemlenir (**Şekil 32**). Örneğin, aynı çimento içeriğine (ağırlıkça %4) ve atık türüne (DPA) sahip DPA&CC4 ve DPA&CU4 numunelerinin dayanımı, DPA&C (kontrol) numunesine kıyasla sırasıyla %20.3 ve %41.8 daha düşüktür. Mineral katkılar içeren dolgu numunelerinin düşük dayanımları, çimentoya göre daha düşük puzolanik özelliklerle yakından ilişkilidir. Birçok çalışma, bu katkıların çimentoya kıyasla daha düşük miktarda kalsiyum oksit (CaO) içermesi nedeniyle yetersiz hidratasyon ürünleri oluşturduğunu ve dayanımları düşürdüğünü bildirmiştir (Sun vd., 2021; Zhao vd., 2022b). Bu durumun bir etkisi olarak DPA ile hazırlanan mineral katkılı dolgu numunelerinin dayanım kaybı kontrol numunelerine göre oldukça yüksektir.

Çimento ile karşılaştırıldığında, mineral katkılar özellikle erken yaşlarda dolgu ortamının alkalinitesini artırmada yetersiz kalmaktadır. Ancak yüksek bağlayıcı dozajı ve artan kürleme süresi olumsuz koşulları ortadan kaldırabilir (Zheng vd., 2019). Özellikle cüruf, dayanıklılık ve kimyasal korozyona karşı direnç gibi avantajları sayesinde uzun vadede dolgu ortamının iyileştirilmesine katkıda bulunur (Zhang vd., 2022d). Bu durum, YFC içeren numunelerin 90 günlük kür süresinde DPA'lı kontrol numunelerine kıyasla %8.7 (ağırlıkça %4 bağlayıcı içeriği) ve %22.3 (ağırlıkça %8 bağlayıcı içeriği) daha yüksek mukavemet vermesiyle kanıtlanabilir. Ancak bu durum YPA ile hazırlanan ÇMD numunelerinde görülmemiştir. Bunun nedeni ortamın yüksek alkalinitesinin çimento ile etkileşimi güçlendiren bir faktör olmasıdır. UK ise diğer numunelere kıyasla erken ve ileri yaşlarda düşük dayanım vermiştir. UK katkısının puzolanik reaktivitesinin çok düşük olması, dolguların hidratasyon ısısı ve çekirdek sıcaklığı gibi parametrelerini düşürmektedir. Bu da hidratasyon ürünlerinin oluşumunu engellemekte ve dolguda daha gözenekli bir yapıyı tetiklemektedir.

MIP sonuçlarında, uçucu kül katkılı ÇMD numuneleri en yüksek boşluk oranına ve en düşük mukavemete sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, UK'nın düşük su adsorbe etme özelliği, artan çimento oranlarında hidratasyon reaksiyonlarına yavaş katılımına neden olmaktadır (Liu et al., 2020). UK içeren dolgular en düşük dayanım değerlerine (3 günlük kür süresi: 0.17-0.23 MPa) ulaşmakla birlikte yüksek oranda korozyona uğramışlardır. Özellikle 90 günlük kürlenme süresinde, dayanımdaki düşüşün yanı sıra toplam boşluk oranında da bir artış gözlenmiştir (**Şekil 33**).

ÇMD'lerin gözenekliliği azaldıkça mukavemetin katlanarak arttığı da rapor edilebilir (Zhang et al., 2023). OPC ve puzolanik katkılar gibi alkali maddeler dolguların gözenek çözeltilerinde çözünür ve C-S-H oluşturmak için reaksiyona girer (Fang ve Fall, 2018). Puzolanik katkılar OPC gibi C-S-H oluşumunu destekler, ancak Ca/Si oranı daha düşüktür (He vd., 2021). Bu hidrasyon ürünleri, mineral çökelmesi nedeniyle ÇMD'lerin mikro yapısını iyileştirerek gözenekliliği/geçirgenliği azaltır (Sun vd., 2020b). Hidrasyon ürünlerinin, dolguların alkali ortamının korunmasıyla (örneğin, yüksek çimento içeriği ve YPA) artar (Chen vd., 2017; Sun vd., 2022). Gözenekliliğinin azaltılması aynı zamanda dolguları hava ve nem girişine karşı koruyarak pirit oksidasyonunu önemli ölçüde azaltır ve mukavemeti artırır (Ghirian ve Fall, 2015).



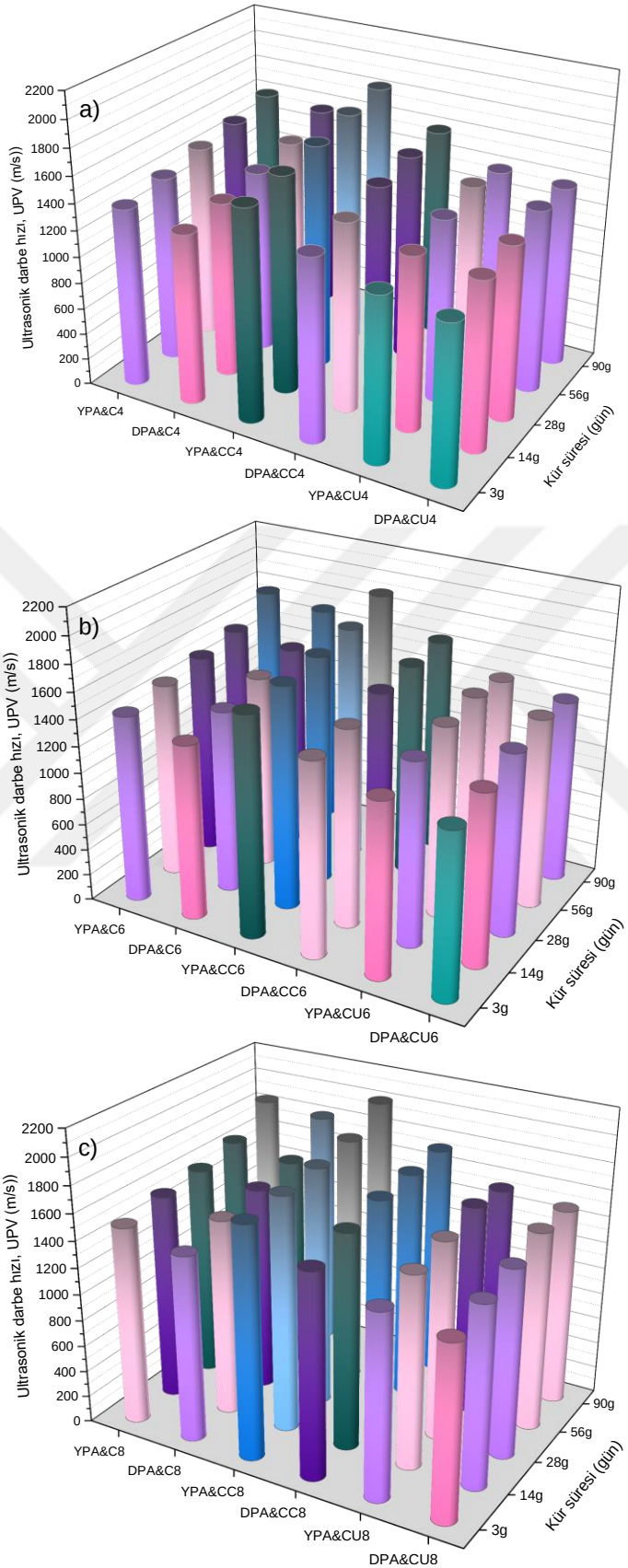
Şekil 33. Çimento dozajına göre UCS ve toplam porozite arasındaki ilişki: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c)

Buna karşılık, birçok çalışma düşük çimento oranları ve yüksek sülfat içerikli atıkların dolgularda kullanılmasıyla hidratasyon reaksiyonlarının zarar gördüğünü ve ciddi mukavemet kayıplarına neden olduğunu bildirmiştir (Zheng vd., 2019; Li vd., 2022c). Önceki ifadeyi destekleyen diğer çalışmalar, yüksek doygunluk ve artan serbest su nedeniyle gözenekliliğin artmasıyla dolgulardaki mukavemet kayıplarına dikkat çekmektedir (Guo vd., 2021; Fang vd., 2021). Bu durum, dolgu partiküllerinin ve hidrasyon ürünlerinin kristalleşmesini ve/veya çökelmesini kısıtlayarak basınç dayanımı, tokluk ve eğilme dayanımının zayıflamasına neden olmaktadır (Cao vd., 2019).

3.3. UPV Ölçüm Sonuçları ve Toplam Porozite ile İlişkisi

Şekil 34 ve **Şekil 35** farklı ÇMD numunelerinin UPV (ultrasonik darbe hızı) sonuçlarını ve bu sonuçların toplam porozite ile değişimini göstermektedir. **Şekil 34**'ten de görülebileceği gibi, UPV değerleri kür süresi/çimento dozajı arttıkça artmaktadır. DPA&CC4 numunesinin 3, 14 ve 28 gün sonraki UPV değerleri sırasıyla 1301, 1378 ve 1415 m/s iken, DPA&CC6 numunesinin aynı kür süreleri sonundaki UPV değerleri sırasıyla 1368, 1429 ve 1501 m/s'dir. Ayrıca, tüm dolgu numunelerinde bazik atık içeren ÇMD numunelerinin asidik atık içeren ÇMD numunelerine göre daha yüksek darbe hızı değerlerine ulaştığı görülmüştür. Öyle ki, en yüksek UPV sonucu (2062 m/s) 90 günlük kür süresinde YPA&C8 numunesinde tespit edilirken, en düşük UPV sonucu (1195 m/s) 3 günlük kür süresinde DPA&CU4 numunesinde tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, bazik atık içeren dolguların daha yoğun bir yapıya sahip olduğunu desteklemektedir. Diğer çimentolu beton/harç kompozitleri gibi, ÇMD'lerin iç yapısı da büyük ölçüde içerdiği çimento hamuruna, agregaların (atık ve katkı maddeleri) gözenekli yapısına ve agrega ile harç arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bu durum, ÇMD'lerdeki herhangi bir bozulmanın (düşük pH'lı atıkların ve sülfat saldırılarının neden olduğu olumsuz hidratasyon ortamı nedeniyle) ÇMD'lerin mekanik performansını ve gözenek yapısını olumsuz etkilemesine neden olur (Wang vd., 2020d; Akkaya vd., 2021). Ayrıca, ÇMD'lerin içerdiği veya maruz kaldığı olumsuz koşullar tahribatsız yöntemlerle belirlenen sonuçları doğrudan etkiler (Yılmaz vd., 2014).

