

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MİNERAL VE KİMYASAL KATKI MADDELERİNİN
MACUN DOLGU PERFORMANSINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Maden Yük. Müh. Bayram ERÇIKDI

**HAZİRAN 2009
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MİNERAL VE KİMYASAL KATKI MADDELERİNİN
MACUN DOLGU PERFORMANSINA ETKİSİ**

Maden Yük. Müh. Bayram ERÇIKDI

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor (Maden Mühendisliği)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08.06.2009
Tezin Savunma Tarihi : 24.06.2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Hacı DEVECİ
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Ali Osman YILMAZ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ali KAHRİMAN**

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2009

ÖNSÖZ

"Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi" isimli bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır. Tezin deneysel çalışmaları, KTÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği ve Macun Dolgu Laboratuvarları'nda ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir.

Doktora tez konusunun belirlenmesinden çalışmaların yürütülmesi ve sonuçlandırılmasına kadar her aşamasında bilgi, deneyim, destek ve değerli görüşlerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Ayhan Kesimal'e minnet ve şükran borçluyum.

Çalışmam boyunca beni yönlendiren, verilerin yorumlanmasında ve tezin çeşitli aşamalarında gösterdiği yardım ve yapıcı eleştirilerinden dolayı tez izleme komitesi üyesi Sayın Doç. Dr. Hacı DEVECİ'ye içtenlikle teşekkür ederim. Yine her türlü öneri ve desteğini esirgemeyen tez izleme komitesi üyesi Sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle laboratuvar çalışmaları aşamasında özverili bir şekilde yardımlarını esirgemeyen ve bilgilerinden yararlandığım Arş. Gör. Ferdi CİHANGİR'e ve Arş. Gör. Ersin Yener YAZICI'ya, bu çalışmamı yapmam için gerekli izni sağlayan Çayeli Bakır İşletmeleri A. Ş. Genel Müdür Muavini Dr. Sabri ALTINOLUK'a, Maden Mühendisi Mustafa YAZICI, Murat GÜREŞCİ ve Kemal KAROĞLU'na, ayrıca görüş ve önerilerinden faydalandığım bölümdeki diğer hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Bu çalışma, 2005.112.008.1 No'lu KTÜ Bilimsel Araştırma Projesi, 107M183 No'lu Tübitak Projesi, 2005.200.200.02 No'lu DPT Projesi ve Çayeli Bakır İşletmeleri A.Ş. tarafından doktora tezi projesi olarak desteklenmiştir.

Bu çalışmayı, çalışmamın başından beri her türlü desteğini esirgemeyen değerli aileme ve çalışmalarım nedeni ile kendisiyle yeterince ilgilenemediğim sevgili eşime ve oğluma ithaf ederim.

Bayram ERÇIKDI
Trabzon 2009

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Tezin Gerekçe ve Amacı.....	2
1.2. Madencilikte Dolgu İşlemi.....	3
1.3. Macun Dolgu Yöntemi.....	5
1.3.1. Macun Dolgu Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	6
1.4. Macun Dolgu Tasarımında Önemli Faktörler.....	7
1.4.1. Dayanım ve Durabilite.....	7
1.4.2. Reoloji.....	9
1.4.3. Ekonomi.....	12
1.5. Macun Dolgunun Dayanım ve Durabilitesini Etkileyen Faktörler.....	13
1.5.1. İç Etkenler.....	14
1.5.1.1. Tane Boyut Dağılımı.....	14
1.5.1.2. Tane Şekli ve Özgül Ağırlık.....	18
1.5.1.3. Mineraloji.....	19
1.5.1.4. Asit ve Sülfat Etkisi.....	20
1.5.1.5. Bağlayıcı Tipi ve Oranı.....	24
1.5.1.6. Mineral Katkı Maddesi Kullanımı.....	26
1.5.1.7. Kimyasal Katkı Maddesi Kullanımı.....	30
1.5.1.8. Karışım Suyu Kimyası.....	31
1.5.1.9. Karışım Özellikleri.....	32
1.5.2. Dış Etkenler.....	33

1.6.	ÇBİ Yeraltı İşletmesinde Dolgulu Çalışma.....	36
1.6.1.	Yeraltı Üretim Yöntemi.....	36
1.6.2.	Yerüstü Macun Dolgu Tesisi.....	38
1.6.3.	Macun Dolgunun Yeraltı Üretim Boşluklarına Yerleştirilmesi.....	39
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
2.1.	Giriş.....	42
2.2.	Atık Malzeme.....	44
2.3.	Bağlayıcı Malzeme.....	46
2.3.1.	Çimento.....	47
2.3.2.	Doğal Puzolanlar.....	48
2.3.3.	Yapay Puzolanlar.....	51
2.4.	Akışkanlaştırıcılar.....	55
2.5.	Atık Malzemenin Reolojik Özellikleri.....	57
2.6.	Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması.....	58
2.7.	Tek Eksenli Basınç ve Deformasyon Testleri.....	60
2.8.	Mikroyapı Analizleri.....	62
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	63
3.1.	Malzemelerin Karakterizasyonu.....	63
3.1.1.	Atık Malzeme.....	63
3.1.2.	Bağlayıcı Malzeme.....	63
3.1.3.	Doğal Puzolanlar.....	64
3.1.4.	Yapay Puzolanlar.....	65
3.1.5.	Akışkanlaştırıcılar.....	67
3.2.	Macun Dolgu Dayanım ve Durabilitesinin Değerlendirilmesi.....	67
3.2.1.	Bağlayıcı Tipinin Etkisi.....	67
3.2.2.	Bağlayıcı Oranının Etkisi.....	69
3.2.3.	Su/Çimento Oranının Etkisi.....	71
3.2.4.	Doğal Puzolan Kullanımının Etkisi.....	72
3.2.5.	Yapay Puzolan Kullanımının Etkisi.....	75
3.2.6.	Akışkanlaştırıcı Kullanımının Etkisi.....	80
3.3.	Macun Dolgu Mikroyapısının Değerlendirilmesi.....	82
3.3.1.	Bağlayıcı Tipi, Oranı ve Su/Çimento Oranının Etkisi.....	82
3.3.2.	Doğal Puzolan Kullanımının Etkisi.....	87

3.3.3.	Yapay Puzolan Kullanımının Etkisi.....	91
3.3.4.	Akışkanlaştırıcı Kullanımının Etkisi.....	95
3.4.	Numunelerin Deformasyon Davranışlarının Değerlendirilmesi.....	99
4.	SONUÇLAR.....	105
5.	ÖNERİLER.....	107
6.	KAYNAKLAR.....	108
7.	EKLER.....	121
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Cevher zenginleştirme işlemleri sonucu açığa çıkan tesis atıklarının tamamına yakını, son yıllarda önemi giderek artan macun dolgu teknolojisi ile yeraltı üretim boşluklarında güvenli bir şekilde depolanabilmektedir. Böylece yerüstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetleri azaltılarak madencilik faaliyetlerinin çevreye duyarlı hale gelmesi sağlanmaktadır.

Macun dolgu; atık malzeme, bağlayıcı ve karışım suyunun başarılı bir karışımı olarak ifade edilmektedir. Macun dolguyu oluşturan her bir bileşenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliği dolgunun dayanım ve durabilitesini etkilemektedir. Sülfür içeriği yüksek olan atıkların macun dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda, uzun dönemde durabilite açısından bazı problemlerle karşılaşmaktadır.

Bu tez kapsamında, farklı bağlayıcı tipi, oranı, su/çimento oranı ve mineral ve kimyasal katkı maddelerinin, sülfür içeriği yüksek tesis atıkları kullanılarak hazırlanan macun dolgunun mekanik performansına ve reolojik özelliklerine etkisi incelenmiştir. 7-360 günlük kür süreleri sonunda, farklı karışım özelliklerinde hazırlanan macun dolgu numuneleri tek eksenli basınç ve deformasyon testlerine tabi tutulmuştur.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, %5 çimento oranında bağlayıcı olarak Portland çimento (CEM I 42,5), Portland kompoze çimento (CEM II/A 42,5) ve sülfata dayanıklı çimento (SDÇ 32,5) kullanımının uygun olmadığı, ancak SDÇ 32,5'in uzun dönemde dayanım kaybını engellediği gözlenmiştir. Bağlayıcı oranının artırılması veya su/çimento oranının azaltılması, macun dolgunun dayanım ve durabilitesine olumlu yönde etki etmiştir. CEM I 42,5 yerine mineral katkı maddesi olarak %10-30 oranında Fatsa Tras (FT), Akkuş Tras (AT) ve Atık Cam Malzeme (ACM) ikamesinin dayanım kaybını artırdığı, %5-60 oranında Yüksek Fırın Cürufu (YFC), Uçucu Kül (UK), Kayseri Pumis (KP) ve Silis Dumanı (SD) kullanımının ise dayanım kaybını azalttığı belirlenmiştir. Kısa ve uzun dönemli testlerden akışkanlaştırıcı olarak Normal, Süper ve Hiper Akışkanlaştırıcı (NA, SA ve HA) kullanımının macun dolgu dayanım ve durabilitesi üzerinde pozitif bir etki yaptığı gözlenmiştir. Mikroyapı analizlerinden, numunelerde oluşan dayanım kaybının ikincil alçıtaşı minerali oluşumundan kaynaklandığı anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Macun Dolgu, Piritli Atıklar, Bağlayıcı Tipi, Mineral ve Kimyasal Katkı Maddesi, Asit ve Sülfat Etkisi, Tek Eksenli Basınç Dayanımı

SUMMARY

Effect of Pozzolanic Mineral and Chemical Admixtures on Paste Backfill Performance

In recent years, paste backfill (CPB) has gained importance since all the mill tailings produced in mineral processing operations can be placed safely into the underground openings created due to ore production. This reduces the tailings disposal and rehabilitation costs, and renders the mining operations more environmentally friendly.

CPB is an engineered mixture of mill tailings, a hydraulic binder and mixing water. The physical, chemical and mineralogical properties of each components of CPB affect its strength and stability. Some problems in long-term stability of CPB are known to be often experienced in practice when the mill tailings with high sulphide content are used.

In this study, the effects of binder type and dosage, water-to-cement ratio and, mineral and chemical admixtures on the mechanical performance and rheological properties of CPB prepared from sulphide rich-mill tailings were investigated. The CPB specimens prepared under the different test conditions were subjected to the uniaxial strength and deformation tests over 7-360 days of curing periods.

Ordinary Portland cement (CEM I 42.5), Portland compose cement (CEM II/A 42.5) and sulphate resistant cement (SDC 32.5) at 5% binder dosage were found to be not suitable binders for use; albeit, only SDC 32.5 alleviated the loss of strength of CPB samples in the long term. Increasing binder dosage or decreasing water-to-cement ratio appeared to produce a beneficial effect on the strength and stability of CPB samples. The addition of FT, AT and ACM (10-30 wt%) as a partial replacement of CEM I 42,5 were observed to aggravate further the strength losses of CPB samples. However, YFC, UK, KP and SD (5-60%) appeared to improve the long-term performance of CPB samples. In the short and long term tests, NA, SA and HA as water-reducing admixtures have produced a positive effect on the paste backfill strength. SEM analysis of CPB samples revealed that the strength losses in the long term could be attributed to the formation of secondary gypsum.

Key Words: Paste Backfill, Sulphide Tailings, Binder Type, Mineral and Chemical Admixtures, Acid and Sulphate Effect, Uniaxial Compressive Strength

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Madencilik işlemleri sonucu asidik maden suyu (AMD) oluşumu.....	2
Şekil 2. Kaya (a), hidrolik (b) ve macun (c, d) dolgunun yapısal görünümü.....	4
Şekil 3. Dünyada macun dolgu teknolojisinin uygulandığı yerler.....	5
Şekil 4. Macun dolguyu oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi.....	6
Şekil 5. Yeraltı üretim boşluklarında macun dolgunun işlevi.....	8
Şekil 6. Slamp ölçümünün şematik gösterimi.....	10
Şekil 7. Slamp değeri yüksek (a), normal (b) ve düşük (c) dolgu.....	11
Şekil 8. Macun dolguda slamp-katı içerik (a) ve slamp-dayanım (b) arasındaki ilişki.	11
Şekil 9. 20 mikron altı malzeme miktarı ile boşluk oranı ve porozite (a), su/çimento oranı (b), katı oranı (c) ve slamp (d) arasındaki ilişki.....	15
Şekil 10. İyi ve kötü tane boyut dağılımı.....	16
Şekil 11. İri taneli (a) ve iri ve ince taneli (b) atıklardan oluşan karışım.....	16
Şekil 12. 20 mikron altı malzeme miktarının macun dolgu dayanımına etkisi.....	17
Şekil 13. Üniformluk katsayısı (Cu)-dayanım arasındaki ilişki.....	18
Şekil 14. Mika tanelerinin çimentolu dolgu içerisindeki dağılımı.....	19
Şekil 15. Özgül ağırlık-dayanım (a) ve bağlayıcı tüketimi-maliyet (b) arasındaki ilişki.....	19
Şekil 16. Mineralojik yapının macun dolgu dayanımına etkisi (a) ve kür süresi ile birlikte asit ve sülfat oluşumu (b).....	21
Şekil 17. Kür süresi ile birlikte sülfat (a, b, c) ve pH (d) miktarında azalma.....	23
Şekil 18. Sülfür içeriğinin dolgu dayanımına (a) ve oksijen tüketim miktarına (b) etkisi.....	24
Şekil 19. Bağlayıcı tipi ve oranının macun dolgu dayanımına etkisi.....	26
Şekil 20. Mineral katkı maddesi olarak ACM (a, b), UK (c) ve YFC (d) kullanımının macun dolgu dayanımına etkisi.....	29
Şekil 21. Karışım suyunun cüruf (a) ve Portland (b) bağlayıcılı macun dolgu dayanımına etkisi.....	32
Şekil 22. Su/çimento oranının macun dolgu dayanımına etkisi.....	33
Şekil 23. Kür sıcaklığının macun dolgu dayanımına etkisi.....	34
Şekil 24. Drenaj koşullarının macun dolgu dayanımına etkisi.....	35

Şekil 25. Drenaj ve konsolidasyonun dolgunun mikroyapısına etkisi.....	36
Şekil 26. ÇBİ’de uygulanan üretim yönteminin şematik gösterimi.....	37
Şekil 27. ÇBİ yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen dolgu miktarlarının yıllara göre dağılımı.....	38
Şekil 28. ÇBİ macun dolgu tesisi akım şeması.....	39
Şekil 29. Macun dolgunun boru hattı ile yeraltına nakliyesi.....	39
Şekil 30. Yeraltında tipik bir macun dolgu yerleşimi ve oluşan basınçlar.....	40
Şekil 31. ÇBİ yeraltı işletmesinde oluşan barikat yıkılmaları ve olumsuz etkileri.....	41
Şekil 32. Atık malzemenin alınışı ve laboratuara getirilişi.....	44
Şekil 33. Atık malzeme örneğinin tane boyut dağılımı.....	45
Şekil 34. Atık malzeme örneğinin XRD profili (Py: Pirit; Qtz: Kuvars).....	46
Şekil 35. Deneysel çalışmalarda kullanılan bağlayıcı ve mineral katkı maddeleri.....	46
Şekil 36. Çimento malzemelerinin tane boyut dağılımı.....	47
Şekil 37. Doğal puzolan malzemelerinin tane boyut dağılımı.....	49
Şekil 38. AT malzeme örneğinin XRD profili (Fsp: Feldispat; Qtz: Kuvars; Fe ₂ -Act: Ferroaktinolit).....	50
Şekil 39. FT malzeme örneğinin XRD profili (Ill: İllit; Fsp: Feldispat; Qtz: Kuvars).....	50
Şekil 40. KP malzeme örneğinin XRD profili.....	51
Şekil 41. Yapay puzolan malzemelerinin tane boyut dağılımı.....	52
Şekil 42. YFC malzeme örneğinin XRD profili.....	53
Şekil 43. ACM malzeme örneğinin XRD profili.....	54
Şekil 44. UK malzeme örneğinin XRD profili (Qtz: Kuvars; Po: Portlandit; Anh: Anhidrat; Cal: Kalsit).....	54
Şekil 45. SD malzeme örneğinin XRD profili (Fsp: Feldispat; Qtz: Kuvars).....	55
Şekil 46. Macun dolgu slamplarının akışkanlaştırıcı katkı ilavesine göre değişimi.....	56
Şekil 47. Slamp test takımı (sol) ve slamp ölçüm işlemi (sağ).....	57
Şekil 48. Macun dolgu slamplarının katı içeriğine karşı değişimi.....	58
Şekil 49. Macun dolgu karışımında kullanılan mikser (a), karıştırma işlemi (b), drenaj düzenek sistemi (c) ve numunelerin kür alması (d).....	60
Şekil 50. Bilgisayar kontrollü tek eksenli basınç dayanımı ve deformasyon ölçer cihazı.....	61
Şekil 51. Örnek bir tek eksenli basınç ve deformasyon test sonucu.....	61
Şekil 52. Bağlayıcı tipinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	68

Şekil 53. Bağlayıcı oranının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi	70
Şekil 54. Su/çimento oranının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi	71
Şekil 55. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında FT ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi	73
Şekil 56. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında AT ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	73
Şekil 57. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında KP ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	74
Şekil 58. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında ACM ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	76
Şekil 59. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında UK ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	77
Şekil 60. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %20-60 oranında YFC ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	78
Şekil 61. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %5-15 oranında SD ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	79
Şekil 62. CEM I 42,5 ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi	80
Şekil 63. CEM II/A 42,5 ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	81
Şekil 64. Çimentolu macun dolgu numunelerinin genel mikroyapısı.....	82
Şekil 65. CEM I 42,5 (a,b) ve SDÇ 32,5 kullanılarak (c, d, e, f) hazırlanan numunelerin (360 günlük) mikroyapısı.....	83
Şekil 66. CEM II/A 42,5 kullanılarak %5 (a, b), %7 (c, d) ve 6.10 su/çimento oranında (e,f) hazırlanan numunelerin (360 günlük) mikroyapısı.....	84
Şekil 67. CEM I 42,5 (a) ve eşit oranda CEM I 42,5 ve SDÇ 32,5 (b) kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin (360 günlük) XRD profili (Py: Pirit; Gp: Alçıtaşı; Qtz: Kuvars; Po: Portlandit; Kln: Kaolinit; Sa: Sanidin; Ill: İllit; Chl: Klorit; C: Paris plasteri; Fsp: Feldispat; Brt: Barit).....	85
Şekil 68. CEM I 42,5 (a), SDÇ 32,5 (b) ve CEM II/A 42,5 (c, d) kullanılarak %5-7 çimento oranında hazırlanan numunelerin 360 günlük kür süresi sonundaki görünümü	86
Şekil 69. Çatlaklardan içeriye giren havanın oksidasyona etkisi.....	87
Şekil 70. CEM I 42,5 yerine %20 oranında KP (a, b), AT (c, d) ve FT (e, f) ikame edilerek hazırlanan numunelerin (360 günlük) mikroyapısı	88
Şekil 71. CEM I 42,5 yerine %20 oranında KP (a) ve AT (b) ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinin XRD profili (Py: Pirit; Gp: Alçıtaşı, Qtz: Kuvars, Po: Portlandit; Kln: Kaolinit; Ill: İllit; C: Paris plasteri; Fsp: Feldispat).....	89
Şekil 72. CEM I 42,5 (a) ve CEM I 42,5 yerine %30 oranında AT (b), FT (c) ve KP (d) ikame edilerek hazırlanan numunelerin 360 günlük kür süresi sonundaki görünümü.....	90

Şekil 73. CEM I 42,5 yerine %20 YFC ve ACM kullanılarak hazırlanan numunelerin (360 günlük) SEM görünümü ve EDS spektrumu.....	91
Şekil 74. CEM I 42,5 yerine %20 oranında YFC (a) ve ACM (b) ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinin XRD profili (Py: Pirit; Qtz: Kuvars; Chl: Klorit; C: Paris plasteri; Fsp: Feldispat; Jrs: Jarosit).....	92
Şekil 75. Macun dolguda hidrasyon ve bozunma sürecinin şematik gösterimi.....	93
Şekil 76. CEM I 42,5 yerine %30 oranında ACM (a), FA (b), %15 oranında SD (c) ve %60 oranında YFC (d) ikame edilerek hazırlanan numunelerin 360 günlük kür süresi sonundaki görünümü.....	94
Şekil 77. CEM I 42,5 + NA (a), CEM I 42,5 + HA (b) ve CEM II/A 42,5 + SA (c) kullanılarak hazırlanan numunelerin (360 günlük) SEM görünümü ve EDS spektrumu	96
Şekil 78. CEM I 42,5 + NA (a) ve CEM II/A 42,5 + SA (b) kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin XRD profili (Py: Pirit; Qtz: Kuvars; Chl: Klorit; C: Paris plasteri; Fsp: Feldispat; Ill: İllit; Brt: Barit).....	97
Şekil 79. CEM I 42,5 + NA (a), CEM I 42,5 + SA (b), CEM II/A 42,5 + SA (c) ve CEM II/A 42,5 + HA (d) kullanılarak hazırlanan numunelerin 360 günlük kür süresi sonundaki görünümü.....	98
Şekil 80. Bağlayıcı tipi (a, b), oranı (c, d) ve su/çimento oranının (e, f) macun dolgu numunelerinin 28 ve 360 günlük kür süreleri sonundaki eksenel gerilme-birim deformasyon davranışına etkisi.....	100
Şekil 81. Mineral katkı maddesi olarak YFC (a, b) ve AT (c, d); akışkanlaştırıcı olarak SA kullanımının macun dolgu numunelerinin 28 ve 360 günlük kür süreleri sonundaki eksenel gerilme-birim deformasyon davranışına etkisi.....	102
Şekil 82. Numunelerin 28 ve 360 günlük kür süresi sonundaki kırılma şekilleri.....	103

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Farklı karışımlara ait ön gerilme ve slamp değerleri.....	11
Tablo 2. Macun dolgunun dayanım ve durabilitesini etkileyen faktörler.....	13
Tablo 3. Çimento tipi, oranı ve su/çimento oranının etkisini belirlemek amacıyla hazırlanan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri.....	43
Tablo 4. Doğal (FT, AT ve KP) ve yapay puzolan (UK, SD, YFC, ACM) kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri.....	43
Tablo 5. Kimyasal katkı maddelerinin etkisini belirlemek amacıyla hazırlanan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri.....	43
Tablo 6. Atık malzemenin fiziksel ve kimyasal bileşimi.....	45
Tablo 7. Kullanılan bağlayıcıların kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri.....	48
Tablo 8. Doğal puzolanların kimyasal, fiziksel ve mineralojik bileşimi.....	49
Tablo 9. Puzolanik etkinliğin belirlenmesi için harçların hazırlanmasında kullanılan karışım oranları (TS 25, 1975).....	51
Tablo 10. Yapay puzolanların kimyasal, fiziksel ve mineralojik bileşimi.....	53
Tablo 11. Kimyasal katkı maddelerine ait bazı özellikler.....	56
Tablo 12. Çimento tipi, oranı ve su/çimento oranının macun dolgu performansına etkisini belirlemek için tasarlanan deneysel çalışma koşulları.....	59
Tablo 13. Portland çimentosu yerine belirli oranlarda doğal ve yapay puzolan ikamesinin macun dolgu performansına etkisini belirlemek için tasarlanan deneysel çalışma koşulları.....	59
Tablo 14. Karışıma akışkanlaştırıcı ilavesinin macun dolgu performansına etkisini belirlemek için tasarlanan deneysel çalışma koşulları	59
Tablo 15. Doğal puzolanların kimyasal ve puzolanik etkinlik deney sonuçlarının TS 25 ile karşılaştırılması.....	65
Tablo 16. Yapay puzolanların kimyasal ve puzolanik etkinlik deney sonuçlarının ASTM C 618 ile karşılaştırılması.....	66
Tablo 17. Bağlayıcı indeks değerleri ve numunelerde görülen dayanım kayıpları.....	75
Tablo 18. Macun dolgu numuneleri için hesaplanan teğetsel Young modülleri (E_t).....	104

SEMBOLLER DİZİNİ

ACM	: Atık Cam Malzeme
AMD	: Asidik Maden Suyu
ASTM	: American Society for Testing and Materials
AT	: Akkuş Tras
CEM I 42,5	: Portland Çimentosu
CEM II/A 42,5	: Portland Kompoze Çimento
CH	: Portlandit
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat
Cc	: Eğrilik Katsayısı
Cu	: Uniformluk Katsayısı
ÇBİ	: Çayeli Bakır İşletmeleri
EDS	: Noktasal Analiz Tekniği
FT	: Fatsa Tras
HA	: Hiper Akışkanlaştırıcı
KP	: Kayseri Pumis
NA	: Normal Akışkanlaştırıcı
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
SD	: Silis Dumanı
SDÇ 32,5	: Sülfata Dayanıklı Çimento
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	: Türk Standartları
TI	: Portland Çimentosu
TV	: Sülfata Dayanıklı Çimento
UK	: Uçucu Kül
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
XRD	: X-Işını Difraksiyonu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bakır ve kurşun gibi metalik sülfürlü cevherlerin üretimi ve zenginleştirilmesi işlemleri sonucunda, önemli miktarda sülfür içeriği yüksek atık açığa çıkmaktadır. Sülfürlü minerallerin (pirit, pirotit vb.) su ve oksijen varlığında oksidasyona uğraması, asidik maden suyu (AMD) oluşumuna (Şekil 1) ve atık içerisinde bulunan arsenik (As), bakır (Cu) ve çinko (Zn) gibi metallerin çözünmesine yol açarak çevre kirliliğine neden olmaktadır (Gray, 1997; Kuyucak, 1998; Akçil ve Koldaş, 2006). Ayrıca cevher zenginleştirme işlemleri esnasında kullanılan kimyasal maddeler, atıkların çevreye olan olumsuz etkilerini çok yönlü hale getirmektedir (Çetiner vd., 2006). Bu nedenle, çevresel açıdan zararlı bu tür atıkların kontrolü (nereye depolanacağı, atıkların durabilitesi ve emniyeti, su ve toprak kalitesi üzerindeki etkileri vb.), çevresel açıdan oldukça önemlidir.

Sülfürlü atıkların asit ve sülfat oluşturma potansiyelini engellemek veya azaltmak için genellikle sülfürlü atıkların; i) ayrıştırılması, ii) yeraltı, denizaltı ve yerüstü atık havuzlarında kontrollü bir biçimde depolanması, iii) geçirgenliği düşük toprakla veya sentetik/organik malzeme ve bileşenleriyle örtülmesi ve iv) alkali minerallerin ortama ilave edilmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır (Hilson ve Murck, 2001; Xenidis vd., 2002; Yılmaz vd., 2004).

Günümüzde genellikle yerüstü atık barajlarına ve denizlere deşarj edilen sülfürlü maden atıkları, son yıllarda önemi giderek artan macun dolgu teknolojisi ile yeraltı üretim boşluklarında güvenli bir şekilde depolanabilmektedir. Böylece sülfürlü atıkların atmosferik koşullarda bozunması sonucu oluşabilecek çevresel etkiler azaltılmaktadır. Madencilik endüstrisinde macun dolgu yöntemi oldukça yeni bir teknolojidir. Tesis atıklarının tamamına yakını macun dolgu yöntemi ile tahkimat amaçlı veya güvenli çalışma koşulları tesis etmek amacıyla yeraltı üretim boşluklarında depolanmaktadır. Böylece hem yerüstü çevresel etki azalmakta hem de yerüstü ve yeraltı zemin şartları iyileşmektedir (Ünal ve Çakmakçı, 2000; Yılmaz, 2003).



Şekil 1. Madencilik işlemleri sonucu asidik maden suyu (AMD) oluşumu

1.1.1. Tezin Gerekçe ve Amacı

Macun dolgu, kısmen susuzlaştırılmış tesis atıkları (ağırlıkça %78-85 katı), su ve bağlayıcı (ağırlıkça %3-9) karışımından oluşmaktadır. Sülfür içeriği yüksek olan atıkların macun dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda uzun dönemde durabilite açısından bazı problemlerle karşılaşıldığı bilinmektedir. Nedenleri tam olarak anlaşılammakla beraber sülfür içeriği yüksek atıkların asit ve sülfat oluşumuna yol açtığı ve buna bağlı olarak dolgu matriksi içinde genleşme özelliğine sahip ikincil alçıtaşı ve etrenjit mineralleri oluşumuna neden olduğu belirtilmektedir (Ouellet vd., 1998; Benzaazoua vd., 1999, Bernier vd., 1999; Hassani vd., 2001; Benzaazoua vd., 2002). Bu minerallerin, dolgunun durabilitesini kaybetmesine ve sonuçta göçüklere yol açmak suretiyle istenmeyen işgücü kayıplarına ve üretimin durmasına neden olduğu ileri sürülmektedir (Kesimal vd., 2004, 2005; Fall ve Benzaazoua, 2005; Tariq ve Nehdi, 2007. Ayrıca piritin oksidasyonu sonucu açığa çıkan asit, hidrasyon ürünlerinin bağlayıcılık özelliklerini kaybetmelerine yol açarak dolgu dayanım ve durabilitesini azaltmaktadır.

Macun dolgu teknolojisinin oldukça yeni bir teknoloji olmasından dolayı özellikle sülfür içeriği yüksek atıklardan üretilen dolgunun uzun dönemde durabilitesinin bozulmasının nedenleri (piritin oksidasyonu vb.) halen araştırılmakta ve önleyici çözümler aranmaktadır. Beton endüstrisinde asit ve sülfat etkisi olarak adlandırılan bu problemin çözümünde en etkili yöntemin, puzolanik özelliğe sahip mineral katkı malzemelerinin (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, tras vb.) kullanımı olduğu belirtilmektedir. Çimento giderlerinin dolgu işletme giderlerinin %50-80'ini teşkil ettiği göz önüne alındığında, bağlayıcı niteliğe sahip puzolanik katkı maddelerinin dolguda kullanılması asit ve sülfat

etkisine karşı dolgunun durabilitesinin arttırılmasında etkin rol oynayacak ve aynı zamanda, çimento tüketimini ve tesis işletme giderlerini önemli ölçüde azaltacaktır. Ayrıca inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan akışkanlaştırıcı gibi bazı kimyasal katkı maddelerinin de su/çimento oranını azaltmak suretiyle macun dolgu dayanımı, durabilitesi ve reolojik özellikleri açısından olumlu sonuçlar verebilir.

Bu doktora tez çalışmasının başlıca amacı;

1. Bağlayıcı tipi, oranı ve su/çimento oranının macun dolgu performansına etkisinin araştırılması ve dolgunun dayanım ve durabilitesi açısından en uygun bağlayıcı tipi ve oranının belirlenmesi,
2. Macun dolguda bağlayıcı olarak normal Portland çimentosu yerine belirli oranlarda mineral ve kimyasal katkı maddesi kullanımının potansiyel faydalarının ortaya konulması,
3. 360 günlük kür süresi sonunda kırılan numunelerin mineralojik ve kimyasal açıdan karakterize edilmesi ve ikincil minerali oluşumunun araştırılmasıdır.

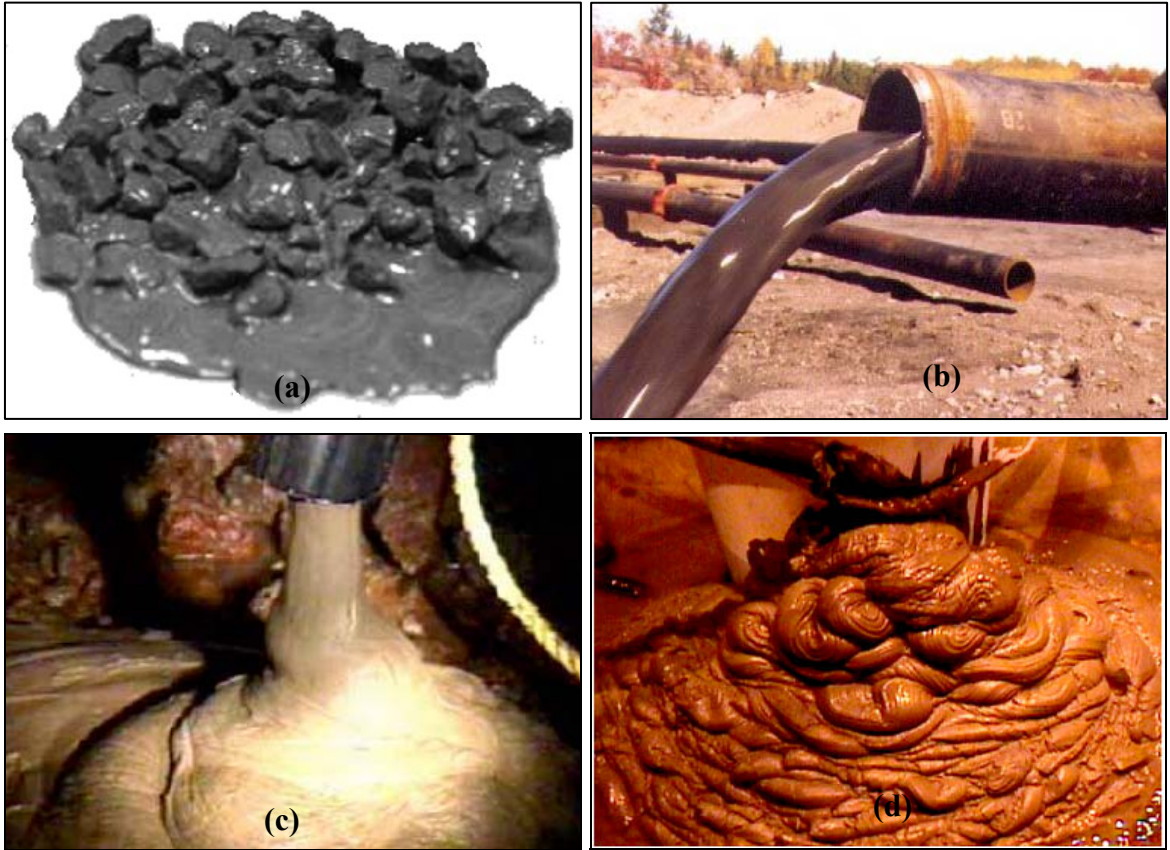
1.2. Madencilikte Dolgu İşlemi

Dolgu, yeraltı maden ocaklarında cevher üretimi sonucu oluşan boşlukları uygun bir malzeme kullanarak tahkimat sağlamak, topukların kazanımı ve/veya atıkları depolamak amacıyla yapılan doldurma işlemidir (Archibald vd., 1993). Yeraltı madenciliğinde uygulanan dolgu işlemi gerek yeraltı faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yapılması gerekse de yüzeyde meydana gelen çökmeleri engelleme açısından büyük bir öneme sahiptir. Dolgunun cevheri alınmış bölgelere yerleştirilmesi genellikle karışım içerisine bir miktar bağlayıcı ve karışım suyu ilave edilerek gerçekleştirilmektedir. Dolgu malzemesi olarak genellikle tesis atıkları, kum, taşocaklarından patlatma sonucu elde edilen iri kayaç parçaları ve kırılmış agrega kullanılmaktadır (Çakmakçı, 1997). Yeraltı maden sahalarında yaygın olarak kaya dolgu, hidrolik dolgu ve macun dolgu yöntemleri kullanılmaktadır.

Kaya dolgusu, cevheri alınmış boşlukları doldurmak için pasa olarak adlandırılan yan kayaç ve çeşitli boyutta agregalardan oluşan bir dolgu tipidir. Kaya dolgu uygulamasında malzemenin taşocağı vb. yerlerden temin edilmesi durumunda, maliyet önemli oranda artmaktadır. Ancak, aynı çimento oranında diğer dolgu yöntemlerine kıyasla dayanım kazanımı oldukça yüksektir (Yılmaz, 2003; Kuganathan, 2005).

Hidrolik dolgu, malzemenin su ile nakli, üretilen yerin doldurulması, fazla suyun katı dolgu malzemesinden ayrışması ve sertleşmesi esasına dayanır. Hidrolik dolgu yönteminde kullanılan malzemenin tane boyut dağılımı, dolgunun yeraltına nakliyesi ve yerleştirilmesi sonrası fazla suyun drenajı açısından önemlidir. Bu nedenle hidrolik dolguda genellikle sınıflandırılmış atıklar kullanılmaktadır (Yılmaz, 2003). Hidrolik dolgu, yeraltında oluşturulan açıklıklara yerleştirildiğinde dolgu içindeki fazlalık su, drenaj yoluyla uzaklaşmaktadır. Hidrolik dolguda tesis edilen barikatın sağlamlığı, sıvılaşma riski veya zayıf drenaj nedeniyle oluşabilecek göçüklerin engellenmesi bakımından önemlidir (Grice, 2005).

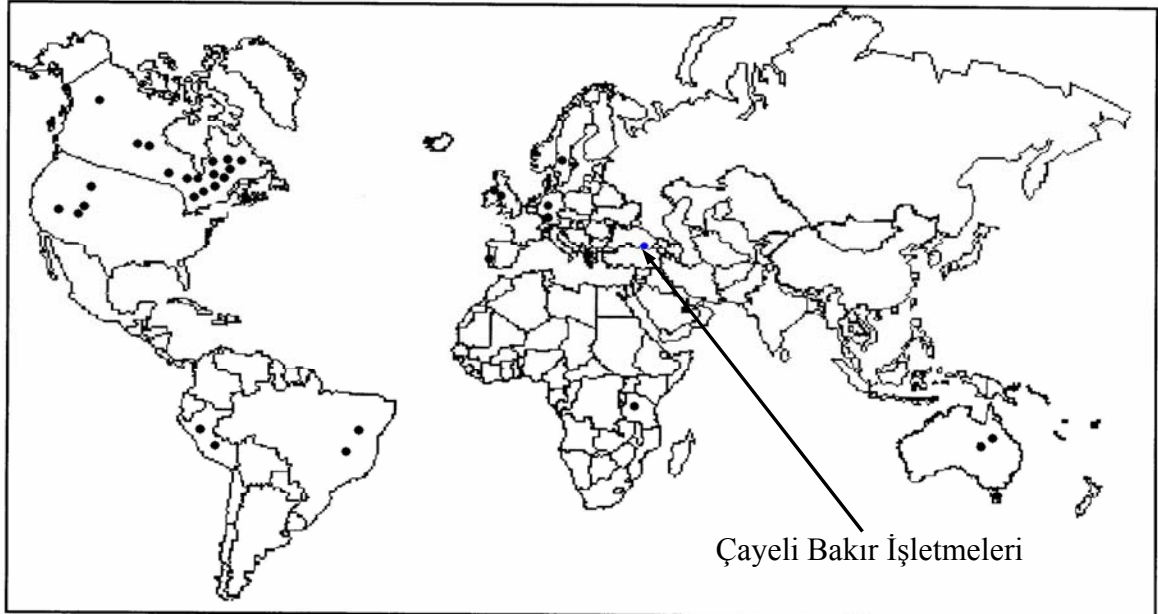
Macun dolgu, yüksek yoğunluklu tesis atıkları (tane boyut dağılımı ve özgül ağırlığına bağlı olarak %78–85 katı oranında), dolgunun dayanım kazanımını sağlamak için bağlayıcı ve yeraltı üretim boşluklarına istenen kıvamda taşınmasını sağlamak için ilave edilen karışım suyundan oluşmaktadır (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995). Şekil 2, yeraltı madenlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan kaya, hidrolik ve macun dolgu bileşiminin yapısal görünümünü göstermektedir.



Şekil 2. Kaya (a), hidrolik (b) ve macun (c, d) dolgunun yapısal görünümü

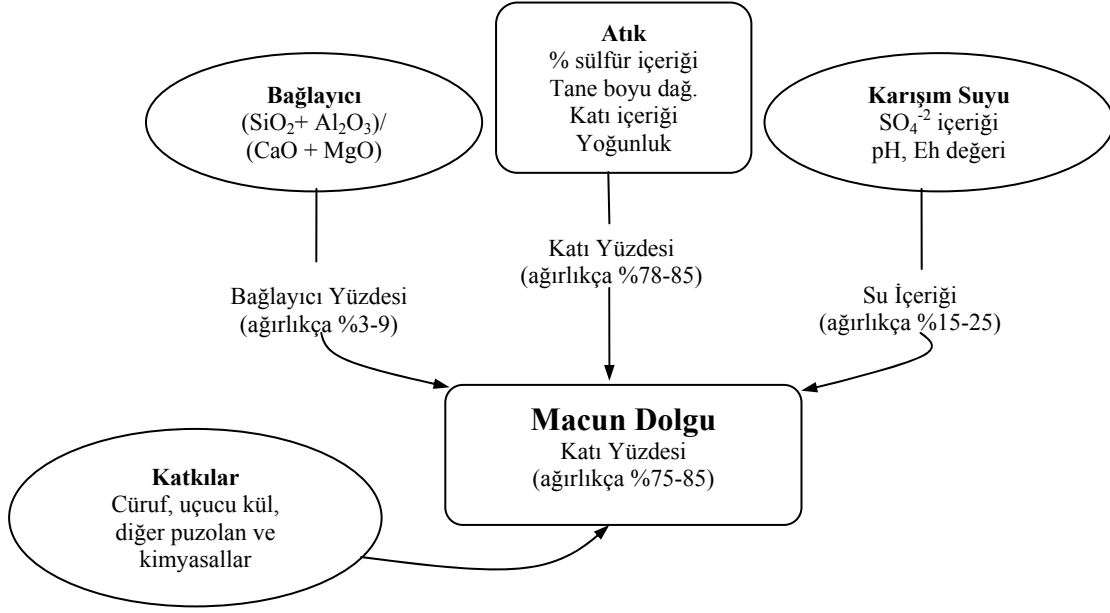
1.3. Macun Dolgu Yöntemi

Madencilik endüstrisinde macun dolgu, nispeten yeni bir yöntemdir. İlk olarak 1980 yılında Almanya'da Grund Madeninde kullanılmış ve başarısından dolayı dünyada yaygın olarak uygulanan dolgu yöntemlerinden birisi olmuştur. Kullanımı özellikle Kanada ve Avustralya yeraltı madenciliğinde çok yaygın olan macun dolgu teknolojisi son yıllarda hem hidrolik ve kaya dolgusuna kıyasla düşük işletme maliyeti ve cevher zenginleştirme atıklarının tamamının yeraltında depolanmasına imkan sağlaması ve hem de atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerinde önemli ölçüde azalma sağlaması nedeniyle günümüzde diğer ülkeler tarafından da tercih edilmeye başlanmıştır (Landriault, 2006). 1980 yılında sadece bir işletmede uygulanan macun dolgu teknolojisi bugün, dünya genelinde başta Kanada ve Avustralya olmak üzere, ABD, Almanya, Peru, Brezilya, İsveç, Güney Afrika, Tanzanya, İrlanda ve Türkiye'de toplam 30'dan fazla yeraltı madeninde uygulanmaktadır (Şekil 3). Ülkemizdeki kullanımı ise henüz yeni olup 1999 yılında Çayeli Bakır İşletmesi'nde uygulanmaya başlanmıştır.



Şekil 3. Dünyada macun dolgu teknolojisinin uygulandığı yerler

Macun dolgu, atık malzeme (ağırlıkça katı oranı %78-85), bağlayıcı ve su karışımı olarak ifade edilmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Macun dolguyu oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi (Yılmaz vd., 2003)

Karışımında kullanılan kıyık malzeme, cevher zenginleştirme tesisinden elde edilen atık malzemelerdir. Macun dolgunun yeraltına borularla belli bir akışkan kıvamda taşınabilmesi ve sürtünme nedeniyle oluşabilecek aşınma problemlerini önlemek ve su tutmayı sağlamak için en az ağırlıkça %15 veya daha yüksek oranda 20 µm altı ince taneli atık malzeme olması gerekmektedir (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995). Dolgunun dayanım kazanımını sağlaması için, macun dolguya ağırlıkça %3-9 oranında bağlayıcı ilave edilmektedir. Bağlayıcının hidrasyonu ve dolgunun yeraltına belli bir akışkan formda taşınması amacıyla ilave edilen su, ağırlıkça %15-25 arasında değişmektedir.

1.3.1. Macun Dolgu Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Yeraltı maden ocaklarında macun dolgu kullanımının avantaj ve dezavantajları kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Atıkların tamamına yakınının yeraltında depolanmasını sağlamakta ve böylece yerüstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetleri önemli oranda azalmaktadır.
- Boru hattı ile yeraltına taşınması, klasik taşıma sistemlerinin (konveyör ve mobil ekipmanlar) yol açtığı problemleri (tahkimatın zarar görmesi, trafik problemi vb.) azaltmaktadır.
- Kaya ve hidrolik dolgu yöntemlerine kıyasla işletme maliyetleri düşüktür.

- Aynı bağlayıcı oranında hidrolik dolguya kıyasla nispeten daha erken sürede yüksek dayanım kazanımı sağladığından madencilik işlemleri (ocağın döngü süresi) kısalmaktadır.
- Katı oranının yüksek, porozitesinin düşük ve taşınması ve yerleştirilmesi esnasında ayrışmanın oluşmaması nedeniyle bünyesinden daha az miktarda su drene olmakta ve drenajla birlikte ayrılacak bağlayıcı miktarı azalmaktadır.
- Yeraltına yerleştirilen macun dolgu içindeki ince malzemenin uzaklaştırılmasına gerek olmadığından daha temiz bir işlem yürütülmektedir.
- Dolgu malzemesi olarak kullanılacak diğer doğal kaynakların (kaya, agrega, çakıl vb.) tüketimi azalmaktadır.

Macun dolgunun dezavantajları ise şöyle sıralanabilir:

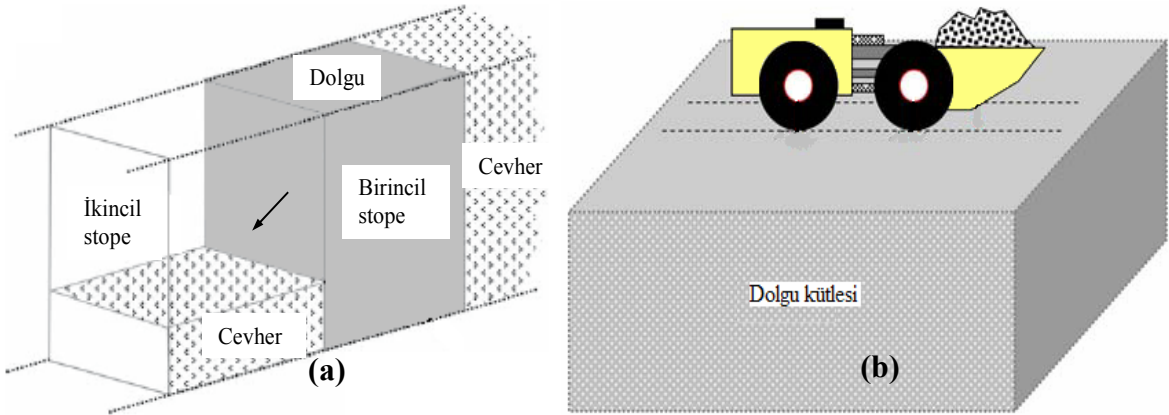
- İlk yatırım maliyetleri yüksek ve yüksek katı yoğunluğu nedeniyle pompalama ve susuzlaştırma işlemleri pahalıdır.
- Macun dolguyu yeraltına nakletmek için yüksek pompa basıncı gerekmektedir. Bu ise pompa bakım ve enerji maliyetlerini artırmaktadır.
- Özellikle sülfürlü atıkların su ve oksijen varlığında oksidasyona uğraması macun dolgunun uzun dönemde durabilitesini kaybetmesine neden olabilmektedir.
- Tane boyutu, yoğunluk, özgül ağırlık ve su miktarındaki değişikliklerde dolgunun yeraltına nakliyatında problemler oluşabilmektedir.
- Teknolojinin yeni olması nedeniyle kalifiye elemana ve büyük çapta mühendislik tasarımına gereksinim duyulmaktadır.

1.4. Macun Dolgu Tasarımında Önemli Faktörler

1.4.1. Dayanım ve Durabilite

Macun dolgu tasarımında göz önüne alınması gereken en önemli etken, kısa ve uzun dönem mekanik özellikleridir. Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun dayanım ve durabilitesi, çalışma alanlarının emniyeti ve cevher seyrelmesinin kontrolü bakımından büyük önem arz etmektedir. Çünkü yeraltında meydana gelecek göçükler çevresel problemlere (tasman vb.), iş gücü kaybına ve üretim veriminin azalmasına neden

olacaktır. Belli bir kür süresi sonunda sertleşmiş veya sertleşmekte olan macun dolgunun mekanik performansı, uygulamasının ucuz ve maden işletmelerinde rutin olarak kullanılmasından dolayı, pratikte tek eksenli basınç testi ile değerlendirilmektedir (Fall ve Samb, 2006). Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolguda istenen tek eksenli basınç dayanım değerleri, dolgunun işlevine göre farklılık arz etmektedir. Örneğin, erken kür sürelerinde macun dolgunun sıvılaşma (liquefaction) riskini azaltmak ve macun dolgu barikatlarının zarar görmesini engellemek için yeraltına yerleştirilen dolgunun erken kür sürelerinde en az 0,15 MPa dayanım kazanması gereklidir (Bloss, 2002; Been vd., 2002; Roux vd., 2004). Üretim yöntemi olarak kes-doldur ve arakatlı kazı metodunun uygulandığı yeraltı madenlerinde, birincil üretim odasına (stope) yerleştirilen macun dolgunun ikincil odanın üretimi ve sonrasında macun dolgu ile doldurulması işlemleri tamamlanıncaya kadar geçen sürede kendi stabilitesini sağlaması gerekmektedir (Şekil 5a).



Şekil 5. Yeraltı üretim boşluklarında macun dolgunun işlevi

Bu amaçla yerleştirilen dolgunun 28 günlük kür süresi sonunda en az 0,7 MPa'lık dayanım kazanması gerektiği belirtilmektedir (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995). Ayrıca ekipman ve işçiler için çalışma platformu işlevini (Şekil 5b) sağlayacak dolgunun da erken kür sürelerinde yüksek dayanım kazanması gerektiği belirtilmiştir (Belem ve Benzaazoua, 2008). Macun dolgunun tavan tahkimatı sağlaması amacıyla yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilmesi durumunda ise dolgunun minimum 4 MPa'lık bir dayanıma sahip olması gerekmektedir (Grice, 1998). Macun dolgunun daha erken kür sürelerinde istenen dayanım kazanımını sağlaması, yan odaların üretimi için gerekli bekleme süresini kısaltmakta ve üretim işlemlerinin hızlanmasını sağlamaktadır. Macun dolgunun

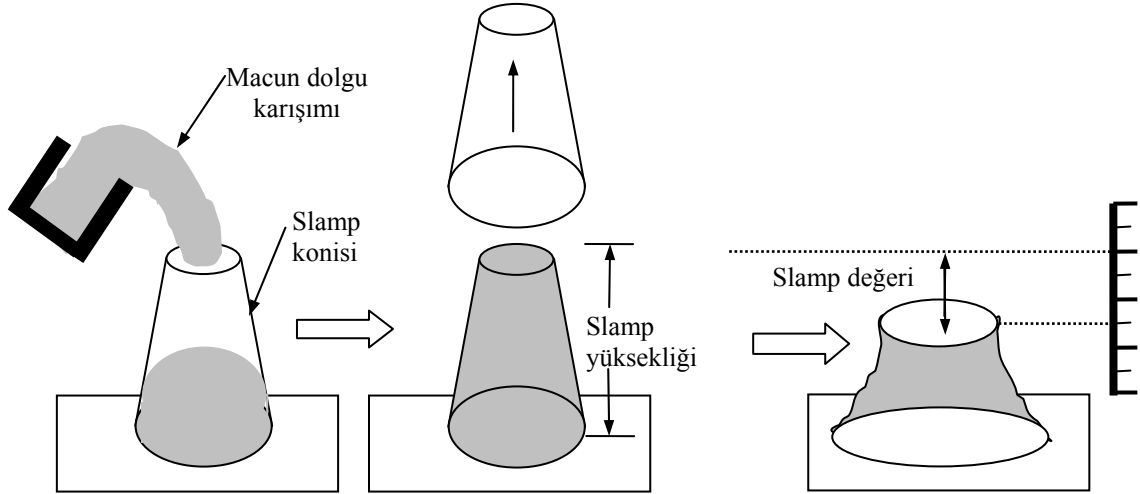
yeraltındaki konumuna ve işlevine bağlı olarak istenen dayanım değerleri uygun bir mühendislik tasarımı ile elde edilebilmektedir.

1.4.2. Reoloji

Reoloji, bir malzemenin akışkanlık özellikleri ifade etmekte olup taşınabilirliği açısından oldukça önemlidir. Yerüstü macun dolgu tesisinde hazırlanan karışımın boru hattı ile yeraltı üretim boşluklarına taşınabilmesi için belirli bir akışkanlığa sahip olması gerekmektedir (Simon, 2005). Verimli ve ekonomik bir dolgu nakli, minimum enerji ile maksimum oranda katı malzeme içeren karışımın yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Ancak katı oranının artması, karışımın akışkanlığını azaltmakta, boru hattında sürtünme kayıplarına ve tıkanmalara neden olarak dolgu nakliye verimini düşürmektedir (Huynh vd., 2006). Bu nedenle macun dolgu tasarımında göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden birisi, hazırlanacak karışımın reolojik özellikleridir.

