



ÇİMENTOLU MACUN DOLGUDA C SINIFI UÇUCU KÜLÜN ÇİMENTO YERİNE İKAMESİNİN DAYANIMA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Serkan TÜYLÜ*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Pb-Zn Atıkları,
Çimentolu Macun Dolgu
(ÇMD),
Uçucu Kül,
Dayanım.*

Öz

Çimentolu macun dolgu (ÇMD) yöntemi, öncelikle yüksek miktarda proses atıklarının yeraltında depolanabilmesine imkan vermesinin yanında tavan yüklerine bağlı göçüklere karşı da destek sağlayan önemli bir atık yönetimi sistemidir. Dolayısıyla bu sistem içerisinde oluşturulan macun malzemenin zamana bağlı olarak alacağı maksimum dayanım değeri önem kazanmaktadır. İstenilen dayanımın sağlanabilmesi için, macun malzemenin optimum karışım oranlarının en az maliyetle belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, macun dolgudaki yüksek maliyetlerden birini oluşturan çimento miktarını düşürmek için Tufanbeyli uçucu külünün çimento yerine ikame edilebileceği yaklaşık katkı oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle çökme deneylerine göre macun malzemedeki katı içeriği %80 olarak belirlenmiş ve buna göre ÇMD referans numuneleri hazırlanmıştır. %80 katı içeriği sabit tutularak %3-11 arası çimento kullanımı gerçekleştirilmiş, bunlardan %9 ve %11 çimento içerikli numunelerin dayanımlarının yeterli dayanım değerleri verdiği tespit edilmiştir. Daha sonra bu çimento oranlarının da %20-30-40 ve 50'si oranında çimento yerine uçucu kül ikameli numuneler hazırlanmış ve 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre de macun dolgu malzemesinin dayanımına etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, referans numunelere göre %9 çimentonun %30'una kadar uçucu kül ikamesinin özellikle 56 ve 90 günlük kür sürelerinde ve %11 çimentonun %50'sine kadar uçucu kül ikameli karışımların ÇMD karışımında kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CLASS C FLY ASH CEMENT SUBSTITUTION ON STRENGTH IN CEMENTED PASTE BACKFILL

Keywords

*Pb-Zn Tailings,
Cemented Paste Backfill
(CPB),
Fly Ash,
Strength.*

Abstract

Cemented Paste Backfill (CPB) Method is an important tailings management system that can provide support against collapses due to the roof loads, as well as enabling storage possibilities of high amount of process tailings at the underground. Therefore, it gains important that the paste material created in this system gets the maximum strength value depending on the time. For this purpose, the optimum mixing ratios of the paste material should be determined with minimum costs. The main purpose of this study is to determine the additive rate that it can substitute for cement in order to reduce the amount of cement, which constitutes one of the high costs of paste backfill. Firstly, the solid content of the paste material was determined as 80% according to the slump tests, and then CPB reference samples were prepared. By taking the solid content of 80% fixed, 3-11% cement was used, it was determined that the strength of the samples containing 9% and 11% cement gave sufficient strength values. Subsequently, 20-30-40 and 50% of these cement ratios were substituted with fly ash samples and their effects on the strength of CPB were examined over the curing times of 28, 56 and 90 days. As a result, it put forth that, according to reference samples, fly ash substitution of up to 30% can use in the paste mixtures with 9% cement ratio, especially in curing periods of 56 and 90 days. In addition, up to 50% fly ash substitution can use instead of cement in 11% cement.

Alıntı / Cite

Tüylü, S., (2020). Çimentolu Macun Dolguda C Sınıfı Uçucu Külün Çimento Yerine İkamesinin Dayanım Olan Etkilerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 479-488.

* İlgili yazar / Corresponding author: stuyulu@istanbul.edu.tr, +90-212-473-7070

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
S. Tüylü, 0000-0002-8128-9840	Başvuru Tarihi / Submission Date	27.01.2020
	Revizyon Tarihi / Revision Date	28.04.2020
	Kabul Tarihi / Accepted Date	03.05.2020
	Yayın Tarihi / Published Date	25.06.2020

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda maden atıklarının yerüstünde aşırı depolanması nedeniyle özellikle atık barajı kazalarının sonucu olarak çok sayıda insan ve canlı yaşamının kaybedildiği, bununla beraber yaşam kaynağı olan yeraltı ve yerüstü sularının kirlendiği çevresel felaketler yaşanmıştır. Bu problemlerin çözümüne yönelik olarak, yerüstünde depolanan atıkların hacminde bir azalma sağlaması amacıyla özellikle yeraltı madenciliğinde bu atıkların çimentolu macun dolgu (ÇMD) malzemesi olarak kullanımında büyük bir artış görülmektedir. Madencilik endüstrisinde çimentolu macun dolgu sistemi, atıkların yeraltında depolanabilmesinin yanı sıra tavan yüklerine bağlı göçüklere karşı da destek görevini üstlenmektedir. Dolayısıyla oluşturulan macun malzemenin zamana bağlı olarak alacağı maksimum dayanım değeri önem kazanmaktadır. Oluşturulan ÇMD karışımları tavan tahkimatı içinse 28 günlük kür süresine göre minimum ≥ 4 MPa, eğer sadece yüksüz dolgu içinse ≥ 1 MPa dayanım şartını sağlamalıdır (Hassani ve Archibald 1998; Li vd., 2002; Fall vd., 2005; Belem ve Benzaazoua, 2008; Li ve Fall, 2016).

Yeraltında oluşturulan boşluklara doldurulan bu macun malzeme, genellikle tesis atığının çimento ile karışımından oluşmakta ve katı içeriği %70-85 arasında değişmektedir (Yılmaz vd., 2011; Wu vd., 2015; Li ve Fall, 2016; Jiang vd., 2017). Katı oranındaki değişkenlik macun dolgu malzemesinin pompalanabilirliği için önemlidir ve bu nedenle 15–25 cm çökme (slump) aralığına uygun bir katı oranı seçilmektedir (Belem ve Benzaazoua, 2008; Cihangir vd., 2015; Ouattara vd., 2017). Bu durum, taşımada basınç kayıplarını azaltır ve kazanılan dayanımı artırır. Ayrıca belirli bir çökme değerindeki macunun su içeriği ve yoğunluğu ince tane miktarına göre değişmektedir. Tane boyutu incelidikçe ıslanan yüzey alanı artacağından nem içeriği yüksek ve yoğunluğu düşük kalacaktır (Newman vd., 2001; Meggyes ve Debreczeni, 2006).