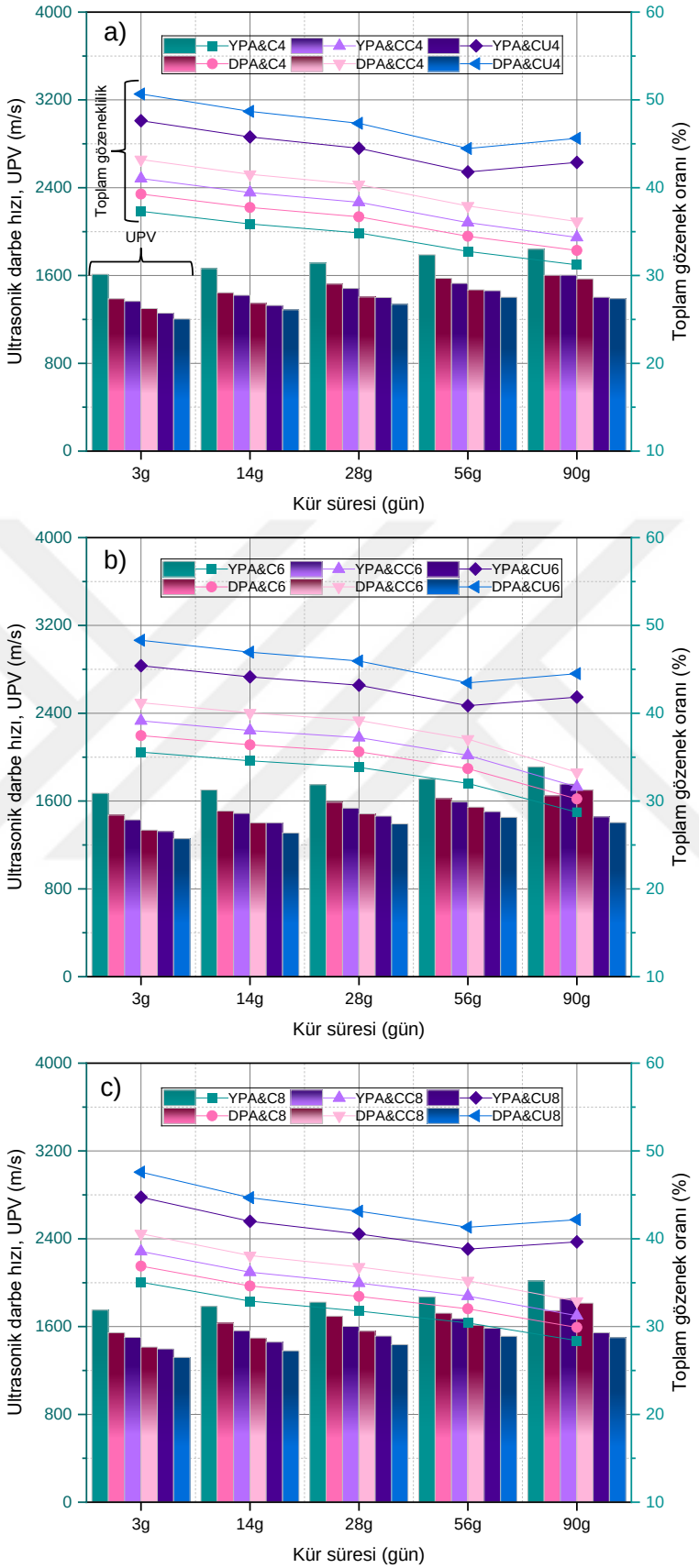


Şekil 34. Çimento dozajına bağlı tüm ÇMD'lerin UPV gelişimi: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c)

Bu nedenle, asidik atıklarla hazırlanan dolguların UPV sonuçları, bazik atıklarla hazırlananlara kıyasla daha düşük sonuçlar vermektedir. Ayrıca, azalan UPV değerleri dolgu numunelerinin toplam porozite ve geçirgenliğindeki artış hakkında bilgi vermektedir (Zhang vd., 2020). Özellikle oksijen geçirgenliği göz önünde bulundurulduğunda, asidik atık içeren ÇMD numunelerinin hava/su ile teması sonucu erken oksidasyonu, bu dolguların düşük UPV değerleri ile kolayca açıklanabilir. Dolguların yetersiz sıkıştırılması ve dolgu numunelerinde hasarlı alanların veya boşlukların bulunması gibi durumlar da darbe hızında düşüşe neden olur (Liu vd., 2020a). Bu nedenle UPV sonuçları, dolgu numunelerinin istenen sıkıştırmaya ulaşıp ulaşmadığını kontrol etmek ve buna bağlı olarak zaman içindeki gözenek yapısal evrimi hakkında mantıklı bir fikir sahibi olmak için kullanılabilir.

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 (Raavi ve Tripura, 2021). Özellikle OPC'nin dolgularda yüksek oranlarda kullanılması nedeniyle verimli hidratasyon süreci ve porozitenin azalması UPV'yi olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca mineral katkılar uzun vadede çimentolu malzemelerin yapısal özelliklerini iyileştirerek UPV değerlerini artırmaktadır. Buna karşılık, çalışmalar su/çimento oranındaki azalmaya bağlı olarak çimentolu malzemelerin gözenekliliğindeki artışın UPV'yi azalttığını bildirmektedir (Zhang vd., 2021a).

Ultrasonik dalgaların çimento matrisinde yayılması, özellikle gözenek yapısı nedeniyle numunelerin doygunluğuna çok duyarlıdır (Candelaria vd., 2020). Bu durum hem yoğunlukta hem de Young modülünde bir azalma ile ilişkilidir (Araujo Thomaz vd., 2021). Mevcut literatürde UPV'nin çimentolu malzemelerin, özellikle de betonun aside maruz kalma derecesi ile önemli ölçüde azaldığı da bildirilmiştir (Siad vd., 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-Valukolaee, 2017).



Şekil 35. Çimento dozajına göre UPV ve toplam porozite arasındaki ilişki: ağırlıkça %4 (a); %6 (b); ve %8 (c)

3.4. UCS ve UPV Arasındaki Korelasyon

UPV, ÇMD gibi çimentolu malzemelerde mekanik dayanımla yakından ilişkilidir. Bununla birlikte, UPV ve UCS arasındaki korelasyon karışım oranı, agrega/atıklar ve çimento tipinden doğrudan etkilenir. Kullanılan malzemeler için UCS ve UPV arasındaki regresyon eğrileri mevcut olduğu sürece, herhangi bir basınç dayanımını tahmin etmek mümkün hale gelir. Önceki çalışmalarda, ÇMD numuneleri için mekanik dayanım ve ultrasonik darbe hızı arasında birçok bağlantı sunulmuş ve önerilmiştir (Li vd., 2020). Farklı atık ve mineral katkı türlerine bağlı olarak, ÇMD numunelerinin UPV ve UCS arasındaki korelasyon en küçük kare regresyon yaklaşımı ile belirlenmiştir. Doğrusal, polinom, logaritmik, üstel ve güç yaklaşımları kullanılarak her yöntem için bağlantı sabitleri hesaplanmıştır. **Tablo 13**, tüm ÇMD numuneleri için oluşturulan eğri denklemlerini, R^2 ve P (F testleri sonucu) değerlerini göstermektedir. R^2 (korelasyon/belirleme katsayısı) regresyonları karakterize etmek için kullanılan istatistiksel bir ölçüdür ve 0 ile 1 arasında değerler almaktadır (Raposo, 2016). Bu değer 0'a yaklaştıkça, uydurulan eğri ile hesaplanan veriler arasında bir ilişki olmadığı kabul edilir. Bu değer 1'e yaklaştığında ise uydurulan eğri hesaplanan verilerin tüm değişkenliğini açıkladığını gösterir. Genel olarak, R^2 ne kadar büyükse, uydurulan eğri ile veri arasındaki ilişki o kadar güçlüdür (Abdelkareem vd., 2022). Bu durum göz önünde bulundurularak, eğri uydurma yöntemleri arasında en yüksek R^2 değerlerine sahip olan güç eğrisi uydurma yöntemi kullanılmıştır (**Tablo 13**). UPV ile UCS değerlerinin karşılaştırılması, **Şekil 36 ve Şekil 37**'de gösterildiği gibi dolgu numuneleri için en uyumlu eğri güç eğrisi olarak bulunmuştur. Ayrıca **Tablo 13**'ten ÇMD numunelerinin test değişkenleri (DPA/YPA ve mineral katkılar) arasında yüksek R^2 değerleri (0.83-0.98) olduğu sonucu çıkarılabilir.

