

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MERMER VE TUĞLA ATIKLARININ MACUN DOLGUDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisi Gökhan KÜLEKÇİ

HAZİRAN 2013
TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MERMER VE TUĞLA ATIKLARININ MACUN DOLGUDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Maden Mühendisi Gökhan KÜLEKÇİ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"MADEN YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22.05.2013
Tezin Savunma Tarihi : 13.06.2013**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇİKDI

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalında

Gökhan KÜLEKÇİ tarafından hazırlanan

**MERMER VE TUĞLA ATIKLARININ MACUN DOLGUDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28 / 05 / 2013 gün ve 1506 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL


.....

Üye : Doç. Dr. Emel ABDİOĞLU


.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇİKDI


.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Mermer ve Tuğla Atıklarının Macun Dolguda Kullanılabilirliğinin Araştırılması” isimli bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda “yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez konusunun belirlenmesinden çalışmaların yürütülmesi ve sonuçlandırılmasına kadar her aşamasında bilgi, deneyim, destek ve görüşlerinden yararlandığım danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI’ ya...

Çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen babam Serdar KÜLEKÇİ’ye...

Üfkümü genişleten hocalarım Prof. Dr Ayhan KESİMAL, Yrd. Doç. Dr Ferdi CİHANGİR ve Arş. Gör. Kadir KARAMAN’a ...

Çalışma boyunca bana yardım eden Arş. Gör. Tekin YILMAZ’a ve Arş. Gör. Şener ALİYAZICIOĞLU’na...

Çalışmalarım süresince engin bilgi ve birikimini benimle paylaşan Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇAVUŞOĞLU’na...

Öğrenim süresince üzüntü ve sevinçlerimi paylaşan, her an yanımda olan ailemin bütün üyelerine ve nişanlım Jeoloji Müh. Elif YILMAZ’a...

Teşekkürü bir borç bilirim...

Gökhan KÜLEKÇİ

Trabzon 2013

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Mermer ve Tuğla Atıklarının Macun Dolguda Kullanılabilirliğinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı ve yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim 22/05/2013.

Gökhan KÜLEKÇİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Madencilikte Dolgu Teknolojisi	3
1.2.1. Macun Dolguda Uygun Fiziki ve Kimyasal Şartların Sağlanması İçin Gerekli Tasarım ve Çimento Kullanımı.....	6
1.2.2. Dolguda Bulunan Sülfürlü Atıkların Portland Çimentosu Üzerindeki Etkisi.....	7
1.3. Dolguda Kullanılan Bağlayıcılar	9
1.3.1. Portland Çimentosu	12
1.3.2. Sülfata Dayanıklı Çimento (SDÇ)	13
1.3.3. Puzolanik Malzemeler	14
1.3.3.1. Doğal Puzolanlar.....	18
1.3.3.2. Yapay Puzolanlar	20
1.4. Mermer ve Tuğla Atıklarının Puzolan Olarak Kullanımı	21
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
2.1. Giriş	26
2.2. Atık Malzeme.....	27
2.3. Bağlayıcı Malzeme	30
2.3.1. Çimento	31
2.3.2. Mermer Atığı	32
2.3.3. Tuğla Atığı (Pişmiş Kil).....	34
2.4. Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması	36

2.5.	Tek Eksenli Basınç Dayanımı ve Deformasyon Testleri.....	37
2.6.	pH Analizleri	38
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	40
3.1.	Macun Dolgunun Dayanımının Değerlendirilmesi.....	40
3.1.1.	Öğütülmüş Mermer Atığının İkame Olarak Kullanılması	41
3.1.2.	Öğütülmüş Tuğla Atığının İkame Olarak Kullanılması.....	43
3.1.3.	Öğütülmüş Mermer Atığının İlave Olarak Kullanılması	46
3.1.4.	Öğütülmüş Tuğla Atığının İlave Olarak Kullanılması	51
3.1.5.	Öğütülmüş Mermer ve Tuğla Atıklarının İlave Olarak Kullanılması	55
4.	SONUÇLAR	57
5.	ÖNERİLER	58
6.	KAYNAKLAR	59
7.	EKLER	70
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MERMER VE TUĞLA ATIKLARININ MACUN DOLGUDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Gökhan KÜLEKÇİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI
2013, 69 Sayfa, 3 Sayfa Ek

Bu çalışmada Portland çimentosu yerine belirli oranlarda ikame ve ilave olarak öğütülmüş mermer ve tuğla atıkları kullanımının sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan macun dolgunun dayanım ve duraylılık özelliklerine etkisi incelenmiştir. 7-180 günlük kür süreleri sonunda, farklı karışım özelliklerinde hazırlanan macun dolgu numuneleri tek eksenli basınç testine tabi tutulmuştur. Uzun dönemde macun dolgu numunelerinde görülen duraylılık kaybını anlamak için atık içerisindeki piritin oksidasyonundan kaynaklanan asit oluşumu kür süresine bağlı olarak takip edilmiştir. Elde edilen dayanım ve duraylılık sonuçları, kullanılan katkıların (mermer ve tuğla) fiziksel, kimyasal, mineralojik ve puzolanik özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. Portland çimentosu yerine ağırlıkça %15-30-45 oranında puzolanik özelliğe sahip öğütülmüş tuğla atığı kullanımının macun dolgunun dayanım ve duraylılığını artırdığı görülmüştür. Macun dolguda bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosuna ilave olarak %10 ve %30 oranında öğütülmüş mermer ve %15, %45 tuğla atığı kullanımı macun dolgu numunelerinin dayanımında kontrol numunelerine göre %15-265 oranında artış sağlamıştır. Ayrıca öğütülmüş mermer atığı kullanımının kontrol numunesine kıyasla macun dolgunun uzun dönem nötralizasyon potansiyelini artırdığı görülmüştür. Kısa ve uzun dönemli testlerden Portland çimentosuna ilave olarak %25 oranında öğütülmüş mermer atığı ve %25 oranında öğütülmüş tuğla atığının birlikte kullanımının macun dolgu dayanım ve duraylılığı üzerinde pozitif bir etki yaptığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Macun Dolgu, Pirit Atıklar, Tuğla Atığı, Mermer Atığı, Puzolanik Aktivite, Atık Bertarafı

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE UTILITY OF THE WASTE BRICK AND MARBLE ON THE PASTE BACKFILL

Gökhan KÜLEKÇİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Dr Bayram ERÇIKDI
2013, 69 Pages, 3 Pages Appendixes

In this study, effect of usage of grinded waste marble and brick as replacement and additive at a given rate instead of Portland cement on the strength and stability properties of paste backfill prepared from tailings having high sulphur content was investigated. At the end of 7-180 days of curing period, paste backfill samples produced at different mixture properties were subjected to unconfined compressive strength test. To ascertain the loss of stability in the paste backfill samples at long-term, acid formation based on pyrite oxidation in tailings was monitored depending on curing period. The results of strength and stability obtained were associated with physical, chemical, mineralogical and pozzolanic properties of additives (marble and brick) used. It was observed that usage of grinded brick dust having pozzolanic character at 15% by weight instead of Portland cement increase the strength and stability of paste backfill. Usage of grinded marble and brick powders at the rates of 15 and 45% in addition to Portland cement used as a binder in paste backfill provided an increase of 15-65% on the strength of paste backfill. It was also seen that usage of grinded marble dust powders increased the neutralization potential of paste backfill on the long-term by comparison control sample. From the short and long-term tests, it was observed that usages of grinded marble dust at the rate of 25% and grinded brick dust at the rate of 25% in addition to Portland cement made a positive impact on the strength and stability of paste backfill.

Key words: Paste backfill, Pyrite tailings, Waste brick, Waste marble, Pozzolanic activity, Waste disposal

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Macun dolgu	4
Şekil 2. Portland çimentosu	12
Şekil 3. Derinlerde oluşan kristal yapı ve yüzeyde oluşan amorf yapı	19
Şekil 4. Diatomların elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri	20
Şekil 5. Ocaklardan açığa çıkan mermer atıkları	22
Şekil 6. Mermer atıkları	23
Şekil 7. Atık malzemelerin cevher hazırlama tesis çıkışından ve atık barajından alınması ve varillere doldurulması	28
Şekil 8. Deneysel çalışmalarda kullanılan atık malzemenin tane boyut dağılımı	29
Şekil 9. Gümüşhane ve Bayburt mermer atığı	32
Şekil 10. Trabzon- Araklı ve Çorum tuğla atıkları	34
Şekil 11. Hazırlanmış drenaj masasında bekletilen numuneler.....	36
Şekil 12. Kaplanan ve kür odasına konulan numuneler	37
Şekil 13. Numunelerin tek eksenli basınç ünitesinde kırılması	38
Şekil 14. Numunelerin nem ve pH tayinlerinin yapılması	39
Şekil 15. Portland çimentosu ile hazırlanan kontrol numunelerinin dayanımı	40
Şekil 16. İkame olarak katılan farklı mermer atıklarının tek eksenli basınç dayanımı	41
Şekil 17. İkame Bayburt mermer atığının tek eksenli basınç dayanımı	42
Şekil 18. İkame Gümüşhane mermer atığının tek eksenli basınç dayanımı	43
Şekil 19. İkame olarak katılan farklı tuğla atığının tek eksenli basınç dayanımı.....	44
Şekil 20. İkame Çorum tuğla atığının tek eksenli basınç dayanımı	45
Şekil 21. Araklı tuğla atığının tek eksenli basınç dayanımı	46
Şekil 22. İlave edilen mermer tipinin basınç dayanımına etkisi	47
Şekil 23. İlave Gümüşhane mermer atığının basınç dayanımına etkisi	48
Şekil 24. İlave Bayburt mermer atığının basınç dayanımına etkisi.....	49
Şekil 25. İlave edilen Gümüşhane ve Bayburt mermer atığının pH üzerindeki etkisi	49
Şekil 26. İlave edilen Gümüşhane mermer atığının pH üzerindeki etkisi	50
Şekil 27. İlave edilen Bayburt mermer atığının pH üzerindeki etkisi	51
Şekil 28. İlave edilen tuğla tipinin basınç dayanımına etkisi	51

Şekil 29. İlave Araklı tuğla atığının basınç dayanımına etkisi	52
Şekil 30. İlave Çorum tuğla atığının basınç dayanımına etkisi.....	53
Şekil 31. İlave edilen Araklı tuğla atığı pH üzerindeki etkisi	54
Şekil 32. İlave edilen Çorum tuğla atığının pH üzerindeki etkisi	54
Şekil 33. İlave edilen tuğla atıklarının pH üzerindeki etkisi	55
Şekil 34. İlave Gümüşhane mermer ve Araklı tuğla atığının basınç dayanımına etkisi ..	56
Şekil 35. İlave edilen Araklı tuğla ve Gümüşhane mermer atığının pH üzerindeki etkisi	56

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Dolgu tipleri ve özellikleri	4
Tablo 2. Macun dolguda kullanılan bağlayıcılar	11
Tablo 3. Mineralojik ikame ve katkıların kökenlerine göre sınıflandırılması	16
Tablo 4. Mermer ve tuğla atıklarının ikame puzolan olarak kullanımına yönelik deneysel tasarım	27
Tablo 5. Mermer ve tuğla atıklarının ilave puzolan olarak kullanımına yönelik deneysel tasarım.....	27
Tablo 6. Atık malzemenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri	30
Tablo 7. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri	31
Tablo 8. Mermer atıklarının kimyasal, fiziksel ve mineralojik bileşimi	33
Tablo 9. Araklı ve Çorum tuğlanın fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri	35

SEMBOLLER DİZİNİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
AT	: Araklı tuğla atığı
BM	: Bayburt mermer atığı
CEM II 42,5 R	: Portland Kompoze Çimento
CH	: Portlandit
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat
C_u	: Üniformluk Katsayısı
C_c	: Eğrilik Katsayısı
ÇT	: Çorum tuğla atığı
GM	: Gümüşhane mermer atığı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TCMA	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
UCS	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son yıllarda puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddelerinin çimento yerine belirli oranlarda kullanımı; çimentolu karışımların (dolgu, beton vb.) porozite ve geçirgenliğinin azaltılması, alkali-silika ve asit-sülfat etkisi nedeniyle oluşan durabilite kaybının engellenmesi ve çimento tüketimi/işletme maliyetlerinin azaltılması bakımından önem kazanmıştır. Puzolanların kullanılabilirliğini belirleyen en önemli etken, yakın mesafede yeterli miktarda bulunması ve ekonomik bir şekilde temin edilebilmesidir. Yeraltı madenciliğinde madeni alınmış boşlukların doldurulması ve tahkimat amacıyla çimentolu macun dolgu kullanımı özellikle Kanada ve Avustralya yeraltı madenciliğinde çok yaygındır. Hidrolik ve kaya dolgusuna kıyasla düşük işletme maliyeti ve cevher zenginleştirme atıklarının %65-70'inin yeraltında depolanabilir olması çimentolu macun dolgu yöntemini çevresel açıdan avantajlı kılmaktadır. Ülkemizde 2000 yılından beri Çayeli Bakır İşletmesi'nde uygulanmakta olan macun dolgu yöntemi, 2013 yılında İzmir Efemçukuru altın madeninde kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca Kastamonu Küre Etibakır madeninde macun dolgu uygulamasına yönelik yasal ve teknik altyapı çalışmaları devam etmektedir.

Çimentolu macun dolgu susuzlandırılmış tesis atıkları, su ve bağlayıcı karışımından oluşmaktadır. Dolgunun dayanım kazanımını sağlaması için, macun dolguya ağırlıkça %3-9 oranında bağlayıcı ilave edilmektedir. Bağlayıcı olarak genellikle Portland çimentosu kullanılmakta ve bağlayıcı, dolgu işletme maliyetlerinin yaklaşık %50-75'ini teşkil etmektedir. Portland çimentosu gibi kalsiyumca zengin bağlayıcıların özellikle sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan dolgunun uzun dönem duraylılığını koruyamadığı belirtilmekte ve bunu engelleyici çözümler aranmaktadır. Beton endüstrisinde asit ve sülfat atık olarak adlandırılan bu problemin çözümünde en etkili yöntemin puzolanik özelliğe sahip mineral katkı malzemelerinin (mermer ve tuğla atığı, metakaolen, diatomit, yüksek fırın cürufu vb.) kullanımı olduğu belirtilmektedir. Çimento giderlerinin dolgu işletme giderlerinin önemli bir kısmını teşkil ettiği göz önüne alındığında, puzolanik özelliğe sahip katkı maddelerinin dolguda kullanılması asit ve sülfat atak olarak adlandırılan problemin çözümünde etkin rol oynayacak ve aynı zamanda çimento tüketimini ve tesis işletme

giderlerini önemli ölçüde azaltacaktır. Mermer ve tuğla atıklarının puzolan olarak betonda kullanımının oldukça yaygın olmasına karşın macun dolguda kullanıldığına yönelik literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Ülkemizde bol miktarda bulunan ve kolayca temin edilebilecek mermer ve tuğla atıklarının sülfürce zengin atıklardan üretilen dolguda Portland çimentosu yerine belirli oranlarda kullanımı hem yerüstü atık (mermer ve tuğla) depolama problemlerini ortadan kaldıracak hem de dolgunun dayanım ve duraylılığını olumlu yönde etkileyecektir.

Yeraltı ve özellikle de açık ocak madenciliği gerek işletme faaliyetleri, gerekse maden tesis atıklarının depolanmasına yönelik yeryüzünde çok büyük alanlar gerektirebilmektedir. Özellikle cevher zenginleştirme tesis atıklarının zararlı bileşenler (sülfürlü mineraller-ağır metaller) içerdiği durumlarda çevresel problemlere yol açmaması için depolanmaları hayati önem arz etmektedir. Madencilik faaliyetleri sonucu açığa çıkan atıklar bazı durumlarda canlıların sürekli olarak etkileşim içerisinde olduğu akarsu ve göllere deşarj edilmekte, atık baraj ve havuzları ile deniz dibi, vb. yerlere depolanmaktadır. Cevherlerin zenginleştirildiği tesislerden çıkan sülfürlü atıklar, su ve oksijen varlığında oksitlenerek çevresel açıdan zararlı asidik maden suyu (AMD) oluşumuna neden olmaktadır. Oluşan asidik maden suları yeraltı ve yerüstü suları ile içme suyunun kirlenmesi, kara ve sularda yaşayan canlıların zarar görmesi, tarım ve orman arazilerinin elverişsiz duruma gelmesi gibi geri dönüşü olmayan birçok probleme yol açabilmektedir. Bu tür atıkların yeryüzünde depolanması durumunda, canlıların sürekli temas halinde olduğu ekolojik ortamların madencilik işlemleri bittikten sonra tekrar doğaya kazandırılması çok büyük rehabilitasyon maliyetlerini beraberinde getirmektedir.

Pirit içeren atıklardan normal çimento kullanılarak hazırlanan macun dolguda, piritin oksidasyonu sonucu asit ve sülfat etkileri nedeniyle dayanım ve durabilite problemleri meydana gelmektedir. Ayrıca çimento üretimi yüksek enerji gerektiren pahalı bir işlemdir. Çimento üreticileri daha uygun koşullarda çimento üretmek ve maden işletmecileri daha ekonomik koşullarda dolgu uygulamaları yapmak için bağlayıcı madde sistemleri üzerinde sürekli olarak araştırmalar yapmaktadırlar.

1.1.1. Tezin Amacı

Pirit içeriği yüksek atıklardan normal Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan macun dolguda, piritin oksidasyonu sonucu asit ve sülfat etkileri nedeniyle dayanım ve

durabilite problemleri meydana gelmektedir. Mermer ve tuğla atıklarının puzolan olarak asit ve sülfat etkisine karşı duraylı olduğu ve betonda kullanıldığına, ancak macun dolguda çimento yerine belirli oranlarda kullanıldığına dair literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu tez çalışması ile dolguda dayanım ve durabilite problemlerinin engellenmesi hedeflenmektedir. Bu tez çalışması; giderek yaygınlaşmakta olan macun dolgu teknolojisi alanında ileride yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı ve yerüstünde depolanmaları nedeniyle çevresel problemlere yol açan mermer ve tuğla atıkları için alternatif bir kullanım alanı oluşturarak ülke ekonomisine katkıda bulunması hedeflenmektedir.

1.2. Macun Dolgu Teknolojisi

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. Yeraltı madenciliğinde dolgu uygulaması gerek yeraltı faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yapılması gerekse yerüstünde oluşabilecek çökmeleri engelleme açısından önemlidir. Dolgunun cevheri alınmış bölgelere yerleştirilmesi genellikle karışım içerisine bir miktar bağlayıcı ve karışım suyu ilave edilerek gerçekleştirilmektedir. Dolgu malzemesi olarak genellikle cevher zenginleştirme atıkları, kum, taşocaklarından patlatma sonucu elde edilen iri kayaç parçaları ve kırılmış agrega kullanılmaktadır. Yeraltı maden sahalarında yaygın olarak kaya dolgu, hidrolik dolgu ve son yıllarda önemi giderek artan macun dolgu yöntemi kullanılmaktadır (Amaratunga ve Hein 1997; Benzaazoua vd., 2002; Yılmaz, 2003). Yeraltında kullanılan bu dolguların benzer ve farklı birçok özelliği vardır. Bu özelliklerin bir kısmı Tablo 1’de verilmiştir.

Yeraltı madencilik faaliyetleri sonucu çıkan tesis atıklarının yeraltında macun dolgu şeklinde depolanması, gerek dünyada gerekse ülkemizde son yıllarda büyük önem kazanmıştır.

Macun dolgu, sınıflandırılmamış tesis atıkları, su ve bağlayıcı (yalnızca çimento ve/veya belli oranda çimento + diğer tras, silis dumanı, cüruf ve uçucu kül gibi puzolanik malzemeler) karışımından üretilir (Şekil 1). Karışım, “macun” özelliğinden dolayı kolayca pompalanabilir ve malzeme Newtoniyen dışı davranış gösterir (Brackebusch, 1994; Amaratunga ve Hein, 1997).

Tablo 1. Dolgu tipleri ve özellikleri (Henderson vd., 1997)

Özellikler	Kaya Dolgu	Hidrolik Dolgu	Macun Dolgu
Katı oranı	% 100	% 60-75	% 75-85
Bağlayıcı	çimentolu veya çimentosuz	çimentolu veya çimentosuz	yalnızca çimentolu
Su/çimento oranı	w/c oranı düşük, bağlayıcı dayanımı yüksek	w/c oranı yüksek, bağlayıcı dayanımı düşük	w/c oranı düşük, bağlayıcı dayanımı yüksek
Barikat	gerekli değil	Pahalı	ucuz
Nakliye	nakliye kuyusu ve mobil ekipmanlar	sondaj kuyusu ve boru hattı	sondaj kuyusu ve boru hattı
Tane boyu	>20cm	> 20 um (> % 90)	<20um(>% 15)
Yerleştirme hızı	100-400 ton/saat	100-200 ton/saat	50-200 ton/saat
İlk yatırım giderleri	yüksek	Düşük	yüksek
İşletme giderleri	yüksek	Orta	düşük
Avantajları	yüksek dayanım, malzeme temini kolay, su sorunu yok	malzeme temini kolay, sınıflandırılmış atıklar kullanılır, kullanımı yaygın	çimento tüketimi az tüm atıklar kullanılır, uygulanması kolay
Dezavantajları	yüksek nakliye giderleri, boşlukların yapısı, tesis atıkları kullanılamaz	dolgudan fazlalık suyun uzaklaştırılması, yüksek çimento tüketimine karşılık düşük dayanım,	ileri teknoloji gerektirir, (pompalama ve susuzlandırma işlemleri)

Macun dolguyu günümüzde avantajlı kılan en önemli özelliği, cevher zenginleştirme işlemleri sonucu açığa çıkan çevresel açıdan zararlı tesis atıklarının %65-70'inin yeraltında güvenli bir şekilde depolanabilmesi ve böylece yerüstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerinde önemli oranda azalma sağlamasıdır. Ayrıca dolgu malzemesi olarak kullanılan doğal kaynakların (agrega vb.) tüketilmesini engellemekte ve bu malzemelerin üretimi esnasında oluşacak çevresel problemleri ortadan kaldırmaktadır (Erçikdi, 2009).



Şekil 1. Macun dolgu

Macun dolgu yöntemi, diğer metotlara göre daha yenidir ve ilk olarak 1970'li yılların sonlarında Almanya'da Bad Grund Madeni'nde uygulanmıştır. Uygulamadan elde edilen başarılı sonuçlardan sonra dünyanın madencilik açısından gelişmiş ülkeleri olan Kanada ve Güney Afrika'da da macun dolgu sistemi uygulanmaya başlanmıştır. 1980'li yılların ortalarından itibaren ise Avustralya ve Tazmanya'da bulunan bazı yeraltı madenlerinde uygulanmaya başlamıştır (Grice, 1998). Ülkemizde 2000 yılından beri Çayeli Bakır İşletmesi'nde uygulanmakta olan macun dolgu yöntemi, 2012 yılında İzmir Efemçukuru altın madeninde, 2013 yılında da Kastamonu Küre Etibakır madeninde kullanılmaya başlanacaktır.

Dolgu yöntemleri içinde en popüler olanının, diğer dolgu yöntemlerine nazaran daha avantajlı olması ve çok yönlülüğünden dolayı çimentolu macun dolgu olduğu söylenilebilir. Macun dolgu metodu, dolgu malzemesi (kaya, atık vb.) için ön hazırlık gerektirmediğinden, madencilik sektörü için kaya dolgusu ve hidrolik dolguya göre daha ekonomik bir yöntemdir. Yöntemin avantajları; atıkların %65-70'inin yeraltında depolanabilir olması, yük taşıma özelliği sayesinde yüzeyde oluşabilecek sübsidans vb. hareketlerin azalması, üretim bölgelerinin duraylılığının sağlanması, emniyetli ve rahat çalışma ortamları sunması, topuktaki cevherin maksimum oranda kazanılması ile maden ömrünü artırması, işletme maliyetlerini azaltması, yeryüzünde atık depolama alanları gerektirmemesi, potansiyel çevresel problemleri minimum kılarak rehabilitasyon maliyetlerini düşürmesi, sonuçta da çevreye duyarlı ve sürdürülebilir madencilik faaliyetlerini mümkün kılması olarak sıralanabilir (Hassani ve Bois, 1992; Benzaazoua vd., 1999a; Le Roux vd., 2005). Bu bakımdan macun dolgu yöntemi, son yıllarda dünyanın birçok ülkesinde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır ve uygulama sahaları hızla artmaktadır.

Macun dolgunun avantajlarının yanında dezavantajları da vardır. Pirit içeren atıklardan normal çimento kullanılarak hazırlanan macun dolguda, piritin oksidasyonu sonucu asit ve sülfat etkileri nedeniyle dayanım ve durabilite problemleri meydana gelmektedir.

Macun dolgu işlemlerinde kullanılacak atıkların mineralojik özellikleri de, dolgu dayanımı ve duyarlılığı üzerinde önemli derecede etkili olan diğer bir husustur. Macun dolgu, karakteristik özellikleri itibari ile yerleştirildiği bölgede uzun süre ortalama %15-25 arasında nem tutmaktadır. Dolayısıyla boşluklu yapı nedeni ile özellikle atık malzemenin süfürlü mineraller içermesi durumunda, boşluklardaki oksijen ve su varlığında SO_4^{2-}

iyonları ve asit üretimi (H^+ ; H_2SO_4) oluşmakta, sonuçta dolgu ortamı agresifleşmektedir. Oksidasyon sonucu oluşan asit, hidrasyon ürünlerinin (C-S-H jeli) ayrışmasına ($pH \leq 9$) ve bağlayıcılık özelliklerini kaybetmelerine neden olmaktadır. Benzer şekilde oksidasyon sonucu oluşan sülfat, hidrasyon ürünleri olan Portlandit ($Ca(OH)_2$) ve trikalsiyumalüminat ($3CaO \cdot Al_2O_3$) ile reaksiyona girerek alçıtaşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ve etrenjit ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) mineralleri oluşturmaktadır. Genleşme özelliğine sahip bu mineraller dolgu içerisinde içsel gerilme çatlakları oluşturmakta ve dolguda dayanım ve durabilite problemlerine neden olmaktadır (Benzaazoua vd., 1999a; Hassani vd., 2001; Kesimal vd., 2004; Kesimal vd., 2005; Fall ve Benzaazoua., 2004; Ouellet vd., 2006; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2009a, b) Sülfür içeriğinin artmasıyla oksidasyon ürünlerinde de artış olmakta ve dolgu bünyesindeki bozulmalar artmaktadır. Ayrıca atık malzemelerdeki minerallerin boyut ve şekli, tane boyut dağılımı, mineral yüzey özellikleri ve kullanılan bağlayıcı tipine bağlı olarak dolgu özellikleri değişkenlik göstermektedir (Benzaazoua vd., 2002).

Atık bileşiminde sülfürlü minerallerinin miktarı ve kullanılan bağlayıcıların tipine bağlı olarak farklı dayanım sonuçları elde edilebilmektedir. Benzaazoua vd. (2002) yaptığı çalışmada, yüksek sülfür içeriğine sahip atıklar için uzun kür sürelerinde en iyi dayanım değerlerini sülfata dayanıklı Portland çimento içeren numunelerin verdiğini, yüksek fırın cürufu katkılı çimentonun ise sülfür içeriği orta ve düşük seviyede olan dolgu numunelerinde daha iyi dayanım sonuçları verdiğini ortaya koymuştur. Erçikdi (2009a) yaptığı çalışmada ise, yüksek sülfür içeriğine sahip atıklarda düşük bağlayıcı oranlarında (%5) normal Portland çimento kullanımının, kısa ve uzun dönem dayanım ve durabilite özellikleri açısından, macun dolgu uygulamalarında uygun olmadığını belirtmiştir. Ayrıca, yazar sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan dolguda bağlayıcı olarak %5 çimento oranında %50 Portland çimentosu + %50 SDÇ (sülfata dayanıklı çimento) kullanımını önermiştir. Dolayısıyla atık bileşimindeki sülfürlü mineral miktarı ve sülfürlü mineral içeren bu tür atıkların bağlayıcılar ile etkileşimi de farklıdır.