Macun dolgu uygulamalarında istenilen dayanıma bağlı olarak kullanılan çimento miktarı %3-10 arasında değişebilmektedir (Benzaazoua vd., 2002; Huang vd., 2011; Wu vd., 2015; Li ve Fall, 2016; Koohestani vd., 2017; Wang vd., 2017; Ouattara vd., 2018). Bununla beraber bazı stoplarda, ilk birkaç metreye kadar yapılan ilk dolgu (plug-fill) ve yaklaşık 1 hafta sonra da ikinci dolgu (residual-fill) olmak üzere iki kademeli macun dolgu çalışmaları da yapılmaktadır. İlk dolgu çimento içeriği %5-7 arasında değişmekte iken ikinci dolgu çimento içeriği %2-5 arasında değişmektedir (Yılmaz vd., 2015). Bu bağlayıcı oranlarındaki farklılıkların temelinde macun dolguda istenen dayanım değerleri ile karışım bileşenlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri de önemli rol oynamaktadır. Dolgu bileşenlerinden her biri, macun dolgunun kısa, orta ve uzun dönemdeki duraylılığını etkilemektedir. Özellikle çimento miktarı arttıkça macun dolgunun dayanımının artması beklenmektedir. Ancak atık içerisindeki sülfür oranına bağlı sülfat atıklar karşısında, kalsiyumca zengin çimento gibi bağlayıcılar dayanım etkisini farklı oranlarda etkileyebilirler (Dong vd., 2019).

Macun dolgu karışımında kullanılan bağlayıcılar önemli ölçüde maliyeti etkilemektedir. Yalnızca macun dolgu maliyetleri, toplam maden işletme maliyetlerinin % 10'u ila % 20'si arasındayken, bağlayıcılar ise dolgu maliyetlerinin % 75'ini oluşturabilmektedir (Belem ve Benzaazoua, 2008). Literatürde hem bağlayıcı maliyetlerini azaltmak hem de sülfat atağa karşı daha duraylı macun dolgu üretmek amacıyla karışıma uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddeleri ilave edilerek yapılmış çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde; özellikle sülfür içeren minerallerin bulunduğu atıkların kullanıldığı çimentolu macun dolgu karışımlarında uygun bir endüstriyel tasarımın henüz ortaya konulmadığı görülmüştür. Bu durumun temel sebebi, macun dolgu karışımında kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin macun dolgu karışım oranlarını doğrudan etkilemesidir. Dolayısıyla, bu çalışmada elde edilen laboratuvar sonuçları doğrultusunda bir Pb-Zn yeraltı madeni için endüstriyel uygulama sırasında kullanılacak CaO bakımından zengin C sınıfı uçucu kül ikameli en uygun ÇMD karışım oranlarının yaklaşık olarak belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, bir Pb-Zn yeraltı maden işletmesinde %80 katı içeriğinde ve %3-11 arasında çimento bağlayıcısı uygulanarak ÇMD numuneleri oluşturulmuştur. 28-56 ve 90 günlük kür sürelerine göre dayanım açısından tahkimat amaçlı kullanılacak macun dolgu çimento oranları belirlenmiştir. Bu çimento oranları temel alınarak, çimento yerine %20-30-40-50 oranlarında uçucu kül kullanımının macun dolgunun dayanımına etkisi araştırılmıştır. Böylece uçucu külün bir Pb-Zn yeraltı madeninde macun dolgu uygulamasında çimento yerine ikame edilerek çimento miktarının azaltılabileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca yerüstünde depolanan atıkların azaltılmasıyla çevresel açıdan oluşturabileceği ciddi riskler daha da kontrol edilebilir olacaktır. Bu çalışmayla sürdürülebilir madencilığe katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

ÇMD uygulamalarında kullanılan temel bağlayıcı malzeme genellikle portland çimentosudur (PÇ). Aynı zamanda çimento, ÇMD işletme maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle işletme maliyetlerini minimumda tutmak için çimento oranı azaltılırken istenilen dayanım ve duraylılığı sağlamak amacıyla yapay veya doğal puzolanların ikincil bağlayıcı olması ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Örneğin; Benzaazoua vd. (1999), ~%17 sülfür içeriği olan bir bakır madeni atığını ağırlıkça %4,5'i kadar bağlayıcı (%40'ı uçucu kül ve %60'ı PÇ) ile karıştırarak ÇMD numuneleri hazırlamışlardır. Sonuç olarak sülfat atağına dirençli uçucu kül kullanımının genellikle ÇMD dayanımının azalmasını engellediğini ifade etmişlerdir. Benzaazoua vd. (2002), ÇMD karışımlarında %3, %4,5 ve %6 bağlayıcı oranlarında %50 PÇ ve %50 uçucu külü 3 farklı atık türünde kullanmışlardır. Bu atıklar, %32 sülfür içeren A1 atığı, %16 sülfür içeren B atığı ve %5 sülfür içeren C atığıdır. 90 günlük kür sürelerine göre; %3 ve %4,5 bağlayıcı oranına göre en yüksek dayanım sırasıyla ~300 kPa ve ~700 kPa ile B atığı, %6 bağlayıcı oranına göre en yüksek dayanım ~1100 kPa ile A1 atığı ölçülmüştür. Kesimal vd. (2004), bir bakır madenin ~%4 sülfür içeren atıkları ve portland kompoze çimento 32,5 R tipi ile ÇMD örnekleri oluşturmuşlardır. Yüksek sülfür taşıyan atıklarda, bağlayıcının, macun dolgu işlemleri için yeterli uzun vadeli dayanımı sağlamak için etkili veya uygun olmadığı bulunmuştur. Ramlochan vd. (2004), düşük dereceli kireç içeren uçucu külün yüksek oranlarda bağlayıcı ile birlikte macun dolgu karışımlarında kullanılmasının uygun olmadığını ifade etmişlerdir. Hassani vd. (2007), yüksek sülfür içeren atıklardan oluşmuş ÇMD karışımlarının uzun dönemdeki duraylılığının sağlanabilmesi için yalnız başına portland çimentosunun yeterli olamayacağını, çimento yerine %50 C sınıfı uçucu kül ikame ÇMD numunelerinin daha iyi dayanım sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Erçikdi vd. (2009), PÇ'ye ikame olarak kullanılan uçucu külün, ÇMD örneklerinin uzun süreli performansını iyileştirdiğini ve bağlayıcı maliyetlerini düşürmek için mineral katkı maddeleri olarak uygun bir şekilde kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Tariq ve Yanful (2013), uçucu kül gibi puzolanik malzemelerin, puzolanik reaksiyonlar yoluyla PÇ'nin hidrasyonu sırasında serbest bırakılan Ca(OH)₂ tüketimine katkı sağladığını ve bununla beraber sülfat atağıyla oluşan bozulmanın, çimentodaki mono sülfat hidrat (AFm) ve kalsiyum alüminat hidrat ile sınırlandırılarak veya ortadan kaldırılarak kontrol edilebildiğini anlatmışlardır. Gorakhki ve Bareither (2018), Amerika'daki üç ayrı maden (bakır, soda külü ve lal taşı) atıkları, çimento yerine ikame edilen üç spesifik olmayan uçucu kül ve PÇ (Tip I – II) karışımları ile beraber katı içeriği % 60-75 (su içeriği =% 33-67), su-bağlayıcı oranı 2.5 ve 5 olan ÇMD numuneleri hazırlamışlardır. 0,1 gün (2 saat), 7 ve 28 gün kürledikten sonra tek eksenli basma dayanımı sonuçlarına göre kırılma stresi, CaO içeriğinde ve uçucu külün CaO-SiO₂ oranındaki artışla doğru orantılı olarak artmıştır. Dolayısıyla, bu durum parçacıklar arasında daha etkili bir bağlanma olduğunu ortaya koymuştur. Yılmaz (2018), bünyesinde ~%51 SO₃ barındıran atıklarla %75,7-76,9 katı içeriğinde, %3, %4,5 ve %7 bağlayıcı ile (%40'ı C tipi uçucu kül - %60'ı PÇ ve %80'i cüruf - %20'si PÇ) ÇMD numuneleri hazırlamıştır. Derinlik etkisine ve 28 günlük kür süresine göre cüruf esaslı çimentolu ÇMD numunelerinin, içerdiği katkı miktarı ve kimyasal bileşimi nedeniyle hem uçucu kül esaslı çimentodan hem de sadece Portland çimentolu ÇMD numunelerinden daha iyi dayanım verdiğini ifade etmiştir. Eker (2019), ~%33 sülfür içeren bir bakır madeni atığı ile ÇMD örnekleri oluşturmuştur. Bağlayıcı olarak kullanılan % 3- 11 çimento miktarlarının % 10, 20, 30 ve 40'ı kadar ikame edilen F tipi uçucu külün bütün çimento oranlarındaki karışımlarda basınç dayanımını arttırdığını belirlemiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde; yüksek oranda sülfat ya da ağırlıklı pirit minerali içeren atıkların kullanıldığı farklı katı içeriklerinde ve farklı bağlayıcı oranlarında hazırlanan ÇMD karışımlarında, özellikle sülfat atak karşısında dayanımın olumsuz etkilenmemesi için çimento ikamesi olarak farklı tür ve oranlarda uçucu külün kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bu durumun en önemli nedenlerinden biri de ÇMD karışımında kullanılan bağlayıcıların, madene göre fiziksel ve kimyasal özellikleri farklılıklar gösteren atıklarla nasıl bir tepkime vereceğinin tam olarak bilinmemesidir. Farklı bölgelerdeki farklı termik santrallerde ortaya çıkan aynı sınıf uçucu küldeki farklı CaO-SiO₂ oranları ÇMD dayanımını doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan, özellikle sülfür içeren bir atıkla en uygun ÇMD dayanımının belirlenebilmesi için sülfata dirençli bağlayıcılar kullanılarak alternatif ÇMD karışımlarının ortaya koyulmasına ve macun dolgu mukavemeti performansının artırılması için ilave testler yapılarak araştırılmasına gereklilik olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, yapılan çalışmada bir Pb-Zn atığı ile farklı oranlardaki C sınıfı uçucu kül karıştırılarak hazırlanan ÇMD numunelerinin dayanımları araştırılmış, bu konudaki literatüre ve endüstriye katkıda bulunulmuştur.