Macun dolguyu oluşturan atık, bağlayıcı ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri karışımın akışkanlığını önemli derecede etkilemektedir. Macun dolgu akışkanlığını etkileyen başlıca faktörler; katı oranı, su/çimento oranı, bağlayıcı tipi ve oranı, mineral ve kimyasal katkı maddeleri, atık ve bağlayıcı malzemenin tane boyut dağılımı, tane şekli, özgül ağırlığı ve yüzey alanı, tanelerin yüzey özellikleri (zeta potansiyeli, su tutma vb.), atıkların mineralojik bileşimi ve karışım suyunun kimyasal (iyon konsantrasyonu ve pH) özellikleridir (Nguyen ve Boger, 1998; Zhou vd., 2001; Kesimal vd., 2002; Clayton vd., 2003; Xin-min vd., 2004; Gawu ve Fourie, 2004; Henderson vd., 2005; Huynh vd., 2006). Kesimal vd. (2004) atık içerisindeki kil minerallerinin su tutma özelliklerinden dolayı, karışımın akışkanlığını arttırdığını belirtmiştir.

Macun dolgunun reolojik özellikleri, uygulamasının pratikte kolay olması nedeniyle maden işletmelerinde genelde slamp testi ile değerlendirilmektedir (Kuganathan, 2001). Slamp, bir karışım malzemesinin koni şeklindeki kaygan bir kalıptan serbest bırakıldığında boydaki düşmenin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Slamp ölçümünün şematik gösterimi

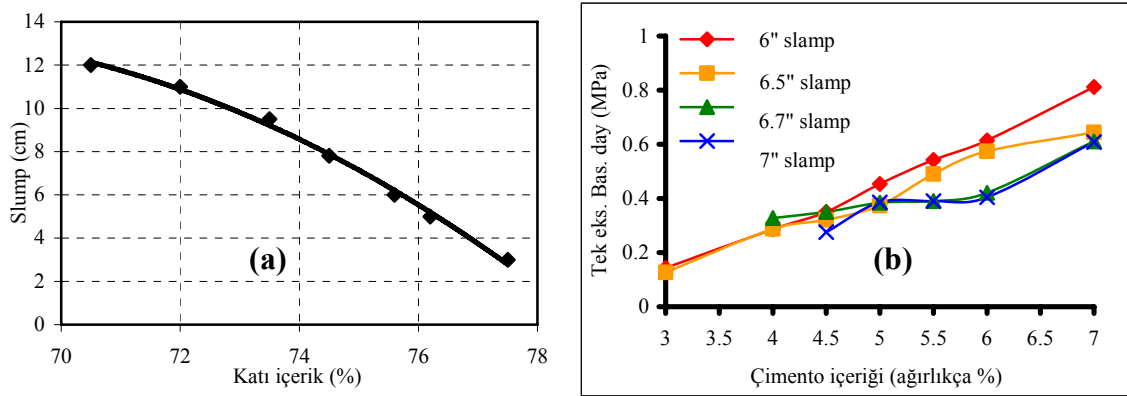
Macun dolgu uygulamalarında slamp değeri, malzemenin özelliğine bağlı olarak 6-10 inch arasında değişmekte olup, 12 inch yüksekliğindeki standart beton koni test aletiyle belirlenmektedir (Landriault vd., 1997; Cooke, 2007). Genellikle macun dolgu karışımında su miktarı arttıkça karışımın slamp değeri artmakta (Şekil 7 ve 8a) ve boru hattı ile yeraltına daha kolay nakledilmektedir (Brackebusch, 1994; Grabinsky vd., 2002; Yılmaz, 2003). Ancak fazla su ihtiva eden karışımın kür süresi uzamakta ve dolgu dayanım ve durabilitesi azalmaktadır (Şekil 8b). Huynh vd. (2006) akışkanlaştırıcı özelliğe sahip kimyasal katkı maddelerinin macun dolgunun akışkanlığını arttırdığını ve dolgunun daha düşük su/çimento oranlarında yeraltına taşınabileceğini belirtmiştir. Su/çimento oranının azalması, dolgu mikroyapısını (boşluk ve gözeneklilik) iyileştirerek dayanım ve durabilitesini arttırmakta ve dolgunun erken kür sürelerinde sıvılaşma riskini azaltmaktadır (Kesimal vd., 2005; Erçikdi vd., 2008b). Macun dolgu için uygun bir slamp değerinin belirlenmesi, boru hattı ile yeraltına nakliyesi esnasında tıkanmaları engelleyerek emniyetli ve verimli bir nakliye işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Clark vd., 1995).

Bazı araştırmacılar macun dolgunun reolojik özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi ve yeraltına taşınmasında herhangi bir problemle karşılaşılmasında için, slamp ölçümünün yanında ön gerilme (yield stres) ve viskozite ölçümlerinin de yapılmasının faydalı olacağını belirtmiştir (Mackenzie ve Rantala, 2001; Clayton vd., 2003; Fourie ve Dunn, 2007; Moghaddam ve Hassani, 2007; Belem ve Benzaazoua, 2008). Macun dolgu, Bingham plastik davranış gösterdiğinden belirli bir ön gerilmeye ulaşıncaya kadar akışkan özellik göstermez. Dolayısıyla bir ön gerilmeye ihtiyaç duyulmaktadır (Aref vd., 1992). Ön

gerilme, akışkan tanelerin statik sürtünmesini yenmesi için gerekli basınçtır. Viskozite ise, herhangi bir akışkanın akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 7. Slamp değeri yüksek (a), normal (b) ve düşük (c) dolgu



Şekil 8. Macun dolguda slamp-katı içerik (a) ve slamp-dayanım(b) arasındaki ilişki (Yılmaz, 2003)

Tablo 1. Farklı karışımlara ait ön gerilme ve slamp değerleri (Clayton vd., 2003)

	Kömür atığı	Altın atığı	Kurşun-çinko atığı
Özgül ağırlık (kg/m ³)	1450	2800	4100
Katı oranı (%)	36	75	75
Pulp yoğunluğu (kg/m ³)	1120	1930	2310
Slamp değeri (mm)	203	203	203
Ön gerilme (Pa)	160	275	330

Clayton vd. (2003) aynı slamp değerine sahip iki karışımın farklı ön gerilme değerlerine sahip olabileceğini (Tablo 1); ön gerilme değeri yüksek olan karışımların boru

hattında tıkanmalara yol açabileceği, tersi durumda ise düşük ön gerilmeli karışımların aynı çimento oranında daha düşük dayanım üreteceğini belirtmiştir. Tablo 1 incelendiğinde, özgül ağırlıklara bağlı olarak aynı slump değerindeki kömür, altın ve kurşun-çinko atıklarının farklı ön gerilme değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle özellikle atık malzeme ile ilgili tane boyut dağılımı ve özgül ağırlığı sürekli olarak değişen işletmelerde ön gerilmenin de ölçülmesi, dolgu naklinin başarısı açısından gereklilik arz etmektedir.

1.4.3. Ekonomi

Macun dolgu tasarımında göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden bir diğeri ise hazırlanacak karışımın ekonomik olmasıdır. Macun dolgu tesisi, genel olarak etkin susuzlaştırma ekipmanları, beton pompa teknolojisi, çimento ve karışım tesisleri, dolgu nakliyesinde kullanılan boru hattı ve tüm tesis için bilgisayar kontrol sistemleri vb. gerektirdiğinden ilk yatırım maliyeti yüksektir. Ancak son yıllarda susuzlaştırma ve beton pompa teknolojisindeki yeniliklere bağlı olarak ilk yatırım maliyetleri nispeten azalma eğilimi göstermiştir.

Macun dolgu işletme maliyeti, toplam maden işletme maliyetlerinin %10-20'sini teşkil etmektedir (Grice, 1998). Macun dolgu işletme maliyetlerinin en önemli kısmını ise bağlayıcı maliyetleri (ağırlıkça %3-9 bağlayıcı için 2-6\$/ton) oluşturmaktadır. Naylor vd. (1997) tipik olarak %1 bağlayıcı içeren macun dolgu karışımının tonunun 1 \$'a karşılık geldiğini belirtmiştir. De Souza vd. (2003) %3 çimento kullanılarak hazırlanan karışımın macun dolgu işletme maliyetlerinin %42'sini; Fall ve Benzaazoua (2003) ise, %5-9 oranında bağlayıcı içeren karışımın macun dolgu işletme maliyetlerinin %50-75'ini oluşturduğunu belirtmiştir. Bilindiği üzere macun dolgunun dayanım ve durabilitesini artırmak için karışıma ilave edilen bağlayıcı miktarı arttıkça, işletme maliyetleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu nedenle macun dolgu karışımının istenilen dayanım ve durabilitesini sağlayacak optimum bağlayıcı tipi ve oranının belirlenmesi, işletme maliyetlerinin azaltılması bakımından önemlidir. Bu amaçla son yıllarda Portland çimentosu yerine belirli oranlarda puzolanik özelliğe sahip mineral veya akışkanlaştırıcı özelliğe sahip kimyasal katkı maddeleri kullanılarak maliyet optimizasyonu yapılmaya çalışılmaktadır (Benzaazoua vd., 2004, Fall ve Benzaazoua, 2005b; Klein ve Simon, 2006; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2008a).

1.5. Macun Dolgunun Dayanım ve Durabilitesini Etkileyen Faktörler

Macun dolgunun kısa ve uzun dönem dayanım ve durabilitesini birçok faktör etkilemekte ve bu faktörler iç ve dış etkenler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Tablo 2). İç etkenler, dolgunun karışım özellikleri ve dolguyu oluşturan her bir bileşenin (atık, bağlayıcı ve karışım suyu) fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile ilişkilidir (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995; Amaratunga ve Yaschyshyn, 1997; Ouellet vd., 1998; Bernier vd., 1999; Belem vd., 2000; Benzaazoua vd., 2002, 2004). Dış etkenler ise macun dolgu ile doldurulan yeraltı üretim boşluğunun yan kayaç ile etkileşimi (yanal basınçlar vb.), konsolidasyon etkisi, drenaj koşulları, patlatma kaynaklı titreşimler, kür koşulları (sıcaklık, nem) vb. ile ilgilidir (Benzaazoua vd., 1999, Aubertin vd., 2003; Fall ve Samb, 2006; Yılmaz vd., 2006, 2008a,b, 2009; Erçikdi vd., 2008b, 2009d).

Tablo 2. Macun dolgunun dayanım ve durabilitesini etkileyen faktörler

İÇ ETKENLER	DIŞ ETKENLER
<p><u>Atık malzeme özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Tane boyut dağılımı • Tane şekli • Özgül ağırlık • Mineraloji • Asit ve sülfat etkisi <p><u>Bağlayıcı özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bağlayıcı tipi ve oranı • Mineral katkı maddesi (puzolan) kullanımı • Kimyasal katkı maddesi kullanımı <p><u>Karışım suyu özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • SO₄²⁻ konsantrasyonu (mg/l) • pH <p><u>Karışım özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Su/çimento oranı • Yoğunluk (%katı oranı) 	<p><u>Yerinde koşullar</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kür koşulları (sıcaklık, nem) • Konsolidasyon • Drenaj koşulları • Sıvılaşma (liquefaction) riski • Yeraltı suyu koşulları • Yan kayaçla etkileşim (yanal basınçlar, çatlak vb.) • Patlatma kaynaklı titreşimler • Dolgu yerleştirme şekli (kademeli vb.) • Dolgu barikatının sağlamlığı

1.5.1. İç Etkenler

1.5.1.1. Tane Boyut Dağılımı

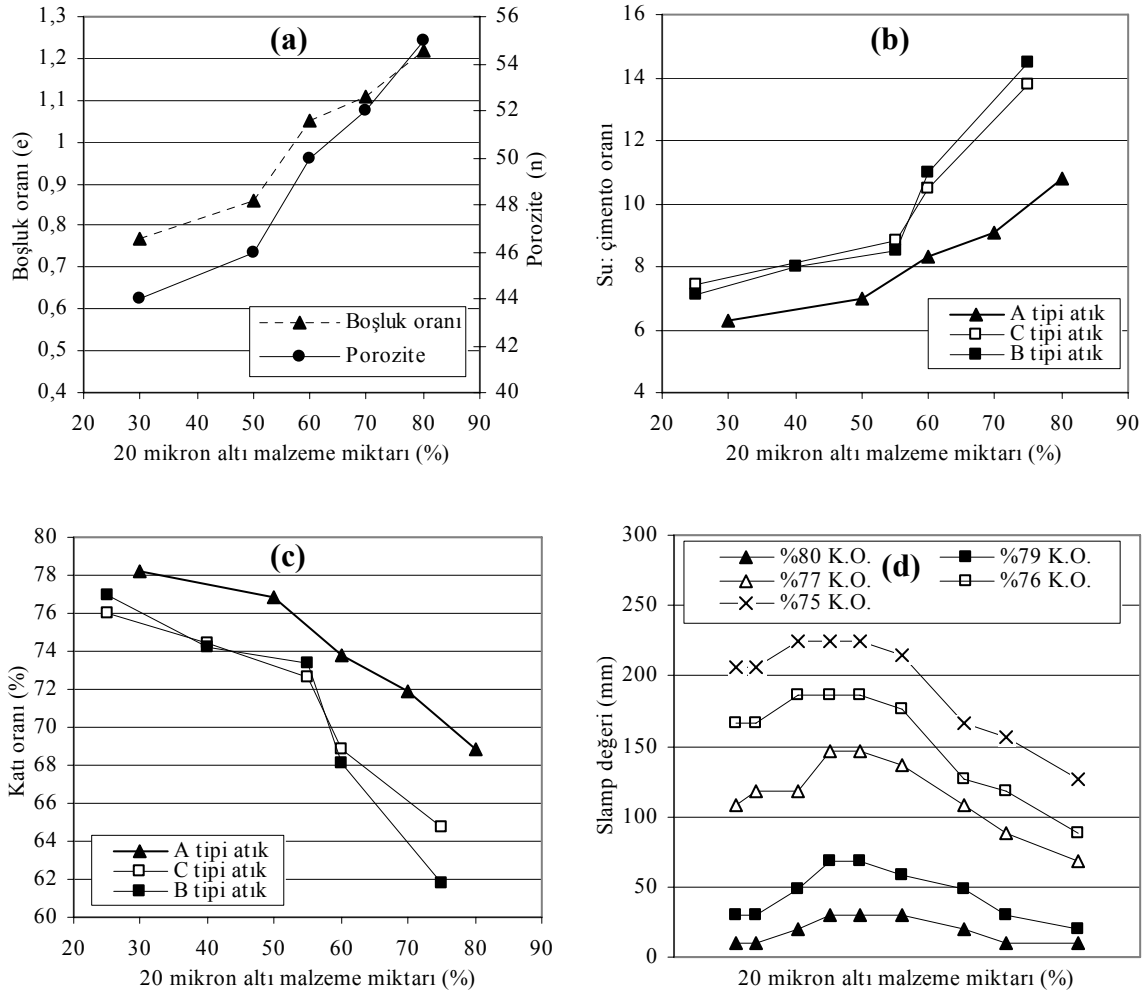
Macun dolgu hazırlanmasında kullanılan katı malzemenin tane boyut dağılımı, dolgu performansını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Karışımın macun oluşturması için taneli malzemenin 20 µm altı içeriğinin ağırlıkça en az %15 veya daha yüksek olması gerekmektedir (Brackebush, 1994; Landriault, 1995). Landriault (1995) 20 µm altı malzeme miktarına (ağırlıkça) bağlı olarak macun dolgu karışımı için üç tip boyut dağılım kategorisinin bulunduğunu belirtmiştir. Bunlar sırasıyla iri taneli atıklar (malzemenin ağırlıkça %15-35'i <20 µm), orta taneli atıklar (malzemenin ağırlıkça %35-60'ı <20 µm) ve ince taneli atıklar (malzemenin ağırlıkça %60-90'ı <20 µm) olarak adlandırılmaktadır.

Yüksek oranda ince tane içeren atık malzeme, üniform bir tane boyut dağılımının oluşmasına neden olmakta ve arzu edilen dağılım derecesini düşürmektedir. Karışım içerisinde 20 µm'dan küçük malzeme miktarı arttıkça dolgunun katı oranı ve slamp değeri (belli bir katı oranındaki) azalmaktadır (Şekil 9). Porozite ve boşluk oranı, su/çimento oranı ve su tutma kapasitesi ise 20 µm altı malzeme miktarının artmasıyla artmaktadır (Aubertin vd., 1996; Kuganathan, 2001; Fall vd., 2004, 2005a). Buna göre belli bir akışkanlıkta katı oranı, ince taneli atıklar için daha düşüktür.

Atık malzemenin tane boyut dağılımı, dolgunun mikroyapısı (toplam porozite ve boşluk oranı) üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. İri taneli atıklardan hazırlanan macun dolgu karışımları ince taneli atıklardan hazırlanan karışımlara kıyasla drenaj yoluyla daha fazla su bırakmaktadır (Belem vd., 2002). Karışım bünyesinden fazla suyun uzaklaşması; i) macun dolgunun üretim boşluklarına homojen bir şekilde yerleştirilmesini sağlamakta, ii) erken kür sürelerinde sıvılaşma riskini azaltmakta, iii) porozite ve boşluk oranında azalma sağlamakta ve iv) dolgunun kısa ve uzun dönem dayanım ve durabilitesini arttırmaktadır (Benzaazoua vd., 2004, Erçikdi vd., 2008b).

Ortamda 20 µm altı malzeme miktarının artması, çimento ile kaplanması gereken yüzey alanını artırmaktadır. Bu da macun dolguda dayanımın düşmesine yol açmakta veya istenen dayanımı elde etmek için daha fazla çimento kullanılmasını gerektirmektedir. Aynı su/çimento oranında iri taneli atıklardan (ince malzeme oranı düşük) hazırlanan macun dolgu karışımının, ince taneli atıklardan hazırlanan karışıma kıyasla daha hızlı dayanım kazanımı sağlayacağı düşünülmektedir. Çünkü, hidrasyon ürünleri (C-S-H vb.) ile

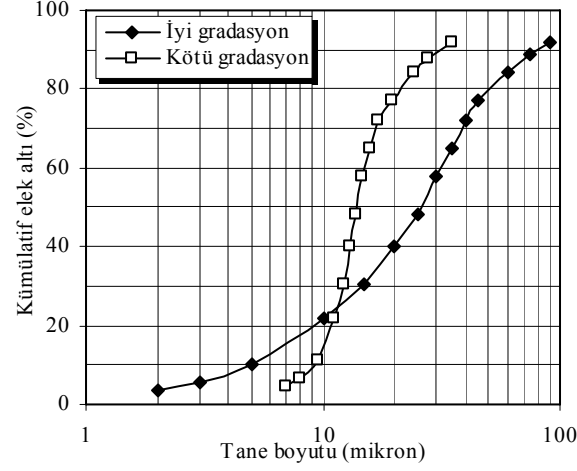
doldurulması gereken boşluk hacmi, iri taneli atıklardan hazırlanan karışımlarda nispeten daha düşüktür.



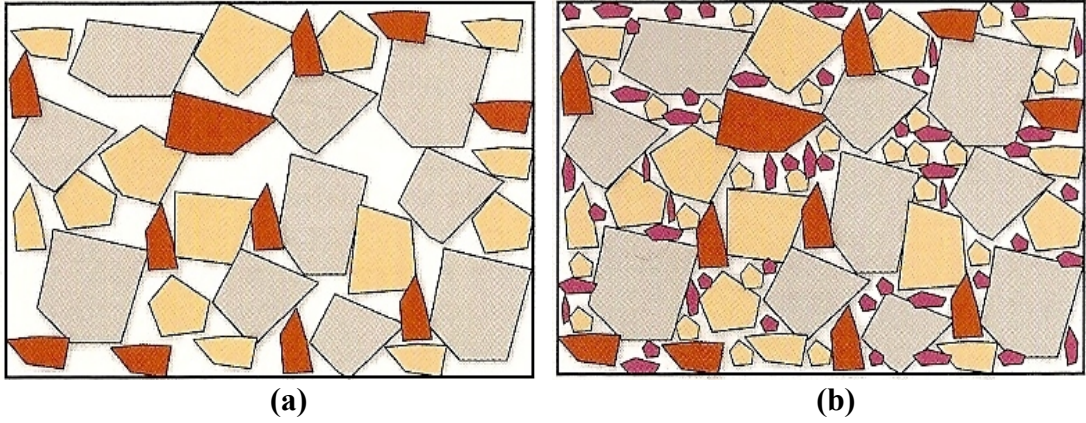
Şekil 9. 20 mikron altı malzeme miktarı ile boşluk oranı ve porozite (a); su/çimento oranı (b); katı oranı (c) ve slamp (d) arasındaki ilişki (Fall vd., 2004)

Macun dolgu malzemesi olarak kullanılacak atık malzemenin tane boyut dağılımı; dolgunun dayanımı, durabilitesi ve yeraltı üretim boşluklarına nakliyesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle karışım içindeki malzemenin optimum tane boyut dağılımına sahip olması ve her fraksiyon boyutundaki malzemenin içermesi istenmektedir (Şekil 10). Optimum tane boyut dağılımı aynı zamanda iri taneler arasını ince tanelerin doldurması ve çimento ile daha iyi bir etkileşim sağlayacak karışımın elde edilmesi olarak da ifade edilmektedir (Şekil 11). Optimum tane boyut dağılımına sahip olmayan atıkların macun dolgu dayanım ve durabilitesini azalttığı belirtilmektedir (Kesimal vd., 2003). Ancak

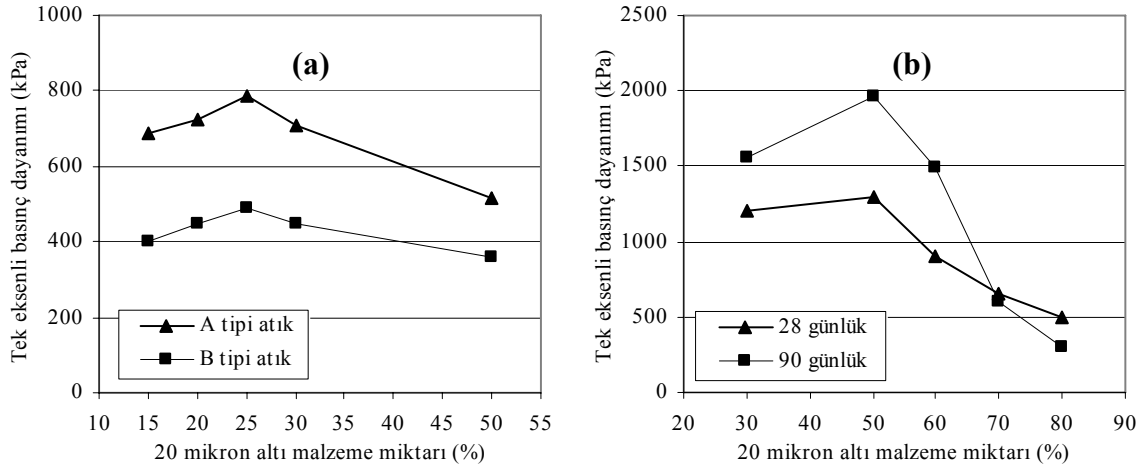
literatürde dayanım kazanımı açısından ağırlıkça 20 μm altı optimum malzeme miktarının değiştiği görülmektedir. Kesimal vd. (2003) iki farklı atık örnek üzerinde yapmış olduğu deneysel çalışmada en yüksek dayanım kazanımını 20 μm altı ağırlıkça %25 (Şekil 12a); Fall vd. (2004) ise 20 μm altı ağırlıkça %50 olan atık malzemenin sağladığını belirtmiştir (Şekil 12b).



Şekil 10. İyi ve kötü tane boyut dağılımı



Şekil 11. İri taneli (a) ve iri ve ince taneli (b) atıklardan oluşan karışım



Şekil 12. 20 mikron altı malzeme miktarının macun dolgu dayanımına etkisi (Kesimal vd., 2003; Fall vd., 2004)

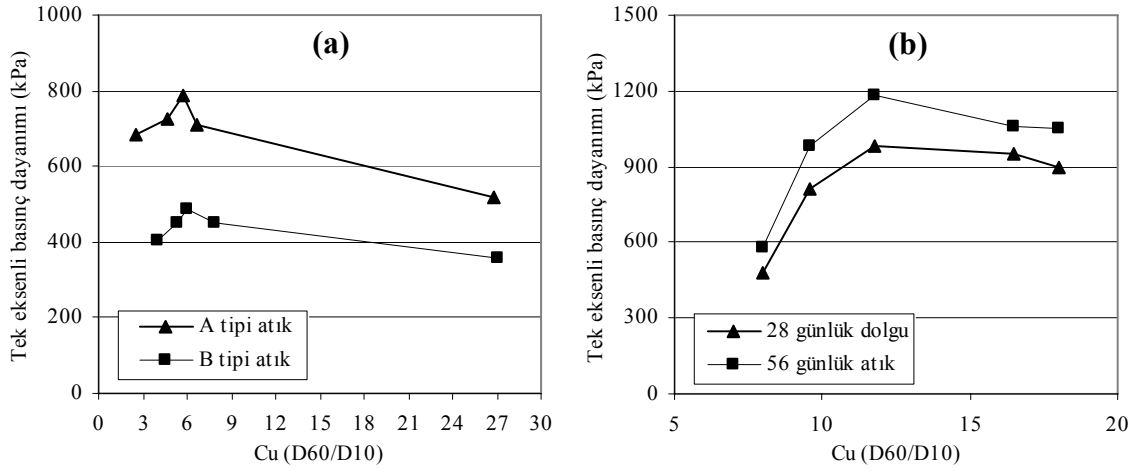
Bir malzemenin optimum tane boyut dağılımına sahip olup olmadığı literatürde genellikle üniformluk (C_u) ve eğrilik katsayılarına (C_c) göre değerlendirilmektedir (Annor, 1999). İyi bir tane boyut dağılımına sahip dolgu ve/veya zemin malzemeleri için C_u değeri 4-6 ve C_c değeri ise 1-3 arasında değişmektedir (Annor, 1999; Erçıkıdı vd., 2003). Üniformluk ve eğrilik katsayı değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmaktadır;

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \quad (\text{üniformluk katsayısı}) \quad (1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10}) \times (D_{60})}, \quad (\text{eğrilik katsayısı}) \quad (2)$$

Burada; D_{10} , toplam malzemenin %10'nun elek altına geçtiği boyut; D_{30} , toplam malzemenin %30'nun elek altına geçtiği boyut ve D_{60} , toplam malzemenin %60'nun elek altına geçtiği boyut miktarlarını göstermektedir.

Ancak literatürde elde edilen deneysel sonuçların birbirlerinden farklılık arz ettiği görülmektedir. Erçıkıdı vd. (2003) en yüksek dayanım kazanımını C_u değeri 6 olan atık malzemenin (Şekil 13a); Benzaazoua vd. (2004) ise C_u değeri 12 olan atık malzemenin sağladığını belirtmiştir (Şekil 13b).



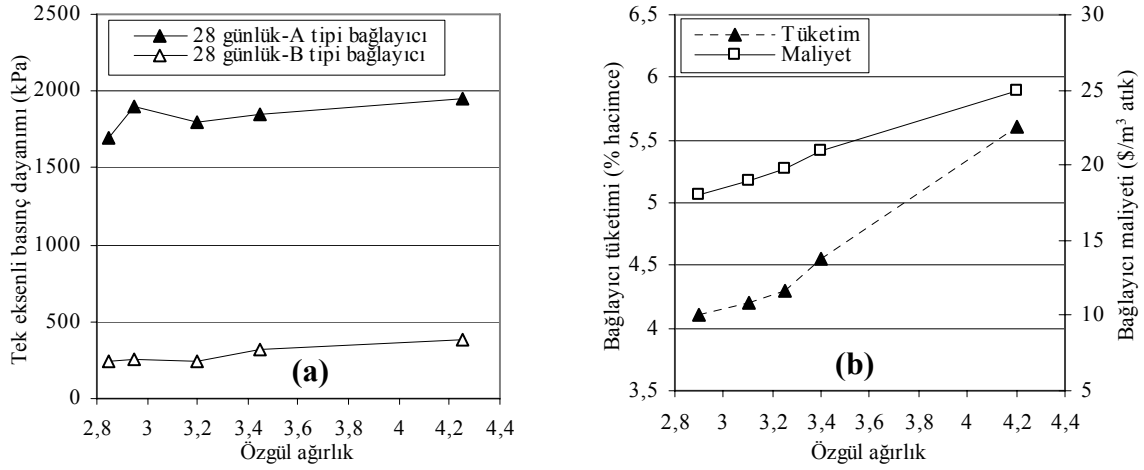
Şekil 13. Uniformluk katsayısı (Cu)-dayanım arasındaki ilişki (Erçıkı vd., 2003; Benzaazoua vd., 2004)

1.5.1.2. Tane Şekli ve Özgül Ağırlık

Atık malzemenin tane şekli ve özgül ağırlığı, dolgu dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Patlatma, kırma ve öğütme işlemlerine tabi tutulan cevher genellikle köşeli (düzensiz) veya küresel yapıya sahip olmaktadır. Henderson ve Revell (2005) aynı özgül ağırlığa sahip olmalarına rağmen tabakalı yapıdaki tanelerin küresel tanelere kıyasla daha uzun sürede çöklediğini ve çökme süresinin dolgunun drenaj, konsolidasyon ve dayanım özelliklerini etkilediğini belirtmiştir. Özcan vd. (2000) filtre keki içerisinde birbirine paralel olarak çökelen tabakalı yapıdaki kaolin tanelerinin birbiriyle temas yüzeyinin arttığını ve bu nedenle küresel şekilli cam tanelerinden hazırlanan filtre kekine kıyasla daha yüksek makaslama dayanımı ürettiğini belirtmiştir. Revell (2004) ise düzgün yüzeyli mika taneleri ile çimento taneleri arasında zayıf bir köprü oluştuğunu ve bu nedenle dolgunun yük taşıma kapasitesinin azaldığını belirtmiştir (Şekil 14). Cengiz (2002) ise küresel şekilli tanelerin birbirleriyle daha iyi temas ettiğini ve bu tanelerin karışımından elde edilecek dolgunun daha dayanıklı olacağını belirtmiştir. Macun dolgu içerisindeki küresel şekilli tanelerin, köşeli tanelere kıyasla daha hızlı çökeleceğinden fazla suyun ortamdaki uzaklaşma süresinin kısıllanacağı ve dolgunun daha erken kür süresinde dayanım kazanımına başlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 14. Mika tanelerinin çimentolu dolgu içerisindeki dağılımı



Şekil 15. Özgül ağırlık-dayanım (a) ve bağlayıcı tüketimi-maliyet (b) arasındaki ilişki (Fall vd., 2004)

Atık malzemenin özgül ağırlığı ile dolgu dayanımı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Atık malzemenin özgül ağırlığı arttıkça aynı çimento oranında daha fazla bağlayıcı kullanılmakta ve dolgu dayanımı artmaktadır (Şekil 15a). Ancak kullanılan bağlayıcı miktarının artması ile birlikte dolgunun ekonomikliği azalmaktadır (Şekil 15b).

1.5.1.3. Mineraloji

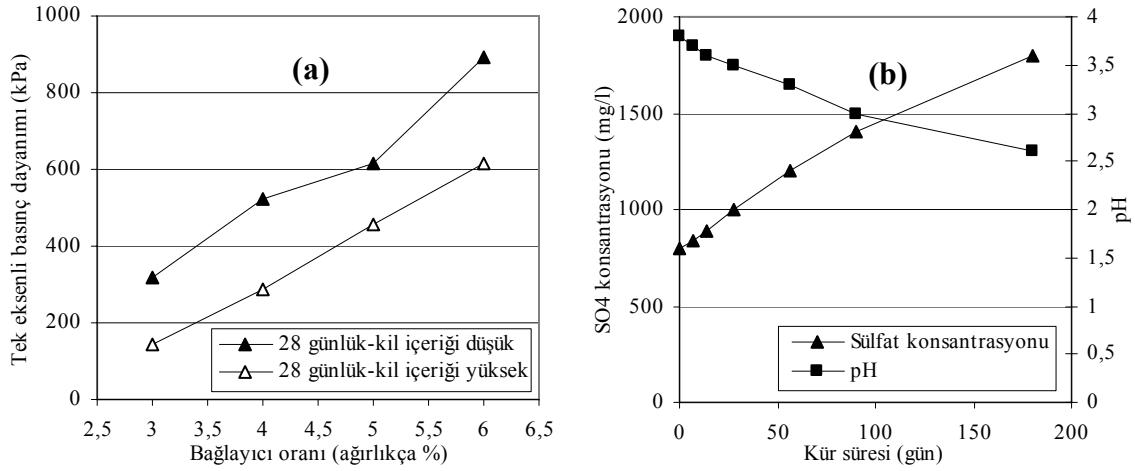
Atık malzemenin mineralojik bileşimi, macun dolgunun dayanım ve durabilitesi açısından son derece önemlidir. Bünyesinde su tutma özelliği yüksek olan serisit, mika, klorit ve kil mineralleri macun dolgunun akışkanlığını artırmakta ancak dayanımını

olumsuz yönde etkilemektedir (Yılmaz, 2003; Henderson ve Revell, 2005; Kesimal vd., 2005). Minerallerin özgül ağırlıklarının farklı olması, dolgu içerisindeki çökeltme sürelerini, dolgunun nihai yoğunluğunu ve dayanımını etkilemektedir. Ayrıca kuvars gibi silisli mineraller dolgunun boru hattı ile yeraltına nakliyesi esnasında aşınmalara yol açmaktadır. Yılmaz (2003) kil mineral içeriği yüksek atıklardan hazırlanan macun dolgu numunelerinin pirit içeriği yüksek atıklardan hazırlanan numunelere kıyasla 28 günlük kür süresi sonunda 1,35-2,2 kat daha düşük dayanım ürettiğini (Şekil 16a) ve bunun nedeninin kil minerallerinin bünyesinde su tutma özelliğinden kaynaklandığını belirtmiştir.

1.5.1.4. Asit ve Sülfat Etkisi

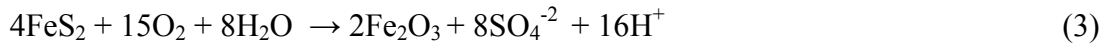
Asit ve sülfat etkisi beton ve dolgu gibi çimentolu yapılarda hidrasyon ürünlerinin veya çimento bileşenlerinin asit (H^+) veya sülfat (SO_4^{2-}) ile etkileşimidir. Asit ve sülfat etkisi kaynağına bağlı olarak beton ve harçlarda genellikle dış kaynaklı, macun dolguda ise iç kaynaklıdır. Dış kaynaklı asit ve sülfat etkisi, çimentolu karışımın sülfatca ($MgSO_4$ ve Na_2SO_4 vb.) zengin ortamlara (deniz suyu vb.) maruz kalması ve sülfat iyonlarının çimentolu matriks içine difüzyonu ile oluşmaktadır. Bu nedenle dış kaynaklı asit ve sülfat etkisi, çimentolu matriksin mikroyapısına, sülfatca zengin ortamlara maruz kalma süresine ve ortamın sıcaklık, pH ve sülfat konsantrasyonuna bağlıdır. Asit ve sülfatın beton dayanımı ve durabilitesini olumsuz yönde etkilediği belirtilmektedir (Rendell ve Jauberthie, 1999; Zivica ve Bajza, 2001; Santhanam vd., 2001; McGregor ve Blowes, 2002; Bakharev vd., 2002).

İç kaynaklı sülfat etkisi ise çimentolu karışım içerisinde sülfatca zengin bileşenlerin bulunması ile ilişkilidir. Macun dolgu malzemesi olarak kullanılan sülfürce zengin atık malzeme ve karışım suyu ortamdaki sülfat (SO_4^{2-}) varlığının en önemli kaynağıdır. Pirit, su ve oksijen varlığında oksitlenerek asit ve sülfat oluşturmaktadır (Şekil 16b). Sülfürlü minerallerin reaktivitesi; mineral tipine, minerallerin özgül yüzey alanına, ortamın pH ve oksijen miktarına bağlıdır (Hassani ve Archibald, 1998). Macun dolguda kullanılan atıkların genellikle ince boyutlu (yüksek yüzey alanı) olması ve kür işlemlerinin yeraltında nemli ortamlarda gerçekleşmesi sülfürlü minerallerin oksidasyonunu artırmaktadır. Oksidasyon; oksijen miktarı, sıcaklık ve yüzey alanının artması ile birlikte artmakta, pH artışı ile azalmaktadır (Hassani ve Archibald, 1998).



Şekil 16. Mineralojik yapının macun dolgu dayanımına etkisi (a) ve kür süresi ile birlikte asit ve sülfat oluşumu (b) (Yılmaz, 2003; Tariq ve Nehdi, 2007)

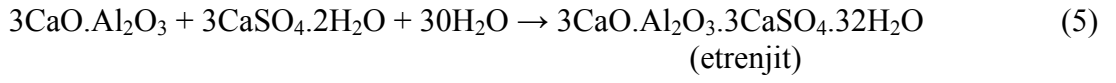
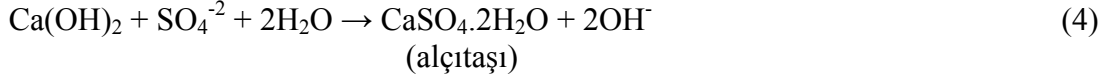
Hassani ve Archibald (1998), reaktivlik derecesi bakımından sülfürlü minerallerin pirotit, arsenopirit, pirit, kalkopirit, sfalerit, galenit ve kalkosit olarak sıralanabileceğini belirtmiştir. Kesimal vd. (2005), çimentolu yapının porozite ve gözenekliliğinin dolgu içerisindeki sülfürlü minerallerin oksidasyonu açısından önemli olduğunu belirtmiştir. Sülfürlü minerallerin (özellikle pirit gibi) oksidasyonu sonucu oluşan asit ve sülfat (3), macun dolgu dayanımı ve durabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



Macun dolgu malzemesi olarak kullanılan piritin su ve oksijen varlığında oksidasyonu sonucu açığa çıkan asit, hidrasyon ürünlerinin (C-S-H, tobermorit jeli ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$, portlandit) bağlayıcılık özelliklerini kaybetmelerine ($\text{pH} \leq 9$) yol açarak dolgu dayanım ve durabilitesini azaltmaktadır (Benzaazoua vd., 1999; Hassani vd., 2001; Tariq ve Nehdi, 2007; Belem ve Benzaazoua, 2008). Ayrıca sülfürlü minerallerin, asidik ortamlardaki ($\text{pH} 1-4$) bakteri (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) etkileşimi nedeniyle oksidasyona girme eğiliminin arttığı belirtilmektedir (Hassani ve Archibald, 1998; Archibald vd., 1999; Nehdi ve Tariq, 2007).

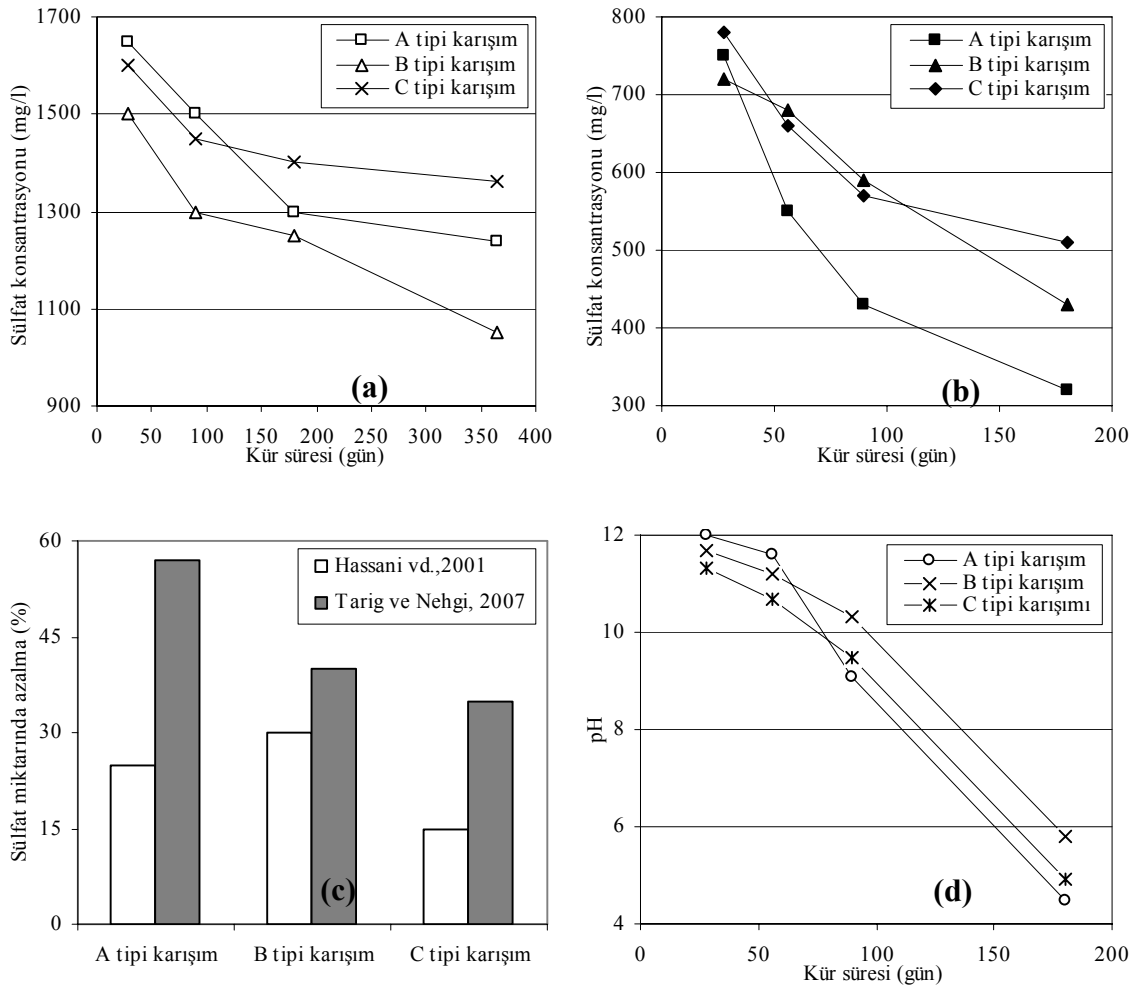
Benzer şekilde oksidasyon sonucu oluşan sülfat macun dolgu içindeki portlandit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$; simgesi CH] ve trikalsiyum alüminat [$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; C_3A] ile reaksiyona girerek (4, 5) genleşme özelliğine sahip ikincil alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve etrenjit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) mineralleri oluşturmaktadır. Oluşan reaksiyon ürünlerinin

hacmi kendilerini oluşturan bileşenlerin orijinal hacminden daha büyük olup, dolgu içerisinde 70-200 MPa'lık bir içsel gerilme oluşturarak çatlamalara ve dolgunun dayanım ve durabilitesini kaybetmesine yol açmaktadır (Ouellet vd., 1998; Benzaazoua vd., 1999, Bernier vd., 1999; Hassani vd., 2001; Benzaazoua vd., 2002, Kesimal vd., 2004; Fall ve Benzaazoua, 2005b; Tariq ve Nehdi, 2007).



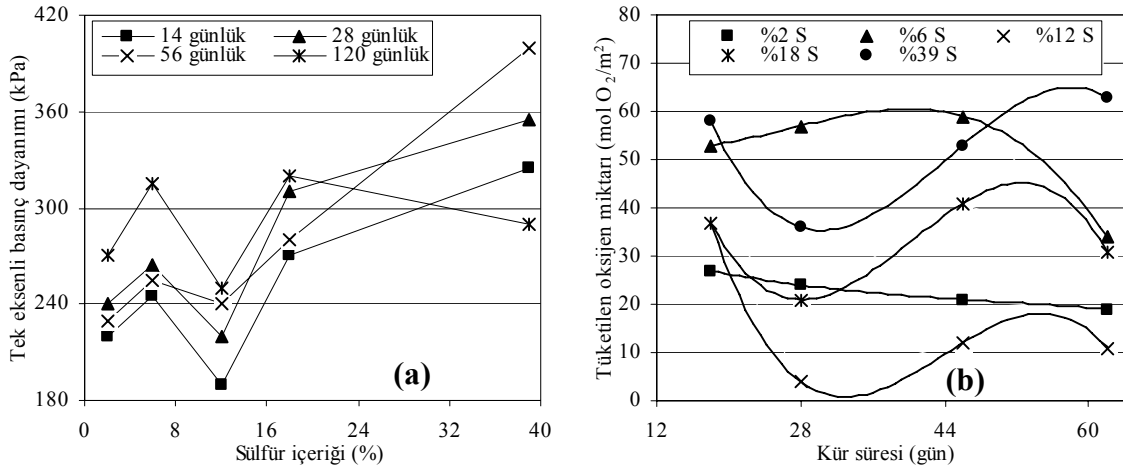
Hassani vd. (2001) ve Tariq ve Nehdi (2007) yapmış oldukları deneysel çalışmalarda, başlangıçtaki SO_4^{-2} konsantrasyonunun kür süresi ile birlikte %15-57 oranında azaldığını (Şekil 17a, b, c) belirtmişlerdir. Benzer olarak karışımın pH'ı da zamanla azalmış ve 90-180 günlük kür süresi aralığında ortamdaki kirecin kimyasal reaksiyonlar (puzolanik reaksiyon, sülfat etkisi vb.) sonucu tüketilmesi nedeniyle, pH 7'nin altına düşmüştür (Şekil 17d).

Çimentolu macun dolgunun geçirgenliğinin düşük ve suya doymuş olması nedeniyle dolgu matriksi içerisine oksijen difüzyonunun mümkün olmadığı veya sınırlı seviyede olduğu belirtilmektedir (Belem vd., 2001; Benzaazoua vd., 2004; Oullet vd., 2006). Bu nedenle çimentolu macun dolgu içerisindeki sülfürlü minerallerin kimyasal reaktivitesinin oldukça düşük olduğu, kimyasal reaksiyonlarda (4 ve 5) tüketilen sülfatın (SO_4^{-2}) ise, başlangıçta karışım içerisinde bulunan sülfat bileşenlerinin olduğu belirtilmektedir.



Şekil 17. Kür süresi ile birlikte sülfat (a, b, c) ve pH (d) miktarında azalma (Hassani vd., 2001; Tariq ve Nehdi, 2007)

Fall vd. (2004) tane boyut dağılımı ve bağlayıcı oranı aynı, sülfür içeriği farklı atıklar kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin dayanım ve durabilite açısından farklı davranışlar gösterdiğini, bunun piritin oksitlenmesi ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Dolgu içerisinde sülfür miktarının artması karışımın yoğunluğunu ve karışıma ilave edilen çimento miktarını artırarak dolgu dayanım ve durabilitesini iyileştirmiştir (Şekil 18a). Sülfür miktarındaki daha fazla artış (%39 S) ise, oksijen tüketim miktarının artmasına ve sülfat etkisi nedeniyle uzun dönemde macun dolgu dayanımının düşmesine yol açmıştır (Şekil 18a,b).



Şekil 18. Sülfür içeriğinin dolgu dayanımına (a) ve oksijen tüketim miktarına (b) etkisi (Fall vd., 2004)

1.5.1.5. Bağlayıcı Tipi ve Oranı

Macun dolgunun işlevine bağlı olarak gerekli dayanım kazanımını sağlamak amacıyla karışıma ağırlıkça %3-9 oranında bağlayıcı ilave edilmektedir. Ancak bağlayıcı maliyetleri, macun dolgu işletme giderlerinin önemli bir kısmını (%3 çimento oranı için %42'sini) teşkil etmektedir (De Souza vd., 2003). Ayrıca özellikle sülfürlü atıkların kullanıldığı macun dolgu uygulamalarında, Portland çimentosu gibi kalsiyumca zengin bağlayıcılar asit ve sülfat etkisine karşı düşük performans göstermektedir (Benzaazoua vd., 1999; Hassani vd., 2001; Yılmaz vd., 2004; Kesimal vd., 2004). Bu nedenle en uygun bağlayıcı tipi ve oranının belirlenmesi, hem macun dolgunun kısa ve uzun dönem dayanım ve durabilitesi ve hem de ekonomik ve verimli bir dolgu uygulaması açısından önem arz etmektedir.

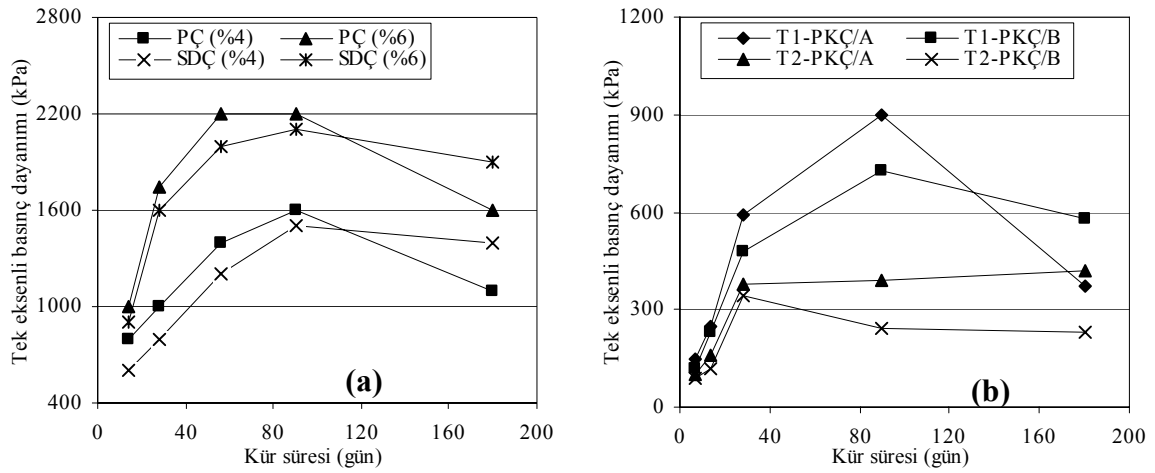
Bağlayıcının sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellik, macun dolgunun asit ve sülfat etkisine karşı performansında önemli bir etkidir. Kalsiyumca zengin Portland çimentosunun asit ve sülfat etkisine karşı düşük performans göstermesine rağmen (Ouellet vd., 1998; Neville, 2000), Portland kompoze çimento veya sülfata dayanıklı çimento kullanımının, asit ve sülfat etkisine karşı etkili bir çözüm olduğu belirtilmektedir (Irassar vd., 2000; Benzaazoua vd., 2002; Dulaijan vd., 2003; Torres vd., 2003; Shannaq ve Shaia, 2003; Fall ve Benzaazoua 2005b; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2008c, 2009a). Portland çimentosunun C₃A içeriği (%8-12), Portland kompoze (<%8) ve sülfata dayanıklı çimentoya (<%5) göre daha yüksektir. Ayrıca bağlayıcıların ana bileşeni olan

C_3S 'in (alit) C_2S 'e (belit) göre 2,2 kat daha fazla CH üretmesi nedeniyle, C_3S/C_2S oranının da bağlayıcıların asit ve sülfat etkisine karşı performansında önemli bir etken olduğu belirtilmektedir (Irassar vd., 2000). Ortamda CH miktarının artması, genleşme özelliğine sahip ikincil alçıtaşı oluşumu potansiyelini arttırabilir (Benzaazoua vd., 1999; Hassani vd., 2001). Ancak, Portland kompoze çimento içerisinde bulunan puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddeleri (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.), ortamdaki CH ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip ilave C-S-H jeli oluşturmakta ve sülfat etkisini (genleşme özelliğine sahip ikincil mineral oluşumu) azaltmaktadır (Hooton ve Emery, 1990).