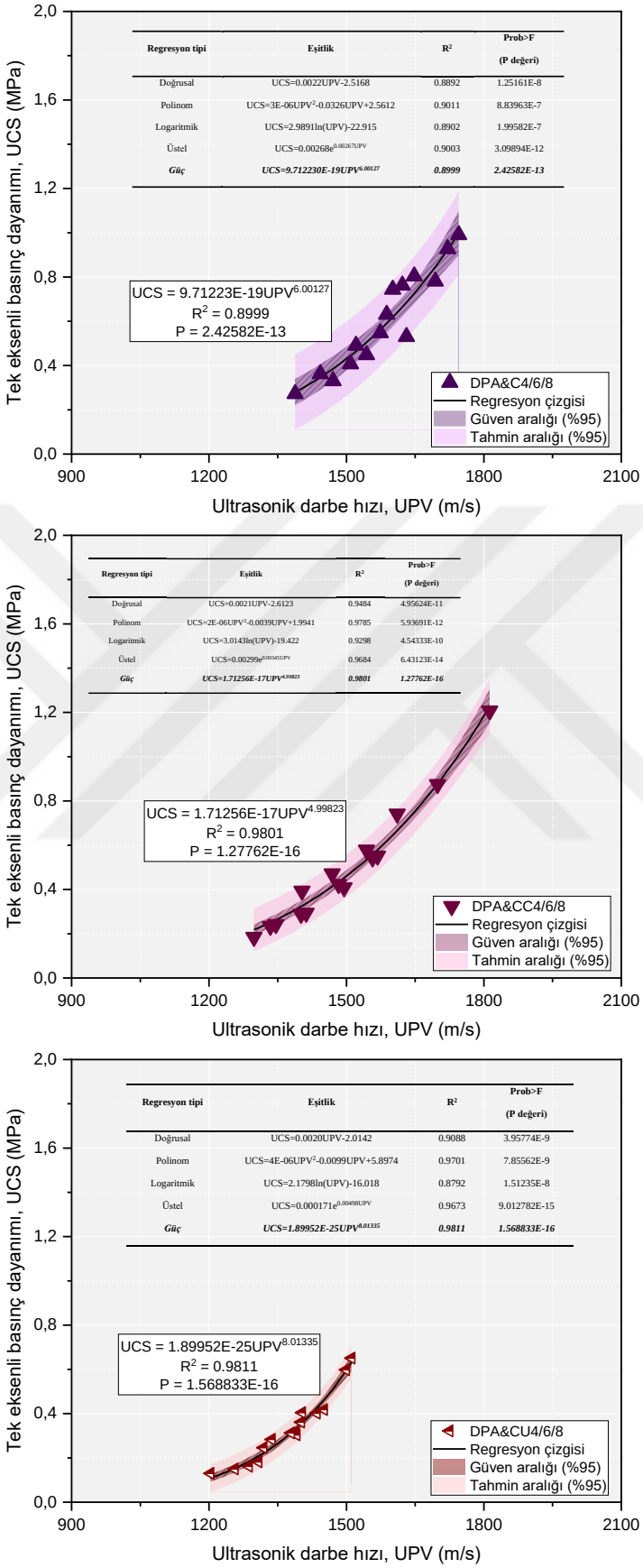
Uygun eğriyi bulmanın yanı sıra, güven ve tahmin bandı regresyon modelini daha sezgisel olarak yorumlamaya yardımcı olur (Diquigiovanni vd., 2022; Telschow ve Schwartzman, 2022). Tüm çimentolu maden dolgu numuneleri için %95 güven ve tahmin bandı kullanılmıştır (**Şekil 36 ve Şekil 37**). Burada güven aralığı, veriler için olası tüm uyum eğrisi sınırlarını göstermektedir. Başka bir deyişle, hata payının eklenip çıkarılmasına dayalı olarak verilerin makul bir değer aralığında olup olmadığını gösterir. Bu çalışmadaki tüm ÇMD numunelerinin UPV değerlerine karşı

çizilen tek eksenli basınç dayanımları (UCS) çoğunlukla %95 güven bandı içerisindedir.

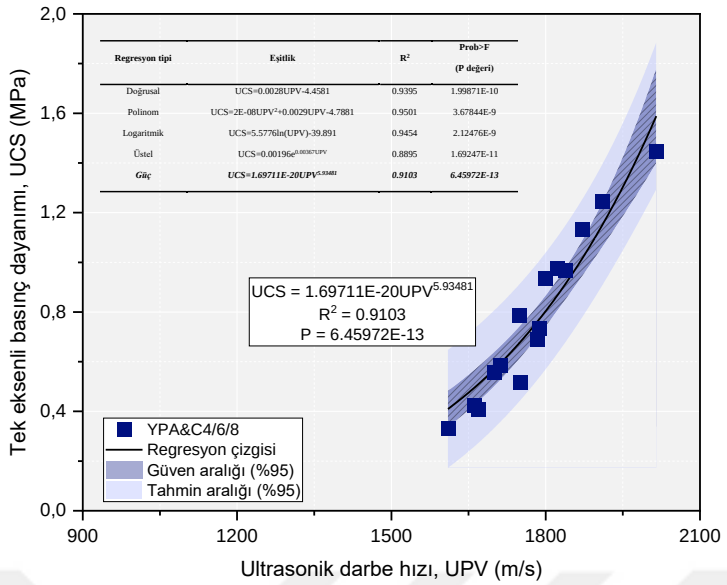
Tahmin bandı, belirtilen güven seviyesi (%95) için tüm deneysel noktaları nerede görmeyi bekleyebileceğimiz hakkında bilgi verir. Sabit bir terim olması bakımından güven aralığı ifadesinden farklıdır. Bu nedenle, tahmin bandı güven bandından daha geniştir. Benzer şekilde, çalışma kapsamında yapılan regresyonların doğruluğunu değerlendirmek amacıyla F testi için P (Prob>F) değerleri kullanılmıştır. P-değeri, bir hipotezi gözlenen verilere karşı doğrulamak için kullanılan istatistiksel bir ölçüdür (Lundahl vd., 2011). P, 0 ile 1 arasında bir değer alan bir olasılıktır. F testi için P değeri ne kadar küçükse (genellikle %5'ten az), regresyon analizinin doğruluğu o kadar büyüktür. P-değeri aynı zamanda hipotez testleri için önceden seçilmiş güven düzeylerine (%95) bir alternatif sunmaktadır (Baduashvili vd., 2020). **Tablo 13**'ten tüm dolgu numunelerinin P değerlerinin %5'ten çok daha küçük olduğu çıkarılabilir. Bu, güç uydurma eğrileri aracılığıyla elde edilen denklemlerin uyumunun bir göstergesidir.

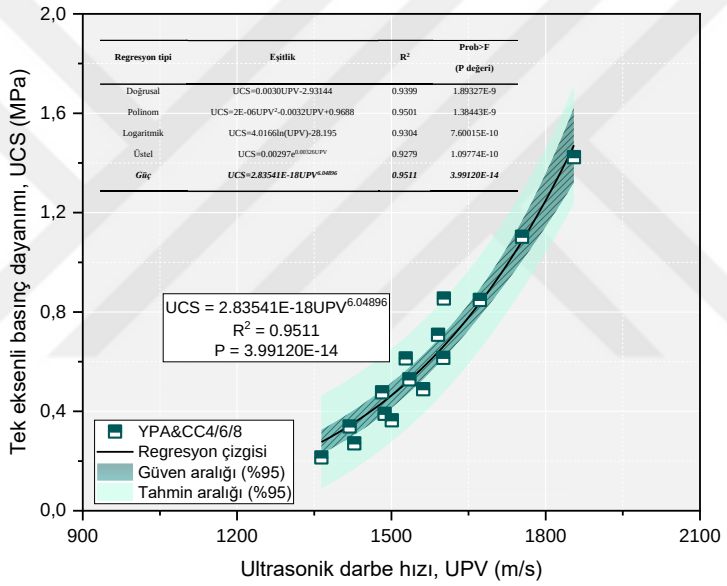
Tablo 13. Tüm ÇMD numunelerinin farklı korelasyon sonuçları

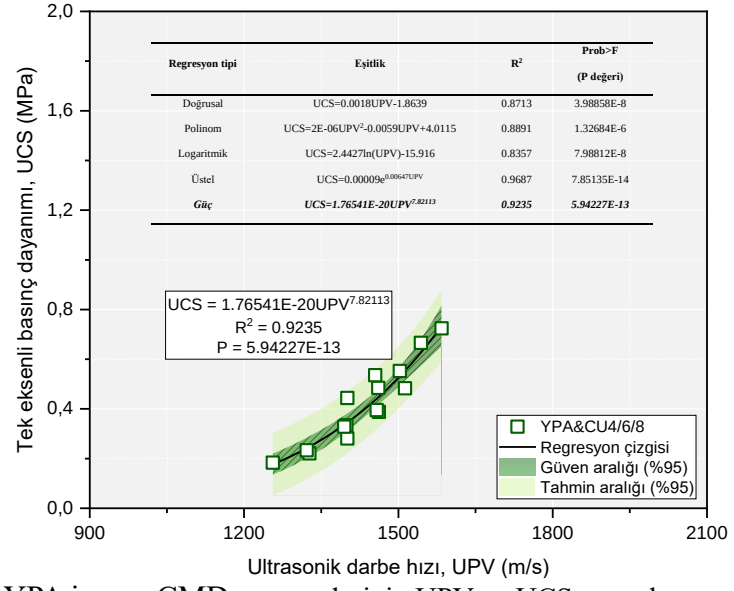
Numune ID	Regresyon tipi	Eşitlik	R^2	Prob>F (P değeri)
DPA&C4/6/8	Doğrusal	UCS=0.0022UPV-2.5168	0.8892	1.25161E-8
	Polinom	UCS=3E-06UPV^2-0.0326UPV+2.5612	0.9011	8.83963E-7
	Logaritmik	UCS=2.9891ln(UPV)-22.915	0.8902	1.99582E-7
	Üstel	UCS=0.00268e$^{0.00267UPV}$	0.9003	3.09894E-12
	Güç	***UCS=9.712230E-19UPV$^{6.00127}$***	***0.8999***	***2.42582E-13***
YPA&C4/6/8	Doğrusal	UCS=0.0028UPV-4.4581	0.9395	1.99871E-10
	Polinom	UCS=2E-08UPV^2+0.0029UPV-4.7881	0.9501	3.67844E-9
	Logaritmik	UCS=5.5776ln(UPV)-39.891	0.9454	2.12476E-9
	Üstel	UCS=0.00196e$^{0.00367UPV}$	0.8895	1.69247E-11
	Güç	***UCS=1.69711E-20UPV$^{5.93481}$***	***0.9103***	***6.45972E-13***
DPA&CC4/6/8	Doğrusal	UCS=0.0021UPV-2.6123	0.9484	4.95624E-11
	Polinom	UCS=2E-06UPV^2-0.0039UPV+1.9941	0.9785	5.93691E-12
	Logaritmik	UCS=3.0143ln(UPV)-19.422	0.9298	4.54333E-10
	Üstel	UCS=0.00299e$^{0.00345UPV}$	0.9684	6.43123E-14
	Güç	***UCS=1.71256E-17UPV$^{4.99823}$***	***0.9801***	***1.27762E-16***
YPA&CC4/6/8	Doğrusal	UCS=0.0030UPV-2.93144	0.9399	1.89327E-9
	Polinom	UCS=2E-06UPV^2-0.0032UPV+0.9688	0.9501	1.38443E-9
	Logaritmik	UCS=4.0166ln(UPV)-28.195	0.9304	7.60015E-10
	Üstel	UCS=0.00297e$^{0.00326UPV}$	0.9279	1.09774E-10
	Güç	***UCS=2.83541E-18UPV$^{6.04896}$***	***0.9511***	***3.99120E-14***
DPA&CU4/6/8	Doğrusal	UCS=0.0020UPV-2.0142	0.9088	3.95774E-9
	Polinom	UCS=4E-06UPV^2-0.0099UPV+5.8974	0.9701	7.85562E-9
	Logaritmik	UCS=2.1798ln(UPV)-16.018	0.8792	1.51235E-8
	Üstel	UCS=0.000171e$^{0.00498UPV}$	0.9673	9.012782E-15
	Güç	***UCS=1.89952E-25UPV$^{8.01335}$***	***0.9811***	***1.568833E-16***
YPA&CU4/6/8	Doğrusal	UCS=0.0018UPV-1.8639	0.8713	3.98858E-8
	Polinom	UCS=2E-06UPV^2-0.0059UPV+4.0115	0.8891	1.32684E-6
	Logaritmik	UCS=2.4427ln(UPV)-15.916	0.8357	7.98812E-8
	Üstel	UCS=0.00009e$^{0.00647UPV}$	0.9687	7.85135E-14
	Güç	***UCS=1.76541E-20UPV$^{7.82113}$***	***0.9235***	***5.94227E-13***