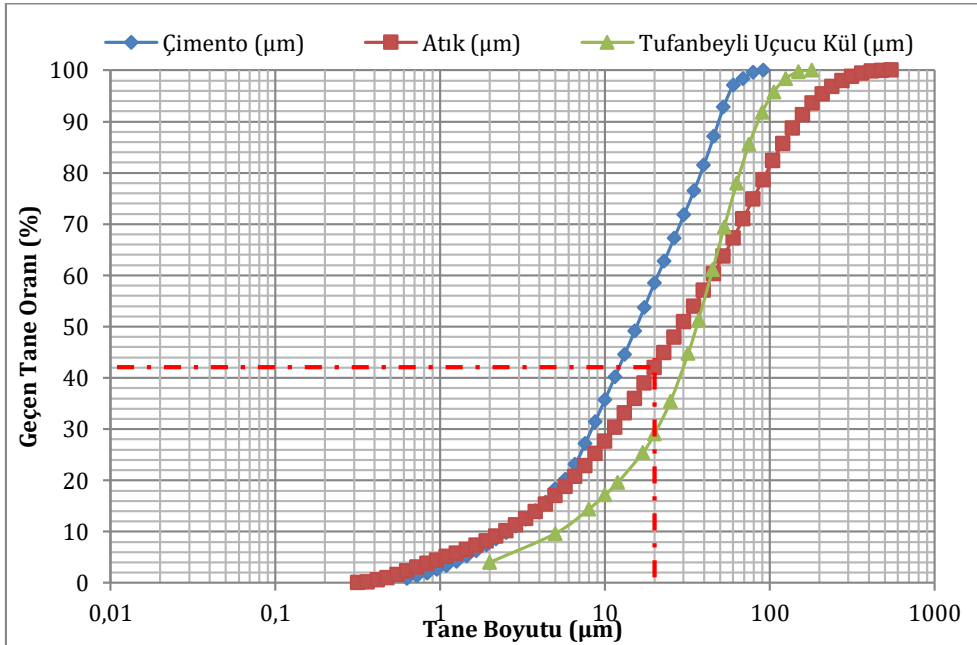
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Macun dolgu karışımları hazırlanırken, Balıkesir/Balya bölgesinden alınmış Pb-Zn madeni proses atığı, Adana Tufanbeyli Termik Santrali'nden alınmış uçucu kül, CEM I 42,5 R Portland Çimentosu ve şebeke suyu kullanılmıştır. Dolgu karışımında kullanılan malzemelerin tane boyut dağılımları lazer partikül boyut analiz cihazı ile belirlenmiş ve Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin bazı kimyasal özellikleri ICP-MS analizi ile belirlenmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Atık, çimento ve uçucu külün önemli kimyasal bileşenleri (Important chemical components of tailings, cement and fly ash)

Bileşenler	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	*S/**SO ₃
Atık (~%)	13,6	36,2	8,1	23,3	2,5	2,6	0,2	*7,5
Uçucu Kül (~%)	4,5	33,7	19,8	22	2,2	1,6	0,5	**13,7
Çimento (~%)	3,4	19,9	4,8	61,6	1,3	0,9	0,3	**3,7