Tariq ve Nehdi (2007), sülfür içeriği yüksek atıklardan (%21 S) hazırlanan macun dolguda bağlayıcı olarak Portland çimentosu (PÇ) yerine sülfata dayanıklı çimento (SDÇ) kullanımının dayanım kaybını azalttığını belirtmiştir. %4 ve 6 bağlayıcı oranında PÇ ve SDÇ kullanılarak hazırlanan macun dolgu numuneleri 90–180 günlük kür süresi aralığında sırasıyla %27-31 ve %7-10 oranında dayanım kaybetmiştir (Şekil 19a). Kesimal vd. (2004) iki farklı atık (T1 ve T2) ve iki farklı bağlayıcı (PKÇ/A ve PKÇ/B) kullanarak yapmış olduğu çalışmada, puzolanik mineral katkı maddesi içeriği yüksek (%21-35) olan PKÇ/B tipi bağlayıcının, uzun dönemde T1 tipi atık (kil içeriği düşük) için uygun, T2 tipi atık (kil içeriği yüksek) için ise uygun olmadığını belirtmiştir (Şekil 19b). Klein ve Simon (2006) sülfür içeriği düşük atık malzemesi (%6 S) için bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanımının uygun olduğunu ve macun dolgu numunelerinde 360 günlük kür süresi boyunca herhangi bir dayanım kaybının gerçekleşmediğini belirtmiştir. Benzaazoua vd. (2002) ve Fall ve Benzaazoua (2005b) sülfür içeriği yüksek atıklardan (%26 ve %32 S) hazırlanan macun dolguda uzun dönemde oluşabilecek asit ve sülfat etkisine karşı, bağlayıcı olarak eşit oranda PÇ ve SDÇ karışımı kullanımının faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Ancak araştırmacılar (Benzaazoua vd., 1999, 2002, 2004, 2006; Kesimal vd., 2003, 2004, 2005; Fall ve Benzaazoua, 2005b; Binici ve Aksoğan, 2006; Klein ve Simon, 2006; Tariq ve Nehdi, 2007; Nehdi ve Tariq, 2007), deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların tüm macun dolgu işletmeleri için genelleştirilemeyeceğini; atık, bağlayıcı ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin elde edilen sonuçlar üzerinde etkili olduğunu, bir macun dolgu uygulamasında yüksek dayanım kazanımı sağlayan bir bağlayıcının diğer bir uygulamada düşük dayanım verebileceğini ve bu nedenle, her bir dolgu uygulaması için optimum dayanım ve durabilitesini sağlayacak bağlayıcı tipi ve oranının belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Bağlayıcı oranı arttıkça macun dolgu dayanımı artmakta; ancak, dolgu işletme

maliyetleri de artmaktadır. Bağlayıcı tipi veya atık mineralojisindeki farklılıklara rağmen, dayanım ve bağlayıcı oranı arasında genellikle doğrusal bir ilişki vardır. Benzaazoua vd. (1999) ve Fall ve Benzaazoua (2005b) bağlayıcı oranı arttıkça, macun dolgunun asit ve sülfat etkisine karşı direncinin arttığını belirtmişlerdir. Günümüzde macun dolgu dayanım ve durabilitesini etkilemeyecek şekilde kullanılan bağlayıcı oranının azaltılması için birçok çalışma gerçekleştirilmektedir (Petrolito vd., 2005; Nehdi ve Tariq, 2007).



Şekil 19. Bağlayıcı tipi ve oranının macun dolgu dayanımına etkisi (Tariq ve Nedi, 2007)

1.5.1.6. Mineral Katkı Maddesi Kullanımı

Puzolan, çok ince öğütüldüğünde bağlayıcı özelliğe sahip ürünler (C-S-H jeli) oluşturmak için normal sıcaklıklarda ve nem varlığında kimyasal olarak portlandit (CH) ile reaksiyona giren silisli veya silisli ve alüminli madde olarak tanımlanmaktadır (ASTM C 219, 2007). Puzolanik maddeler, genellikle doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Tras olarak da bilinen doğal puzolanlar, genellikle volkanik kökenli kayalardır. Bilinen doğal puzolan türleri volkanik küller, tüfler (pumis gibi), kalsine olmuş killer ve şeyllerdir. Yapay puzolanlar ise, çeşitli sanayi artığı maddelerden veya bazı doğal maddelerin ısıtılma maruz bırakılmaları sonucu elde edilen maddelerdir. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı yaygın olarak bilinen yapay puzolanlardır.

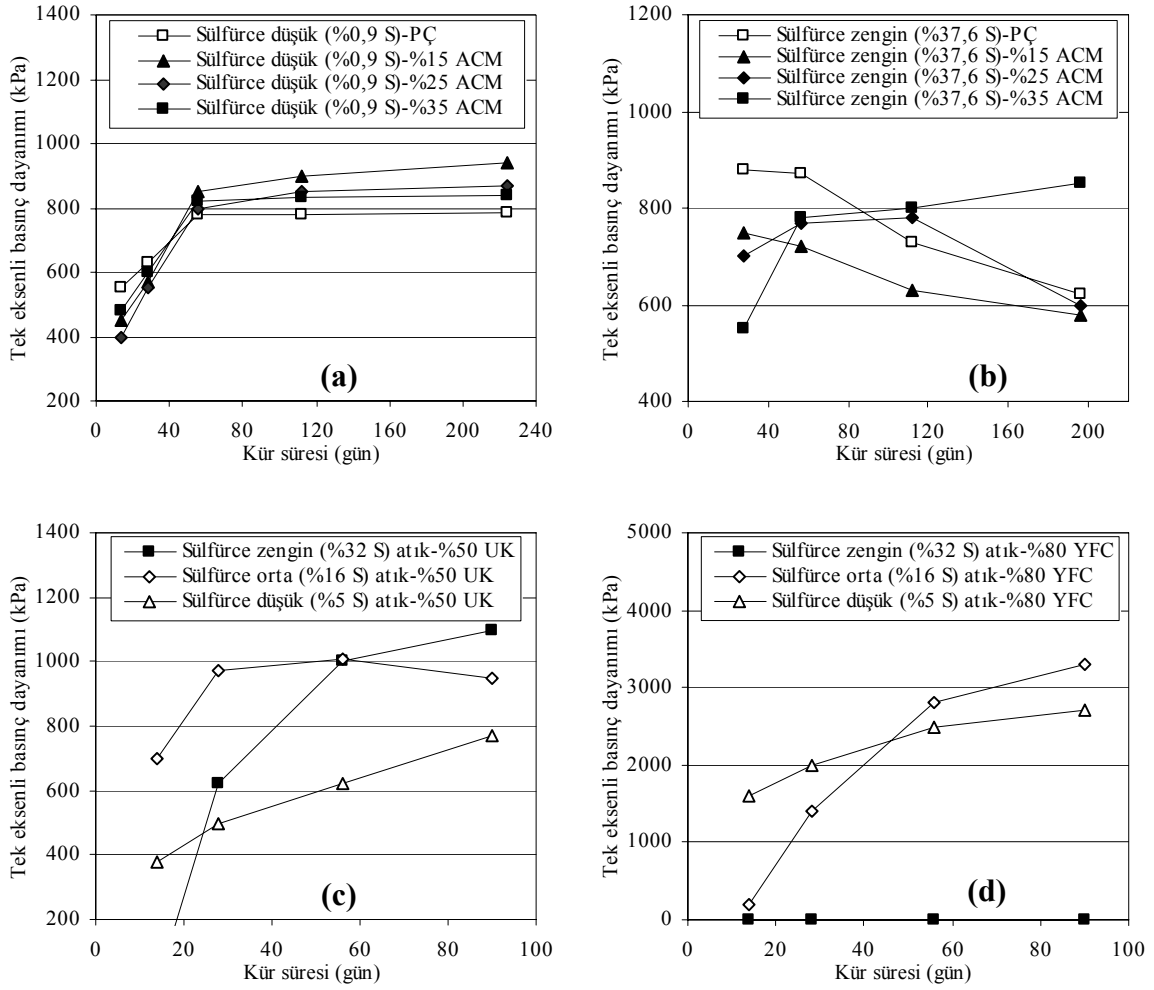
Puzolanlar katkı maddesi olarak doğrudan çimento ile karıştırılarak kullanılabilirler gibi belirli oranlarda Portland çimentosu (PÇ) ile birlikte öğütülerek katkı çimento üretiminde de kullanılmaktadır. Puzolanların kullanılabilirliğini belirleyen

en önemli etken, dolgu tesisine yakın mesafelerde yeterli miktarda bulunması ve ekonomik bir şekilde temin edilebilmesidir (Alp vd., 2003). Puzolanik maddelerin puzolanik etkinliği, malzemenin fiziksel özelliği (tane boyut dağılımı ve tane şekli), kimyasal ve mineralojik bileşimi ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin, iyi bir puzolanik etkinliğe sahip malzeme, mineralojik olarak yüksek oranda camsı faz ($\geq\%80$) ve alkali feldspat, düşük oranda kil minerali içermektedir (Alp vd., 2003). Benzer şekilde puzolan olarak kullanılacak malzemenin kimyasal olarak $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının en az %70, fiziksel olarak ise en az $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ özgül yüzey alanına sahip olması gerekmektedir (ASTM C 618–05, 2005). Özgül yüzey alanının artması, malzemenin puzolanik etkinliğinin artmasına yol açmakta, dayanım ve durabiliteye olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Ayrıca ince olarak öğütülmüş malzemeler mikro boşlukları doldurarak karışımın porozite ve gözenekliliğinin azalmasına yardımcı olmaktadır (Swamy, 1997). Ancak tane inceliğindeki artış, karışımın akışkanlığını ve öğütme maliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Turanlı vd. (2004) doğal puzolanların tane boyut dağılımının betonun erken kür sürelerindeki dayanım kazanımını etkilediğini, ancak dayanım kazanımında puzolanik etkinliklerinin daha önemli olduğunu belirtmiştir. Çavdar (2004) mineral katkı maddesi kullanımının, piriz süresini geciktirdiğini ve erken kür sürelerinde dayanımı azalttığını belirtmiştir. Yılmaz vd. (2003) ise, puzolanik malzeme tarafından bağlanacak kireç miktarının; puzolan içersindeki aktif fazların yapısına ve miktarına, aktif fazların amorf SiO_2 içeriğine ve karışımın kireç/puzolan oranına bağlı olduğunu belirtmiştir.

Hidratasyon ürünü olan portlandit (CH), su ile kolay çözünebilmekte ve yıkanmayla geride boşluklar bırakarak daha gözenekli ve poroziteli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca CH, kimyasal tepkime kolayca verebilen bileşiklerden birisidir. Çimentolu karışımlarda mineral katkı maddesi kullanılarak portlanditin yol açabileceği olumsuz etkiler (ikincil alçıtaşı oluşumu vb.) azaltılabilmektedir. Puzolanların mineral katkı maddesi olarak çimentolu karışımlarda kullanımının başlıca faydaları; i) porozite, boşluk oranı ve geçirgenliği azaltmak, ii) alkali-silika reaksiyonu ve asit ve sülfat etkisi nedeniyle oluşan dayanım ve durabilite kaybını engellemek, iii) çimento maliyetini/tüketimini azaltmak, iv) puzolanlarla ilgili (uçucu kül vb.) atık depolama/rehabilitasyon maliyetlerini azaltmak ve olumsuz çevresel problemleri (toz oluşumu ve diğer çevre kirliliği sorunları) azaltmak olarak sıralanabilir (Neville, 2000; Erdoğan, 2003; Alp vd., 2003; Mehta ve Monteiro, 2005).

Doğal puzolanların, macun dolgunun dayanım ve durabilitesine etkisine yönelik bugüne kadar herhangi bir bilimsel çalışma gerçekleştirilmemiştir. Ülkemiz ise doğal puzolan kaynakları bakımından oldukça zengindir (Türkmenoğlu ve Tankut, 2002; Çavdar ve Yetgin, 2007). Yapay puzolanların (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, atık cam malzeme vb.) mineral katkı maddesi olarak macun dolgu uygulamalarında kullanımı, işletme maliyetlerini azaltmak ve özellikle sülfürlü atıkların kullanıldığı karışımlarda asit ve sülfat etkisi nedeniyle oluşan dayanım ve durabilite kaybını engellemek amacıyla son yıllarda giderek artmaktadır (Archibald vd., 1999; Hassani vd., 2001; Mohammed vd., 2002; Benzaazoua vd., 2002; 2004; 2006; Fall ve Benzaazoua, 2005b; Klein ve Simon, 2006; Tariq ve Nehdi, 2007; Sargeant vd., 2007). Ülkemizde her yıl endüstriyel işlemler sonucunda önemli miktarlarda puzolanik karakteristiğe sahip yapay puzolan (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve atık cam malzeme) açığa çıkmaktadır. Örneğin ülkemizde endüstriyel işlemler sonucu açığa çıkan uçucu kül miktarı 13 milyon (Atiş vd., 2004), yüksek fırın cürufu miktarı ise 3 milyon ton civarındadır (Altun ve Yılmaz, 2002; Alataş vd., 2006). Benzer olarak kullanım veya üretim artışı olarak açığa çıkan atık cam miktarı yıllık 120 bin ton civarındadır (Topçu ve Canbaz, 2004). Bu malzemelerin bir kısmı çimento üretiminde kullanılmakta, geri kalan kısmı ise yerüstü atık depolama sahalarına depolanmaktadır. Ancak bu malzemeler zehirli metal içermekte ve yerüstünde depolanmaları sonucu olumsuz çevresel problemlere (tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, çevre kirliliği vb.) yol açabilmektedirler.

Archibald vd. (1999) ve Sargeant vd. (2007) sülfür içeriği düşük atıklar (%0,9 S) için Portland çimentosu (PÇ) yerine %15-35 oranında öğütülmüş atık cam malzeme (ACM) kullanımının uygun olduğunu, kontrol numunesine kıyasla eşit veya %11-16 oranında daha yüksek dayanım kazanımının elde edildiğini belirtmişlerdir (Şekil 20a). Archibald vd. (1999) ayrıca sülfür içeriği yüksek atıklar (%37,6 S) kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinde, bağlayıcı olarak Portland çimentosu yerine ağırlıkça %15-25 oranında öğütülmüş ACM kullanımının uygun olmadığını ancak %35 oranında ACM kullanımının, uzun dönemde görülen dayanım kaybını engellediğini ve 196 günlük kür süresi sonunda kontrol numunesine kıyasla %38 daha yüksek dayanım kazanımının elde edildiğini belirtmiştir (Şekil 20b). Hassani vd. (2001) sülfür içeriği yüksek (%30 S) atıklar için PÇ yerine ağırlıkça %40-60 uçucu kül (UK) ikamesinin uzun dönemde oluşan dayanım kaybını engellediğini ancak, yeterli dayanım kazanımı sağlayamadığını belirtmiştir.



Şekil 20. Mineral katkı maddesi olarak ACM (a, b), UK (c) ve YFC (d) kullanımının macun dolgu dayanımına etkisi

Benzaazoua vd. (2002), sülfür içeriği yüksek (%32 S) atıklar için PÇ yerine %50 UK ikamesinin, %6 çimento oranı ve üzerinde olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir (Şekil 20c). Mohammed vd. (2002) sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan macun dolguda C sınıfı UK kullanımının, geçirgenliği azaltarak dolgu dayanımını arttırdığını ortaya koymuştur. Klein ve Simon (2006) sülfür içeriği düşük atıklar (%6 S) için PÇ yerine UK ikamesinin faydalı olmadığını belirtmiştir. Benzaazoua vd. (2002) PÇ yerine %80 yüksek fırın cürufu (YFC) ikamesinin sülfür içeriği düşük (%5-16 S) atıklar için uygun olduğunu, ancak sülfür içeriği yüksek (%32 S) atıklar kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin 90 günlük kür süresi boyunca hiçbir dayanım üretmediğini belirtmiştir (Şekil 20d). Fall vd. (2007) sülfürce zengin (%26 S) atıklardan hazırlanan macun dolguda bağlayıcı olarak PÇ yerine %50 oranında YFC kullanımının, 28 günlük kür süresi sonunda

2,2 kat daha yüksek dayanım kazanımı sağladığını göstermiştir.

1.5.1.7. Kimyasal Katkı Maddesi Kullanımı

Kimyasal katkı maddesi, taze ve/veya sertleşmiş haldeki betonun özelliklerini değiştirmek için karıştırma işlemi esnasında karışıma belirli oranda eklenen maddelerdir. Kimyasal katkı maddeleri ASTM C 494'e göre; akışkanlaştırıcı (Tip A), priz geciktirici (Tip B), priz hızlandırıcı (Tip C), akışkanlaştırıcı ve priz geciktirici (Tip D), akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı (Tip E), yüksek oranda akışkanlaştırıcı (Tip F) ve yüksek oranda akışkanlaştırıcı ve priz geciktirici (Tip G) olmak üzere yedi sınıfa ayrılmaktadır (ASTM C 494, 2008). Günümüz beton teknolojisinde kimyasal katkı maddelerinin kullanımı oldukça yaygın olmasına rağmen, macun dolguda çok az seviyededir. Macun dolgunun su/çimento oranının (genellikle $>5,0$) betona kıyasla ($<5,0$) yaklaşık 8 kat daha yüksek olması, dolgunun porozitesinin artmasına ve dayanımının azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle özellikle akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddelerinin macun dolguda kullanılması; dayanım kazanımında artış, çimento tüketiminde azalma, akışkanlıkta iyileşme, dolgu nakil hattında daha az aşınma, pompalamada kolaylık, dolgunun daha uzak mesafelere taşınması ve daha fazla atık malzemenin yeraltında depolanmasına imkan sağlamaktadır (Gay ve Constantiner, 1998; Henderson ve Revell, 2005; Huynh vd., 2006; Klein ve Simon, 2006). Ayrıca madencilik yöntemine ve dolgu nakil hattı tasarımına bağlı olarak priz hızlandırıcı veya geciktirici kimyasalların kullanılması, erken kür sürelerinde dayanım artışı ile birlikte üretim işlemlerinin hızlanmasına ve boru hattında oluşan tıkanmaların azalmasına yardımcı olmaktadır (Bloss ve Revell, 2001; Razavi ve Hassani, 2007).

Akışkanlaştırıcılar kimyasal bileşimlerine bağlı olarak %10-30 oranında su azaltabilmektedirler. Ancak gereğinden fazla kimyasal katkı maddesi kullanımı, akışkanlığın aşırı miktarda artmasına ve betonun stabilitesini kaybederek ayrışmasına yol açabilir (Türkel ve Felekoğlu, 2004).

Klein ve Simon (2006) macun dolguda bağlayıcı olarak Portland çimento ile birlikte akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımının, dolgunun 28-360 günlük kür süresi arasındaki dayanım kazanımlarında %80 artış sağladığını ve uzun dönem dayanım kaybını engellediğini belirtmiştir. Benzer olarak Razavi ve Hassani (2007), alkali kimyasallarla aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu kullanımının 28 günlük kür süresi

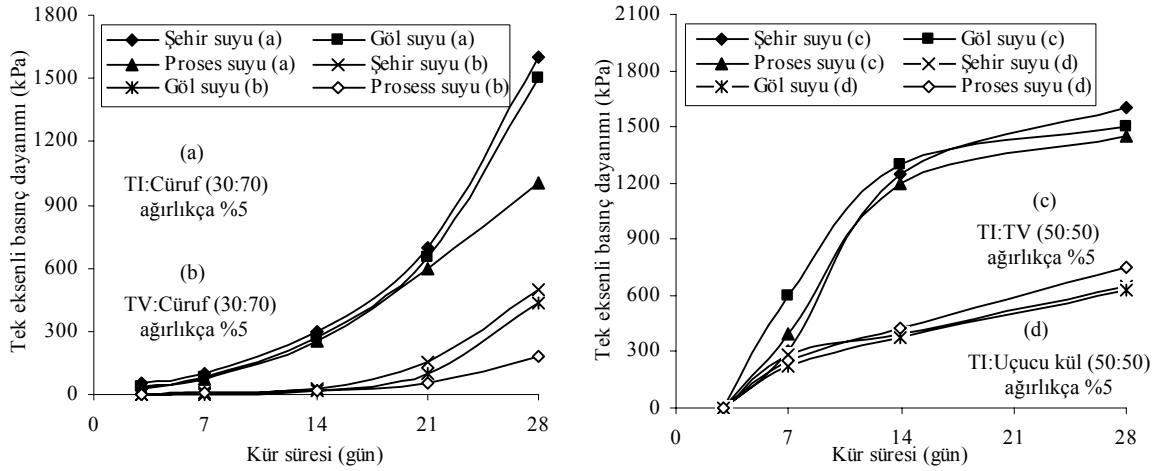
sonunda çok düşük bir dayanım kazanımı sağlamasına rağmen, 120 günlük kür süresi sonunda kontrol numunesine kıyasla 2,5 kat daha yüksek dayanım kazanımı sağladığını belirtmiştir.

1.5.1.8. Karışım Suyu Kimyası

Karışım suyu, macun dolgu performansına etki eden önemli bir parametre olup kimyasal bileşimine bağlı olarak hidrasyon işlemini etkilemektedir (Benzaazoua vd., 2002; Ouellet vd., 2004a; Fall ve Benzaazoua, 2005b). Karışım suyu, atık bünyesindeki su ve karışımı istenen akışkanlığa getirmek için ilave edilen musluk suyundan oluşmaktadır. Atık bünyesindeki su genellikle toplam karışım suyunun %75-80'ini oluşturmaktadır. Özellikle sülfürlü cevherlerin flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesinde hava ve sülfat konsantrasyonu bakımından zengin kimyasalların kullanılması nedeniyle sülfat (SO_4^{-2}) konsantrasyonu bakımından zengindir. Karışıma sonradan ilave edilen musluk suyu ise, karışım suyu içerisindeki sülfat konsantrasyonunu seyreltmektedir. DIN 4030'a göre sülfat (SO_4^{-2}) konsantrasyonu 200-600 mg/l arasında değişen suların agresiflik derecesi düşük, 600-3000 mg/l arasında olanların yüksek ve >3000 mg/l olanların ise çok yüksektir.

Benzaazoua vd. (2002) karışım suyunun macun dolgu performansına etkisini değerlendirmek amacıyla yapmış olduğu çalışmada, 28 günlük kür süresi sonunda cüruf esaslı bağlayıcıların karışım suyu kimyasından etkilenmesine karşın (Şekil 21a), uçucu kül ve sülfata dayanıklı çimentonun etkilenmediğini belirtmiştir (Şekil 21b). Şekil 21a ve 21b'de görüldüğü üzere sülfat (SO_4^{-2}) konsantrasyonu yüksek (1650 mg/l), pH'ı düşük (6,0) proses suyu kullanımının, 28 günlük kür süresi sonunda şehir (54 mg/l) ve göl (3 mg/l) suyu kullanımına kıyasla daha düşük dayanım kazanımına yol açtığı görülmektedir. Fall ve Benzaazoua (2005b) karışım içerisinde Portland çimento ve SO_4^{-2} konsantrasyonunun artmasıyla dayanım kaybının da artış gösterdiğini belirtmiştir. Ouellet vd. 2007a ise sülfat konsantrasyonu yüksek (4613-7549 mg/l) su kullanımının, hidrate olmuş sülfatlı bileşenlerin dolgu içerisinde çökmesine neden olduğunu ve sonuçta, dolgu porozitesinin azalmasına ve dayanımının artmasına katkıda bulunduğunu ifade etmiştir.

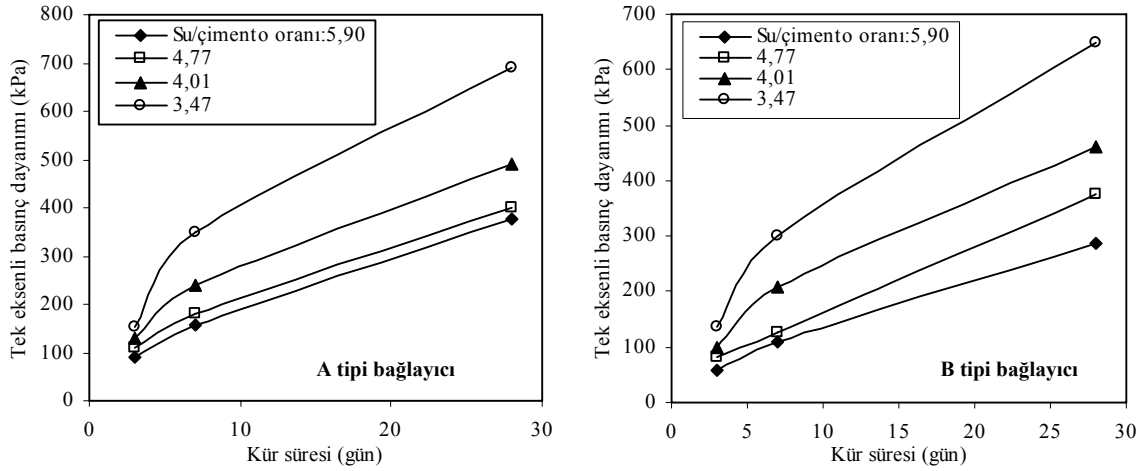
Maden operatörleri macun dolgu tasarımında genellikle karışım suyunun kimyasal bileşimini ihmal etmektedirler. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, macun dolgu tasarımında karışım suyu kimyasının da göz önüne alınmasının gerekli olduğunu göstermektedir.



Şekil 21. Karışım suyunun cüruf (a) ve Portland (b) bağlayıcılı macun dolgu dayanımına etkisi (Benzaazoua vd., 2002)

1.5.1.9. Karışım Özellikleri

Macun dolgu tesisinde hazırlanan dolgunun yeraltı üretim boşluklarına taşınması için belli bir akışkan kıvamda olmasını sağlayacak yeterli miktarda su içermesi gereklidir. Bu nedenle karışımın su/çimento oranı, macun dolgunun dayanımı, durabilitesi ve yeraltına taşınabilirliği açısından oldukça önemlidir. Karışıma ilave edilen fazla su, macun dolgunun yeraltına kolayca taşınabilmesi için istenen akışkanlığa ulaşmasında kullanılmakta olup, macun dolgu tesisindeki görevli operatörler (pompalama ve dağıtım sistemlerinde) tarafından kontrol edilmektedir. Su/çimento oranının artması, macun dolgu performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Şekil 22). Benzer olarak karışımın yoğunluğu arttıkça hem karışıma ilave edilen çimento miktarının artması ve hem de ortamdaki su miktarının azalması nedeniyle dolgunun dayanımı artmaktadır (Kesimal vd., 2005). Dayanım kazanımındaki olumlu etkisinin yanında, yoğunluğun (%katı oranı) artması aynı zamanda daha fazla miktarda atığın yeraltında depolanmasına imkan sağlamaktadır. Böylece yerüstünde depolanacak çevresel açıdan zararlı (sülfürlü vb.) atık miktarında ve rehabilitasyon maliyetlerinde azalma olacaktır. Ancak yoğunluğun artması veya su/çimento oranının azalması, dolgunun boru hattı ile yeraltına nakliyesinde daha fazla enerji gereksinimine ve borularda birtakım aşınma ve tıkanma problemlerinin oluşmasına yol açabilir. Bu nedenle, hem dolgunun dayanım ve durabilitesi ve hem de dolgunun yeraltına kolayca taşınabilirliği açısından en uygun su/çimento oranı ve yoğunluğun (% katı oranı) belirlenmesi önem arz etmektedir.



Şekil 22. Su/çimento oranının macun dolgu dayanımına etkisi (Kesimal vd., 2005)

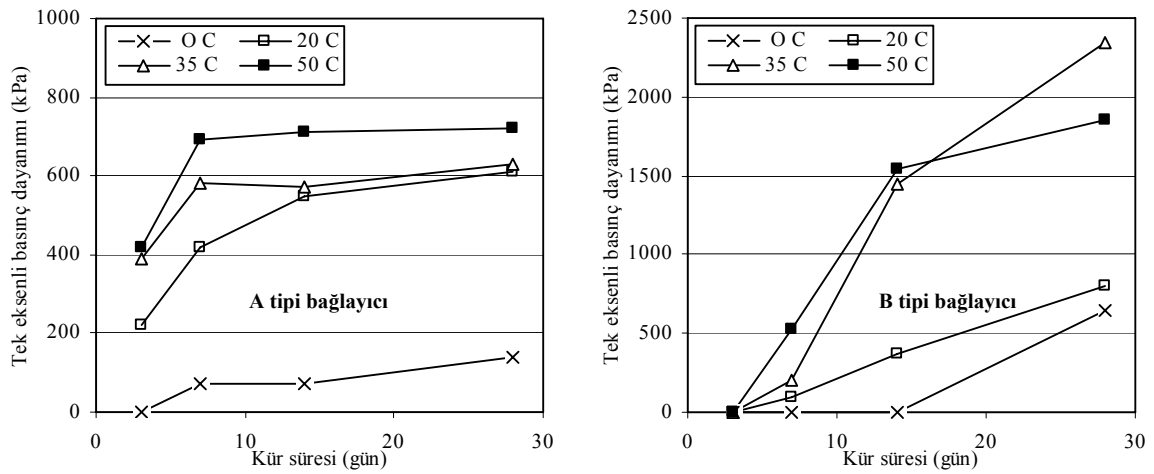
Ayrıca dolgu dayanım ve durabilitesi açısından mikroyapının önemi birçok çalışmada belirtilmiştir (Bakker, 1999; Benzaazoua vd., 2002; Ouellet vd., 2004b; Benzaazoua vd., 2006; Ouellet vd., 2007a, b). Yapılan çalışmalarda, macun dolgu karışımı içinde boşluk oranı fazla ise yani atık malzeme ile çimento hamuru homojen bir şekilde karışmamış ise düşük bir dayanım kazanımının elde edileceği belirtilmiştir. Gözenekli yapı, dolgu içerisine oksijen girişine imkan tanımakta ve pirit minerallerinin oksidasyonuna neden olmaktadır. Diğer bir deyişle macun dolgu numunelerinin asit ve sülfat etkisine karşı durabilitesi, sahip oldukları gözenekli yapı ile ilişkilidir (Benzaazoua vd., 1999, 2006). Şayet macun dolgu karışımı yoğunsa yani çimento hamuru ile atık malzeme bileşimi homojen bir şekilde karışmış ve boşluk oranı daha düşükse, yüksek bir dayanım kazancı elde edilecektir.

1.5.2. Dış Etkenler

Dış etkenler (sıcaklık, drenaj ve konsolidasyon etkisi, yanal basınçlar, patlatma kaynaklı titreşimler vb.), macun dolgunun dayanım ve durabilitesi açısından oldukça önemlidir.

Kür sıcaklığı, macun dolgu dayanım ve durabilitesini etkileyen en önemli dış etkenlerden birisidir. Fall ve Samb (2006) kür sıcaklığının macun dolgu performansına etkisini araştırmak amacıyla yaptığı çalışmada, kür sıcaklığı ve dayanım kazanımı arasında genellikle doğrusal bir ilişkinin olduğunu belirtmiştir (Şekil 23). Bağlayıcı tipindeki farklılıklara rağmen, yüksek kür sıcaklığının (35-50°C) hidrasyon işlemini hızlandırdığını

ve daha erken sürede dayanım kazanımının gerçekleştiğini belirtmiştir. Düşük kür sıcaklıklarının ($\leq 20^{\circ}\text{C}$) ise, dayanım kazanımını ve cevher üretimini geciktirdiğini ve karışım içerisinde oluşan buz kristallerinin (0°C 'de) dolgu matriksinin çatlamasına yol açtığını göstermiştir. Ancak macun dolguya yönelik laboratuvar koşullarında yapılan bilimsel çalışmalarda (Archibald, 1999; Benzaazoua vd., 2002, 2004; Kesimal vd., 2003, 2004, 2005; Fall ve Benzaazoua, 2005b; Klein ve Simon, 2006; Tariq ve Nehdi, 2007), genellikle ortamın kür sıcaklığı ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) göz önüne alınmaktadır.

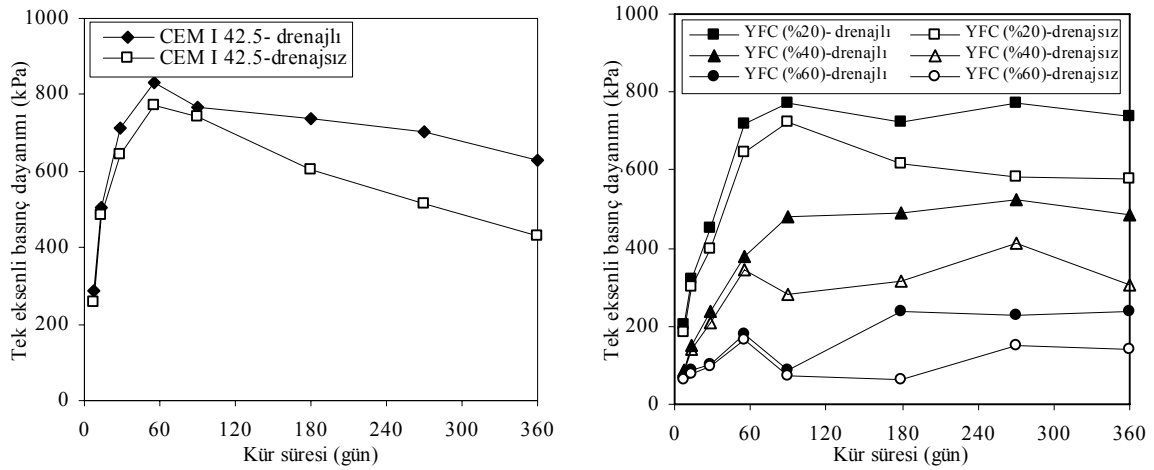


Şekil 23. Kür sıcaklığının macun dolgu dayanımına etkisi (Fall ve Samb, 2006)

Macun dolgunun dayanımını etkileyen dış etkenlerden bir diğeri ise drenaj koşulları ve dolgunun kendi ağırlığı ile oluşan konsolidasyon etkisidir (Wickland ve Wilson, 2005; Belem vd., 2006). Yeraltı üretim boşluğuna yerleştirilen dolgu, drenaj koşullarının iyi olmaması durumunda yüksek porozite ve boşluk oranına sahip olacağından daha düşük dayanım ve durabilite üretmektedir (Benzaazoua vd., 2004). Dolgu karışımının, içerisinde bulunan fazla suyu dışarıya drene edebilme yeteneği aynı zamanda malzemenin tane boyut dağılımı ile de ilgilidir. İri taneli atıklardan (malzemenin ağırlıkça %15-35'i $< 20 \mu\text{m}$) hazırlanan macun dolgu karışımları, ince taneli atıklardan (malzemenin ağırlıkça %60-90'ı $< 20 \mu\text{m}$) hazırlanan karışımlara nazaran drenaj yoluyla daha fazla su bırakmaktadırlar (Fall vd., 2005a).

Araştırmacılar (Belem vd., 2002; Revell, 2004; Roux vd., 2005) drenajsız silindir numune kalıpları kullanılarak laboratuvarında hazırlanan numunelerin yeraltı koşullarında kür alan macun dolguyu tam olarak yansıtmadığı belirtilmektedir. Ayrıca yeraltındaki

drenaj koşulları, konsolidasyon ve sıkıştırma basıncı etkisi nedeniyle yeraltından alınan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımının, laboratuarda benzer koşullarda hazırlanan numunelerin dayanımına kıyasla 2 ile 4 kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Ouellet vd., 1998; Belem vd., 2002; Benzaazoua vd., 2004; Revell, 2004; Roux vd., 2005). Erçikdi vd., 2008b, drenaj koşullarının macun dolgunun özellikle uzun dönem performansında daha etkili olduğunu ve bağlayıcı tipindeki farklılığa rağmen, drenajı sağlanan numunelerin drenajsız numunelere kıyasla bütün kür süreleri sonunda daha yüksek dayanım kazanımı gerçekleştirdiği ortaya konulmuştur (Şekil 24). Ancak çoğu macun dolgu tesisinde, yeraltına yerleştirilen dolgunun dayanımını tahmin etmek için laboratuvar koşullarında yapılan deneysel çalışmalarda, drenaj koşulları göz ardı edilmektedir.

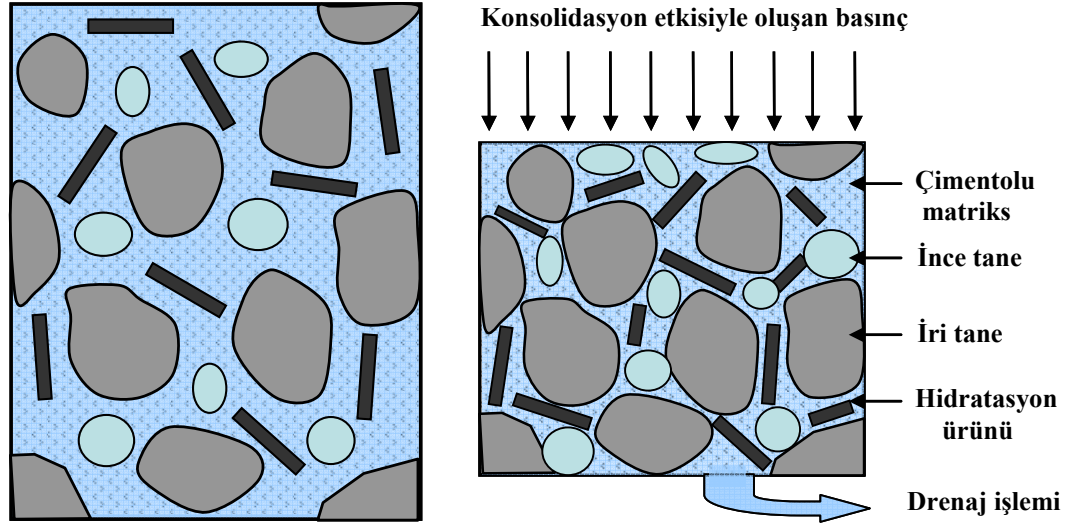


Şekil 24. Drenaj koşullarının macun dolgu dayanımına etkisi (Erçikdi vd., 2008b)

Benzer şekilde Yılmaz vd. (2009), drenaj ve konsolidasyon etkisinin macun dolgu karışımının porozite ve boşluk oranının azalttığı (Şekil 25) ve bunun 28 günlük kür süresi sonunda drene ve konsolide olmayan numunelere kıyasla %7-51 oranında daha yüksek dayanım kazanımı sağladığını belirtmiştir.

Yeraltı dolgu odalarından alınacak karot numuneleri üzerinde veya yerinde yapılacak deneysel çalışmalar (sıcaklık ölçümü, dayanım testleri, mikroyapı çalışmaları vb.), yeraltı kür koşullarındaki dolgu davranışının (dayanım, durabilite vb.) daha iyi anlaşılmasına ve yeraltı koşullarına uygun dolgu tasarımına katkıda bulunacaktır. Ancak gerek yeraltı kür koşullarının havalandırma, su varlığı, derinlik, cevher tipi vb. gibi etkenlere bağlı olarak

değişkenlik arz etmesi gerekse düşük dayanımlı macun dolgu odasından karot alınımındaki zorluklar (düzgün karot alınamaması vb.) nedeniyle dış etkenlere yönelik yapılan çalışma çok az sayıdadır.



a-Drene ve konsolide olmamış numune **b**-Drene ve konsolide numune

Şekil 25. Drenaj ve konsolidasyonun dolgunun mikroyapısına etkisi (Yılmaz vd., 2009)

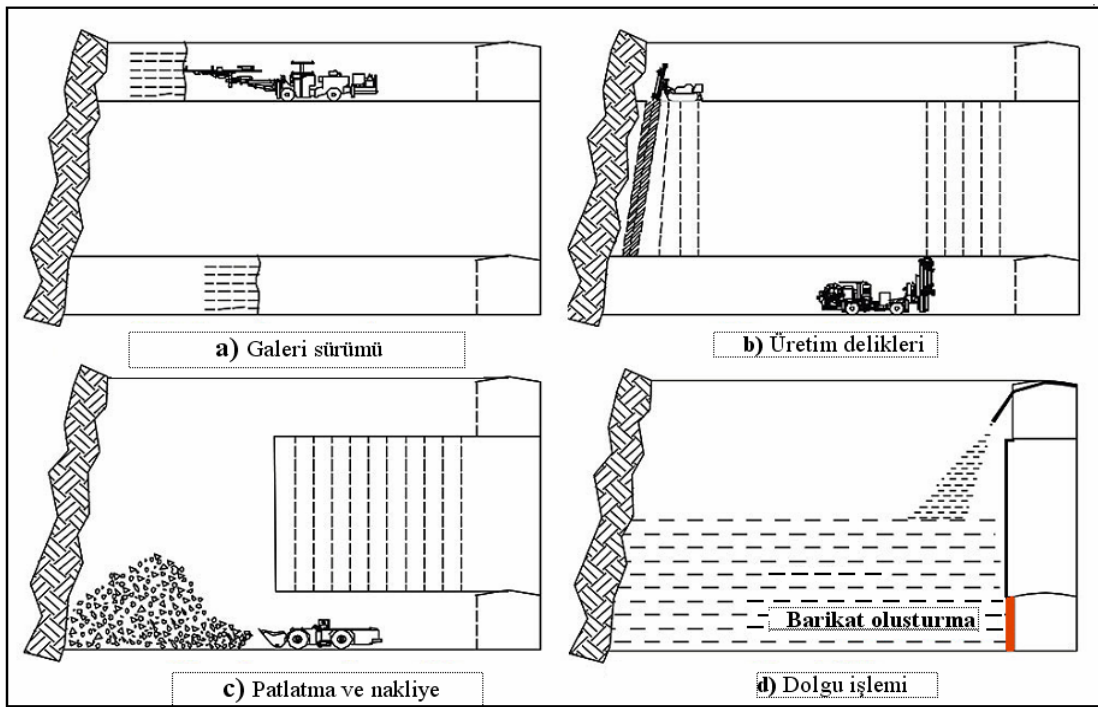
1.6. ÇBİ Yeraltı İşletmesinde Dolgulu Çalışma

1.6.1. Yeraltı Üretim Yöntemi

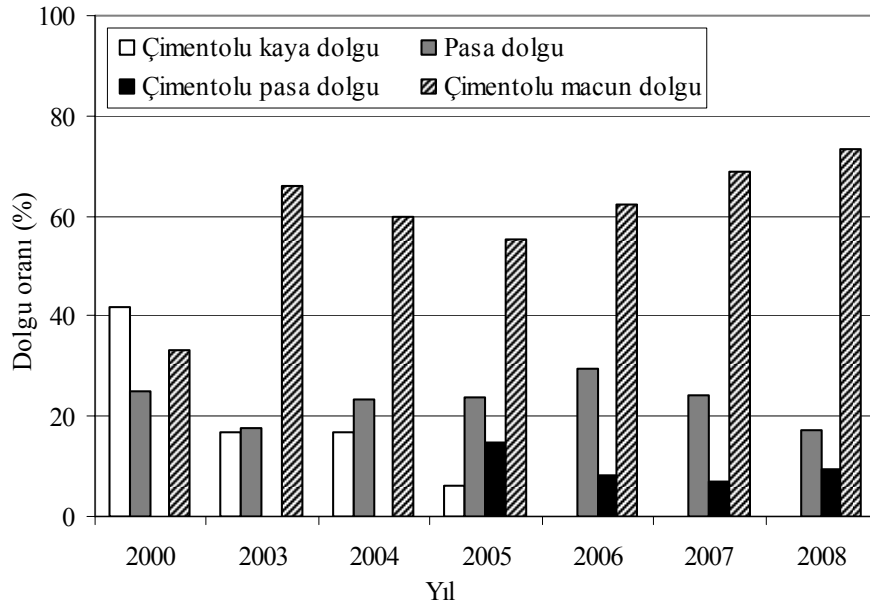
Çayeli Bakır İşletmeleri (ÇBİ) ülkemizin en büyük tam mekanize, yeraltı bakır ve çinko madenidir. Ç.B.İ yeraltı bakır-çinko madeninde üretim arakatlı kazı metodu ile yapılmaktadır. Üretim işlemi; yüksekliği 10-15 m, genişliği 6-7 m, uzunluğu 10-25 m arasında değişen yeraltı üretim odalarında gerçekleştirilmektedir. Üretim metodu başlıca; i) üretim odasının tavan ve tabanında 7x5 m (genişlik x yükseklik) boyutlarında hazırlık galerilerinin sürülmesi, ii) patlatma işlemi için üretim deliklerinin delinmesi, iii) patlatma işlemi ve açığa çıkan cevherin nakliyesi ve iv) barikat inşası ve madeni alınmış bölgenin dolgu malzemesi ile doldurulması safhalarından oluşmaktadır (Şekil 26).

Dolgu işlemi, yeraltında uygulanan üretim yönteminin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. İşletmede yeraltı üretim faaliyetleri sonucu madeni alınmış boşluklara çimentolu pasa dolgu, pasa dolgu ve çimentolu macun dolgu yöntemi ile yılda ortalama 250 000 m³ dolgu yerleştirilmektedir (Yumlu ve Güreşçi, 2007). 2008 yılında dolgu

maliyetleri, toplam maden işletme maliyetlerinin %16'sını oluşturmuştur. Dolgu malzemesi olarak flotasyon tesis atıkları ve hazırlık çalışmalarından (galeri sürümü vb.) açığa çıkan pasa kullanılmaktadır. 2000 yılında yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen toplam dolgunun %33'ü, 2008 yılında ise %73,3'ü macun dolgu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 27). Ortalama %7,6 çimento oranında hazırlanan 1 m³ macun dolgu 34,14 \$ (işçilik dahil), kullanılan çimento ise, macun dolgu işletme maliyetlerinin %42'sini teşkil etmiştir (Tuncel, 2009). ÇBİ'de dolgu uygulaması başlıca; i) topuk işlevi görerek yan cevherin üretilmesini sağlamak, ii) çalışma zemini oluşturmak, iii) tavan tahkimatı sağlamak, iv) güvenli ve emniyetli çalışma koşulları tesis etmek ve v) işletmede açığa çıkan atıkları (tesis atıkları, galeri sürümü vb. sonucu açığa çıkan atıklar) depolamak amacıyla gerçekleştirilmektedir (Yumlu, 2001).



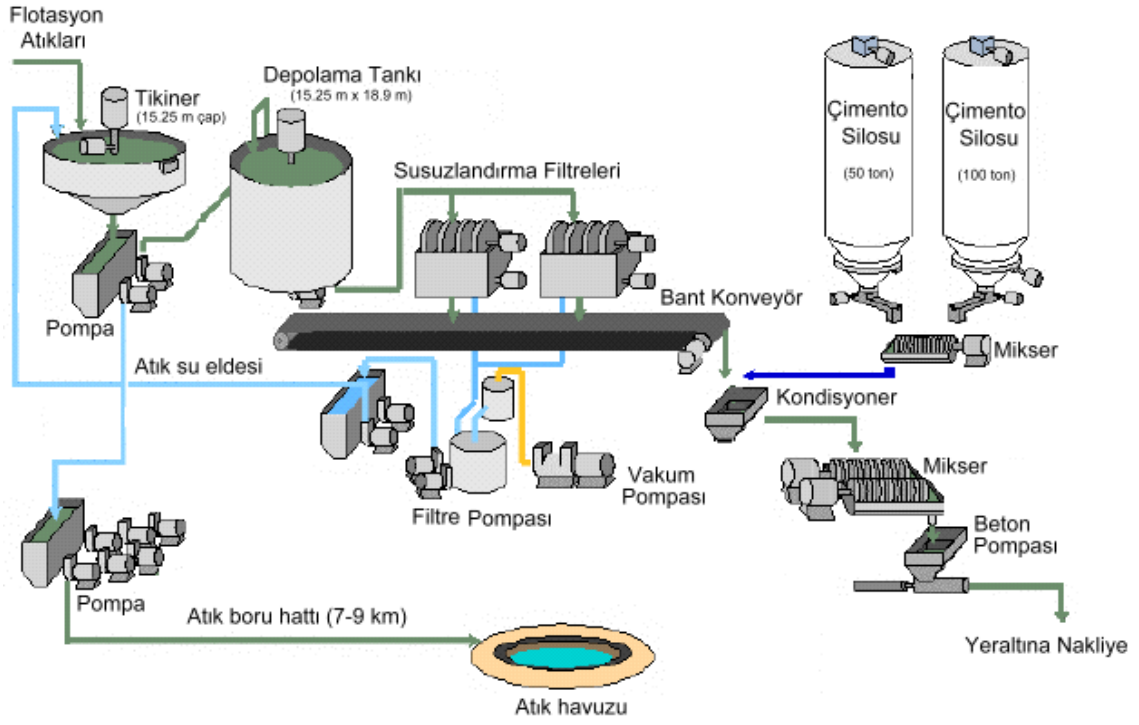
Şekil 26. ÇBİ'de uygulanan üretim yönteminin şematik gösterimi (Yumlu ve Güreşçi, 2007)



Şekil 27. ÇBİ yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen dolgu miktarlarının yıllara göre dağılımı

1.6.2. Yerüstü Macun Dolgu Tesisi

1999 yılı Temmuz ayında devreye giren macun dolgu tesisi, yeraltında cevheri alınan üretim odalarını cevher zenginleştirme tesis atığı, su ve çimento karışımından oluşan macun dolgu ile doldurmak amacıyla kurulmuştur. Macun dolgu tesisi, yaklaşık olarak ağırlıkça %82 katı oranına sahip ve saatte 45 m³'lük macun üretme kapasitesinde tasarlanmıştır. Ağırlıkça %45-75 katı içeren tesis atıkları, 4" çapında borularla macun dolgu tesisine gönderilmektedir. Atıklar ilk olarak 16 m çapındaki bir tikinerde koyulaştırılmakta ve depolama tankına nakledilmektedir. Depolama tankında homojenleştirilen atıklar iki adet vakumlu disk filtre kullanılarak susuzlaştırılmaktadır (Şekil 28). Bu işlem sonucu oluşan filtre kekinin katı içeriği ağırlıkça %84-86'dır. Daha sonra filtre kekine kondisyoner tankında su ve mikserde bağlayıcı ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılmakta ve hazırlanan karışım 5" çapındaki borular ve Putzmeister pompa kullanılarak yeraltı üretim boşluklarına nakledilmektedir (Şekil 29). Karışımın bağlayıcı içeriği, dolgunun yeraltındaki konumuna ve işlevine göre değişmektedir. Hazırlanan macun dolgu karışımlarının akışkanlığı ise genellikle 7"-8" slamp arasındadır. Tesiste hazırlanan bütün karışımların slamp ölçümü ve karışımlardan alınan örneklerin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı testleri düzenli olarak yapılmaktadır.



Şekil 28. ÇBİ macun dolgu tesisi akım şeması



Şekil 29. Macun dolgunun boru hattı ile yeraltına nakliyesi

1.6.3. Macun Dolgunun Yeraltı Üretim Boşluklarına Yerleştirilmesi

Üretim odasına yerleştirilen dolgunun emniyetli bir şekilde kür alması ve daha iyi tahkimat sağlaması için dolgu barikatının yüksek basınçlara dayanıklı olması ve patlamaması gerekmektedir (Şekil 30). Bu yüzden üretim odasına yerleştirilen dolgunun

Barikat üzerine gelen basıncın büyüklüğü, dolguyu oluşturan atık malzemenin fiziksel özelliklerine (tane boyut dağılımı, özgül ağırlık vb.), macun dolgu karışım özelliklerine (slamp, katı miktarı, çimento tipi ve oranı vb.), dolgu miktarına, dolgu yerleştirme şekline (kademeli vb.), yeraltında yapılan patlatmaların tasarımına ve oluşturduğu sismik dalgaların büyüklüğüne, drenaj koşullarına ve üretim odasının (stope) boyut ve geometrisine bağlıdır. ÇBİ yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen dolgunun daha iyi kür alması, tahkimat sağlaması ve barikat üzerine gelen basınçların azalması için alınan önlemlere rağmen (dolgunun kademeli olarak doldurulması vb.), yeraltında birtakım barikat yıkılmalarının ve göçüklerin meydana geldiği belirtilmiştir (Yumlu ve Güreşçi, 2007). Oluşan göçükler, yeraltında çalışan işçi ve ekipmanların güvenliğine zarar vermekte, iş, zaman ve cevher kayıplarına neden olarak maden işletme maliyetlerini arttırmaktadır (Şekil 31).



Şekil 31. ÇBİ yeraltı işletmesinde oluşan barikat yıkılmaları ve olumsuz etkileri (Yumlu ve Güreşçi, 2007)

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddesi, akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi ve farklı çimento tipi, oranı ve su/çimento oranının macun dolgunun dayanımı, durabilitesi, mikroyapısı ve deformasyon davranışı üzerine etkisini araştırmak için bir dizi deneysel çalışma yürütülmüştür (Erçikdi vd., 2008a, b, c, d; 2009a, b, c, d). Deneysel çalışmalarda pirit içeriği yüksek tesis atığı, doğal (tras, pumis) ve yapay (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve atık cam malzeme) puzolanlar, kimyasal katkı maddeleri (normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcılar), farklı özelliklerdeki çimentolar (Portland çimento, CEM I 42,5; Portland kompoze çimento, CEM II/A 42,5; ve Sülfata dayanıklı çimento, SDÇ 32,5) ve musluk suyu kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı;

- i) Bağlayıcı tipinin (CEM I 42,5, CEM II/A 42,5 ve SDÇ 32,5) kısa ve uzun dönem macun dolgu performansına etkisini incelemek ve en uygun bağlayıcı tipini belirlemek (Tablo 3),
- ii) CEM II/A 42,5 bağlayıcı tipi kullanarak su/çimento oranı ve bağlayıcı oranının macun dolgu performansına etkisini araştırmak (Tablo 3),
- iii) Bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu yerine (CEM I 42,5) belirli oranlarda kısmen doğal (ağırlıkça %30'a kadar) ve yapay (ağırlıkça %60'a kadar) puzolan ikamesinin macun dolgu performansına etkisini araştırmak ve sülfür içeriği yüksek atıklar için en uygun doğal/yapay puzolan tipi ve ikame oranını (%) belirlemek (Tablo 4),
- iv) Macun dolguda akışkanlaştırıcı olarak farklı kimyasal katkı maddeleri (normal, süper ve hiper) kullanımının kısa ve uzun dönem macun dolgu performansına etkisini araştırmaktır (Tablo 5).