1.2.1. Macun Dolguda Uygun Fiziki ve Kimyasal Şartların Sağlanması İçin Gerekli Tasarım ve Çimento Kullanımı

Maden atıklarının değişken yapıda olması ve dünyanın her yerinde farklı özellik göstermesinden dolayı standart bağlayıcılar her zaman kullanılamaz. Kullanılsa bile

istenilen dayanım sağlanamaz. Çimentolu dolguda; dolgunun nihai dayanımını yeterli sürede elde etmesi ve dayanımı koruması bağlayıcının başarısını ölçmede ana parametreyi oluşturmaktadır (Thomas vd., 1979). Madencilik işlemleri sonucu üretilmiş farklı atıkların stabilizasyonu için kullanılan aynı miktardaki Portland çimentosu aynı mukavemet özelliğini göstermemektedir. Macun dolgu için istenen dayanım kriteri araştırmacılara göre farklılık arz etmektedir. Örneğin Hassani ve Bois, (1992) 0,24-4,3 MPa, Tariq (2012) ise 0,5-5 MPa önermişlerdir. Bu geniş farklılıklar ışığında, hedeflenen dayanımın var olması için tasarlanan macun dolgu karışımında toplam katı miktarının %3-8 oranında Portland çimentosu kullanılır. Grice (1998)'e göre; çoğu dolgu uygulamalarında makul bir basınç dayanımı elde etmek için %7 Portland çimentosu kullanılmalıdır. Portland çimentosunun böyle yüksek oranda kullanılması madencilik sektörüne ek mali yük getirmektedir.

Benzaazoua vd. (2004a)'e göre; bağlayıcının macun dolgu içindeki etkisi bağlayıcının kimyasal yapısına ve karışımındaki oranına bağlıdır. Farklı tipteki bağlayıcılar farklı atıklar ile beraber farklı dayanım sonuçları verirler. Bağlayıcı madde maliyeti macun dolgu işlemlerinde önemli olduğu için, bağlayıcı bileşimin optimizasyonu yapılmalı ve ekonomik fakat etkili bir bağlayıcı belirlenmelidir.

1.2.2. Dolguda Bulunan Sülfürlü Atıkların Portland Çimentosu Üzerindeki Etkisi

Sülfürlü atıkların kullanıldığı macun dolguda içsel sülfat atak etkisine ve bu etkiye bağlı olarak uzun sürede dayanım kaybına karşı, uzun bir süre standart Portland çimentosu kullanılmıştır. İçsel sülfat atak; karışımın içerisindeki aşırı miktardaki sülfürün sertleşmiş harç veya betona zarar vermesi şeklinde tanımlanır (Skalny vd., 2002).

Yapılan birçok çalışma (Benzaazoua vd., 1999 ve 2002; Hassani vd., 2001; Fall vd., 2005; Kesimal vd., 2005; Ouellet vd., 2006; Erçikdi vd., 2009b ve 2010a; Ouellet vd., 2006; De Souza vd., 1997), karışım suyu içindeki veya pritin oksidasyonu sonucu oluşan sülfatın, çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve kalsiyum iyonları (Ca^{+2}) ile reaksiyona girerek dayanımı düşüren Jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve etrenjit ($3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) oluşumuna yol açtığını göstermiştir. Araştırmacılar normal Portland çimentosunda oluşan sülfat atak etkisini doğrulamışlar ve matrix içinde ikincil jips oluşumları gözlemlemişlerdir. Bu ikincil jipsler şişme göstererek harçta çatlak

oluşumuna ve ilerleyen süreçte dayanımın düşmesine neden olmaktadır (Cohen ve Mather, 1991; Tian ve Cohen., 2000; Mehta, 1983).

Fall vd. (2005), macun dolguda yer alan sülfürün dayanım parametrelerine önemli etkisi olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu etki sülfür içeriği, kür süresi, çimentonun yapısı ve miktarı ile ilişkilidir. Bellmann vd. (2006), betonlarda sülfat çözeltisi konsantrasyonunun jips oluşumuna etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak Portlandit çimentosunun jips yapısını oluşturabilmesi için sülfat konsantrasyonunun yaklaşık 1400 ppm ($\text{pH} \sim 12,5$) olması gerekmektedir. Portland çimentosu sınıflandırılmış atıklarda stabilizasyon sürecinde tek başına boşluklu yapı üretebilir (Means vd., 1995). Bu istenmeyen boşlukları ve bu boşluklardan kaynaklanan sülfat atak etkisini engellemek için karışıma puzolan ve/veya pH artırıcı katkı eklenebilir. (Fall vd., 2005).

Sülfürlü macun dolgu performansının farklı olması içerdiği sülfatın konsantrasyonuna bağlıdır. Mesela sülfat konsantrasyonu 2000 ppm in altında olan sülfürlü atıklar hidrate olmuş çimento ürünleri ile boşlukları doldurarak erken dönemdeki dayanıma katkı sağlarlar. Ancak sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak çimento oranı ve kür zamanı olumlu etki yaparken sülfat varlığı negatif etki yapabilir (Fall vd., 2005). Benzaazoua vd. (2004)'e göre, sülfat konsantrasyonu 200-8000 ppm arasında olduğunda macun dolguda sülfat etkisi görülmez. Sülfat konsantrasyonu 8000-10000 ppm arasında ise jips çökelişi mümkündür ve bağlayıcı ile beraber C-S-H oluşumunu artırarak dayanımın yükselmesine yardımcı olabilir. Eğer sülfat konsantrasyonu 10000 ppm i geçerse ikincil jips oluşumuna ve sülfat atağı neden olabilir. Buna bağlı olarak dayanımı düşürücü etkisi olabilir (Belem ve Benzaazoua, 2008). Oluşan hidrasyon ürünlerinin hacminin artması iç gerilme oluşturabilir bu gerilme matrix içinde boşluk oluşmasına sebep olabilir. Divet (1998), Sülfat ve Portland çimentosu arasındaki istenmeyen reaksiyonlar sonucu oluşan kristal yapılarının 70-200 MPa içsel gerilme oluşturabileceği, bunun çimento yapısını bozan temel etkeb olabileceğini düşünmektedir. Bu içsel gerilme ve çimentonun yapısının bozulması macun dolguda oluşan dayanım kaybının sebebi olabilir.

Fall ve Pokharel (2010), karışımın başlangıçtaki sülfat içeriğinin 15000 ppm'den büyük olduğu takdirde sülfat iyonlarının büyük bir bölümünün C-S-H tarafından absorbe edildiğini idda etmektedir. Deneysel sonuçlar sülfat ile oluşan bağlayıcının düşük kalitede C-S-H oluşturduğu görülmektedir. Bağlayıcı olarak C-S-H jelinin kalitesindeki bu düşüklük dayanımın düşmesine neden olacaktır.

İlave su normalde işlenebilirlik ve pompalanabilirlik gereksinimlerini karşılamak amacıyla macun dolgu tasarımı için gereklidir. Bundan dolayı, macun dolguda bulunan hacimsel su oranı bağlayıcının hidrate olması için gerekli olandan her zaman fazladır (Belem ve Benzaazoua, 2008). Macun dolgu tasarımında kullanılan ilave su; atıkların proses suyu, göl suyu veya belediye suyu da olabilir. Macun dolguya gerekli kıvamı vermek için kullanılan suyun sülfat içeriği ve pH değeri uzun süreli dayanımı ve durabilitesi için çok önemlidir. Asidik sular ve sülfat tuzları macun dolgu içerisindeki bağlayıcıya olumsuz etki ederek dayanım ve durabilitenin düşmesine neden olabilir (Lawrence, 1992; Wang ve Villaescusa, 2001; Benzaazoua vd., 2002, 2004; Fall vd., 2005; Fall ve Pokharel, 2010). Bu olay, düşük çimento içeriği ve yüksek sülfatın konsantrasyonuna sahip çimentolu macun dolguda daha belirgin olabilir. Düşük çimento oranı kullanılarak, yüksek sülfürlü atıklarla hazırlanan macun dolguda pH seviyesi kritik noktada ($\sim 12,5$) olabilir. Bu durumda sülfat atak etkisi oluşarak bağlayıcının bağlayıcılık özelliğini kaybetmesine neden olabilir ve dolgunun dayanımını düşürebilir (Benzaazoua vd., 1999a).

Madencilik sektörü zemin mekaniği sorunları ile başa çıkmak için yeraltı madenciliği operasyonlarında çimentolu dolgunun mekanik özelliklerini yükseltmek zorundadır. Bunun için genellikle bağlayıcı oranı yükseltilmekte ve bu ek maliyet getirmektedir (Scoble ve Piciacchiaa, 1986). Macun dolgunun mekanik performansını bozmadan çimento tüketimini azaltmak mümkündür. Portland çimentosu hem yüksek maliyeti hem de sözde zayıf performansına rağmen uzun dönem de bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Portland çimentosunun hem maliyeti yüksek, hem de sülfatlı ortamlarda duraylılık performansının düşük olması nedeni ile alternatif bağlayıcılar kullanılarak uygun dizayn ve tasarımlar elde edilebilir. Bundan dolayı bugün macun dolgu için daha sağlam mühendislik tasarımları oluşturacak ucuz ve puzolanik etkinliği yüksek mineral katkı maddelerinin kullanımı önem kazanmıştır.

1.3. Dolguda Kullanılan Bağlayıcılar

Macun dolguda bağlayıcı öncelikli olarak yeterli mekanik ve statik direnci geliştirmek için kullanılır. Çimentonun katılaşmasında, atık ve su Portland çimentosu ile kimyasal reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat ve alüminat bileşikleri oluştururken katılar agrega gibi davranarak beton özelliği gösterirler (Conner, 1993).

Bağlayıcı maliyeti madencilik işletme maliyetinin önemli bir bölümünü temsil eder. Kanada’da yeraltı maden işletmeciliğinin yaklaşık %65’inde dolgu kullanılmaktadır (Mining Source Book, 1994). Hassani vd. (2007)’ne göre yeraltı madenciliğinde toplam maliyetin yaklaşık %20’sini dolgunun oluşturduğunu belirtmiştir. Kullanılan Portland çimentosu ise dolgu maliyetinin %75’ini oluşturmaktadır. 1993 de yayınlanan “Canadian Minerals Year Book” kitabına göre “Ontario madencilik” sektöründe tek başına Kanada’da üretilen Portland çimentosunun %5-6 sını tüketmiştir. Bu da dolgunun yeraltına nakli ve yerleştirilmesi için yıllık yaklaşık 75 milyon Kanada doları harcama demektir. Portland çimentosunun üretiminde harcanan yüksek enerji maliyeti ve maden sahalarından uzak mesafelerde üretiliyor olması, çimentolu macun dolgu birim maliyetini önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle, çimento oranının fazla olduğu tesislerde dolgu maliyet önemli yer tutmaktadır. Normal Portland çimentosunun pahalı olması nedeniyle macun dolguda tek başına kullanımı gün geçtikçe popülaritesini yitirmektedir. Ayrıca, çimento endüstrisi en fazla sera gazı (özellikle CO₂) salınımı yapan sanayi dallarından biridir (Tariq Amjad, 2012). Çimento üretimi enerji yoğun bir işlemdir ve üretilen her ton Portland çimentosu küresel ısınmaya katkı yapan yaklaşık 1 ton CO₂ atmosfere yayar (Worrell vd., 2001). Atmosfere yaydığı yüksek orandaki CO₂ gazı nedeni ile çevreciler açısından yüksek oranda eleştiri almaktadır.

Bununla birlikte madencilikte dolgu işlemlerinde dayanımı artırmak ve durabiliteyi sağlamak için çimento miktarını artırmak, işletme maliyetlerini önemli derecede artırmaktadır. Bağlayıcı olarak çimento kullanılan dolgu yöntemlerinin uygulandığı maden işletmelerinde, dolgu maliyetleri toplam işletme maliyetlerinin %10-20’lik kısmını oluşturmaktadır. Bu maliyetin ise yaklaşık %50-75’lik kısmını çimento maliyetleri oluşturmaktadır (Grice, 1998; Fall vd., 2003). Çimentonun pahalı olması, maden işletmecilerini, daha ekonomik koşullarda dolgu uygulamalarına yönelik uygun maliyetlerde bağlayıcı madde sistemleri üzerinde sürekli olarak araştırmalara yönlendirmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Macun dolguda kullanılan bağlayıcılar

Kullanılan malzeme	Kökeni	Rolü	Referanslar	
			Betonda	Macun dolguda
Yüksek fırın curufu	Metallerin yüksek sıcaklıklarda eritilmesi ile	Puzolan	Zhu vd. (2012)	Lun (1986), Grice (1998) , Erçikdi vd.(2009), Fall (2012), Tariq (2012), Benzaazoua vd. (2007), Yin vd. (2012)
Atık cam	Cam tüketimi ve üretimi	Puzolan	Shao ve ark. (2000)	Archibald vd. (1999) , Peyronnard vd. (2011) , Erçikdi vd (2009), ve Sargeant (2008),
Biyolojik küller	Tarım (pirinç veya buğday samanı) veya orman (talaş cips) Biyokütle Yanma	Puzolan	Frías vd. (2007) ve Wang ve Baxter (2007)	Peyronnard vd. (2011)
CAISiFrit	Alüminyum tedavisi (NovaFrit)	Puzolan	Tagnit-Hamou ve Laldji (2004)	Peyronnard vd. (2011)
Kâğıt çamur külleri	Kâğıtların yanması sonucu oluşan kül	Puzolan	Pera ve Amrouz (1998)	Peyronnard vd. (2011)
Kırmızı çamur	Aleminyum üretimi	Puzolan	Pera vd. (1997), Pan vd. (2002, 2003) ve Yang ve Xiao (2008)	Benzaazoua vd. (2006)
Kireç atığı	İşlem sırasında kireç üreten veya atık olarak ortaya çıkaran işlem (su ve gaz arıtma, metalurji)	Hidratasyon hızlandırıcı	Singh ve Garg (2007)	Wilson (2012)
Çimento fırın atığı	Çimento üretiminde bacalarda toplanan	Hidratasyon hızlandırıcı	Konsta-Gdoutos ve Shah (2003),ve Buchwald ve Schulz (2005)	Peyronnard vd. (2011), Tariq (2012) ,Nehdi (2007)
Uçucu kül	Çimento üretiminde fırın bacalarında filtreler ile yakalanan kül	Puzolan	Esteves (2012), Cuenca (2013)	Simon (2006),Fall (2012), Tariq (2012) ,Suna (2012), Nehdi (2007), Zamani (2011), Benzaazoua (2007) Lee (2012)
Tras ve pomza		Puzolan		Erçikdi vd. (2010)
Mermer atığı	Mermer üretimi sırasında ortaya çıkan atık	Hidratasyon hızlandırıcı	Türker vd., (2002); Kırgız, (2007); Alyamaç ve İnce, (2009); Ergün, (2011); Rai vd., (2011); Belaidi vd., (2012).).	Bu çalışma
Tuğla atığı	Tuğla üretimi sırasında ortaya çıkan atık	Puzolan	Naceri ve Hamina, (2009). Wild vd. (1997), Kırgız ,(2007), Ho, (2003), Yeğınobalı, (2001)	Bu çalışma

1.3.1. Portland Çimentosu

Portland çimentosu katkısı, geçmişte ve günümüzde, maden atıklarının katılaşması için en çok kabul edilen bağlayıcı olmaya devam etmektedir. Portland çimentosunun uygunluğu ve kullanılabilirliği sayesinde maden atıklarının yeraltına depolanmasında uzun süredir en yaygın kullanılan bağlayıcı tipi olmuştur, (Rankine ve Sivakugan, 2007; Grabinsky vd., 2007, 2008).



Şekil 2. Portland çimentosu

Portland çimentosunun stabil hale gelmesi, çimentonun su ile reaksiyona girerek atık malzemenin sertleşmesi ile olur. Portland çimentosunun hidratasyon mekanizması birçok yerde detaylı çalışılmış ve rapor edilmiştir (Taylor, 1990a; Glasser, 1993; Mollah vd., 1995; Hills ve Pollard, 1997). Portland çimentosunun yapısını oluşturan 4 susuz ana evre vardır; (a) %50-70'i *trikalsiyum silikat* (Ca_3SiO_5) veya C_3S , (b) %20-30'u *dikalsiyum silikat* (Ca_2SiO_4) veya $\beta\text{-C}_2\text{S}$ veya *belite*, (c) %5-12'si *trikalsiyum alüminat* ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_3$) veya C_3A ve (d) %5-12'si *kalsiyum alüminoferrit* ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$) veya C_4AF . Normal koşullar altında hidratasyon evreleri (a) % 60-70'i *kalsiyum silikat* hidratasyonu ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), değişken bir yapıdaki bu jel genel olarak C-S-H şeklinde kısaltılır (b) % 20-25'i *kalsiyum hidroksit* [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] veya Portlandit oluşturur. Bu iki evre Portland

çimentosunun sulu hidrasyon kısmının yaklaşık %90'nını oluştururlar (Hills ve Pollard, 1997).

Kalan katı ürünler *kalsiyum sülfat-alüminatlardır*; *trikalsiyumaluminatrisulphat* ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), ve *trikalsiyumaluminatmonosülfat* ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$) (Skalny vd., 2002). Hidrasyon da olan bir dizi kimyasal reaksiyon sayesinde çimento hamurunun sertleşmesini sağlar.

1.3.2. Sülfata Dayanıklı Çimento (SDÇ)

Sülfata dayanıklı Portland çimentosu (SDÇ) 1930'larda Thorvaldson tarafından geliştirilmiştir. Temel Prensipte olarak Portland çimentosunun üretildiği hammadde içerisindeki demir (Fe_2O_3) içeriği oranını artırmaktır. Bu bulgu Portland çimentosunun geliştirilmesine yol açmıştır; bu geliştirme içeriğin alüminat (C_3A) oranını azaltarak ve tetrakalsiyumalüminat-ferit (C_4AF) oranını artırarak sağlanmıştır. Çimentolu atıklar gibi çimento hamurunun sülfat atak etkisi içermesi çimentonun durumu için önemli bir faktördür. Sülfat ile ilgili bozulma çimentodaki C_3A içeriğine ve CH oluşum miktarına bağlıdır. Düşük C_3A konsantrasyonu sülfata dayanıklı çimentoda etrenjit oluşumunu azaltır. Dolayısıyla ile harcın daha az zarar görmesini ve beton malzemelerinin sülfat tarafından zarar görmesini engeller (Puppala vd., 2004). Portland çimentosunun SDÇ gibi sülfata dayanıklı olması için C_3A içeriği %5'den az olmalıdır. Çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit, sülfatlı ortama maruz kalmış düşük oranda C_3A içeren Portland çimentonun performansında önemli bir rol oynar. Bu Portland çimentosunun sülfattan etkilenmesine bağlı olarak değişim gösterebilir (Irassar vd., 2000). Fakat sülfata dayanıklı çimentolar daha pahalı bir seçenektir.

Benzaazoua vd. (2004), çimento ve sülfürlü maden atıklarından hazırlanan macun dolgunun katılaşma işlemini incelemiştir. Bu yazarlar sıradan beton veya harcın, çimento-atık karışımının katılaşma prosesinin hem çimentonun hidrasyonunu hem de macun dolgudaki su boşluklarının hidrasyona etkisini incelemişlerdir. Katılaşmada çözülme reaksiyonları hakimdir. Çimentonun susuz evresini en çok etkileyen *Trikalsiyumsilikatdır* (C_3S) veya ($3CaO \cdot SiO_2$), çünkü $Ca_2 + H_2SiO_4^{2-}$ ve OH^- iyonlarının açığa çıkmasını sağlar.

Kesimal vd. (2004), dolguya PKÇ/B (Portland kompoze çimento) tipi bağlayıcı ilavesiyle şu anda Türkiye'de macun tesisinde kullanılan atıklarda dayanım artışı belirlemiştir. Buna ek olarak, PKÇ/A-tipi bağlayıcı dayanım artışı açısından karşılaştırmak

için seçilmiştir. Bu tip bağlayıcının yüksek sülfür içeren atıklardan hazırlananda macun dolguda duraylılık açısından yeterli olmadığı ve bağlayıcının etkili olmadığı saptanmıştır. Buna rağmen 28 günlük kür süresinde macun dolgu yüksek dayanım geliştirmiştir. Yapılmış deneysel çalışma; sülfürce zengin bileşiklerin varlığı sülfat atak nedeniyle katılaşmış macun matriksinin bozulmasına neden olabileceğini ortaya koymuştur.

Benzaazoua vd. (2004b), “*Europeangold*” maden işletmesinden elde edilen atıkla yapılan çimentolu macun dolgunun jeokimyasal davranışını incelemiştir. Portlandit çimentosunun (kireçle zenginleştirilmiş) arsenik varlığında bozulmasını incelemiştir. Dolgu örneklerinin içerisindeki kirleticilerin geçişi düşük geçirimsizlik sayesinde minimize edilmiştir ve kalsiyum sülfatın ve arsenatlar yerinde çökmüştür. Bu liç testleri kireççe zengin çimentonun arsenik için yüksek tutma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Buna rağmen, dolgu geçirgenliği çimentodaki nem miktarı tarafından çevreye salınımı artırır. Portlanditçe zengin bir çimentolu dolgu pH durumunu ve kalsiyum aktivitesini belirler. Bu arsenopirit oksidasyonunu engellemek için elverişlidir. Fakat gözlemlenen ayrışma uzun dönem dayanımlarında bile çok küçük bulunmuştur. Erçıkı vd. (2009a), sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan çimentolu macun dolgunun mekanik performansından ve durabilitelerinden sülfat atağın güçlü bir şekilde sorumlu olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar; normal Portland çimentonun, sülfatça zengin atıklardan hazırlanan dolguda düşük dozajda (örnek: %5) kullanımının duyarlılık açısından uygun olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca Sülfata dayanıklı çimento kullanımı uzun süreli durabiliteyi korumasına karşın fakat pahalı olduğundan dolayı tek başına kullanımı önerilmemiştir (Erçıkı, 2009).

1.3.3. Puzolanik Malzemeler

Son yıllarda, madencilik sektöründe hem dolguda kullanılan çimento miktarını azaltmak hem de dayanımı yüksek tutmak için puzolonik malzeme kullanımı üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Macun dolguda puzolan kullanımı veya katkılı çimento kullanımı büyük bir ilgi görmüştür. Macun dolguda olduğu gibi çimento hamuru içine katılan ek bağlayıcılar eşsiz bir karakter gösterir ve dayanımı artırır.

Yapılan araştırmalarda bazı katkıların reaktif olmadıkları halde çimento hidratasyonu’ nu olumlu yönde etkiledikleri anlaşılmıştır. Örneğin, mermer atığı taneleri

hidratasyon ürünleri içinde çekirdek oluşturarak su ile reaksiyonu hızlandırır (Yeğınobalı, 2001).

Puzolanlar, “kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık değeri olan, fakat ince taneli durumdayken, sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştğinde, hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özelliğı kazanan silikalı ve alüminalı malzemeler” olarak tanımlanmaktadır (ASTM C 618, 1994).

ASTM C 125 (2003) standardı, özellikleri düzeltebilen tanımların yanıltıcı olacağını savunmaktadır, ikame ve katkı için: “Su, hava etkileri vb. başlangıçta beklenen özellikleri ya da dayanım ve donma-çözölme gibi sonuç özelliklerini etkileyen malzemelerdir.” tanımını yapmaktadır.

Hidratasyon ürünü olan Portlandit (CH), su ile kolay çözülebilmekte ve yıkanmayla geride boşluklar bırakarak daha gözenekli ve poroziteli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca CH, kimyasal tepkimelere en çok istekli olan bileşiklerden birisidir. Çimentolu karışımlarda mineral katkı maddesi kullanılarak Portlanditin yol açabileceğı olumsuz etkiler (ikincil alçıtaşı oluşumu vb.) azaltılabilmektedir. Puzolanların mineral katkı maddesi olarak çimentolu karışımlarda kullanımının başlıca faydaları; i) porozite, boşluk oranı ve geçirgenliğı azaltmak, ii) alkali-silika reaksiyonu ve asit ve sülfat etkisi nedeniyle oluşan dayanım ve duraylılık kaybını engellemek, iii) çimento maliyetini/tüketimini azaltmak, iv) puzolanlarla ilgili (uçucu kül vb.) atık depolama/rehabilitasyon maliyetlerini ve olumsuz çevresel problemleri (tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, çevre kirliliğı vb.) azaltmak olarak sıralanabilir (Erçıkı, 2009).

Puzolanlar kireç yokluğunda reaktif silika kaynağı olarak hizmet etmekte olup, normal olarak kendinden yapıştırma özelliğine sahip değildırler. Puzolonik maddeler Portland çimentonun hidratasyonu boyunca açığa çıkan serbest haldeki Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerler. Hidratasyon sonucu oluşan ikincil C-S-H matrix içindeki kapiler boşlukları azaltır. Dolgu agrega arasındaki ara yüzeyi azaltarak sülfür difüzyonunu azaltır (Irassar vd., 2000).

Matriks de yer alan hidrate olmuş mono sülfat ($\text{C}_4\text{ASH}_{12}$), hidrate olmuş kalsiyum alüminat (C-A-H) ve kalsiyum hidroksid (CH) hidratasyon sonucu Portland çimentoda oluşan sülfat ataktan sorumludurlar. Bozulmadan sorumlu olan sülfat atak etkisi hem kontrol edilebilir hem de çimentodaki monosülfat ve kalsiyum aliminathidratasyonu engellenebilir. Bu Portland çimentosundaki C_3A içeriğı azaltılarak veya karışıma bir miktar yapay veya doğal puzolan eklenerek başarılabılır. Doğal puzolan eklemenin ikinci

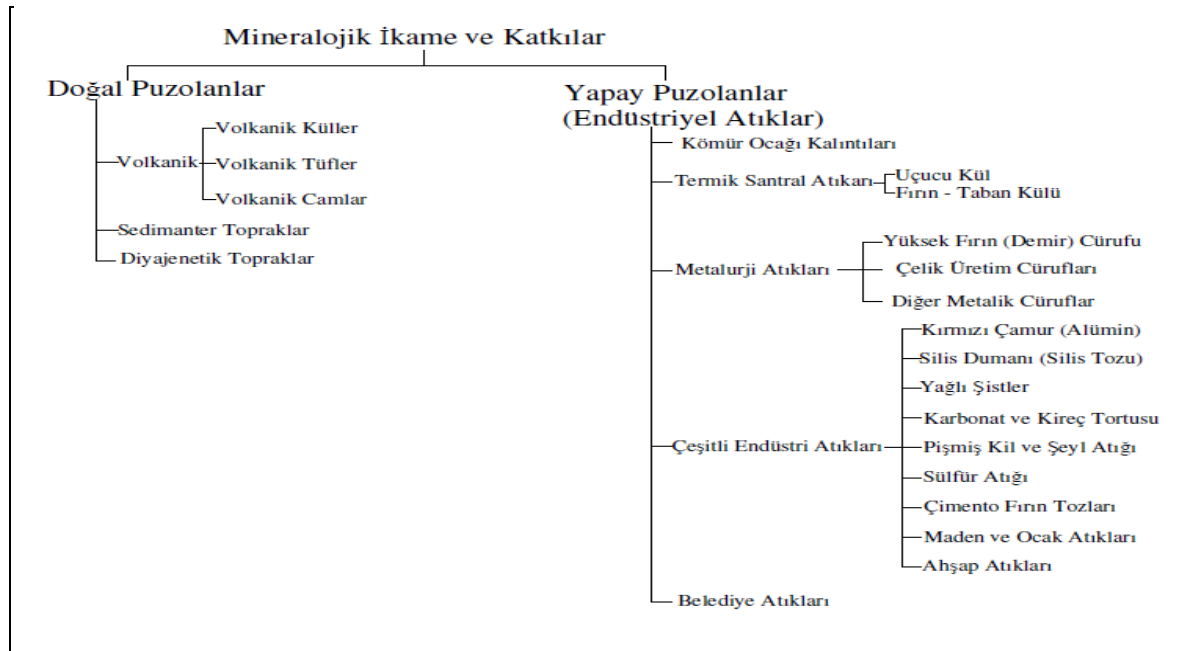
faydası, yalnızca ürünün performansını iyileştirmek, teknik faydalarını artırmak ve çeşitli kaynaklardan gelen ürünlerinden yararlanabilmek değil aynı zamanda çimento kullanımını azaltarak karbon emisyonunu azaltmak ve dolayısıyla sürdürülebilir gelişmeye destekleyici olabilmektir.