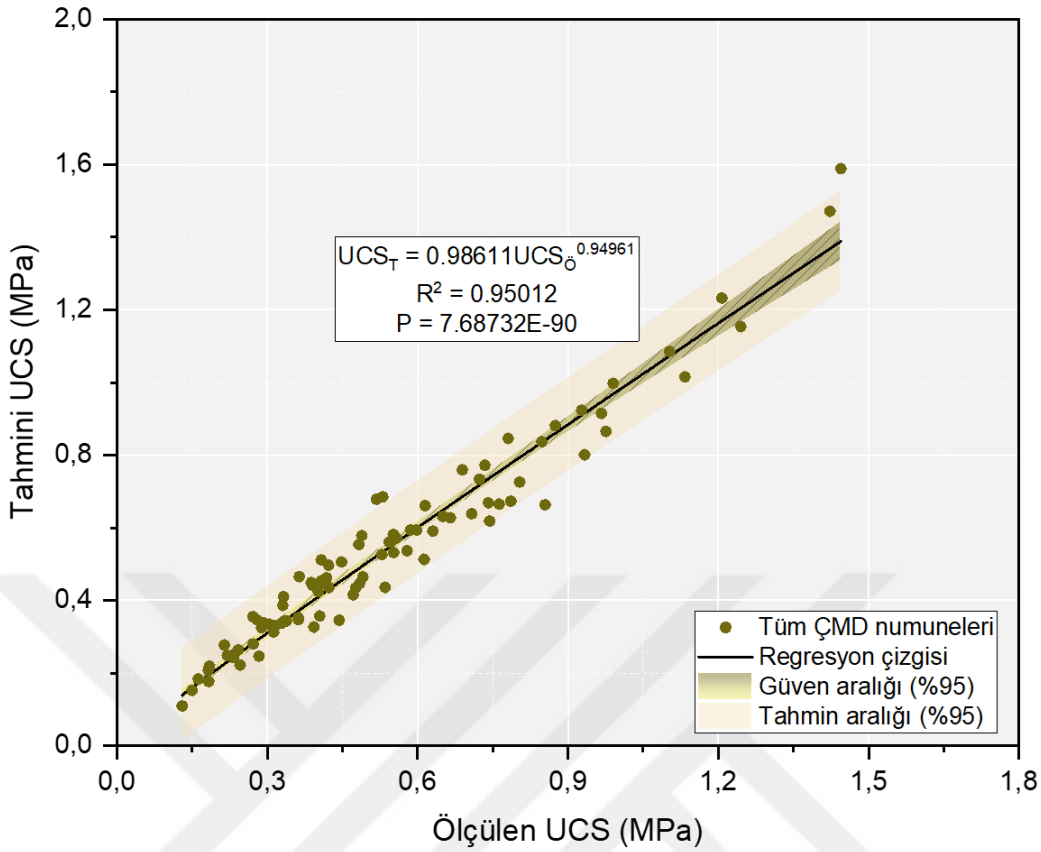
Şekil 36. DPA içeren ÇMD numunelerinin UPV ve UCS sonuçları arasındaki ilişki







Şekil 37. YPA içeren ÇMD numunelerinin UPV ve UCS sonuçları arasındaki ilişki



Şekil 38. ÇMD'lerin ölçülen ve öngörülen mukavemetleri arasındaki bağlantı

Şekil 38, farklı atık türleri ve mineral katkı maddelerine göre yapılan dolgu numunelerinin ölçülen ve beklenen mukavemetleri arasındaki bağlantıyı göstermektedir. Hem ölçülen hem de beklenen mukavemetlerin büyük ölçüde tutarlı olduğuna dikkat edin. Korelasyon katsayısı yaklaşık olarak 0.95 olmasına rağmen, çoğu veri %95 güven aralığında yer almaktadır. Ancak, P değeri oldukça düşüktür (7.68732E-90). Bu durum, güç eğrisi uydurma yönteminin UPV değerlerine sahip dolgu numunelerinin UCS sonuçlarını değerlendirmek için kolaylıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu regresyon yönteminin yardımıyla, ÇMD'lerin kalite ve performansını değerlendirmek için daha pratik bir yöntem olan tahribatsız UPV testinin güvenilirliği sağlanmaktadır.

4. SONUÇLAR

Farklı pH değerlerine (4.72 ve 10.41) sahip piritik atıklar (DPA ve YPA) ve çimento ikamesi olarak yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) kullanılarak oluşturulan ÇMD karışımlarının çeşitli özellikleri hem tahribatlı hem de tahribatsız test teknikleri ile araştırılmıştır. Dolgu numuneleri ağırlıkça %72 katı madde içeriğinde, ağırlıkça %4/6/8 çimento dozajında hazırlanmış ve daha sonra 3-90 gün arasında kürlenmiştir. Mineral katkıların (YFC ve UK) çimento ikame oranı %30 olarak seçilmiştir. ÇMD numunelerinin performansı UCS, MIP ve UPV testleri kullanılarak belirlenmiş ve aralarındaki ilişkiler ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Yapılan çeşitli çalışmalar ışığında, önde gelen sonuçlar aşağıda çıkarılmıştır:

- ✓ Asidik atık (DPA) içeren ÇMD'ler (maksimum toplam gözeneklilik %49.89), bazik atık (YPA) içeren dolgulara (maksimum toplam gözeneklilik %45.12) göre daha boşluklu/gözenekli bir yapı oluşumunu destekleyerek UCS ile UPV sonuçları üzerinde olumsuz etkilere neden olmuştur.
- ✓ Bazik atıklarla yapılan dolgu numunelerinin (UCS/UPV: 0.19-1.46 MPa/1195-2062 m/s), aynı yaş/çimento dozajında asidik atıklarla yapılanlardan (UCS/UPV: 0.12-1.19 MPa/1160-1853 m/s) daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- ✓ Yaş/çimento dozajı arttıkça, neredeyse tüm örneklerin toplam gözeneklilik/mezoporozite/eşik çapı/kritik gözenek boyutu değerleri azalırken, sadece makroporozite artmıştır.
- ✓ UPV ve UCS testleri arasındaki bağlantılar farklı denklemler kullanılarak incelenmiş ve aralarındaki ilişkiyi en iyi yansıtan denklemin güç uydurma olduğu görülmüştür. Ayrıca, ölçülen ve tahmin edilen UCS değerleri arasındaki ilişki $UCS_T = 0.98611 UCS_Ö^{0.94961}$ olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma tahribatsız (sadece UPV) ve tahribatlı (hem UCS hem de MIP) yöntemler arasında bir bağlantı olduğunu ve bu bağlantının malzemelerin boşluk yapısından, özellikle de atıkların pH'ından etkilendiğini göstermiştir. Karışımlarda kullanılan mineral katkıların farklı puzolanik özellikleri, dolgu numunelerinde farklı kısa ve uzun vadeli sonuçlara yol açmış ve UPV sonuçlarını doğrudan etkilemiştir. Piritik atıkların zararlı etkisini azaltmak ve atıkların yerine inert

katı malzemelerin kullanılmasını göz önünde bulundurarak dolgu yapılarının performansını artırmak için, bu malzemeler üzerinde ultrasonik dalgaların yayılması üzerine daha fazla araştırma yapılmaktadır.

KAYNAKÇA

Abdelkareem, M. A., Soudan, B., Mahmoud, M. S., Sayed, E. T., AlMallahi, M. N., Inayat, A., ... & Olabi, A. G. (2022). Progress of artificial neural networks applications in hydrogen production. *Chemical Engineering Research and Design*, 182, 66-86.

Agrela, F., Cabrera, M., Morales, M. M., Zamorano, M., & Alshaaer, M. (2019). Biomass fly ash and biomass bottom ash. In *New trends in eco-efficient and recycled concrete* (pp. 23-58). Woodhead Publishing.

Ahmad, J., Kontoleon, K. J., Majdi, A., Naqash, M. T., Deifalla, A. F., Ben Kahla, N., Isleem, H. F. & Qaidi, S. M. (2022). A comprehensive review on the ground granulated blast furnace slag (GGBS) in concrete production. *Sustainability, 14*(14), 8783.

Akkaya, U. G., Cinku, K., & Yilmaz, E. (2021). Characterization of strength and quality of cemented mine backfill made up of lead-zinc processing tailings. *Frontiers in Materials*, *8*, 740116.

Al Biajawi, M. I., Embong, R., Muthusamy, K., Ismail, N., & Obianyo, I. I. (2022). Recycled coal bottom ash as sustainable materials for cement replacement in cementitious Composites: A review. *Construction and Building Materials*, 338, 127624.

Al-Ghouti, M. A., Khan, M., Nasser, M. S., Al-Saad, K., & Heng, O. E. (2021). Recent advances and applications of municipal solid wastes bottom and fly ashes: Insights into sustainable management and conservation of resources. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101267.

Almasaeid, H. H., Suleiman, A., & Alawneh, R. (2022). Assessment of high-temperature damaged concrete using non-destructive tests and artificial neural network modelling. *Case Studies in Construction Materials, 16*, e01080.

Amran, M., Fediuk, R., Murali, G., Avudaiappan, S., Ozbakkaloglu, T., Vatin, N., ... & Gholampour, A. (2021). Fly ash-based eco-efficient concretes: A comprehensive review of the short-term properties. *Materials, 14*(15), 4264.