Tablo 3. Çimento tipi, oranı ve su/çimento oranının etkisini belirlemek amacıyla hazırlanan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri

Toplam numune sayısı (192)	Slamp değeri (inch)	Bağlayıcı oranı (ağ. %)	Çimento tipi			Kür süresi (gün)
			CEM I 42,5 (%)	CEM II/A 42,5 (%)	SDÇ 32,5 (%)	
24 numune			100	0	0	
24 numune	7,0	5,0	0	0	100	7-360
24 numune			50	0	50	
24 numune			0	100	0	
48 numune	7,0	6,0, 7,0	0	100	0	7-360
48 numune	6,5, 7,5	5,0	0	100	0	7-360

CEM I 42,5: Portland çimento; CEM II/A 42,5: Portland kompoze çimento; SDÇ 32,5: Sülfata dayanıklı çimento

Tablo 4. Doğal (FT, AT ve KP) ve yapay (UK, SD, YFC ve ACM) puzolan kullanarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri

Toplam numune sayısı (504)	Slamp değeri (inch)	Bağlayıcı oranı (ağ. %)	Puzolan tipi	Puzolan adı	İkame oranı (%)	Kür süresi (gün)
72 numune	7,0	5,0	Doğal	AT	10, 20, 30	7-360
72 numune				KP	10, 20, 30	
72 numune				UK	10, 20, 30	
72 numune	7,0	5,0	Yapay	ACM	10, 20, 30	7-360
72 numune				YFC	20, 40, 60	
72 numune				SD	5, 10, 15	

FT: Fatsa tras; AT: Akkuş tras; KP: Kayseri pumisi, UK: Uçucu kül; ACM: Atık cam malzeme; YFC: Yüksek fırın cürufu SD: Silis dumanı;

Tablo 5. Kimyasal katkı maddelerinin etkisini belirlemek amacıyla hazırlanan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri

Toplam numune sayısı (144)	Çimento	Kim. katkı maddesi	İlave oranı (%)	Katı oranı (%)	Slamp değeri (inch)	Bağlayıcı oranı (ağ. %)	Kür süresi (gün)
	SA	6	77	7,2			
	HA	5,4	77	7,2			
72 numune	CEM II/A 42,5	NA	7	77	7,0	5,0	7-360
		SA	6	77	7,0		
		HA	5,4	77	7,0		

NA: Normal akışkanlaştırıcı; SA: Süper akışkanlaştırıcı; HA: Hiper akışkanlaştırıcı

2.2. Atık Malzeme

Atık malzeme, Çayeli Bakır İşletmeleri macun dolgu tesisinde mevcut vakumlu disk filtre çıkışındaki bant konveyör üzerinden alınmış ve 500 kg kapasiteli varillere doldurularak bölüm laboratuvarına getirilmiştir (Şekil 32).

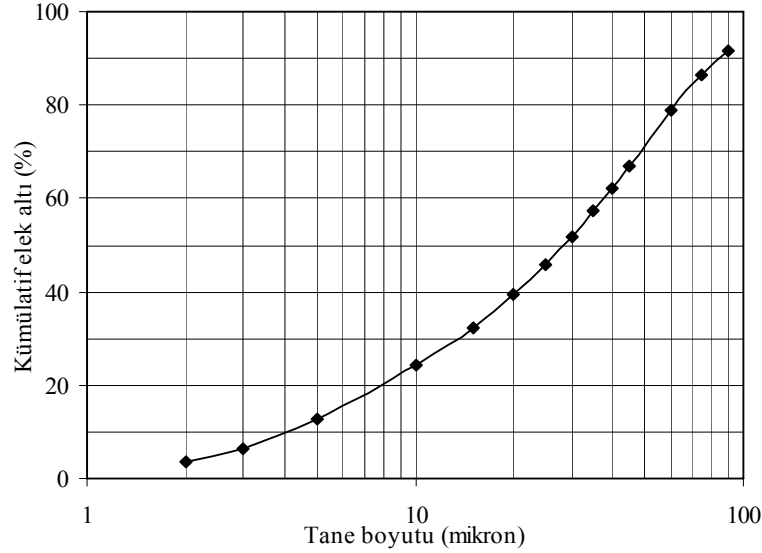


Şekil 32. Atık malzemenin alınışı ve laboratuvara getirilişi

Malvern Mastersizer ile atıklar üzerinde gerçekleştirilen tane boyut dağılımı analizi sonuçlarından (Şekil 33), 20 μm altı malzeme miktarının ağırlıkça %40 olduğu görülmektedir (Şekil 33, Ek Tablo 1). Atık malzeme bu haliyle orta boyutlu macun dolgu malzemesi (malzemenin ağırlıkça %35-60'ı < 20 μm) sınıfına girmekte olup, bu tür atıklar ince boyutlu macun dolgu malzemesine (malzemenin ağırlıkça %60-90'ı < 20 μm) göre nispeten iyi dayanımlı dolgu üretmektedir (Landriault, 1995; Fall vd., 2005a). İyi bir tane boyut dağılımına sahip malzemenin her boyuttan yeterli miktarda tane içermesi ve uniformluk katsayısının (C_u) 4-6, eğrilik katsayısının (C_c) ise 1-3 arasında olması istenir (Annor, 1999). Bu çalışmada kullanılan atık malzemenin tane boyut dağılımı grafiğinden, C_u değerinin 9,3, C_c değerinin ise 1,52 olduğu ve bu bakımdan atık malzemenin iyi bir tane boyut dağılımına sahip olduğu görülmektedir (Tablo 6).

Atık malzemenin kimyasal bileşimini belirlemeye yönelik incelemeler spektrofotometre (SO_3) ve atomik absorpsiyon spektrometre (AAS) yöntemleri ile yapılmış ve sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Atık malzemenin kimyasal bileşiminden (Tablo 6), atığın baskın olarak demir oksit (FeO), sülfür (S) ve silisyum dioksit (SiO_2) içerdiği görülmektedir. Philips X'pert PW 3040 X-ışınları difraktometre (XRD) cihazı kullanılarak elde edilen mineralojik bileşimden, atık malzemenin yüksek oranda pirit minerali (FeS_2) ve

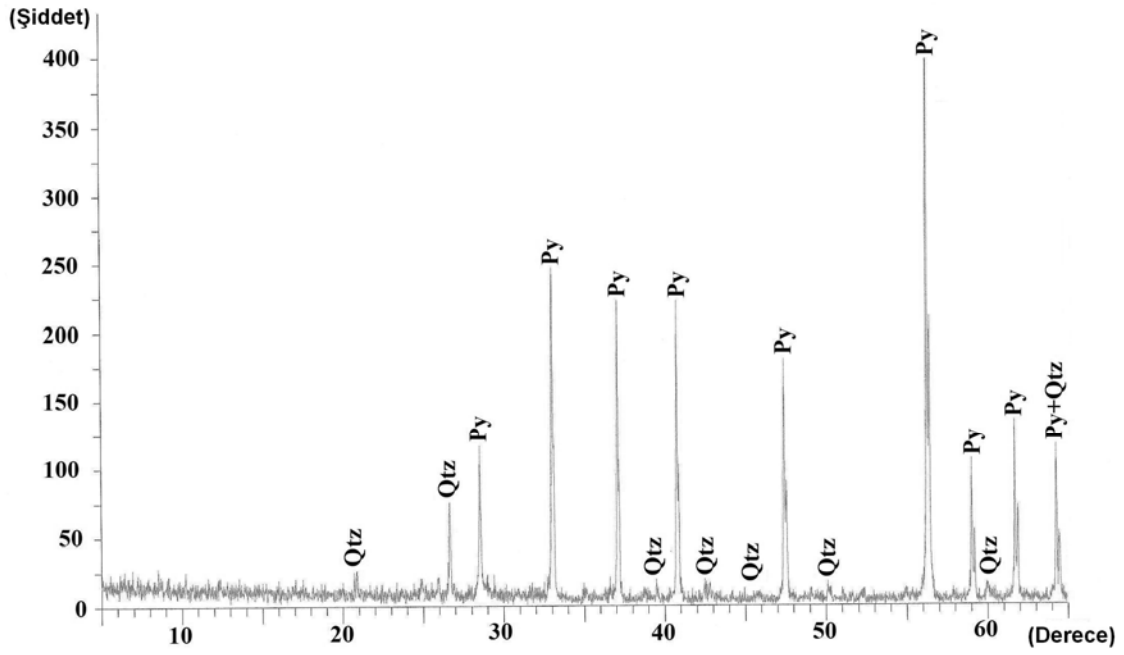
az miktarda kuvars minerali (SiO_2) içerdiği saptanmıştır (Şekil 34). Atık malzeme örneğinin özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı piknometre ve yüzey alanı ölçer cihazı ile belirlenmiş olup sırasıyla $4,09 \text{ gr/cm}^3$ ve $3584 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak ölçülmüştür (Tablo 6).



Şekil 33. Atık malzeme örneğinin tane boyut dağılımı

Tablo 6. Atık malzemenin fiziksel ve kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim (%)							
MgO	1,19	CaO	0,95	K ₂ O	0,23	SO ₃	2,83
Al ₂ O ₃	3,27	FeO	22,92	Na ₂ O	0,17	Cl ⁻	0,003
SiO ₂	11,39	S	26,22	TiO ₂	< 0,01	Kızdırma kaybı	29,02
Toplam							98,203
Fiziksel özellikler							
D ₁₀ (µm)	4,0	D ₃₀ (µm)	15,0	D ₆₀ (µm)	37,0	D ₈₀ (µm)	62,0
D ₂₀ (µm)	7,8	D ₅₀ (µm)	28,0	D ₇₀ (µm)	49,0	D ₉₀ (µm)	83,0
C _u [C _u = (D ₆₀) / (D ₁₀)]				9,3	C _c [C _c = (D ₃₀) ² / (D ₁₀)*(D ₆₀)]	1,52	
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)				3584	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	4,09	
Mineralojik bileşim: Pirit: FeS ₂ ; Kuvars: SiO ₂							
D ₁₀ : Malzemenin %10'unun elek altına geçtiği tane boyutu;				C _u : Uniformluk katsayısı;		C _c : Eğrilik katsayısı	



Şekil 34. Atık malzeme örneğinin XRD profili (Py: Pirit; Qtz: Kuvars)

2.3. Bağlayıcı Malzeme

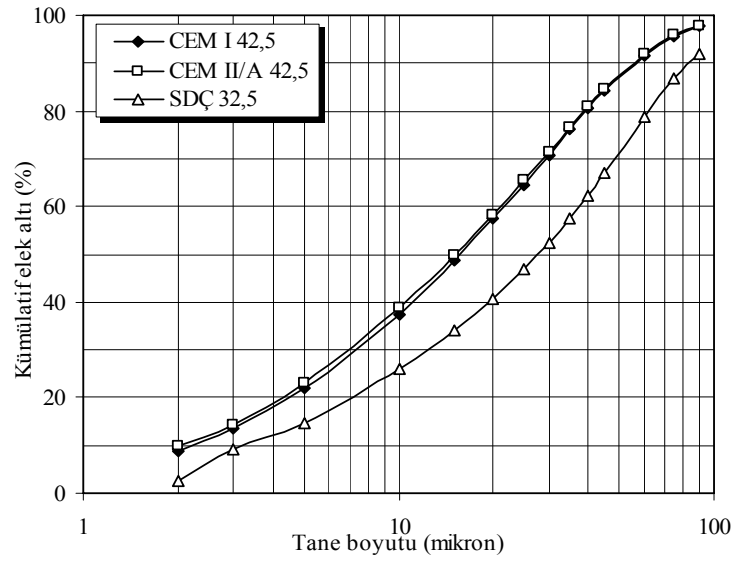
Deneysel çalışmalarda bağlayıcı malzeme olarak; Portland çimentosu (CEM I 42,5), Portland kompozite çimento (CEM II/A 42,5) ve sülfata dayanıklı çimento (SDÇ 32,5); mineral katkı maddesi olarak doğal (2 farklı tras ve pumis) ve yapay (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve atık cam malzeme) puzolanlar kullanılmıştır (Şekil 35). Bu malzemelere ilişkin yapılan deneysel çalışmalar sırasıyla aşağıda verilmiştir.



Şekil 35. Deneysel çalışmalarda kullanılan bağlayıcı ve mineral katkı maddeleri

2.3.1. Çimento

Macun dolgu karışımlarının hazırlanmasında Ünye çimento fabrikasından temin edilen normal Portland çimentosu (CEM I 42,5), Portland kompoze çimento (CEM II/A 42,5) ve Akçansa çimento fabrikasından temin edilen sülfata dayanıklı çimento (SDÇ 32,5) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan bağlayıcılara ait fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikler Şekil 36 ve Tablo 7’de verilmiştir.



Şekil 36. Çimento malzemelerinin tane boyut dağılımı

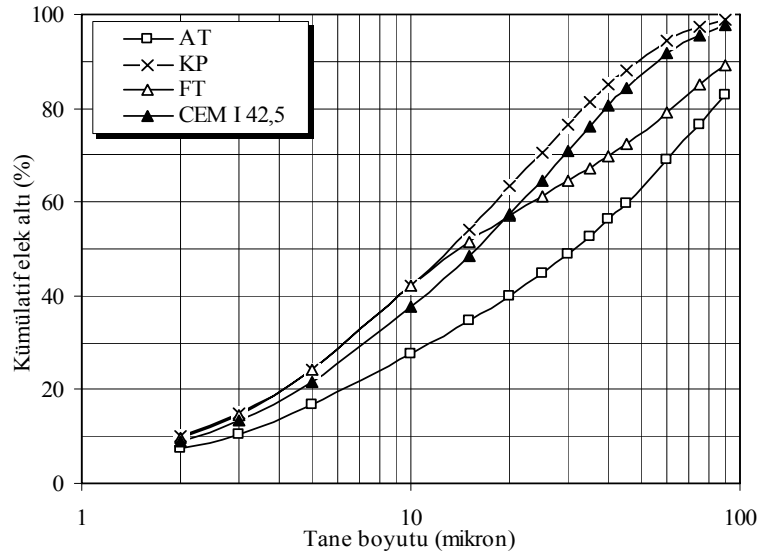
Tablo 7’de görüldüğü üzere, SDÇ 32,5 diğer çimentolara kıyasla daha yüksek oranda CaO, Fe₂O₃ ve daha düşük oranda Al₂O₃ içermektedir. Ayrıca SDÇ 32,5’in tane boyut dağılımının nispeten iri (Şekil 36) ve düşük özgül yüzey alanına (3140 cm²/g) sahip olduğu görülmektedir (Tablo 7). Boque eşitlikleri kullanılarak yapılan hesaplamalarda CEM I 42,5’in %10,95 oranında, SDÇ 32,5’in ise %5,20 oranında C₃A içerdiği hesaplanmıştır (Hurley ve Pritchard, 2005). CEM II/A 42,5 yaklaşık %14 oranında tras, %6 oranında da kireçtaşı içermektedir.

Tablo 7. Kullanılan bağlayıcıların kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri

Karakteristik	CEM I 42,5 (%)	CEM II/A 42,5 (%)	SDÇ 32,5 (%)
Kimyasal bileşim			
SiO ₂	20,31	24,51	21,31
Al ₂ O ₃	5,93	7,15	4,71
Fe ₂ O ₃	2,82	3,42	4,31
CaO	61,02	54,36	62,13
MgO	1,15	1,24	1,26
SO ₃	2,95	2,92	2,88
Na ₂ O	0,32	0,53	0,24
K ₂ O	1,14	1,38	0,75
Cl ⁻	0,0101	0,0082	0,0159
Serbest CaO	1,14	-	0,25
Çözünmeyen kalıntı	1,18	-	-
Kızdırma kaybı	3,78	3,75	1,54
Toplam katkı	-	20,73	-
Fiziksel Özellikler			
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3,01	2,94	3,20
Özgül yüzey (cm ² /g)	4345	4280	3140
200 µm elekte kalıntı (%)	-	-	-
90 µm elekte kalıntı (%)	2,16	2,09	8,03
45 µm elekte kalıntı (%)	15,84	15,43	32,96
Mineralojik bileşim			
C ₃ S	37,10	-	41,43
C ₂ S	30,30	-	29,90
C ₃ A	10,95	-	5,20
C ₄ AF	8,57	-	13,10

2.3.2. Doğal Puzolanlar

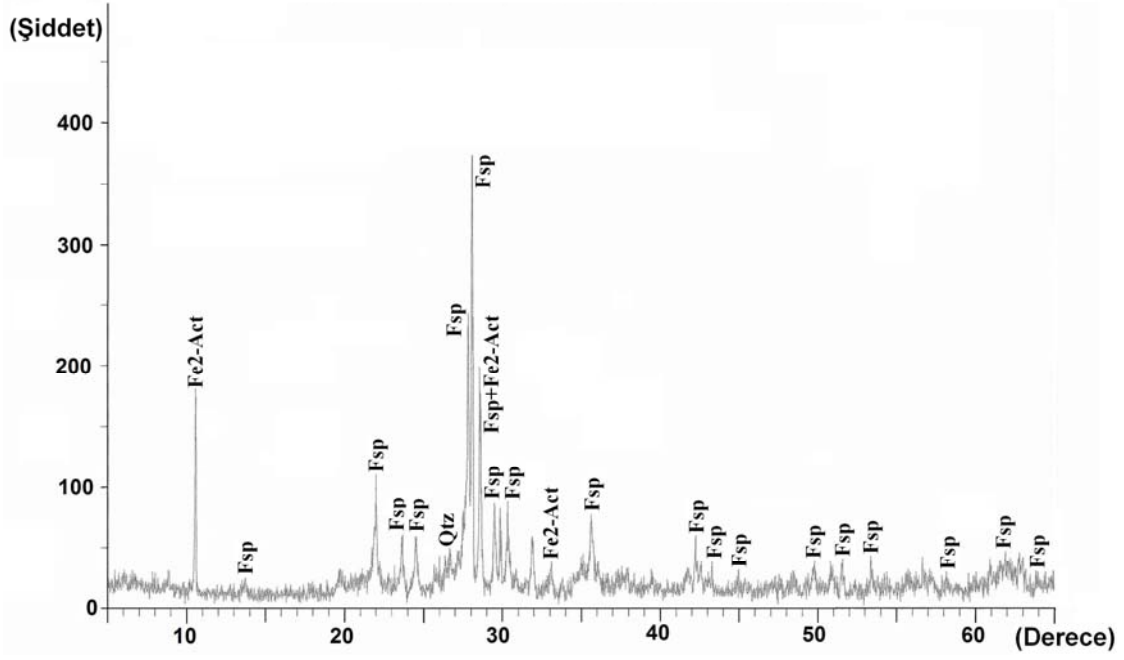
Bu çalışmada doğal puzolan olarak; Ordu ili, Akkuş ve Fatsa yöresinden temin edilen iki farklı tras (AT ve FT) ve Kayseri yöresinden temin edilen pumis (KP) kullanılmıştır. AT, FT ve KP bağlayıcı fazı içinde CEM I 42,5 yerine kısmen ağırlıkça %10, 20 ve 30 (örneğin, CEM I 42,5:AT; 90:10; 80:20; 70:30) oranlarında kullanılmıştır. AT, FT ve KP laboratuarda önce merdaneli kırıcıdan (-4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyalı değirmende AT ve FT 90 dakika, KP ise 45 dakika kuru öğütmeye tabi tutularak inceliği minimum 3000 cm²/g'ye getirilmiştir. Öğütme işleminden sonra TS EN 196-2 ve TS EN 196-6' ya göre malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 37-40, Tablo 8). Doğal puzolanların reaktif silika miktarları TS EN 197-1'e göre, puzolanik etkinlik deneyleri ise TS 25'e göre, TS EN 196-1'de tanımlanan standart kum kullanılarak yapılmıştır (Tablo 9). Standart kalıplar içerisine dökülerek hazırlanan örneklerin 7 günlük kür süresi sonunda basınç ve çekme dayanımları belirlenmiştir



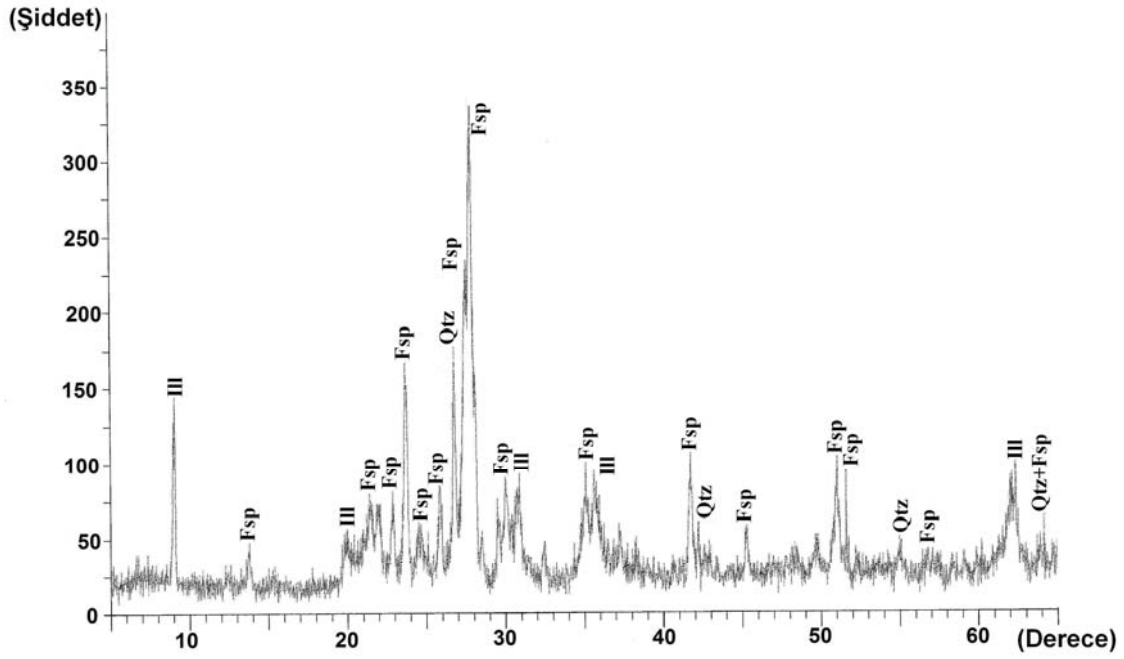
Şekil 37. Doğal puzolan malzemelerinin tane boyut dağılımı

Tablo 8. Doğal puzolanların kimyasal, fiziksel ve mineralojik bileşimi

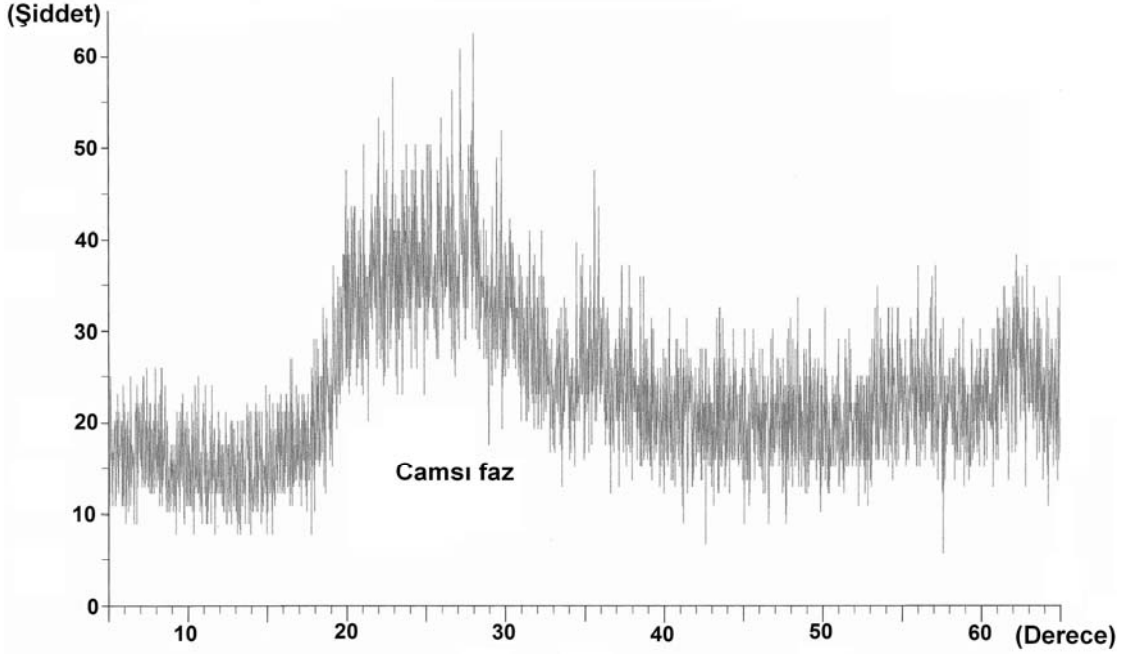
Karakteristik	AT (%)	FT (%)	KP (%)
Kimyasal bileşim			
SiO ₂	55,82	57,28	62,81
Reaktif SiO ₂	35,00	25,94	55,88
Al ₂ O ₃	16,13	18,60	16,19
Fe ₂ O ₃	6,86	4,70	3,75
CaO	8,57	5,72	2,86
MgO	3,97	1,47	0,83
SO ₃	0,15	0,16	0,13
Na ₂ O	2,20	2,84	2,90
K ₂ O	2,20	4,07	2,45
TiO ₂	0,54	0,77	0,69
Serbest CaO	-	-	-
Kalıntı	-	-	-
Kızdırma kaybı	3,12	3,65	6,75
Toplam	99,57	99,35	99,36
Fiziksel özellikler			
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,645	2,580	2,406
Özgül yüzey alan (cm ² /g)	4940	6975	7710
Öğütme süresi (dakika)	90	90	45
Mineralojik bileşim			
	Feldispat: (K,Na)AlSi ₃ O ₈	Feldispat: (K,Na)AlSi ₃ O ₈	Camsı faz
	Kuars: SiO ₂	Kuars: SiO ₂	
	Ferroaktinolit:	İllit:	
	(Ca,Na,K) ₂ Fe ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	[(K,H ₃ O)Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂]	



Şekil 38. AT malzeme örneğinin XRD profili (Fsp: Feldispat; Qtz: Kuvars; Fe2-Act: Ferroaktinolit)



Şekil 39. FT malzeme örneğinin XRD profili (Ill: İllit; Fsp; Feldispat; Qtz: Kuvars)



Şekil 40. KP malzeme örneğinin XRD profili

Tablo 9. Puzolanik etkinliğin belirlenmesi için harçların hazırlanmasında kullanılan karışım oranları (TS 25, 1975)

Malzeme	Miktar (gr)
Kireç-Ca(OH) ₂	150
Tras	$T = 2 \cdot 150 \cdot (\delta_{DP}) / (\delta_{Kireç})$
Standart kum (TS-EN 196-1)	1350
Su	$0,5 \cdot (150 + T)$

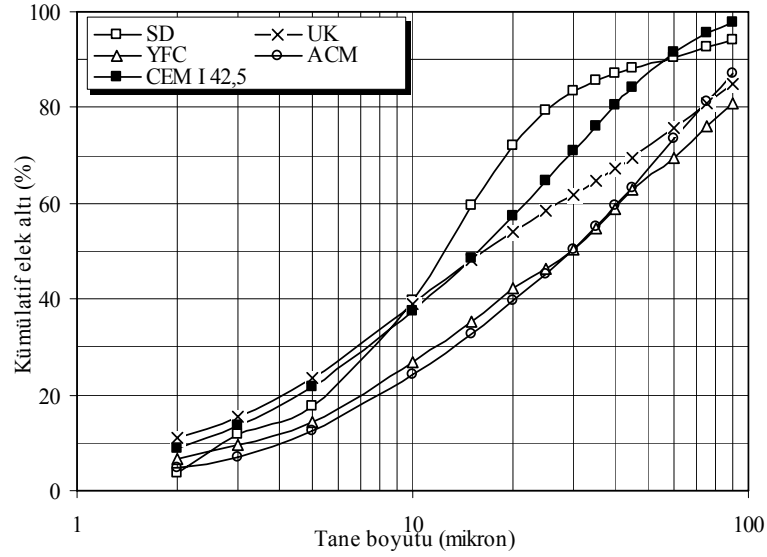
2.3.3. Yapay Puzolanlar

Bu çalışmada yapay puzolan olarak; Kardemir demir-çelik fabrikasından temin edilen yüksek fırın cürufu (YFC), Antalya Etibank Elektrometalurji işletme tesislerinden temin edilen silis dumanı (SD), Afşin Elbistan termik santralinden temin edilen uçucu kül (UK) ve yerel camcıdan temin edilen beyaz renkli atık cam malzeme (ACM) kullanılmıştır.

ACM ve UK bağlayıcı fazı içinde CEM I 42,5 yerine kısmen ağırlıkça %10, 20 ve 30 (örneğin, CEM I 42,5:ACM; 90:10; 80:20; 70:30) oranlarında kullanılmıştır. Benzer olarak YFC bağlayıcı fazı içerisinde ağırlıkça %20, 40 ve 60; SD ise %5, 10 ve 15 oranında CEM I 42,5 yerine kısmen kullanılmıştır. SD malzemesi ince olarak temin edildiğinden kırma ve öğütme işlemine tabi tutulmamıştır. YFC, ACM ve UK laboratuvarında önce merdaneli

kırıcdan (-4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyalı değirmende YFC ve ACM 180 dakika, UK ise 30 dakika kuru öğütmeye tabi tutularak inceliği minimum $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'ye getirilmiştir. Öğütme işleminden sonra TS EN 196-2 ve TS EN 196-6' ya göre malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 41-45, Tablo 10). Yapay puzolanların reaktif silika miktarları ise TS EN 197-1'e göre belirlenmiştir.

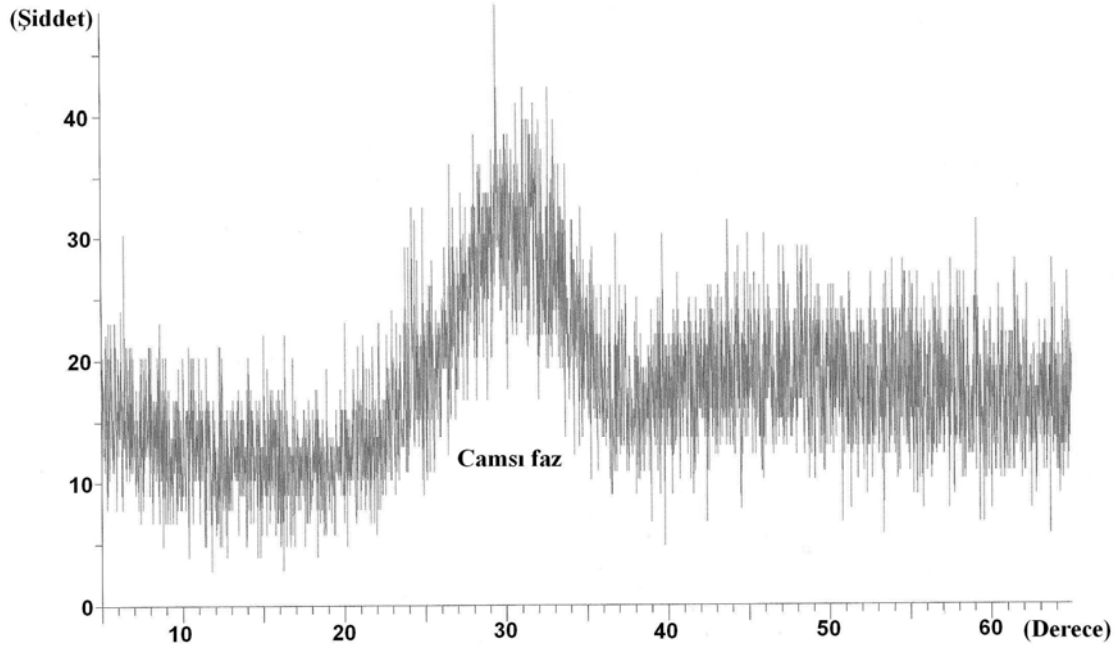
UK, YFC, ACM ve SD için yapılan puzolanik etkinlik testleri ASTM C 311 ve ASTM C 989'a göre gerçekleştirilmiştir. Kontrol numunesinin hazırlanmasında; 500 gr Portland çimento, 1375 gr standart kum ve 242 ml su kullanılmıştır. Karışım numunelerinin hazırlanmasında ise Portland çimentosunun %20'lik kısmı UK, ACM ve SD; %50'lik kısmı YFC ile ikame edilmiştir. Her bir karışım için 3 adet 5 cm x 5 cm x 5 cm ebatlarında kübik numune hazırlanmış, 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımları belirlenmiştir.



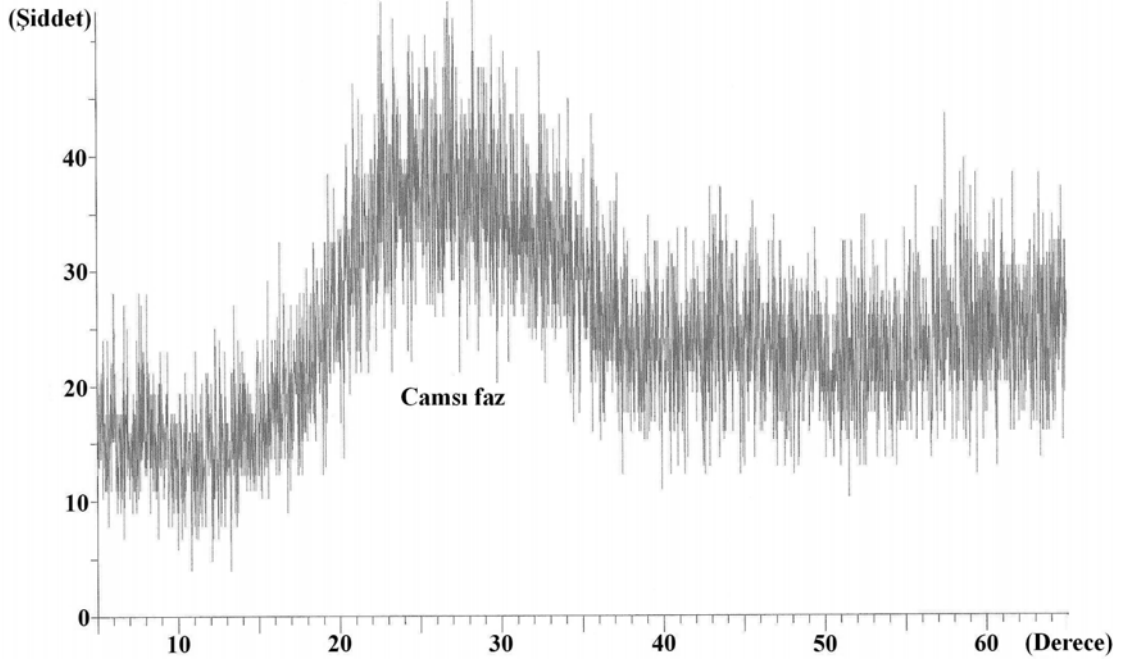
Şekil 41. Yapay puzolan malzemelerinin tane boyut dağılımı

Tablo 10. Yapay puzolanların kimyasal, fiziksel ve mineralojik bileşimi

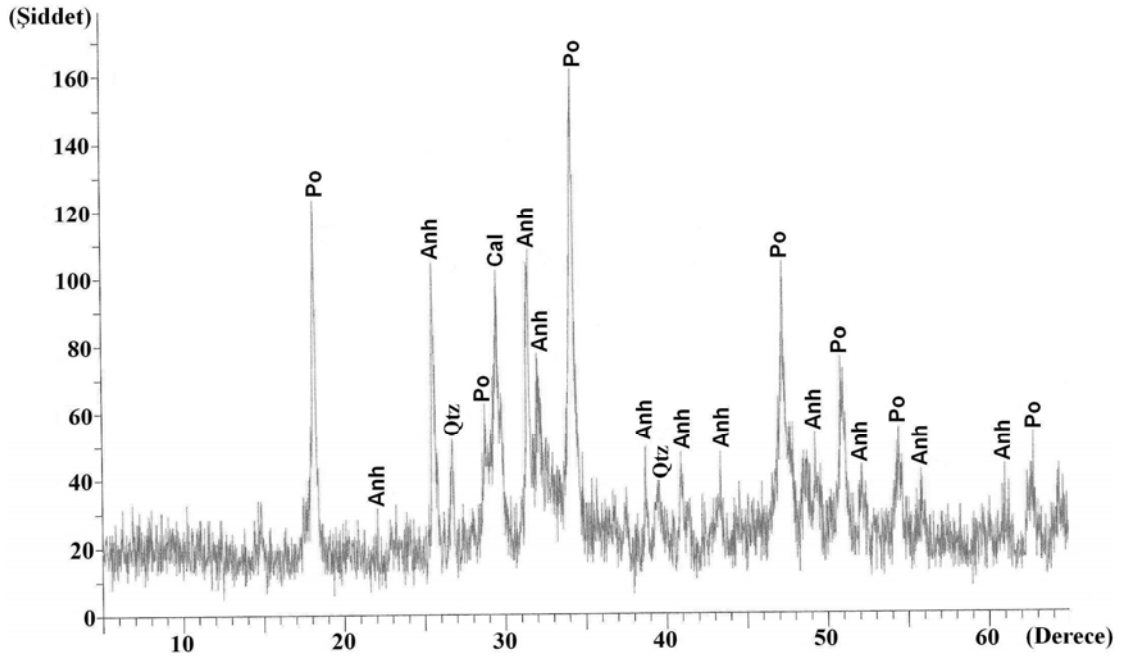
Karakteristik	YFC (%)	ACM (%)	UK (%)	SD (%)
Kimyasal bileşim				
SiO ₂	38,25	72,76	12,21	90,62
Reaktif SiO ₂	37,98	46,69	11,38	88,18
Al ₂ O ₃	12,60	1,32	6,13	0,64
Fe ₂ O ₃	0,84	0,39	2,80	0,68
CaO	37,60	8,09	50,56	0,25
MgO	7,28	4,38	1,57	0,33
SO ₃	0,15	0,12	11,38	1,04
Na ₂ O	0,52	10,75	0,09	0,53
K ₂ O	0,80	0,05	0,25	3,07
TiO ₂	1,00	0,27	0,69	0,40
Cl	0,0050	0,0004	0,0124	0,19
Serbest CaO	-	-	13,86	-
Kalıntı	-	-	-	-
Kızdırma kaybı	0,12	0,01	13,90	1,79
Toplam	99,17	98,14	99,59	99,54
Fiziksel özellikler				
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,87	2,51	2,42	2,39
Özgül yüzey alan (cm ² /g)	3128	3318	7950	24175
Öğütme süresi (dakika)	180	180	30	-
Mineralojik bileşim				
	Camsı faz	Camsı faz	Kuvars: SiO ₂ Portlandit: Ca(OH) ₂ Anhidrat: CaSO ₄ Kalsit: CaCO ₃	Camsı faz Feldispat: (K,Na)AlSi ₃ O ₈ Kuvars: SiO ₂



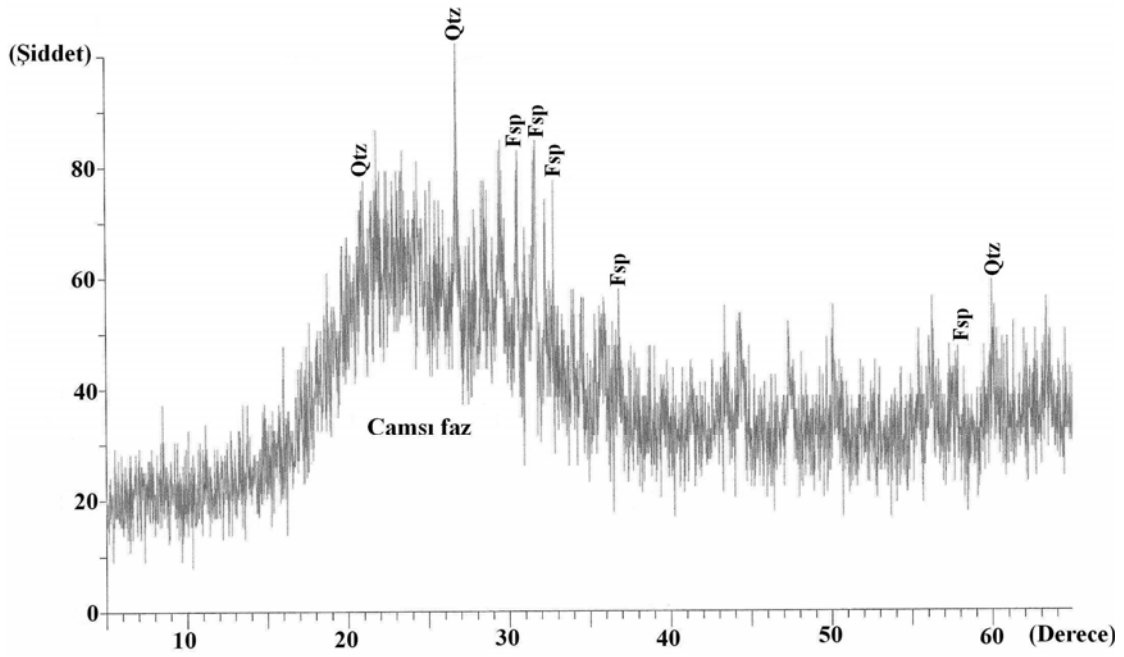
Şekil 42. YFC malzeme örneğinin XRD profili



Şekil 43. ACM malzeme örneğinin XRD profili



Şekil 44. UK malzeme örneğinin XRD profili (Qtz: Kuvars; Po: Portlandit; Anh: Anhidrat; Cal: Kalsit)

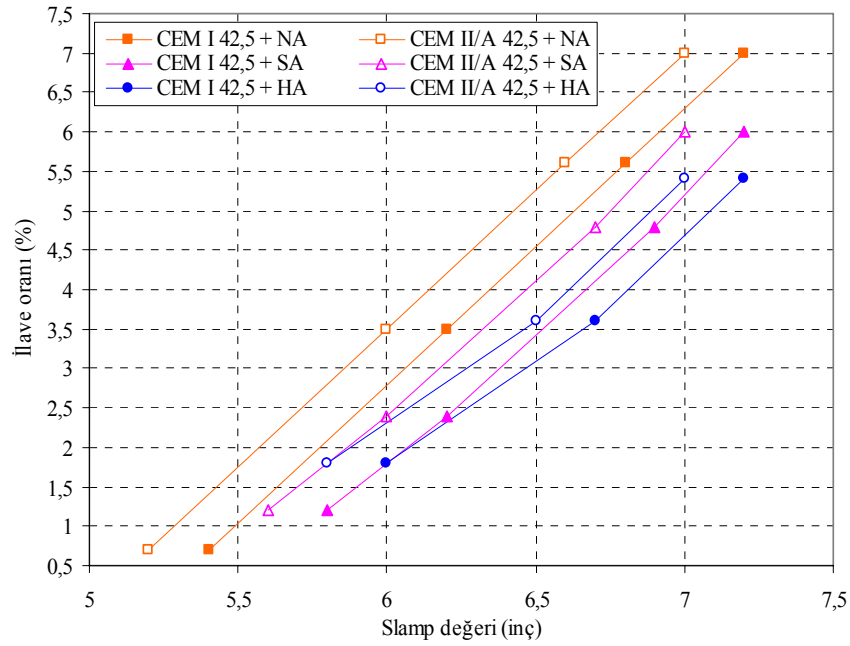


Şekil 45. SD malzeme örneğinin XRD profili (Fsp; Feldispat; Qtz: Kuvars)

2.4. Akışkanlaştırıcılar

Bu çalışmada akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi olarak; Euclid Chemical Company firmasından temin edilen normal akışkanlaştırıcı (NA) ve İksa Beton ve Yapı Kimyasallarından temin edilen süper (SA) ve hiper (HA) akışkanlaştırıcılar kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar iki farklı çimento (CEM I 42,5 ve CEM II/A 42,5) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylein tamamında karışım içerisinde bulunan toplam suyun %7,5'i azaltılarak (ilave edilmeyerek), onun yerine karışımın istenen akışkanlığını (7 inch slump) sağlayacak miktarda akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Akışkanlaştırıcılar karışıma çimento miktarına göre hesaplanarak ilave edilmiştir. NA, SA ve HA'nın karışıma ilave oranlarını belirlemek amacıyla bir dizi slump ölçümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 46). Yapılan slump ölçümlerinden istenen akışkanlığa ulaşmak için (7 inch slump) karışıma çimento miktarına göre %7 oranında NA, %6 oranında SA ve %5,4 oranında HA ilave edilmesi gerektiği belirlenmiştir (Şekil 46).

Akışkanlaştırıcıların karışıma çimento ile suyun etkileşiminden 30–60 saniye sonra ilave edilmesinin akışkanlığı iyileştirmede daha etkili olduğu belirtildiğinden (Ramachandran, 1995; Chun, 2001; Klein ve Simon, 2006), akışkanlaştırıcılar karışıma çimento ile suyun etkileşiminden 60 saniye sonra ilave edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan akışkanlaştırıcıların bazı özellikleri Tablo 11'de verilmiştir.



Şekil 46. Macun dolgu slamplarının akışkanlaştırıcı katkı ilavesine göre değişimi

Tablo 11. Kimyasal katkı maddelerine ait bazı özellikler

Karakteristik	Normal	Süper	Hiper
Kimyasal bileşim	Su (>%60) sodyum lignosülfonat (% 30-40) Trietanolamin (%1-5)	Naftalin sülfonat kondensat	Polikarboksilat kondensat
Ticari adı	EUCO-FILL 30 (Euclid Chemical Company)	İKSAMENT NS (İksa Beton ve Yapı Kimyasalları)	POLYCAR-100 (İksa Beton ve Yapı Kimyasalları)
Önerilen kullanım dozajı	350-1200 ml aralığında (1 ton dolgu için)	Çimentoya göre %0,6- 3 oranında	Çimentoya göre %1 oranında
Standarda uygunluğu	ASTM C 494 tip A	ASTM C 494 tip F	ASTM C 494 tip F
Sağlık ve güvenlik bilgisi	Yapısında insan ve çevre sağlığına zararlı maddeler yoktur	Yapısında insan ve çevre sağlığına zararlı maddeler yoktur	Yapısında insan ve çevre sağlığına zararlı maddeler yoktur
Raf ömrü	1 yıl	1 yıl	1 yıl
Fiziksel Özellikler			
Görünüm	Kahve renkli sıvı	Koyu kahve renkli sıvı	Açık kahve renkli sıvı
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,19	1,20 ± 0,03	1,03 ± 0,02
pH	6,6-9,6	6,50-8,00	6,50-8,00
Klorür	-	≤ %0,1 (TS EN 480- 10)	≤ %0,1 (TS EN 480- 10)
Alkali içeriği	-	≤ %10 (TS EN 480- 12)	≤ %10 (TS EN 480- 12)
Su azaltma yeteneği	• Referans numuneye göre kütlece %5-10 arasında	• Referans numuneye göre kütlece %12-25 arasında	• Referans numuneye göre kütlece %20-40 arasında

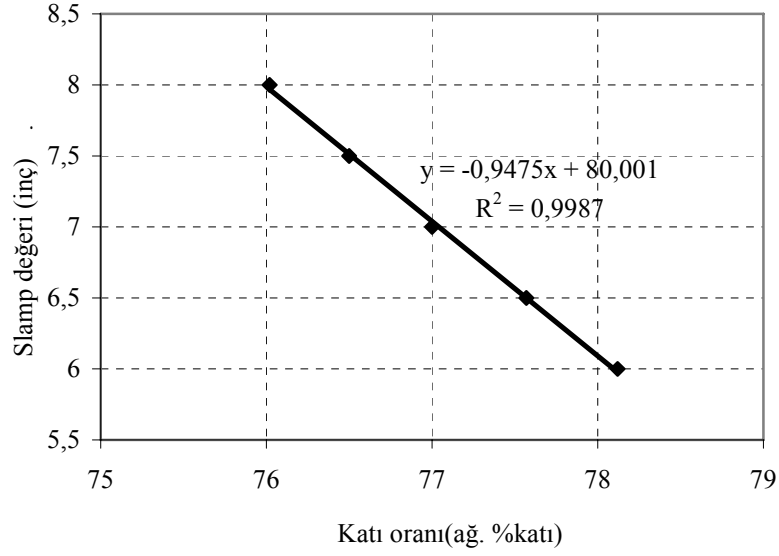
2.5. Atık Malzemenin Reolojik Özellikleri

Atık malzeme örneği için ASTM C 143 standardına göre 6,0-8,0 inch slamp aralığında bir dizi slamp ölçümü gerçekleştirilmiş ve slamplara karşılık gelen su ve katı oranları (%) belirlenmiştir (Şekil 47). Malzemenin slamp değerinin belirlenmesi için ilk olarak, 12 inch'lik standart slamp konisinin 1/3'lük kısmı karıştırıcıdan alınan numune ile doldurulmuş ve şişleme çubuğu ile tüm yüzeyi kapsayacak şekilde 25 defa şişleme yapılmıştır. Daha sonra, slamp konisinin 2/3'lük kısmı macun dolgu karışımı ile doldurulduktan sonra tüm yüzey şişleme çubuğuyla bir önceki seviyenin 1 inch derinliğine gelecek şekilde 25 defa şişleme yapılmıştır. Son olarak da slamp konisinin tamamı numune ile doldurulmuş ve şişleme işlemi ikinci aşamada uygulandığı şekilde tekrarlanmıştır. Slamp konisinden taşan malzeme alındıktan sonra slamp konisinin üst kulplarından tutularak yüzeye dik bir şekilde kaldırılmıştır. Malzeme boşaltıldıktan sonra slamp konisi hemen malzemenin yan tarafına konulmuş ve şişleme çubuğu yere paralel olacak şekilde slamp konisinin üzerine yerleştirilmiştir. Numune yığınının üst kısmı ile şişleme çubuğunun alt tarafı arasındaki mesafe ölçülmüş, eğer malzeme yığını üzerinde alçak ve yüksek noktalar varsa bu noktalar ölçülerek alınan ortalama değer, slamp değeri olarak adlandırılmıştır.

Slampı belirlenen atık malzemedan daha sonra alınan 1 kg örnek, 8 saat boyunca 105 C°'de etüvde kurutularak örneğin katı oranı ve su içeriği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, katı oranı arttıkça atık malzemenin slamp değerinin azaldığı ve 7 inch slamp değerindeki malzemenin katı oranının %77,0 olduğu belirlenmiştir (Şekil 48).



Şekil 47. Slamp test takımı (sol) ve slamp ölçüm işlemi (sağ)



Şekil 48. Macun dolgu slamplarının katı içeriğine karşı değişimi

2.6. Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması

Atık, bağlayıcı malzeme ve karışım suyu kullanılarak %5-7 çimento oranı ve 6,5-7,5 inch slamp aralığında macun dolgu numuneleri hazırlanmış ve daha sonra %80 nemli ve 20°C sıcaklık ortamında 7, 14, 28, 56, 90, 180, 270 ve 360 günlük kür sürelerinde beklemeye tabi tutulmuştur. Bağlayıcı malzeme karışıma, katı oranına (%77) göre hesaplanarak ilave edilmiştir. Macun dolgu karışımının istenen akışkanlığa gelmesi için musluk suyu kullanılmıştır. Karışımın (atık malzeme, bağlayıcı ve su) homojen bir şekilde hazırlanması için 20,8 litre kapasiteli Univex SRMF 20 model mikser kullanılmıştır (Şekil 49). Karıştırma işlemi 105 devir/dk'lık dönme hızında 7 dakika süreyle yapılmıştır. Macun dolgu numunelerinin hazırlanmasında göz önüne alınan deneysel çalışma koşulları Tablo 12-14'de verilmiştir. Karışım suyunun (atığın kendi bünyesinde bulunan su ve katı oranını %77'ye getirmek için ilave edilen musluk suyu) ortalama pH'ı 7,93, SO_4^{-2} konsantrasyonu ise 1283 mg/l'tir. Macun dolgu karışım suyunun SO_4^{-2} konsantrasyonu göz önüne alındığında, DIN 4030-1'e göre etki derecesi yüksek agresif su sınıfına girdiği; ve bu tür SO_4^{-2} içeriği yüksek olan suların macun dolgunun dayanım ve durabilitesini olumsuz yönde etkilediği belirtilmektedir (Benzaazoua vd., 2004; Fall ve Benzaazoua, 2005b).