Tüylü (2016) bir çalışmasında, Pb-Zn atıkları ile yapmış olduğu XRD analizine göre, öncelikli olarak kalsit (CaCO₃) ve kuvars (SiO₂) daha sonra ise sırasıyla feldspat grubu mineralleri (albite Na(AlSi₃O₈)), pirit (FeS₂), kil grubu mineraller ve mika grubu minerallerin atığın içerisinde yer aldıklarını belirlemiştir. Tablo 1'deki sonuçlara göre atık malzeme içerisinde söz konusu minerallerle beraber en fazla %36 değeri ile kuvars minerali bulunmaktadır. CaO ise, cevher zonunun yan kayacının kireçtaşı olması ve flotasyon işlemine şist ve piritin çöktürülmesinde ve pülün pH değerini ayarlama kireç kullanılması nedeniyle %23 değeri ile katı atığın içerdiği en yüksek değerlerden biri olarak gözükmektedir. Demirin ağırlıklı olarak piritten, alüminyumun albitten geldiği ifade edilebilmektedir. Ayrıca %7,5 S değeri ile atık numunelerinin asit potansiyeli (AP) Modifiye ABA yöntemi kullanılarak 234,0625 kg CaCO₃/t belirlenmiştir. Ayrıca, mineralojik ve kimyasal analiz sonuçlarına göre, numunedeki nötralizasyon potansiyeli (NP)'nin kaynağının Ca ve Mg içeren mineraller olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda NP, her iki mineralin yüzdeleri kullanılmak suretiyle yaklaşık 0,9921 olarak hesaplanmıştır. Net nötralizasyon potansiyeli (NNP) değerinin NP/AP = < 1 ve NP-AP = < -20 kg/t CaCO₃ olduğu hesaplanmış ve atık malzemenin bu sonuçlara göre asit üretebileceği belirlenmiştir. Diğer bir macun dolgu karışım malzemesi olan uçucu kül ise, ASTM C618'de istenen SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ ≥ %50 şartına göre toplamda %58 değeri ile kimyasal bileşimlerine bağlı olarak C sınıfına girmektedir. C sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum içeriğinden dolayı maden atıklarının asit potansiyeline karşı koyabilmektedir (Eker, 2019). Ayrıca yapılarında %1-3 arasında değişen serbest kireç bulunur ve bu nedenle kendi kendine çimentolaşma özelliğine sahiptir (Alkaya, 2009). Tufanbeyli uçucu külünün bu çalışmada tercih edilme nedenlerinden birisi de, C sınıfı ve CaO-SiO₂ oranının yüksek olmasıdır.

**Şekil 1.** Atık, çimento ve uçucu külün tane boyut dağılımları (Particle size distributions of tailings, cement and fly ash)

Macun dolgunun pompalanabilmesindeki önemli parametrelerden biri atık malzemesinin sahip olduğu 20 µm altındaki malzemenin oranıdır (Brackebusch, 1994). Adiguzel ve Bascetin (2019) ise bir çalışmalarında macunun pompalanabilmesi için, karışımın atık malzemesinin 38 µm elek altı içeriğinin %20 olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Şekil 1'e göre karışımında kullanılan atık malzemesinin 20 µm tane boyutundan geçen oranı %42'dir. Fall vd. (2005) çalışmalarında macun dolgudaki <20 µm ince tane oranının %40 ve %55 aralığına kadar numunenin dayanımını değiştirmedeğini ifade etmişlerdir. Ayrıca Fall vd. (2008) bir başka çalışmalarında atık içerisinde %25'lik ince tane oranında, ÇMD içindeki makro gözeneklerin (1-10 µm) oranının önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, atık malzeme içerisinde ince tane oranının artmasının karışımın su tutma kapasitesini arttırdığını ve dolgunun dayanımını olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Bununla beraber dayanımı etkileyen en önemli malzeme olan çimentonun 90 µm'dan büyük tane boyutunun ağırlıkça %14'ten az olması gerektiği ilgili standartta belirtilmiştir (TS EN 196-6). Hidratasyon olayı sonunda, yüksek dayanımlar elde edilmesi

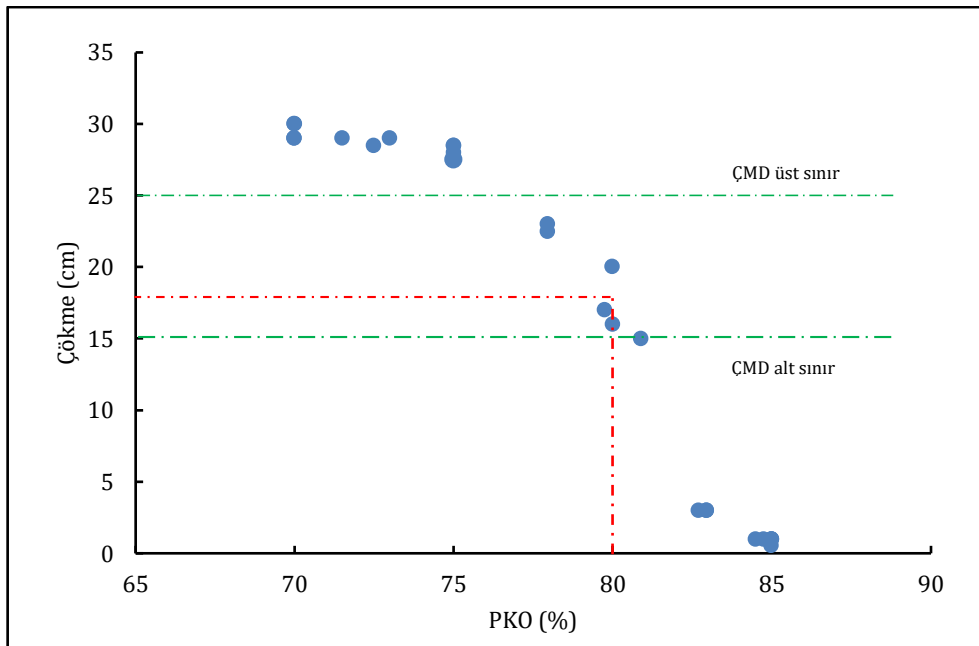
çimento tanelerinin aktif olmalarına bağlıdır ve aktiflik çimentonun ince öğütülmesiyle gerçekleşmektedir. Dolayısıyla çimento yerine ikame edilecek uçucu külün boyutu için de aynı şartlar geçerli olmaktadır. Uçucu külün tane boyutu genelde 0,5µm - 150µm arasında değişmektedir. Hem camsı küresel, hem de düzensiz şekilli taneler bulunmaktadır. Bu tanelerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün tipinden (düşük veya yüksek CaO) kaynaklanmaktadır. Yüksek CaO küllerde, mikroyapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı vardır. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük CaO'lu küller kadar düzgün değildir (TÇMB, 2009).

Bu çalışmada öncelikli olarak %70-85 aralığında katı içeriğindeki malzemeye çökme testi (ASTM C143) yapılarak ÇMD için en uygun katı içeriği belirlenmiştir. Ardından katı malzemenin ağırlıkça %3, 5, 7, 9 ve 11 oranlarında çimento karıştırılarak ÇMD referans numuneleri oluşturulmuştur. ÇMD'de genel olarak karışım suyu için tesis suyu veya musluk suyu kullanılmaktadır (Fall vd., 2009; Hefni, 2014). Bu çalışmada ise, macun dolgu karışımının istenen akışkanlığa gelmesi için şebeke suyu kullanılmıştır. Karışımın (atık malzeme, bağlayıcı ve su) homojen bir şekilde hazırlanması için beton mikseri kullanılmıştır. Ghirian ve Fall (2015) çalışmasındaki gibi karıştırma işlemi 7 dakika süreyle yapılmıştır. Hazırlanan macun dolgu karışımı 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki silindir numune kalıplarına dökülmüştür. Bu referans numunelerine 28, 56, 90 ve 200 günlük kür (80% nem, 22 °C) sürelerinin sonunda ASTM C39'a göre Tek Eksenli Basma Dayanımı (TEBD) testi yapılmıştır. Her bir karışımın en az 5 adet numune kırılmış ve aritmetik ortalaması alınmıştır. Oluşturulan macun dolgu karışımının tavan tahkimatı sağlaması amacıyla istenilen minimum 4 MPa'lık dayanım değeri dikkate alınmış ve bu dayanım değerlerini sağlayan çimento oranları belirlenmiştir. Belirlenen çimento oranlarındaki karışımlara, çimentonun %20, 30, 40 ve 50'si oranlarında çimento yerine uçucu kül katılmıştır. Referans numunelerdeki gibi aynı kür koşulları altında 28, 56 ve 90 günlük sürelerle göre TEBD testi yapılmıştır. Özellikle referans numunelerdeki %9 ve %11 çimento katkılı macun malzemelerin 200 ve 90 günlük dayanım sonuçları birbirlerine çok yakın olduğu için, uçucu kül ikameli numunelerde en fazla 90 günlük kür süresine bakılmıştır.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