Kreijger vd. (1968), mineralojik ikame ve katkısı: “Harç ve betonun karıştırılması sırasında, harç ve betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini düzeltmek amacıyla eklenen, karışım malzemelerinin kabul ettiği malzemelerdir” olarak tanımlamaktadır.

Rouman ve Sarkar (2001), mineralojik katkıları; (a) Bağlayıcı özellikte olanlar: Suda soğutulmuş yüksek fırın curufu vb. (b) Bağlayıcı ve puzolanik özellikte olanlar: Uçucu kül, bazı bitümlü sist külleri vb. (c) Puzolanik özelliği yüksek olanlar: Silis dumanı, pirinç kabuğu külü vb. (d) Normal puzolanlar: Pişmiş kil- metakaolin, tuğla-kiremit atığı, silisli uçucu kül, vb. (e) Puzolanik özelliği düşük olanlar: Havada soğumuş yüksek fırın curufu, bazı kazan curufları, bazı bitümlü sist külleri, vb. (f) Mineralojik özelliği olanlar: Mermer atığı, kuvars atığı, bentonit, demir atığı, olarak sınıflandırmaktadır.

Rouman ve Sarkar (2001) tarafından yapılan sınıflama hem karışık hem de katkıların nasıl elde edildiği belli değildir. Kreijger vd. (1968) ve Gutt ve Nixon (1970) yaptıkları mineralojik ikame ve katkıların kökenlerine göre sınıflandırılması Tablo 3’ de verilmiştir.

Tablo 3. Mineralojik ikame ve katkıların kökenlerine göre sınıflandırılması (Kreijger vd., 1968)



Tuğla atığının da puzolanik özelliğe sahip olduğu ve çimento yerine belirli oranlarda puzolan olarak kullanılabileceği belirtilmektedir (Türker vd., 2002; Kırgız, 2007; Alyamaç ve İnce, 2009; Ergün, 2011; Rai, 2011; Belaidi vd., 2012). Mermer, esas bileşeni kalsiyum karbonat (CaCO_3) olan taşların ısı ve basınç altında başkalaşım veya yeniden kristalleşmesi sonucu oluşan, bileşiminde en az %95 CaCO_3 bulunan, mermer sanayinde ürün kesme, şekil verme ve cilalama sırasında elde edilen inert bir malzemedir. İlgin (2011), mermer atıklarının puzolan olarak Portland çimentosu yerine %15-20 oranında kullanılabilmesi için CaCO_3 'ün %75'ten fazla, MgO 'ün %5'ten az, kil bileşeninin %1,2'den az ve organik bileşeninin %0,2'den az olması gerektiğini belirtmiştir. Mermer atıklarının filler (boşlukları doldurucu) etkisi özelliğine sahip olması betonun boşluk oranı ve gözenekliliğini azaltarak betonun dayanım ve akışkanlığını olumlu yönde etkilemektedir (Türker vd., 2002; Alyamaç ve İnce, 2009; Topçu vd., 2009; Topçu vd., 2009). Çimento yerine en ideal kullanım oranının 200 kg/m^3 olduğunu, bunun üzerindeki kullanım dozajının dayanımı önemli oranda azalttığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar mermer atığının puzolan olarak çimento yerine %10-30 oranında kullanarak betonun dayanımına etkisini incelemiş ve ikame oranı arttıkça mukavemeti sağlayan C_3S ve C_2S bileşenlerini azalttığından dayanımın düştüğünü belirtmiştir (Türker vd., 2002; Kırgız, 2007). Ayrıca mermer atığının puzolan olarak betonun akışkanlığını iyileştirdiğini, bunun eşkenar ve düzgün yüzeyli mermer tanelerinin iç sürtünmeyi azaltmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Rai, 2011; Ergün, 2011). Puzolanik mineral katkı maddesi olarak çimento yerine %5-7,5 oranında öğütülmüş mermer atığı kullanımının betonun 28 ve 90 günlük basınç dayanımı %10 oranında arttırdığını, buna karşın %10 oranında kullanımın aynı kür sürelerinde yaklaşık %15'lik dayanım kaybına yol açtığını belirtmiştir. Mermer atığı tanelerinin hidratasyon ürünleri içinde çekirdek oluşturarak su ile reaksiyonu hızlandırması nedeniyle çimentolu karışımların dayanımına pozitif yönde etki edeceği düşünülmektedir (Yeğinobalı, 2001; Türker vd., 2002; Ergün, 2011).

Erçikdi vd. (2009d, 2010a), doğal (tras, pumis) ve yapay (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, atık cam malzeme) puzolanların sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan çimentolu macun dolguda bağlayıcı yerine %5-60 oranında kullanımının macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucu tras, yüksek fırın cürufu ve atık cam malzeme kullanımının dolgu performansını olumsuz yönde etkilediği, pumis, uçucu kül ve silis dumanı kullanımının ise durabiliteyi olumlu yönde etkilediği ortaya çıkmıştır. Ayrıca yazarlar puzolanların puzolanik etkinliğinin ve reaktif

SiO₂ içeriklerinin dolgunun dayanım ve durabilitesi açısından önemli olduklarını vurgulamışlardır.

1.3.3.1. Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar, yaygın olarak bilinen adıyla traslar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine sahip olmasalar da çok ince öğütüldüklerinde, normal sıcaklıklarda, sulu ortamlarda kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanabilen, silis ve alümin oksitlerince zengin tuf çeşidi malzemelerdir.

Yapılan çalışmalar (Gimenez vd., 1991; Canpolat, 2003, Çavdar, 2004; Özdamar ve Yavuz, 2005;) CaO, MgO ve SO₃ gibi bazı zararlı maddelerin hacim genişlemesini tetikleyen etkenler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu zararlı maddelerin çimentoda belli sınırların altında tutulmaları gerekmektedir. CaO miktarı kütlece %3, MgO miktarı ise kütlece %4,5'ten fazla olmamalıdır. İşte bu noktada doğal puzolanlar, inceliklerine bağlı olarak bu zararlı maddelerle tepkimeye girmekte ve bunların çimento içerisindeki oranlarını düşürmektedir.

Doğal puzolanlar ince öğütülme yetenekleri sayesinde çimento hamurundaki mikro boşluklara kolayca girmekte ve çimento hamurunun iskelet yapısını değiştirerek dayanıklılığını artırmaktadırlar (Shannag, 2000, Sabir, 2001; Pan vd., 2003). Buna ilaveten doğal puzolanlar, ince taneli olmaları sayesinde çimento harcı ve beton üzerinde kayganlaştırıcı bir etki de ortaya koymaktadırlar. Bu etki taze betonun kıvamını ve dolayısıyla işlenebilirliğini iyileştirmektedir (Pan vd., 2003). Ancak doğal puzolanlar, çimentonun toplam özgül yüzeyini artırdıkları için su ihtiyacını da artırabilmektedirler (Vu vd., 2001)

Doğal puzolanlar, yeryüzünde doğal olarak yer alan ve puzolanik özelliğe sahip olan malzemelerdir. Volkanik kül, tuf ve diatom olarak adlandırılan mikroskobik büyüklükteki silisli alglerin kalıntılarını içeren diatomlu toprak, mermer atığı doğal puzolan sınıfına girmektedir.

Volkanik malzemelerin büyük bir bölümü puzolanik özellik gösterir. Volkanik püskürme sırasında silisli ve alüminli malzemelerden oluşan eriyik durumdaki magma, yüzeye lav halinde çıkarak çok çabuk soğuma gösterirse, camsı yapıya sahip olur. Püskürme esnasında gazların da bulunması, malzemenin gözenekli yapıya ve çok büyük yüzey alanına sahip olmasına neden olmaktadır. Yüzey alanının büyük olması ve düzensiz

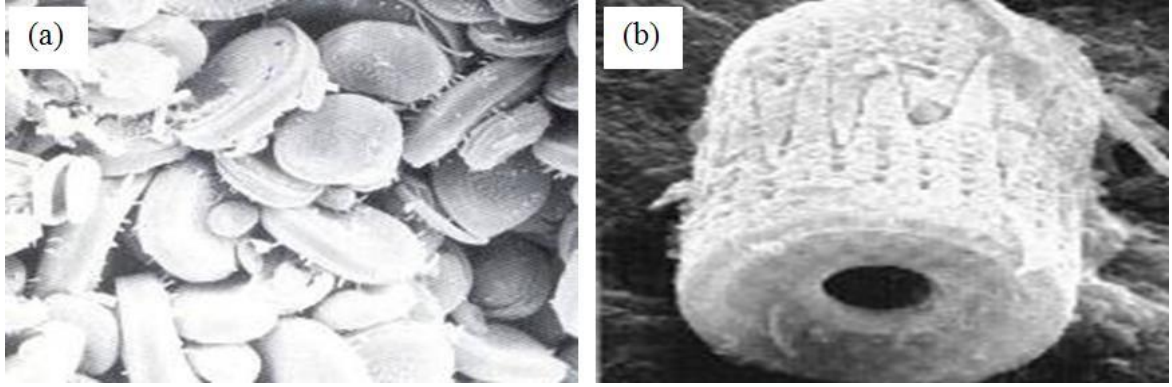
yerleşim göstermelerinden ötürü, alüminli silisler, sulu ortamda kalsiyumlarla kolayca reaksiyona girebilmektedir. Volkanik püskürmenin çok hızlı olması, malzemenin daha amorf yapıya ve daha yüksek puzolanik özelliğe sahip olmasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003; Lewis vd., 2003) (Şekil 3).

Magmanın püskürmesi sonucunda hızlı bir şekilde soğuması ile yüksek puzolanik aktiviteye sahip camı malzemeler oluşurken püskürme sonucu açığa çıkan malzeme yavaş yavaş soğuyarak oluşur ise camı volkanik malzemelere kıyasla, kireçle daha az kimyasal reaksiyon yapan volkanik külleri meydana getirir. Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar ve volkanik küller olarak çeşitleri vardır.



Şekil 3. Derinlerde oluşan kristal yapı ve yüzeyde oluşan amorf yapı

Sedimanter malzemeler, opalin diatom bakımından zengindir. Diatomlar, silisli yapıya sahip olan mikroskobik büyüklükteki tek hücreli su bitkileridir (Şekil 4). Bazı topraklarda bulunan bu organik kalıntılar %94 oranında silis içerirler. Diatomitlerin sahip olduğu puzolanik aktivite, içerdiği amorf silis miktarına bağlıdır. Bazı diatomlu malzemeler, öğütülmeden bazıları ise öğütüldükten sonra mineralojik katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu tür malzemelerin 760 – 1000°C sıcaklığa kadar pişirildikten sonra öğütülmeleri puzolanik özelliklerini artırmaktadır (Erdoğan, 2003, Lewis vd., 2003).



Şekil 4. Diatomların elektron mikroskopi (SEM) görüntüleri

Diyajenetik malzemeler, amorf (şekilsiz) silis bakımından zengin ve silisli kayaların kötü hava şartlarında aşınmasından elde edilir ve puzolanik özellik gösterirler. Mineralojik yapısında ise çok miktarda silis ve az miktarda diğer oksitler bulunur (Lewis vd., 2003).

1.3.3.2. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar, endüstriyel bir üretim esnasında yan ürün olarak ortaya çıkan ve puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Doğal olmayan puzolanlar tuğla atığı (pişirilmiş kil ve şeyl atıkları), silis dumanı, uçucu kül, alüminyum atıkları, yüksek fırın cürufu gibi malzemelerdir (Erdoğan 2007).

Uçucu kül, termik santrallarda elektrik enerjisi üretimi için yakıt olarak kullanılan pulverize kömürün yakılması sonucunda yan ürün olarak elde edilmektedir. Kalsiyum oksit, demir oksit, magnezyum oksit, karbon gibi maddelerin dışında çok yüksek miktarda silika ve alümina içeren ve amorf yapıya sahip olan bu kül parçacıklarının boyutları $1\ \mu\text{m}$ - $150\ \mu\text{m}$ arasında değişmektedir (Erdoğan, 2004).

Yeterli puzolanik aktiviteyi gösteren uçucu küller her tür beton yapımında başarıyla kullanılabilir. Uçucu küllerle yapılan betonların hidrasyon ısısı düşük olduğu için, bu tür malzeme özellikle kütle beton yapımında önem taşımaktadır.

Granüle yüksek fırın cürufu; bilindiği gibi, demir cevheri, doğada demir oksit olarak bulunmaktadır; içerisinde bir miktar silika, alümina, kükürt gibi yabancı maddeler de yer almaktadır. Demir elde edebilmek için, demir oksitteki oksijenin dışarı çıkartılması ayrıca, cevherin, içerisindeki yabancı maddelerden arındırılması gerekmektedir. Bu amaçla, yüksek fırın olarak adlandırılan bir fırının içerisine kademeler halinde kok kömürü,

kireçtaşı ve cevher yerleştirilmekte, kok kömürünün yakılmasıyla da yaklaşık 1600°C sıcaklık uygulanmaktadır. Kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbonmonoksit veya karbon dioksit gazları halinde ortamı terkettikten sonra, geride, eriyik durumda demir ve yine eriyik durumda yabancı maddeler topluluğu (cüruf) bırakmaktadır. Yan ürün olarak elde edilen cürufun içerisinde büyük miktarlarda silika, alümina ve kalsiyumoksit yer almaktadır.

Yüksek fırından eriyik durumda dışarıya çıkartılan cüruf, havada yavaş soğuma işlemine tabi tutulduğu takdirde, kristal yapıli olmaktadır; ancak, suya dökülerek veya başka bir işlemle çok hızlı soğumaya tabi tutulacak olursa, iri kum taneleri büyüklüğünde granüle duruma gelmekte ve amorf yapıya sahip olmaktadır.

Granüle yüksek fırın cürufu amorf yapıda olduğundan ve yeterli miktarda silika ve alümina içerdiğinden, öğütülerek ince taneli duruma getirildiği takdirde puzolanik özellik gösterebilmektedir.

Silis dumanı; silikon metali veya silikon metalli alaşımlar, yüksek saflıktaki kuvarsın yaklaşık 2000°C sıcaklıkta indirgenmesiyle elde edilmektedir. Bu işlem esnasında çok büyük kısmı SiO'dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO'nun fırının nispeten soğuk bölgesinde havayla temas ederek çok çabuk yoğunlaşmasıyla, gazın içerisindeki SiO, amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşmektedir. Böylece, tanecikleri 0,1µm - 0,2 µm olan atık malzeme elde edilmiş olmaktadır. %85-98 kadar silika içeren ve amorf yapıya sahip olan bu atık malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı”denilmektedir. Bu malzeme, “mikrosilika” veya “silika atığı”, veya “silikafüme” gibi isimlerle de anılmaktadır (Erdoğan, 2003).

Çok büyük miktarda silika içeren, amorf yapıya sahip olan ve çimento tanelerinin inceliğinin yaklaşık %1'i kadar ince taneli olan silis dumanı, aktivitesi çok yüksek olan mükemmel bir puzolandır. Bu malzeme çimento üretiminde de kullanılmakla beraber, daha çok, beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

1.4. Mermer ve Tuğla Atıklarının Puzolan Olarak Kullanımı

Son yıllarda yapılan araştırmalarda bazı katkıların reaktif olmadıkları halde çimento hidratasyonunu olumlu yönde etkiledikleri anlaşılmıştır. Örneğin, mermer atığı taneleri hidratasyon ürünlerinin su içindeki reaksiyonu hızlandırmaktadır (Yeğınobalı, 2001).

Mermer, esas bileşeni kalsiyum karbonat olan kayaların ısı ve basınç altında başkalaşım (metamorfizma) veya yeniden kristalleşmesi sonucu oluşan, bileşiminde en az %95 kalsiyum karbonat (CaCO_3) bulunan, genellikle yoğunluğu $2550\text{-}2800\text{ kg/m}^3$ arasında değişebilen, içerisinde bulunan tali minerallerden dolayı çeşitli renklerde olabile, kesilip parlatılabilen kayaca denir. Mermerin kesilmesi sırasında ortaya çıkan mermer atıklarının yapısı, bileşenleri itibariyle mermer bileşenlerinden farklı özellikler göstermezler.

Ülkemizde ve dünyada inşaat sektöründe mermer kullanımının artmasına bağlı olarak mermer işleme fabrikalarının ve atölyelerinin sayısında hızlı bir artış görülmektedir. Bu üretim artışı nedeniyle tesislerde işlenen mermer bloklarının atık ve kırıntılı atıkları tesislerin atık sahalarına veya tesis yakınından geçen akarsulara dökülmektedir (Şekil 5). Bunun doğal bir sonucu olarak da mermer işleme tesislerinin yoğunlaştığı bölgeler de kamuoyu gözünde tabii güzelliğin bozulması sebebiyle olumsuz bir tepki oluşmaktadır.

Mermer ocaklarında blok üretimi esnasında belirli bir boyutun üzerindeki malzeme mermer ($>2\text{mm}$), atık veya pasa olarak atılmaktadır. Bu oran ocağın jeolojik durumu ve işletme şartlarına göre değişiklik göstermesine rağmen yaklaşık olarak toplam üretimin %40-60'ını oluşturmaktadır.



Şekil 5. Ocaklardan açığa çıkan mermer atıkları

Mermer fabrikalarından üretim atığı olarak çıkan atık atıklar genellikle değerlendirilememekte, üstelik çevre kirliliği açısından da sorunlar yaratmaktadır. Mermer atıklarının değerlendirilmesine yönelik olarak uygulamaya sokulabilecek alternatifler, mermer fabrika işletmecilerine ve ülke ekonomisine kazançlar sağlayabileceği gibi, bu fabrikaların çevre kirleticisi özelliğini de önemli ölçüde azaltacaktır. Konuyla ilgili olarak yapılmış olan bir çalışmada, mermer fabrikalarında işlenen mermerlerin ortalama % 30'unun üretim atığı olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir.

Ülkemizde yılda yaklaşık olarak 2200000 ton mermer blok işlendiği düşünülürse, 660000 ton mermer atığının değerlendirilmeden atıldığı söylenebilir. Böyle bir potansiyeli sanayide değerlendirmek ulusal ekonomiye önemli kazanımlar sağlayacaktır. Literatür bilgilerinde ve dünyadaki bazı uygulamalarda gerek mermer atıklarının gerekse mermer atıklarının seramik, çimento, boya, cam, yapı malzemesi gibi birçok sektörde değerlendirilme çalışması olmakla birlikte, ülkemizde mermerin puzolan olarak kullanımına yönelik yaygın uygulamalara rastlanmamaktadır (Beycioğlu vd., 2009).

Ülkemiz mermer atığı bakımından oldukça zengindir (Şekil 6). Ülkemiz dünya mermer rezervlerinin %40'ına sahip olup, her yıl yaklaşık 7 milyon ton mermer işlenmekte ve 1,5-2 milyon atık mermer açığa çıkmaktadır (Alyamaç ve İnce, 2009). Ortaya çıkan bu atıkların azaltılması hem doğal kaynakların optimal olarak kullanılması bakımından hem de çevresel etkilerin (tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, çevre kirliliği vb.) azaltılması bakımından önemlidir. Bu anlamda, mermer atıklarının çimento yerine puzolan olarak kullanılabilmesi bu atıklar için alternatif kullanım alanı oluşturacaktır.



Şekil 6. Mermer atıkları

Mermer, çimento ve klinkere ikame ve/veya katkı yoluyla eklenebilir. Bu durumda gerek çimento gerekse klinkerin kimyasal, fiziksel ve mineralojik özelliklerini ölçülebilir oranda geliştirir (Kırgız, 2007).

Birçok araştırmacı mermer ve tuğla atığının da puzolanik özelliğe sahip olduğu ve çimento yerine belirli oranlarda puzolan olarak kullanılabileceğini belirtmektedir (Türker vd., 2002; Kırgız, 2007; Alyamaç vd., 2009; Ergün, 2011; Rai vd., 2011; Belaidi vd., 2012).

Çimento sanayisinde 1-200µm boyutlu Portland çimentosu üretimi için mermer atık atıklarının kullanımı boyut açısından oldukça uygun ve ekonomik olmaktadır.

Türkiye'nin yıllık tuğla üretim kapasitesi 6 milyar adettir. Ağırlık olarak kapasite 19×10^6 tondur. Ocaktan pişmiş tuğlaya kadar olan süreçte tuğla atığı olarak ortaya çıkan kaybın %20-25 olduğu tahmin edilmektedir. 2005 yılı Türkiye tuğla üretim kapasitesi %80 olduğundan yaklaşık $15,2 \times 10^6$ ton üretim yapılmıştır (Özdamar, 2005). Tuğla üretiminde toplam atık miktarı % 20–25 arasında olduğunda; Türkiye genelindeki yaklaşık tuğla atık miktarı, $15,2 \times 10^6$ (ton/yıl) $\times 0,25 = 3,8 \times 10^6$ (ton/yıl)' dır (Önenç, 1998; Kırgız, 2007; Özdamar ve Yavuz, 2005).

Tuğla ve kiremitlerin öğütülmesiyle elde edilen ince taneli malzeme puzolanik malzeme olarak yaygın kullanım alanına sahiptir. ABD' de, Brezilya' da ve Hindistan'da birçok baraj inşaatında bu puzolanlar kullanılmıştır (Kırgız, 2007).

Tuğla hammaddesi kaolenin ısıtılması ile elde edilen puzolanik aktivite; montmorillonit ve illit' in puzolanik aktivitesinden daha fazladır. Kaolen 700 – 800 °C' de fırında ısıtıldığında metakaolen oluşur. Metakaolenin bazı belirleyici özellikleri, 10 µm elek üstünde ağırlıkça en fazla %10 kalması, 2 µm elek altına en az %5 geçmesi, özgül yüzeyinin 12 m²/gr, nem miktarının ağırlıkça en fazla %0,5 ve yoğunluğunun 0,3 g/cm³ olmasıdır (Ho vd., 2003).

Büyük miktarda silis ve alüminden oluşan kil ve şeyl mineralleri kristal yapıya sahiptirler. Doğal yapıları itibariyle puzolanik özellik göstermezler. Ancak, 1-2 saat kadar 700–900°C civarında sıcaklığa tabi tutulduklarında, bu malzemelerin düzenli kristal yapısı bozulmakta ve yarı amorf veya düzensiz alümino silisli bir yapı elde edilmektedir. Böylece, puzolanik malzeme durumuna gelmektedir. Tuğla, kiremit ve benzeri malzemelerin hammaddesi kil (kaolen, illit vb.), kuvars ve feldspat minerallerinin karışımından oluşmaktadır. Bu karışım 600-900°C'de ısıtılırsa sıcaklık derecelerine ve sahip oldukları mineralojik yapıya bağlı olarak farklı puzolanik aktiviteye sahip

olmaktadır (Böke vd., 2004). Bu anlamda tuğla ve kiremitlerin (pişmiş kil ve şeyl atıklarından oluşan) öğütülmesiyle elde edilen ince taneli malzeme puzolanik malzeme olarak yaygın kullanım alanına sahiptir (Kırgız, 2007; Filho vd., 2007; Kavas ve Olgun, 2008; Naceri ve Hamina, 2009; Lin vd., 2010a,b). Lin vd. (2010a,b) çimento yerine %10-50 oranında puzolanik tuğla atığı kullanımının erken kür sürelerinde (7-14 gün) dayanımı olumsuz etkilediğini, ancak 28. günden itibaren dayanımı arttırdığını ve çimento yerine puzolan olarak ağırlıkça %50'ye kadar kullanılabileceği ifade etmiştir. Tuğlanın puzolanik etkinliğini belirleyen en önemli faktör camsı faz içeriğidir. Camsı faz içeriği arttıkça puzolanik etkinliği artmaktadır (Farrel vd., 2001). Bu nedenle tuğlayı oluşturan killerin kristal yapısının bozularak amorf (camsı) silis ve alüminyum oluşumunu sağlayan kalsinasyon sıcaklığı tuğlanın puzolanik etkinliği açısından önemlidir (Naceri ve Hamina, 2009). Wild (2001) 600-800°C'de kalsinasyona uğrayan tuğla atığının (ağırlıkça %20 oranında çimento yerine kullanılması durumunda) betonun 28 günlük dayanımını artırmasına karşın, uzun dönem (90 gün) dayanımını düşürdüğünü ve sülfatlı ortamlara karşı dirençsiz olduğunu belirtmiştir. Buna karşın 800-1100°C'de kalsinasyona uğrayan tuğla atığı betonun uzun dönem dayanımı ve sülfatlı ortamlara karşı direncini artırmıştır Wild (2001). Çimento yerine puzolan olarak ağırlıkça %10 oranında tuğla atığı kullanımının betonun 90 günlük dayanımını yaklaşık %10-25 oranında arttırdığını ve potansiyel mineral katkı maddesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Naceri ve Hamina, 2009).

Tuğla kırıkları Güney Afrika'da beton karışımında agrega olarak kullanılır. Beton içerisinde kırılmış tuğlaların agrega olarak kullanılması, çözünebilen tuzlar ve nemin etkisiyle genleşme problemine yol açabilmektedir. Fakat agrega olarak kullanılan tuğla kırıklarının, çözünebilir tuz veya geçirgenliğin etkisiyle yapı çeliğinin korozyonunu kontrol altına aldığı da gözlenmiştir (Kırgız, 2007). İkinci Dünya savaşı sonrasında İngiltere' de tuğla kırıkları, betondaki sülfat seviyesini % 1' in altına çekmek amacıyla kullanılmıştır (Kırgız, 2007, Ho vd, 2003).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu tezin başlıca amacı; puzolanik özelliğe sahip mermer ve tuğla atıklarının macun dolguda kullanımının potansiyel faydalarını ortaya koymak ve asit ve sülfat atak nedeniyle sülfürce zengin atıklardan hazırlanan dolguda uzun dönemde oluşan duraylılık problemlerini önlemektir. Tez çalışması sonucunda;

- Mermer ve tuğla atıklarını çimento yerine belirli oranlarda ikame olarak kullanarak macun dolgu performans (dayanım, durabilite vb.) özelliklerinin iyileştirilmesi, (Tablo 4)
- Mermer ve tuğla atıklarının Portland çimentosu yerine belirli oranlarda kullanılabilirliğinde etkili olabilecek parametrelerin (puzolanik etkinlik, reaktif SiO_2 , özgül yüzey alan vb.) detaylı araştırılması ve aynı bağlayıcı oranlarında daha yüksek dayanım ve durabiliteye sahip macun dolgu için en uygun bileşim ve oranın belirlenmesi,
- Dolguda bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosu miktarını azaltmadan yapılacak puzolanik mermer ve tuğla atığı ilavesinin dolgu performansına etkisinin araştırılması, (Tablo 5)
- Mermer ve tuğla atıklarının yerüstünde depolanması sonucu oluşan çevresel problemlerin (atık vb.) elimine edilmesi ve bu atıkların dolguda çimento yerine belirli oranlarda kullanılabilirliğinin ortaya konulması,
- Macun dolguda bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılması durumunda sıklıkla meydana gelen dayanım ve durabilite kaybının nedenlerinin (asit ve sülfat etkisi nedeni ile ikincil mineral oluşumu ve ayrışma vb.) pH analizleri ile kür süresine bağlı olarak araştırılması hedeflenmektedir.