Ankur, N., & Singh, N. (2021). Performance of cement mortars and concretes containing coal bottom ash: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 149*, 111361.

Araya, N., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2020). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production, 263*, 121555.

Arent, D. J., Wise, A., & Gelman, R. (2011). The status and prospects of renewable energy for combating global warming. *Energy Economics, 33*(4), 584-593.

ASTM D4326-13, Standard Test Method for Major and Minor Elements in Coal and Coke Ash By X-Ray Fluorescence, (2013). https://www.astm.org/Standards/D4326.

ASTM-C597. Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International.

Aydin, A. (2014). Upgraded ISRM suggested method for determining sound velocity by ultrasonic pulse transmission technique. In *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014* (pp. 95-99). Cham: Springer International Publishing.

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.

Beltrán, M. G., Barbudo, A., Agrela, F., Jiménez, J. R., & de Brito, J. (2016). Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash. *Construction and Building Materials, 112*, 699-707.

Benaicha, M., Jalbaud, O., Alaoui, A. H., & Burtschell, Y. (2015). Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials, 101*, 702-709.

Bernasconi, D., Caviglia, C., Destefanis, E., Agostino, A., Boero, R., Marinoni, N., ... & Pavese, A. (2022). Influence of speciation distribution and particle size on heavy metal leaching from MSWI fly ash. *Waste Management, 138*, 318-327.

Bilir, T. (2012). Effects of non-ground slag and bottom ash as fine aggregate on concrete permeability properties. *Construction and Building Materials, 26*(1), 730-734.

Birol, B., & Saridede, M. N. (2013). The effect of reduction parameters on iron nugget production from composite pellets. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 34*(4), 195-201.

Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel, 97*, 1-23.

Blyth, M., Sakiyama, N., Hori, H., Yamamoto, H., Nakajima, H., Ud Din, S. M. F., ... & Kittridge, M. G. (2021). Revealing hidden information: High-resolution logging-while-drilling slowness measurements and imaging using advanced dual ultrasonic technology. *Petrophysics, 62*(01), 89-108.

Bogas, J. A., Gomes, M. G., & Gomes, A. (2013). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics, 53*(5), 962-972.

Briones-Hidrovo, A., Copa, J., Tarelho, L. A., Gonçalves, C., da Costa, T. P., & Dias, A. C. (2021). Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion. *Journal of Cleaner Production, 289*, 125680.

British Petroleum BP, 2022. Statistical Review of World Energy.

Bull, A. J., & Fall, M. (2020). Thermally induced changes in metalloid leachability of cemented paste backfill that contains blast furnace slag. *Minerals Engineering, 156*, 106520.

Cai, R., Luo, K., Watanabe, H., Kurose, R., & Fan, J. (2020). Recent advances in high-fidelity simulations of pulverized coal combustion. *Advanced Powder Technology, 31*(7), 3062-3079.

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., & Song, W. (2017). Effect of filling interval time on the mechanical strength and ultrasonic properties of cemented coarse tailing backfill. *International Journal of Mineral Processing, 166*, 62-68.

Cao, S., Xue, G., & Yilmaz, E. (2019). Flexural behavior of fiber reinforced cemented tailings backfill under three-point bending. *IEEE Access, 7*, 139317-139328.

Čarnogurská, M., Lázár, M., Puškár, M., Lengyelová, M., Václav, J., & Širillová, Ľ. (2015). Measurement and evaluation of properties of MSW fly ash treated by plasma. *Measurement, 62*, 155-161.

Cavusoglu, I., Yilmaz, E., & Yilmaz, A. O. (2021). Sodium silicate effect on setting properties, strength behavior and microstructure of cemented coal fly ash backfill. *Powder Technology, 384*, 17-28.

CEA, 2021. Report on fly ash generation at coal / lignite based thermal power stations and its utilization in the country for the year 2020 – 21.

Chen, Q., Zhang, Q., Fourie, A., & Xin, C. (2017). Utilization of phosphogypsum and phosphate tailings for cemented paste backfill. *Journal of environmental management, 201*, 19-27.

Chen, Z., Lu, S., Tang, M., Ding, J., Buekens, A., Yang, J., ... & Yan, J. (2019). Mechanical activation of fly ash from MSWI for utilization in cementitious materials. *Waste Management, 88*, 182-190.

Chen, X., Shi, X., Zhou, J., Du, X., Chen, Q., & Qiu, X. (2019b). Effect of overflow tailings properties on cemented paste backfill. *Journal of environmental management, 235*, 133-144.

Chen, W. H., Lin, Y. Y., Liu, H. C., & Baroutian, S. (2020). Optimization of food waste hydrothermal liquefaction by a two-step process in association with a double analysis. *Energy, 199*, 117438.

Chen, Y., Al-Neshawy, F., & Punkki, J. (2021). Investigation on the effect of entrained air on pore structure in hardened concrete using MIP. *Construction and Building Materials, 292*, 123441.

Chen, S. M., Yilmaz, E., Wang, W., & Wang, Y. M. (2022a). Curing stress effect on stability, microstructure, matric suction and electrical conductivity of cementitious tailings backfills. *Construction and Building Materials, 360*, 129601.

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, D., Zhang, Y., Xu, Y., Nie, Q., Yang, Z., Sheng, W., & Qian, G. (2022c). Municipal solid waste incineration residues recycled for typical construction materials—A review. *RSC advances, 12*(10), 6279-6291.

China NBS, 2019. *China Statistical Yearbook of 2019*. Chinese Statistical Bureau. China Statistical Press, Beijing.

Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Ocak, S., & Akyol, Y. (2018). Effect of sodium-silicate activated slag at different silicate modulus on the strength and microstructural properties of full and coarse sulphidic tailings paste backfill. *Construction and Building Materials, 185*, 555-566.

Cristelo, N., Segadães, L., Coelho, J., Chaves, B., Sousa, N. R., & de Lurdes Lopes, M. (2020). Recycling municipal solid waste incineration slag and fly ash as precursors in low-range alkaline cements. *Waste Management, 104*, 60-73.

Cruz, N. C., Silva, F. C., Tarelho, L. A., & Rodrigues, S. M. (2019). Critical review of key variables affecting potential recycling applications of ash produced at large-scale biomass combustion plants. *Resources, Conservation and Recycling, 150*, 104427.

Cui, L., & Fall, M. (2017). Modeling of pressure on retaining structures for underground fill mass. *Tunnelling and Underground Space Technology, 69*, 94-107.

Czarnecki, S., Shariq, M., Nikoo, M., & Sadowski, Ł. (2021). An intelligent model for the prediction of the compressive strength of cementitious composites with ground granulated blast furnace slag based on ultrasonic pulse velocity measurements. *Measurement, 172*, 108951.

da Costa, T. P., Quinteiro, P., Tarelho, L. A., Arroja, L., & Dias, A. C. (2020). Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration. *Waste management, 101*, 126-140.

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.

De Riese, T., Eckert, D., Hakim, L., Fendt, S., & Spliethoff, H. (2022). Modelling the capture of potassium by solid Al-Si particles at pulverised fuel conditions. *Fuel, 328*, 125321.

Dhir, R. K., De Brito, J., Lynn, C. J., & Silva, R. V. (2018). Chapter 3 – Municipal solid waste composition, incineration, processing and management of bottom ashes. Woodhead Publishing, *Sustainable Construction Materials*, 31-90.

Diquigiovanni, J., Fontana, M., & Vantini, S. (2022). Conformal prediction bands for multivariate functional data. *Journal of Multivariate Analysis, 189*, 104879.

Dolinar, U., Trtnik, G., Turk, G., & Hozjan, T. (2019). The feasibility of estimation of mechanical properties of limestone concrete after fire using nondestructive methods. *Construction and Building Materials, 228*, 116786.

Dou, X., Ren, F., Nguyen, M. Q., Ahamed, A., Yin, K., Chan, W. P., & Chang, V. W. C. (2017). Review of MSWI bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79*, 24-38.

Durinck, D., Engström, F., Arnout, S., Heulens, J., Jones, P. T., Björkman, B., Blanpain, B. & Wollants, P. (2008). Hot stage processing of metallurgical slags. *Resources, Conservation and Recycling, 52*(10), 1121-1131.

Eisentraut, A., & Brown, A. (2012). Technology roadmap: bioenergy for heat and power. *Technology Roadmaps, 2*, 1-41.

Eliche-Quesada, D., Felipe-Sesé, M. A., & Fuentes-Sánchez, M. J. (2021). Biomass bottom ash waste and by-products of the acetylene industry as raw materials for unfired bricks. *Journal of Building Engineering, 38*, 102191.

EPA, (2011). *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2010*. U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA): Washington, DC, USA.

Ercikdi, B., Yılmaz, T., & Külekci, G. (2014). Strength and ultrasonic properties of cemented paste backfill. *Ultrasonics, 54*(1), 195-204.

Esmaeili Kalalagh, A., Marandi, S. M., & Safapour, P. (2005). Technical effects of air cooled blast furnace slag on asphalt mixtures. *Journal of Transportation Research, 2*(3), 199-206.

Everett, D. H. (1972). " IUPAC Manual of Symbols and Terminology", appendix 2, Part 1, Colloid and Surface Chemistry. *Pure Appl. Chem., 31*, 578-621.

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.

Fan, C., Wang, B., Ai, H., Qi, Y., & Liu, Z. (2021). A comparative study on solidification/stabilization characteristics of coal fly ash-based geopolymer and Portland cement on heavy metals in MSWI fly ash. *Journal of Cleaner Production, 319*, 128790.

Fang, K., & Cui, L. (2022). Experimental investigation of fiber content and length on curing time-dependent mode-I fracture behavior and properties of cemented paste backfill and implication to engineering design. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 45*(11), 3302-3318.

Fang, K., & Fall, M. (2018). Effects of curing temperature on shear behaviour of cemented paste backfill-rock interface. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 112*, 184-192.

Fang, K., Ren, L., & Jiang, H. (2021). Development of Mode I and Mode II fracture toughness of cemented paste backfill: Experimental results of the effect of mix proportion, temperature and chemistry of the pore water. *Engineering Fracture Mechanics, 258*, 108096.