4.1. Uygun Katı Malzeme ve Çimento Oranının Belirlenmesi (Determination of Optimum Solid Content and Cement Ratio)

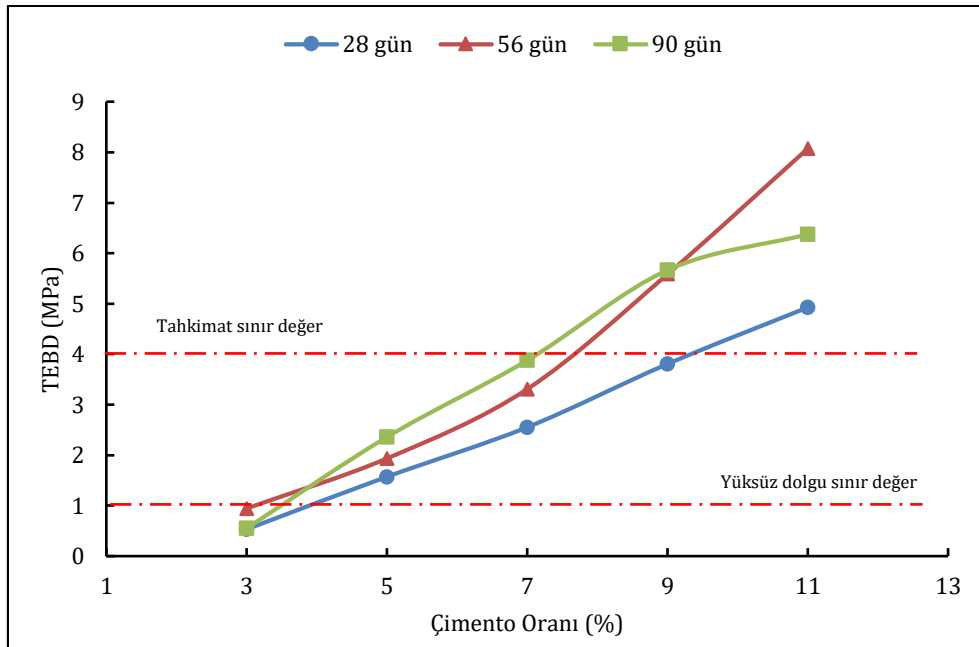
Macun dolgu malzemesinin stopa transferi ve yerleşmesindeki akışkanlığı çok önemlidir. Bu durumu, macunun karışımında kullanılan katı malzeme oranını doğrudan etkilemektedir. Katı malzeme ya da pülpde katı oranını (PKO) belirlemek için ÇMD yönteminde genellikle çökme (slump) deneyi yapılmakta ve ideal akışkanlık dikkate alındığında ise sıklıkla 18 cm slump değeri kullanılmaktadır (Tariq ve Nehdi, 2007; Fall ve Pokharel, 2010; Ghirian ve Fall, 2016). Ayrıca, 18 cm'lik çökme ile ÇMD, Belem ve Benzaazoua (2008) tarafından önerilen 15 cm çapında bir boru sisteminde 100 ton/saat akış hızında beslenebilmektedir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çökme deneylerinin sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Farklı PKO'lara göre çökme testi sonuçları (Slump test results according to different solid content)

Şekil 2'deki çökme testi sonuçları incelendiğinde, 18 cm değerine en yakın katı içeriği 80% olarak görünmektedir. Aynı katı içeriğinde az da olsa çökme değerlerinde farklılıklar oluşmuştur. Özellikle %80 PKO'da çökme değeri bir deneyde 20 cm iken bir başka deneyde 16 cm olarak belirlenmiştir. Aynı katı içeriğine sahip ÇMD'deki çökme azalmasının en temel nedeni, malzeme içerisindeki ince atık tanelerinin yüzey alanındaki artışla beraber tanelerdeki su ihtiyacının artması olarak ifade edilebilir (Fall vd., 2008). Benzer bir durum Şekil 2'deki sonuçlarda da görülmektedir. Macun dolgunun reolojisini doğru bir şekilde tanımlamak için hem akma gerilmesi hem de viskozitesi ölçülmelidir. Ayrıca Clark vd. (1995), çökmedeki 5 cm'lik bir artışın katı kütle konsantrasyonunda %1'lik bir azalma içerdiğini gözlemlemişlerdir. Uçucu kül tanelerinin şeklinin ve tane boyut dağılımlarının, karışımların su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki ettiği bilinmektedir. Bu etki, özellikle küresel tanelerin kayganlaştırıcı nitelik taşıması ve dolgu maddesi özelliğine sahip olmasıdır; bir diğer etki ise şekilsiz ve pürüzlü yüzeye sahip olan tanelerin su ihtiyacını arttırmasıdır. Ayrıca, uçucu külün tane büyüklük dağılımının çok değişken olması halinde de su ihtiyacı artmaktadır (TÇMB, 2009). Çalışmada kullanılan C tipi uçucu külün CaO oranı yüksek olduğu için hem küresel hem de köşeli düzensiz şekilli taneciklere sahiptir.