Tablo 4. Mermer ve tuğla atıklarının ikame puzolan olarak kullanımına yönelik deneysel tasarım

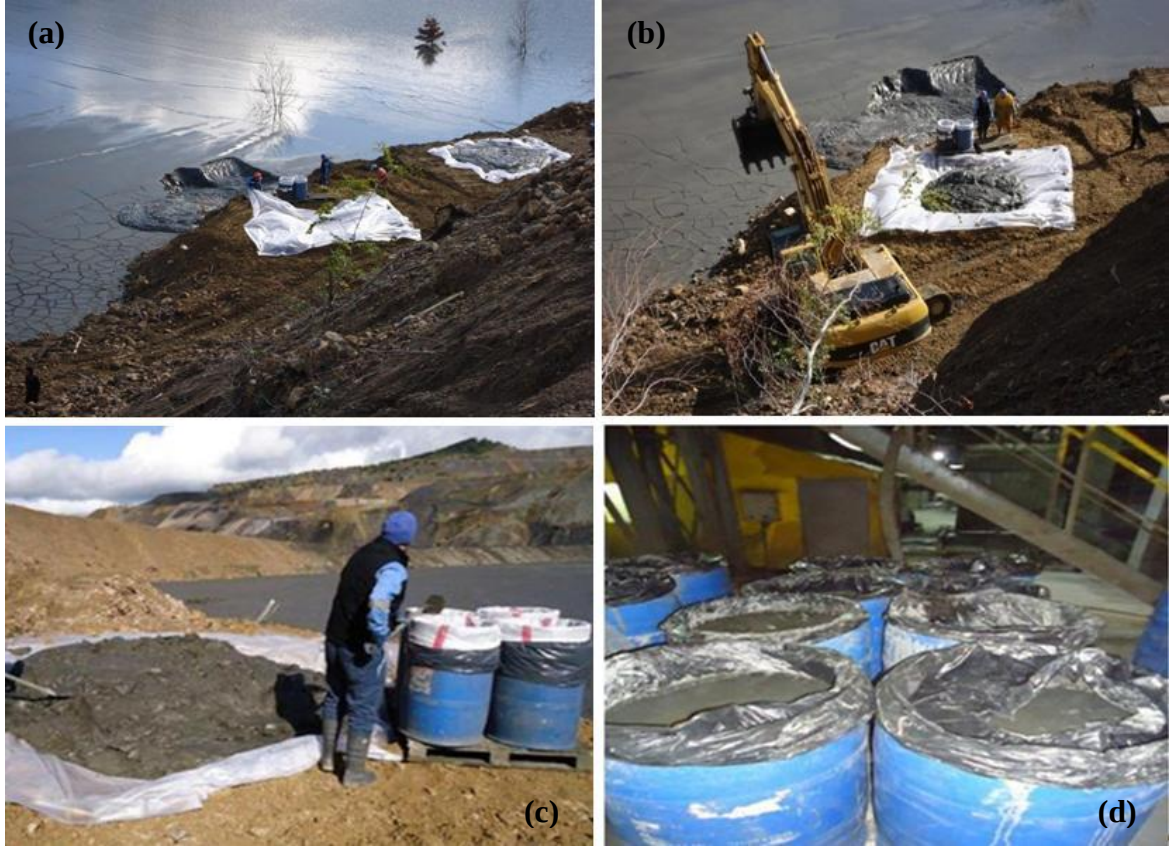
Toplam Numune (234)	Slamp değeri (inch)	Bağlayıcı oranı (ağ.%)	Puzolan tipi	Puzolan adı	İkame oranı (%)	Kür süresi (gün)
54 numune	7,5	7,0	Mermer	GM	10, 20, 30	7, 14, 28, 56, 90, 180
54 numune				BM		
54 numune	7,5	7,0	Tuğla	AT	15, 30, 45	7, 14, 28, 56, 90, 180
54 numune				ÇT		
18 numune	7,5	7,0	Kontrol Numunesi		0	7, 14, 28, 56, 90, 180

Tablo 5. Mermer ve tuğla atıklarının ilave puzolan olarak kullanımına yönelik deneysel tasarım

Toplam Numune (162)	Slamp değeri (inch)	Bağlayıcı oranı (ağ. %)	Puzolan tipi	Puzolan adı	İlave oranı (%)	Kür süresi (gün)
36 numune	7,5	7,0	Mermer	GM	10, 30	7, 14, 28, 56, 90, 180
36 numune				BM		
36 numune	7,5	7,0	Tuğla	AT	15, 45	7, 14, 28, 56, 90, 180
36 numune				ÇT		
18 numune	7,5	7,0	Mermer+Tuğla	GM+AT	25+25	7, 14, 28, 56, 90, 180

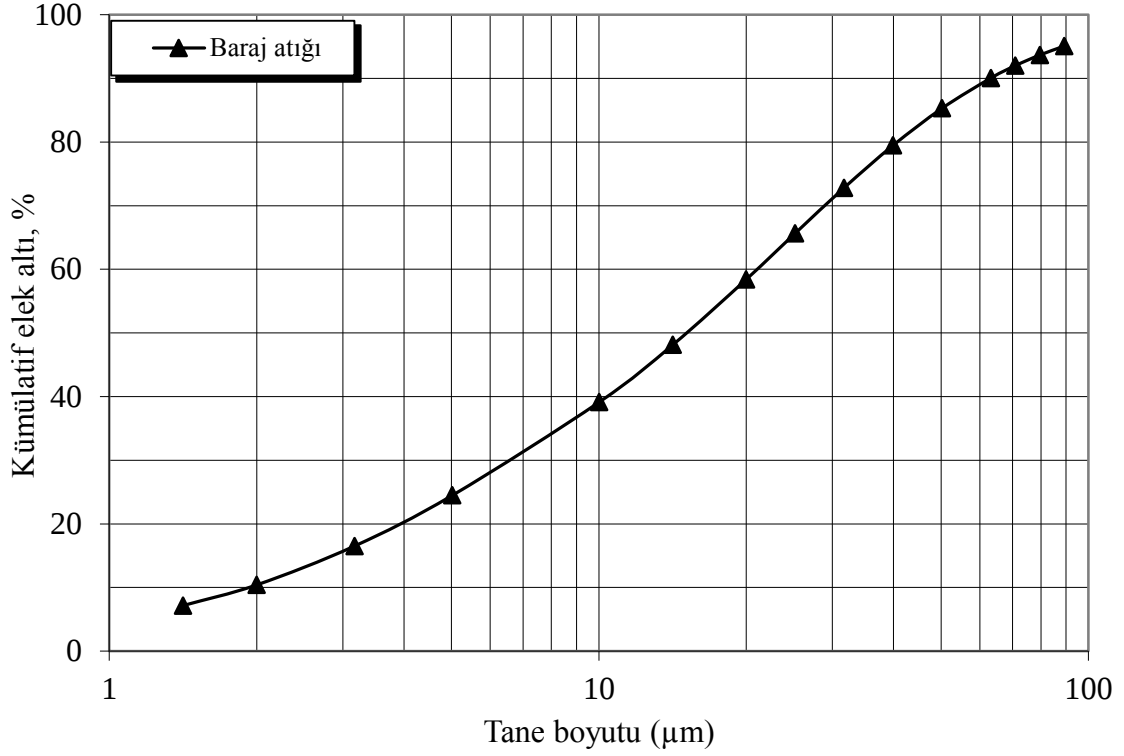
2.2. Atık Malzeme

Atık malzeme; Eti bakır Kastamonu – Küre işletmesinde atık döküm noktasına 40m uzaklıktan alınmıştır. Alınan atık malzeme herhangi bir kirletici tarafından kirletilmemesi ve hava ile temas edip oksidasyona uğramaması için özel hazırlanmış 500 kg kapasiteli varillere doldurularak Macun Dolgu Laboratuvarına getirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Atık malzemelerin cevher hazırlama tesis çıkışından ve atık barajından alınması ve varillere doldurulması

Laboratuvara getirilen baraj atığı, Malvern Mastersizer ile yapılan tane boyut dağılımı analizi sonucuna göre $20\ \mu\text{m}$ altı malzeme miktar %58,42 olup (Şekil 8) orta boyutlu macun dolgu malzemesi (ağırlıkça %35-60 $> 20\ \mu\text{m}$) sınıfına girmektedir. 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; Erçikdi, 2009).



Şekil 8. Deneysel çalışmalarda kullanılan atık malzemenin tane boyut dağılımı

Kullanılan atığın kimyasal bileşimini belirlemek için spektrofotometre ve atomik adsorbsiyon spektrometre (AAS) yöntemleri kullanılmış ve sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Kullanılan atığın kimyasal bileşimlerine (Tablo 6) bakıldığında baskın olarak demir (III) oksit (Fe_2O_3), silisyum dioksit (SiO_2) minerali bulunduğu ve sülfür (S) içeriğinin yüksek olduğu görülmektedir.

Atık malzemenin mineralojik bileşimine bakıldığında genel olarak atık içerisinde kuvars, muskovit albit, klorit gibi silikat grubu minerallerin ve baskın olarak pirit mineralinin bulunduğu görülmektedir. Atığın X-ışınları difraktometre (XRD) cihazı kullanılarak elde edilen mineralojik analizi sonucunda atığın genel olarak yüksek miktarda pirit (FeS_2) minerali içerdiği belirlenmiştir (Ek-1).

Atık malzemenin özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı testleri piknometre ve yüzey alanı ölçer cihazı ile yapılmıştır. Atık malzemenin özgül ağırlığı $3,66 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Atık malzemenin yüzey alanı ise $4630 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. Atık malzemenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri

Özellikler	Baraj atığı (%)
Kimyasal bileşim	
SiO ₂	25,80
Al ₂ O ₃	6,68
Fe ₂ O ₃	39,83
MgO	2,14
CaO	2,79
Na ₂ O	0,35
K ₂ O	0,42
TiO ₂	0,43
P ₂ O ₅	0,03
MnO	0,06
Cr ₂ O ₃	0,02
Kızdırma kaybı	20,6
Toplam	99,15
Sülfür içeriği (S ⁻²) (%)	23,18
Pirit içeriği (FeS ₂) (%)	43,47
Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,66
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	4630
Eğrilik katsayısı ($C_c=(D_{30})^2/(D_{10} \times D_{60})$)	0,99
Üniformluk katsayısı ($C_u=(D_{60}/D_{10})$)	11
Mineralojik bileşim	
	Pirit, Kuvars Kalsit Albit Muskovit Klorit

2.3. Bağlayıcı Malzeme

Bu tez çalışmasında bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu kullanılmıştır. Ayrıca mermer ve tuğla atığının (pişmiş kil) macun dolgu performansına etkisini belirlemek için mermer ve tuğla atığı çimentoya ikame ve ilave şeklinde bağlayıcı olarak kullanılmıştır.

2.3.1. Çimento

Deneysel çalışmalarda bağlayıcı madde olarak; Akçansa çimento fabrikasından temin edilen Portland çimentosu (CEM I 42,5R), kullanılmıştır. Portland çimentosu bu çalışmada puzolanların ve eklenen atıkların etkinliğini görmek için bütün numunelerde ağırlıkça %7 oranında kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan bağlayıcı malzemeye ait fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikler Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri

Özellikler	CEM I 42,5R (%)
Kimyasal bileşim	
SiO ₂	20,57
Al ₂ O ₃	4,81
Fe ₂ O ₃	3,67
MgO	1,35
SO ₃	2,97
CaO	65,27
Na ₂ O	0,41
K ₂ O	0,85
TiO ₂	0,45
P ₂ O ₅	0,13
MnO	0,11
Cr ₂ O ₃	0,075
Serbest CaO	1,19
Kızdırma kaybı	2,1
Toplam	99,90
Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,14
Özgül yüzey (cm ² /g)	4335
Mineralojik bileşim	
C ₃ S	58,44
C ₂ S	14,95
C ₃ A	6,54
C ₄ AF	11,16

CaCO₃ oranı çimentonun hidratasyonu ve macun dolguda dayanımın stabil kalması için önemli bir etmendir.

2.3.2. Mermer Atığı

Bu çalışmada doğal puzolan olarak; Gümüşhane ve Bayburt illerinden temin edilen mermer atığı kullanılmıştır (Şekil 9). Mermer atıkları bağlayıcı fazı içinde CEM I 42,5 yerine kısmen ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında ve bağlayıcı fazı içinde CEM I 42,5 ile beraber ağırlıkça %10 ve 30 oranlarında kullanılmıştır. Tesislerden alınan mermer atıkları ilk olarak laboratuarda merdaneli kırıcıdan (-4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyalı değirmende 60 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 (Tablo 8). Mermer atıklarının, puzolanik etkinlik deneyleri ise TS 25'e göre belirlenmiştir



Şekil 9. Gümüşhane ve Bayburt mermer atığı

Tablo 8. Mermer atıklarının kimyasal, fiziksel ve mineralojik bileşimi

Karakteristik	Gümüşhane Mermer (GM) (%)	Bayburt Mermer (BM) (%)
Kimyasal bileşim		
SiO ₂	1,16	0,10
Al ₂ O ₃	0,53	0,03
Fe ₂ O ₃	0,10	0,07
MgO	0,21	0,11
CaO	55,12	56,37
Na ₂ O	<0,01	<0,01
K ₂ O	0,11	<0,01
TiO ₂	0,01	<0,01
P ₂ O ₅	<0,01	<0,01
MnO	<0,01	<0,01
Cr ₂ O ₃	0,007	0,003
Kızdırma kaybı (LOI)	42,7	43,3
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık	2,72	2,69
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3190	3220
Öğütme süresi (dk.)	60	60
Metilen mavisi (g boya/kg)	0,17	0,17
Toplam organik karbon (%)	0,098	0,110
7 günlük pozolanik aktivite (MPa)	0	0
Mineralojik bileşim		
	Kalsit	Kalsit

Tablo 9’da verilen analiz sonuçlarına göre Bayburt ve Gümüşhane mermer atıklarının C₃A ile reaksiyona girmesi açısından önemli olan CaO içeriklerinin (55,12-56,37) yaklaşık aynı olduğu görülmüştür. Literatür çalışmalarında kullanılan mermerin CaO oranlarına bakıldığında benzer sonuçlar görülmektedir (Kavas, 2007, Ergün, 2011). Bu da çalışmada kullanılan mermerin CaO içeriği olarak uygunluğunu göstermektedir. Bunun yanında dayanıma olumsuz etki yapan Fe₂O₃ değeri de literatür çalışmalarına göre çok düşük seviyededir.

Fiziksel özelliklere bakıldığında ASTM standartlarında belirtilen inceliği (>3000 cm²/g) geçtiği görülmektedir. Bunun yanında belirtilen inceliği sağlamasına rağmen pozolanik aktivite deneylerinde pozolonik özellik göstermemiştir.

Toplam organik karbon içerikleri ve SiO₂ içerikleri bu mermerlerin farklı lokasyonlara ait olduğunu ve Bayburt mermerin su içerisinde ayrılarak oluştuğunu

göstermektedir. Bu da Gümüşhane mermerin Bayburt mermere göre daha asidik olduğunu ıspatlamaktadır.

2.3.3. Tuğla Atığı (Pişmiş Kil)

Tezde puzolan olarak kullanılan tuğla atıkları Trabzon – Araklı tuğla fabrikasından ve Çorum tuğla fabrikasından alınarak kullanılmıştır (Şekil 10). Trabzon Araklı tuğla fabrikasından alınan tuğla 700-800 °C kalsine olmuşken Çorum tuğla fabrikasından alınan tuğlalar 1000-1100 derece kalsine olmuştur. Farrell (2000) yaptığı çalışmada bazı puzolanların (metekoalin) 700°C-800 °C de daha iyi aktif olurken bazılarında >1000 °C de aktif olduğunu belirtmiştir. Wild (1996) tuğla atıklarının en iyi 1000-1100 °C derecede puzolanik aktivite gösterdiğini ortaya koymuştur.



Şekil 10. Trabzon- Araklı ve Çorum tuğla atıkları

Tuğla atığı bağlayıcı fazı içinde ikame ve ilave olarak kullanılmıştır. İkame olarak CEM I 42,5 yerine (örneğin, CEM I 42,5:tuğla atığı; 85:15; 70:30; 55:45) oranlarında, ilave olarak kısmen ağırlıkça %15,45 oranlarında kullanılmıştır.

Tuğla parçaları laboratuarda önce merdaneli kırıcıdan (-4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyeli değirmende 15 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 (Tablo 9,ek 2).

Tablo 9. Araklı ve Çorum tuğlanın fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri

Karakteristik	Araklı Tuğla (AT) (%)	Çorum Tuğla (ÇT) (%)
Kimyasal bileşim		
SiO ₂	69,01	63,35
Al ₂ O ₃	14,66	28,71
Fe ₂ O ₃	4,60	2,24
MgO	1,60	0,42
CaO	3,11	0,80
Na ₂ O	1,94	1,58
K ₂ O	2,34	1,38
TiO ₂	0,54	0,86
P ₂ O ₅	0,11	0,09
MnO	0,07	0,02
Cr ₂ O ₃	0,007	0,028
Kızdırma kaybı (LOI)	1,8	0,0
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık	2,68	2,62
Özgül yüzey alanı (cm ² /gr)	5670	3348
Öğütme süresi (dk.)	15	15
7 günlük pozolanik aktivite (MPa)	9,3	8,7
Kalsinasyon derecesi (°C)	700-800	1000-1100
Reaktif SiO₂ (%)	17,75	28,47
Camsı faz içeriği (%)	55,15	67,89
Mineralojik bileşim		
	Kuvars, Albit, Anortit, Hematit, İllit	Kuvars, Mullit, Opal, Andalüsit

Yapılan deneyler sonucunda kullanılan iki farklı tuğla arasında farklılıklar görülmüştür. Aynı süre öğütülen farklı sıcaklıklarda kalsine olmuş tuğlaların öğütme sonrası özgül yüzey alanları farklı çıkmıştır. Araklı tuğla atığının özgül yüzey alanı 5670 cm²/g çıkarken çorum tuğla atığının yüzey alanı 3348 cm²/gr olarak bulunmuştur. Ayrıca özgül yüzey alana bağlı olarak pozolanik aktivite etkisi de sırasıyla 9,3 ve 8,7 olarak bulunmuştur (Tablo 9). Kavas (2011), yaptığı çalışmada yüzey özgül alanının pozolanik etkinliğe önemli bir etken olduğunu belirtmiştir.

Farell (2001) 4 farklı tuğla atığının betonda kullanılabilirliğine yönelik yaptığı çalışmada camsı faz içeriğinin tuğlanın pozolon olarak kullanılabilirliğinde temel faktör

olduğunu ve camsı faz miktarı arttıkça dayanım arttığını belirtmiştir. Ayrıca, Farell (2001) çalışmasında kullandığı tuğlaların SiO_2 içerikleri %54,83-72,75 arasındadır.

2.4. Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında kullanılan tesis atığı, karışım suyu, bağlayıcı malzemeler, 20,8 litre kapasiteli bir mikser (Univex SRMF20 Stand Model) ile karıştırılarak homojenleştirilmiştir. Karıştırma işlemi 105 devir/dk'lık dönme hızında 7 dakika süreyle yapılmıştır. Bütün macun dolgu numuneleri yaklaşık 19 cm slamp kıvamda hazırlanmıştır.

Hazırlanan dolgu malzemesi 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki drenajlı silindirik numune kalıplarına, her kademede sıkılama/yerleştirme işlemi yapılmak üzere 3 kademede dökülmüştür. Her bir kür süresi için 3 adet numune hazırlanmıştır. Atığın bünyesinde bulunan suya ilaveten, macun dolgu numunelerinin 19 cm slampta hazırlanmasında musluk suyu kullanılmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra bünyelerindeki fazla suyun drene olması için, ortalama 12-18 saat drenaj masasında bekletilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Hazırlanmış drenaj masasında bekletilen numuneler

Bu sürenin sonunda numuneler, hava ile teması kesilecek şekilde plastik poşetlere sarılarak 7-14-28-56-90-180 günlük kür sürelerinde, yaklaşık %85 nemli ortamda, 20°C'de kür dolabında kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 12).



Şekil 12. Kaplanan ve kür odasına konulan numuneler

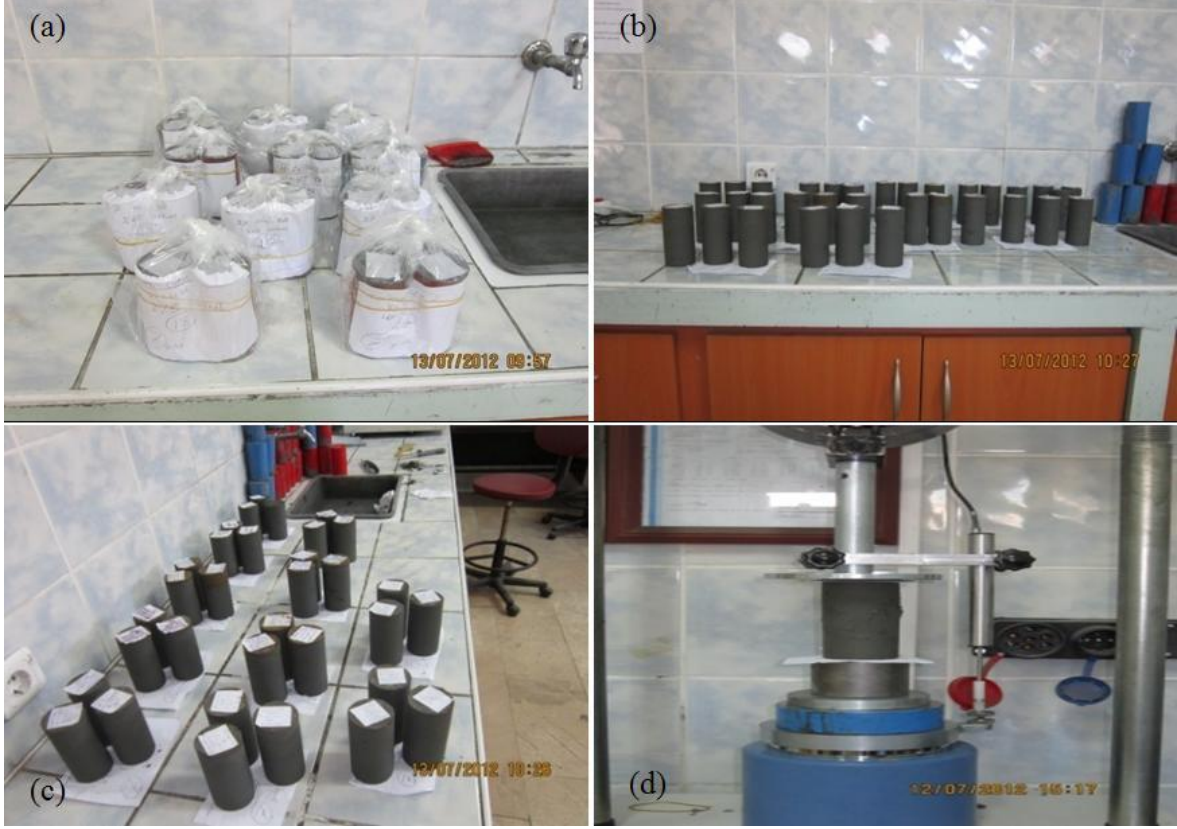
Karışım suyunda bulunan sülfat iyonları; atık bünyesindeki piritin oksitlenmesi ile oluşan sülfat iyonları, musluk suyunda bulunan sülfat iyonları ve flotasyon işlemlerinde kullanılan kimyasallardan kaynaklanan sülfat iyonlarından oluşmaktadır. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda uygun kıvam için başlangıçta atık bünyesinde bulunan su, dizayna bağlı olarak toplam karışım suyunun ortalama %65 ila 80'ini teşkil etmiştir. SO_4^{2-} içeriği yüksek olan sular, macun dolguda uzun dönemde dayanım kayıplarına ve durabilite problemlerine yol açmaktadır (Benzaazoua vd., 2002; Fall vd., 2005; Erçikdi vd., 2009a, b; Erçikdi vd., 2010a, b).

Tuğla atığı ve mermer atığının dayanıma yaptığı katkıyı görmek için standart bağlayıcıya %10-20-30 ikame mermer atığı eklenerek 108 numune, %10-30 ilave edilerek 72 numune, standart bağlayıcıya % 15-30-45 oranlarında tuğla atığı ikame ederek 108 numune, %15-45 ilave ederek 72 numune, mermer ve tuğla atığını beraber ihtiva eden 18 kontrol amaçlı 18 numune olmak üzere toplam 396 numune hazırlanmıştır. Bu numunelerin her biri tek eksenli basınç dayanım testine ve pH analizlerine tabi tutulmuşlardır.

2.5. Tek Eksenli Basınç Dayanımı ve Deformasyon Testleri

Kür dolabında bekletilen 396 adet silindirik macun dolgu numunesi kür süresi dolduktan sonra kür dolabından alınarak tek eksenli basınç dayanımı ve deformasyon testi yapılmıştır. Test 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 13).



Şekil 13. Numunelerin tek eksenli basınç ünitesinde kırılması

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 3 numuneden elde edilen değerlerin ortalaması olarak alınmıştır.

2.6. pH Analizleri

SO_4^{2-} içeriği yüksek olan bu tür sular, macun dolguda uzun dönemde dayanım kayıplarına ve durabilite problemlerine yol açmaktadır (Benzaazoua vd., 2002; Fall vd., 2005; Erçikdi vd., 2009a, b; Erçikdi vd., 2010a, b).

Çalışılan bu tez yüksek oranda pirit içeren atıkla yapıldığı için piritin bozunması ve buna bağlı olarak oluşan asit ve sülfatın macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisini araştırmak için tek eksenli basınç dayanımı testlerini takiben, bütün kür sürelerinde

numunelerin pH analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada dolgu bünye suyunun (gözenek suyu) asit belirlenmesi için kullanılan analiz yönteminde, ASTM D 4972-01, 2007 ve ASTM D 4980-89, 2003 standartlarından esinlenilerek, macun dolguya uyarlanmıştır.

Her bir kür süresinde dayanım testlerinden sonra ilgili numunelerden alınan temsili örnekler, paslanmaz çelikten imal mutfak rendesi ile rendelenmiştir (Şekil 14a). Daha sonra rendelenen numuneler 2,36 mm'lik elekten elenerek poşetlere konulmak suretiyle hava ile temasları kesilmiştir. Bu numunelerden bir miktar temsili örnek ayrılarak, nem tayin cihazında (Sartorius MA35) nem içerikleri belirlenmiştir (Şekil 14b). Nem içeriğine bağlı olarak örneklerin katı ve sıvı miktarları (orijinal dolgu bünye suyu) belirlenmiş ve numuneler, katı/sıvı oranı ağırlıkça 1/1 olacak (500 gr katı) şekilde 800 ml'lik beherlere konularak üzerine saf su ilave edilmiştir (Şekil 14b). Örnekler daha sonra paslanmaz çelikten yapılmış bir el mikseri ile 5 dk karıştırılmıştır (Şekil 14c).