Tablo 12. Çimento tipi, oranı ve su/çimento oranının macun dolgu performansına etkisini belirlemek için tasarlanan deneysel çalışma koşulları

	Atık (%)	Bağlayıcı (%)	Su (%)	Katı oranı (KO) ¹ (%)	Bağlayıcı oranı (BO) ² (%)	Su/çimento oranı (w/c) ³	Slamp (inch)
Bağlayıcı tipi	73,150	3,850	23,0	77,0	5,0	5,97	7,0
Bağlayıcı oranı	73,150	3,850			5,0	5,97	
	72,380	4,620	23,0	77,0	6,0	4,98	7,0
	71,610	5,390			7,0	4,27	
Su/çimento oranı	72,675	3,825	23,5	76,5		6,14	7,5
	73,150	3,850	23,0	77,0	5,0	5,97	7,0
	73,625	3,875	22,5	77,5		5,81	6,5

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

Tablo 13. Portland çimentosu yerine belirli oranlarda doğal ve yapay puzolan ikamesinin macun dolgu performansına etkisini belirlemek için tasarlanan deneysel çalışma koşulları

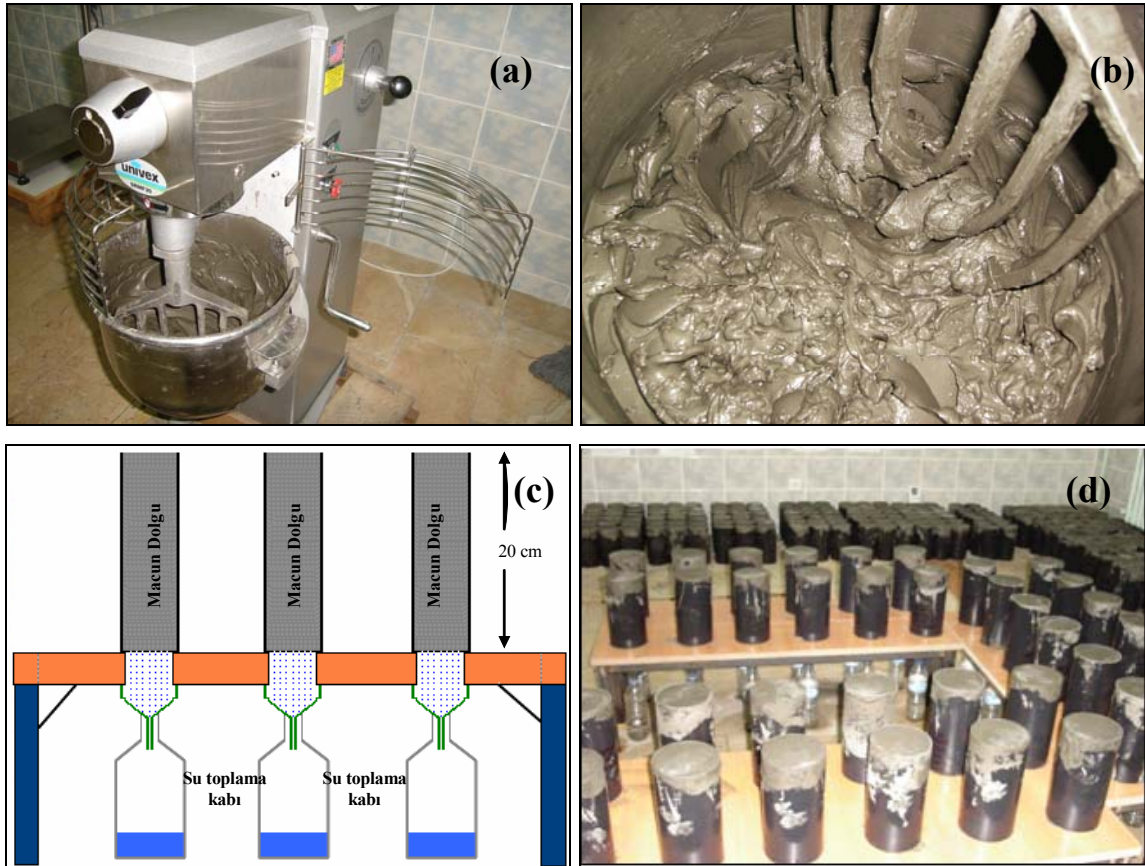
Atık (%)	CEM I 42,5 (%)	Puzolan tipi ve oranı (%)	Su (%)	(KO) (%)	(BO) (%)	(w/c)	
73,150	3,465; 3,08; 2,695	KP	23,0	77,0	5,0	5,97	
		AT					0,385; 0,77; 1,155
		FT					
73,150	3,465; 3,08; 2,695	UK	23,0	77,0	5,0	5,97	
		ACM					0,385; 0,77; 1,155
		YFC					0,77; 1,54; 2,31
		SD					0,1925; 0,385; 0,5775
	3,08; 2,31; 1,54						
	3,6575; 3,465; 3,2725						

Tablo 14. Karışıma akışkanlaştırıcı ilavesinin macun dolgu performansına etkisini belirlemek için tasarlanan deneysel çalışma koşulları

Atık (%)	Çimento tipi ve oranı (%)	Akışkanlaştırıcı ve ilave oranı (%)	Su (%)	(KO) ¹ (%)	(BO) (%)	(w/c) ²	Slamp (inch)	
73,150	CEM I 42,5	3,850	21,275	78,137	5,0	5,596	7,2	
		NA						0,2695
		SA						0,2310
73,150	CEM II/A 42,5	3,850	21,275	78,137	5,0	5,586	7,2	
		NA						0,2695
		SA						0,2310
		HA	0,2079	78,186		5,580	7,2	
		NA	0,2695	78,137		5,596	7,0	
		SA	0,2310	78,168		5,586	7,0	
		HA	0,2079	78,186		5,580	7,0	

$$^1 \text{ KO} : \frac{100 \times (M_{\text{kuru-atik}} + M_{\text{kuru-baglayici}})}{(M_{\text{kuru-atik}} + M_{\text{kuru-baglayici}} + M_{\text{su}} + M_{\text{akiskanlastirici}})} ; \quad ^2 \text{ w/c} : \frac{M_{\text{su}} + M_{\text{akiskanlastirici}}}{M_{\text{kuru-baglayici}}}$$

Hazırlanan macun dolgu karışımı 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğindeki drenajlı silindirik numune kalıplarına dökülmüştür. Yeraltı üretim odalarına yerleştirilen macun dolgu malzemesindeki gibi serbest drenaj koşullarının sağlanması amacıyla silindirik kapların dip kısmına 2 mm çapında 7 adet delik açılmıştır. Her bir kür süresi için 3 adet numune hazırlanmıştır. Çimento tipi, oranı ve su/çimento oranının macun dolgu performansına etkisini belirlemek amacıyla 192; doğal puzolanların etkisini belirlemek amacıyla 216; yapay puzolanların etkisini belirlemek amacıyla 288 ve kimyasal katkı maddelerinin etkisini belirlemek amacıyla 144 adet macun dolgu numunesi olmak üzere toplam 840 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 49. Macun dolgu karışımında kullanılan mikser (a), karıştırma işlemi (b), drenaj düzenek sistemi (c) ve numunelerin kür alması (d)

2.7. Tek Eksenli Basınç Dayanımı ve Deformasyon Testleri

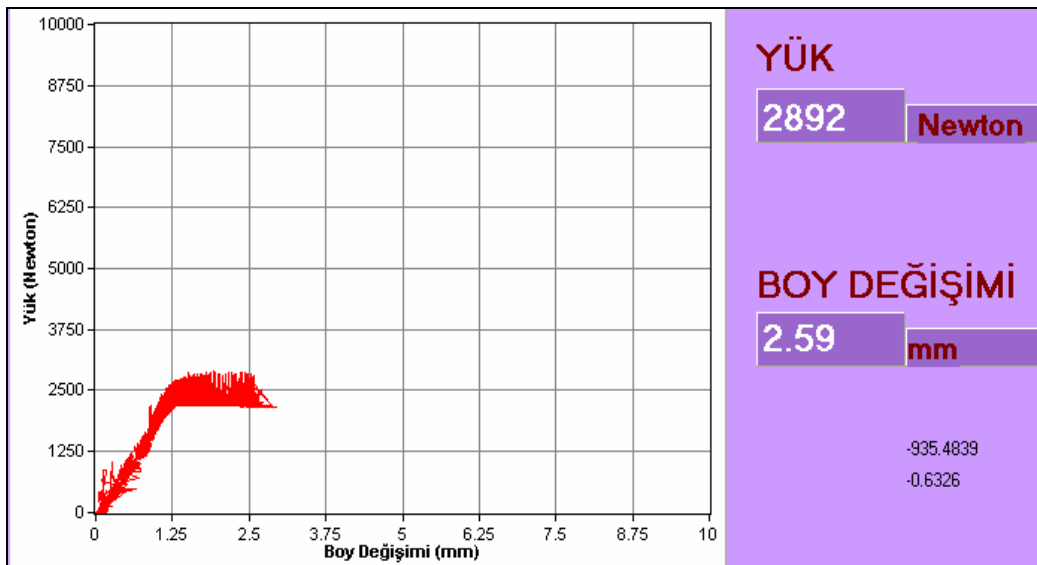
Toplam 840 adet silindirik macun dolgu numunesinin tek eksenli basınç dayanımı ve deformasyon testi, önceden belirlenen kür süreleri sonunda yük kapasitesi 50 kN ve 0,5

mm/dk lık bir yükleme hızına sahip bilgisayar kontrollü basınç ve deformasyon ünitesinde ASTM C 39 (2005) tarafından önerilmiş yönteme göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 50). Silindirik macun dolgu numunelerinin boy/çap oranı 2 olup, numunelerin alt ve üst yüzeyleri deney öncesi düzeltilmiştir. Her bir kür süresi için 3 adet numune deney edilmiş olup, sonuçlar bu 3 numuneden elde edilen değerlerin ortalaması olarak alınmıştır.

Bilgisayar tarafından otomatik olarak kaydedilen yükler ve bunlara karşılık gelen düşey boy değişimleri kullanılarak aksenal gerilme (kPa)-aksenal birim deformasyon (%) grafikleri çizilmiştir (Şekil 51).



Şekil 50. Bilgisayar kontrollü tek aksenal basınç dayanımı ve deformasyon ölçer cihazı



Şekil 51. Örnek bir tek aksenal basınç ve deformasyon test sonucu

2.8. Mikroyapı Analizleri

360 günlük kür süresi sonunda tek eksenli basınç dayanımına tabi tutulan macun dolgu numunelerinden alınan örnekler üzerinde mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM), noktasal analiz tekniği (EDS), X-ışını difraksiyonu (XRD) analizleri ve numuneler üzerinde yapılan gözlemlerden faydalanılmıştır. Macun dolgu örnekleri üzerinde gerçekleştirilen SEM, EDS ve XRD analizleri, macun dolgu mikroyapısı ile dayanım kazanımı/kaybı arasındaki bağıntıyı anlamak için tesis edilmiştir.

SEM ve EDS analizleri, LEO 1550 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle zımpara ile macun dolgu örneklerinin yüzeyleri zımparalanarak düzgün yüzeyler elde edilmiş ve daha sonra elmas pasta kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatılan örnekler altın film ile kaplandıktan sonra elektron mikroskobuna yerleştirilerek farklı büyütme değerlerinde (1000–4000) fotoğraflanmıştır.

XRD analizleri, Philips X'pert PW 3040 model X-ışınları difraktometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 360 günlük kür süresi sonunda kırılan numunelerden alınan örnekler öncelikle belirli bir inceliğe getirilmiş ve daha sonra mineralojik analize tabi tutulmuştur. XRD çekimleri $5-70^\circ$ 2θ arasında gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri, dolgunun durabilitesini kaybetmesine neden olan ikincil mineral (etrenjit ve jips) oluşumu hakkında bilgi edinmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Malzemelerin Karakterizasyonu

3.1.1. Atık Malzeme

Deneysel çalışmada kullanılan atık malzemeye ait 20 mikron altı malzeme miktarının %40 oranında olması, atık malzemenin macun oluşturması için gereken kolloidal özelliklere sahip olduğunu ve macun dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Kimyasal ve mineralojik analizlerden atık malzemenin önemli miktarda pirit minerali içerdiği görülmüştür.

Çimentolu macun dolgu içerisinde pirit minerali varlığı, özellikle uzun dönem kür sürelerinde asit ve sülfat etkisini söz konusu kılmaktadır. Pirit mineralinin su ve oksijen varlığında oksidasyona uğraması asit (H^+) ve sülfat (SO_4^{2-}) oluşumuna, devamındaki kimyasal reaksiyonlar ise genleşme özelliğine sahip ikincil alçıtaşı ve etrenjit minerali oluşumuna yol açarak, macun dolgunun dayanım ve durabilitesini kaybetmesine neden olabilir.

3.1.2. Bağlayıcı Malzeme

Bağlayıcının fiziksel, kimyasal bileşimi ve mineralojik özelliği (C_3A , C_3S/C_2S ve SiO_2/CaO oranı), asit ve sülfat etkisine karşı direnç göstermesinde önemli bir etkidir. Yüksek C_3A içeriği, C_3S/C_2S oranı ve düşük SiO_2/CaO oranına sahip bağlayıcıların asit ve sülfat etkisine karşı dayanıksız olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle sülfür içeriği yüksek atıklardan üretilen macun dolguda olduğu gibi asit ve sülfat etkisinin söz konusu olduğu ortamlarda, düşük C_3A içeriği, C_3S/C_2S oranı ve yüksek SiO_2/CaO oranına sahip bağlayıcıların kullanılması önerilmektedir (Hossain ve Lachemi, 2006; Şahmaran vd., 2007). Bağlayıcı malzemelerin tamamı (CEM I 42,5, CEM II/A 42,5 ve SDC 32,5) fiziksel açıdan yeterli inceliğe ($\geq 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$) sahiptir (Şekil 36). Bağlayıcıların sahip olduğu kimyasal ve mineralojik bileşimden, CEM I 42,5'in yüksek C_3A ve düşük SiO_2/CaO oranına sahip olduğu (Tablo 7) ve bu nedenle CEM I 42,5 kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin asit ve sülfat etkisine karşı düşük direnç göstereceği muhtemeldir.

Buna karşın, C₃A içeriği düşük ve SiO₂/CaO oranı yüksek olan SDC 32,5'in ikincil etrenjit minerali oluşumu potansiyelini azaltarak asit ve sülfat etkisine karşı dolgunun durabilitesini artıracığı düşünülmektedir.

CEM II/A 42,5'in %14 oranında puzolanik özelliğe sahip tras içermesi, ortamdaki sülfat (SO₄⁻²) ile reaksiyona girerek ikincil alçıtaşı minerali oluşumuna yol açacak portlanditin (CH) puzolanik reaksiyonla tüketilmesini ve ilave C-S-H oluşumunu sağlayabilir. İlave C-S-H oluşumunun dolgunun mikroyapısını iyileştirerek (daha düşük porozite ve geçirimsizlik) uzun dönem dayanım ve durabilitesini arttıracığı beklenebilir.

3.1.3. Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar, çimento veya betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için belirli fiziksel, kimyasal, mekanik ve puzolanik etkinlik özelliklere sahip olmalıdırlar. Örneğin, TS 25 (TS 25, 1975)'e göre SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (S+A+F) toplamı en az %70 olmalıdır. Ayrıca, doğal puzolanların MgO, SO₃ ve kızdırma kaybı oranları da TS 25'de belirtilen standartlar içerisinde bulunmalıdır. Benzer olarak sönmüş kireç ve doğal puzolanik madde karışımıyla hazırlanan numunelerin 7 günlük çekme dayanımlarının en az 1 MPa, tek eksenli basınç dayanımlarının ise en az 4 MPa olması gerekmektedir (TS 25, 1975). Doğal puzolanların kimyasal bileşimi (S+A+F), fiziksel özellikleri ve puzolanik deney sonuçları TS 25 (TS 25, 1975) ile karşılaştırmalı olarak Tablo 15'de verilmiştir. Tablo 15 incelendiğinde, doğal puzolanların TS 25'e göre gerekli fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip oldukları ve CEM I 42,5 yerine kısmen mineral katkı maddesi olarak kullanılabilmesi anlaşılmaktadır.

KP kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük çekme ve tek eksenli basınç dayanımları TS 25 (TS 25, 1975)'de belirtilen sınır (eşik) değerlere göre sırasıyla 2,6 ve 3,3 kat daha yüksektir. AT ve FT kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük çekme ve tek eksenli basınç dayanımları, KP ile üretilen harç numunelerinden daha düşüktür (Tablo 15). KP'nin AT ve FT'den daha yüksek puzolanik etkinlik göstermesi; KP'nin sahip olduğu yüksek özgül yüzey alanı (7710 cm²/g), reaktif SiO₂ (%55,88) miktarı ve camsı faz yapıda olmasıyla ilişkilendirilebilir. Çünkü, SiO₂ miktarının artmasıyla puzolanik etkinliğin arttığı, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO ve K₂O miktarının artmasıyla azaldığı, reaktif SiO₂ miktarı ve özgül yüzey alan ile puzolanik etkinlik arasında doğru orantılı bir ilişkinin olduğu belirtilmektedir (Papadakis vd., 2002; Çavdar ve Yetgin, 2007). Doğal

puzolanların puzolanik etkinlik deney sonuçları ve kimyasal bileşimleri karşılaştırıldığında bu çalışmada da benzer ilişkinin elde edildiği görülmektedir (Tablo 15).

Camacho ve Afif (2002) yapmış oldukları çalışmada, puzolanik etkinliği en az 5,4 MPa ve Al_2O_3 içeriği %11,6-14,7 arasında olan doğal puzolanların, Al_2O_3 içeriği %16'dan yüksek olanlarla karşılaştırıldığında asit ve sülfat etkisine karşı daha dirençli olduklarını belirtmiştir. Bu çalışmada kullanılan doğal puzolanların Al_2O_3 içeriklerinin %16,13-18,60 arasında olduğu göz önüne alındığında (Tablo 8), asit ve sülfat etkisine karşı dirençlerinin düşük olacağı beklenebilir.

Tablo 15. Doğal puzolanların kimyasal ve puzolanik etkinlik deney sonuçlarının TS 25 ile karşılaştırılması

TS 25	S+A+F	MgO	SO ₃	Kızdırma kaybı	Reaktif SiO ₂	Özgül yüzey alanı cm ² /g	7 günlük çekme dayanımı (MPa)	7 günlük tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
	(%)	(%)	(%)	(%)				
TS 25	>70,00	<5,00	<3,00	<10,00	-	>3000	>1,0	>4,0
FT	80,58	1,47	0,16	3,65	25,94	6975	1,2	6,4
AT	78,81	3,97	0,15	3,12	35,00	4940	1,6	8,1
KP	82,75	0,83	0,13	6,75	55,88	7710	2,6	13,3

3.1.4. Yapay Puzolanlar

Puzolanların Portland çimentosu yerine kısmen katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için belirli fiziksel, kimyasal ve mekanik (puzolanik etkinlik) özelliklere sahip olması gerekmektedir. ASTM C 618'e göre, C sınıfı uçucu külün $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ (S+A+F) toplamı en az %50, F sınıfı uçucu külün S+A+F toplamı ise en az %70 olmalıdır. Benzer olarak ASTM C 618'e göre 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksinin (%) minimum %75 olması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal bileşimi (S+A+F toplamı %21,14) göz önüne alındığında, ASTM C 618 standartlarına uygun olmadığı (Tablo 16), ancak linyit kömüründen elde edilmesi nedeniyle C tipi puzolan sınıfına girmektedir. Ayrıca yüksek oranda SO₃ (%11,38) içermektedir. Xenidis vd. (2002) C sınıfı uçucu küllerin yüksek oranda Ca içermesi (başlıca CaO, Ca(OH)₂ ve CaCO₃) nedeniyle sülfürlü maden atıklarının asit oluşturma potansiyelini engellemede faydalı olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu çalışmada CEM I 42,5 yerine mineral katkı maddesi olarak kullanılan uçucu külün de benzer kimyasal ve mineralojik özelliklere sahip

olduğu ve asit ve sülfat etkisine karşı faydalı olabileceği öngörülmektedir (Tablo 10 ve Şekil 44).

İnce olarak öğütülmüş atık cam malzeme (ACM), yüksek oranda Na₂O içermektedir. Shao vd. (2000) bu tür alkali içeriği yüksek ACM'nin, alkali-silika reaksiyonları nedeniyle çimentolu yapılarda genleşmeye ve sonuçta dayanım kaybına neden olabileceğini belirtmiştir. Shao vd (2000) ayrıca, ince olarak öğütülmüş ACM'nin tamamının 38 µm altında olması durumunda puzolanik etkinliğin arttığını, asit/sülfat etkisi ve alkali-silika reaksiyonları nedeniyle oluşan dayanım kayıplarını azalttığını belirtmiştir. Bu çalışmada kullanılan ACM'nin 38 µm altı tane miktarının %60 civarında olduğu göz önüne alındığında, ACM kullanımının asit ve sülfat etkisine karşı etkisiz olacağı düşünülmektedir. Malzemenin tamamının 38 µm altında olması için öğütme süresinin artırılması gerekmekte olup, bu işlem maliyetleri artıracaktır.

Tablo 16. Yapay puzolanların kimyasal ve puzolanik etkinlik deney sonuçlarının ASTM C 618 ile karşılaştırılması

	Malzemeler				Sınıf		
	YFC	ACM	UK	SD	N	F	C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	51,69	74,47	21,14	91,94	Min. 70,0	Min. 70,0	Min. 50,0
SO ₃ (%)	0,15	0,12	11,38	1,04	Max. 4,0	Max. 5,0	Max. 5,0
Kızdırma kaybı (%)	0,12	0,01	13,90	1,79	Max. 10,0	Max. 6,0	Max. 6,0
45 µm elekte kalıntı (%)	37,04	36,62	30,41	11,89	Max. 34,0	Max. 34,0	Max. 34,0
Puzolanik aktivite indeksi (%)							
7 gün	70	79	75,5	106	Min. 75	Min. 75	Min. 75
28 gün	74	86	80,5	124	Min. 75	Min. 75	Min. 75

Deneysel çalışmalarda kullanılan yüksek fırın cürufunun (YFC), diğer yapay puzolanlara kıyasla en düşük 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksine (sırasıyla %70 ve %74) sahip olduğu görülmektedir. Bu durum tane boyut dağılımının iri ve özgül yüzey alanının düşük olmasıyla ilişkilendirilebilir (Tablo 10). Silis dumanının (SD) en yüksek puzolanik aktivite indeksine sahip olmasının başlıca nedeni özgül yüzey alanı (24175 cm²/g), reaktif SiO₂ (%88,18) ve SiO₂ içeriğinin (%90,62) yüksek olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, SD'nin sahip olduğu puzolanik etkinliğin yanı sıra tane boyut dağılımının çok ince boyutta olması (Şekil 41), karışım içerisindeki boşlukları doldurarak dolgunun geçirimsizliğini azaltacağı ve asit ve sülfat etkisine karşı direncini artıracığı düşünülmektedir (Goldman ve Bentur 1993; Aköz vd., 1995).

3.1.5. Akışkanlaştırıcılar

Kimyasal katkı maddelerinin akışkanlaştırıcı etkinliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan ön deneylerde, karışıma ilave edilen kimyasal katkı maddesi miktarı (%) arttıkça akışkanlığın arttığı ve akışkanlaştırıcıların CEM I 42,5 ile hazırlanan karışımlarda daha etkili olduğu görülmüştür. Huynh vd. (2006) naftalin sülfonat formaldehit bazlı akışkanlaştırıcıların atık içerisinde bulunan manyetit gibi (Fe_3O_4) demir mineralleri tarafından absorbe edilmesine karşın, kuvars mineralinin bu akışkanlaştırıcıları absorbe etmediğini belirtmiştir. Bu çalışmada da NA, SA ve HA'nın CEM II/A 42,5 kullanılarak hazırlanan karışımlarda reolojik açıdan etkinliğinin nispeten düşük olması, çimento içerisinde %14 oranında bulunan doğal puzolanların (tras) kuvars minerali içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Tablo 8).

Kimyasal katkı maddesi ilavesiyle karışım suyunun toplam %7,5 oranında azalması (ilave edilmemesi) ve katı oranının %77'den yaklaşık %78,2'ye çıkmasına rağmen, dolgu karışımı istenen akışkanlıktadır (7,0-7,2 inch slamp). Ortamdaki karışım suyu miktarının azaltılması ve katı oranının artması, karışımın porozite ve geçirgenliğini azaltacağından dolgu dayanım ve durabilitesine olumlu yönde etki edeceği beklenmektedir. Ayrıca bazı araştırmacılar, bu tür akışkanlaştırıcı özelliğe sahip kimyasalların (lignin, sodyum silikat, fosfat tuzları vb.) pirit mineralinin yüzeyini kaplayarak oksidasyonunu engellediğini ve piritin pasifleştirilmesinde etkin olarak kullanılabileceğini belirtmiştir (Lalvani vd., 1990; Belzile vd., 1997; Chen vd., 2006). Bu bakımdan akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımının pirit mineralinin oksidasyon derecesini ve asit ve sülfat etkisini azaltacağı beklenebilir.

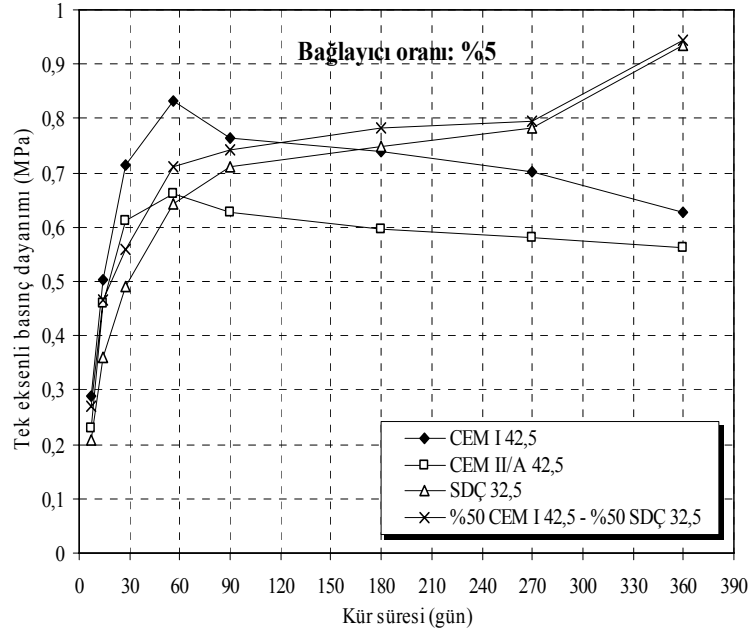
3.2. Macun Dolgu Dayanım ve Durabilitesinin Değerlendirilmesi

3.2.1. Bağlayıcı Tipinin Etkisi

Şekil 52 ve Ek Tablo 2, Portland çimentosu (CEM I 42,5), Portland kompoze çimento (CEM II/A 42,5) ve sülfata dayanıklı çimento (SDÇ 32,5 ve eşit oranda SDÇ 32,5 ve CEM I 42,5) kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu numunelerinin 7-360 günlük kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. 7-56 günlük kür süresi aralığında, kür süresinin artması ile birlikte macun dolgu

numunelerinin tamamının dayanım kazanımına devam ettiği görülmektedir. 7-56 günlük kür süresi aralığındaki ortalama dayanım artışı; CEM I 42,5 ve CEM II/A 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelerde ortalama %287 (2,87 kat), SDÇ 32,5 kullanılarak hazırlanan numunelerde %307 (3,07 kat) ve eşit miktarda SDÇ 32,5 ve CEM I 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelerde %263 (2,63 kat) olmuştur.

Aynı kür süresi aralığında SDÇ 32,5 kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin dayanım kazanımı, CEM I 42,5 ve CEM II/A 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelere göre daha düşüktür (Şekil 52). 28 günlük kür süresi sonunda, sadece CEM I 42,5 kullanılarak hazırlanan numuneler sınır dayanım değerinin üstünde (0,713 MPa) bir dayanım üretmiştir. Dolgu dayanımının, 56 günlük kür süresi sonunda en yüksek değere (0,833 MPa) ulaştığı, ancak 56-360 günlük kür süresi aralığında sürekli bir dayanım kaybının olduğu (~%25 oranında) görülmektedir.



Şekil 52. Bağlayıcı tipinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

CEM II/A 42,5 kullanılarak hazırlanan macun dolgu numuneleri de 56 günlük kür süresinden sonra dayanım kaybına uğramış, ancak CEM I 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelere göre dayanım kaybı daha düşük (%15) seviyede gerçekleşmiştir. Dayanım kaybının daha düşük olması, CEM II/A 42,5 içerisinde bulunan puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddesinin (tras), çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan portlandit

(CH) ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip ilave C-S-H jeli üretmesine ve böylece daha kompakt (gözenekliliği ve boşluk oranı daha düşük) bir dolgu oluşturmaya bağlanabilir. Uzun dönemde CEM I 42,5 ile hazırlanan numunelere kıyasla daha yüksek dayanım üretmesi beklenmesine rağmen, CEM II/A 42,5 ile hazırlanan numunelerin dayanımı 7–360 günlük kür süresi aralığında en fazla 0,66 MPa’ya ulaşmıştır. Elde edilen dayanım sonuçlarından, sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan macun dolguda bağlayıcı olarak CEM I 42,5 ve CEM II/A 42,5 kullanımının %5 çimento oranında uygun olmadığı görülmüştür. CEM I 42,5 ve CEM II/A 42,5 kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinde 56 günlük kür süresinden sonra oluşan dayanım kaybının; atık malzemenin yüksek miktarda pirit minerali içermesi, karışım suyunun sülfat konsantrasyonunun ve bu bağlayıcıların C₃A içeriklerinin yüksek olması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 34 ve Tablo 7).

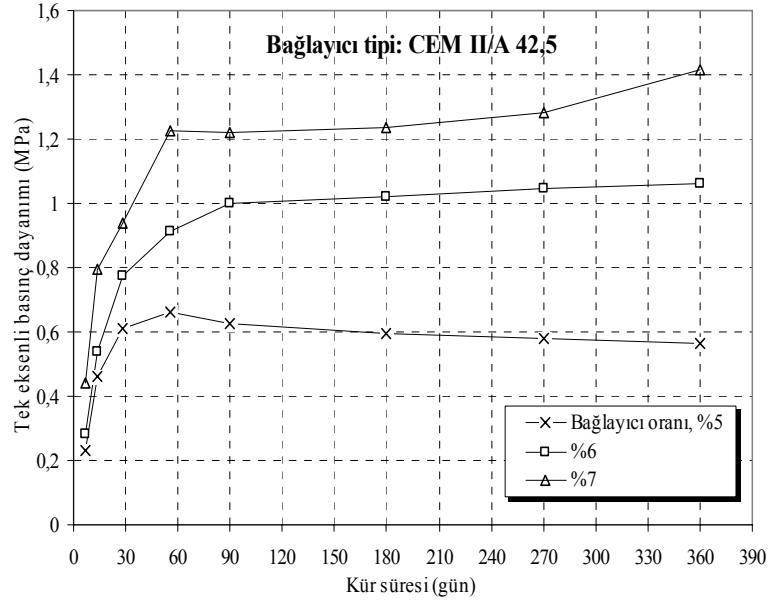
Sülfata dayanıklı çimento (SDÇ 32,5 ve eşit oranda SDÇ 32,5 ve CEM I 42,5) kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin ise, 28 günlük dayanımlarının düşük olmasına rağmen (sırasıyla 0,49 ve 0,558 MPa), uzun dönemde dayanımlarını korudukları ve hatta, 56. günden sonra dayanımlarında sırasıyla %45 ve %33 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Eşit oranda SDÇ 32,5 ve CEM I 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanımı, SDÇ 32,5 kullanılarak hazırlanan numunelere kıyasla daha yüksektir.

Sülfata dayanıklı çimento içeren macun dolgu numunelerinin uzun dönemde durabilitelerinin yüksek olması, bu çimentonun düşük oranda C₃A (%5,2) içermesi ve dolayısıyla, asit ve sülfat etkisine karşı direncinin yüksek olması ile ilişkilendirilebilir (Irassar vd., 2000; Hossain ve Lachemi, 2006; Tariq ve Nehdi, 2007). Ancak elde edilen dayanım sonuçlarından, sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan macun dolguda bağlayıcı olarak CEM I 42,5, CEM II/A 42,5 ve SDÇ 32,5 kullanımının %5 çimento oranında uygun olmadığı görülmüştür.

3.2.2. Bağlayıcı Oranının Etkisi

Şekil 53, %5, %6 ve %7 çimento oranında CEM II/A 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelerin 7-360 günlük kür süresi aralığındaki tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. %6 ve %7 çimento oranında hazırlanan numunelerin, 28 günlük kür süresi sonunda yeterli dayanım kazanımını (>0,7 MPa) sağladıkları görülmektedir. Çimento oranı %5’ten %7’ye yükseltildiğinde, macun dolgu numunelerinin dayanımı bütün kür

sürelerinde 1,5-2,5 kat artmıştır. Çimento oranının %5'den %6-7'ye çıkartılması, macun dolgu numunelerinin uzun dönem performansında da gözle görülür bir iyileşme sağlamıştır (Şekil 53). Yüksek çimento oranlarında (%6-7) hazırlanan numunelerde, %5 çimento oranında görülen dayanım kaybının aksine, uzun dönemde (56-360 günlük kür süresi aralığında) ortalama %15-17 oranında bir dayanım artışı görülmüştür.

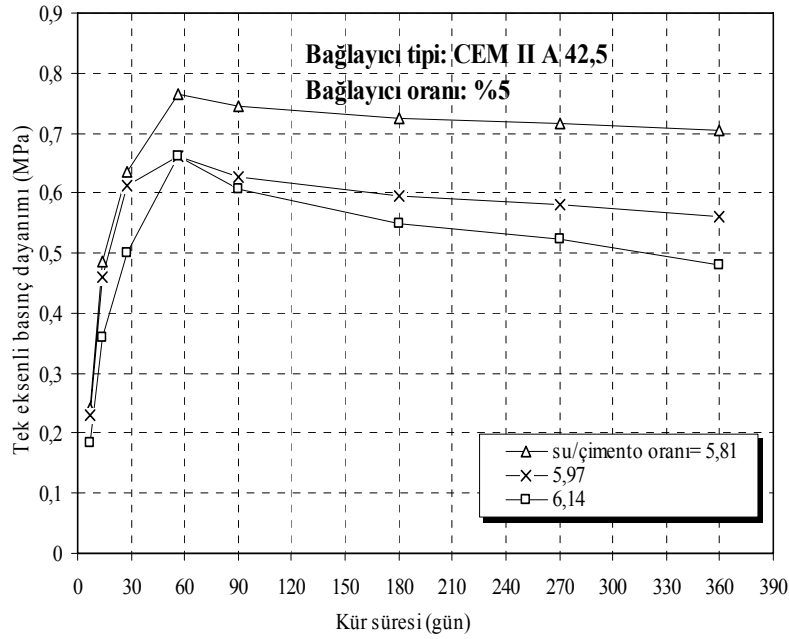


Şekil 53. Bağlayıcı oranının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

Fall ve Benzaazoua (2005b), çimento dozajının artışı ile birlikte asit ve sülfat etkisinin azaldığını ve uzun dönemde dayanım kaybının oluşmadığını belirtmiştir. Çimento miktarının artması sonucu kısa ve özellikle uzun dönemde macun dolgu performansındaki iyileşmenin, ortamdaki C-S-H miktarının artmasına ve dolgunun gözeneklilik ve porozitesinin azalması ve bunların sonucu olarak, asit ve sülfat etkisine karşı dolgu direncinin artması ile ilişkili olduğu öngörülmektedir. Düşük porozite nem ve havanın difüzyonunu azaltmak suretiyle piritin oksidasyonunu ve buna bağlı asit ve sülfat etkisini azaltmaktadır (Tikal'sky ve Carrasquillo, 1992; Petrolito vd., 2005; Klein ve Simon, 2006; Erçıkı vd., 2008a,b). Ayrıca CEM II/A 42,5 içerisinde yer alan puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddesi (tras), ortamdaki kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girerek ilave C-S-H jeli üretimi sağlamakta ve ikincil alçıtaşı minerali oluşumunu sınırlandırmaktadır. Çimento miktarının artması dolgunun dayanımını artıracak ancak ekonomik yönden işletmeyi verimsiz kılacaktır.

3.2.3. Su/Çimento Oranının Etkisi

%5 çimento oranında ve farklı su/çimento oranlarında (5,81, 5,97, 6,14) CEM II/A 42,5 kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin dayanım sonuçları incelendiğinde (Şekil 54), su/çimento oranının artması ile birlikte numunelerin dayanım kazanımının azaldığı ve uzun dönemde durabilitesini koruyamadıkları görülmektedir.



Şekil 54. Su/çimento oranının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

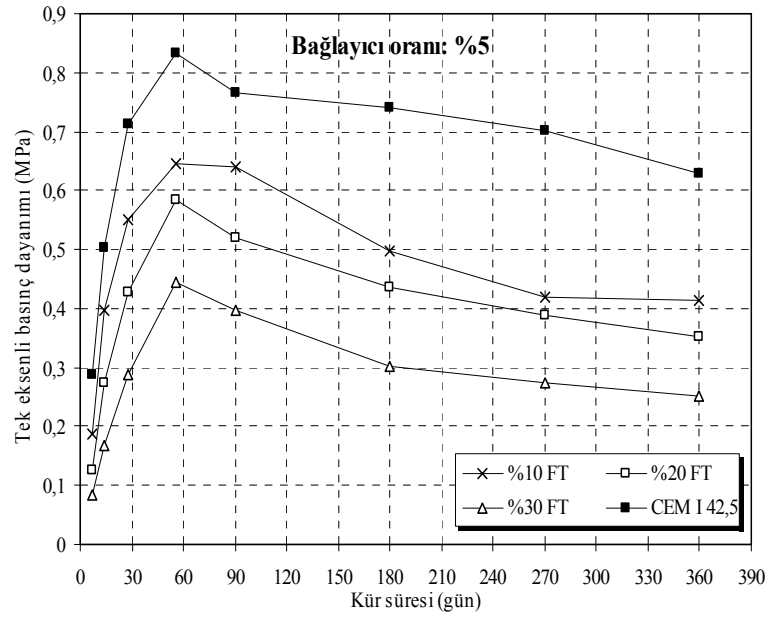
Sadece en düşük su/çimento oranında (5,81) hazırlanan numuneler, 56-360 günlük kür süresi aralığında sınır değer üzerinde dayanım üretmiştir. Su/çimento oranının artması ile birlikte gözlenen dayanım kaybındaki artış, dolgunun mikroyapısının daha gözenekli ve boşluklu hale gelmesi ile açıklanabilir. Gözenek ve boşluk miktarının artması, dolgu/beton numunesi içerisine girebilecek su ve oksijen miktarında artışa neden olmaktadır. Bu da uzun dönemde daha fazla dayanım kaybının oluşmasına yol açmaktadır (Benzaazoua vd., 2004; Yaşar vd., 2004; Şahmaran vd., 2007; Erçikdi vd., 2009a, c). Ancak su/çimento oranının azalması, dolgunun yeraltına boru hattı ile taşınmasında birtakım problemlere (boru hattında aşınma vb.) ve daha fazla enerji tüketimi nedeniyle maliyetlerin artmasına yol açabilir.

3.2.4. Doğal Puzolan Kullanımının Etkisi

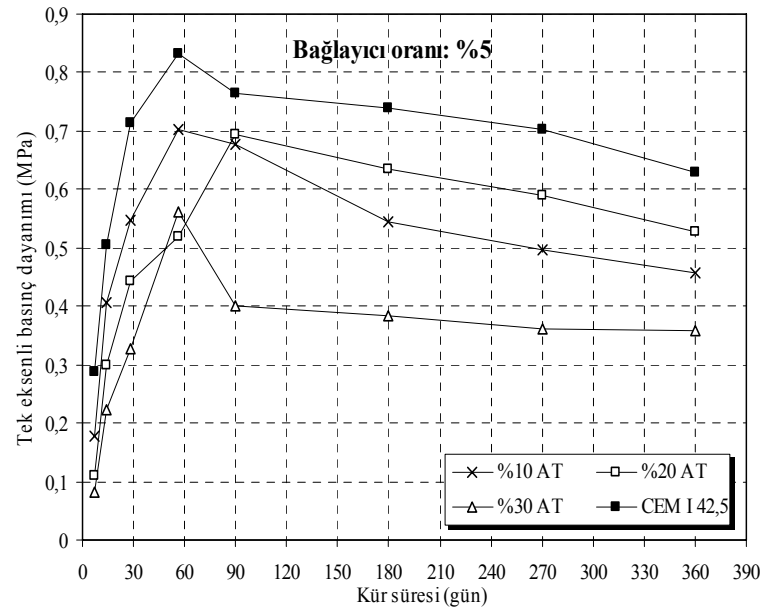
Şekil 55-57, %5 çimento oranında ve sabit bir kıvamda (7 inch slamp) CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında FT, AT ve KP ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinin 7-360 günlük kür süreleri sonundaki dayanım sonuçlarını göstermektedir. Ağırlıkça %10-30 oranında FT, AT ve KP içeren numunelerin hiçbirisi, 28 günlük kür süresi sonunda yeterli dayanım kazanımını sağlayamamıştır. CEM I 42,5 yerine kısmen FT ve AT ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinin dayanım kazanımı benzerlik göstermektedir. Genel olarak FT ve AT ikame oranı arttıkça, macun dolgu numunelerinin kısa ve uzun dönem (%20 AT hariç) dayanım kazanımı azalmıştır. FT ve AT içeren numunelerin dayanımı, CEM I 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanımından bütün kür sürelerinde daha düşüktür. FT ve AT içeren macun dolgu numunelerinin 7-56 günlük kür süresi aralığında dayanım kazanımına devam ettiği, ancak 56 günlük kür süresinden sonra önemli oranda dayanım kaybına uğradıkları görülmektedir (Şekil 55-56). CEM I 42,5 yerine belirli oranlarda kısmen %10-30 AT kullanılarak hazırlanan numunelerin FT'ye nispeten daha iyi sonuç verdiği görülmektedir (Şekil 55-56).

90-360 günlük kür süresi aralığında ise, macun dolgu numunelerinin dayanımında keskin bir düşüş görülmüştür (Şekil 55-56). Bağlayıcı fazı içerisinde FT ve AT miktarı arttıkça, macun dolgu numunelerinde görülen dayanım kaybı (%20 AT hariç) artmıştır. %10, 20 ve 30 oranında FT içeren macun dolgu numuneleri 56-360 günlük kür süresi aralığında sırasıyla %36, 40 ve 43 oranında dayanım kaybına uğramıştır. Elde edilen dayanım sonuçlarından, FT ve AT kullanımının dayanım kaybını artırdığı ve bu nedenle CEM I 42,5 yerine mineral katkı maddesi olarak kullanımının uygun olmadığı anlaşılmıştır.

%10-30 oranında KP içeren numunelerin 7-360 günlük kür süresi aralığındaki dayanım kazanımı incelendiğinde (Şekil-57), numunelerin 90 güne kadar dayanım kazanımına devam ettiği, 90 günlük kür küresinden sonra ise dayanım kaybına uğradıkları görülmüştür (Şekil-57).



Şekil 55. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında FT ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

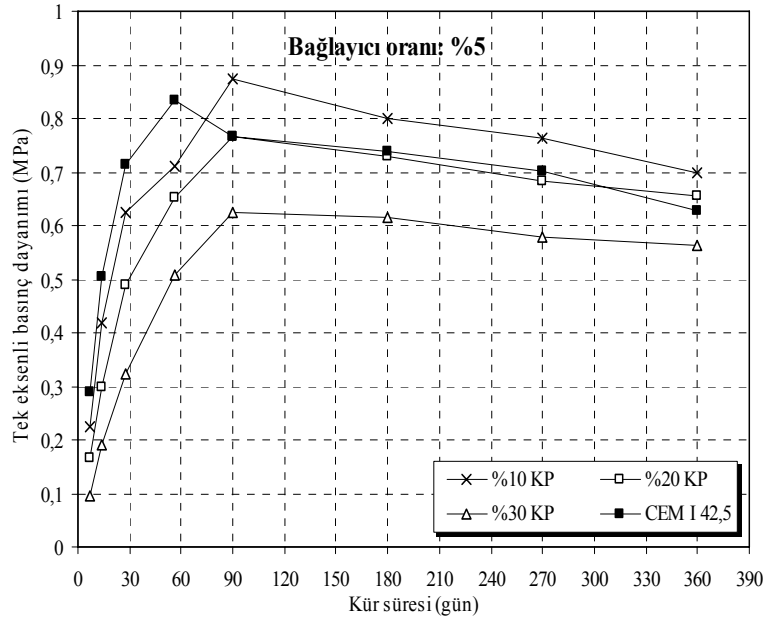


Şekil 56. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında AT ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

%10-30 oranında KP içeren numuneler, bütün kür sürelerinde FT ve AT içeren numunelerden daha yüksek dayanım üretmiştir. Ayrıca en yüksek dayanım kazanımını (0,873 MPa), 90 günlük kür süresi sonunda %10 KP içeren numuneler gerçekleştirmiştir

(Şekil 57). Bu durum, KP'nin özgül yüzey alanının ($7710 \text{ cm}^2/\text{g}$), $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ (%79) ve reaktif SiO_2 ($55,88 \sim \%89$) içeriğinin yüksek ve camsı faz yapıda olması nedeniyle yüksek pozolanik etkinliğe sahip olmasıyla açıklanabilir (Tablo 15).

Bağlayıcı fazı içinde KP ikame oranının artmasıyla birlikte macun dolgu numunelerinin dayanım kazanımının ve kaybının azaldığı görülmektedir. Örneğin, %10 KP içeren numunelerin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı (0,624 MPa), %30 KP kullanılarak hazırlanan numunelerin tek eksenli basınç dayanımından (0,324 MPa) yaklaşık 2 kat daha yüksektir. %10, 20 ve 30 KP içeren numunelerin 90-360 günlük kür süresi aralığında yaşanan dayanım kaybı sırasıyla %20, 15 ve 10 olmuştur. %10 KP içeren macun dolgu numunelerinde %20 oranında dayanım kaybı görülmesine rağmen, 56-360 günlük kür süresi aralığında dayanım değeri 0,7 MPa'nın üzerindedir. 360 günlük dayanım sonuçlarından (Şekil 57), CEM I 42,5 yerine %10-30 oranında KP kullanımının uzun dönem dayanım kaybını azalttığı, ancak, 28 günlük kür süresi sonunda gerekli dayanım kazanımının sağlanabilmesi için çimento miktarının artırılması ($>\%5$) gerekebilir.



Şekil 57. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında KP ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

Bazı araştırmacılar bağlayıcıların bağlayıcılık indeks (Bİ) değerlerinin, çimentolu malzemelerin (dolgu, beton, vb.) asit ve sülfat etkisine karşı direnç göstermesinde önemli bir gösterge olduğunu belirtmişlerdir (Banfill ve Forrester, 2000; Benzaazoua vd., 2002;

Elsen vd., 2004). Bu çalışmada kullanılan bağlayıcıların (CEM I 42,5, AT, FT ve KP) bağlayıcılık indeks değerleri ve bu bağlayıcılar kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinde görülen dayanım kayıpları karşılaştırmalı olarak Tablo 17’de verilmiştir. Tablo 17 incelendiğinde, CEM I 42,5’in B.İ. değeri 0,422 iken, %10-30 FT, AT, KP ikamesi durumunda B.İ. değerlerinin arttığı (0,78-6,15) görülmektedir. Ancak, dayanım kaybı bakımından incelendiğinde, B.İ. değeri arttıkça FT ve AT ile hazırlanan macun dolgu numunelerindeki dayanım kaybı oranı artmış (%20 AT hariç), KP ile hazırlanan macun dolgu numunelerinde ise azalmıştır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda kullanılan bağlayıcıların B.İ. değerleri ile bağlayıcıların asit ve sülfat etkisine karşı durabiliteleri arasında sağlıklı bir korelasyon elde edilememiştir.

Tablo 17. Bağlayıcı indeks değerleri ve numunelerde görülen dayanım kayıpları

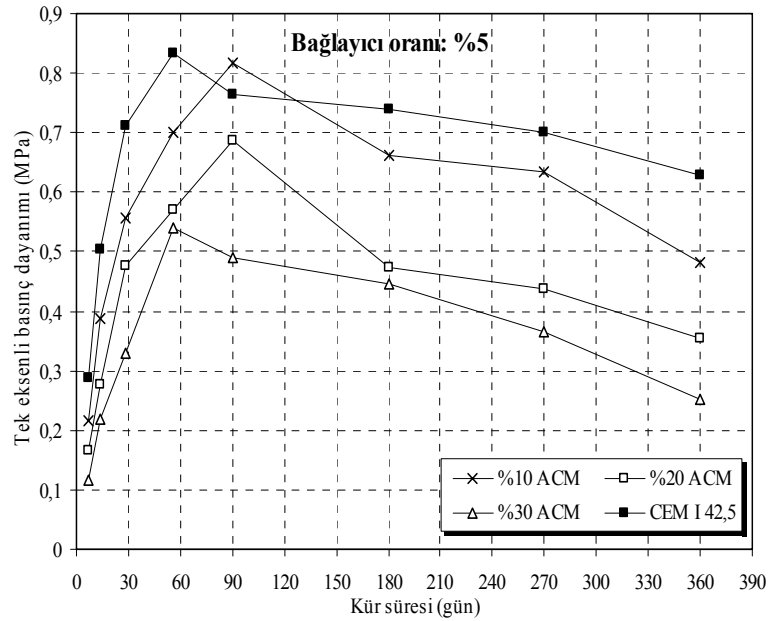
Bağlayıcı	Dayanım kaybı (%)	Bağlayıcılık indeksi (B.İ.) (SiO ₂ +Al ₂ O ₃)/(CaO+MgO)
CEM I 42,5	24,6	0,4221
%10 FT	36	0,9993
%20 FT	40	1,5766
%30 FT	43	2,1539
%10 AT	35	0,7876
%20 AT	24	1,1531
%30 AT	36	1,5187
%10 KP	20	2,3330
%20 KP	15	4,2439
%30 KP	10	6,1548

3.2.5. Yapay Puzolan Kullanımının Etkisi

Şekil 58-61, %5 çimento oranında CEM I 42,5 yerine %5-60 oranında ACM, UK, YFC ve SD ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinin 7-360 günlük kür süreleri sonundaki dayanım sonuçlarını göstermektedir.

Genel olarak bağlayıcı fazı içinde ACM ikame oranı arttıkça, numunelerin dayanım kazanımlarının azaldığı ve uzun dönem dayanım kayıplarının arttığı görülmektedir (Şekil 58). ACM içeren macun dolgu numunelerinin tamamı, 28 günlük kür süresi sonunda yeterli dayanım (0,7 MPa) kazanımını sağlayamamıştır. Bağlayıcı fazı içerisinde ağırlıkça

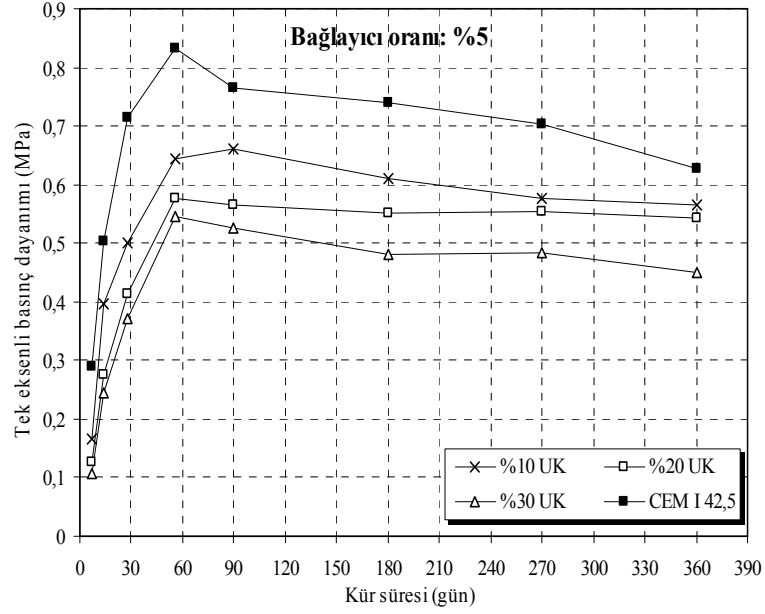
%10-30 oranında ACM içeren macun dolgu numuneleri, 56 ve 90 günlük kür süresine kadar dayanım kazanımına devam etmiş, ancak daha sonra %41-53 oranında dayanım kaybına uğramışlardır. Shao vd. (2000), ince olarak öğütülmüş ACM'nin çimentoya ilave edilmesinin ortamdaki alkali miktarını artırdığını, alkalilerin bağlayıcı jeli (C-S-H) oluşumunu hızlandırarak/arttırarak erken kür koşullarında çimentolu malzemelerde (beton, dolgu vb.) dayanım artışı sağladığını, ancak, alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşan genleşmelerin uzun dönemde dayanım kaybına yol açtığını belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ACM %10,75 oranında Na₂O oranında alkali içermesine rağmen erken kür sürelerinde hızlı dayanım artışı gözlenmemiştir. 360 günlük kür süresi sonunda ise ACM kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinde ciddi çatlamların olduğu gözlenmiştir.