Fořt, J., Šál, J., Ševčík, R., Doleželová, M., Keppert, M., Jerman, M., ... & Černý, R. (2021). Biomass fly ash as an alternative to coal fly ash in blended cements: Functional aspects. *Construction and Building Materials, 271*, 121544.

Franus, W., Wiatros-Motyka, M. M., & Wdowin, M. (2015). Coal fly ash as a resource for rare earth elements. *Environmental Science and Pollution Research, 22*, 9464-9474.

Fusade, L., & Viles, H. A. (2019). A comparison of standard and realistic curing conditions of natural hydraulic lime repointing mortar for damp masonry: Impact on laboratory evaluation. *Journal of Cultural Heritage, 37*, 82-93.

Gan, L., Zhang, C., Shangguan, F., & Li, X. (2012). A differential scanning calorimetry method for construction of continuous cooling transformation diagram of blast furnace slag. *Metallurgical and materials transactions B, 43*, 460-467.

Gao, X., Yuan, B., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2017). Characterization and application of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash and waste granite powder in alkali activated slag. *Journal of Cleaner Production, 164*, 410-419.

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.

Gencel, O., Karadag, O., Oren, O. H., & Bilir, T. (2021). Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. *Construction and Building Materials, 283*, 122783.

Ghirian, A., & Fall, M. (2015). Coupled behavior of cemented paste backfill at early ages. *Geotechnical and geological engineering, 33*, 1141-1166.

Gollakota, A. R., Volli, V., & Shu, C. M. (2019). Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of the Total Environment, 672*, 951-989.

Grabias-Blicharz, E., & Franus, W. (2023). A critical review on mechanochemical processing of fly ash and fly ash-derived materials. *Science of the Total Environment, 860*, 160529.

Guo, J., Bao, Y., & Wang, M. (2018). Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste management, 78*, 318-330.

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.

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.

Hannachi, S., & Guetteche, M. N. (2014, August). Review of the ultrasonic pulse velocity evaluating concrete compressive strength on site. In *Proceedings of Scientific Cooperation International Workshops on Engineering Branches*, Istanbul, Turkey (pp. 8-9).

Haywood, L. K., De Wet, B., de Lange, W., & Oelofse, S. (2019). Legislative challenges hindering mine waste being reused and repurposed in South Africa. *The Extractive Industries and Society, 6*(4), 1079-1085.

He, Y., Zhang, Q., Chen, Q., Bian, J., Qi, C., Kang, Q., & Feng, Y. (2021). Mechanical and environmental characteristics of cemented paste backfill containing lithium slag-blended binder. *Construction and Building Materials, 271*, 121567.

Hu, J., Zhao, F., Kuang, Y., Yang, D., Zheng, M., & Zhao, L. (2020). Microscopic characteristics of the action of an air entraining agent on cemented paste backfill pores. *Alexandria Engineering Journal, 59*(3), 1583-1593.

Huang, B., Gan, M., Ji, Z., Fan, X., Zhang, D., Chen, X., Sun, Z., Huang, X., & Fan, Y. (2022). Recent progress on the thermal treatment and resource utilization technologies of municipal waste incineration fly ash: A review. *Process Safety and Environmental Protection, 159*, 547-565.

Huang, Z., Cao, S., & Yilmaz, E. (2021). Investigation on the flexural strength, failure pattern and microstructural characteristics of combined fibers reinforced cemented tailings backfill. *Construction and Building Materials, 300*, 124005.

Hustrulid, W. A., & Bullock, R. L. (Eds.). (2001). *Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies*. SME.

International Energy Agency (IEA), 2020. Analysis and forecast to 2025.

International Energy Agency (IEA), 2018. Bioenergy. Options for increased use of ash from biomass combustion and cofiring.

IRENA (International Renewable Energy Agency), 2012. Renewable energy technologies: cost analysis series. Wind power. Volume 1: Power sector Issue 5/5. Biomass for power generation.

IRENA, W. 2013. Statistical issues: bioenergy and distributed renewable energy. New York, USA.

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.

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.

Jiang, H., Yi, H., Yilmaz, E., Liu, S., & Qiu, J. (2020a). Ultrasonic evaluation of strength properties of cemented paste backfill: Effects of mineral admixture and curing temperature. *Ultrasonics, 100*, 105983.

Jiang, H., Fall, M., Yilmaz, E., Li, Y., & Yang, L. (2020b). Effect of mineral admixtures on flow properties of fresh cemented paste backfill: Assessment of time dependency and thixotropy. *Powder technology, 372*, 258-266.

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.

Jin, J., Zhang, G., Qin, Z., Liu, T., Shi, J., & Zuo, S. (2022). Viscosity enhancement of self-consolidating cement-tailings grout by biomass fly ash vs. chemical admixtures. *Construction and Building Materials, 340*, 127802.

Ju, T., Meng, Y., Han, S., Lin, L., & Jiang, J. (2021). On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: a focus on zeolites. *Chemosphere, 283*, 131010.

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., & 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., 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.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.

Keskin, T., Yilmaz, E., Sari, M., Kasap, T., & Guner, U.G. (2024a). A review on reusability, recyclability and circular practices of metallic mine tailings. *Minerals.*

Keskin, T., Yilmaz, E., Kasap, T., Sari, M., & Cao, S. (2024b). Toward sustainable industrial waste recycling: A mini-review of its innovative applications and future perspectives. *Minerals*.

Kim, H. K. (2015). Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength mortar to improve workability. *Construction and Building Materials, 91*, 57-64.

Kinnunen, P. H. M., & Kaksonen, A. H. (2019). Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of Cleaner Production, 228*, 153-160.

Kirkelund, G. M., Skevi, L., & Ottosen, L. M. (2020). Electrodialytically treated MSWI fly ash use in clay bricks. *Construction and Building Materials, 254*, 119286.

Kitamura, S. Y., Miyamoto, K. I., Shibata, H., Maruoka, N., & Matsuo, M. (2009). Analysis of dephosphorization reaction using a simulation model of hot metal dephosphorization by multiphase slag. *ISIJ international, 49*(9), 1333-1339.

Kiventerä, J., Lancellotti, I., Catauro, M., Dal Poggetto, F., Leonelli, C., & Illikainen, M. (2018). Alkali activation as new option for gold mine tailings inertization. *Journal of cleaner production, 187*, 76-84.

Kolala, C., Polyakov, M., & Fogarty, J. (2020). Impacts of mining on property values in Kalgoorlie-Boulder, Western Australia. *Resources policy, 68*, 101777.

Koohestani, B., Darban, A. K., Mokhtari, P., Darezereshki, E., Yilmaz, E., & Yilmaz, E. (2020). Influence of hydrofluoric acid leaching and roasting on mineralogical phase transformation of pyrite in sulfidic mine tailings. *Minerals, 10*(6), 513.

Koppejan, J. and Van Loo, S. (2012) *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.

Kumar, P., & Singh, N. (2020). Influence of recycled concrete aggregates and Coal Bottom Ash on various properties of high volume fly ash-self compacting concrete. *Journal of Building Engineering, 32*, 101491.

Kuo, W. T., & Gao, Z. C. (2018). Engineering properties of controlled low-strength materials containing bottom ash of municipal solid waste incinerator and water filter silt. *Applied Sciences, 8*(8), 1377.

Lawson, I., Danso, K. A., Odoi, H. C., Adjei, C. A., Quashie, F. K., Mumuni, I. I., & Ibrahim, I. S. (2011). Non-destructive evaluation of concrete using ultrasonic pulse velocity. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 3*(6), 499-504.

Lee, T., & Lee, J. (2020). Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age. *Construction and Building Materials, 252*, 119027.

Li, Y., Hao, L., & Chen, X. (2016). Analysis of MSWI bottom ash reused as alternative material for cement production. *Procedia Environmental Sciences, 31*, 549-553.

Li, J., Yilmaz, E., & Cao, S. (2020). Influence of solid content, cement/tailings ratio, and curing time on rheology and strength of cemented tailings backfill. *Minerals, 10*(10), 922.

Li, J., Cao, S., & Yilmaz, E. (2021). Characterization of macro mechanical properties and microstructures of cement-based composites prepared from fly ash, gypsum and steel slag. *Minerals, 12*(1), 6.

Li, X., Bai, C., Qiao, Y., Wang, X., Yang, K., & Colombo, P. (2022a). Preparation, properties and applications of fly ash-based porous geopolymers: A review. *Journal of cleaner production, 359*, 132043.

Li, K., Li, X., Du, C., Xue, H., Sun, Q., & Liu, L. (2022b). Experimental study on microstructure and erosion mechanisms of solid waste cemented paste backfill under the combined action of dry–wet cycles and sulphate erosion. *Materials, 15*(4), 1484.

Li, B., Zhang, J., Yan, H., Zhou, N., & Li, M. (2022c). Experimental investigation into the thermal conductivity of gangue-cemented paste backfill in mine application. *Journal of Materials Research and Technology, 16*, 1792-1802.

Libos, I. L. S., 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.

Lim, J. S., Cheah, C. B., & Ramli, M. B. (2019). The setting behavior, mechanical properties and drying shrinkage of ternary blended concrete containing granite quarry dust and processed steel slag aggregate. *Construction and Building Materials, 215*, 447-461.

Liu, L., Xin, J., Huan, C., Qi, C., Zhou, W., & Song, K. I. (2020a). Pore and strength characteristics of cemented paste backfill using sulphide tailings: Effect of sulphur content. *Construction and Building Materials, 237*, 117452.

Liu, Y., Li, H., Wang, K., Wu, H., & Cui, B. (2020b). Effects of accelerator–water reducer admixture on performance of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials, 242*, 118187.

Liu, X., Sun, D., Liao, J., Shao, Z., Shi, Y., Zhang, S., ... & Hong, B. (2022). Quality evaluation of lightweight cellular concrete by an ultrasound-based method. *Frontiers of Structural and Civil Engineering, 16*(9), 1170-1182.

Liu, Z., Li, J., Hu, L., Zhang, X., Ding, S., & Li, H. (2022). Strength and Environmental Behaviours of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash for Cement-Stabilised Soil. *Sustainability, 15*(1), 364.

Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and concrete research, 41*(12), 1244-1256.

Lu, H., Qi, C., Li, C., Gan, D., Du, Y., & Li, S. (2020). A light barricade for tailings recycling as cemented paste backfill. *Journal of cleaner production, 247*, 119388.

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.