Karıştırma işleminden hemen sonra beherin üzeri plastik bir örtü ve paketlenme lastiği ile kapatılarak hava ile teması kesilmiştir. Bir saatlik bekleme süresi sonunda, karışımın üst kısmında biriken sıvı kısım bir huni ve filtre yardımı ile (Whatman No 1) süzülerek ayrılmış (Şekil 14b) ve pH'sı (Oakton pH/Con 510 pH metre, WD-35805-04: cam gövde, tekrar doldurulabilir pH probu) belirlenmiştir (Şekil 14d).



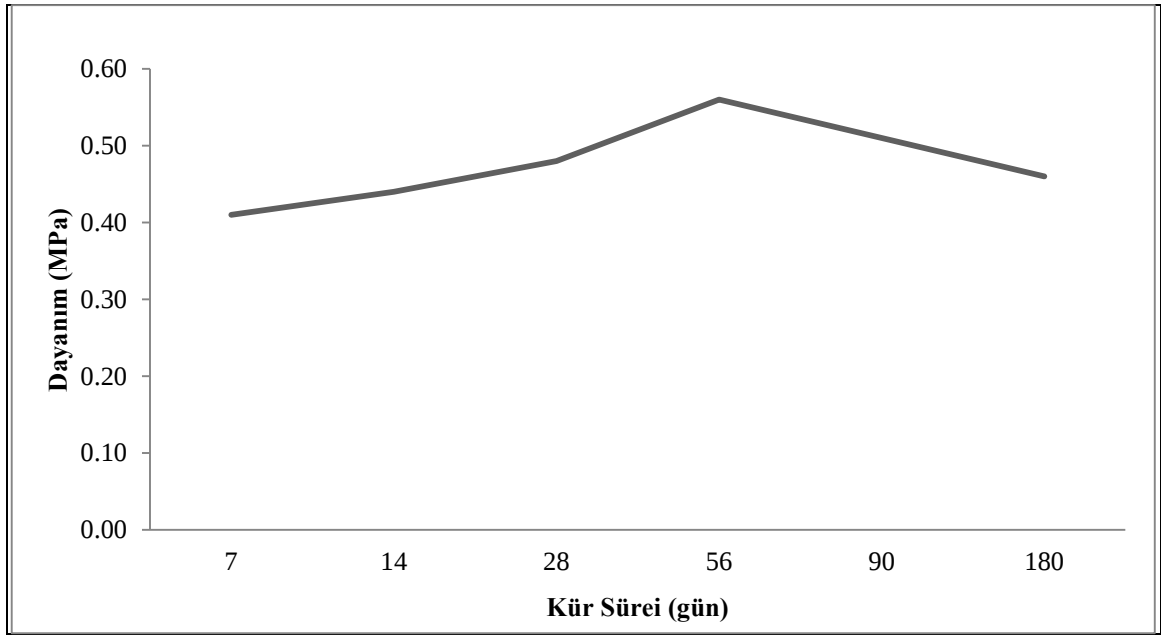
Şekil 14. Numunelerin nem ve pH tayinlerinin yapılması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Macun Dolgunun Dayanımının Değerlendirilmesi

Yapılan çalışmada 2 farklı mermer ve tuğla atığı kullanılmıştır. Bu katkıları ikame ve ilave olarak katılmıştır. Bağlayıcı yerine ve bağlayıcı ile beraber kullanılan mermer ve tuğla atıkları farklı oranlarda kullanılmış ve dayanıma yaptıkları etkiler ölçülmüştür.

%7 oranında standart bağlayıcı (CEM I 42,5) ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin dayanım grafiği Şekil 15 de verilmiştir. 56 güne kadar yükselen dayanım 56 günden sonra düşme göstermektedir. Bu düşüşü Cihangir vd. (2009) yapmış olduğu çalışmada sülfat atak etkisine bağlamıştır. Bu durumu önlemek, mermer ve tuğla atıklarının macun dolguda kullanılabilirliğini belirlemek için yapılan deney sonuçları aşağıda verilmiştir.



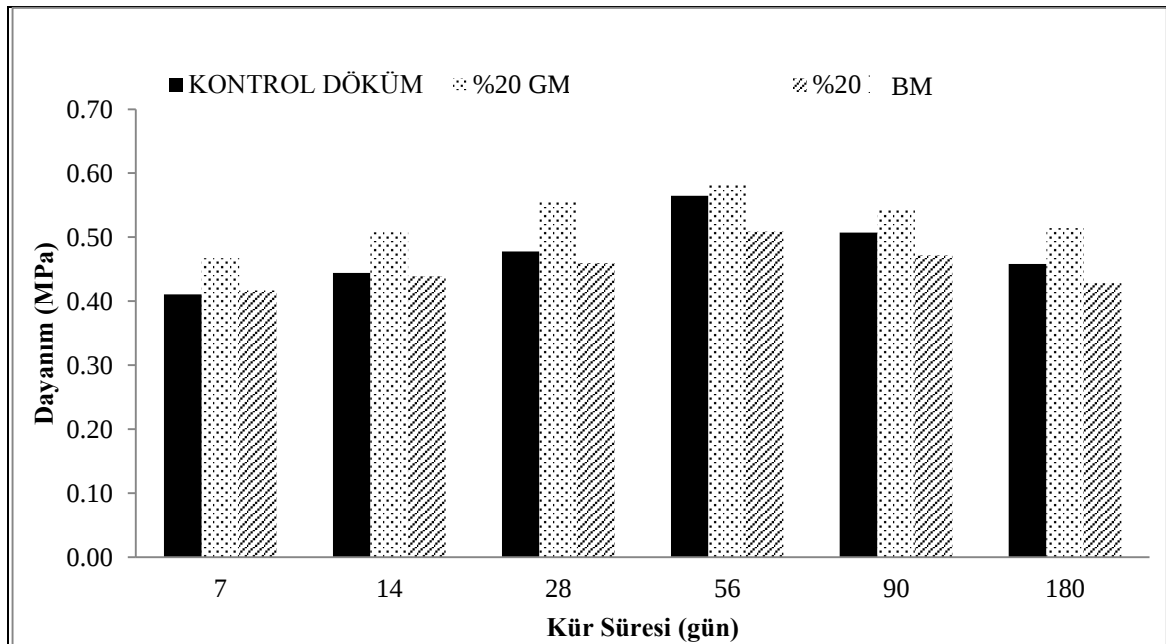
Şekil 15. Portland çimentosu ile hazırlanan kontrol numunelerinin dayanımı

3.1.1. Öğütülmüş Mermer Atığının İkame Olarak Kullanılması

Çalışmada kullanılan Bayburt ve Gümüşhane'den alınan mermer atıkları ikame olarak standart bağlayıcı (CEM I 42,5) yerine ağırlıkça %10-20-30 (örneğin, CEM I 42,5:mermer atığı;80:20) katılarak hazırlanan macun dolgunun tek eksenli basma dayanımı incelenmiştir.

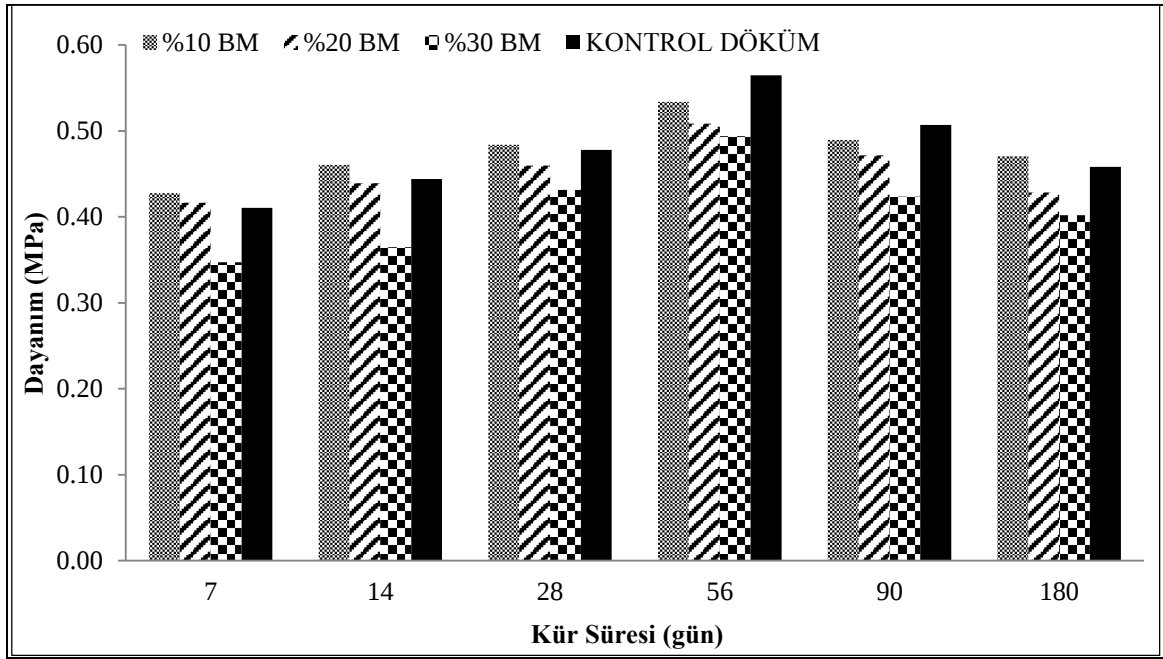
Macun dolguya %20 oranında Portland çimento yerine farklı mermer atıkları katılmış ve dayanım sonuçları Şekil 16'da verilmiştir. Bayburt mermer atığı (BM) travertenden Gümüşhane mermer atığı (GM) kireçtaşından elde edilmiştir. Tablo 9'da yapılmış analizler sonucu toplam organik karbon içerikleri ve SiO_2 içerikleri bu mermerlerin farklı lokasyonlara ait olduğunu ve Bayburt mermerin, kireçtaşının su içerisinde ayrışması sonucu oluştuğunu göstermektedir.

Gümüşhane mermer atığı (GM) ilaveli numunelerin dayanımının daha yüksek çıktığı görülmüştür (Şekil 15). %20 BM ikameli numunelerin 180 gün sonraki dayanımları 0,43 MPa iken GM'in dayanımı 0,51 MPa'dır. GM'in SiO_2 içeriği %1,16 iken, BM'nin %0,1'dir. Bu da dayanımda oluşan farkı göstermektedir. Lin vd.(2011) ve Kavas vd.(2007) yaptıkları çalışmada, mermer içerisindeki SiO_2 ve Al_2O_3 'ün karışım içerisinde C-S-H ve C-A-S-H oluşumunda önemli bir etmen olduğunu ortaya koymuşlardır.



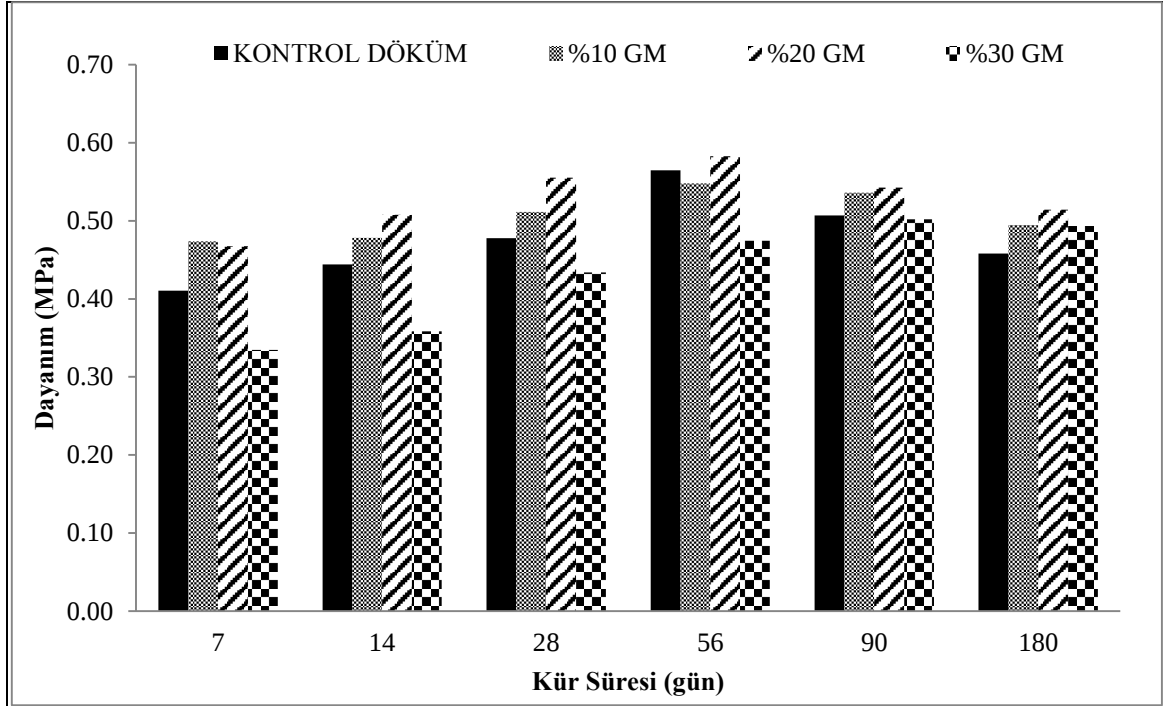
Şekil 16. İkame olarak katılan farklı mermer atıklarının tek eksenli basınç dayanımı

Dayanım sonuçlarına bakıldığında mermer atığı ikameli numunelerin dayanımları kontrol numunelerinin dayanımlarından fazla olduğu görülmektedir. Tablo 9’da belirtilen pozolonik etkinliği olmayan mermer de bu atış boşluk doldurma etkisine bağlanabilir. Rai (2011) beton üzerinde yaptıkları çalışmada mermer atığının ince agrega yerini tuttuğu böylece karışımdaki ara yüzeyi artırarak çimentonun etkinliğini artırdığını ve böylece dayanımın arttığını ortaya koymuştur.



Şekil 17. İkame Bayburt mermer atığının tek eksenli basınç dayanımı

Şekil 17’de görüldüğü gibi Bayburt mermer atığının (BM) dayanım üzerinde çok fazla bir etkisi yoktur. %10-20 oralarındaki BMT 7 ve 14 günlük kür sürelerinde kontrol numunesinin dayanımını geçmiştir. 56 gün sonunda %10 ikameli numunelerin tek eksenli basma dayanımları 0,53 MPa’la ulaşmıştır. 180 gün sonunda %10 ikameli numunelerin dayanımları %11,32 azalırken kontrol numunelerinin dayanım değeri %28,57 azalmıştır. %10 GM ikameli numunelerde ise 56 gün sonunda kazanılan dayanım %10,91 düşerek 0,49 MPa’a gerilemiştir (Şekil 18). Dayanım kayıplarının kontrol numunesine göre az olmasını, CaCO_3 varlığında uzun dönemde numunede oluşacak sülfat atak etkisini engellemiş olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Erçikdi vd. (2009b) yapmış oldukları çalışmada macun dolguda uzun dönemde dayanım düşmesinin en önemli nedeninin sülfat atak etkisi olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 18. İkame Gümüşhane mermer atığının tek eksenli basınç dayanımı

İkame edilen mermer oranı arttıkça her iki atık türünde de dayanım değerlerinin düştüğü görülmüştür (Şekil 17-18). Agarwal vd. (2006) ve Ergün (2011) betonda yaptıkları çalışmada standart bağlayıcı yerine kullanılan mermer atığı ikame oranı arttıkça dayanımın düştüğü belirtmişlerdir. Bu dayanım düşmesi karışımdaki klinker miktarının azalmasıyla ilişkilendirilebilir.

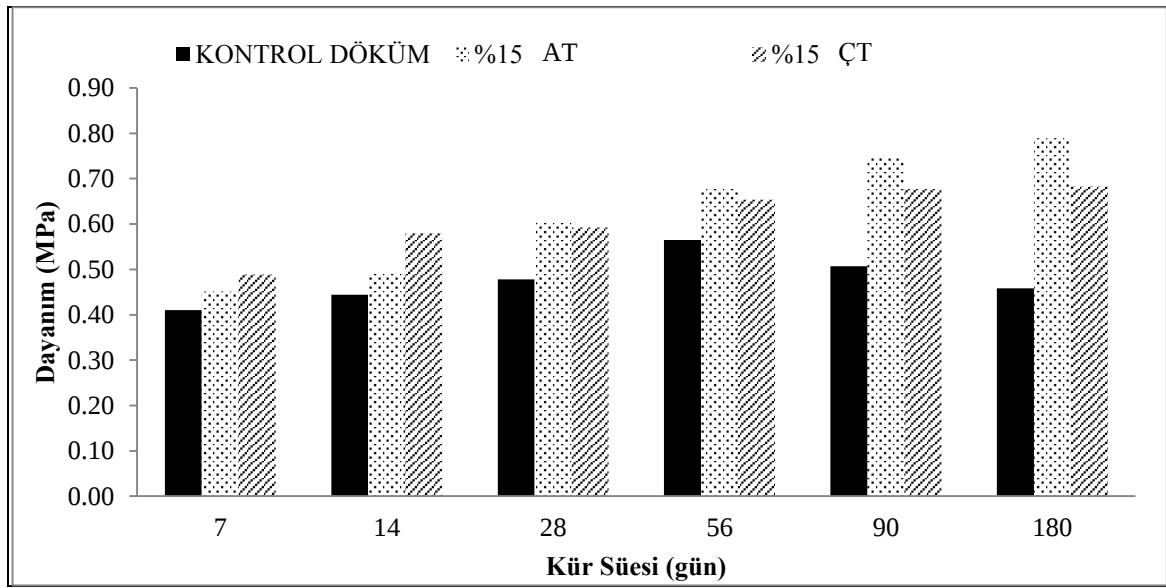
3.1.2. Öğütülmüş Tuğla Atığının İkame Olarak Kullanılması

Çalışmada kullanılan Çorum ve Trabzon-Araklı'dan alınan tuğla atıkları ikame olarak standart bağlayıcı (CEM I 42,5) yerine ağırlıkça %15-30-45 oranında (örneğin, CEM I 42,5:tuğla atığı;70:30) katılarak macun dolgunun tek eksenli basma dayanımı incelenmiştir.

Macun dolguya %15 oranında Portland çimento yerine farklı tuğla atıkları katılmış ve dayanım sonuçları Şekil 19'da verilmiştir. Araklı tuğla atığının dayanımı Çorum tuğla atığına oranla daha fazla artırdığı şekil 19'da görülmektedir.

Trabzon Araklı tuğla fabrikasından alınan tuğla 700-800°C kalsine olmuşken Çorum tuğla fabrikasından alınan tuğlalar 1000-1100 °C'de kalsine olmuştur. Farrell (2001) ve

Kavas vd. (2007) yaptıkları çalışmalarda bazı puzolanların (metakolin) 700-800°C'de daha iyi aktif olurken bazılarının ise 1000°C'nin üzerinde aktif olduğunu belirtmişlerdir. Wild (2001) yaptıkları X-ray analizleri sonucu farklı sıcaklık aralıklarında farklı puzolanik bileşenler oluştuğunu ve tuğla atıklarının en iyi 1000-1100°C'de puzolanik aktivite gösterdiğini ortaya koymuştur. Yapılan çalışmada kalsine sıcaklığı düşük olmasına karşın özgül yüzey alanı ve puzolanik aktivite indeksi yüksek olan (Tablo 10) Araklı tuğla atığının dayanımı daha yüksek çıkmıştır (Şekil 19).



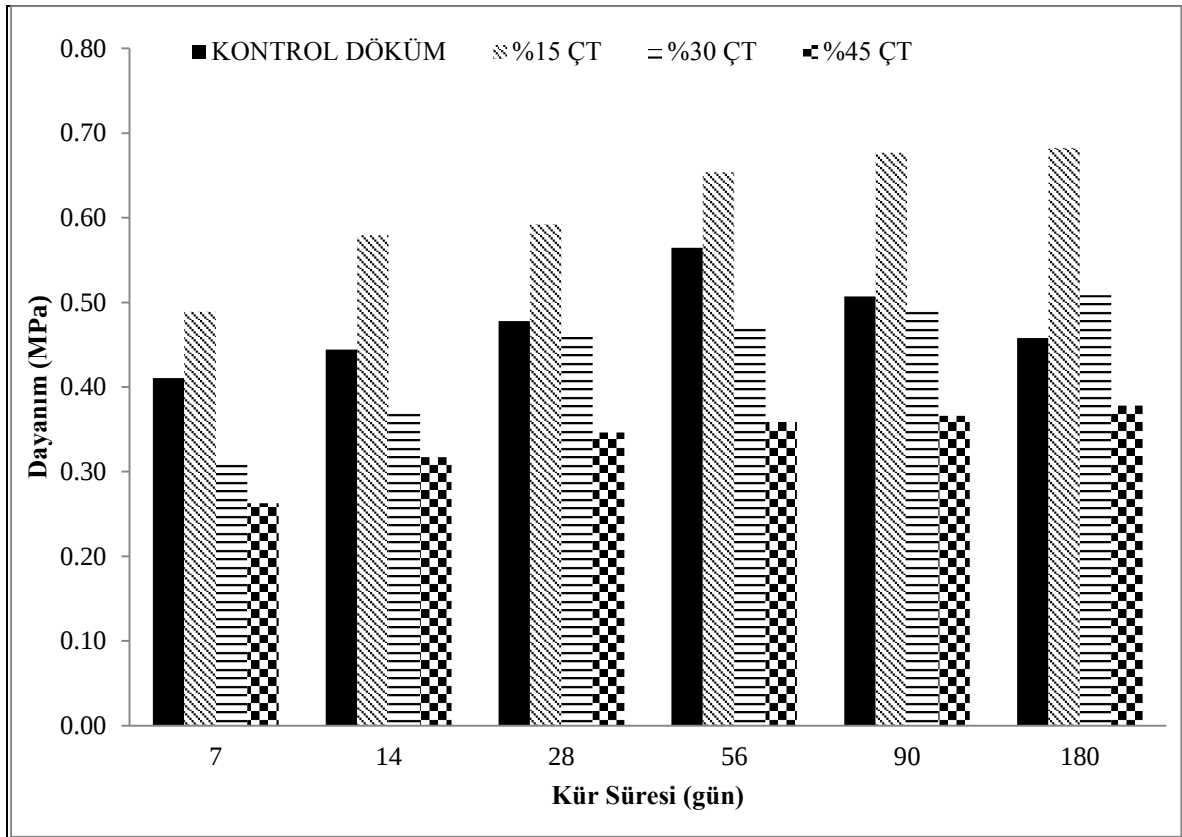
Şekil 19. İkame olarak katılan farklı tuğla atığının tek eksenli basınç dayanımı

Şekil 20'de görüldüğü gibi %15-45 oranlarında katılan Çorum tuğla atığı (ÇT) dayanıma etki etmektedir. %15 oranında katılan ÇT'nin dayanımı kontrol numunesinin dayanımını bütün kür sürlerinde geçmiştir. Bunun yanında 180 gün sonunda tek eksenli basınç dayanımı 0,68 MPa'ı bulmuş ve uzun dönemde dayanım düşmesi olmamıştır.

Farrell vd. (2001) betonda standart bağlayıcıya %10-20-30 oranlarında tuğla atığı ikame ederek yaptığı çalışmada tuğla atığının tek eksenli basma dayanımı artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca Farrell yaptığı çalışmada düşük çamsı faz ihtiva eden tuğla atıklarının dayanımlarının daha düşük olduğunu vurgulamıştır.

%45 oranında kullanılan ÇT'nin genel olarak dayanımı çok düşüktür (Şekil 20). Bu da karışımda bulunan bağlayıcı oranının neredeyse yarı yarıya düşürülmesinden kaynaklanmaktadır.

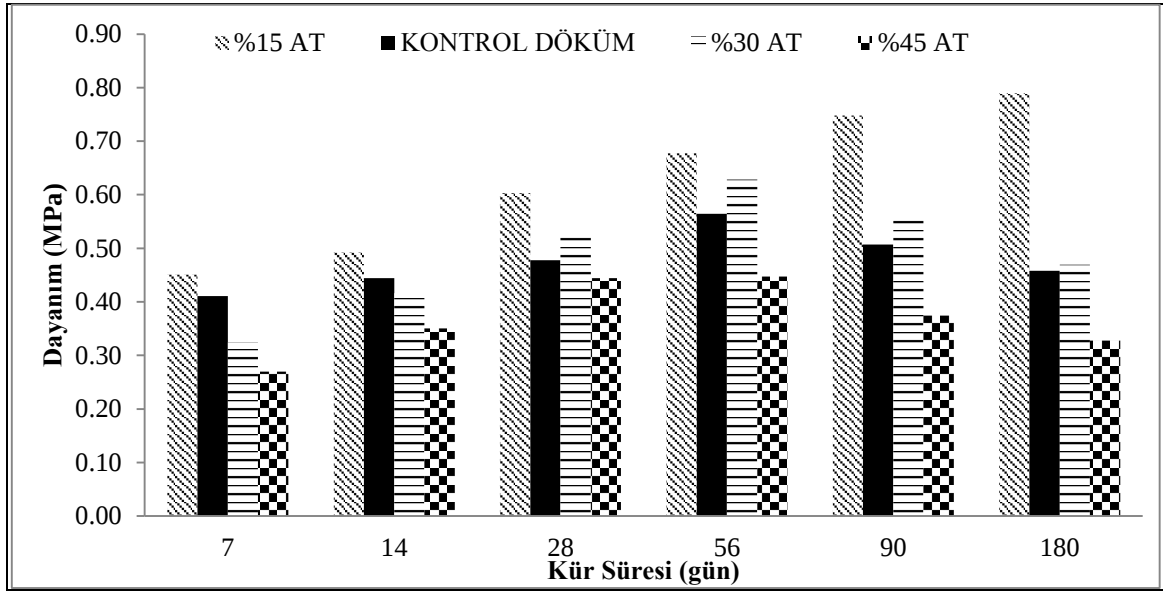
Kontrol numunesinin dayanımı kısa dönemde (7-14-28) hidrasyonun yoğun olduğu için artış göstermektedir. 56. günden sonra sülfat atak etkisi olduğundan dolayı dayanımda düşme görülmektedir (Şekil 20-21). Lin vd. (2009) puzolanik aktivitenin 28 günden sonra başladığını ve C-S-H oluşumunun karışım içerisindeki boşlukları doldurarak sıkışmayı artırdığını, bunun da tek eksenli basınç dayanımını arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca SiO_2 'nin C-S-H, C-A-H ve C-A-S-H oluşumunu artırdığını, yüksek oranlarda (%30-40-50) kullanılan tuğla atıklarının, aktif olması için karışım içinde yeterli Ca(OH)_2 bulamadığından dayanımı düşürebileceğini söylemiştir. Cihangir vd. (2011) yaptığı çalışmada uzun kür süresinde macun dolguda dayanım düşmesinin sülfat atak etkisinden kaynaklandığını net bir şekilde ortaya koymuştur.



Şekil 20. İkame Çorum tuğla atığının tek eksenli basınç dayanımı

Şekil 21’de görüldüğü gibi %15 Araklı tuğla atığı (AT) içeren numunelerde 180 gün boyunca dayanım artışı görülmektedir. 180 gün sonunda dayanım 0,79 MPa’a ulaşmıştır. Kontrol numunesi ve diğer oranlarda katılan puzolanlar kısa dönemde dayanımda artış gösterirken uzun dönemde düşme eğilimi göstermişlerdir. 7 günlük kür süresi sonunda tek

eksenli basınç dayanımı kontrol numunesinin altında olan %30 oranındaki AT 14 gün sonunda kontrol numunesini geçmiştir (Şekil 21). Kavas (2007) yapmış olduğu çalışmada kil çerisindeki SiO_2 'nin çekirdek görevi görerek C-S-H jeli oluşumunu artırdığını ortaya koymuştur.