Macun dolgudaki suyun bir kısmı hidrasyon için kullanılırken, büyük bir kısmı ise macun dolgunun yer altına transferi için kullanılmaktadır. Buradaki fazla su, dayanım kazanmaya başlayan macun dolgunun gözenekliliğini etkilemekte, bu boşlukların su veya hava ile dolmasına ve sonrasında da dayanımının azalmasına sebep olmaktadır. Abdul-Hussain ve Fall (2011) çalışmalarında da TEBD ve su/çimento oranı arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğunu söylemişlerdir. Macun kalitesini kontrol etmedeki diğer önemli faktörlerden biri su/çimento oranı olarak bilinir. Bu çalışmada ise sabit su oranı kullanıldığı için yalnızca çimento miktarlarındaki değişim su/çimento oranını etkilemiştir. %80 katı içeriğine göre %3, 5, 7, 9 ve 11 oranlarında çimento bağlayıcısı karıştırılarak hazırlanan referans numunelerinin 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre TEBD testi sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



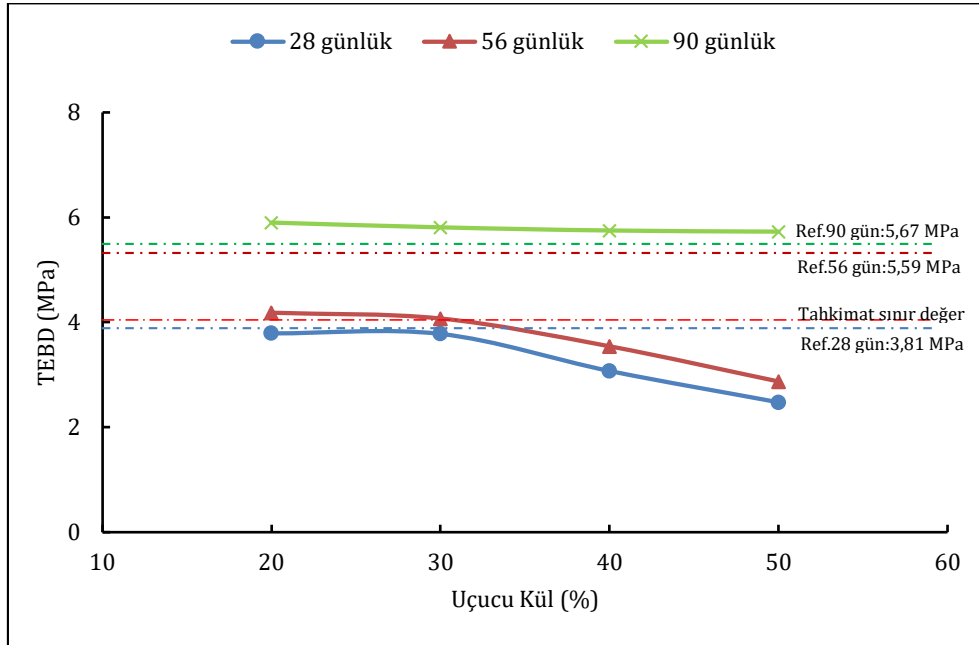
Şekil 3. Farklı çimento kullanım oranlarına göre ÇMD örneklerinin dayanım değişimi (Strength change of CPB samples according to different cement usage rates)

Fall vd. (2008) çalışmasında da su/çimento oranı 6'dan 9'a arttıkça 28 günlük tek eksenli basma dayanımının azaldığı anlaşılmaktadır. Benzer bir şekilde bu çalışmadaki su/çimento oranının çimentonun artışına bağlı olarak azalması sonucu 28 günlük TEBD değerleri Şekil 3'teki gibi lineer bir artış göstermiş ve 2,77 ile 2,27 su/çimento oranı istenilen dayanımı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca 28 günlük dayanıma göre 4 MPa'nın üzerinde sadece %11 çimento içeriği ile oluşturulan numunelerin dayanımının kaldığı görülmektedir. Bu çalışmadaki atık malzemesinin macun dolguda yüksüz olarak kullanılabilmesi için ise en az %5 çimento katılması gerekmektedir. Uzun kür süresindeki dayanım değerleri özellikle %9 çimentodan sonra 56 günlük kür süresine göre ciddi bir düşüş sergilemektedir.

4.2. ÇMD Karışımlarındaki Uçucu Kül İkamesinin Etkisi (Effect of Fly Ash Substitution In CPB Mixtures)

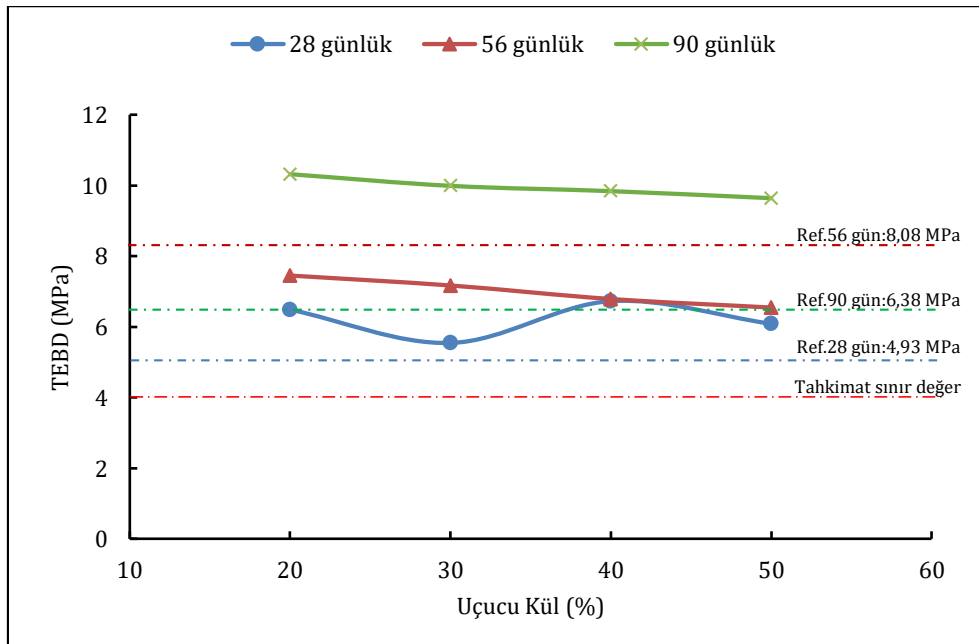
Sülfat atıklarının uzun dönemde macun dolgu dayanımları üzerindeki olumsuz etkisi bu çalışmadaki Pb-Zn atıklarında da ortaya çıkmıştır. Bu durumun azaltılabilmesi için, puzolanik bir malzeme olan uçucu kül, çimento

yerine ikame olarak belirli oranlarda kullanılmıştır. Buna göre %9 çimento içeriğinde kullanılan uçucu kül ikamesinin sonuçları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Farklı oranlarda uçucu külün ÇMD numunelerinde (%9 çimentolu) çimento ikamesi olarak kullanımında dayanım değişimi (Strength change in the use of different ratio of fly ash as cement substitute in CPB samples (9% cement))

28 günlük %9 çimento katkılı referans numunesindeki (3,81 MPa) çimento oranı temel alınarak oluşturulan %20, %30, %40 ve %50 oranlarında uçucu kül ikameli ÇMD karışımlarının dayanımları sırasıyla 3,79 MPa, 3,78 MPa, 3,07 MPa ve 2,47 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak, bu değerler tahkimat için istenilen dayanımı sağlayamamışlardır (Şekil 4). Buna karşın 56 günlük %20 (4,18 MPa) ve %30 (4,07 MPa) uçucu kül ikameli numunelerde tahkimat sınır değeri aşılmıştır. Bununla beraber 90 günlük uçucu kül ikameli ÇMD numunelerinin dayanımları ise sırasıyla 5,90 MPa, 5,81 MPa, 5,75 MPa ve 5,73 MPa olarak ölçülmüştür. Bu durum özellikle uçucu külün puzolanik özelliğinin uzun dönemdeki etkisinin yansımasıdır. Dolayısıyla %9 çimento oranına göre %30 uçucu kül ikamesinin uygun olduğu ve 56 günden sonra ise dayanım açısından daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. Diğer bir tahkimat amaçlı karışım olan %11 çimento içeriğinde kullanılan uçucu kül ikamesinin sonuçları ise Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Farklı oranlarda uçucu külün ÇMD numunelerinde (%11 çimentolu) çimento ikamesi olarak kullanımında dayanım değişimi (Strength change in the use of different ratio of fly ash as cement substitute in CPB samples (11% cement))