Şekil 58. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında ACM ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10-30 oranında UK kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanımı, bütün kür sürelerinde sınır değerin (0,7 MPa) altındadır (Şekil 59). Ağırlıkça %10-30 oranında UK içeren numunelerin belli bir kür süresine kadar dayanım kazanımına devam ettikleri, daha sonra dayanım kaybına uğradıkları görülmektedir. %10 UK içeren numuneler 90-360 gün kür süreleri arasında %14,4, %20-30 UK içeren numuneler ise 56-360 gün kür süreleri arasında sırasıyla %5,5 ve %17,4 dayanım kaybına

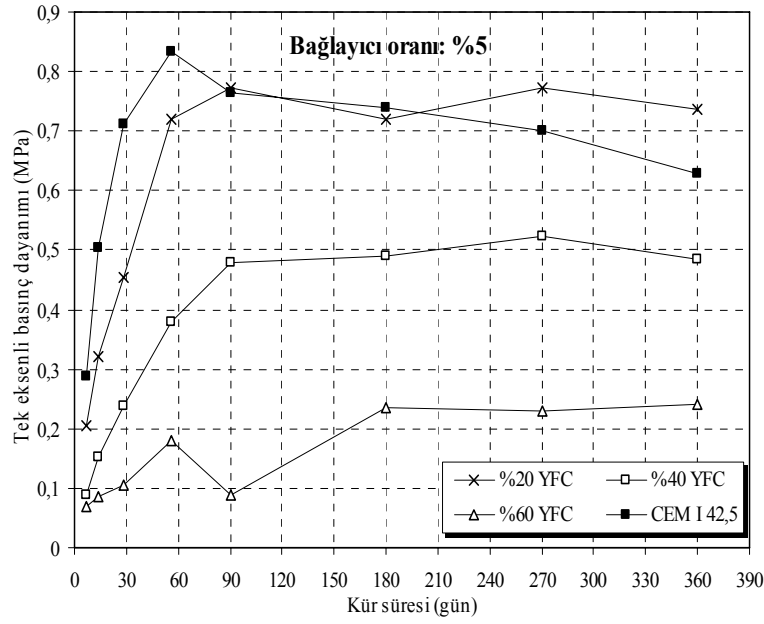
uğramıştır. CEM I 42,5 ve ACM içeren numunelerle karşılaştırıldığında, en az dayanım kaybının %5,5 ile %20 UK içeren numunelerde olduğu görülmektedir. UK kullanımının uzun dönemdeki faydalı etkisinin, sahip olduğu puzolanik etkinliğinin yanı sıra yüksek oranda CaO, Ca(OH)₂ ve CaCO₃ içermesi nedeniyle (Tablo 10), piritin oksidasyonu sonucu oluşan asitliği nötralize etme potansiyelinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Xenidis vd., 2002). Ancak, erken kür sürelerinde yeterli dayanım kazanımı için çimento miktarının artırılması (>%5) gerekmektedir.



Şekil 59. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %10–30 oranında UK ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

Şekil 60, CEM I 42,5 yerine %20-60 oranında YFC ikame edilerek %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu numunelerinin 7-360 günlük kür süreleri sonundaki dayanım sonuçlarını göstermektedir. Bağılayıcı fazı içerisinde YFC miktarı arttıkça dayanım kazanımının azaldığı görülmektedir. %20 YFC içeren numuneler 28 günlük kür süresi sonunda 0,45 MPa'lık dayanım üretmesine rağmen, 56-360 günlük kür süresi aralığındaki dayanımı 0,7 MPa'dan yüksektir (Şekil 60).

CEM I 42,5 yerine %40-60 YFC ikame edilmesi durumunda, macun dolgu numunelerinin dayanım kazanımlarının azaldığı, buna karşın numunelerde herhangi bir dayanım kaybının oluşmadığı görülmektedir (Şekil 60).



Şekil 60. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %20-60 oranında YFC ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

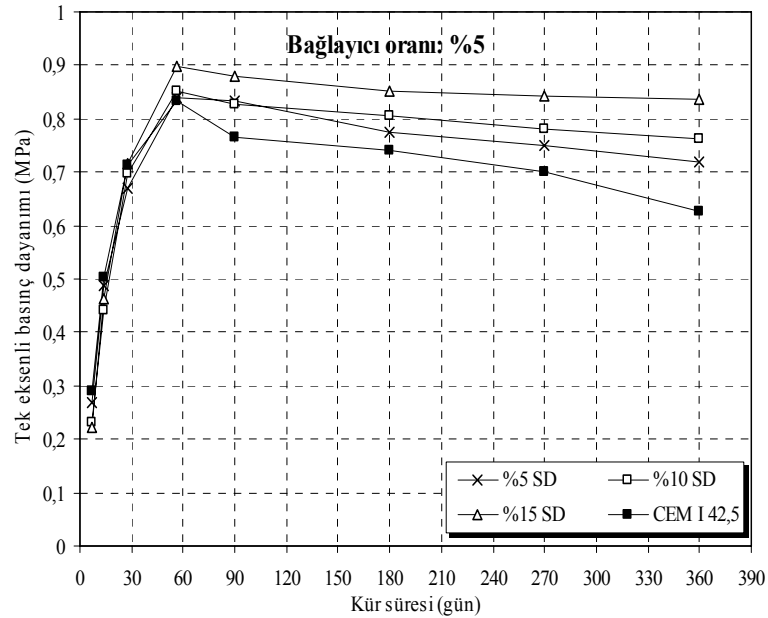
Örneğin, %60 oranında YFC içeren numunelerin 7-28 günlük kür süresi aralığındaki dayanımı 0,07-0,1 MPa arasında değişmektedir. Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgu karışımlarının erken kür sürelerinde yeraltı sismik hareketler (patlatma kaynaklı titreşimler vb.) nedeniyle sıvılaşma riskine maruz kalmaması için minimum 0,15-0,3 MPa dayanım kazanması gerektiği göz önüne alındığında (Bloss, 2002; Been vd., 2002; Roux vd., 2004), %60 YFC içeren macun dolgu karışımlarının %5 çimento oranında yeraltına yerleştirilmesi durumunda, dolgunun üretim patlatmaları nedeniyle sıvılaşma riskine maruz kalabileceği düşünülmektedir.

Dayanım kazanımındaki azalmanın, ortamdaki klinker miktarının azalması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bilindiği gibi puzolanlar, klinkerin hidrasyonu sonucu açığa portlandit (CH) ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip ürün (C-S-H) oluşturmaktadır (Taylor, 1990; Neville, 2000). YFC miktarının artması nedeniyle yeterli miktarda CH oluşmadığı ve bu nedenle YFC'nin puzolanik etkinliğini tam olarak gösteremediği düşünülmektedir. Ancak, %5'den yüksek çimento oranlarında CEM I 42,5 yerine YFC ikamesinin dolgu dayanım ve durabilitesi açısından faydalı olacağı düşünülmektedir.

CEM I 42,5 yerine %5-15 oranında mineral katkı maddesi olarak SD kullanımının, macun dolgu dayanım ve durabilitesini artırdığı görülmektedir (Şekil 61). SD ikame oranı

arttıkça macun dolgu numunelerinin dayanım ve durabilitesi artmıştır. Yapay puzolanlar (ACM, UK, YFC ve SD) kullanılarak hazırlanan macun dolgu numuneleri arasında en yüksek dayanım kazanımını (0,9 MPa), 56 günlük kür süresi sonunda %15 SD içeren numuneler üretmiştir. %5-15 arasında SD içeren macun dolgu numunelerinde, 56 günlük kür süresinden sonra sırasıyla %14, %11 ve %7 oranında dayanım kaybı görülmesine rağmen, 28-360 günlük kür süresi aralığındaki dayanım değerleri 0,7 MPa üzerindedir (Şekil 61).

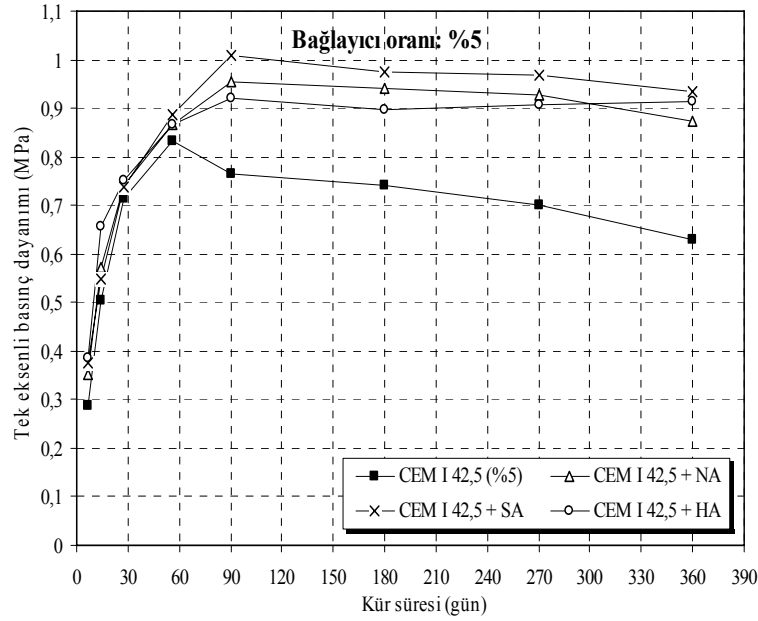
SD içeren macun dolgu numunelerinin daha yüksek dayanım kazanımı, SD'nin sahip olduğu yüksek oranda reaktif SiO₂ (88,18) içeriği, yüksek özgül yüzey alanı (24175 cm²/g) ve puzolanik etkinliği ile ilişkilendirilebilir. Elde edilen dayanım sonuçlarından, SD içeren numunelerin erken kür süresinde yeterli dayanım kazanımını sağladığı ve uzun dönemde durabilitesini koruduğu, bu nedenle sülfür içeriği yüksek atıklar kullanılarak hazırlanan macun dolguda bağlayıcı olarak CEM I 42,5 yerine %5-15 oranında SD kullanımının uygun olduğu anlaşılmıştır. Benzer olarak Lee vd. (2005) yapmış olduğu çalışmada, Portland çimentosu yerine %5-15 oranında SD ikamesinin, sülfat (Na₂SO₄) etkisi nedeniyle beton numunelerinde görülen dayanım kaybını önemli oranda azalttığını belirtmiştir.



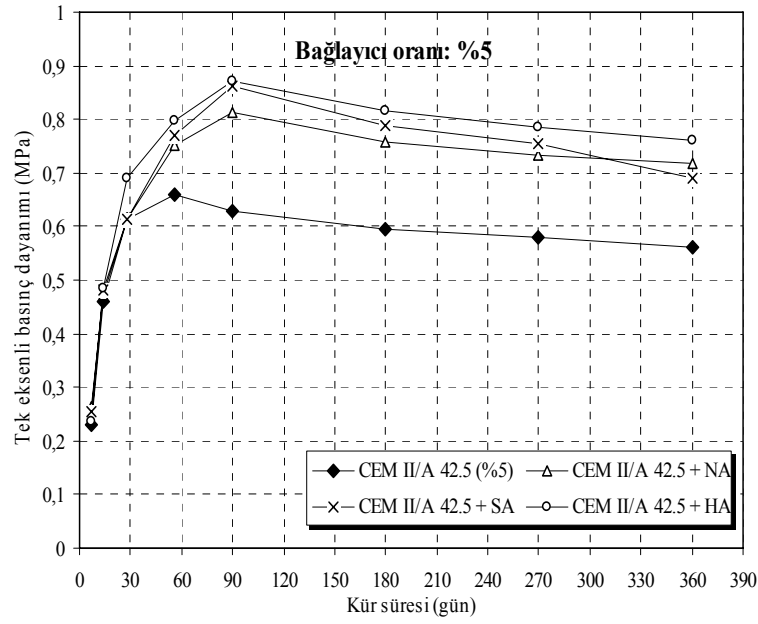
Şekil 61. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %5-15 oranında SD ikamesinin macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

3.2.6. Akışkanlaştırıcı Kullanımının Etkisi

Şekil 62-63'de, bağlayıcı (CEM I 42,5 ve CEM II/A 42,5) ile birlikte akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımının (NA, SA ve HA) macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi görülmektedir. Akışkanlaştırıcı içeren numunelerin dayanımı, içermeyen numunelere kıyasla bütün kür sürelerinde daha yüksektir (Şekil 62-63). CEM I 42,5 ve NA, SA ve HA kullanılarak hazırlanan numunelerin, 28 günlük kür süresi sonunda yeterli dayanım kazanımını sağladıkları ve uzun dönemde durabilitelerini korudukları görülmektedir. %5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımları göz önüne alındığında, en yüksek dayanım (1 MPa) kazanımını CEM I 42,5 ve SA kullanılarak hazırlanan numuneler üretmiştir (Şekil 62). Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımının faydalı etkisi, özellikle 90 günlük kür süresinden sonra daha net bir şekilde görülmektedir (Şekil 62-63). Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımı, 90-360 günlük kür süresi aralığında her iki bağlayıcı tipiyle hazırlanan numunelerin akışkanlaştırıcı içermeyen numunelere kıyasla ortalama %25-50 oranında daha yüksek dayanım vermesini sağlamıştır. Aynı kür süresi aralığında CEM I 42,5 ve akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan numunelerde %1-8, CEM II/A 42,5 ve akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan numunelerde ise %12-20 oranında dayanım kaybının olduğu görülmektedir.



Şekil 62. CEM I 42,5 ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi



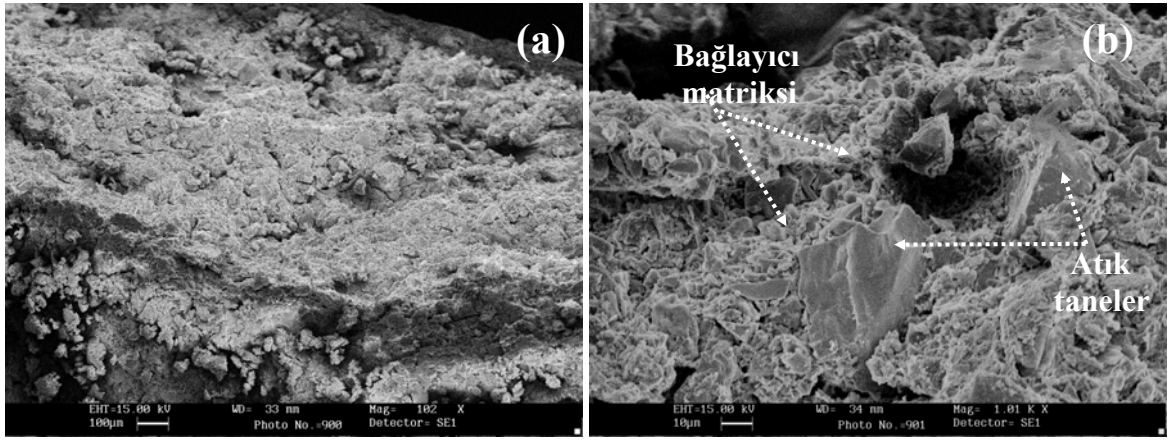
Şekil 63. CEM II/A 42,5 ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılarak hazırlanan numunelerin akışkanlaştırıcı katkı içermeyen numunelere kıyasla dayanım ve durabilitesinin yüksek olması, çimento tanelerinin karışım içerisinde daha homojen bir şekilde dağılması ve aynı akışkanlıkta olmasına karşın karışımın su/çimento oranının 5,97'den 5,59'a düşmesi ile ilişkilendirilebilir. Ortamdaki su miktarının azalması, daha boşluksuz ve kompakt bir yapıda dolgu yapısının oluşmasına ve pirit mineralinin oksidasyonuna yol açan su ve hava difüzyonunun azalmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca bu tür (lignin vb.) akışkanlaştırıcıların sülfürlü (pirit, pirotit vb.) minerallerin oksidasyonunu azalttığı ve bu nedenle uzun dönemde daha az dayanım kaybının olduğu düşünülmektedir (Belzile vd., 1997; Cai vd., 2005; Huynh vd., 2006).

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımının dolgunun dayanım ve durabilitesine olumlu etkisinin yanında, belli bir hacimdeki yeraltı üretim boşluğunda daha fazla atık malzemenin depolanmasına imkan sağlaması, çimento tüketimi ve macun dolgu işletme maliyetlerini azaltması söz konusudur. Ancak bunun için detaylı ekonomik analiz yapılması gerekmektedir.

3.3. Macun Dolgu Mikroyapısının Değerlendirilmesi

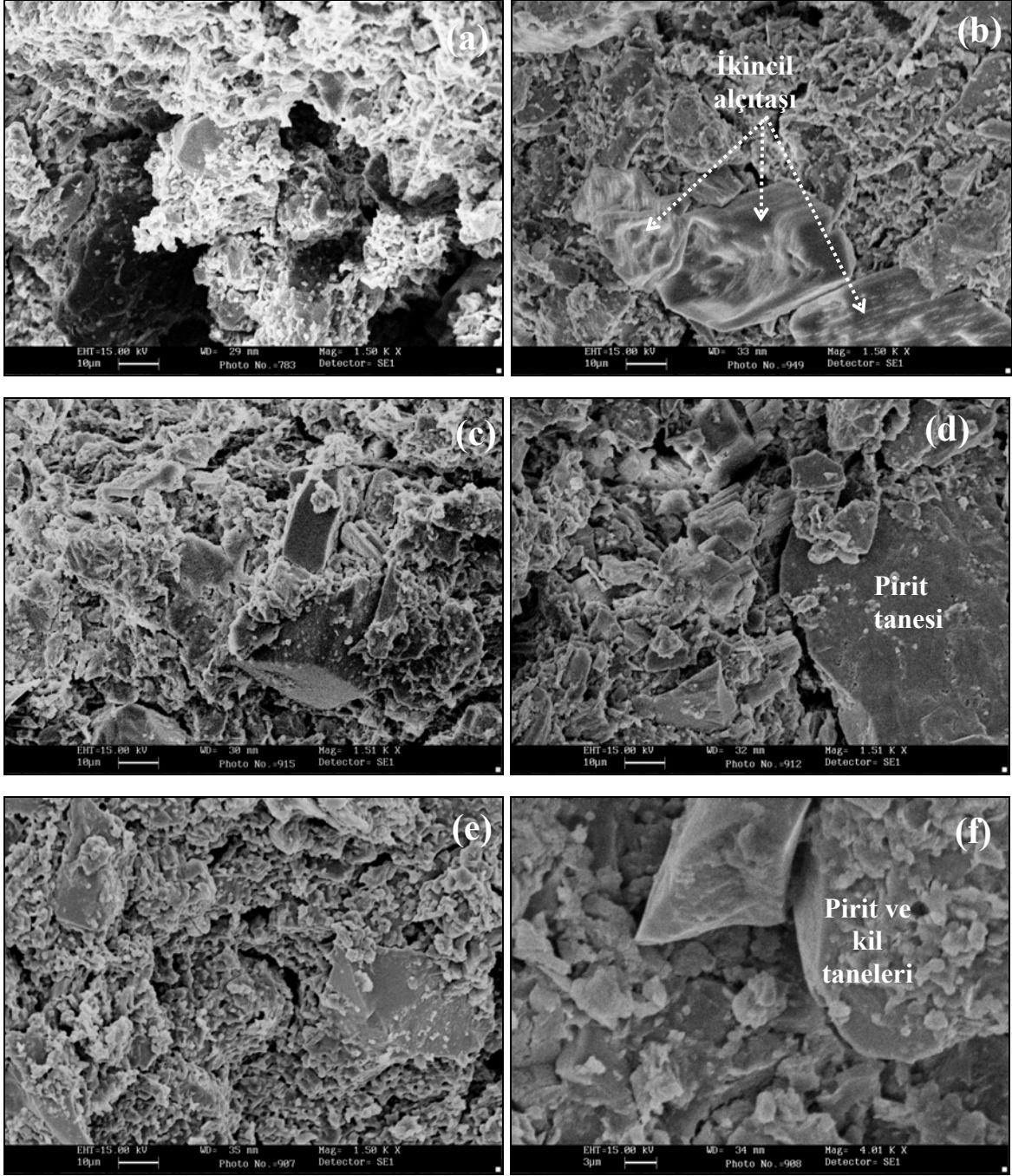
Şekil 64’de, kırılan macun dolgu numunelerinden alınan örneklerin x100 ve x1000 büyüklüğünde taratılmış SEM analizi fotoğrafları verilmiştir. Yapılan SEM analizlerinden, genel olarak macun dolgu tanelerinin matrix içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı ve iri tanelerin arasını ince taneler ve hidrasyon ürünlerinin doldurduğu (Şekil 64a ve b), ancak, düşük çimento oranında (%5) hazırlanan dolguda tanelerin genel olarak birbirlerine zayıf bir şekilde bağlandığı gözlenmiştir.



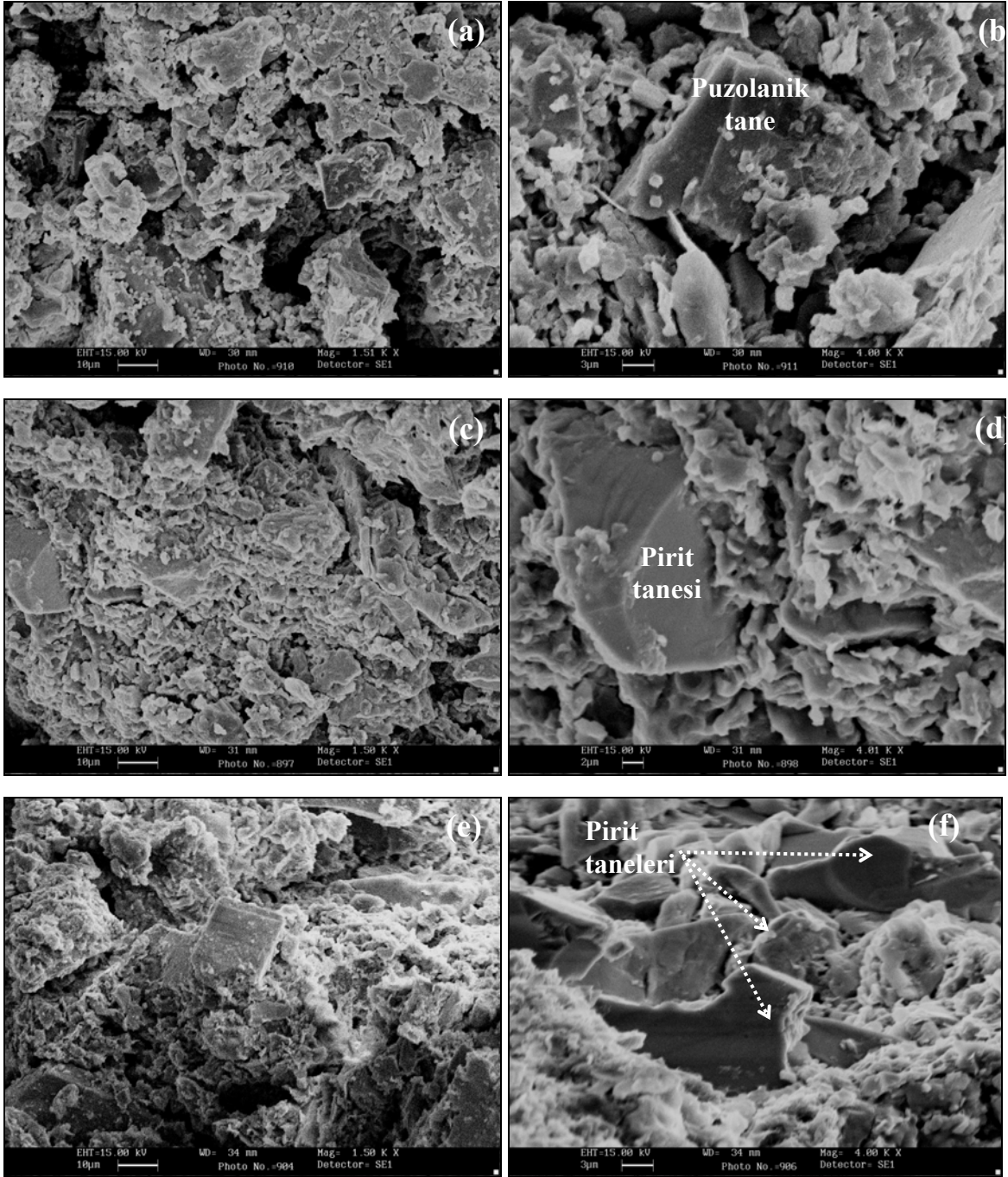
Şekil 64. Çimentolu macun dolgu numunelerinin genel mikroyapısı

3.3.1. Bağlayıcı Tipi, Oranı ve Su/Çimento Oranının Etkisi

Şekil 65, CEM I 42,5 (Şekil 65a, b), SDÇ 32,5 (Şekil 65c,d) ve eşit oranda CEM I 42,5 ve SDÇ 32,5 (Şekil 65e, f) kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu numunelerinin (360 günlük) SEM analizi fotoğraflarını göstermektedir. Şekil 66 ise, CEM II/A 42,5 bağlayıcı tipi kullanılarak çimento oranı %5 (Şekil 66a,b), %7 (Şekil 66c,d) ve su/çimento oranı 5,81 (Şekil 66e,f) olan macun dolgu numunelerinden alınan örneklerin SEM analizi fotoğraflarını göstermektedir. Şekil 67, CEM I 42,5 (Şekil 67a) ve eşit oranda CEM I 42,5 ve SDÇ 32,5 (Şekil 67b) kullanılarak hazırlanan numunelerin XRD analiz sonuçlarını, Şekil 68’de ise, farklı bağlayıcı tipleri kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin 360 günlük kür süresi sonundaki fiziksel görünümü verilmiştir. Ayrıca Ek Tablo 3’de, XRD analizleri sonucu saptanan mineraller ve formülleri verilmiştir.



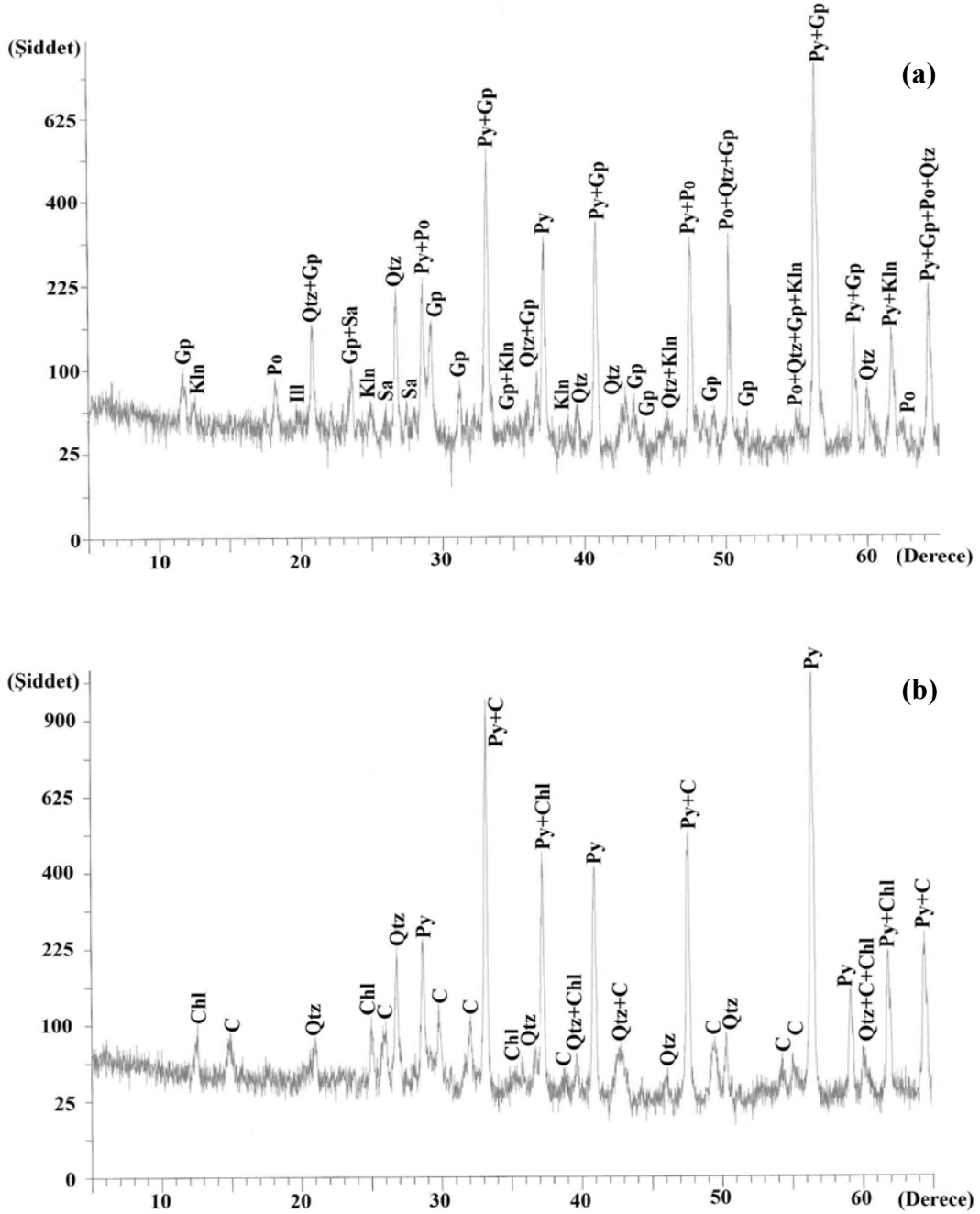
Şekil 65. CEM I 42,5 (a, b) ve SDC 32,5 kullanılarak (c, d, e, f) hazırlanan numunelerin (360 günlük) mikroyapısı



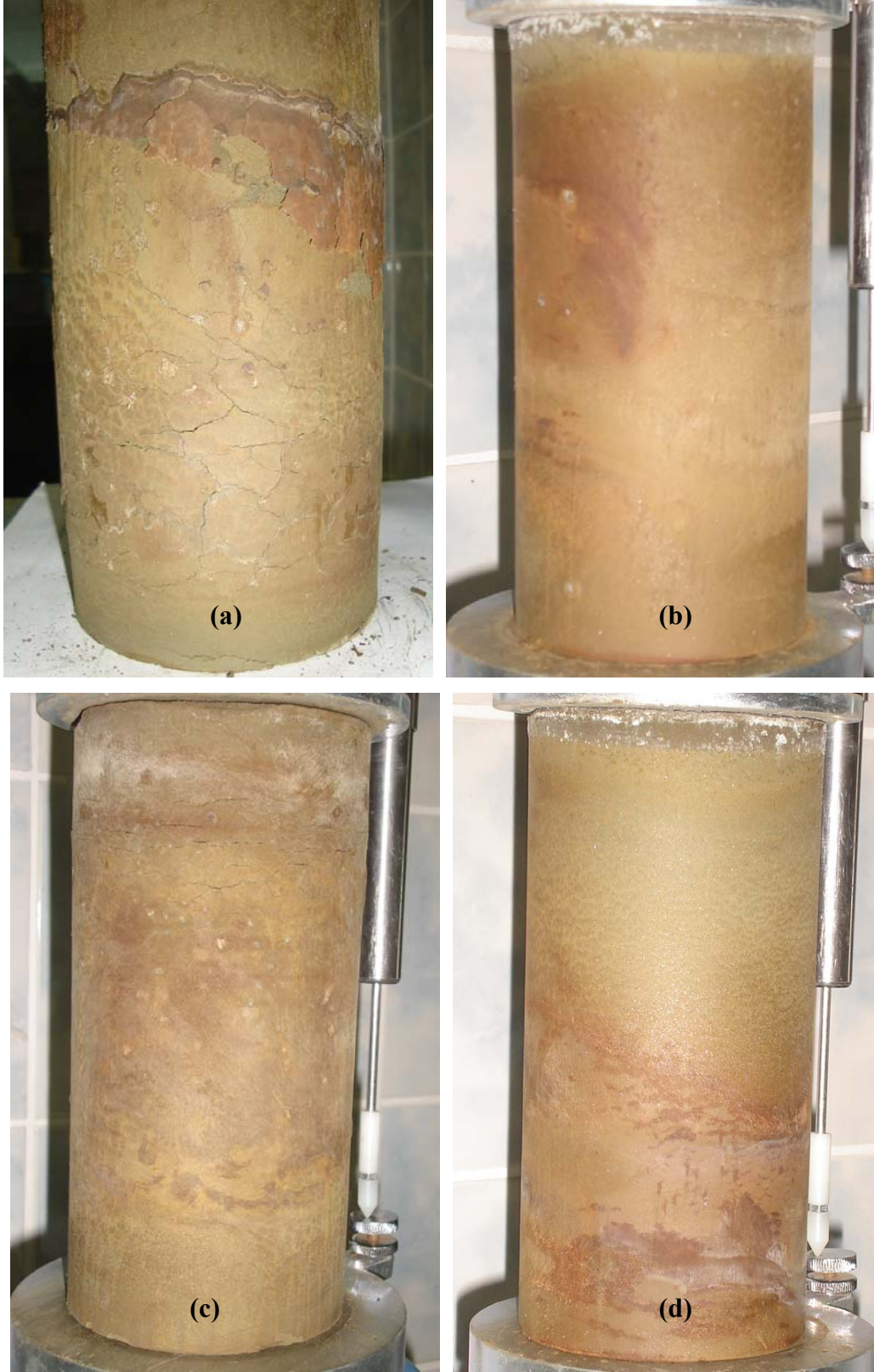
Şekil 66. CEM II/A 42,5 kullanılarak %5 (a, b), %7 (c, d) ve 6,10 su/çimento oranında (e, f) hazırlanan numunelerin (360 günlük) mikroyapısı

Mikroyapı analizlerinden (SEM, XRD, vb.), macun dolgu matriks yapısı ile dolgu dayanım kazancı ve durabilitesi arasında doğru orantılı bir ilişkinin olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin, CEM I 42,5 kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin CEM II/A 42,5 ve SDÇ 32,5 kullanılarak hazırlanan numunelere kıyasla daha gözenekli yapıda olduğu (Şekil 65a, c, e) görülmektedir. Boşluklu yapı içerisine nüfuz eden havanın (Şekil 69), pirit

mineralinin oksidasyonunu artırdığı ve bunun sonucunda açığa çıkan sülfatın (SO_4^{2-}), hidrasyon ürünü olan portlandit (CH) ile reaksiyona girerek ikincil alçıtaşı minerali oluşumuna yol açtığı görülmektedir (Şekil 65b, Şekil 67a). Genleşme özelliğine sahip ikincil alçıtaşı mineralininin numunelerde birtakım çatlakların oluşmasına (Şekil 68a) ve uzun dönemde dayanım kaybına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 67. CEM I 42,5 (a) ve eşit oranda CEM I 42,5 ve SDC 32,5 (b) kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin (360 günlük) XRD profili (Py: Pirit; Gp: Alçıtaşı; Qtz: Kuvars; Po: Portlandit; Kln: Kaolinit; Sa: Sanidin; Ill: İllit; Chl: Klorit; C: Paris plasteri; Fsp: Feldispat; Brt: Barit)



Şekil 68. CEM I 42,5 (a), SDC 32,5 (b) ve CEM II/A 42,5 (c, d) kullanılarak %5-7 çimento oranında hazırlanan numunelerin 360 günlük kür süresi sonundaki görünümü

Araştırmacılar benzer olarak, pirit içeriği yüksek atık malzeme ve Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinde, genişleme özelliğine sahip ikincil alçıtaşı minerali oluşumu nedeniyle dayanım kaybının oluştuğunu belirtmişlerdir (Benzaazoua vd., 20002; Fall ve Benzaazoua, 2005; Tariq ve Nehdi, 2007). SDC 32,5 kullanılarak hazırlanan numunelerde ise gözenekliliğin nispeten daha az olduğu (Şekil 65c,d,e,f), ikincil alçıtaşı mineralinin ve çatlamanın oluşmadığı görülmüştür (Şekil 67b, 68b).

Bağlayıcı oranındaki artışın ve su/çimento oranındaki azalmanın, dolgunun mikroyapısında iyileşme sağladığı (Şekil 66a, c, e), pirit taneleri arasındaki yoğun C-S-H jeli dağılımını belirginleştirdiği (Şekil 66d, f), dayanım kaybını ve çatlak oluşumunu engellediği görülmüştür (Şekil 53, Şekil 68c,d). Ayrıca farklı bağlayıcı tipleri kullanılarak hazırlanan numunelerin hiçbirisinde ikincil etrenjit minerali oluşumuna rastlanmamıştır.

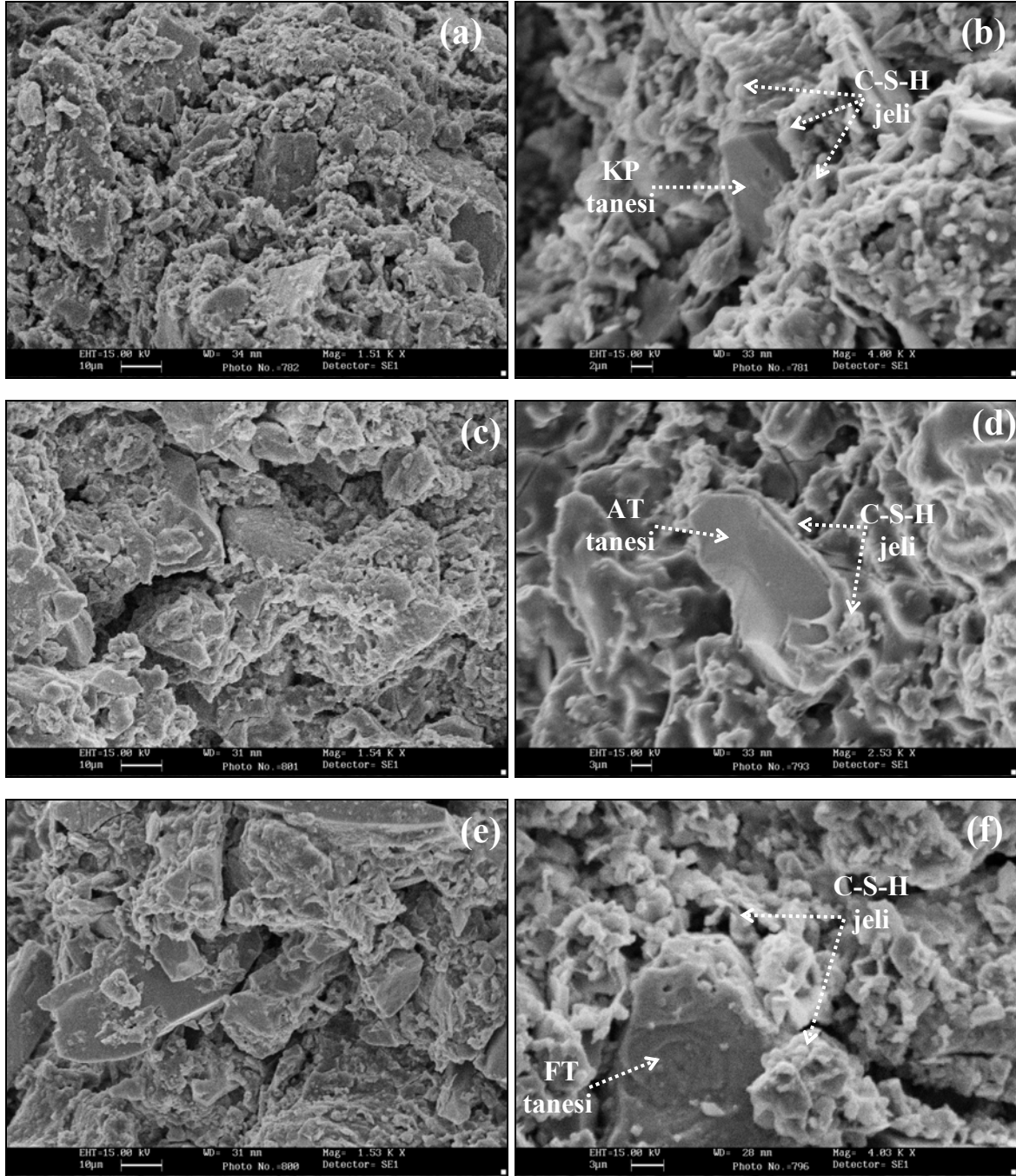


Şekil 69. Çatlaklardan içeriye giren havanın oksidasyona etkisi

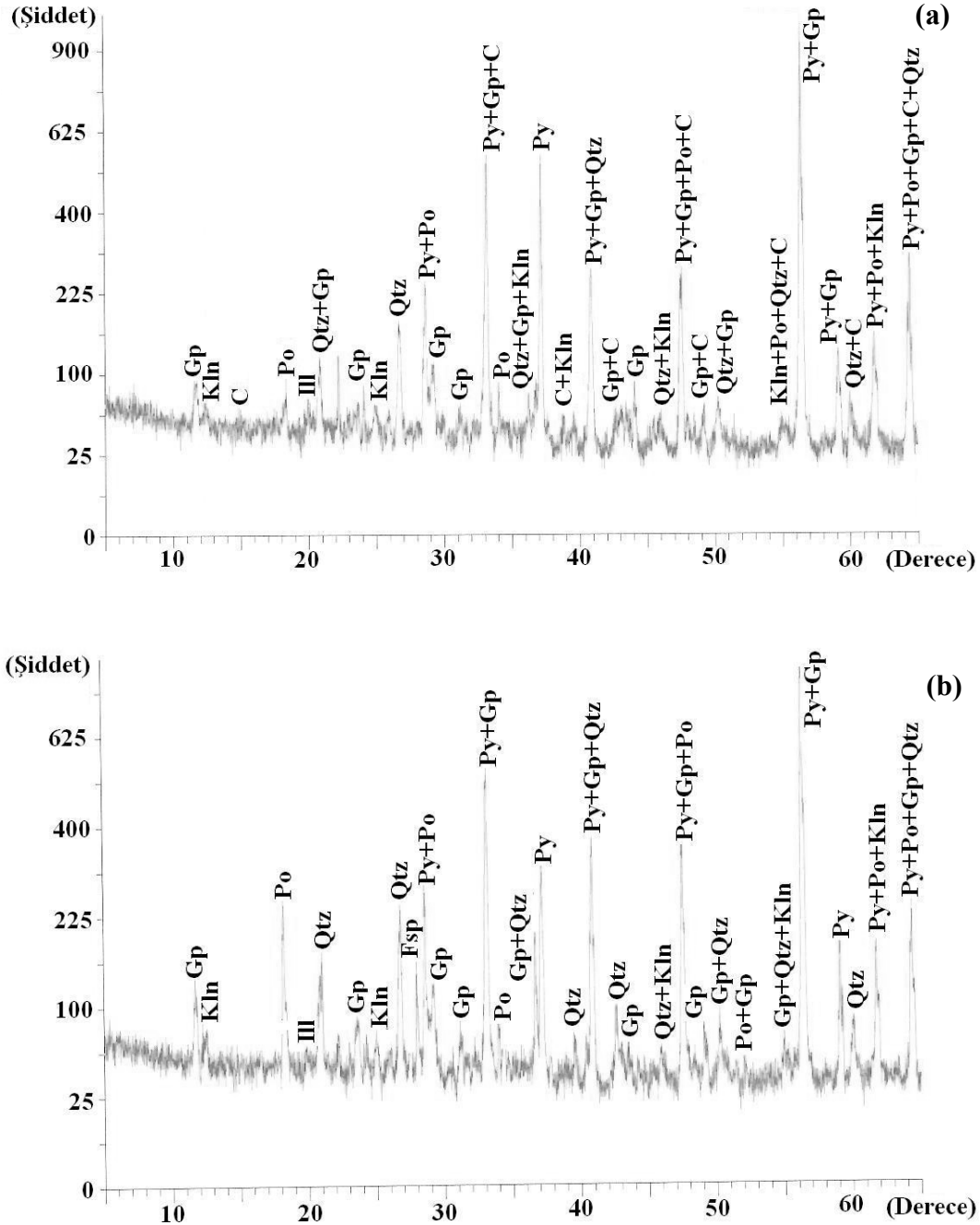
3.3.2. Doğal Puzolan Kullanımının Etkisi

Şekil 70'de, CEM I 42,5 yerine mineral katkı maddesi olarak %20 oranında KP (Şekil 70a, b), AT (Şekil 70c, d) ve FT (Şekil 70e, f) ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinin SEM fotoğrafları verilmiştir. CEM I 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelerin mikroyapısı (Şekil 65a) ile karşılaştırıldığında, mineral katkı maddesi olarak bağlayıcı fazı içerisinde KP, FT ve AT kullanımının (Şekil 70a, c, e) dolgunun

mikroyapısına olumlu yönde katkı yaptığı görülmektedir. Puzolan kullanımının macun dolgunun dayanımı, durabilitesi ve mikroyapısı üzerindeki faydalı etkisi, puzolanik etkinlik sonucu oluşan ilave C-S-H jeli ve puzolanik tanelerin dolgu içerisindeki boşlukları doldurmasıyla ilişkilendirilebilir.

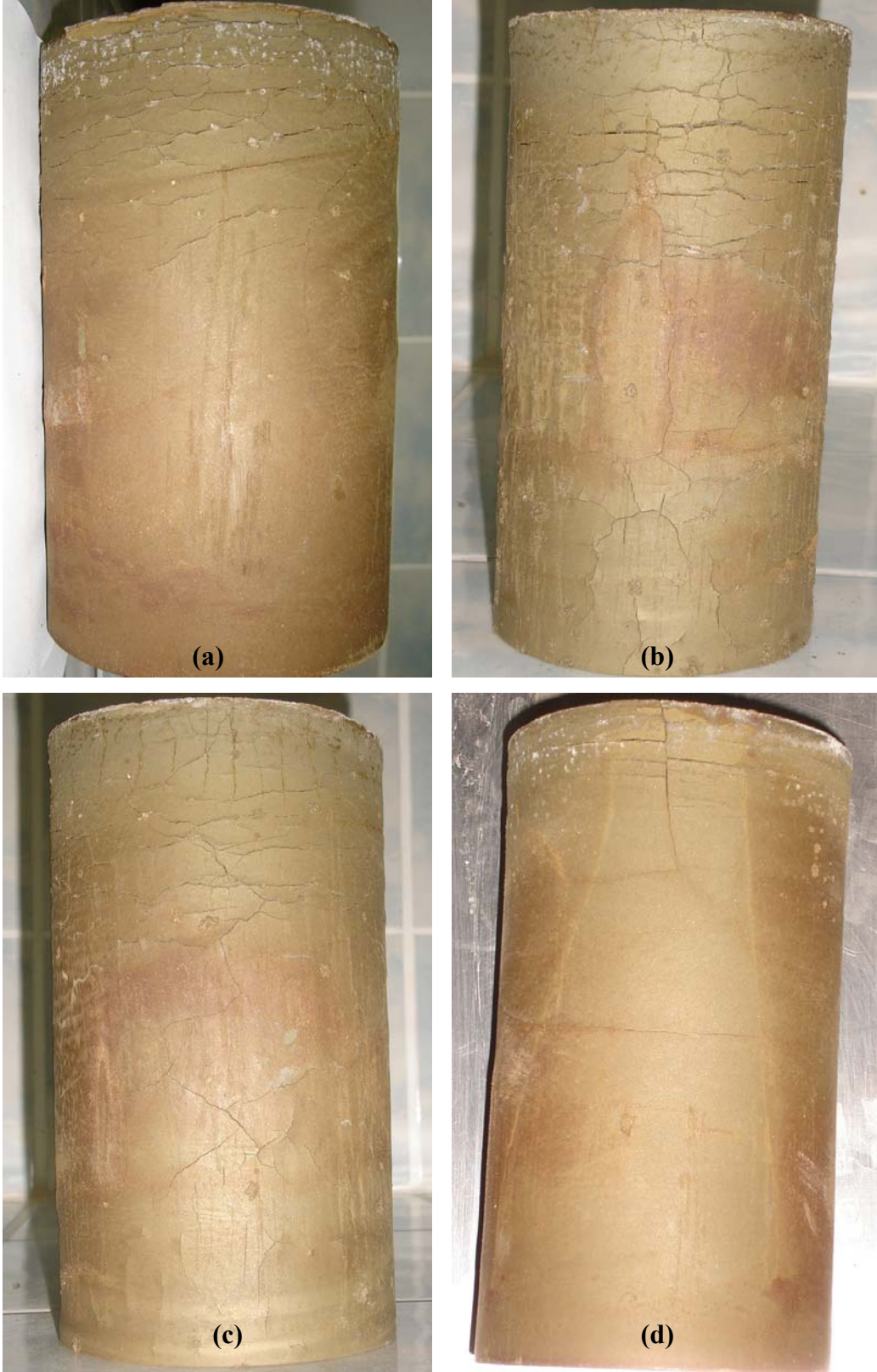


Şekil 70. CEM I 42,5 yerine %20 oranında KP (a, b), AT (c, d) ve FT (e, f) ikame edilerek hazırlanan numunelerin (360 günlük) mikroyapısı



Şekil 71. CEM I 42,5 yerine %20 oranında KP (a) ve AT (b) ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinin (360 günlük) XRD profili (Py: Pirit; Gp: Alçıtaşı, Qtz: Kuvars, Po: Portlandit; Kln: Kaolinit; Ill: İllit; C: Paris plasteri; Fsp: Feldispat)

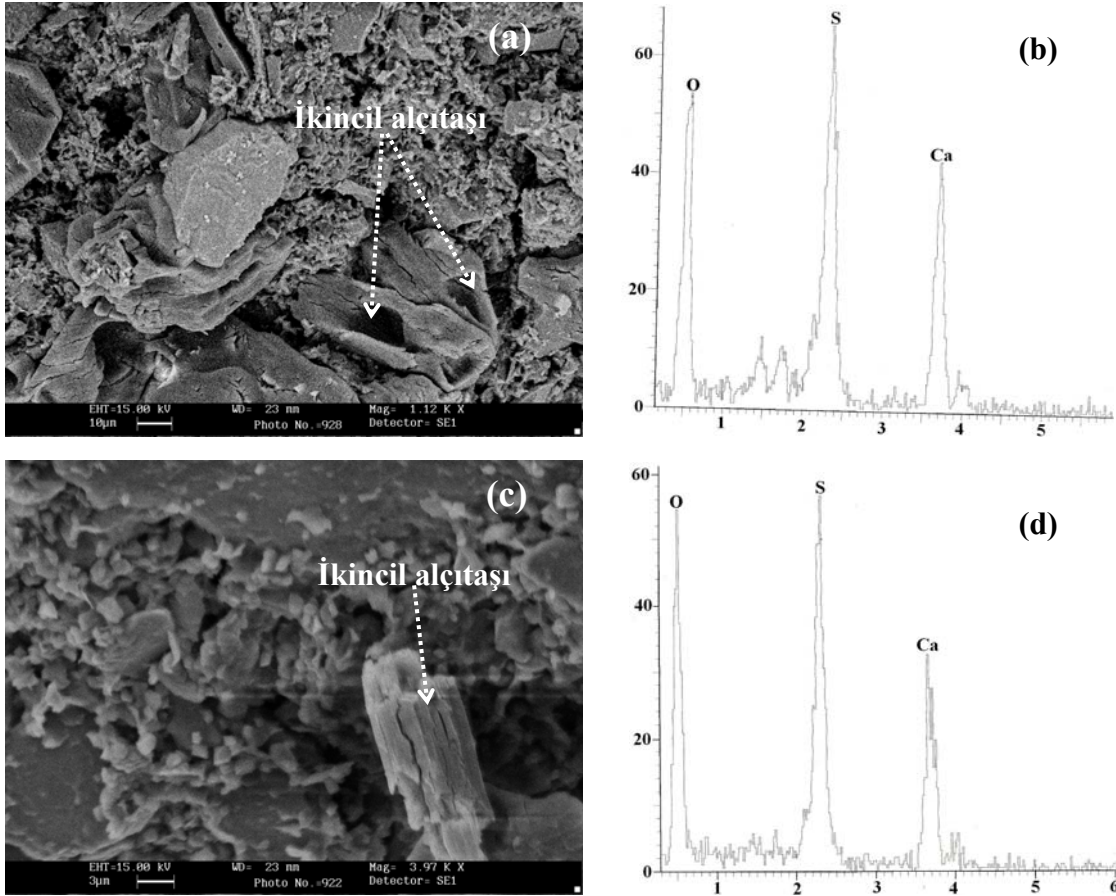
Ayrıca SEM analizlerinden, KP kullanılarak hazırlanan numunelerin diğer numunelere kıyasla daha kompakt bir yapıda olduğu anlaşılmıştır (Şekil 70a). XRD analizlerinden, CEM I 42,5 yerine %20 oranında KP, FT ve AT ikame edilerek hazırlanan numunelerde ikincil alçıtaşı mineralinin saptandığı ve 360 günlük kür süresi sonundaki numunelerde birtakım çatlakların oluştuğu görülmüştür (Şekil 71-72).