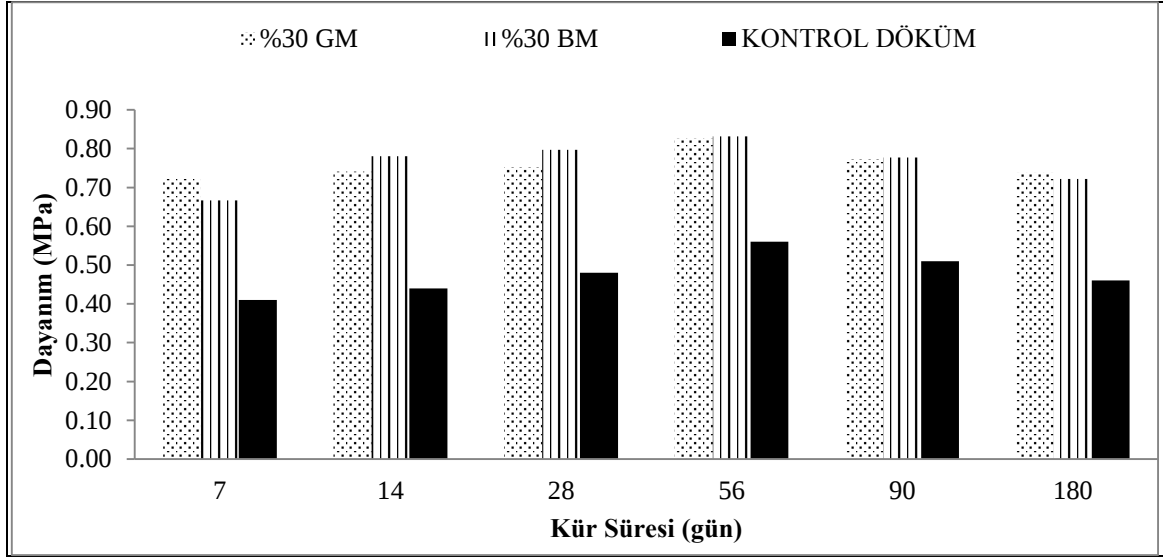


Şekil 21. İkame Araklı tuğla atığının tek eksenli basınç dayanımı

3.1.3. Öğütülmüş Mermer Atığının İlave Olarak Kullanılması

Bayburt ve Gümüşhane'den alınan mermer atıkları Portland Çimentosuna (CEM I 42,5) ilave olarak ağırlıkça %10-30 (örneğin, CEM I 42,5:mermer atığı;70:30) oranında katılmıştır.

Mermer atığının ilave olarak bağlayıcıya (CEM I 42,5) ağırlıkça %30 oranlarında ilave edilmesi dayanımlarda farklılıklar oluşturmuştur (Şekil 22). Kontrol numunesi ile aynı oranda bağlayıcı içeren mermer atığı ilaveli numunelerin dayanımları yüksek çıkmıştır. Gümüşhane ve Bayburt mermer atıkları arasında tek eksenli basınç dayanımı sonuçları açısından önemli bir fark görülmemiştir. Bunun nedeninin mermerin fiziksel özellikleri olduğu düşünülmektedir. Ayrıca mermerin mikro boşlukları doldurucu etkisinden dolayı bir dayanım artışı mevcuttur. Rai (2011) beton üzerinde yaptıkları çalışmada mermer atığının ince agrega yerini tuttuğunu, karışımdaki ara yüzeyi artırarak çimentonun etkinliğini ve böylece dayanımı artırdığını ortaya koymuştur.



Şekil 22. İlave edilen mermer tipinin basınç dayanımına etkisi

Şekil 23’de görüldüğü üzere %10-30 oranlarında ilave olarak katılan GM dayanımı kontrol numunelerinin dayanımını bütün kür süreleri için geçmiştir.

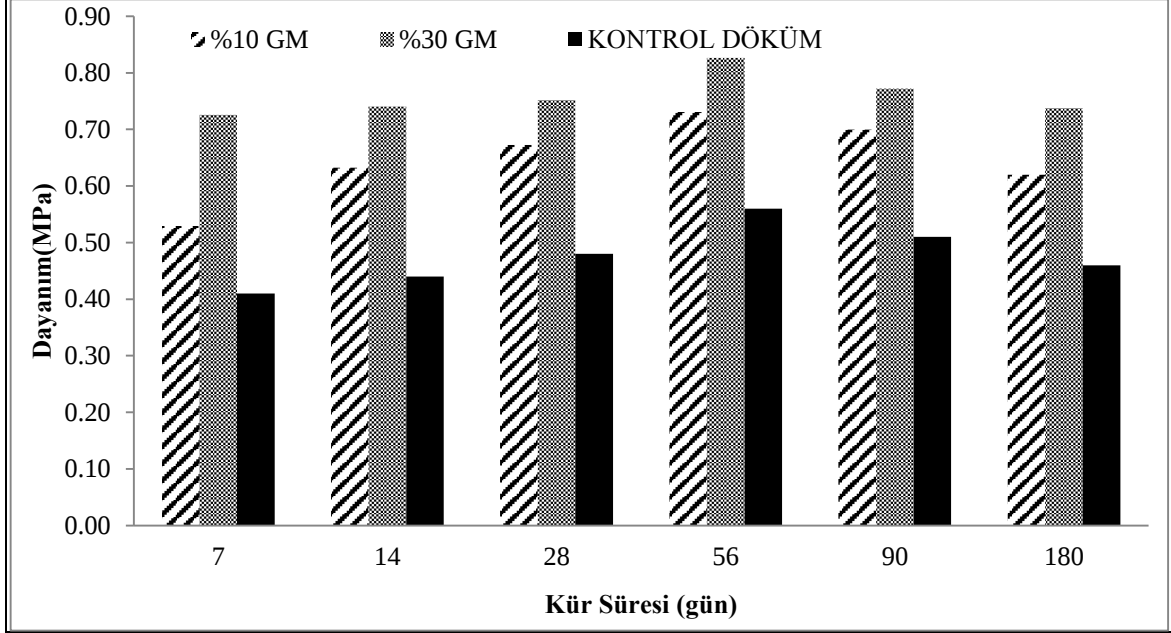
%10 oranında bağlayıcıya ilave edilen GM dayanımı 56 günlük kür süresi sonunda 0,73 MPa iken kontrol numunesi 0,56 MPa dayanım göstermektedir. Bağlayıcı miktarı sabitken kontrol numunesi ile GM ilaveli numunenin farklı dayanım göstermesi mermer atığının fiziksel yapısından kaynaklandığı göstermektedir.

%30 oranında ilave GM içeren numunelerin dayanımı oldukça yüksektir (Şekil 23). Bu da karışımda bulunan bağlayıcı oranının sabit olmasından ve mermerin fiziksel özelliğinin birleşmesiyle ortaya çıkan bir durumdur. Kontrol numunesi 56 gün sonunda 0,56 MPa dayanım verirken 180 gün kür süresi sonunda bu dayanım %18 oranında düşerek 0,46 MPa’a düşmüştür. GM ilaveli numunelerin 180 gün sonunda tek eksenli basınç dayanımı %11 oranında azalma göstermiştir. Bu farkın mermerin içerdiği CaCO_3 ’dan dolayı sülfat atak etkisini engellemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kontrol numunesinin dayanımı kısa dönemde (7-14-28) hidratasyonun yoğun olduğu için artış göstermektedir. Ancak 56 gün sonra sülfat atak etkisi olduğundan dolayı dayanımda düşme görülmektedir.

Agarwal vd. (2006) ve Ergün (2011) betonda yaptıkları çalışmada standart bağlayıcı yerine kullanılan mermer atığında ikame oranı arttıkça dayanımın düştüğünü belirtmişlerdir. Bu durumun, mermer atığının puzolanik özellik göstermemesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Erçikdi vd. (2009) yapmış oldukları çalışmada macun dolguda uzun dönemde dayanım düşmesinin en önemli nedeninin sülfat atak etkisi olduğunu belirtmişlerdir

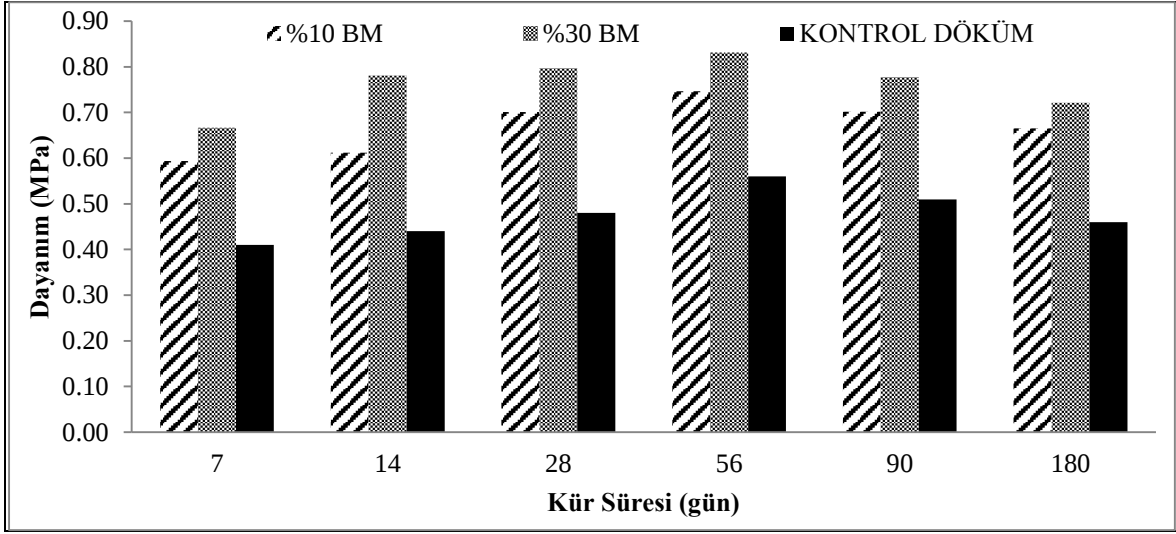


Şekil 23. İlave Gümüşhane mermer atığının basınç dayanımına etkisi

Şekl 24’de görüldüğü gibi %10-30 oranında ilave edilen Bayburt mermer atığının (BM) dayanımı artırdığı görülmektedir.

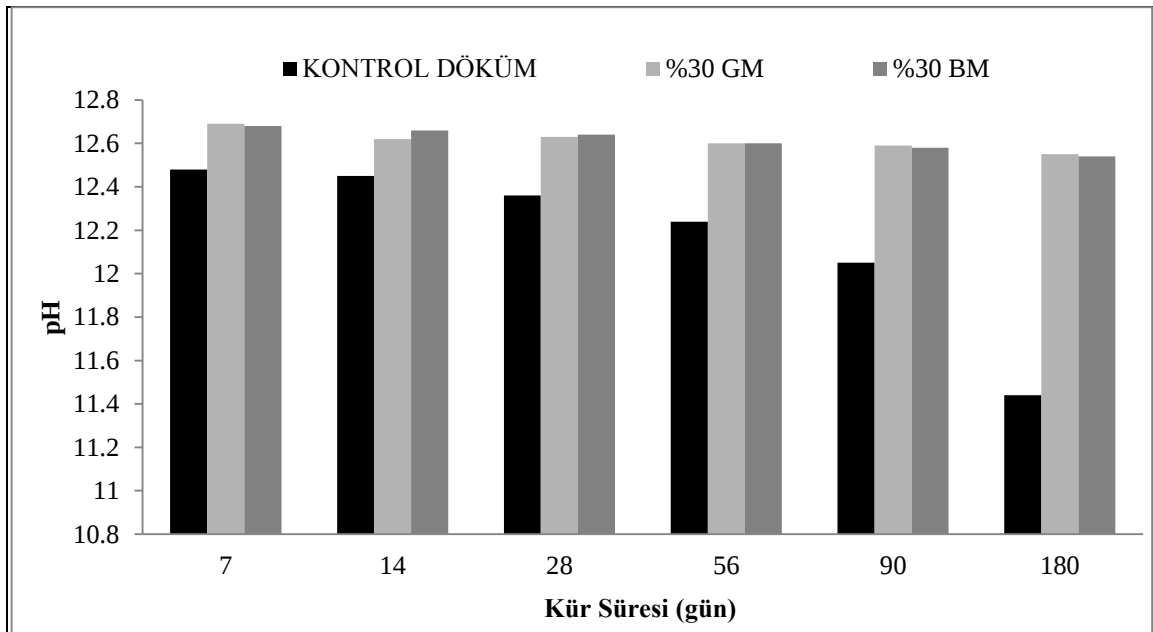
%10 BM ilaveli numuneler 56 gün sonunda 0,75 MPa dayanım vermişlerdir. 180 günlük kür süresi sonunda %11 dayanım kaybı göstermiştir. Bu dayanım düşmesine rağmen 180 gün sonunda kontrol numunesine göre %46 daha fazla dayanım göstermiştir.

En yüksek dayanımı %30 BM içeren numuneler vermiştir. 56 günlük kür süresi sonunda dayanımı maksimum seviyede olan numuneler 180 gün sonunda %14 dayanım kaybı yaşamışlardır.



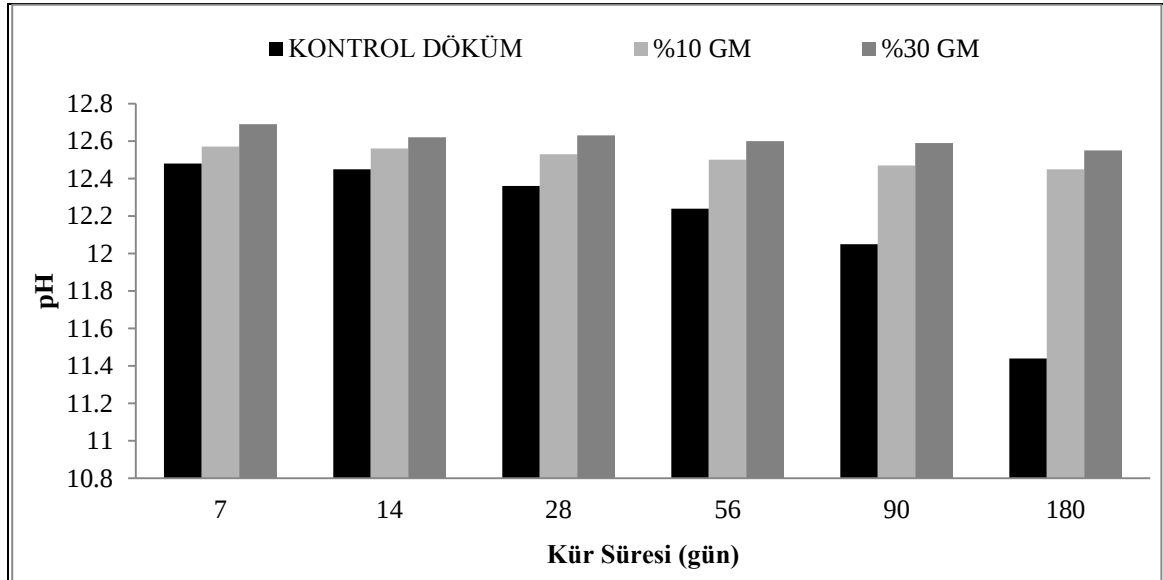
Şekil 24. İlave Bayburt mermer atığının basınç dayanımına etkisi

Portland çimentosuna %30 oranında GM ve BM ilave edilerek hazırlanan numunelerin pH ölçümleri Şekil 24’de verilmiştir. 180 günlük kür süresi sonunda Gümüşhane ve Bayburt mermer atığının pH’ları içerdikleri CaCO_3 ’dan dolayı çok az değişme gösterirken kontrol numunesinin pH’sı düşmüştür. Uzun dönemde pH düşmesi standart bağlayıcı ile hazırlanan numunelerde asit oluştuğunu ve sülfat atak etkisi görülebileceğini göstermektedir.



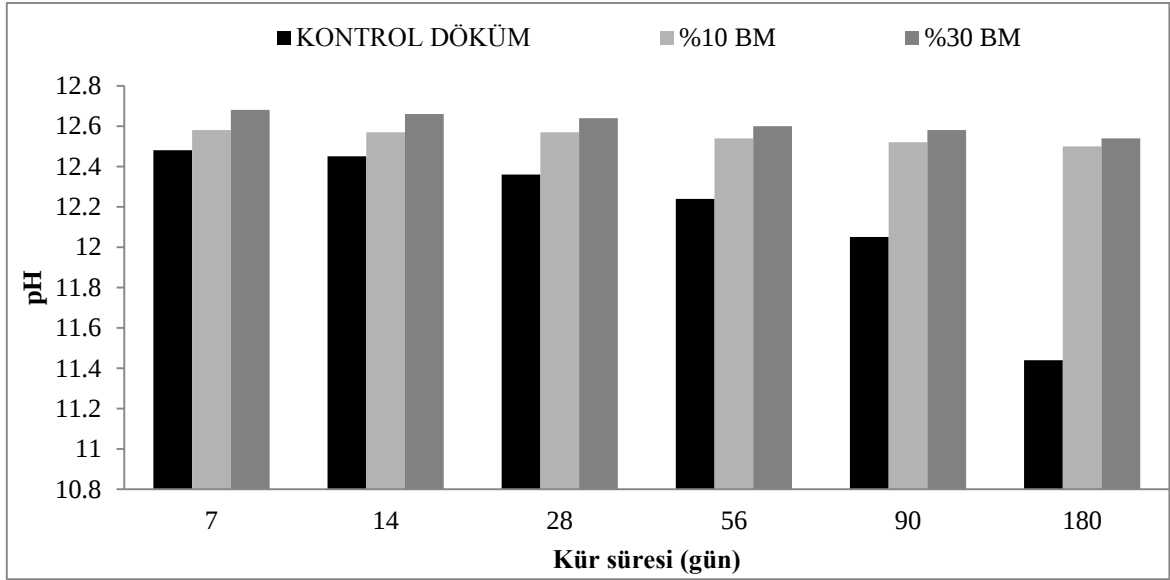
Şekil 25. İlave edilen Gümüşhane ve Bayburt mermer atığının pH üzerindeki etkisi

Portland çimentosuna %10 ve 30 oranlarında ilave olarak katılan Gümüşhane mermer atığının (GM) pH üzerindeki etkisi Şekil 26’da verilmiştir. 7 günlük kür süresi sonunda pH değerleri yaklaşık 12,65 civarında iken 180 gün sonunda 12,50 seviyesine düşmüştür. Kontrol numunesinin pH değeri ise %8,33 azalarak 11,44’e gerilemiştir.



Şekil 26.İlave edilen Gümüşhane mermer atığının pH üzerindeki etkisi

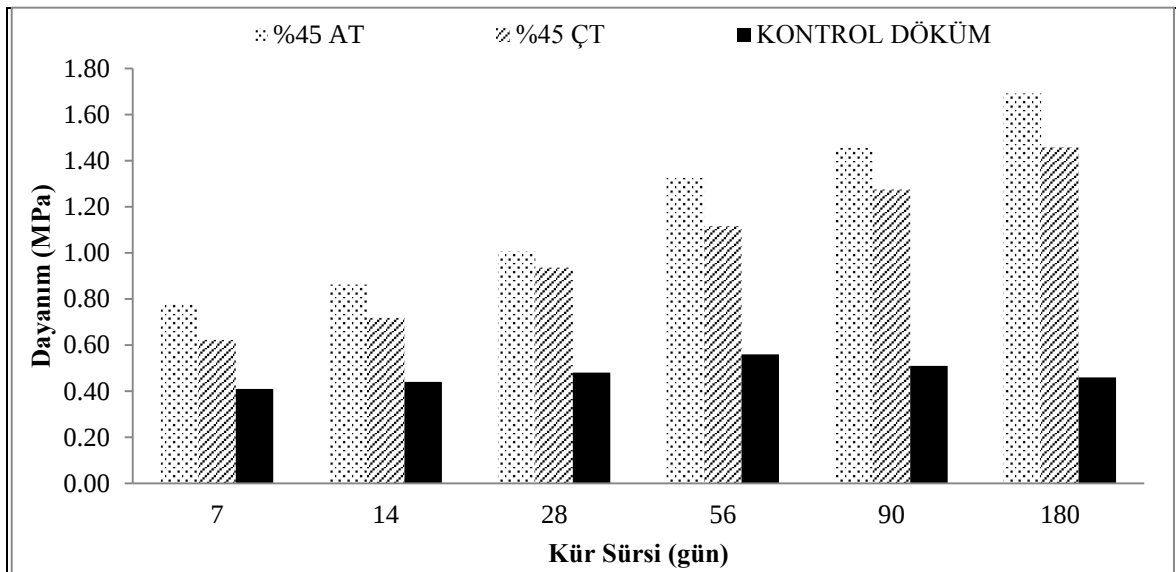
Portland çimentosuna ağırlıkça %10-30 oranında BM ilave edilerek hazırlanan numunelerin kür süresine bağlı pH sonuçları Şekil 27’de verilmiştir. Erken kür süresinde hidrasyon hızlı bir şekilde devam ettiği için pH değerleri yüksektir. Uzun dönemde mermerin yapısındaki CaCO_3 sayesinde pH seviyesinde fazla bir değişim olmamıştır.



Şekil 27. İlave edilen Bayburt mermer atığının pH üzerindeki etkisi

3.1.4. Öğütülmüş Tuğla Atığının İlave Olarak Kullanılması

Çalışmada standart bağlayıcıya (CEM I 42,5) %45 oranında ilave edilen Araklı ve Çorum tuğla atıklarının dayanıma etkileri Şekil 28’de verilmiştir. Her iki tuğla atığının da dayanıma önemli bir katkı yaptığı görülmektedir. Kontrol numunesinde dayanım en fazla 0,59 MPa iken %45 oranında tuğla atığı ihtiva eden numunede en fazla 1,69 MPa olarak okunmuştur.

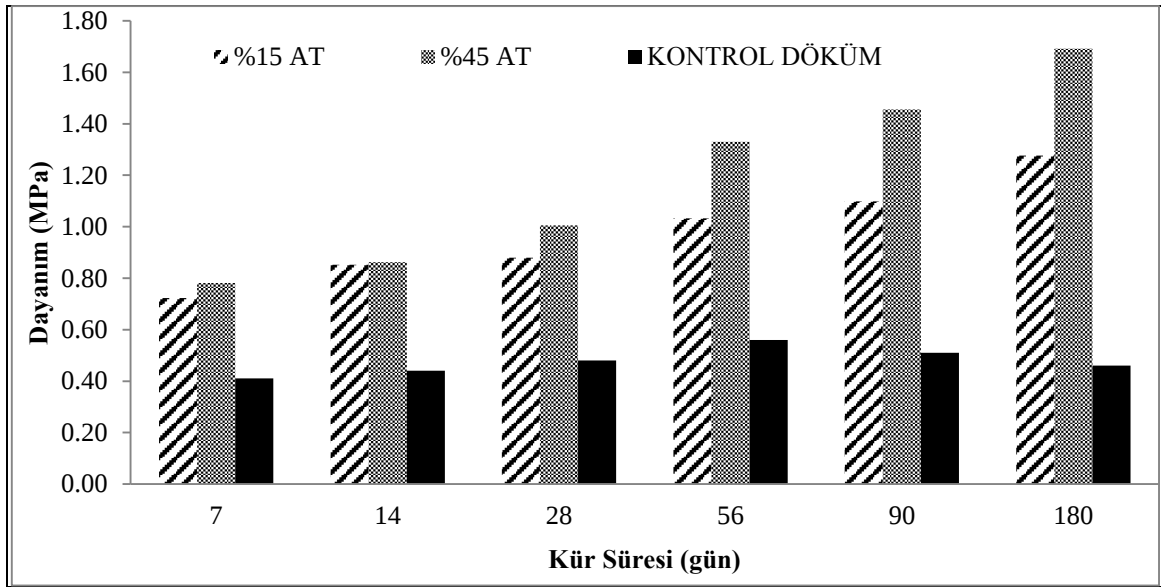


Şekil 28. İlave edilen tuğla tipinin basınç dayanımına etkisi

Yapılan çalışmada %15-45 oranlarında bağlayıcıya ilave olarak kullanılan Araklı tuğla atığı (AT) puzolan etkisi göstermektedir (Şekil 29).

%15 AT ilaveli numuneler 7 gün sonunda tek eksenli basınç dayanımı 0,72 MPa gelirken 180 gün sonunda bu dayanım %78 artarak 1,28 MPa olmuştur. 180 gün sonunda kontrol numunesinden %178 daha fazla dayanım üretmiştir (Şekil 29).

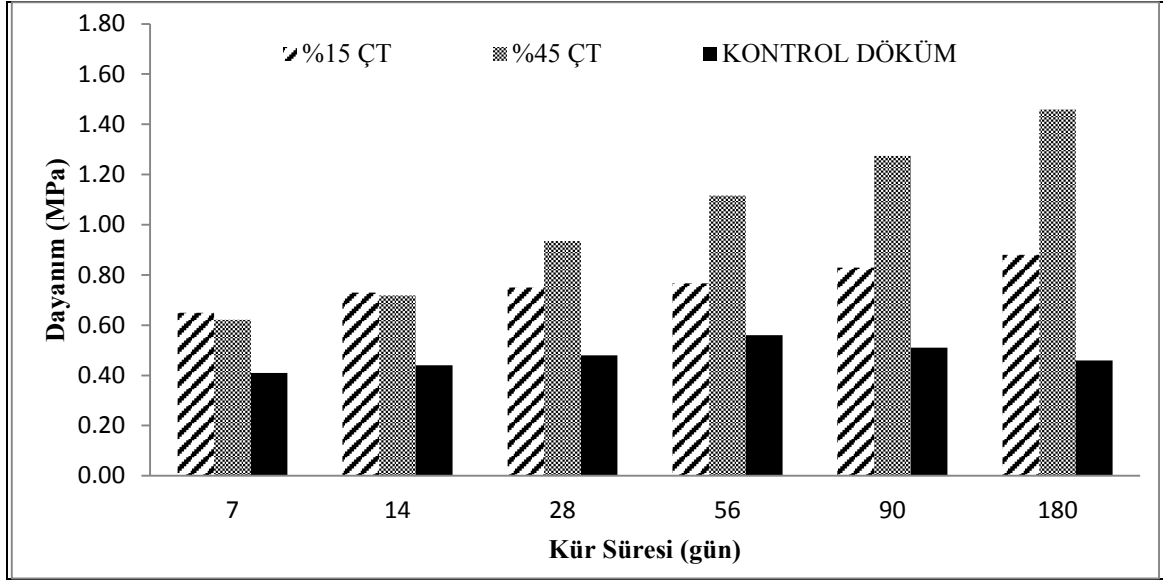
%45 AT ilaveli numunelerin tek eksenli dayanımları diğer numunelere oranla çok daha fazladır (Şekil 29). 180 gün sonunda kontrol numunesine göre %267 daha fazla dayanım vermektedir. Dayanımın bu oranda artması puzolanik özellik ve boşlukların dolması ile ilişkilendirilebilir. Ancak bunun için mikroyapı (SEM, MIP vb.) analizlerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 29. İlave Araklı tuğla atığının basınç dayanımına etkisi

Şekil 30'da görüldüğü gibi ilave edilen %15-45 oranındaki Çorum tuğla atığı (ÇT) tek eksenli basma dayanımına önemli ölçüde katkı yapmıştır. İlave edilen ÇT oranı ile dayanım kazanımı arasında lineer bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

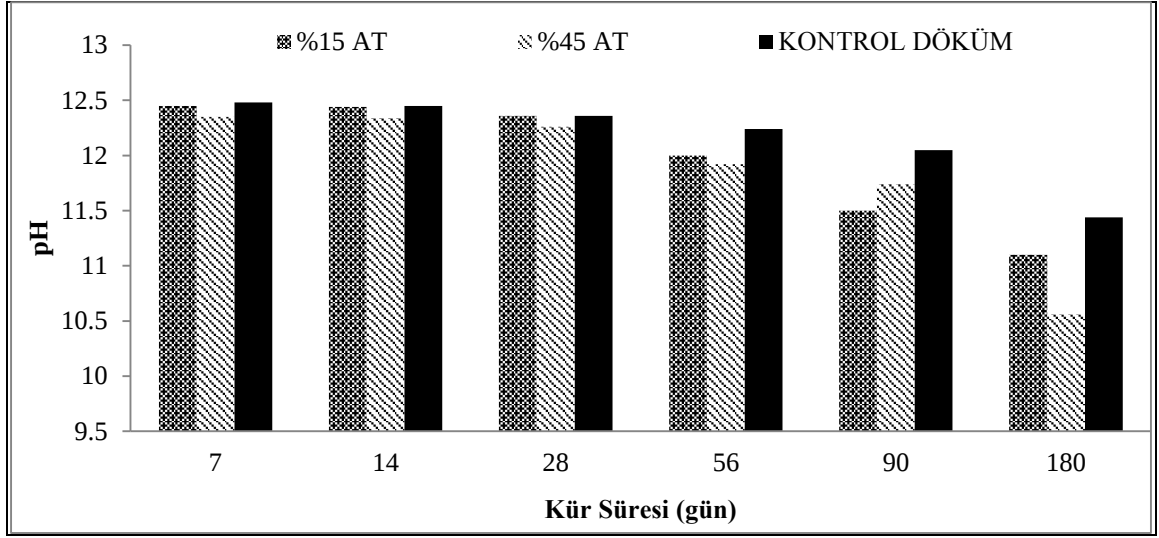
%15 ÇT ilaveli numuneler 180 gün sonunda 0,88 MPa, %45 ÇT ilaveli numuneler ise 180 günlük kür süresi sonunda 1,46 MPa dayanıma ulaşmıştır (Şekil 30).