%11'e göre farklı oranlarda katılan uçucu külün etkisi incelendiğinde ise 28.gündeki dayanımların küçük bir aralıkta dalgalanmasına rağmen istenilen dayanımın üzerine çıktıkları Şekil 5'te görülmektedir. Bununla beraber en yüksek dayanımı veren %20 uçucu kül ikameli 28. günde 6,49 MPa, 56. günde 7,45 MPa ve 90. günde de 10,33 MPa dayanımlar sağlanarak referans numunelerin çok üzerinde değerlere ulaşılmıştır. Ancak uçucu kül miktarındaki artışa bağlı olarak özellikle 56 ve 90 günlük kür süresine sahip numunelerin dayanım değerlerinde 0,7-0,9 MPa aralığında bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca referans numunelerin tersine uzun dönemde dayanımın önemli bir oranda arttığı ve dolayısıyla sülfat atak karşısında uçucu külün puzolanik özelliğinin etkili olduğu Şekil 5'ten anlaşılmaktadır. Puzolan malzemeler, fiziksel, minerolojik ve kimyasal açıdan çimento ile benzerlik gösterse de kimyasal bileşimleri açısından karşılaştırıldığında puzolanlarda silikatlar (SiO₂) çoğunlukta iken, portland çimentosunda CaO çoğunlukta. Dolayısıyla, puzolanların büyük bir kısmı kendi başına bağlayıcı özelliğe sahip olmadığından ikincil bağlayıcı maddeler olarak anılırlar. Bu durumun etkisi olarak, Şekil 5'te artan uçucu kül miktarlarına karşılık çimentodaki CaO değerlerinin yeterli gelmeyerek dayanımın azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber uçucu küldeki puzolanik etki, külün bileşimine ve inceliğine bağlı olarak değişebilmektedir. Özellikle linyit uçucu külleri su ile karıştırılıp kompaksiyona tabi tutulduklarında çimentolaşmadan dolayı dayanımları artmakta ise de bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş ortaya çıkmaktadır. Bu etki ise genellikle, uçucu küldeki serbest CaO ve suda çözünebilen diğer bileşiklere bağlıdır. Bir başka ifadeyle, çimentolaşma özelliğinden tam yararlanmak için daha uzun bir kür süresine ve yeterli CaO'ya ihtiyaç duyulmaktadır (Alkaya, 2009).