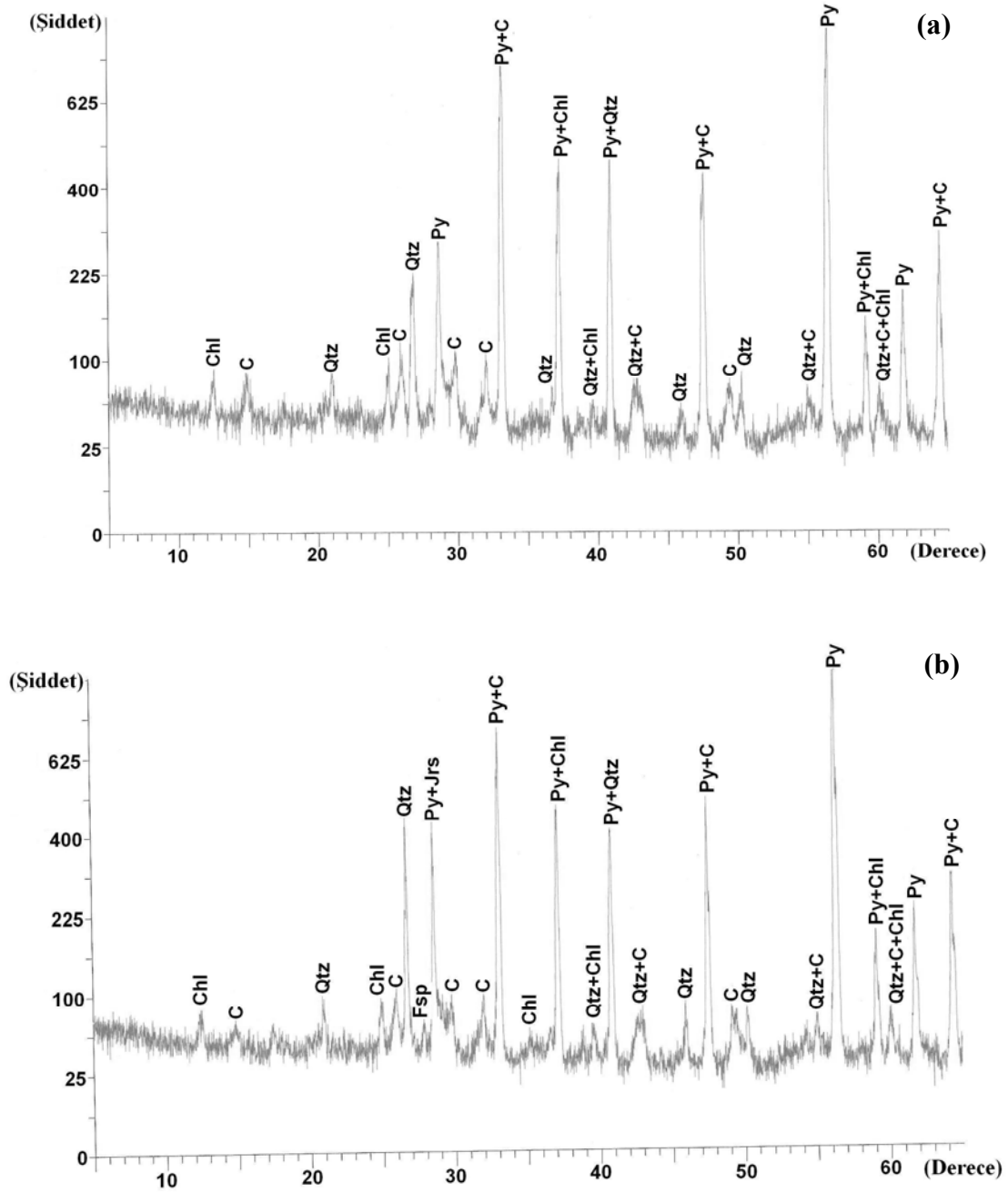
Şekil 72. CEM I 42,5 (a) ve CEM I 42,5 yerine %30 oranında AT (b), FT (c) ve KP (d) ikame edilerek hazırlanan numunelerin 360 günlük kür süresi sonundaki görünümü

3.3.3. Yapay Puzolan Kullanımının Etkisi

Şekil 73, CEM I 42,5 yerine %20 oranında YFC (Şekil 73a, b) ve ACM (Şekil 73c,d) ikame edilerek hazırlanan numunelerin (360 günlük) SEM ve EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. SEM analizinde, CEM I 42,5 yerine yapay puzolan ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinde ikincil alçıtaşı minerali oluşumu gözlenmiştir (Şekil 73a,c). Yapılan noktasal analizler (EDS) sonucu açığa çıkan yüksek kalsiyum (Ca), sülfür (S) ve oksijen (O) pikleri bunu kanıtlamaktadır (Şekil 73b, d). Aynı numunelerden alınan örnekler üzerinde yapılan XRD analizlerinde ise, ikincil alçıtaşı mineraline saptanmamıştır (Şekil 74). Bu durumun, ikincil alçıtaşı mineralinin kristallenme derecesi ve ortamda bulunduğu miktar ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Çünkü XRD analiz yönteminde, genellikle amorf yapıdaki ve miktar olarak %5'in altındaki minerallerin tespiti oldukça zordur. XRD analizlerinde baskın olarak pirit, kuvars, paris plasteri, klorit, jarosit ve feldispat mineralleri saptanmıştır (Şekil 74).



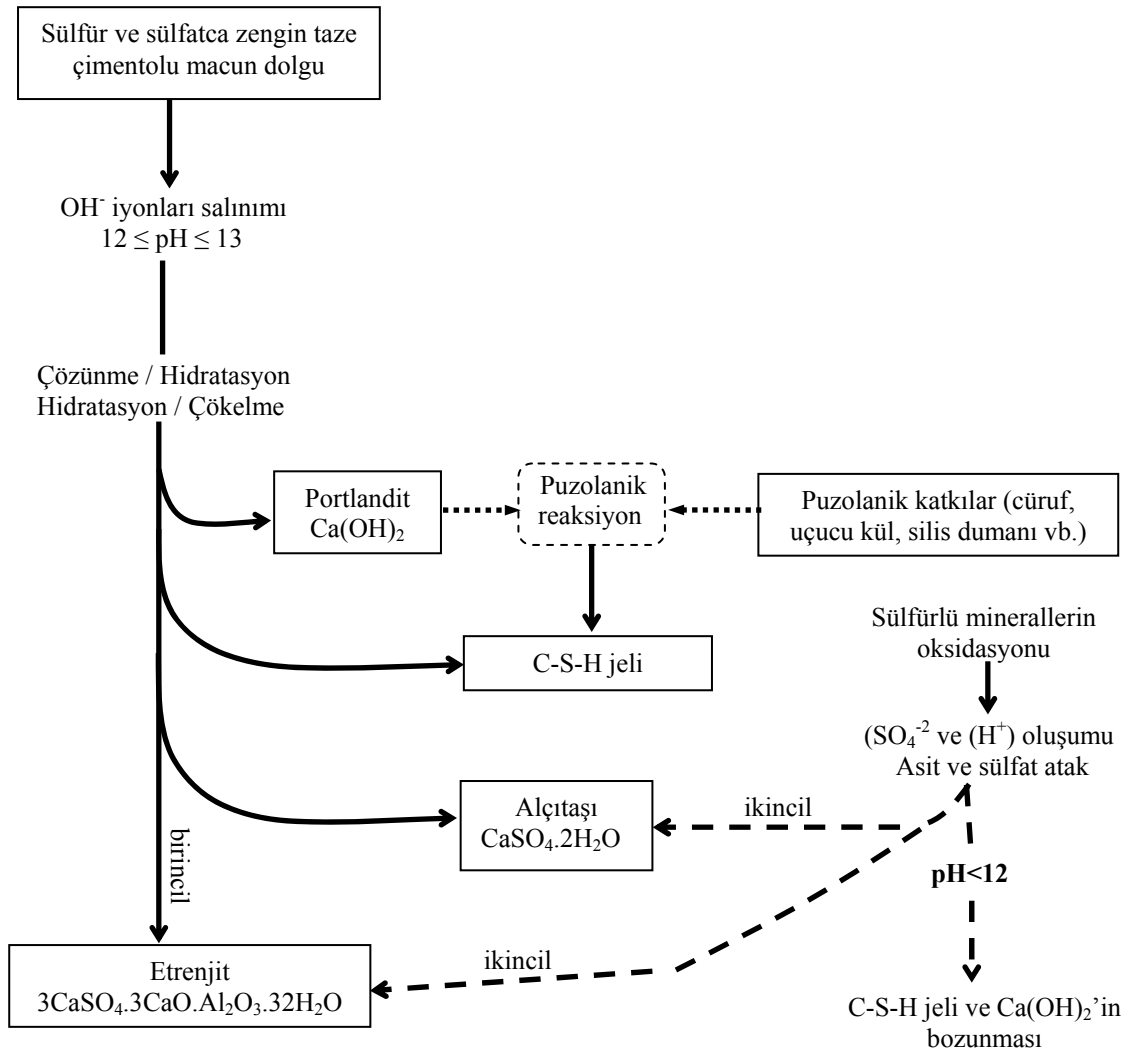
Şekil 73. CEM I 42,5 yerine %20 YFC ve ACM kullanılarak hazırlanan numunelerin (360 günlük) SEM görünümü ve EDS spektrumu



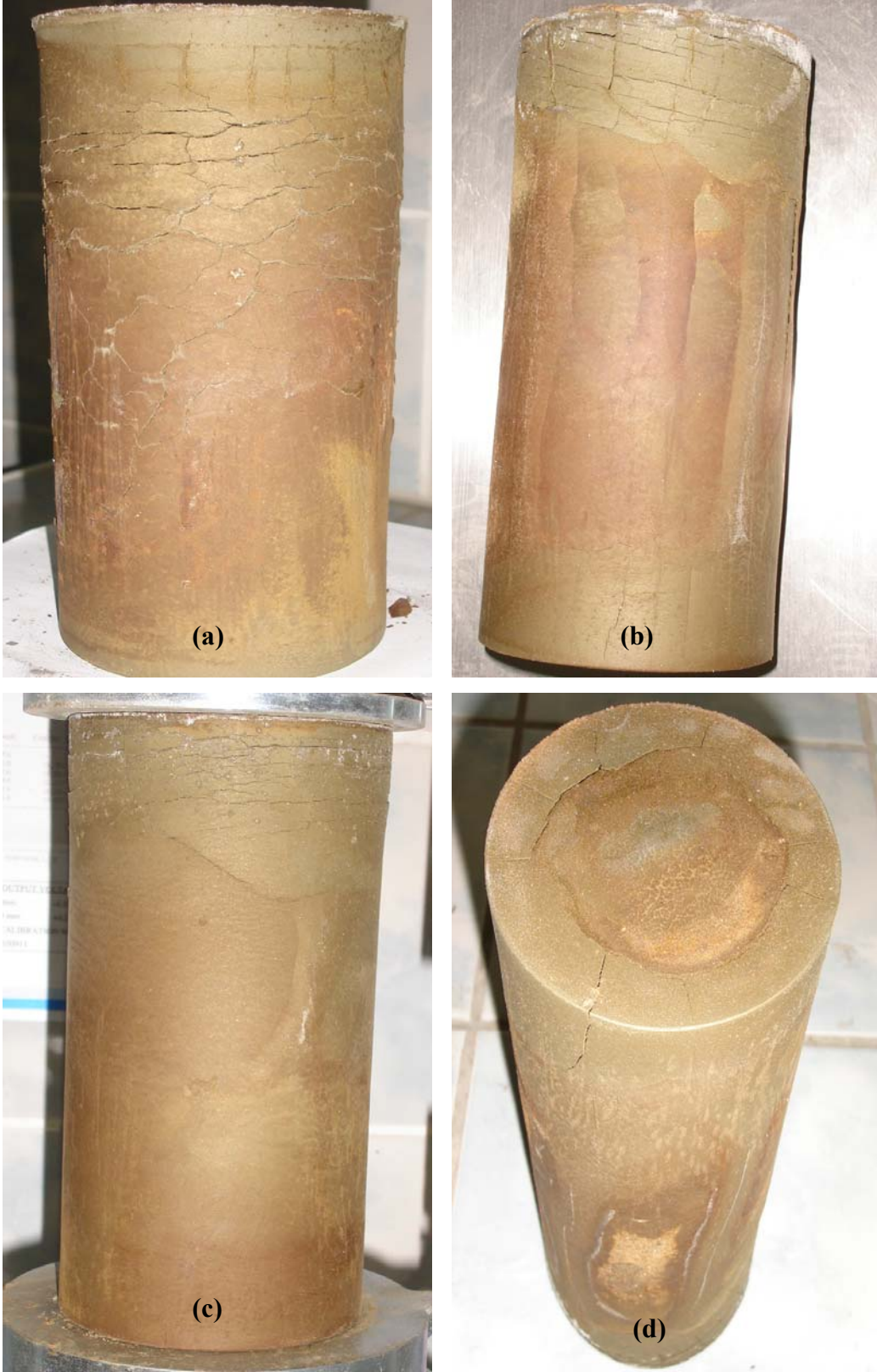
Şekil 74. CEM I 42,5 yerine %20 oranında YFC (a) ve ACM (b) ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinin XRD profili (Py: Pirit; Qtz: Kuvars; Chl: Klorit; C: Paris plasteri; Fsp: Feldispat)

Macun dolgu numunelerinde görülen dayanım ve durabilite kaybının ikincil alçıtaşı minerali oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 75, yeraltına yerleştirilen sülfür ve sülfatça zengin taze çimentolu macun dolguda gelişen hidratasyon işlemini, zamanla bozunma süreçlerini ve puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddesi kullanımının önemini göstermektedir (Belem ve Benzaazoua, 2008; Erçikdi vd., 2009b).

Yerleştirilen dolgu içerisinde öncelikle OH^- iyonlarının salınımı gerçekleşmekte ve açığa çıkan iyonlar ortamın pH'ının 12-13 arasında kalmasını sağlamaktadır. Hidratasyon işleminin gerçekleşmesiyle birlikte sırasıyla; birincil etrenjit, portlandit ve macun dolgunun dayanım kazanmasını sağlayan C-S-H jeli oluşumu gerçekleşmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi ortamdaki sülfürlü minerallerin (pirit vb.) su ve oksijen varlığında oksidasyona uğramasıyla oluşan sülfat (SO_4^{2-}) ortamdaki portlandit CH ile reaksiyona girerek ikincil alçıtaşı minerali oluşumuna yol açmaktadır. Oluşan ikincil alçıtaşı minerali numunelerde genleşme, çatlama ve yapısal bütünlüğün bozulmasına yol açmıştır (Şekil 76). Ayrıca oksidasyon sonucu oluşan asit (H^+), ortamdaki portlanditin (CH) çözünmesine ($\text{pH}<12$ durumunda) ve C-S-H jelinin bağlayıcılık özelliğini yitirmesine neden olmaktadır (Hassani vd., 2001; Fall ve Benzaazoua, 2005b; Tariq ve Nehdi, 2007).



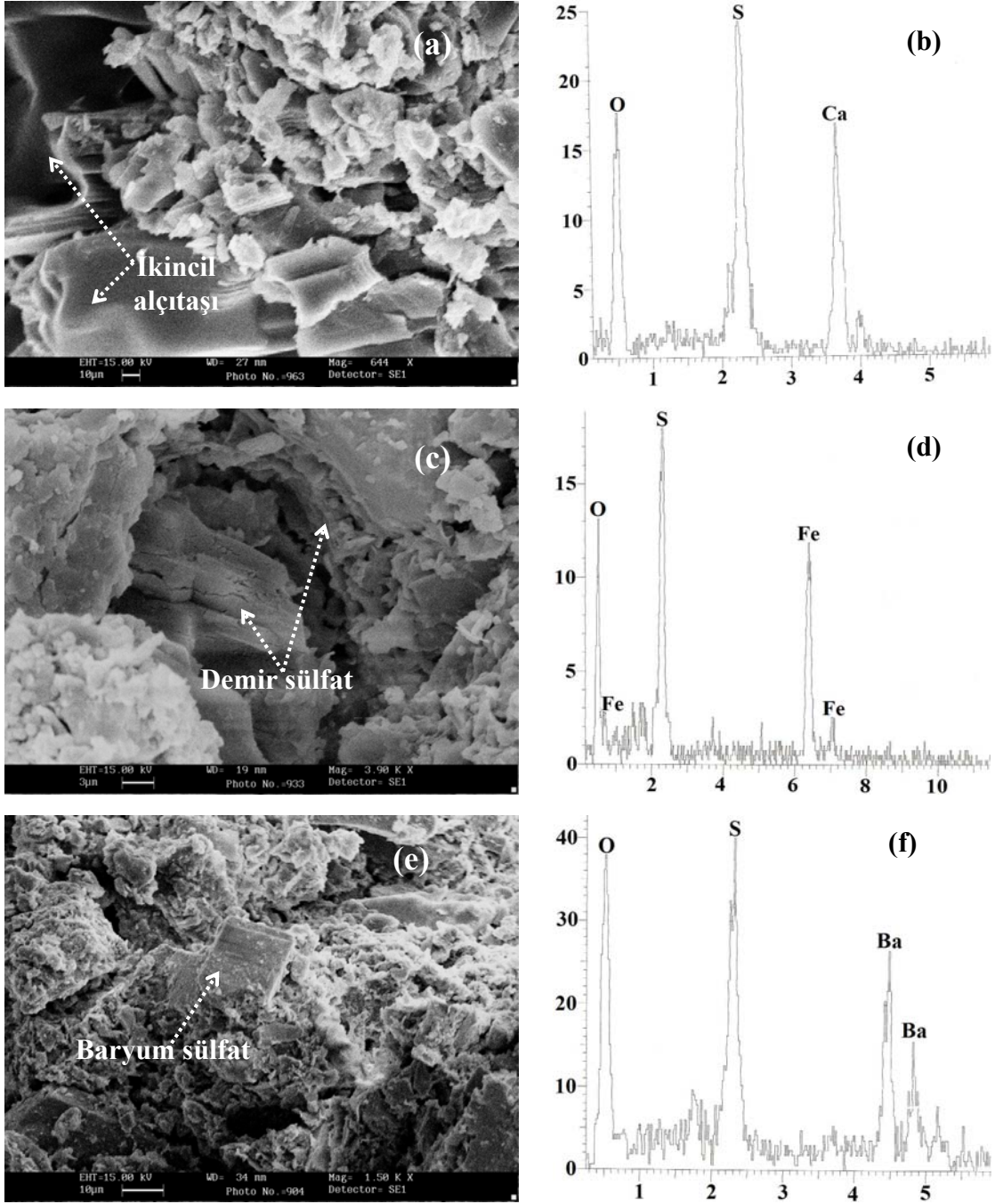
Şekil 75. Macun dolguda hidratasyon ve bozunma sürecinin şematik gösterimi



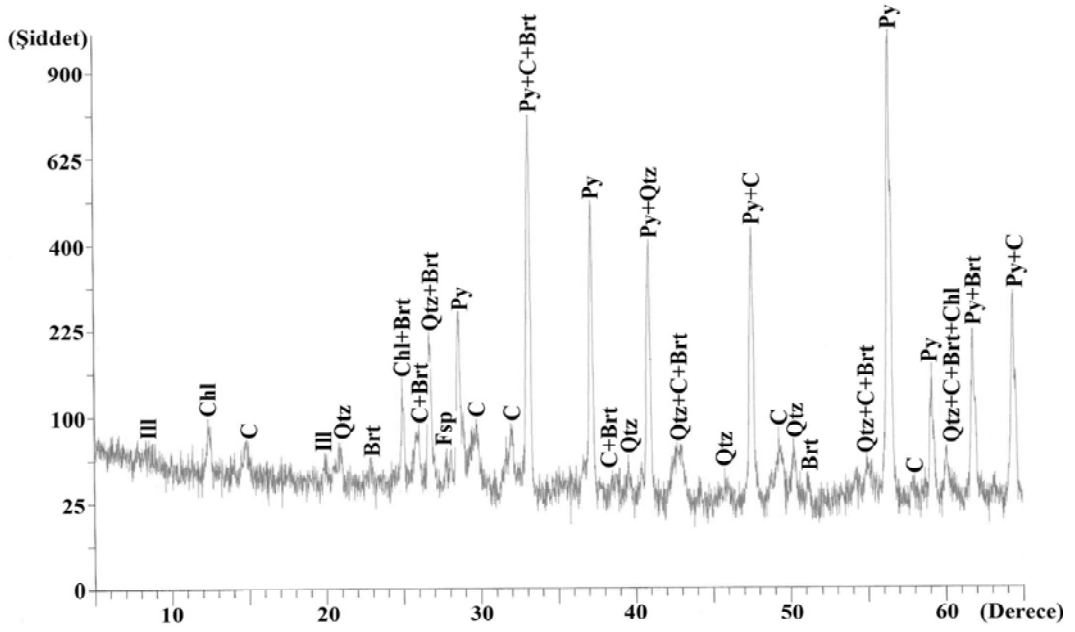
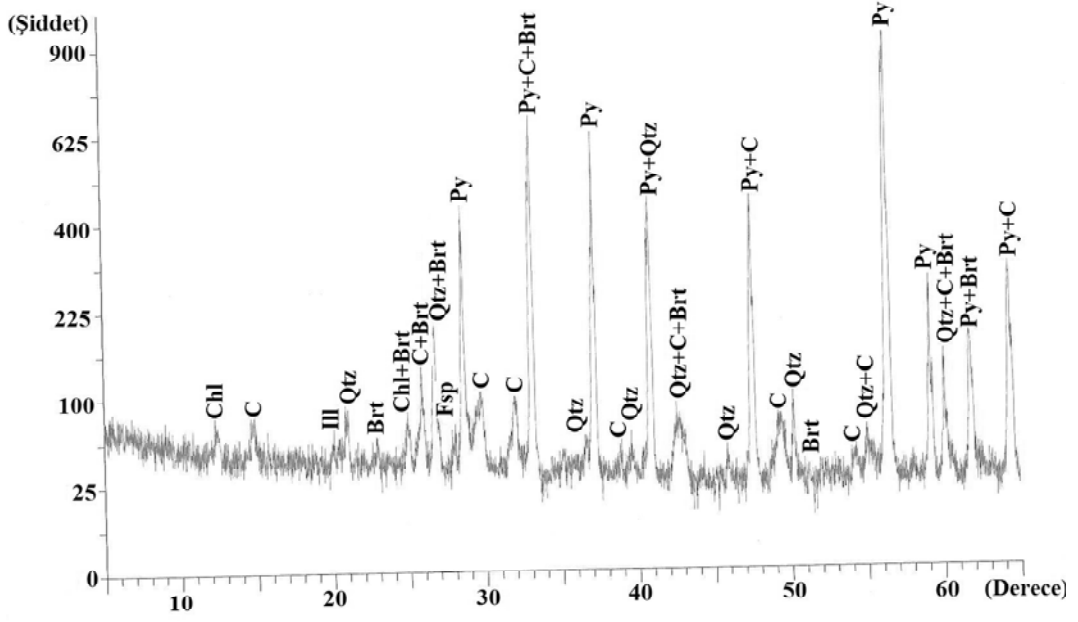
Şekil 76. CEM I 42,5 yerine %30 oranında ACM (a), FA (b), %15 oranında SD (c) ve %60 oranında YFC (d) ikame edilerek hazırlanan numunelerin 360 günlük kür süresi sonundaki görünümü

3.3.4. Akışkanlaştırıcı Kullanımının Etkisi

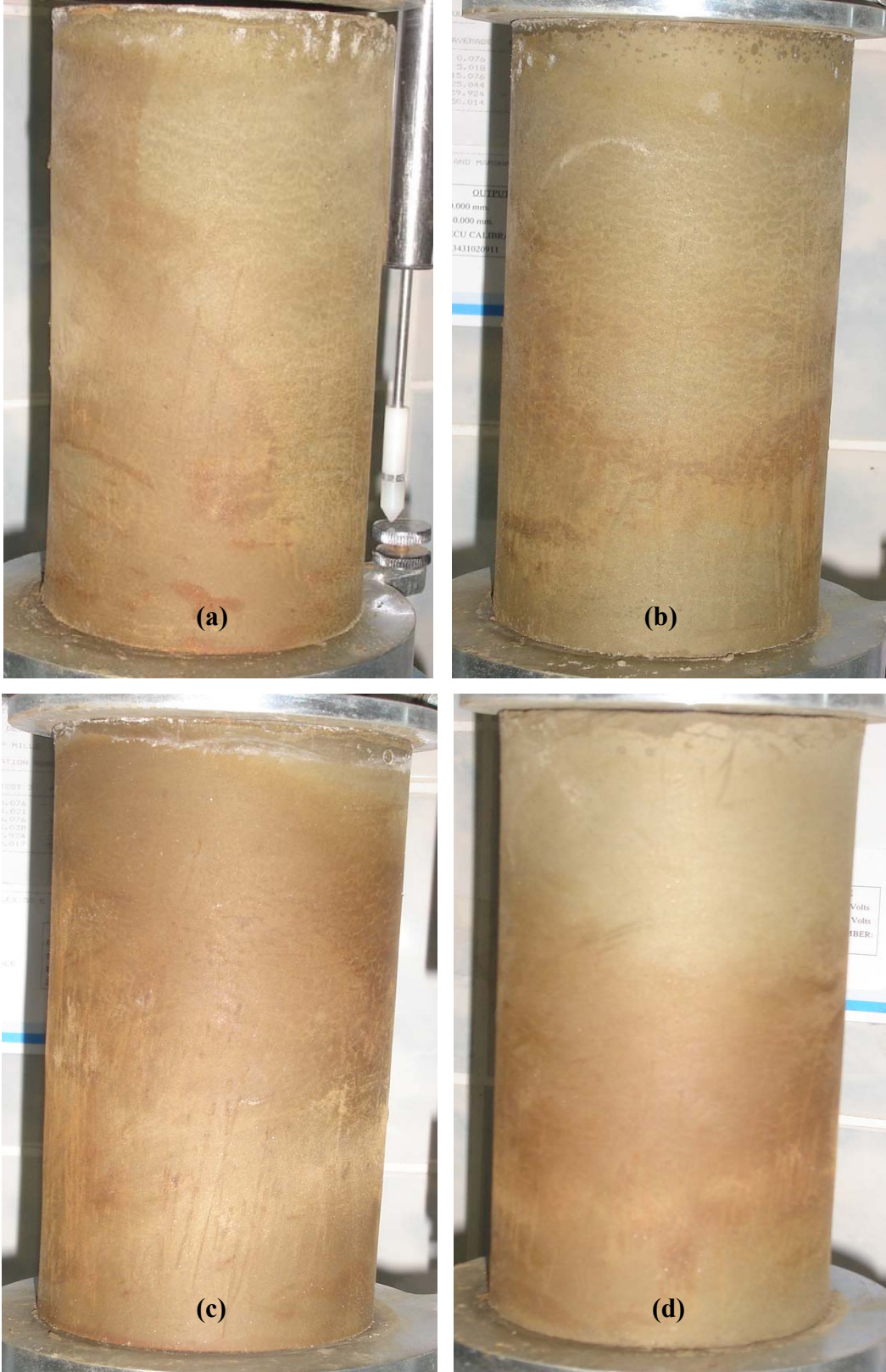
Şekil 77, akışkanlaştırıcı ve iki farklı bağlayıcı tipi kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinden 360 günlük kür süresi sonunda alınan örneklerin SEM görünümü ve EDS spektrumunu göstermektedir. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımı ile su/çimento oranının azalması, macun dolgunun mikroyapısında iyileşme sağlamış ve dolgu dayanım ve durabilitesine olumlu yönde etki etmiştir. Akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin SEM analizlerinden, ikincil alçıtaşı (Şekil 77a, b), demir sülfat (Şekil 77c, d) ve baryum sülfat (Şekil 77e, f) minerali oluşumuna rastlanmıştır. XRD analizlerinde ise ikincil alçıtaşı ve etrenjit minerali saptanmamıştır (Şekil 78). Bazı araştırmacılar (Benzaazoua vd., 2002; Fall ve Benzaazoua, 2005b; Ouellet vd., 2007a), ikincil alçıtaşı minerali oluşumunun her zaman dayanım ve durabiliteyi olumsuz yönde etkilemediğini, yeterli miktarda oluşması durumunda dolgu içerisindeki gözenek ve boşlukları doldurarak dayanım ve durabiliteyi olumlu yönde etkilediğini belirtmiştir. Düşük porozite ve gözeneklilik, nem ve havanın difüzyonunu azaltmak suretiyle piritin oksidasyonunu ve buna bağlı asit ve sülfat etkisini azaltmaktadır (Klein ve Simon, 2006; Erçikdi vd., 2008a, b). Ayrıca 360 günlük kür süresi sonunda numunelerde herhangi bir çatlamanın oluşmaması (Şekil 79), akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanımının faydalı olduğunu göstermiştir.



Şekil 77. CEM I 42,5 + NA (a), CEM I 42,5 + HA (b) ve CEM II/A 42,5 + SA (c) kullanılarak hazırlanan numunelerin (360 günlük) SEM görünümü ve EDS spektrumu



Şekil 78. CEM I 42,5 + NA (a) ve CEM II/A 42,5 + SA (b) kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin (360 günlük) XRD profili (Py: Pirit; Qtz: Kuvars; Chl: Klorit; C: Paris plasteri; Fsp: Feldispat; Ill: İllit; Brt: Barit)



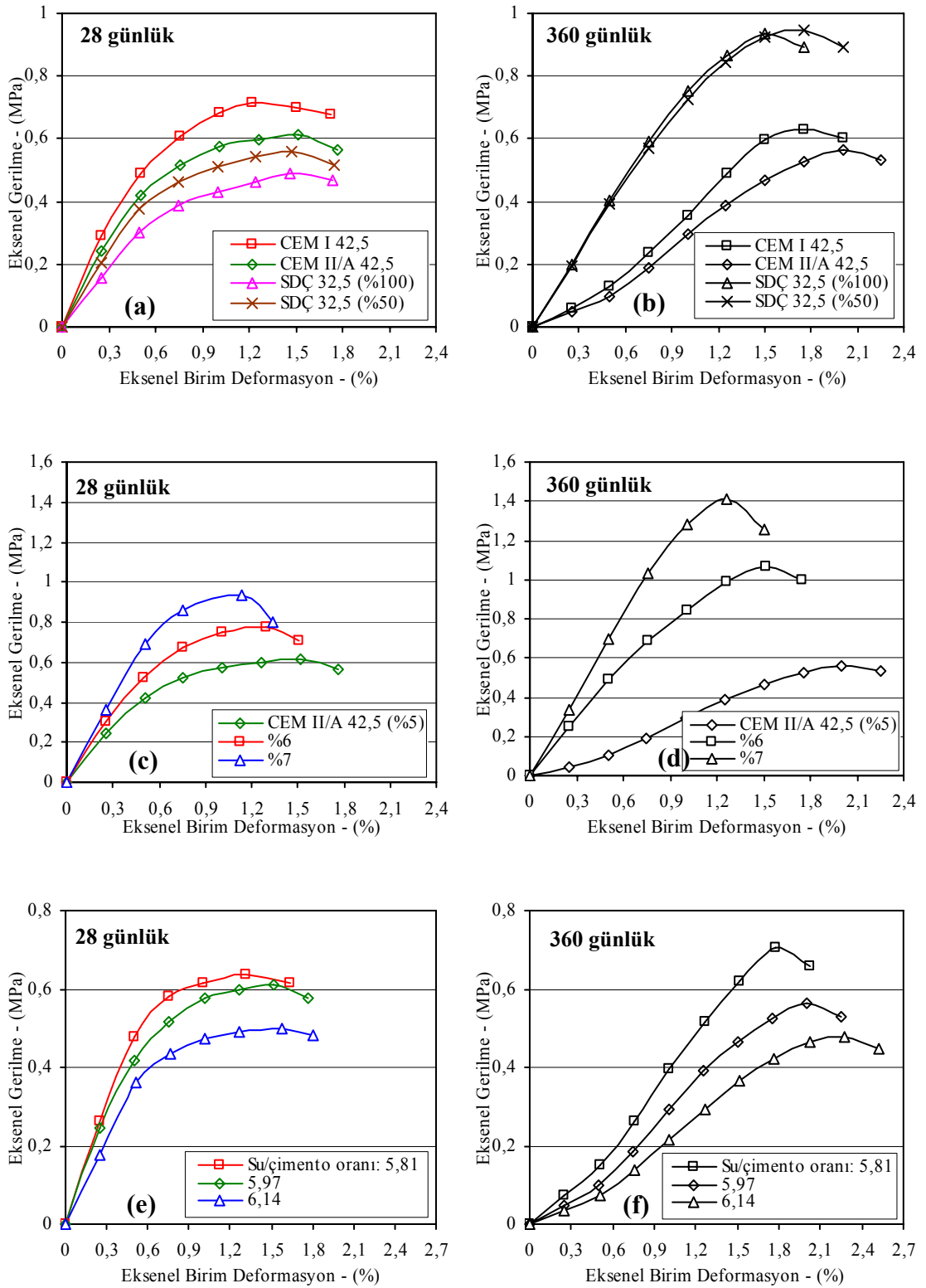
Şekil 79. CEM I 42,5 + NA (a), CEM I 42,5 + SA (b), CEM II/A 42,5 + SA (c) ve CEM II/A 42,5 + HA (d) kullanılarak hazırlanan numunelerin 360 günlük kür süresi sonundaki görünümü

3.4. Numunelerin Deformasyon Davranışlarının Değerlendirilmesi

Macun dolgu numunelerinin deformasyon davranışları, numunelerin dayanımını ölçerken sabit bir yükleme hızı altında numunede meydana gelen aksel gerilme (σ) ve aksel gerilme altındaki aksel birim deformasyon (ϵ) verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Şekil 80-81'de, 28 ve 360 günlük kür süresi sonunda tek aksel basınç-deformasyon testine tabi tutulan macun dolgu numunelerinin aksel gerilme-birim deformasyon eğrileri verilmiştir.

Şekil 80-81 incelendiğinde, bağlayıcı tipi, oranı, su/çimento oranı, mineral ve kimyasal katkıların macun dolgu numunelerinin aksel gerilme-birim deformasyon özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak 28 günlük kür süresi sonunda kırılan macun dolgu numunelerinin tamamı elastik-plastik davranış göstermiştir (Şekil 80a, c, e ve Şekil 81a, c, e). 360 günlük kür süresi sonunda ise, macun dolgu numunelerinin karışım özelliklerine bağlı olarak farklı davranışlar sergilediği görülmektedir (Şekil 80b, d, f ve Şekil 81b, d, f). Kür süresindeki artış ile birlikte aksel gerilme-birim deformasyon davranışında açığa çıkan farklılık, numunelerin 28 ve 360 günlük kür süreleri sonundaki fiziksel bütünlüğü ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 82). Çünkü 28 günlük kür süresi sonunda macun dolgu numunelerinde herhangi bir çatlak oluşumu vb. gözlenmemiştir (Şekil 82a). Ayrıca hidratasyon sürecinin devam etmesi ve ortamda bir miktar nem bulunması nedeniyle 28 günlük kür süresi sonunda macun dolgu numunelerinin boşluk ve gözenekliliğinin 360 günlük kür süresi sonundaki numunelere kıyasla daha düşük olduğu düşünülmektedir. 360 günlük kür süresi sonunda kırılan numunelere bakıldığında (Şekil 82b, c, d), bazı numunelerde çatlakların (Şekil 82b, c) oluştuğu ve kür süresinin artmasıyla nem miktarının azaldığı görülmektedir.

Bağlayıcı tipinin numunelerin aksel gerilme-birim deformasyon davranışına etkisi, uzun dönemde daha net bir şekilde gözükmemektedir (Şekil 80a, b). SDC 32,5 içeren numuneler uzun dönemde elastik-plastik, CEM I 42,5 ve CEM II/A 42,5 kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan numuneler ise plastik (boşlukların kapanması)-elastik-plastik davranış göstermiştir. Buradaki davranış farklılığı, bağlayıcıların kimyasal ve mineralojik özellikleri ile ilişkilendirilebilir. CEM I 42,5 ve CEM II/A 42,5 kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan numunelerde asit ve sülfat etkisi nedeniyle oluşan çatlaklar (Şekil 82b) ve dayanım kaybı (Şekil 52), numunelerin plastik (boşlukların kapanması)-elastik-plastik davranış göstermesine yol açmıştır.



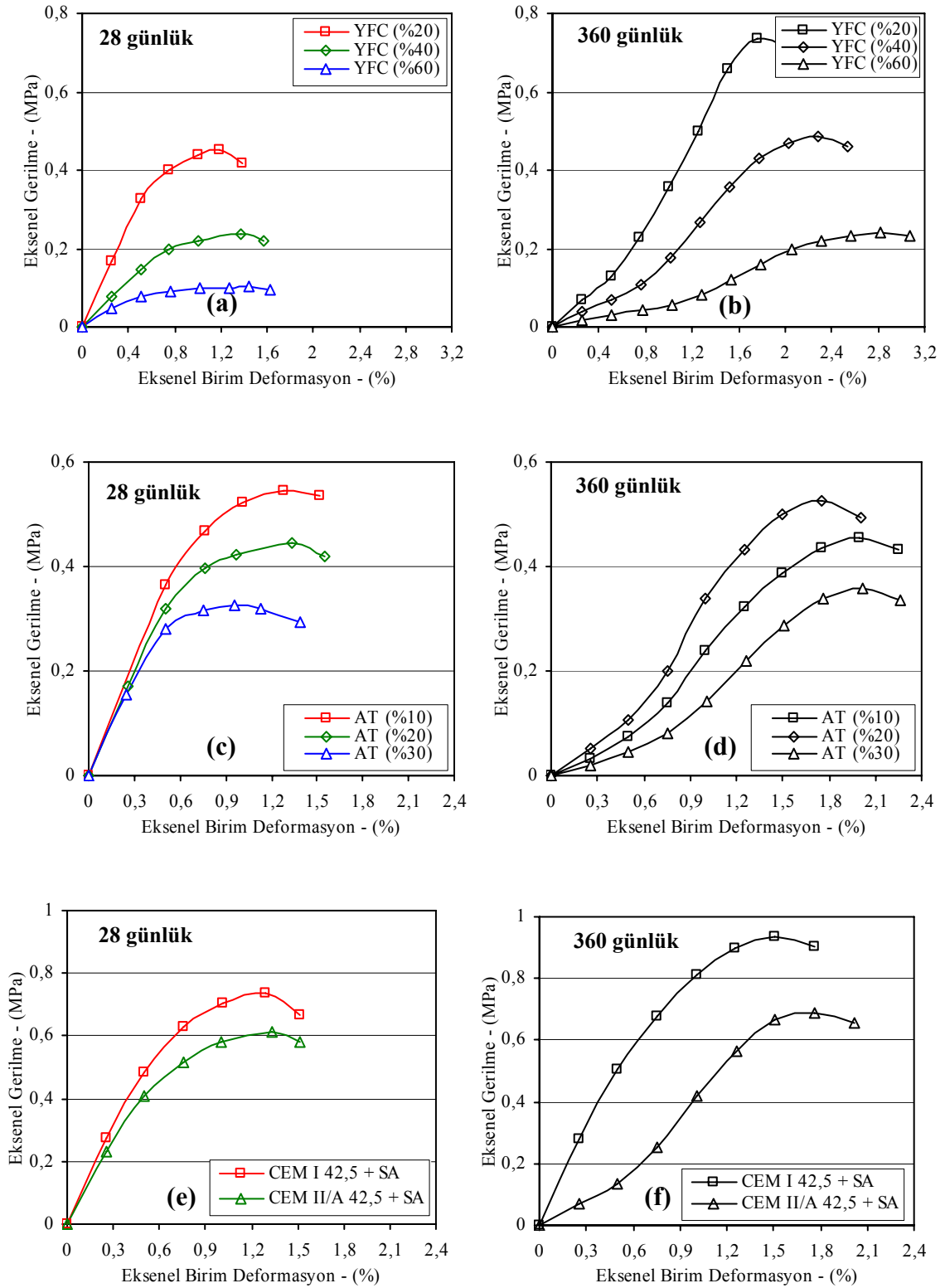
Şekil 80. Bağlayıcı tipi (a, b), oranı (c, d) ve su/çimento oranının (e, f) macun dolgu numunelerinin 28 ve 360 günlük kür süreleri sonundaki eksenel gerilme-birim deformasyon davranışına etkisi

SDÇ 32,5 kullanılarak hazırlanan numunelerin ise, atık içerisindeki pirit mineralinin oksidasyonu sonucu açığa çıkan asit ve sülfat etkisine karşı durabilitelelerini ve fiziksel bütünlüklerini korudukları (Şekil 82c) ve elastik-plastik davranış gösterdikleri görülmektedir.

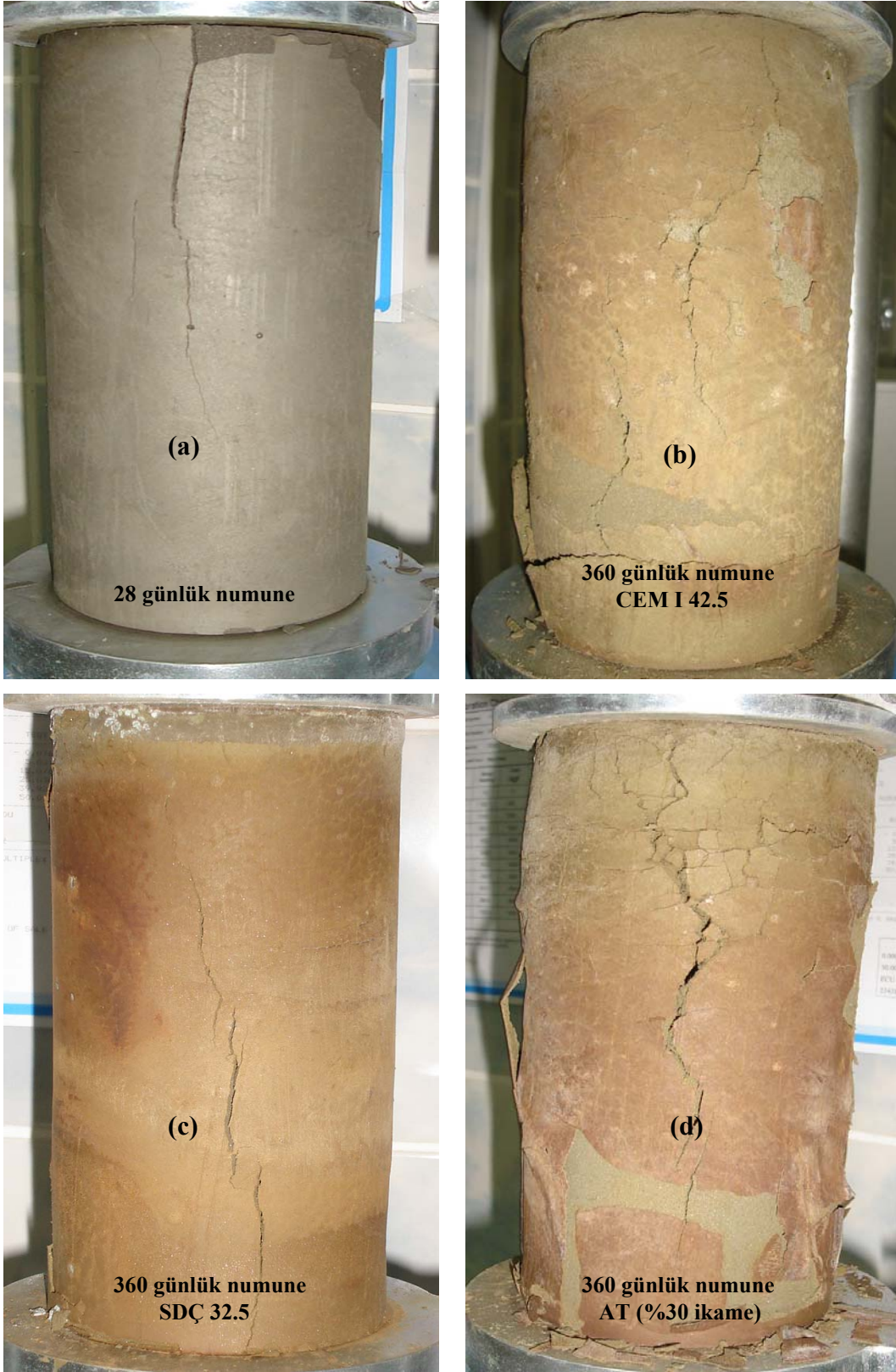
Bağlayıcı oranının artmasıyla (>%5) macun dolgu numunelerinin uzun dönemde elastik-plastik davranış gösterdiği görülmektedir. Bağlayıcı oranının artması; i) ortamdaki C-S-H ve CH miktarını arttırmış, ii) asit ve sülfat etkisine karşı uzun dönemde dolgunun durabilitesini ve fiziksel bütünlüğünü korumasını sağlamış ve iii) dolgu mikroyapısını (porozite ve gözeneklilik) iyileştirmiştir. Bu nedenle %6-7 bağlayıcı oranında hazırlanan numuneler, 28 ve 360 günlük kür süresi sonunda elastik-plastik davranış sergilemiştir.

Farklı su/çimento oranlarında CEM II/A 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelerin; kısa dönemde elastik-plastik, uzun dönemde ise plastik (boşlukların kapanması)-elastik-plastik davranış gösterdiği görülmektedir (Şekil 79e, f). Ünal ve Çakmakçı (2000) ve Fall vd. (2007) su/çimento oranının azalması ile birlikte porozite ve gözenekliliğin azaldığını ve bu çalışmada da olduğu gibi (Tablo 18), macun dolgu numunelerinin dayanım ve elastisite modüllerinin arttığını belirtmiştir.

Numunelerin teğetsel Young modülleri (E_t), bağlayıcı oranının artması ile birlikte artmış, su/çimento oranı ve mineral katkı maddesi ikame oranının artmasıyla birlikte ise azalmıştır (Tablo 18). Diğer bir ifade ile numunelerin yenildiği andaki birim deformasyonları (ϵ), bağlayıcı oranının artması ile birlikte azalmış, su/çimento oranı ve mineral katkı maddesi ikame oranının artması ile birlikte artmıştır. Ayrıca kür süresinin artması ile birlikte numunelerin yenildiği andaki eksenel birim deformasyonu (ϵ) artmıştır (Şekil 80-81). 28 ve 360 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilen deformasyon testlerinden elde edilen en yüksek eksenel birim deformasyon değerleri sırasıyla %1,58 (su/çimento oranı 6,14 olan numuneler için) ve %2,82 (%60 YFC içeren numuneler için) olarak gerçekleşmiştir (Şekil 80a, Şekil 81b). Beton numuneleri için bu değer yaklaşık %0,2 oranında olduğu belirtilmektedir (Fall vd., 2007). Macun dolguda beton ve kayaya nispeten deformasyon değerlerinin fazla olması nedeniyle dayanım artışı ile birlikte teğetsel Young modüllerinin her zaman artmadığı görülmüştür (Tablo 18).



Şekil 81. Mineral katkı maddesi olarak YFC (a, b) ve AT (c, d); akışkanlaştırıcı olarak SA kullanımının macun dolgu numunelerinin 28 ve 360 günlük kür süreleri sonundaki eksenel gerilme-birim deformasyon davranışına etkisi



Şekil 82. Numunelerin 28 ve 360 günlük kür süresi sonundaki kırılma şekilleri

Tablo 18. Macun dolgu numuneleri için hesaplanan teğetsel Young modülleri (E_t)

Karışım tipi	28 günlük		360 günlük	
	Maksimum Dayanım (MPa)	Teğetsel Young Modülü E_t (MPa)	Maksimum Dayanım (MPa)	Teğetsel Young Modülü E_t (MPa)
CEM I 42,5	0,713	95	0,628	53
CEM II/A 42,5	0,612	83	0,562	40
SDÇ 32,5 (%100)	0,490	71	0,935	71
SDÇ 32,5 (%50)	0,558	63	0,944	67
PKÇ 42,5 (%5 çimento oranı)	0,612	83	0,562	40
%6	0,776	100	1,063	83
%7	0,936	167	1,414	143
Su/çimento oranı 5,81	0,636	91	0,704	49
5,97	0,612	83	0,562	40
6,14	0,501	71	0,479	30
%20 YFC	0,453	67	0,736	67
%40 YFC	0,238	31	0,484	39
%60 YFC	0,104	16	0,240	15
%10 AT	0,547	71	0,456	83
%20 AT	0,444	66	0,527	105
%30 AT	0,327	55	0,357	63
CEM I 42,5 + SA	0,753	95	0,934	83
CEM II/A 42,5 + SA	0,689	77	0,690	67

4. SONUÇLAR

1. Atık malzeme, tane boyu dağılımı bakımından orta boyutlu macun dolgu malzemesi sınıfına girmektedir. Atığın kimyasal ve mineralojik analizinden, sülfür içeriğinin yüksek (%26,2) ve pirit mineralinin baskın olduğu saptanmıştır. Ayrıca karışım suyunun da yüksek miktarda sülfat (SO_4^{2-}) içerdiği belirlenmiştir. Macun dolgu karışımının sülfür ve sülfat içeriği bakımında zengin olması nedeniyle, asit ve sülfat etkisi nedeniyle bazı macun dolgu numunelerinin uzun dönemde dayanım ve durabilitesini kaybettiği gözlenmiştir.

2. Sülfür içeriği yüksek, piritli maden atıkları kullanılarak hazırlanan macun dolguda, bağlayıcı olarak CEM I 42,5, CEM II/A 42,5 ve SDC 32,5 kullanımının %5 çimento oranında uygun olmadığı anlaşılmıştır. CEM I 42,5 kullanılarak hazırlanan numuneler 28 günlük kür süresi sonunda istenen dayanım değerini (0,7 MPa) üretmesine rağmen, 56-360 günlük kür süresi aralığında %24,6 dayanım kaybına uğramışlardır. SDC 32,5 kullanılarak hazırlanan numuneler ise kısa dönemde düşük, uzun dönemde yüksek dayanım üretmiştir. Elde edilen sonuçlardan, bağlayıcıların fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin macun dolgu dayanım ve durabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır.

3. Bağlayıcı oranının artırılması (>%5), kısa dönemde (28 günlük kür süresi sonunda) yeterli dayanım kazanımı sağlayarak uzun dönemde dayanım kaybını engellemiştir. Su/çimento oranının azaltılması da benzer olarak, 56-360 günlük kür süresi aralığında sınır değer (0,7 MPa) üzerinde dayanım kazanımı sağlamış ve dayanım kaybını azaltmıştır. Ancak bağlayıcı tüketiminin artırılması veya su/çimento oranının azaltılması, dolgu dayanım ve durabilitesini artıracak ancak ekonomik yönden işletmeyi verimsiz kılabilir.

4. CEM I 42,5 yerine mineral katkı maddesi olarak belirli oranlarda (ağırlıkça %10-30) FT, AT ve ACM kullanımının uygun olmadığı anlaşılmıştır. FT, AT ve ACM içeren macun dolgu numunelerinin, kısa dönemde yeterli dayanım (0,7 MPa) kazanımı sağlayamadığı ve uzun dönemde oluşan dayanım kaybını artırdığı gözlenmiştir.

5. Bağlayıcı fazı içerisinde ağırlıkça %10-60 oranında KP, UK ve YFC kullanımının, kısa dönemde yeterli dayanım kazanımı sağlamamasına rağmen uzun dönemde oluşan dayanım kaybını azalttığı ve yüksek çimento oranlarında (>%5) CEM I 42,5 yerine kullanımlarının faydalı olabileceği anlaşılmıştır. Mineral katkı maddesi kullanımının

faydalı etkisi, ilave C-S-H jeli oluşumu ve dolgu içerisindeki boşluk ve gözeneklerin azalması ile ilişkilidir.

6. CEM I 42,5 yerine ağırlıkça %5-15 oranında SD kullanımının, %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu numunelerinin hem kısa dönemde yeterli dayanım kazanımı sağlamasına ve hem de uzun dönemde durabilitelerini korumasına katkıda bulunması nedeniyle uygun olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca doğal (FT, AT, KP) ve yapay (ACM, UK, YFC ve SD) puzolanlar kullanılarak hazırlanan macun dolgu numuneleri arasında en yüksek dayanım (0,9 MPa) kazanımını, 56 günlük kür süresi sonunda %15 SD içeren numuneler üretmiştir.

7. Akışkanlaştırıcı olarak CEM I 42,5 ile birlikte NA, SA ve HA, CEM II/A 42,5 ile birlikte HA kullanımı macun dolgunun kısa ve uzun dayanım ve durabilitesini artırmıştır. Akışkanlaştırıcı kullanımının macun dolgunun dayanım ve durabilitesi üzerindeki olumlu etkisi, su/çimento oranının 5,97'den 5,59'a düşmesi ve dolgunun daha kompakt bir yapıda olması ile ilişkilidir.

8. Gerçekleştirilen SEM, XRD ve EDS analizlerinden, macun dolgu numunelerinde görülen dayanım kaybı ve çatlamların genişleme özelliğine sahip ikincil alçıtaşı minerali oluşumundan kaynaklandığı saptanmıştır. Ayrıca dolgu matriks yapısı ile dayanım ve durabilite arasında direkt bir ilişkinin olduğu sonucuna varılmıştır.

9. Macun dolgu numunelerinin eksenel gerilme-birim deformasyon grafikleri incelendiğinde, maksimum eksenel birim deformasyon (ϵ) %2,82 dolayında gerçekleşmiştir. 28 günlük kür süresi sonundaki macun dolgu numunelerinin tamamı elastik-plastik bir deformasyon davranışı sergilemiştir. Kür süresinin artması ile birlikte numunelerin yenildiği andaki deformasyon miktarı artmıştır. Ayrıca bağlayıcı oranının artması ve su/çimento oranının azalmasıyla Young modüllerinin arttığı gözlenmiştir.

5. ÖNERİLER

1. Puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddelerinin (doğal ve yapay puzolanlar) macun dolgu performansına etkisi daha yüksek (>%5) çimento oranlarında araştırılmalı ve maliyet analizleri yapılmalıdır.

2. Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgudan alınacak karot numuneleri üzerinde tek ve üç eksenli basınç-deformasyon testleri gerçekleştirilmeli ve laboratuvar ortamından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmalıdır.

3. Macun dolgu içerisinde gerçekleşen hidrasyon işlemini ve oluşan ürünlerin (CH, C-S-H jeli, ikincil alçıtaşı oluşumu vb.) macun dolgu performansına etkisini daha iyi anlamak amacıyla daha detaylı mikroyapı (SEM, XRD, EDS vb.) analizleri gerçekleştirilmelidir.

4. Karışım suyu kimyasının (pH, SO_4^{-2}) macun dolgu performansına etkisi detaylı bir şekilde araştırılmalıdır.

5. Atık malzemenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliğinin macun dolgu performansına etkisini daha iyi anlamak amacıyla farklı özelliklere sahip atık malzeme örnekleri kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

6. Yeraltı kür koşullarının (kür sıcaklığı, drenaj koşulları, konsolidasyon etkisi, yanal basınç etkisi vb.) macun dolgu performansına etkisi incelenmelidir.