Şekil 30. İlave Çorum tuğla atığının basınç dayanımına etkisi

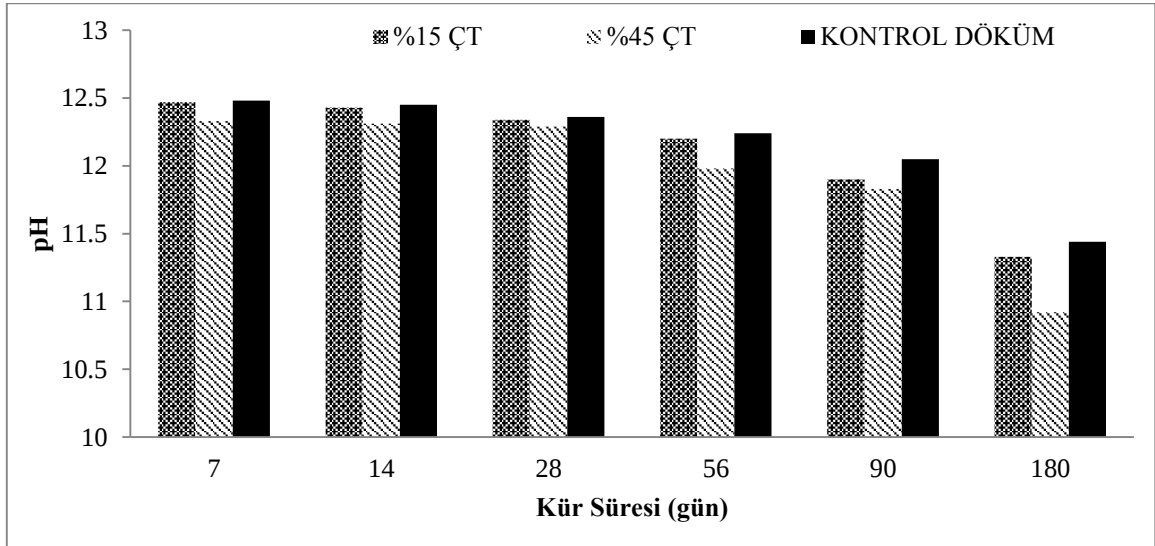
Standart bağlayıcıya %15-45 oranında ilave edilen Araklı tuğla atığı (AT) pH seviyesinde büyük oranda düşmeye sebep olmuştur (Şekil 31). 28 gün sonuna kadar 12,4 seviyelerinde olan pH 28 günden sonra hızlı bir düşüş gerçekleştirmiştir. 180 gün sonunda kontrol numunesine göre %15 AT ilaveli numune %2,97 azalırken %45 ilaveli numune %7,7 azalmıştır. %45 oranında AT ihtiva eden numunelerdeki bu düşüş dayanımı da bu ölçüde artırmıştır.

Standart bağlayıcıya ağırlıkça %15-30-45 oranlarında ikame olarak katılan Çorum tuğla atığının (ÇT) pH değişimine etkisi Şekil 32’de verilmiştir. 7 gün sonundaki pH değerleri aynı olan ikame katkıları 180 gün sonunda azalma göstermişlerdir. Çalışmada kullanılan numunelerin tamamında pH düşme gösterirken bu azalma 28 günden sonra daha belirgindir.



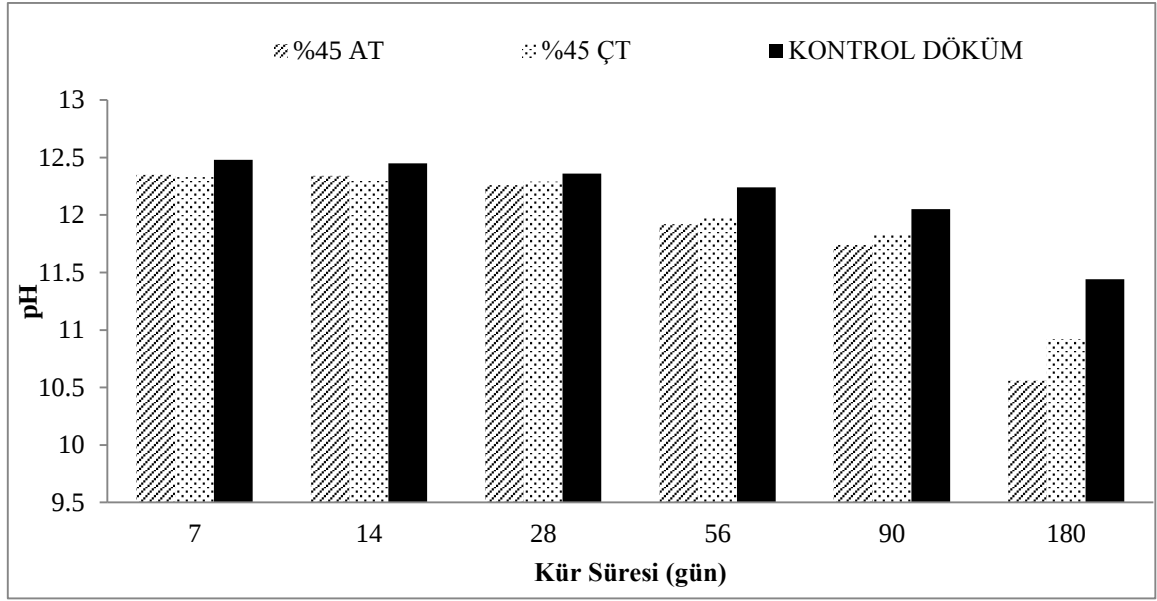
Şekil 31. İlave edilen Araklı tuğla atığı pH üzerindeki etkisi

Şekil 32’de görüldüğü gibi standart bağlayıcıya ilave edilen %15 ve 45 oranında Çorum tuğla atığı (ÇT) pH seviyesini düşürmüştür. 14 gün sonunda düşmeye başlayan pH 180 gün sonunda 11 seviyesine gerilemiştir.



Şekil 32. İlave edilen Çorum tuğla atığının pH üzerindeki etkisi

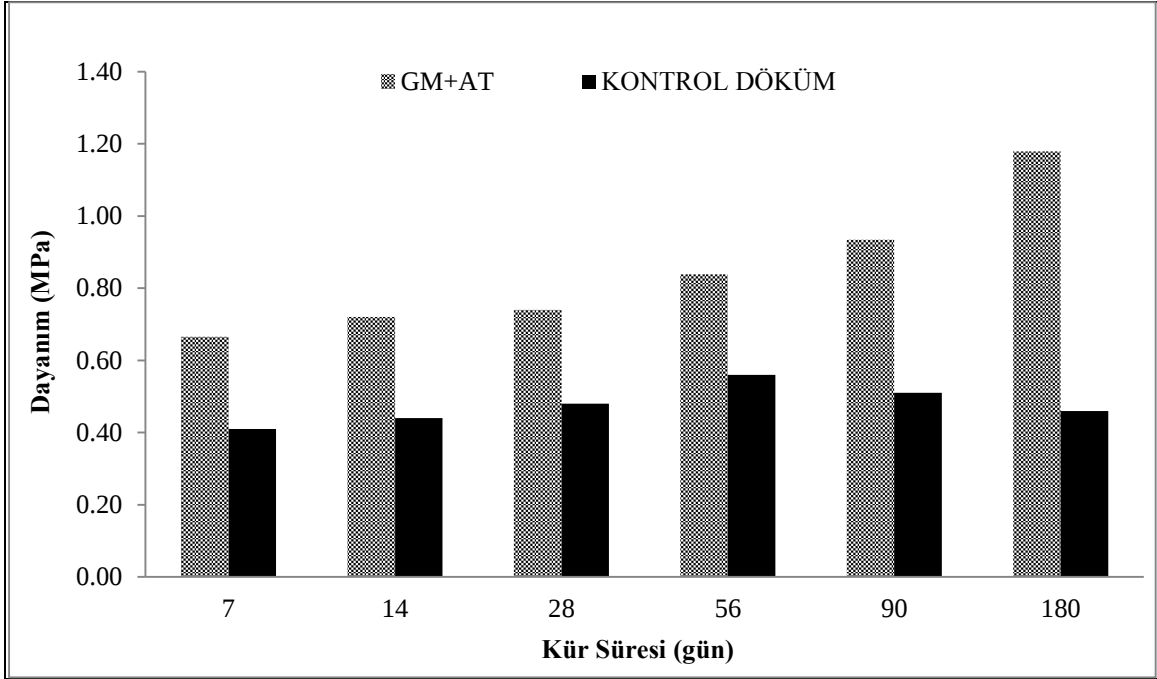
180 günlük kür süresi sonunda ÇT kullanılarak hazırlanan numunelerin pH seviyesi AT ile hazırlananlara kıyasla daha yüksek seviyededir. Bu durum daha önce yapılan çalışmalarla uyumlu olarak kalsinasyon derecesi yüksek olan ÇT’nin sülfatlı ortamlara karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir (Wild vd., 1997).



Şekil 33. İlave edilen tuğla atıklarının pH üzerindeki etkisi

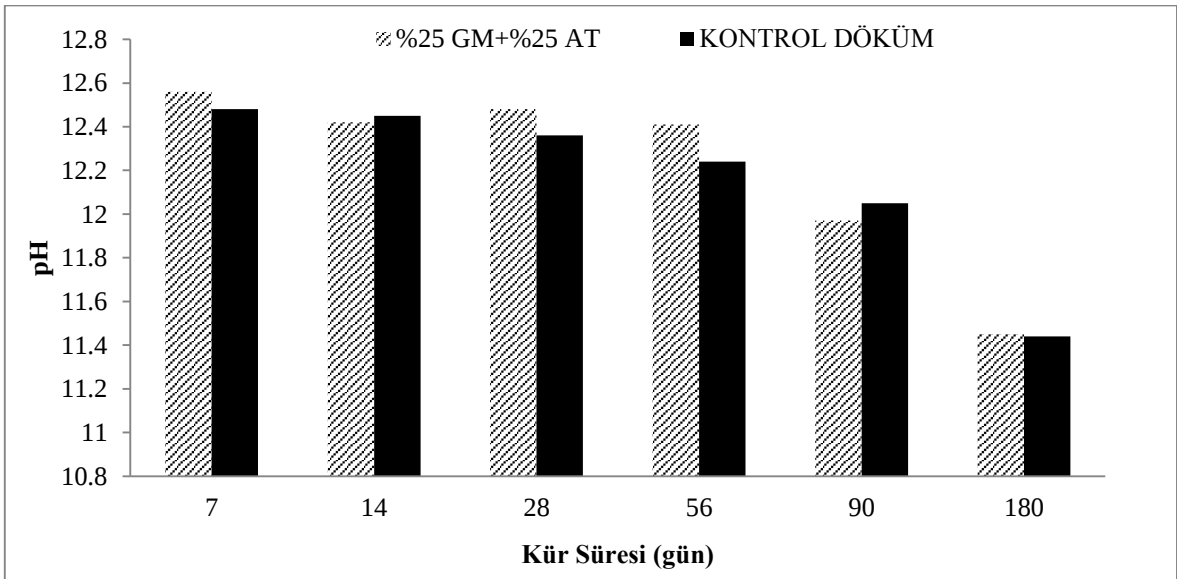
3.1.5. Öğütülmüş Mermer ve Tuğlanın İlave Olarak Kullanılması

Mermer ve tuğla atığının birlikte yaptığı etkiyi görebilmek için standart bağlayıcıya ilave olarak %25 oranında mermer atığı ve %25 oranında tuğla atığı eklenerek numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin tek eksenli basınç dayanımları bütün kür sürelerinde lineer olarak artmıştır (Şekil 34). 180 gün kür süresi sonunda tek eksenli basınç dayanımı kontrol numunesine göre %157 artmıştır.



Şekil 33. İlave Gümüşhane mermer ve Araklı tuğla atığının basınç dayanımına etkisi

Puzolan çimentoya kütlece yaklaşık %25 Araklı tuğla atığı (AT) ve %25 Gümüşhane mermer atığı ilave edilerek hazırlanan numunelerin pH analizleri Şekil 35’de verilmiştir. Tuğla atığının puzolonik olmasından dolayı reaksiyon devam ettiği için pH seviyesi 180 gün sonunda kontrol numunesi ile hemen hemen aynıdır.



Şekil 34. İlave edilen Araklı tuğla ve Gümüşhane mermer atığının pH üzerindeki etkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada öğütülmüş mermer ve tuğla atıkların sülfürlü macun dolgunun kısa ve uzun dönem mekanik performansına etkisi değerlendirilmiştir. Hazırlanan macun dolgunun dayanım ve duraylılık performansı ve kür süresine bağlı asit (pH) analizleri ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. İki farklı mermer ve iki farklı tuğla atığının kullanıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıdaki gibidir;

- i. %7 oranında Portland çimentosu (CEM I 42,5) ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımları 56. güne kadar yükselmiş daha sonra düşme göstermiştir.
- ii. Portland çimentosu (CEM I 42,5) yerine ikame olarak ağırlıkça %10-30 oranında Gümüşhane mermer (GM) ve Bayburt mermer (BM) kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanımı kontrol numunesine yakın veya düşük seviyede dayanım üretmiştir.
- iii. Puzolanik özelliği olmamasına karşın Portland çimentosuna ilave olarak %10 ve %30 oranında Gümüşhane ve Bayburt mermer kullanımı macun dolgu numunelerini dayanımı önemli derecede artırmıştır. Ayrıca öğütülmüş mermer atığı içeren numunelerin uzun dönemde asitik ortamlara karşı daha dirençli olduğu ortaya çıkmıştır.
- iv. Macun dolgu numunelerinin hazırlanmasında bağlayıcı olarak kullanılan CEM I 42,5 yerine ikame olarak ağırlıkça %15-45 oranında öğütülmüş Araklı tuğla (AT) ve Çorum tuğla (ÇT) kullanımı dolgu dayanım ve duraylılığını önemli derecede etkilemiştir. İkame olarak %15 oranında AT ve ÇT içeren numuneler kontrol numunesine kıyasla bütün kür sürelerinde daha yüksek dayanım üretmiştir. Buna karşın, karışımda AT ve ÇT ikame oranı arttıkça dolgu dayanımı azalmıştır. Aynı ikame oranında AT içeren numuneler daha yüksek dayanım kazanımı sağlamasına karşın ÇT içeren numunelerin asidik ortamlara karşı kalsinasyon derecesinin yüksek olması nedeniyle daha dirençli olduğu gözlemlenmiştir.
- v. Normal bağlayıcıya CEM I 42,5 %15 ve %45 oranında AT ve ÇT ilave edilerek hazırlanan macun dolgu numuneleri bütün kür sürelerinde kontrol numunesine kıyasla daha yüksek dayanım ve duraylılık göstermiştir. %15 GM + %25 AT ilave edilmesi durumunda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

5. ÖNERİLER

- i. Portland çimentosu (CEM I 42,5) kullanılarak hazırlanan numunelerde 56. günden sonra görülen dayanım kayıplarını asit ve sülfat etkisi sonucu oluşan ikincil alçıtaşı ve etrenjit mineralleri ile ilişkilendirebilmek için mikroyapı (SEM) ve minerolojik (XRD) analizler yapılmalıdır.
- ii. Öğütülmüş mermer ve tuğla atığı kullanımının dayanım ve duraylılığa faydalı etkisini bilimsel açıdan desteklemek için mikroyapı (MIP) analizleri yapılarak özellikle katkıların puzolanik etkinliğini ve boşlukları doldurma özelliklerinin ortaya konulması gerekmektedir.
- iii. Farklı cevher zenginleştirme atıkları (altın, gümüş vb.) mermer ve tuğla atıklarının kullanılarak ilave çalışmalar yapılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Agarwal, S.K.ve Gulati, D., 2006. Utilization of İndustriyal Wastes and Unprocessed Micro-fillers for Making Cost Effective Mortars, Construction and Building Materials, 20, 999-1004.
- 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.
- Alyamaç, K.E. ve İnce, R., 2009. A Preliminary Concrete Mix Design for SCC with Marble Powders, Construction and Building Materials 23, 1201-1210.
- Amaratunga, L. ve Hein, G.G., 1997. Development of a High Strength Total Tailings Paste Fill Using Fine Sulfide Mill Tailings, Proceedings Of The 29th Annual Conference of The Canadian Mineral Processors, Ottawa (Ontario), Canada, 293-305.
- Annor, A.B., 1999. A Study of the Characteristics and Behaviour of Composite Backfill Material. PhD Thesis, McGill University, Montreal, 396 p.
- ASTM C 125, 2003. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, Conshohocken, 1-4.
- ASTM C 219, 2007. Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, American Standard of Testing Materials, Philadelphia.
- ASTM C 39, 2005. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 39, 2002. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of American Standard of Testing Materials Standards, 04.02.
- ASTM C 595M, 1997. Standart Spesification for Blended Hydraulic Cements (Metric), Annual Book of American Standard of Testing Materials Standards.
- ASTM C 618, 1994. Standard Specification for Coal Fly Ash and Rawor Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 618-05, 2005. Standard Specification for Fly Ash And Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use As Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. In: Annual Book of ASTM Standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania.

- ASTM C 989., 2006. Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM D 4972-01, 2007. Standard Test Method for pH of Soils, Annual Book of American Standard of Testing Materials Standards.
- ASTM D 4980-89., 2003. Standard Test Methods for Screening of pH in Waste, Annual Book of American Stand. of Testing Materials Standards.
- Bahar, D.L., 2010. The Effect of The Using Waste Marble Dust as Fine Sand on The Mechanical Properties of The Concrete, International Journal of The Physical Sciences, 5,9, 1372-1380.
- Belaidi, A.S.E., Azzouz L., Kadri, E. ve Kenai, S., 2012. Effect of Natural Pozzolana and Marble Powder on the Properties of Self-Compacting Concrete, Construction and Building Materials, 31 251–257
- Belem, T. ve Benzaazoua, M., 2008. Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology, Geotechnical and Geological Engineering, 26,2, 147-174.
- Bellmann, F., Moser, B., ve Stark, J. 2006. Influence of Sulphate Solution Concentration on The Formation of Gypsum in Sulphate Resistance Test Specimen, Cement and Concrete Research 36, 358-363
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman P. ve Verburg, R., 1999a. Cementitious Metal Release and Acid Drainage Using Cementitious Materials: A Review, Journal of Environmental Science, 6, 423-436.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P. ve Verburg, R., 1999b. Cementitious Backfill with High Sulfur Content: Physical, Chemical and Mineralogical Characterization, Cement and Concrete Research, 29, 719-25.
- Benzaazoua, M. ve Belem, T., 2000. Optimization of Sulfurous Paste Backfill Mixtures for Increased Long-Term Strength and Durability, Waste Treatment and Environmental Impact in the Mining Industry, Clean Mine Technology, 1, 343-352.
- Benzaazoua, M., Belem, T. ve Bussiere, B., 2002. Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill, Cement and Concrete Research 32, 1133-44.
- Benzaazoua, M., Fall, M. ve Belem, T., 2004. Contributing to Understanding the Hardening Process of Cemented Pastefill, Minerals Engineering, 17, 2, 141-152.
- Benzaazoua, M., Bussiere, B. ve Aubertin, M., 2007. Microstructural Evolution of Cemented Paste Backfill, Mercury Intrusion Porosimetry test Results Serge Ouellet.

- Beycioğlu, A., Başıyigit, C., Subaşı, S. ve Kırgız, M. S., 1997. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı İle Geri Kazanılması ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması Hacettepe Üniversitesi Polatlı Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ankara.
- Böke, H., Akkurt, S. ve Pekoğlu, B., 2004. Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özellikleri, Yapı Dergisi, 269, 90–95.
- Brackebusch, F.W., 1994. Basics of Paste Backfill Systems, Mining Engineering, 46-10, 1175-8.
- Buchwald, A. ve Schulz, M., 2005. Alkali-Activated Binders By Use of Industrial By-Products, Cement and Concrete Research 35,5, 968-973.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M., Sümer, M. ve Yurdusev, M., 2003. Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash as Replacement Materials in Cement Production, Cement and Concrete Research, 34,5, 731-735.
- Cihangir, F., Turan, A., Erçikdi, B., Kesimal, A. ve Deveci, H., 2009. Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufunun Macun Dolguda Bağlayıcı Olarak Kullanılabilirliği, Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Antalya, 579-585.
- 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.
- Cohen, M.D., ve Mather, B. 1991. Sulphate Attack on Concrete-Research Needs, ACI Materials Journal 88,, 62-69.
- Conner, J.R., 1993. Chemistry and Microstructure of Solidified Waste Forms. Lewis Publishers, London.
- Cuenca E. ve Serna P., 2013. Shear Behavior of Prestressed Precast Beams Made of Self-Compacting Fiber Rein Forced Concrete, Construction and Building Materials, 45, 145-156
- Çavdar, A. ve Yetgin, Ş., 2004. Tane İnceliğinin Traslı Çimento Özelliklerine Etkisi, Türkiye İnşaat Mühendisliği 17. Teknik Kongresi (CD-ROM), Istanbul, Turkey, 451-454.
- Çavdar, A., 2004. Trabzon Yöresi Tüflerinin Çimentoda Tras Olarak Kullanılabilirliği, Çimento İnceliği ve Tras Oranının Traslı Çimentonun Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Dali, B., 1997. Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield, Uk.

- Day, R. L., 1990. Pozzolons for Use in Low-Cost Housing, Department of Civil Engineering, University of Calgary.
- De Souza, E., Archibald, J.F. ve De Gagne, D. 1997. Glassfill-An Environmental Alternative for Waste Glass Disposal. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 90,1010, 58-64.
- Design and Control of Concrete Mixtures, 2011. Fly Ash, Slag, Silica Fume, And Natural Pozzolans Chapter 3.
- DIN 4030-1, 2008. Assesment of Water, Soil and Gases, for Their Aggressiveness to Concrete-Part 1: Principles and Limiting Values, German Standards.
- Divet, L., 1998. Mechanical, Mineralogical and Chemical Characterization of a Paste Backfill. Proceedings of the 4th International Conference on Tailings and Mine Waste, 139-146.
- Erçikdi, B., Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Deveci, H., 2003. Effect of Desliming on The Strength of Paste Backfill, X. Balkan Mineral Processing Congress, Bulgaria, 850-857.
- Erçikdi, B., 2009. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 143 s.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009a. 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.
- Erçikdi, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009b. Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Tailings: Importance of Binder Type and Dosage, Cement and Concrete Composites, 31-4, 268-74.
- Erçikdi, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H., Alp, I., Yazıcı, M. ve Şahin, B., 2009c. Çevreye Duyarlı Macun Dolgu Teknolojisi: Çayeli Bakır İşletmeleri'nde Örnek Uygulama, 3. Madencilik Ve Çevre Sempozyumu, Ankara, 139-152.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2010b. Utilization of Water-Reducing Admixtures in Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Mill Tailings, Journal of Hazardous Materials, 179, 940-946.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, 741.
- Erdoğan, T.Y., 2003b. Mineral Katkı Maddeleri, 169 – 208, Portland Çimentoları ve Diğer Çimento Türleri, 17-37.
- Erdoğan, T. Y., 2004. Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.

- Ergun, A., 2011. Effects of the Usage of Diatomite and Waste Marble Powder as Partial Replacement of Cement on the Mechanical Properties of Concrete, Construction and Building Materials, 25-2, 806-812.
- Fall, M. ve Benzaazoua, M. 2005a. Modeling The Effect of Sulphate on Strength Development of Paste Backfill And Binder Mixture Optimization, Cement and Concrete Research 35,2, 301-314.
- Fall, M. ve Benzaazoua, M., 2003. Advances in Predicting Performance Properties and Cost of Paste Backfill, Proceedings on Tailings and Mine Waste, Vail, USA, 73-85.
- Fall, M. ve Pokharel, M., 2010. Coupled Effects of Sulphate and Temperature on the Strength Development of Cemented Tailings Backfills: Portland Cement-Paste Backfill, Cement and Concrete Composites, 32,10, 819-828.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Ouellet, S., 2005b. Experimental Characterization of the Influence of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 18,1, 41-44.
- Fall, M., Wu, D., ve Cai S.J., 2012. Coupled Modeling of Temperature Distribution and Evolution in Cemented Tailings Backfill Structures that Contain Mineral Admixtures, Journal of Geotechnical and Geological, 30, 935-961.
- Fall, M.ve Benzaazoua, M., 2004. Modelling The Effect of Sulphate on Strength Development of Paste Backfill and Binder Mixture Optimization, Cement and Concrete Research, 32,5, 301-14.
- Filho, R. D. T., Gonçalves, J. P., Americano, B. B., ve Fairbairn, E. M. R., 2007. Potential for Use of Crushed Waste Calcined-Clay Brick as a Supplementary Cementitious Material in Brazil, Cement and Concrete Research, 37, 1357-1365.
- Frias, M., Villar-Cociña, E. ve Valencia-Morales, E., 2007, Characterisation of Sugar Cane Straw Waste as Pozzolanic Material for Construction, Calcining Temperature and Kinetic Parameters, Waste Management, 27,4, 533-538
- Gimenez, S., Blanco, M., T., Palomo, A. ve Puertas, F., 1991. Production of Cement Requiring Low Energy Expenditure – An Industrial Test, ZKG International, 44: 12–15.
- Glasser, F.P., 1993. Chemistry of Cement-Solidified waste forms. In: Spence, R.D. (Ed.), Chemistry and Microstructure of Solidified Waste Forms. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Grabinsky, M., Bawden, W.F. ve Thompson, B., 2007. In Situ Measurements for Geomechanical Design of Cemented Paste Backfill Systems, Minefill-CIM Bulletin, 100 (1103), 21, 8.