Benzaazoua vd. (2002), %32 sülfür içeren atık ile %6 bağlayıcının %50'si kadar uçucu kül ikame edilerek hazırlanan ÇMD numunesinin 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre dayanımlarını sırasıyla ~600kPa, ~1000kPa ve ~1100kPa olarak bulmuşlardır. Eker (2019) ise, yine benzer sülfür içeriğine sahip farklı bir atık ile tavan tahkimatı için istenilen değeri 28 günlük kür süresine göre ~5 MPa dayanımla % 11 çimentolu - %10 ve %20 F tipi uçucu kül ikameli ÇMD karışımlarıyla sağlamıştır. 90 günlük kür süresinde ise sadece % 11 çimentolu - % 10 uçucu kül ikameli karışım 4 MPa'nın üzerinde kalabilmiştir. Bu çalışmadaki %11 çimento oranına göre farklı oranlarda çimento yerine C tipi uçucu kül ikameli ÇMD karışımlarının hepsinin 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinin tamamındaki dayanımları 4 MPa'nın üzerinde kalmıştır. Bunun nedeni olarak atık içeriğindeki sülfür oranının daha az olması ve C tipi uçucu kül kullanımının etkili olduğu düşünülmektedir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Madenlerde tahkimat amacı ile de kullanılabilen ÇMD'de, çimento yerine farklı katkı malzemeleri kullanılabilir. Bu çalışmada da katkı maddesi olarak bir termik santral atığı olan uçucu kül kullanılmıştır. Farklı oranlardaki uçucu kül ikameli ÇMD'lerin 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre dayanımları ölçülmüş ve sonuçlar daha önceden referans olarak hazırlanan katkısız numuneler ile karşılaştırılmıştır. Çimento katkısının içeriğine farklı oranlarda uçucu kül kullanılması sonucunda; referans numunelere göre, %9 çimentonun %30'una kadar uçucu kül ikamesinin özellikle 56 ve 90 günlük kür sürelerinde ve %11 çimentonun %50'sine kadar uçucu kül ikameli karışımların ÇMD yönteminde kullanılabilmesi belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonunda uçucu kül ilâvesinin, 90 günlük bir süreç dahilinde Pb-Zn atığı karışımı ÇMD malzemesinin dayanımı üzerindeki etkisinin fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu durum puzolanik reaksiyon ve uçucu külün boşlukları doldurma etkisi ile açıklanabilir. Ancak uçucu külün artışına bağlı olarak macun dolgudaki temel bağlayıcı olan çimento miktarının azalmasıyla ÇMD dayanımlarında az da olsa bir düşüş eğiliminin olduğu görülmüştür. Toplam kütledeki uçucu kül oranı dikkate alındığında doğru türde ve oranda bir uçucu külün macun dolgu karışımlarında kullanılmasının özellikle çimento tüketiminde ve dolayısıyla maliyetlerde ciddi bir azalma sağlayacağı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte çalışma sahasındaki Pb-Zn atıklarının tahkimat amacıyla yeraltında, fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından uygun C tipi uçucu kül ikameli ÇMD karışımları olarak kullanılabilmesi ortaya konulmuştur. Bundan sonraki çalışmalarda farklı puzolanik özellikteki malzemelerin Pb-Zn atıklarıyla yapılan macun dolguda kullanılabilirliğinin araştırılması ve alternatif karışım oranlarının bulunmasının sürdürülebilir madencilğe katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Esan Eczacıbaşı Balya Pb-Zn Yeraltı İşletmesi yöneticilerine ve çalışanlarına, Enerjisa Enerji Üretim A.Ş. Adana Tufanbeyli Termik Santrali yöneticilerine ve çalışanlarına, Akçansa Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş. yöneticilerine ve çalışanlarına malzeme teminindeki yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Abdul-Hussain N. and Fall M., 2011. Unsaturated hydraulic properties of cemented tailings backfill that contains sodium silicate. *Eng Geol* 123(4):288–301.
- Adiguzel D. and Bascetin A., 2019. The investigation of effect of particle size distribution on flow behavior of paste tailings. *Journal of Environmental Management* 243 (2019) 393–401.
- Alkaya, D., 2009. Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 5, No: 1, 2009* (61-72).
- ASTM C39., 2018. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C143., 2015. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618., 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P., Verburg, R., 1999. Cementitious backfill with high sulphur content: physical, chemical and mineralogical characterization. *Cem. Concr. Res.* 29 (5), 719 - 725.
- Benzaazoua, M., Belem T. and Bussière B., 2002. Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill, *Cement and concrete research*, 32: 12.
- Belem, T. and Benzaazoua, M., 2008. Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 147-174.
- Brackebusch, F.W., 1994. Basics of paste backfill systems, *Mining Engineering*, 46, 1175–8.
- Cihangir, F., Ercikdi B., Kesimal A., Deveci H. and Erdemir F., 2015. Paste backfill of high-sulphide mill tailings using alkali-activated blast furnace slag: effect of activator nature, concentration and slag properties, *Minerals engineering*, 83: 117-127.
- Clark CC, Vickery JD, Backer RR, 1995. Transport of total tailings paste backfill: results of full-scale pipe test loop pumping tests. Report of investigation, RI 9573, USBM, 37 pp.
- Dong, Q., Liang, B., Jia, L., Jiang L., 2019. Effect of sulfide on the long-term strength of lead-zinc tailings cemented paste backfill. *Construction and Building Materials* 200 (2019) 436–446.
- Eker, H., 2019. Metalik Proses Artıklarının Macun Dolgu Yöntemi ile Depolanmasında Uygun Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2019.
- Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., ve Alp, I., 2009. Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 848–856.
- Fall M, Benzaazoua M, Ouellet S, 2005. Experimental characterization of the effect of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill. *Miner Eng* 18(1):41–44
- Fall, M., Benzaazoua M. and Saa, E. G., 2008. Mix proportioning of underground cemented tailings backfill, *Tunnelling and underground space technology*, 23(1): 80-90.
- Fall, M., Adrien, D., Célestin J. C., Pokharel M. and Touré, M., 2009. Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill, *Minerals engineering*, 22(15): 1307-1317.
- Fall, M. and 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.
- Ghirian, A. and Fall, M., 2015. Coupled behavior of cemented paste backfill at early ages, *Geotechnical and geological engineering*, 33(5): 1141-1166.
- Ghirian, A. and Fall, M., 2016. Long-term coupled behaviour of cemented paste backfill in load cell experiments, *Geomechanics and geoengineering*, 11(4): 237-251.
- Gorakhki, M.H. and Bareither, C.A., 2018. Compression Behavior of Mine Tailings Amended with Cementitious Binders, *Geotech Geol Eng* (2018) 36:27–47.
- Hassani F, Archibald J., 1998. Mine backfill. In: Canadian Institute of Mine, Metallurgy and Petroleum, Published on CD-ROM Proceedings, Canada, 263p.
- Hassani, F.P., Nokken, M.R., Annor, A.B., 2007. Physical and mechanical behaviour of various combinations of mine fill materials, *CIM Bull.* 2 (3), 72.
- Hefni, M. A., 2014. An investigation into the development and potential of foam minefill, PhD thesis, McGill University.
- Huang S., Xia K. And Qiao L., 2011. Dynamic tests of cemented paste backfill: effects of strain rate, curing time, and cement content on compressive strength. *J Mater Sci* (2011) 46:5165–5170.
- Jiang, H., M. Fall and L. Cui, 2017. Freezing behaviour of cemented paste backfill material in column experiments, *Construction and building materials*, 147: 837-846.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Ercikdi, B., 2004. Evaluation of paste backfill test results obtained from different size slumps with varying cement contents for sulphur rich mill tailings, *Cem. Concr. Res.* 34 (10), 1817e1822.
- Koohestani, B., Bussière, B., Belem T. and Koubaa, A., 2017. Influence of polymer powder on properties of cemented paste backfill, *International journal of mineral processing*, 167: 1-8.
- Li T, Singh U, Coxon J, Grice TG, Sainsbury D, 2002. Development and application of paste fill using dry tailings. First International Seminar on Deep and High Stress Mining, Perth, 10 pp
- Li, W. and Fall M., 2016. Sulphate effect on the early age strength and self-desiccation of cemented paste backfill, *Construction and building materials*, 106: 296-304.
- Meggyes, T. and Debreczeni, A., 2006. Paste technology for tailings management, *Land Contamination & Reclamation*, 14 (4), 2006 EPP Publications Ltd.
- Newman, P., Cadden, A., White, R., 2001. Paste - The Future of Tailings Disposal? Securing the Future, International Conference on Mining and the Environment. June 25 - July 1, Skelleftea, Sweden, pp.594 – 603.

- Ouattara, D., Yahia, A., Mbonimpa, M., & Belem, T., 2017. Effects of superplasticizer on rheological properties of cemented paste backfills. *International Journal of Mineral Processing*, 161, 28-40.
- Ouattara, D., Mbonimpa, M., Yahia, A., Belem, T., 2018. Assessment of rheological parameters of high density cemented paste backfill mixtures incorporating superplasticizers. *Construction and Building Materials*. Volume 190, 30 November 2018, Pages 294-307.
- Ramlochan, T., Thomas, M., and Hooton, R., 2004. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature: Part II: Microstructural and microchemical investigations, *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1341-1356.
- Tariq, A. and Nehdi, M., 2007. Developing durable paste backfill from sulphidic tailings, *Proceedings of the institution of civil engineers - waste and resource management*, 160(4): 155-166.
- Tariq, A., and Yanful, E. K., 2013. A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices, *Journal of environmental management*, 131, 138-149
- TÇMB, 2009. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. 4. Baskı Temmuz 2009. ISBN 975-8136-18-6
- Tüylü, S. 2016, Maden tesis atıklarının yerüstünde depolanmasında en uygun tasarım koşullarının belirlenmesi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2016.
- TS EN 196-6, 2010. Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini.
- Wang Y., Wu A., Wang S., Wang H., Yang L., Wang Y. and Ruan Z.e., 2017. Correlative mechanism of hydraulic-mechanical property in cemented paste backfill, *Journal of Wuhan university of technology-mater. sci. ed.*, 32(3): 579-585.
- Wu A., Wang Y., Wang H., Yin S. and Miao X., 2015. Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill, *International journal of mineral processing*, 143: 65-71.
- Yılmaz, E., Belem, T., Bussièrè B. and Benzaazoua M., 2011. Relationships between microstructural properties and compressive strength of consolidated and unconsolidated cemented paste backfills, *Cement and concrete composites*, 33(6): 702-715.
- Yılmaz, E., Belem, T., Benzaazoua M., 2015. Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions. *Engineering Geology* 185 (2015) 52-62.
- Yılmaz, T. Erçıkıdı, B. Cihangir, F. 2017. Yüksek fırın cürufu ve perlit ikamesinin çimentolu macun dolgunun mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), ss. 239-251, Haziran 2017.
- Yılmaz, 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