Lynn, C. J., Ghataora, G. S., & Obe, R. K. D. (2017). Municipal incinerated bottom ash (MIBA) characteristics and potential for use in road pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology, 10*(2), 185-201.

Manca, P. P., Massacci, G., Pintus, D., & Sogos, G. (2021). The flotation of sphalerite mine tailings as a remediation method. *Minerals Engineering, 165*, 106862.

Mangi, S. A., Ibrahim, M. H. W., Jamaluddin, N., Arshad, M. F., & Jaya, R. P. (2019). Short-term effects of sulphate and chloride on the concrete containing coal bottom ash as supplementary cementitious material. *Engineering Science and Technology, an International Journal, 22*(2), 515-522.

Manjarrez, L., & Zhang, L. (2018). Utilization of copper mine tailings as road base construction material through geopolymerization. *Journal of Materials in Civil Engineering, 30*(9), 04018201.

Maschio, S., Tonello, G., Piani, L., & Furlani, E. (2011). Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production:

Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength. *Chemosphere, 85*(4), 666-671.

Mihaljević, M., Markučič, D., Runje, B., & Keran, Z. (2019). Measurement uncertainty evaluation of ultrasonic wall thickness measurement. *Measurement, 137*, 179-188.

Miyamoto, T., Torii, K., Akahane, K., & Hayashiguchi, S. (2015). Production and use of blast furnace slag aggregate for concrete. *Nippon steel & sumitomo metal technical report, 109*, 102-108.

Modolo, R. C. E., Ferreira, V. M., Tarelho, L. A., Labrincha, J. A., Senff, L., & Silva, L. (2013). Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. *Construction and Building Materials, 45*, 275-281.

Mostafa, N. Y., El-Hemaly, S. A. S., Al-Wakeel, E. I., El-Korashy, S. A., & Brown, P. W. (2001). Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag. *Cement and concrete research, 31*(6), 899-904.

Motz, H., & Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste management, 21*(3), 285-293.

Munawar, M. A., Khoja, A. H., Naqvi, S. R., Mehran, M. T., Hassan, M., Liaquat, R., & Dawood, U. F. (2021). Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150*, 111451.

Muthusamy, K., Rasid, M. H., Jokhio, G. A., Budiea, A. M. A., Hussin, M. W., & Mirza, J. (2020). Coal bottom ash as sand replacement in concrete: A review. *Construction and Building Materials, 236*, 117507.

Müllauer, W., Beddoe, R. E., & Heinz, D. (2013). Sulfate attack expansion mechanisms. *Cement and concrete research, 52*, 208-215.

Nath, S. K., Randhawa, N. S., & Kumar, S. (2022). A review on characteristics of silico-manganese slag and its utilization into construction materials. *Resources, Conservation and Recycling, 176*, 105946.

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.

Nieva, N. E., Borgnino, L., & García, M. G. (2018). Long term metal release and acid generation in abandoned mine wastes containing metal-sulphides. *Environmental pollution, 242*, 264-276.

Nikravan, M., Ramezanianpour, A. A., & Maknoon, R. (2020). Study on physiochemical properties and leaching behavior of residual ash fractions from a municipal solid waste incinerator (MSWI) plant. *Journal of environmental management, 260*, 110042.

Nithiya, A., Saffarzadeh, A., & Shimaoka, T. (2018). Hydrogen gas generation from metal aluminum-water interaction in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash. *Waste Management, 73*, 342-350.

Obe, R. K. D., De Brito, J., Lynn, C. J., & Silva, R. V. (2017). *Sustainable construction materials: municipal incinerated bottom ash*. Woodhead Publishing.

Odzijewicz, J. I., Wołejko, E., Wydro, U., Wasil, M., & Jabłońska-Trypuć, A. (2022). Utilization of ashes from biomass combustion. *Energies, 15*(24), 9653.

OECD *Annual Report, 2007*. The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France.

Olympus, 2024. Ultrasonic Couplants. Retrieved 20/04/ 2024.

Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties–A review. *Construction and Building Materials, 105*, 423-434.

Pal, S. C., Mukherjee, A., & Pathak, S. R. (2003). Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and concrete research, 33*(9), 1481-1486.

Pang, B., Zhou, Z., & Xu, H. (2015). Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete. *Construction and building materials, 84*, 454-467.

Patil, C., Manjunath, M., Hosamane, S., Bandekar, S., & Athani, R. (2021). Pozzolonic activity and strength activity index of bagasse ash and fly ash blended cement mortar. *Materials Today: Proceedings, 42*, 1456-1461.

Qi, C., Fourie, A., Chen, Q., & Zhang, Q. (2018). A strength prediction model using artificial intelligence for recycling waste tailings as cemented paste backfill. *Journal of Cleaner Production, 183*, 566-578.

Qi, C., Chen, Q., Fourie, A., Tang, X., Zhang, Q., Dong, X., & Feng, Y. (2019a). Constitutive modelling of cemented paste backfill: A data-mining approach. *Construction and Building Materials, 197*, 262-270.

Qi, C., & Fourie, A. (2019b). Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Minerals Engineering, 144*, 106025.

Qin, S., Cao, S., & Yilmaz, E. (2022). Employing U-shaped 3D printed polymer to improve flexural properties of cementitious tailings backfills. *Construction and Building Materials, 320*, 126296.

Qin, S., Cao, S., Yilmaz, E., & Li, J. (2021). Influence of types and shapes of 3D printed polymeric lattice on ductility performance of cementitious backfill composites. *Construction and Building Materials, 307*, 124973.

Qiu, J., Guo, Z., Yang, L., Jiang, H., & Zhao, Y. (2020). Effect of tailings fineness on flow, strength, ultrasonic and microstructure characteristics of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials, 263*, 120645.

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.

Rafieizonooz, M., Khankhaje, E., & Rezania, S. (2022). Assessment of environmental and chemical properties of coal ashes including fly ash and bottom ash, and coal ash concrete. *Journal of Building Engineering, 49*, 104040.

Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M. R., Hussin, M. W., & Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Construction and Building Materials, 116*, 15-24.

Rai, A., Prabakar, J., Raju, C. B., & Morchalle, R. K. (2002). Metallurgical slag as a component in blended cement. *Construction and Building Materials, 16*(8), 489-494.

Rajamma, R., Senff, L., Ribeiro, M. J., Labrincha, J. A., Ball, R. J., Allen, G. C., & Ferreira, V. M. (2015). Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement based materials. *Composites Part B: Engineering, 77*, 1-9.

Ravindiran, G., Saravanan, P., Jeyaraju, R. M., & Josephraj, J. (2022). Water—Conventional and novel treatment methods. In *Solar-Driven Water Treatment* (pp. 37-66). Academic Press.

Rémond, S., Pimienta, P., & Bentz, D. P. (2002). Effects of the incorporation of Municipal Solid Waste Incineration fly ash in cement pastes and mortars: I. Experimental study. *Cement and Concrete Research, 32*(2), 303-311.

Sadek, D. M. (2014). Effect of cooling technique of blast furnace slag on the thermal behavior of solid cement bricks. *Journal of cleaner production, 79*, 134-141.

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.

Saxena, S., & Tembhurkar, A. R. (2018). Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials, 165*, 126-137.

Sepehrinezhad, A., & Toufigh, V. (2018). The evaluation of distributed damage in concrete based on sinusoidal modeling of the ultrasonic response. *Ultrasonics, 89*, 195-205.

Sezer, G. İ., & Gülderen, M. (2015). Usage of steel slag in concrete as fine and/or coarse aggregate.

Shen, H., & Forssberg, E. (2003). An overview of recovery of metals from slags. *Waste management, 23*(10), 933-949.

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.

Singh, N., & Bhardwaj, A. (2020). Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement. *Construction and Building Materials, 233*, 117276.

Singh, R. P., Tyagi, V. V., Allen, T., Ibrahim, M. H., & Kothari, R. (2011). An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW) in Indian scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(9), 4797-4808.

Song, X., Hao, Y., Wang, S., Zhang, L., Liu, W., & Li, J. (2022a). Mechanical properties, crack evolution and damage characteristics of prefabricated fractured cemented paste backfill under uniaxial compression. *Construction and Building Materials, 330*, 127251.

Song, X., Hao, Y., Wang, S., Zhang, L., Liu, H., Yong, F., ... & Yuan, Q. (2022b). 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, H., & Zhu, J. (2020a). Nondestructive evaluation of steel-concrete composite structure using high-frequency ultrasonic guided wave. *Ultrasonics, 103*, 106096.

Sun, Q., Wei, X., Li, T., & Zhang, L. (2020b). Strengthening behavior of cemented paste backfill using alkali-activated slag binders and bottom ash based on the response surface method. Materials, 13(4), 855.

Sun, W., Wu, D., Liu, H., & Qu, C. (2021). Thermal, mechanical and ultrasonic properties of cemented tailings backfill subjected to microwave radiation. Construction and Building Materials, 313, 125535.

Sun, X., Liu, J., Qiu, J., Wu, P., & Zhao, Y. (2022). Alkali activation of blast furnace slag using a carbonate-calcium carbide residue alkaline mixture to prepare cemented paste backfill. *Construction and Building Materials, 320*, 126234.

Tang, P., Florea, M. V. A., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2016). Application of thermally activated municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash fines as binder substitute. *Cement and Concrete Composites, 70*, 194-205.

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.

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.

Tian, X., & Xu, W. (2022). Prediction of the mechanical performance of cemented tailings backfill using ultrasonic pulse velocity measurement. *Minerals, 12*(8), 986.

Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, N., Larsson, M. L., & Bjorkman, B. (2007). Characteristics of steel slag under different cooling conditions. *Waste management, 27*(10), 1335-1344.

Tripathy, S. K., Dasu, J., Murthy, Y. R., Kapure, G., Pal, A. R., & Filippov, L. O. (2020). Utilisation perspective on water quenched and air-cooled blast furnace slags. *Journal of cleaner production, 262*, 121354.

USEIA, 2014. Statistics on global coal production, consumption [WWW Document]. 2014. URL https://www.eia.gov/coal/data.php#production

Václavík, V., Dirner, V., Dvorský, T., & Daxner, J. (2012). The use of blast furnace slag. *Metalurgija, 51*(4), 461-464.

Vasanelli, E., Colangiuli, D., Calia, A., & Luprano, V. A. (2017). Estimating in situ concrete strength combining direct and indirect measures via cross validation procedure. *Construction and Building Materials, 151*, 916-924.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel, 105*, 40-76.