7. Farklı özellikteki kimyasal katkı maddelerinin (priz hızlandırıcı, akışkanlaştırıcı vb.) bağlayıcı veya mineral katkı maddeleri ile birlikte kullanımının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi detaylı bir şekilde araştırılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Akçil, A. ve Koldaş, S., 2006. Acid Mine Drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies, Journal of Cleaner Production, 14, 12-13, 1139-1145.
- Aköz, F., Koral, S., Yüzer, N. ve Türker, F., 1995. Effects of Sodium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars With and Without Silica Fume, Cement Concrete Research, 25, 6, 1360-1368.
- Alataş, T., Somunkıran, E. T. ve Ahmedzade, P., 2006. Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agregada Olarak Kullanılması, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18, 2, 225-234.
- Alp, İ., Deveci, H., Yılmaz, E., Yılmaz, A. O. ve Kesimal, A., 2003, Investigation of the Potential Use of the Quarry Product from Taşhane-Terme as Trass Raw Material in Cement Industry, Proceedings of the International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul, 553-559.
- Altun, İ. A. ve Yılmaz, İ., 2002. Study on Steel Furnace Slags with High MgO as Additive in Portland Cement, Cement and Concrete Research, 32, 1247-1249.
- Amaratunga, L. M. ve Yaschyshyn, D. N., 1997. Development of a High Modulus Paste Fill Using Fine Gold Mill Tailings, Geotechnical and Geological Engineering, 15, 3, 205-219.
- Annor, A. B., 1999. A Study of the Characteristics and Behaviour of Composite Backfill Material, PhD Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 396 p.
- Archibald, J. F., Lausch, P. ve He, Z. X., 1993. Quality Control Problems Associated with Backfill Use in Mines, The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 86, 972, 53-57.
- Archibald, J. F., Chew, J. L. ve Lausch, P., 1999. Use of Ground Waste Glass and Normal Portland Cement Mixtures for Improving Slurry and Paste Backfill Support Performance, CIM Bulletin, 92, 1030, 74-80.
- Aref, K., Moss, A. ve Durston, K., 1992. Design Issues for Low Moisture Content Backfill, CIM Bulletin, 82, 270-281.
- Aubertin, M., Bussiere, B. ve Chapuis, R. P., 1996. Hydraulic Conductivity of Homogenized Tailings from Hard Rock Mines, Canadian Geotechnical Journal, 33, 470-482.
- Aubertin, M., Li, L., Arnoldi, S., Belem, T., Bussiere B., Benzaazoua, M. ve Simon, R., 2003. Interaction Between Backfill and Rock Mass in Narrow Stopes, Soil and Rock America Mechanics Symposium, Essen, Germany, 1157-1164.
- ASTM C 143, 2008. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards.

- ASTM C 39, 2005. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 219, 2007. Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 311, 2007. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash for Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 494, 2008. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 618-05, 2005. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 989, 2006. Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, Annual Book of ASTM Standards.
- Atiş, C. D., Sevim, U. K., Özcan, F., Bilim, C., Karahan, O., Tanrıku, A. H. ve Ekşi, A., 2004. Strength Properties of Roller Compacted Concrete Containing A Non-Standard High Calcium Fly Ash, Materials Letters, 58, 1446-1450.
- Bakharev, T., Sanjayan J. G. ve Cheng, Y. B., 2002. Sulfate Attack on Alkali-Activated Slag Concrete, Cement and Concrete Research, 32, 2, 211-216.
- Bakker, R., 1999. Application and Advantages of Blended Cement Concretes, QCL Group Technical Note, 7 p.
- Banfill P. F. G. ve Forrester, A. M., 2000. A Relationship Between Hydraulicity and Permeability of Hydraulic Lime, Proceedings of the International RILEM-Workshop "Historic Mortars: Characteristics and Tests", Paisley, 173-183.
- Been, K., Brown, E. T. ve Hepworth, N., 2002. Liquefaction Potential of Paste Fill at Neves Corvo Mine, Portugal, IMM Transactions Section A, 111, 1, 47-58.
- Belem, T., Benzaazoua, M. ve Bussiere, B., 2000. Mechanical Behaviour of Cemented Paste Backfill, Proceedings of 53th Canadian Geotechnical Conference, Montreal, 373-380.
- Belem, T., Bussiere, B. ve Benzaazoua, M., 2001. The Effect of Microstructural Evolution on the Physical Properties of Paste Backfill, Proceedings of Tailings and Mine Waste '01, Balkema, Rotterdam, 365-374.
- Belem, T., Benzaazoua, M., Bussiere, B. ve Dagenais, A., 2002. Effects of Settlement and Drainage on Strength Development Within Mine Paste Backfill, Proceedings of Tailings and Mine Waste'02, Colorado, USA, 139-148.

- Belem, T., Aatar, E. O., Bussiere, B., Benzaazoua, M., Fall, M. ve Yilmaz, E., 2006. Characterization of Self-Weight Consolidated Paste Backfill, Proceedings of the 9th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Limerick, Ireland, 333-345.
- Belem, T. ve Benzaazoua, M., 2008. Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology, Geotechnical and Geological Engineering, 26, 2, 147-174.
- Belzile, N., Maki, S., Chen, Y. W. ve Goldsack, D., 1997. Inhibition of Pyrite Oxidation by Surface Treatment, The Science of the Total Environment, 196, 177-186.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman P. ve Verburg, R., 1999. Cementitious Backfill with High Sulfur Content: Physical, Chemical, and Mineralogical Characterization, Cement and Concrete Research, 29, 5, 719-725.
- Benzaazoua, M. Belem, T. ve Bussiere, B., 2002. Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill, Cement and Concrete Research, 32, 7, 1133-1144.
- Benzaazoua, M., Fall, M. ve Belem, T., 2004. A Contributing to Understanding the Hardening Process of Cemented Pastefill, Minerals Engineering, 17, 2, 141-152.
- Benzaazoua, M., Fiset, J. F., Bussiere, B., Villeneuve, M. ve Plente, B., 2006. Sludge Recycling Within Cemented Paste Backfill: Study of the Mechanical and Leachability Properties, Minerals Engineering, 19, 5, 420-432.
- Bernier, R. L., Lee, M. G. ve Moerman, A., 1999. Effects of Tailings and Binder Geochemistry on the Physical Strength of Paste Backfill, Proceedings of Sudbury '99, Mining and the Environment II, Sudbury, Canada, 1113-1122.
- Bing, B. ve Cohen, M. D., 2000. Does Gypsum Formation During Sulphate Attack on Concrete Lead to Expansion, Cement and Concrete Research, 30, 1, 117-123.
- Binici, H. ve Aksoğan, O., 2006. Sulfate Resistance of Plain and Blended Cement, Cement & Concrete Composites, 28, 39-46.
- Bloss, M. L. ve Revell, M. B., 2001. Mining with Paste Fill at BHP Cannington, 7th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 2001, Seattle, USA, 209-223.
- Bloss, M. L., 2002. Below Ground Disposal (Mine Backfill), In: Jewell, Fourie, Lord, editors, Paste and Thickened Tailings: A Guide, University of Western Australia, 103-26.
- Brackebusch, F. W., 1994. Basics of Paste Backfill Systems, Mining Engineering, 46, 10, 1175-1178.
- Cai, M. F., Dang, Z., Chen, Y. W. ve Belzile, N., 2005. The Passivation of Pyrrhotite by Surface Coating, Chemosphere, 61, 659-667.

- Camacho, R. E. R. ve Afif, R. U., 2002. Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability, Cement and Concrete Research, 32, 1851-1858.
- Cengiz, A. K., 2002. Lavvar Atıklarının Hidrolik Dolguda Sıkışma Özellikleri, Madencilik, 41, 3, 27-34.
- Chen, Y. W., Li, Y., Cai, M. F., Belzile, N. ve Dang, Z., 2006. Preventing Oxidation of Iron Sulfide Minerals by Polyethylene Polyamines, Minerals Engineering, 19, 19-27.
- Chun, B. W., 2001. Paste Fluidity of Two-Component Cement Dispersant Formulation Another Additivity Rule, Cement and Concrete Research, 31, 959-963.
- Clayton, S., Grice, T. ve Boger, D. V., 2003. Analysis of the Slump Test for on-Site Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions, International Journal of Mineral Processing, 70, 1-4, 3-21.
- Clark, C. C., Vickery, J. D. ve Backer, R. R., 1995. Transport of Total Tailings Paste Backfill: Results of Full-Scale Pipe Test Loop Pumping Tests, USBM, RI 9573, USA.
- Cooke, R., 2007. Backfill Pipeline Distribution Systems-Design Methodology Review, 9th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 2007, Montreal, Canada, 9 p.
- Çakmakçı, G., 1997. Mechanical Evaluation of Cemented Backfill Materials, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural & Applied Sciences, 181 p.
- Çavdar, A., 2004. Trabzon Yöresi Tüflerinin Çimentoda Tras Olarak Kullanılabilirliği, Çimento İnceliği ve Tras Oranının Traslı Çimentonun Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Çavdar, A. ve Yetgin, Ş., 2007. Availability of Tuffs from Northeast of Turkey as Natural Pozzolan on Cement, Some Chemical and Mechanical Relationships, Construction and Building Materials, 21, 12, 2066-2071.
- Çetiner, E. G., Ünver, B. ve Hindistan, M. A., 2006. Maden Atıkları ile İlgili Mevzuat: Avrupa Birliği ve Türkiye, Madencilik, 45, 1, 23-34.
- De Souza, E., Archibald, J.F. ve Dirige, A. P. E., 2003. Economics and Perspectives of Underground Backfill Practices in Canadian Mining, 105th Annual General Meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, Canada, 15 p.
- DIN 4030-1, 2008. Assesment of Water, Soil and Gases, for Their Aggressiveness to Concrete-Part 1: Principles and Limiting Values, German Standards.

- Ducman, V., Mladenovic, A. ve Suput, J. S., 2002. Lightweight Aggregate Based on Waste Glass and Its Alkali-Silica Reactivity, Cement and Concrete Research, 32, 223- 226.
- Dulaijan, S. U. A., Maslehuddin, M., Zahrani, M. M. A., Sharif, A. M., Shameem, M. ve Ibrahim, M., 2003. Sulfate Resistance of Plain and Blended Cements Exposed to Varying Concentrations of Sodium Sulphate, Cement & Concrete Composites, 25, 4, 429-437.
- Elsen, J., Brutsaert, A., Deckers, M. ve Brulet, R., 2004. Microscopical study of ancient mortars from Tournai (Belgium), Materials Characterization, 53, 2-4, 289-294.
- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, 741 s.
- Erçıkıdı, B., Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Deveci, H., 2003. Effect of Desliming on the Strength of Paste Backfill, Proceedings of the X Balkan Mineral Processing Congress, Varna, Bulgaria, 850-857.
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2008a. Doğal Puzolan Özelliklerinin Macun Dolgunun Dayanım ve Duraylılığına Etkisi, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 29, 1, 25-35.
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2008b. Drenaj Koşullarının Macun Dolgu Dayanımına Etkisi, Madencilik, 47, 2, 15-24.
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2008c. Effect of Binder Type and Proportion on the Short -and Long Term Strength of Cemented Paste Backfill, First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium (SHIRMS), Perth, Australia, 193-199.
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A. ve Deveci, H., 2008d. Atık Cam ve Uçucu Kül Katkılı Macun Dolgunun Dayanım Özellikleri, IX Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, İzmir, 484-495.
- Erçıkıdı, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009a. Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Tailings: Importance of Binder Type and Dosage, Cement & Concrete Composites, 31, 4, 268-274.
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009b. Utilization of Industrial Waste Products as Pozzolanic Material in Cemented Paste Backfill of High Sulphide Mill Tailings, Journal of Hazardous Materials, 168, 2-3, 848-856.
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009c. Piritli Atıklardan Üretilen Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım ve Deformasyon Özellikleri, Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Antalya, 323-335.
- Erçıkıdı, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H., Alp, İ., Yazıcı, M. ve Şahin, B., 2009d. Çevreye Duyarlı Macun Dolgu Teknolojisi: Çayeli Bakır İşletmelerinde Örnek Uygulama, 3. Madencilik ve Çevre Sempozyumu, Ankara, 139-152.

- Fall, M. ve Benzaazoua, M., 2003. Advances in Predicting Performance Properties and Cost of Paste Backfill, Proceedings on Tailings and Mine Waste'03, Vail, USA, 73-85.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Ouellet, S., 2004. Effect of Tailings Properties on Paste Backfill Performance, Proceedings of The 8th International Symposium on Mining with Backfill, Beijing, China, 193-202.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Ouellet, S., 2005a. Experimental Characterization of the Effect of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 18, 1, 41-44.
- Fall, M. ve Benzaazoua, M., 2005b. Modelling the Effect of Sulphate on Strength Development of Paste Backfill and Binder Mixture Optimization, Cement and Concrete Research, 35, 2, 301-314.
- Fall, M. ve Samb, S. S., 2006. Influence of Curing Temperature on Strength, Deformation Behaviour and Pore Structure of Cemented Paste Backfill at Early Ages, Construction and Building Materials, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.08.010.
- Fall, M., Belem, T., Samb, S. ve Benzaazoua, M., 2007. Experimental Characterization of the Stres-Strain Behaviour of Cemented Paste Backfill in Compression, Journal of Materials Science, 42, 3914-3922.
- Fourie, A. ve Dunn, F., 2007. Limitations to the Use of the Modified Slump Test for Yield Stress Determination, Proceedings of the Tenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Paste 2007, Perth, Australia, 219-228.
- Gay, F. ve Constantiner, D., 1998. Additives for Improving Paste Backfill Mixes, Proceedings of Tailings and Mine Waste'98, Colorado, USA, 159-166.
- Gawu, S. K. Y. ve Fourie, A. B., 2004. Assesment of the Modified Slump Test as a Measure of the Yield Stress of High-Density Thickened Tailings, Canadian Geotechnical Journal, 41, 39-47.
- Goldman, A. ve Bentur, A., 1993. The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength, Cement and Concrete Research, 23, 4, 962-972.
- Grabinsky, M. W., Theriault, J. ve Welch, D., 2002. An Overview of Paste and Thickened Tailings Disposal On Surface, Proceedings of the Symposium sur l'environnement et les mines: Defis et perspectives. Rouyn-Noranda, Canada, 8 p.
- Gray, N. F., 1997. Environmental Impact and Remediation of Acid Mine Drainage: A Management Problem, Environmental Geology, 30, 1-2, 62-71.
- Grice, T., 1998. Underground Mining with Backfill, The 2nd Annual Summit on Mine Tailings Disposal Systems, Brisbane, Australia, 5-15.

- Grice, A. G., 2005. Introduction to Hydraulic Fill, In: Handbook on Mine Fill, Australian Centre for Geomechanics, 179 p.
- Hassani, F. P., Ouellet, J. ve Hossein, M., 2001. Strength Development in Underground High Sulphate Paste Backfill Operation, CIM Bulletin, 94, 1050, 57-62.
- Hassani, F. ve Archibald, J., 1998. Mine Backfill, Canadian Institute of Mine, Metallurgy and Petroleum, Published on CD-ROM Proceedings, Canada, 263 p.
- Henderson, A. ve Revell, M. B., 2005. Basic Mine Fill Materials, In: Handbook on Mine Fill, Australian Centre for Geomechanics, 179 p.
- Henderson, A., Revell, M. B., Landriault, D. ve Coxon, J., 2005. Paste Fill, In: Handbook on Mine Fill, Australian Centre for Geomechanics, 179 p.
- Hilson, G. ve Murck, B., 2001. Progress Toward Pollution Prevention and Waste Minimization in the North American Gold Mining Industry, Journal of Cleaner Production, 9, 405-415.
- Hooton, R. D. ve Emery, J. J., 1990. Sulphate Resistance of a Canadian Slag Cement, ACI Materials Journal, 87, 6, 547-555.
- Hossain, K. M. A. ve Lachemi, A., 2006. Performance of Volcanic Ash and Pumice Based Blended Cement Concrete in Mixed Sulfate Environment, Cement and Concrete Research, 36, 1123-1133.
- Hurley, P. W. ve Pritchard, R. G., 2005. Cement, Encyclopedia of Analytical Science, 458-463.
- Huynh, L., Beattie, D. A., Fornasiero, D. ve Ralston, J., 2006. Effect of Polyphosphate and Naphthalene Sulfonate Formaldehyde Condensate on the Rheological Properties of Dewatered Tailings and Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 19, 28-36.
- Irassar, E. F, Gonzales, M. ve Rahhal, V., 2000. Sulphate Resistance of Type V Cements with Limestone Filler and Natural Pozzolana, Cement and Concrete Research, 22, 361-368.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçıkıdı, B., Alp, İ., Yumlu, M. ve Özdemir, B., 2002. Macun Dolgu Laboratuar Testleri, Madencilik, 41, 4, 11-20.
- Kesimal, A., Erçıkıdı, B. ve Yılmaz, E., 2003. The Effect of Desliming by Sedimentation on Paste Backfill Performance, Minerals Engineering, 16, 10, 1009-1011.
- Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Erçıkıdı, B., 2004. Evaluation of Paste Backfill Test Results Obtained From Different Size Slumps with Varying Cement Contents for Sulphure Rich Mill Tailings, Cement and Concrete Research, 34, 10, 1817-1822.

- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Deveci, H. ve Alp, İ., 2005. Effect of Properties of Tailings and Binder on the Short- and Long-Term Strength and Stability of Cemented Paste Backfill, Materials Letters, 59, 28, 3703-3709.
- Klein, K. ve Simon, D., 2006. Effect of Specimen Composition on the Strength Development in Cemented Paste Backfill, Canadian Geotechnical Journal, 43, 310-324.
- Kuganathan, K., 2001. A Method to Design Optimum Pastefill Mixes Through Flow Cone and Mini Slump Cone Testing, 7th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 2001, Seattle, USA, 163-177.
- Kuganathan, K., 2005, Rock Fill in Mine Fill, In: Handbook on Mine Fill, Australian Centre for Geomechanics, 179 p.
- Kuyucak, N., 1998. Mining, The Environment and The Treatment of Mine Effluents Drainage-Treatment Options for Mining Effluents, International Journal of Environment and Pollution, 10, 2, 315-325.
- Lalvani, S. B., Deneve, B. A. ve Weston, A., 1990. Passivation of Pyrite Due to Surface Treatment, Fuel, 69, 12, 1567-1569.
- Landriault, D., 1995. Paste Backfill Mix Design for Canadian Underground Hard Rock Mining, Proceedings of the 97th Annual General Meeting of the CIM Rock Mechanics and Strata Control Session, Nova Scotia, Canada, 652-663.
- Landriault, D., Verburg, R., Cincilla, W. ve Welch, D., 1997. Paste Technology for Underground Backfill and Surface Tailings Disposal Applications, CIM Bulletin, 54, 112-120.
- Landriault, D., 2001. Backfill in Underground Mining, In: Hustrulid, W.A. (ed.), Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies, SME, USA, 608– 609.
- Landriault, D., 2006. They Said “It Will Never Work”– 25 Years of Paste Backfill 1981-2006, Proceedings of 9th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Limerick, Ireland, 277-292.
- Lee, S. T., Moon, H. Y. ve Swamy, R. N., 2005. Sulfate Attack and Role of Silica Fume in Resisting Strength Loss, Cement & Concrete Composites, 27, 65-76.
- MacKenzie, A. T. ve Rantala, P. A., 2001. Pastefill Transportation Techniques and Predictive Rheology, 7th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 2001, Seattle, USA, 57-62.
- McGregor, R. G. ve Blowes, D. W., 2002. The Physical, Chemical and Mineralogical Properties of Three Cemented Layers within Sulfide-Bearing Mine Tailings, Journal of Geochemical Exploration, 76, 3, 195-207.

- Mehta, P. K., 1983. First International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Minerals By-Products in Concrete, ACI Publication, 79, 1, 1–46.
- Mehta, P. K. ve Monteiro, P. J. M., 2005. Concrete: Microstructure, Properties and Materials, The McGraw-Hill Companies, Third Edition, 659 p.
- Moghaddam, A. S. ve Hassani, F. P., 2007. Yield Stress Measurement of Cemented Paste Backfill With the Vane Method and Slump Tests, 9th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 2007, Montreal, Canada, 8 p.
- Mohammed, A. M. O., Hossein, M. ve Hassani, F. P., 2002. Hydro-Mechanical Evaluation of Stabilized Mine Tailings, Environmental Geology, 41, 749-759.
- Naylor, J., Farmery, R. A. ve Tenbergen, R. A., 1997. Paste Backfill at the Macassa Mine with Flash Paste Production in a Paste Production and Storage Mechanism, Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, Ontario, Canada, 408-420.
- Nehdi, M. ve Tariq, A., 2007. Stabilization of Sulphidic Mine Tailings for Prevention of Metal Release and Acid Drainage Using Cementitious Materials: A Review, Journal of Environmental Science, 6, 423-436.
- Neville, A. M., 2000. Properties of Concrete, Prentice Hall, London, England.
- Nguyen, Q. D. ve Boger, D. V., 1998. Application of Rheology to Solving Tailings Disposal Problems, International Journal of Mineral Processing, 54, 217-233.
- Ouellet, J., Benzaazoua, M. ve Servant, S., 1998. Mechanical, Mineralogical and Chemical Characterization of a Paste Backfill, Proceedings of the 4th International Conference on Tailings and Mine Waste, Colorado, USA, 139-146.
- Ouellet, S., Bussiere, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M. ve Belem, T., 2004a. Effect of Binder Type and Mixing Water Chemistry on Microstructural Evolution of Cemented Paste Backfill, Proceedings of the 57th Annual Canadian Geotechnical Conference and 5th joint IAH-CNC/CGS Conference, Quebec, Canada, 8 p.
- Ouellet, S., Bussiere, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M. ve Fall, M., 2004b. Sulphide Reactivity Within Cemented Paste Backfill: Oxygen Consumption Test Result, Proceedings of the 56th Annual Canadian Geotechnical Conference and 4th joint IAH-CNC/CGS Conference, Quebec, Canada, 8 p.
- Ouellet, S., Bussiere, B., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. ve Aubertin, M., 2006. Reactivity and Mineralogical Evolution of An Underground Mine Sulphidic Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 19, 5, 407- 419.
- Ouellet, S., Bussiere, B., Aubertin, M. ve Benzaazoua, M., 2007a. Microstructural Evolution of Cemented Paste Backfill: Mercury Intrusion Porosimetry Test Results, Cement and Concrete Research, 37, 12, 1654-1665.

- Ouellet, S., Bussiere, B., Benzaazoua, M. ve Aubertin, M., 2007b. SEM-XMAP: Scanning Electron Microscopy and X-Ray Dot-Mapping Applied to Cemented Paste Backfill, 9th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 2007, Canada, 10 p.
- Özcan, O., Ruhland, M. ve Stahl, W., 2000. The Effect of Pressure, Particle Size and Particle Shape on the Shear Strength of Very Fine Mineral Cakes, International Journal of Mineral Processing, 59, 185-193.
- Papadakis, V. G., Antiohos, S. ve Tsimas, S., 2002. Supplementary Cementing Materials in Concrete Part II: A Fundamental Estimation of the Efficiency Factor, Cement and Concrete Research, 32, 1533-1538.
- Petrolito, J., Anderson, R. M. ve Pigdon, S. P., 2005. A Review of Binder Materials Used in Stabilized Backfills, CIM Bulletin, 98, 1085, 1-7.
- Ramachandran, V. S., 1995. Concrete Admixtures Handbook-Properties, Science and Technology, 2nd Edition, Noyes Publications, Park Ridge.
- Razavi, M. ve Hassani F. P., 2007. Strength Development and Characteristics of Sodium Silicate-fortified Sand Pastefill/The Effect of Binder Content- Sodium Silicate Concentration, and Pulp Density, 9th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 2007, Canada, 8 p.
- Rendell, F. ve Jauberthie, R., 1999. The Deterioration of Mortar in Sulphate Environments, Construction and Building Materials, 13, 6, 321-327.
- Revell, M., 2004. Paste-How Strong is it?, Proceeding of the 8th International Symposium on Backfill, Beijing, China, 286-294.
- Roux, L. K., Bawden, W. F. ve Grabinsky, M. W., 2004. Liquefaction Analysis of Early Age Cemented Paste Backfill, 8th International Symposia on Mining with Backfill, Beijing, China, 233-241.
- Roux, K. A., Bawden, W. F. ve Grabinsky, M. F., 2005. Field Properties of Cemented Paste Backfill at the Golden Giant Mine, IMM Transactions Section A, 114, 2, 65-80.
- Santhanam, M., Cohen, M. D. ve Olek, J., 2001. Sulfate Attack Research Whither Now?, Cement and Concrete Research, 31, 6, 845-851.
- Sargeant, A., Souza, E. D. ve Archibald, J., 2007. The Application of Post-Consumer Glass As a Cementing Agent in Mine Backfill, 9th International Symposium on Mining with Backfill, Montreal, Canada, 84-97.
- Shannag, M. J. ve Shaia, A. H., 2003. Sulfate Resistance of High-Performance Concrete, Cement & Concrete Composites, 25, 3, 363-369.
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. ve Rodriguez, D., 2000. Studies on Concrete Containing Ground Waste Glass, Cement and Concrete Research, 40, 1, 91-100.

- Simon, D., 2005. Microscale Analysis of Cemented Paste Backfill, Ph.D. Thesis, Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto, 208 p.
- Sobolev, K., Türker, P., Soboleva, S. ve İşcioglu, G., 2007. Utilization of Waste Glass in ECO-Cement: Strength Properties and Microstructural Observations, Waste Management, 27, 7, 971-976.
- Swamy, R. N., 1997. Design for Durability and Strength Through the Use of Fly Ash and Slag in Concrete, Third CANMET/ACI International Conference, Auckland, New Zealand, 1-72.
- Şahmaran, M., Kasap, O., Duru, K. ve Yaman, I. O., 2007. Effects of Mix Composition and Water-Cement Ratio on the Sulfate Resistance of Blended Cements, Cement & Concrete Composites, 29, 159-167.
- Türkmenoğlu, A. G. ve Tankut, A., 2002. Use of Tuffs from Central Turkey as Admixture in Pozzolanitic Cements: Assessment of Their Petrographical Properties, Cement and Concrete Research, 32, 629-637.
- Tariq, A. ve Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings, Waste and Resource Management, 160, 4, 155-166.
- Taylor, H. F. W., 1990. Cement Chemistry, 3rd Edition, Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich, London, England.
- Tikal'sky, P. J. ve Carrasquillo, R. L., 1992. Influence of Fly Ash on the Sulphate Resistance of Concrete, ACI Materials Journal, 89, 1, 69-75.
- Topçu, İ. B. ve Canbaz, M., 2004. Properties of Concrete Containing Waste Glass, Cement Concrete Research, 34, 267-274.
- Torres, S. M., Sharp, J. H., Swamy, R. N., Lynsdale, C. J. ve Huntley, S. A., 2003. Long Term Durability of Portland-Limestone Cement Mortars Exposed to Magnesium Sulfate Attack, Cement & Concrete Composites, 25, 947-954.
- TS 25, 1975. Tras, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1, 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-2, 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-6, 2002. Çimento Deney Metotları-Bölüm 6: İncelik Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2002. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Tuncel, Y., 2009. İkili Görüşme, Maliyet Kontrol Mühendisi, Çayeli Bakır İşletmeleri A.Ş., Madenli, Çayeli.
- Turanlı, L., Uzal, B. ve Bektaş, F., 2004. Effect of Material Characteristic on the Properties of Blended Cements Containing High Volumes of Natural Pozzolans, Cement and Concrete Research, 34, 12, 2277-2282.
- Türkel, S. ve Felekoğlu, B., 2004. Aşırı Dozda Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Taze ve Sertleşmiş Betonun Bazı Özellikleri Üzerine Etkileri, Fen ve Mühendislik Dergisi, 6, 1, 77-89.
- Ünal, E. ve Çakmakçı, G., 2000. Laboratory Evaluation of Cemented Backfill Materials for Mines, Geotechnical Testing Journal, 23, 4, 496-505.
- Yaşar, E., Erdoğan, Y. ve Kılıç, A., 2004. Effect of Limestone Aggregate Type and Water-Cement Ratio on Concrete Strength, Materials Letters, 58, 772-777.
- Yılmaz, E., 2003. Sülfid İçeren Maden Atıklarından Hazırlanan Çimentolu Macun Dolgu Örneklerinin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yılmaz, E., Kesimal, A. ve Erçikdi, B., 2003. Macun Dolgu Dayanımını ve Duraylılığını Etkileyen Faktörler, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 28, 2, 155-169.
- Yılmaz, E., Kesimal, A. ve Erçikdi, B., 2004. Asit Üreten Sülfidik Maden Atıklarının Macun Dolgu Olarak Değerlendirilmesi, İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi, 17, 1, 11-19.
- Yılmaz, E., El Aatar, O., Belem, T., Benzaazoua, M. ve Bussiere, B., 2006. Effect of Consolidation on the Performance of Cemented Paste Backfill, Underground Support'06, Quebec, Canada, 1-14.
- Yılmaz, E., Belem, T., Bussiere, B. ve Benzaazoua, M., 2008a. Consolidation Characteristics of Early Age Cemented Paste Backfill, Proceedings of the 61st Canadian Geotechnical Conference and the 9th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Edmonton, Canada, 797-804.
- Yılmaz, E., Belem, T., Benzaazoua, M. ve Bussiere, B., 2008b. Experimental Characterization of the Influence of Curing Under Stress on the Hydromechanical and Geotechnical Properties of Cemented Paste Backfill, Proceedings of the 15th International Conference on Tailings and Mine Waste, Colorado, USA, 139-152.
- Yılmaz, E., Benzaazoua, M., Belem, T. ve Bussiere, B., 2009. Effect of Curing Under Pressure on Compressive Strength Development of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 22, 9-10, 772-785.
- Yumlu, M., 2001. Backfill Practices at Çayeli Mine, Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET 2001, Ankara, 333-339.

- Yumlu, M. ve Güreşci, M., 2007. Paste Backfill Bulkhead Monitoring-A Case Study From Inmet's Cayeli Mine, 9th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 2007, Montreal, Canada, 8 p.
- Zivica, V. ve Bajza, A., 2001. Acidic Attack of Cement Based Materials - A Review: Part 1. Principle of Acidic Attack, Construction and Building Materials, 15, 8, 331-340.
- Zhou, Z., Scales, P. J. ve Boger, D. V., 2001. Chemical and Physical Control of the Rheology of Concentrated Metal Oxide Suspensions, Chemical Engineering Science, 56, 9, 2901-2920.
- Wickland, B. E. ve Wilson, G. W., 2005. Self-Weight Consolidation of Mixtures of Mine Waste Rock and Tailings, Canadian Geotechnical Journal, 42, 327-339.
- Xenidis, A., Mylona, E. ve Paspaliaris, I., 2002. Potential Use of Lignite Fly Ash for the Control of Acid Generation from Sulphidic Wastes, Waste Management, 22, 631-641.
- Xin-min, W., Xiong, L. J., Zheng, X. Z. ve Guo, X. W., 2004. Rheological Properties of Tailing Paste Slurry, Journal of Central South University of Technology, 11, 1, 75-79.

7. EKLER

Ek Tablo 1. Atık malzeme tane boyut dağılımı analizi sonuçları



MASTERSIZER

Results: Histogram Report

Sample Details

Sample ID: 1909-Atık Malzeme
 Sample File: (Result Not Saved)
 Sample Path: C:\SIZERSS\DATA\
 Sample Notes:

Run Number: 7

Measured:
 Analysed: Mon Oct 30 2006 12:27PM
 Result Source: Averaged

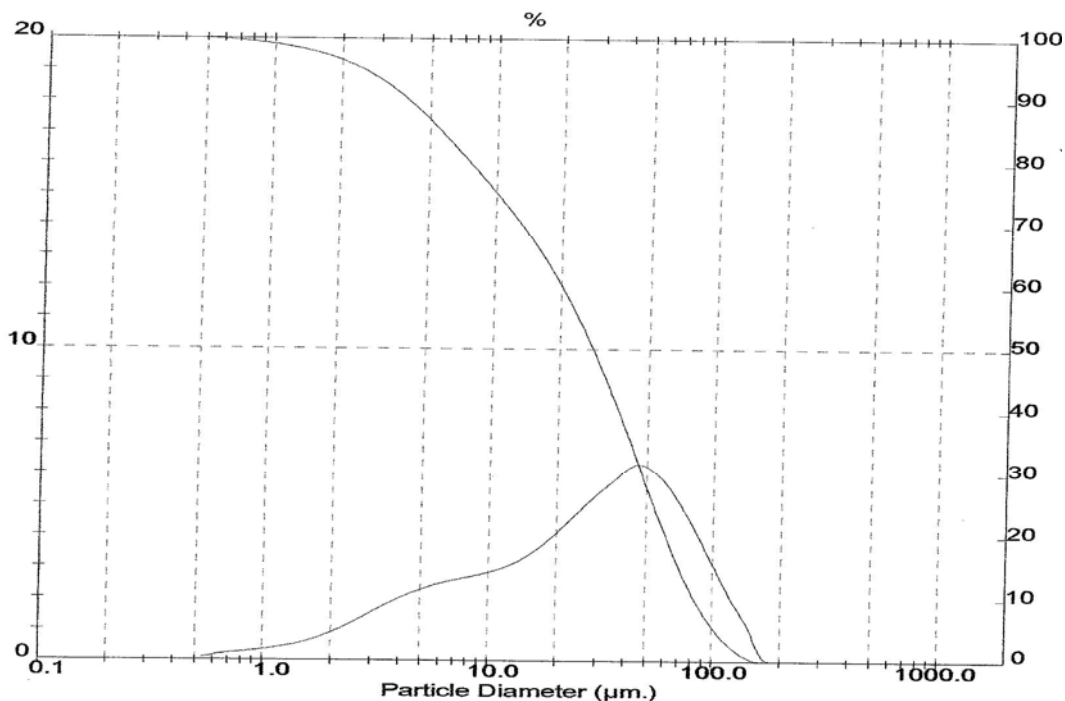
System Details

Range Lens: 300 mm Beam Length: 2.40 mm Sampler: Obscuration: 6.9 %
 Presentation: 3RHA [Particle R.I.= (1.4500, 0.1000); Dispersant R.I.= 1.0000] Residual: 0.297 %
 Analysis Model: Compressed Range
 Modifications: None

Result Statistics

Distribution Type: Vol Concentration = 0.0084 %Vol Density = 3.100 g / cub.cm Specific S.A. = 0.1927 sq. m/g
 Mean Diameters: D (v, 0.1) = 4.07 µm D (v, 0.5) = 28.53 µm D (v, 0.9) = 84.23 µm
 D [4, 3] = 37.21µm D [3, 2] = 10.04 µm Span = 2.810E+00 Uniformity = 8.835E-01

Size (µm)	Volume Over %	Size (µm)	Volume Over %	Size (µm)	Volume Over %	Size (µm)	Volume Over %
2.00	96.57	16.00	66.09	45.00	32.87	200.0	0.00
3.00	93.49	20.00	60.62	60.00	21.29	300.0	0.00
4.00	90.23	25.00	54.25	64.00	18.87	400.0	0.00
5.00	87.14	30.00	48.29	75.00	13.44	500.0	0.00
8.00	79.54	32.00	46.03	90.00	8.26	600.0	0.00
10.00	75.57	35.00	42.76	125.0	2.17	700.0	0.00
15.00	67.53	40.00	37.65	150.0	0.42	800.0	0.00



Ek Tablo 2. 7-360 günlük kür süresinde macun dolgu örneklerinin tek eksenli basınç dayanım testi sonuçları

Çimento tipi: CEM I 42,5

Kati Oranı: %77

Silindir numarası	Bağlayıcı oranı (%)	Kür süresi (gün)	Kati oranı (%)	Ağırlık (gr)	Çap (cm)	Uzunluk (cm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	5	7	77,0	3884,33	10,16	20,024	2,394	2222	0,274
2	5	7	77,0	3879,16	10,16	20,014	2,392	2340	0,289
3	5	7	77,0	3886,35	10,16	20,030	2,395	2460	0,304
								Ortalama	0,289
4	5	14	77,0	3839,63	10,16	19,820	2,391	4040	0,499
5	5	14	77,0	3844,50	10,16	19,848	2,390	4120	0,508
6	5	14	77,0	3837,18	10,16	19,822	2,389	4090	0,505
								Ortalama	0,504
7	5	28	77,0	3849,44	10,16	19,862	2,392	5915	0,730
8	5	28	77,0	3849,33	10,16	19,793	2,400	5892	0,727
9	5	28	77,0	3873,11	10,16	20,015	2,388	5522	0,681
								Ortalama	0,713
10	5	56	77,0	3806,35	10,16	19,610	2,395	6844	0,845
11	5	56	77,0	3808,16	10,16	19,632	2,394	6642	0,820
12	5	56	77,0	3817,52	10,16	19,748	2,386	6765	0,835
								Ortalama	0,833
13	5	90	77,0	3737,46	10,16	18,845	2,448	6386	0,788
14	5	90	77,0	3730,80	10,16	18,830	2,445	6128	0,756
15	5	90	77,0	3786,33	10,16	20,014	2,335	6079	0,750
								Ortalama	0,765
16	5	180	77,0	3668,96	10,16	19,684	2,300	6134	0,757
17	5	180	77,0	3680,29	10,16	19,770	2,297	6142	0,758
18	5	180	77,0	3736,51	10,16	20,000	2,306	5713	0,705
								Ortalama	0,740
19	5	270	77,0	3724,14	10,16	19,940	2,305	5551	0,685
20	5	270	77,0	3730,13	10,16	19,851	2,320	5648	0,697
21	5	270	77,0	3720,16	10,16	19,826	2,316	5867	0,724
								Ortalama	0,702
22	5	360	77,0	3675,90	10,16	19,857	2,285	5064	0,625
23	5	360	77,0	3805,68	10,16	19,990	2,350	4983	0,615
24	5	360	77,0	3747,10	10,16	19,997	2,313	5218	0,644
								Ortalama	0,628

Ek Tablo 2 (devam)

Çimento tipi: CEM II/A 42,5									
Kati Oranı: %77									
Silindir numarası	Bağlayıcı oranı (%)	Kür süresi (gün)	Kati oranı (%)	Ağırlık (gr)	Çap (cm)	Uzunluk (cm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	5	7	77,0	3827,75	10,16	19,880	2,376	1908	0,236
2	5	7	77,0	3814,20	10,16	19,760	2,382	1780	0,220
3	5	7	77,0	3805,33	10,16	19,744	2,379	1920	0,237
								Ortalama	0,231
4	5	14	77,0	3789,07	10,16	19,731	2,370	3760	0,464
5	5	14	77,0	3790,01	10,16	19,730	2,371	3804	0,469
6	5	14	77,0	3780,04	10,16	19,694	2,369	3640	0,449
								Ortalama	0,461
7	5	28	77,0	3830,28	10,16	19,725	2,397	5084	0,627
8	5	28	77,0	3827,38	10,16	19,717	2,396	4860	0,600
9	5	28	77,0	3864,22	10,16	19,946	2,391	4927	0,608
								Ortalama	0,612
10	5	56	77,0	3841,42	10,16	19,826	2,391	5430	0,670
11	5	56	77,0	3878,88	10,16	20,085	2,383	5149	0,635
12	5	56	77,0	3839,51	10,16	19,824	2,390	5486	0,677
								Ortalama	0,661
13	5	90	77,0	3783,4	10,16	19,907	2,346	4670	0,576
14	5	90	77,0	3783,2	10,16	19,876	2,349	5372	0,663
15	5	90	77,0	3818,10	10,16	20,020	2,354	5230	0,645
								Ortalama	0,628
16	5	180	77,0	3758,00	10,16	20,029	2,316	4740	0,585
17	5	180	77,0	3730,06	10,16	19,962	2,306	5032	0,621
18	5	180	77,0	3763,80	10,16	19,980	2,325	4692	0,579
								Ortalama	0,595
19	5	270	77,0	3748,48	10,16	19,917	2,323	4935	0,609
20	5	270	77,0	3735,67	10,16	19,910	2,316	4368	0,539
21	5	270	77,0	3730,21	10,16	19,902	2,313	4797	0,592
								Ortalama	0,580
22	5	360	77,0	3820,67	10,16	20,004	2,357	4716	0,582
23	5	360	77,0	3818,53	10,16	19,903	2,368	4489	0,554
24	5	360	77,0	3836,95	10,16	19,968	2,371	4457	0,550
								Ortalama	0,562

Ek Tablo 2 (devam)

Çimento tipi: Kati Oranı:		PC 42,5 (%50) + SDC 32,5 (%50) %77							
Silindir numarası	Bağlayıcı oranı (%)	Kür süresi (gün)	Kati oranı (%)	Ağırlık (gr)	Çap (cm)	Uzunluk (cm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	5	7	77,0	3846,95	10,16	20,125	2,359	2166	0,267
2	5	7	77,0	3830,14	10,16	20,004	2,363	2040	0,252
3	5	7	77,0	3810,20	10,16	19,924	2,360	2354	0,291
								Ortalama	0,270
4	5	14	77,0	3784,66	10,16	19,700	2,371	3749	0,463
5	5	14	77,0	3814,54	10,16	19,820	2,375	3664	0,452
6	5	14	77,0	3799,42	10,16	19,784	2,370	3918	0,484
								Ortalama	0,466
7	5	28	77,0	3820,47	10,16	20,012	2,356	4715	0,582
8	5	28	77,0	3851,36	10,16	20,085	2,366	4300	0,531
9	5	28	77,0	3836,18	10,16	20,046	2,362	4540	0,560
								Ortalama	0,558
10	5	56	77,0	3841,68	10,16	20,135	2,355	5769	0,712
11	5	56	77,0	3827,92	10,16	20,067	2,354	5623	0,694
12	5	56	77,0	3834,27	10,16	20,094	2,355	5890	0,727
								Ortalama	0,711
13	5	90	77,0	3809,06	10,16	19,984	2,352	6173	0,762
14	5	90	77,0	3818,12	10,16	20,079	2,347	5791	0,715
15	5	90	77,0	3804,19	10,16	19,960	2,352	6048	0,746
								Ortalama	0,741
16	5	180	77,0	3760,60	10,16	19,952	2,326	6539	0,807
17	5	180	77,0	3781,16	10,16	19,994	2,334	6547	0,808
18	5	180	77,0	3772,87	10,16	19,968	2,332	5923	0,731
								Ortalama	0,782
19	5	270	77,0	3780,50	10,16	19,816	2,354	7464	0,921
20	5	270	77,0	3778,92	10,16	20,095	2,321	5499	0,679
21	5	270	77,0	3774,38	10,16	19,802	2,352	6376	0,787
								Ortalama	0,796
22	5	360	77,0	3797,70	10,16	19,921	2,353	8474	1,046
23	5	360	77,0	3799,20	10,16	20,015	2,343	7306	0,902
24	5	360	77,0	3783,26	10,16	19,945	2,341	7156	0,883
								Ortalama	0,944

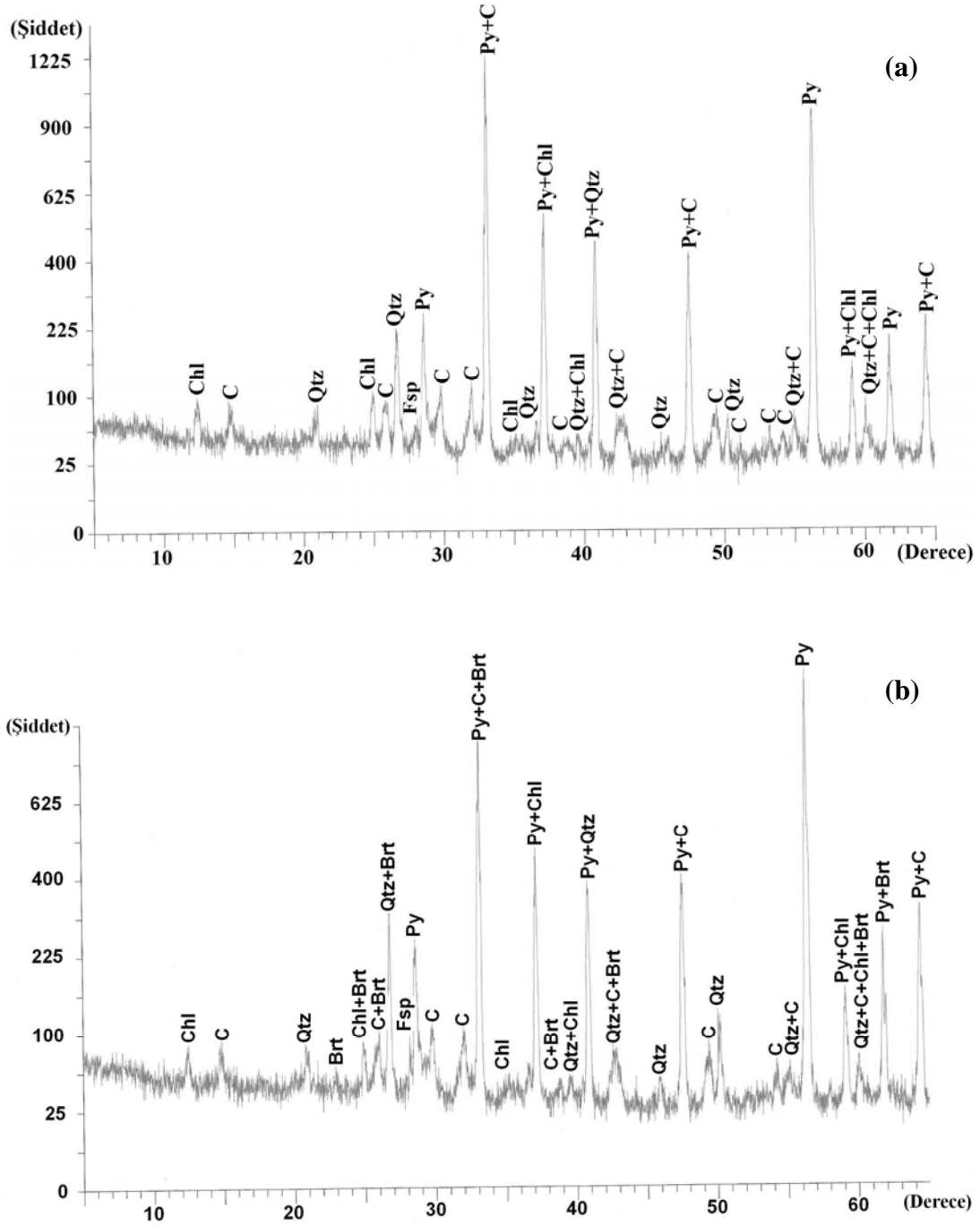
Ek Tablo 2 (devam)

Çimento tipi: Kati Oranı:		SDÇ 32,5 (%100) %77							
Silindir numarası	Bağlayıcı oranı (%)	Kür süresi (gün)	Kati oranı (%)	Ağırlık (gr)	Çap (cm)	Uzunluk (cm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	5	7	77,0	3810,38	10,16	19,738	2,382	1661	0,205
2	5	7	77,0	3790,16	10,16	19,640	2,382	1740	0,215
3	5	7	77,0	3836,45	10,16	19,814	2,390	1688	0,208
								Ortalama	0,209
4	5	14	77,0	3821,77	10,16	19,823	2,379	2828	0,349
5	5	14	77,0	3850,40	10,16	19,914	2,386	2910	0,359
6	5	14	77,0	3840,12	10,16	19,820	2,391	3018	0,373
								Ortalama	0,360
7	5	28	77,0	3862,33	10,16	20,075	2,374	4053	0,500
8	5	28	77,0	3871,60	10,16	20,128	2,374	3896	0,481
9	5	28	77,0	3868,48	10,16	20,056	2,380	3960	0,489
								Ortalama	0,490
10	5	56	77,0	3849,31	10,16	20,079	2,366	5062	0,625
11	5	56	77,0	3832,70	10,16	19,986	2,367	5376	0,664
12	5	56	77,0	3818,44	10,16	19,846	2,375	5184	0,640
								Ortalama	0,643
13	5	90	77,0	3825,74	10,16	20,148	2,343	6049	0,747
14	5	90	77,0	3807,56	10,16	20,025	2,347	5365	0,662
15	5	90	77,0	3810,46	10,16	20,110	2,338	5860	0,723
								Ortalama	0,711
16	5	180	77,0	3761,60	10,16	19,955	2,326	6231	0,769
17	5	180	77,0	3758,54	10,16	19,890	2,332	5818	0,718
18	5	180	77,0	3769,28	10,16	19,920	2,335	6110	0,754
								Ortalama	0,747
19	5	270	77,0	3776,37	10,16	19,919	2,340	6004	0,741
20	5	270	77,0	3776,78	10,16	19,934	2,338	6689	0,826
21	5	270	77,0	3764,82	10,16	19,824	2,344	6318	0,780
								Ortalama	0,782
22	5	360	77,0	3794,14	10,16	19,974	2,344	7138	0,881
23	5	360	77,0	3786,01	10,16	19,904	2,347	7890	0,974
24	5	360	77,0	3780,26	10,16	19,892	2,345	7702	0,955
								Ortalama	0,935

Ek Tablo 3. Farklı bağlayıcılarla hazırlanan macun dolgu numunelerinin XRD analiz sonucu

Bağlayıcı	Silikat	Formül	Sülfid/ Sülfat	Formül	Hidratasyon ürünü	Formül
CEM I 42,5	Kaolinit Kuvars Sanidin İllit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ SiO_2 $(K,Na)AlSi_3O_8$ $(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	Pirit	FeS_2	Alçıtaşı Portlandit	$CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$ $Ca(OH)_2$
SDÇ 32,5	Klorit Kuvars Feldispat	$(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ SiO_2 $(K,Na)AlSi_3O_8$	Pirit	FeS_2	Paris plasteri	$2CaSO_4 \cdot H_2O$
CEM I 42,5- SDÇ 32,5	Klorit Kuvars	$(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ SiO_2	Pirit	FeS_2	Paris plasteri	$2CaSO_4 \cdot H_2O$
CEM II/A 42,5 (%5)	Klorit Feldispat	$(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ $(K,Na)AlSi_3O_8$	Pirit	FeS_2	Paris plasteri Barit	$2CaSO_4 \cdot H_2O$ $BaSO_4$
CEM II/A 42,5 (%7)	Klorit	$(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	Pirit	FeS_2	Paris plasteri	$2CaSO_4 \cdot H_2O$

Puzolan Tipi ve İkame Oran	Silikat	Formül	Sülfid/ Sülfat	Formül	Hidratasyon ürünü	Formül
%20 AT	Kaolinit Kuvars Feldispat	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ SiO_2 $(K,Na)AlSi_3O_8$	Pirit	FeS_2	Alçıtaşı Portlandit	$CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$ $Ca(OH)_2$
%20 KP	Kuvars Kaolinit İllit	SiO_2 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	Pirit	FeS_2	Alçıtaşı Portlandit Paris plasteri	$CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$ $Ca(OH)_2$ $2CaSO_4 \cdot H_2O$
%20 FT	Kaolinit Kuvars Feldispat	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ SiO_2 $(K,Na)AlSi_3O_8$	Pirit	FeS_2	Alçıtaşı Paris plasteri	$CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$ $2CaSO_4 \cdot H_2O$
%20 YFC	Kuvars Klorit	SiO_2 $(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	Pirit	FeS_2	Paris plasteri	$2CaSO_4 \cdot H_2O$
%20 ACM	Kuvars Feldispat	SiO_2 $(K,Na)AlSi_3O_8$	Pirit	FeS_2	Paris plasteri	$2CaSO_4 \cdot H_2O$
%20 UK	Kuvars Feldispat Klorit	SiO_2 $(K,Na)AlSi_3O_8$ $(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	Pirit	FeS_2	Paris plasteri Barit	$2CaSO_4 \cdot H_2O$ $BaSO_4$
%10 SD	Klorit	$(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	Pirit	FeS_2	Paris plasteri	$2CaSO_4 \cdot H_2O$



Ek-Şekil 1. SDÇ 32.5 ve CEM I 42.5 yerine %20 oranında UK ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinin XRD profili (Py: Pirit; Qtz: Kuvars; Chl: Klorit; C: Paris plasteri; Fsp: Feldispat; Jrs: Jarosit; Brt: Barit)

ÖZGEÇMİŞ

Bayram ERÇIKDI, 15.11.1980 tarihinde Denizli'nin Acıpayam ilçesinde doğdu. 1990 yılında Benlik İlkokulu'ndan mezun oldu. Orta ve lise öğrenimini 1990-1996 yıllarında Acıpayam Lisesi'nde yaptı. 1996 yılında kazandığı İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği bölümünden 2000 yılında mezun oldu. Ekim 2001 tarihinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Araştırma Görevliliği sınavını kazanarak çalışmaya başladı. 2004 yılında yüksek lisansını tamamlayarak aynı anabilim dalında doktora öğrenimine başladı. 2005 yılında Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı.

Bayram ERÇIKDI, halen KTÜ Mühendislik Fakültesi bünyesinde Öğretim Görevlisi olarak görevine devam etmektedir. İyi derecede İngilizcesi olup evli ve bir çocuk babasıdır.