- Grabinsky, M., Bawden, W.F., Simon, D. ve Thompson, B., 2008. Insitu Properties of Cemented paste Backfill in an Alimak Stope, Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, 790-796.
- Grice, A.G. ve Fountain, J.L., 1991. The fill information system. Proceedings of the Second Australian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, The University of Wollongong, Australia, 68-80.
- Grice, T., 1998. Underground Mining with Backfill. In: Proceedings of 2nd Annual Summit, Mine Tailings Disposal Systems, Brisbane, Australian, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Carlton South, Australia, 1-14.
- Gutt, W. ve Nixon, P., J., 1970. Use of Waste Materials in the Construction Industry, Materials and Structures, 12 70: 255 – 306.
- Hassani, F. P. ve Bois, D., 1992. Economic and Technical Feasibility for Backfill Design in Quebec Underground Mines, Final Report 1/2, Canada-Quebec Mineral Development Agreement, Research and Development in Quebec Mines.
- Hassani, F., Razavi, S.M. ve Isagon, I., 2007a. A Study of Physical and Mechanical Behaviour of Gel fill. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 100, 1-7.
- Hassani, F.P., Nokken, M.R. ve Annor, A.B., 2007b. Physical and Mechanical Behaviour of Various Combinations of Mine Fill Materials, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 72.
- Hassani, F.P., Ouellet, J.ve Hossein, M., 2001. Strength Development in Underground High Sulphate Paste Backfill Operation, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 94-1050, 57–62.
- Henderson, A., Newman, P., Landriault, D. ve Antoniazzi, P., 1997. The Cost Advantage of Using Paste as a Backfill. 99th CIM Annual General Meeting, Canada, 35-48.
- Hills, C.D. ve Pollard, S.J.T., 1997. The Influence of Interference Effects on the Mechanical, Microstructural and Fixation Characteristics of Cement Solidified Hazardous Waste Forms, Journal of Hazardous Materials, 52,2-3, 171-191.
- Ho, DWS., Sheinn, AMM., Ng, CC. ve Tam, CT., 2001. The use of Quarry Dust for SCC Applications, Cement and Concrete Research, 32,4, 505-511.
- 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, 22,5, 361-368.
- Kavas, T. ve Olgun, A., 2008. Properties of Cement and Mortar Incorporating Marble Dust and Crushed Brick, Ceramics-Silikaty, 52,1, 24–28.

- Kermani, M.F., Hassani, F.P., Isagon, I., Nokken, M. ve Zamani, S.H., 2011. Investigation into Mechanical & Microstructural Properties of Gelfill.
- Kesimal, A., Erçikdi, 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 Erçikdi, 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, 1817-22.
- 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.
- Kırgız, M. S., 1998, Mineralojik Katkıların Çeşitli Tanımları, Sınıfları, Özellikleri ve Kullanım Alanları, Maden Tetkik ve Arama Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 1,2, 61–63.
- Kırgız, M.S., 2007. Mermer ve Tugla Endüstrisi Atıklarının Çimento Üretiminde Mineralojik Katkı Olarak Kullanılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Klein, K. ve Simon, D., 2006. Effect of Specimen Composition on the Strength Development in Cemented Paste Backfill, Canadian Geotechnical Journal, 43,3, 310-324.
- Konsta-Gdoutos, M. S.ve Shah, S. P., 2003, Hydration and Properties of Novel Blended Cements Based on Cement Kiln Dust and Blast Furnace Slag, Cement and Concrete Research, 33,8, 1269-1276.
- Kreijger, P., J., 1968. Terminology, Definition and Classification of Admixtures, Materials and Structures, 1,2, 79–88.
- Landriault, D.A., 1995. Paste Backfill Mix Design for Canadian Underground Hard Rock Mining, Proceedings of The 97th Annual General Meeting of The Rock Mechanic and Strata Control Session, Nova Scotia-Canada, 652-663.
- Landriault, D.A., 2001. Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies. SME, United States, 717.
- Lawrence, C.D. 1992. The Influence of Binder Type on Sulphate Resistance, Cement and Concrete Research, 22,6, 1047-1058.
- Le Roux, K., Bawden, W. ve Grabinsky, M., 2005. Field Properties of Cemented Paste Backfill at the Golden Giant Mine, IMM Transactions Section A, 114,2, 65-80.
- Lee, J.K., 2012. Thermal and Electrical Behaviors of Selected Geomaterials, The University of Western Ontario, Canada.

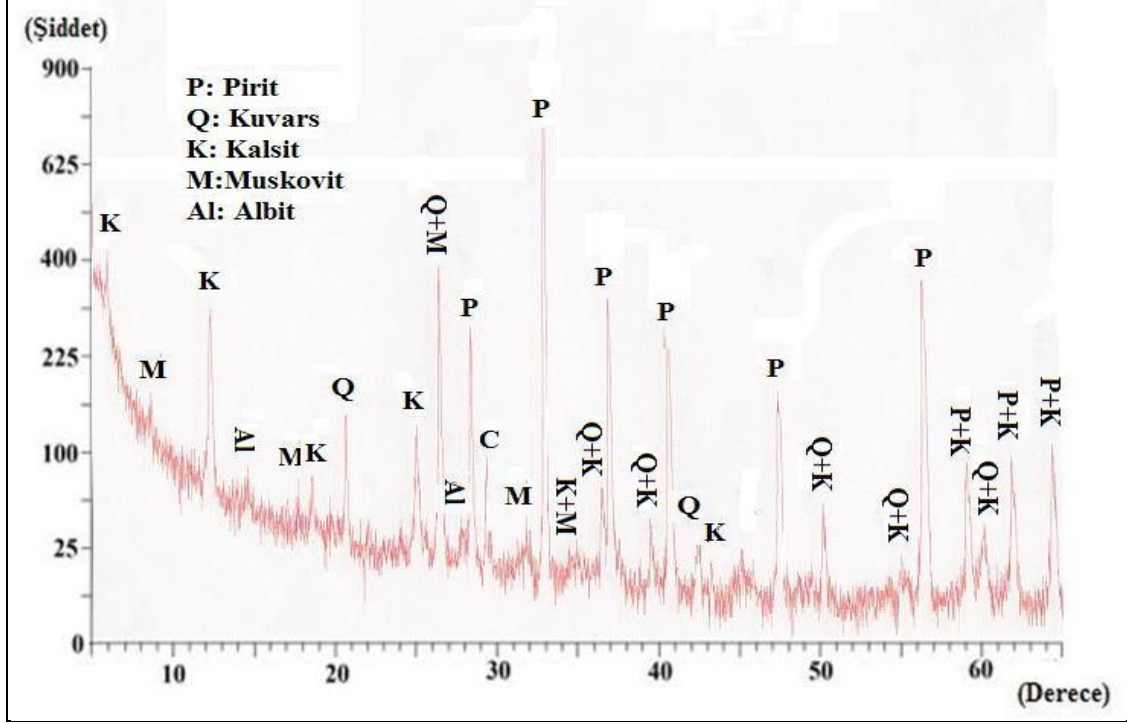
- Lin, D-F ve Chen, L., 2009. Stabilization Treatment of Soft Subgrade Soil by Sewage Sludge Ash and Cement, Journal of Hazardous Materials, 162,1, 321-327.
- Lin, K. L. ve Chen, B.Y., 2010. Waste Brick's Potential for Use As A Pozzolan in Blended Portland Cement.
- Means, J.L., Smith, L.A., Nehring, K.W., Brauning, S.E., Gavaskar, A.R., Sass, B.M., Wiles, C.C., ve Mashni, C.I. 1995. The Application of Solidification/Stabilization to Waste Materials. Lewis Publishers, New York.
- Mehta, P. K. ve Monteiro, P. J. M., 2005. Concrete: Microstructure, Properties and Materials, The McGraw-Hill Companies, Third Edition, 659.
- Mehta, P.K. 1983. Mechanism of Sulphate Attack on Portland Cement Concrete-Another Look, Cement and Concrete Research, 13,3, 401-406.
- Mining Sourcebook, 1994. Canadian Mining Sourcebook (103rd Edition), Southam Magazine Group, Southam Inc.
- Mollah, M.Y.A., Vempati, R.K., Lin, T.C. ve Cocke, D.L., 1995. The Interfacial Chemistry of Solidification and Stabilization of Metals in Cement and Pozzolanic Materials Systems, Waste Management 15,2, 137-148.
- Naceri, A. ve Hamina, Mc., 2009. Use of Waste Brick As A Partial Replacement of Cement in Mortar, Geomaterials Laboratory, Civil Engineering Department, M'sila University, P.O. Box 166, Ichbilia, M'sila 28000, Algeria.
- Nehdi, M. ve Tariq, A., 2007. Stabilization of Sulphidic Mine Tailings for Prevention of Tailings Disposal Systems, Brisbane, Australia, 5-15.
- Neville, A. M., 2000. Properties of Concrete, Prentice Hall, London, England.
- O'Farrell, M., Wild, S. ve Sabir, B. B., 2000. Resistance to Chemical Attack of Ground Brick-PC Mortar Part II. Synthetic Seawater, Cement and Concrete Research, 30, 757-765.
- Ouellet, S., Bussiere, B., Mbonimpa, M. ve Benzaazoua, M., 2006. Aubertin M., Reactivity and Mineralogical Evolution of an Underground Mine Sulphidic Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 19, 407-19.
- Özdamar, Z. ve Yavuz, B., 2005. Türk Yapı Sektörü Raporu, Yapı-Endüstri Merkezi, İstanbul, 70-77, 100-102, 147-160.
- Pan, S., Tseng, D., Lee, C. C. ve Lee, C., 2003. Influence of the Fineness of Sewage Sludge Ash on the Mortar Properties, Cement and Concrete Research, 33, 1749-1754.
- Pera, J. ve Amrouz, A., 1998. Development of Highly Reactive Metakaolin from Paper Sludge, Advanced Cement Based Materials, 7,2, 49-56.

- Puppala, A.J., Griffin, J.A., Hoyos L.R. ve Chomtid, S., 2004. Studies on Sulphate Resistant Cement Stabilization Methods to Address Sulphate Induced Heave Problems. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 391-402.
- Rai, B., 2011. Influence of Marble Powder/Granules in Concrete Mix, International Journal of Civil and Structural Engineering, 1-4.
- Rankine, R.M. ve Sivakugan, N., 2007. Geotechnical Properties of Cemented paste Backfill from Cannington Mine, Australia. Geotechnical and Geological Engineering 383-393.
- Rouman, J.C. ve Sarkar. L.S., 2001. 21. Yüzyılın Çimentoları, Çimento ve Beton Dünyası, 36-45.
- Sabir, B., Wild, S. ve Bai, J., 2001. Metacaolin and Calcined Clays as Pozzolan for Concrete: a Review, Cement and Concrete Composites, 23, 441-454.
- Santhanam, M., Cohen, M.D. ve Olek, J., 2001. Sulfate Attack Research Whither Now Cement and Concrete Research, 31, 6, 845-851.
- Scoble, M.J. ve Piciacchia, L., 1986. Hydraulic Backfill Design to Optimize Support and Cost Effectiveness, Mining Science and Technology 4 75-85.
- Shannag, M., 2000. High Strenght Concrete containing natural pozzolanand silica fume, Cement and Concrete Composites, 22, 399-406.
- Singh, M. ve Garg, M., 2007. Durability Of Cementing Binders Based On Fly Ash And Other Wastes, Construction and Building Materials, 21,11, 2012-2016.
- Skalny, J., Marchand, J. ve Odler, I., 2002. Sulphate Attack on Concrete. Spon. Press, New York.
- 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.
- Tariq, A. ve Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings, Cement and Concrete Research, 29, 5, 719-725.
- Tariq, A., 2012. Synergistic and Environmental Benefits of Using Cement Kiln Dust with Slag and fly Ash in Cemented Paste Tailings.
- Taylor, H. F. W., 1990a. Cement Chemistry, 3rd Edition, Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich, London, England.
- Taylor, H.F.W., 1990b. Cement Chemistry, Third ed, Academic Press, New York.

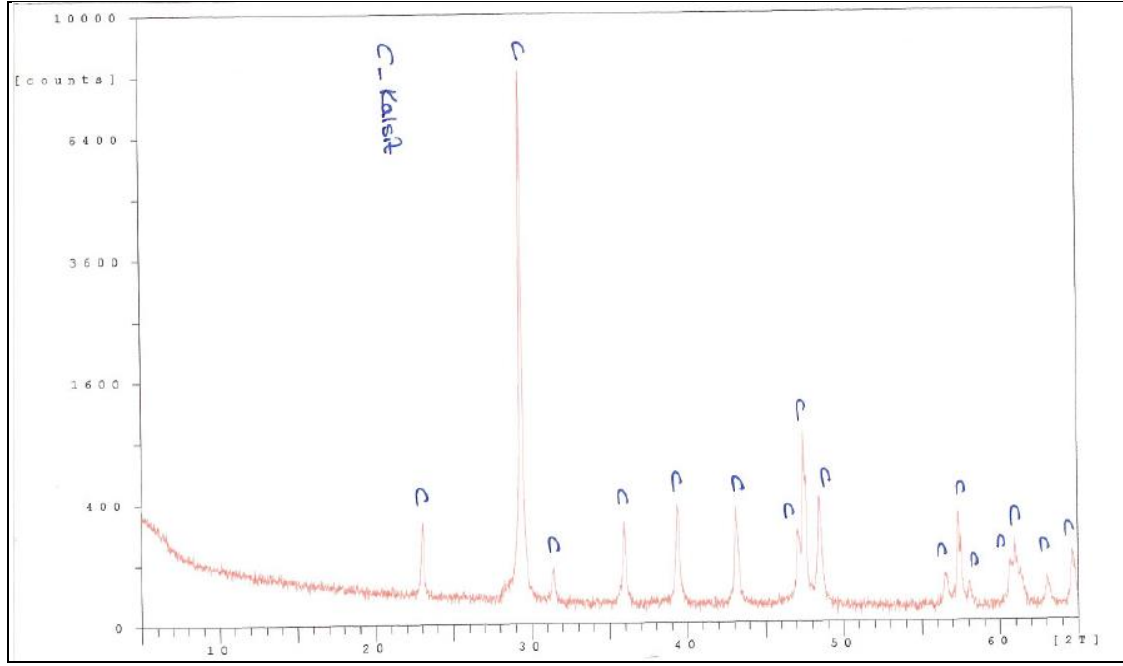
- Thomas, E.G., Nantel J.H., ve Notely, K.R., 1979. Fill technology in underground metalliferous mines. International Academic Services Ltd. Kingston, Canada.
- Tian, B. ve Cohen, M.D. 2000. Does Gypsum Formation During Sulphate Attack on Concrete Lead to Expansion, Cement and Concrete Research 30, 117-123.
- Topçu, İ. B. ve Canbaz, M., 2004. Properties of Concrete Containing Waste Glass, Cement and Concrete Research, 34, 267-274.
- TSEN 196-2, 2002. Methods of Testing Cement-Part 2: Chemical Analysis of Cement, Turkish Standards Institution (TSE), Ankara.
- TSEN 196-6, 2002. Methods of Testing Cement-Part 6: Determination of Fineness; Turkish Standards Institution (TSE); Ankara.
- Turanli, L., Uzal, B. ve Bektas, F., 2004. Effect of Material Characteristics on The Properties of Blended Cements Containing High Volumes of Natural Pozzolans, Cement and Concrete Research, 34, 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.
- Türker P., Erdoğan B. ve Erdoğan K., 2002. Influence of Marble Powder on Micro Structure and Hydration of Cements Cem, Concrete World J TÇMB (TURKEY), 7, 38-89.
- Vu, D., Stroeve, P. ve Bui, V., 2001. Strength and Durability Aspects of Calsine Dcaolin –Blended Portland Cement Mortar and Concrete, Cement &Concrete Composite, 23, 471-478.
- Wang, C. ve Villaescusa, E. 2001. Influence of water salinity on the properties of cemented tailings backfill. Min Technol: IMM Trans Sect A 110, 62-65.
- Wang, S. ve Baxter, L., 2007. Comprehensive Study of Biomass Fly Ash In Concrete, Strength, Microscopy, Kinetics and Durability, Fuel Processing Technology, 88, 11-12, 1165-1170.
- Wild, S., 2001. Metakaolin and Calcined Clays As Pozzolans of Concrete, School of Technology, University of Glamorgan, Pontypridd, Mid. Glamorgan, Wales Cf37 1 DL, Uk.
- Wilson, M. A., Al-Defai, N. K. ve Carter, M. A., 2012. The Influence of Pozzolan Additions on the Water Retentivity of Freshly-Mixed Hydraulic Lime Mortars, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester.

- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C. ve Meida, L.O., 2001. Carbon dioxide Emissions from the Global Cement Industry. Annual Review of Energy and the Environment 26, 303- 329.
- Yeginobalı, A., 2001a. Katkılı Betonmu, Katkılı Çimentomu, Çimento ve Beton Dünyası, 5 30, 33-35.
- Yeğınobalı, A., 2001b. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, Ankara.
- Yılmaz, E., 2003. Sülfıt İçeren Maden Atıklarından Hazırlanan Çimentolu Macun Dolgu Örneklerinin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 117.
- Yılmaz, E., Belem, T., Bussi  re, B. ve Benzaazoua, M. 2008. Consolidation Characteristics of Early Age Cemented Paste Backfill. GeoEdmonton 61st Canadian geotechnical conference and 9th joint CGS/IAH-CNC groundwater conference, Geotechnical Society of Edmonton, 797-804.
- Yin, S. Wua, A., Hua, K., Wang ,Y. ve Key Y.Z., 2012. Laboratory of the Ministry of Education of China for High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083.
- Yuan, Y.C. ve Henghu, S., 2012. Novel Silica Alumina-Based Backfill Material Composed of Coal Refuse and Fly Ash.
- Yumlu, M. ve G  reş  i, M., 2007. Paste Backfill Bulkhead Monitoring – A Case Study From Inmet’s Cayeli Mine, Turkey, 9th International Symposium on Mining With Backfill, Montreal-Canada, 146-55.

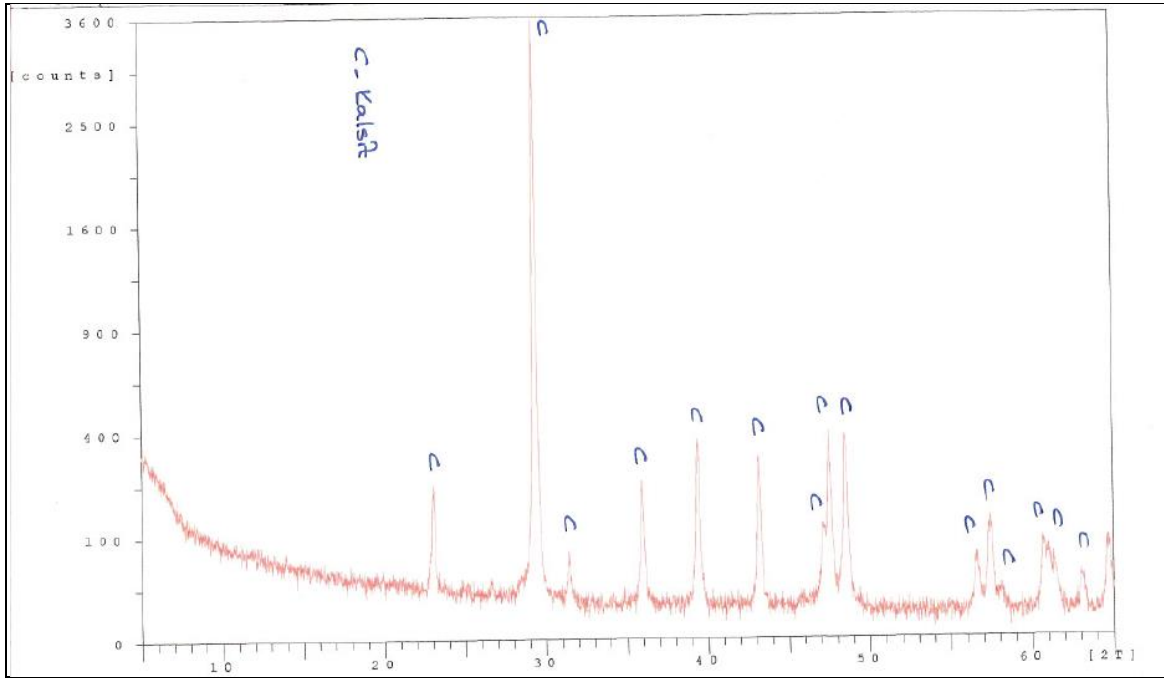
7. EKLER



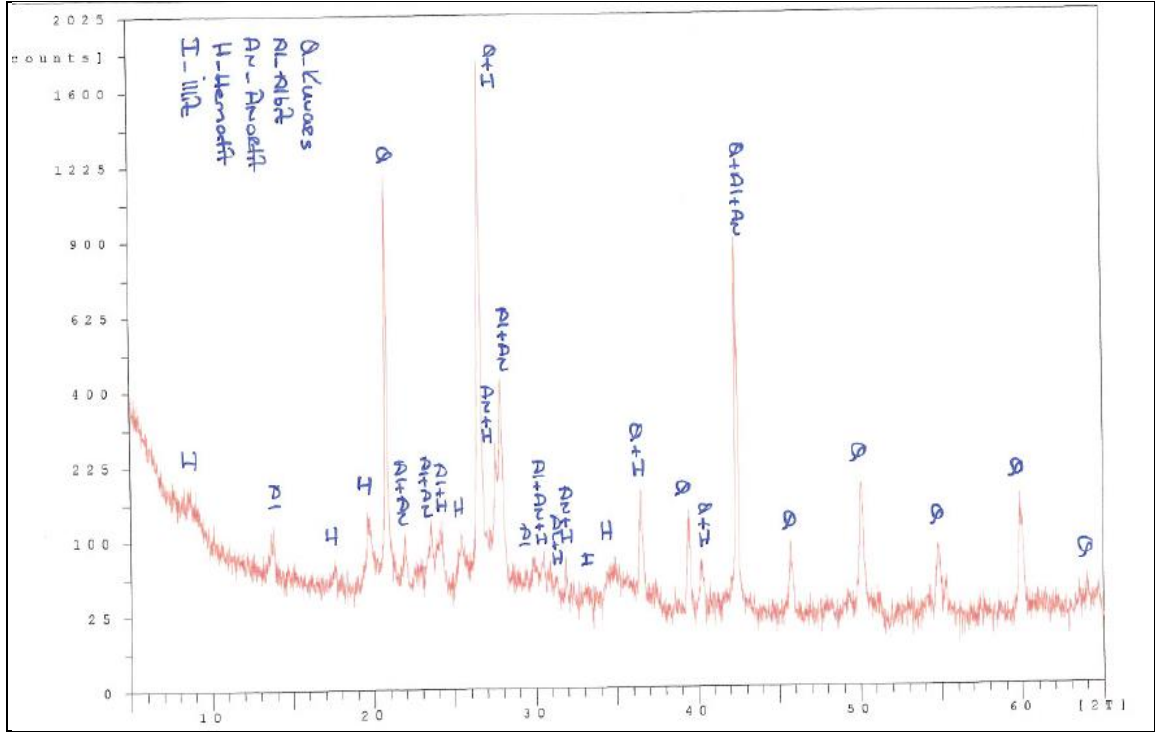
Ek 1. Atık malzemenin XRD grafiği



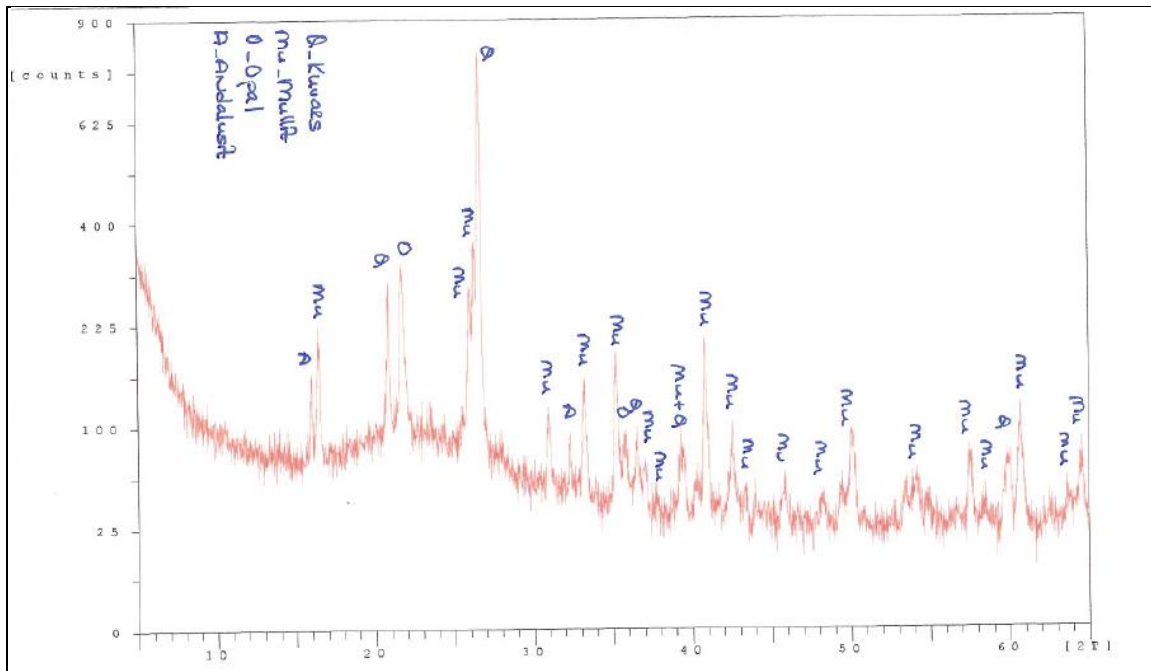
Ek 2. Bayburt mermer atığı numune örneğinin XRD profili



Ek 3. Gümüşhane Mermer Atığı numune örneğinin XRD Profili



Ek 4. Araklı tuğla atığı numune örneğinin XRD profili



Ek 5. Çorum tuğla atığı numune örneğinin XRD profili

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan KÜLEKÇİ 1986'da Gümüşhane'de doğmuştur. İlkokulu Gümüşhane Merkez Gazipaşa ilkokulunda tamamlayan Gökhan KÜLEKÇİ, orta ve lise eğitimini Gümüşhane Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. Lise eğitiminden sonra 2005 yılında Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümünü kazanmıştır. Bir yıl burada okuyan Gökhan Külekçi 2006 yılında ÖSYM'nin özel durumlar yönetmeliğinden yararlanarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümüne geçiş yapmıştır. 2010 yılında 4 üzerinden 3.20 ortalama ile bölüm birincisi olarak eğitimini tamamlamıştır Aynı yıl içerisinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Şu anda Gümüşhane Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

BAŞLICA YAYINLARI;

1. Ercikdi, B., Yılmaz, T. ve **Külekci, G.**, 2013. Strength and Ultrasonic Properties of Cemented Paste Backfill, Ultrasonics, Doi: 10.1016/j.ultras. 2013.04.013 (Baskıda)
2. Yılmaz, T., Ercikdi, B., Karaman, K. ve **Külekci, G.**, 2013. Assessment of Strength Properties of Cemented Paste Backfill by P-wave Velocity Test, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, (Hakemde)