Wang, A., Cao, S., & Yilmaz, E. (2022a). Effect of height to diameter ratio on dynamic characteristics of cemented tailings backfills with fiber reinforcement through impact loading. *Construction and Building Materials, 322*, 126448.

Wang, A., Cao, S., & Yilmaz, E. (2022b). Influence of types and contents of nano cellulose materials as reinforcement on stability performance of cementitious tailings backfill. *Construction and Building Materials, 344*, 128179.

Wang, G., Wang, Y., & Gao, Z. (2010a). Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. *Journal of Hazardous Materials, 184*(1-3), 555-560.

Wang, J., Fu, J., Song, W., & Zhang, Y. (2022c). Effect of rice husk ash (RHA) dosage on pore structural and mechanical properties of cemented paste backfill. *Journal of Materials Research and Technology, 17*, 840-851.

Wang, K., & Tester, J. W. (2023). Sustainable management of unavoidable biomass wastes. *Green Energy and Resources, 1*(1), 100005.

Wang, L., Hustad, J. E., Skreiberg, Ø., Skjevrak, G., & Grønli, M. (2012). A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications. *Energy Procedia, 20*, 20-29.

Wang, L., Jin, Y., & Nie, Y. (2010). Investigation of accelerated and natural carbonation of MSWI fly ash with a high content of Ca. *Journal of hazardous materials, 174*(1-3), 334-343.

Wang, M., & Wan, W. (2019). A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 123*, 104094.

Wang, Y., Cao, Y., Cui, L., Si, Z., & Wang, H. (2020). Effect of external sulfate attack on the mechanical behavior of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials, 263*, 120968.

Wang, Z., Wang, Y., Cui, L., Bi, C., & Wu, A. (2022d). Insight into the isothermal multiphysics processes in cemented paste backfill: Effect of curing time and cement-to-tailings ratio. *Construction and Building Materials, 325*, 126739.

Watanabe, J., & Yamamoto, K. (2015). Flamelet model for pulverized coal combustion. *Proceedings of the Combustion Institute, 35*(2), 2315-2322.

Wei, Y., Guo, W., Wu, Z., & Gao, X. (2020). Computed permeability for cement paste subject to freeze-thaw cycles at early ages. *Construction and Building Materials, 244*, 118298.

Wiciak, P., Cascante, G., & Polak, M. A. (2017). Sensor and dimensions effects in ultrasonic pulse velocity measurements in mortar specimens. *Procedia engineering, 193*, 409-416.

World Bank, 2019. *Solid Waste Management*. The World Bank Group.

Wu, D., Zhang, Y., & Liu, Y. (2016a). Mechanical performance and ultrasonic properties of cemented gangue backfill with admixture of fly ash. *Ultrasonics, 64*, 89-96.

Wu, J., Jing, H., Yin, Q., Meng, B., & Han, G. (2020). Strength and ultrasonic properties of cemented waste rock backfill considering confining pressure, dosage and particle size effects. *Construction and Building Materials, 242*, 118132.

Wu, M. H., Lin, C. L., Huang, W. C., & Chen, J. W. (2016b). Characteristics of pervious concrete using incineration bottom ash in place of sandstone graded material. *Construction and Building Materials, 111*, 618-624.

Xinghua, H., Shujing, Z., & Hwang, J. Y. (2016). Physical and chemical properties of MSWI fly ash. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2016*, 451-459.

Xu, G., & Shi, X. (2018). Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review. *Resources, conservation and recycling, 136*, 95-109.

Xu, W., Li, Q., & Liu, B. (2020a). 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. (2020b). Influence of silica fume and low curing temperature on mechanical property of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials, 254*, 119305.

Xue, G., & Yilmaz, E. (2022). Strength, acoustic, and fractal behavior of fiber reinforced cemented tailings backfill subjected to triaxial compression loads. *Construction and Building Materials, 338*, 127667.

Xue, G., Yilmaz, E., Feng, G., Cao, S., & Sun, L. (2021). Reinforcement effect of polypropylene fiber on dynamic properties of cemented tailings backfill under SHPB impact loading. *Construction and Building Materials, 279*, 122417.

Yaman, I. O., Inci, G., Yesiller, N., & Aktan, H. M. (2001). Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission. *ACI Materials Journal, 98*(6), 450.

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. (2022). Rheological properties and wall-slip behavior of cemented tailing-waste rock backfill (CTWB) paste. *Construction and Building Materials, 324*, 126723.

Yang, L., Hou, C., Zhu, W., Liu, X., Yan, B., & Li, L. (2022). Monitoring the failure process of cemented paste backfill at different curing times by using a digital image correlation technique. *Construction and Building Materials, 346*, 128487.

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.

Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-science reviews 141*, 105-121.

Ye, G., Lura, P., Van Breugel, K., & Fraaij, A. L. A. (2004). Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement. *Cement and Concrete Composites, 26*(5), 491-497.

Yilmaz, E. (2018). Stope depth effect on field behaviour and performance of cemented paste backfills. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 32*(4), 273-296.

Yu, J., Qiao, Y., Jin, L., Ma, C., Paterson, N., & Sun, L. (2015). Removal of toxic and alkali/alkaline earth metals during co-thermal treatment of two types of MSWI fly ashes in China. *Waste Management, 46*, 287-297.

Yu, X., Song, W., Tan, Y., Kemeny, J., & Wang, J. (2022). Energy dissipation and 3d fracturing of Backfill-encased-rock under triaxial compression. *Construction and Building Materials, 341*, 127877.

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. (2022a). Pore structure, mechanical behavior and damage evolution of cemented paste backfill. *Journal of Materials Research and Technology, 17*, 2864-2874.

Zhang, F., Li, Y., Zhang, J., Gui, X., Zhu, X., & Zhao, C. (2022d). Effects of slag-based cementitious material on the mechanical behavior and heavy metal immobilization of mine tailings based cemented paste backfill. *Heliyon, 8*(9).

Zhang, H., Cao, S., & Yilmaz, E. (2022c). Influence of 3D-printed polymer structures on dynamic splitting and crack propagation behavior of cementitious tailings backfill. *Construction and Building Materials, 343*, 128137.

Zhang, H., Cao, S., & Yilmaz, E. (2023). Carbon nanotube reinforced cementitious tailings composites: Links to mechanical and microstructural characteristics. *Construction and Building Materials, 365*, 130123.

Zhang, J., Zhao, X., Yang, B., Li, J., Liu, Y., Ma, G., ... & Wu, J. (2022b). Nondestructive evaluation of porosity in additive manufacturing by laser ultrasonic surface wave. *Measurement, 193*, 110944.

Zhang, S., Ren, F., Guo, Z., Qiu, J., & Ding, H. (2020). Strength and deformation behavior of cemented foam backfill in sub-zero environment. *Journal of Materials Research and Technology, 9*(4), 9219-9231.

Zhang, Y., Aslani, F., & Lehane, B. (2021a). Compressive strength of rubberized concrete: Regression and GA-BPNN approaches using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials, 307*, 124951.

Zhang, Y., Wang, L., Chen, L., Ma, B., Zhang, Y., Ni, W., & Tsang, D. C. (2021b). Treatment of municipal solid waste incineration fly ash: State-of-the-art technologies and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials, 411*, 125132.

Zhao, Y., Guo, Y., Feng, G., Li, C., Xie, W., & Zhang, C. (2022a). Study on strength and deformation characteristics of cemented gangue backfill body under the coupling action of load and salt erosion. *Construction and Building Materials, 342*, 128003.

Zhao, Y., Qiu, J., Wu, P., Guo, Z., Zhang, S., & Sun, X. (2022b). Preparing a binder for cemented paste backfill using low-aluminum slag and hazardous oil shale residue and the heavy metals immobilization effects. *Powder Technology, 399*, 117167.

Zhao, Z., Cao, S., & Yilmaz, E. (2023). Effect of layer thickness on the flexural property and microstructure of 3D-printed rhomboid polymer-reinforced cemented tailing composites. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 30*(2), 236-249.

Zhen, G., Lu, X., Zhao, Y., Niu, J., Chai, X., Su, L., ... & Hu, Y. (2013). Characterization of controlled low-strength material obtained from dewatered sludge and refuse incineration bottom ash: Mechanical and microstructural perspectives. *Journal of environmental management, 129*, 183-189.

Zheng, J., Sun, X., Guo, L., Zhang, S., & Chen, J. (2019). Strength and hydration products of cemented paste backfill from sulphide-rich tailings using reactive MgO-activated slag as a binder. *Construction and Building Materials, 203*, 111-119.

Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Si, B., Dong, X., Wang, T., & Yao, Z. (2022). Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. *Science of the Total Environment, 804*, 149985.

Zhou, N., Zhang, J., Ouyang, S., Deng, X., Dong, C., & Du, E. (2020). Feasibility study and performance optimization of sand-based cemented paste backfill materials. *Journal of Cleaner Production, 259*, 120798.

Zhou, Y., Fall, M., & Haruna, S. (2022a). Flow ability of cemented paste backfill with chloride-free antifreeze additives in sub-zero environments. *Cement and Concrete Composites, 126*, 104359.

Żukowski, W., Jankowski, D., Wrona, J., & Berkowicz-Płatek, G. (2023). Combustion behavior and pollutant emission characteristics of polymers and biomass in a bubbling fluidized bed reactor. *Energy, 263*, 125953.

EKLER

MAKALELERİN LİSTESİ

Hakemli dergi makaleleri:

1. **Keskin, T.**, Yilmaz, E., Sari, M., Kasap, T., Guner, U.G., "A review on reusability, recyclability and circular practices of metallic mine tailings," Minerals, submitted, 2024. SCIE Journal Impact Factor: 2.2, Category Quartile: Q2.
2. **Keskin, T.**, Yilmaz, E., Kasap, T., Sari, M., Cao, S., "Toward sustainable industrial waste recycling: A mini-review of its innovative applications and future perspectives," Minerals, submitted, 2024. SCIE Journal Impact Factor: 2.2, Category Quartile: Q2.

Yazarın yukarıdaki makalelere katkısı:

1. Kavramsallaştırma, inceleme, yaklaşım, yazma-özgün taslak hazırlama.
2. İnceleme, deneysel teknikler, doğrulama, birlikte yazma-orijinal taslak.