

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN AKTİFLEŞTİRİLMESİNDE AKTİVATÖR TİPİNİN VE
AKTİVATÖR EKLEME ZAMANININ MACUN DOLGU ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisi Meryem KURTULUŞ

**HAZİRAN 2019
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalında
Meryem KURTULUŞ Tarafından Hazırlanan**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN AKTİFLEŞTİRİLMESİNDE AKTİVATÖR TİPİNİN VE
AKTİVATÖR EKLEME ZAMANININ MACUN DOLGU ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28 / 05 / 2019 gün ve 1806 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Gürcan KONAK

Üye : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL

Üye : Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR


.....

.....

.....

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

"Yüksek Fırın Cürufunun Aktifleştirilmesinde Aktivatör Tipinin ve Aktivatör Ekleme Zamanının Macun Dolgu Özelliklerine Etkisi" isimli bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimim süresi boyunca danışmanlığımı üstlenerek, gerek konu seçimi, gerekse çalışmaların yürütülmesi ve sonuçlandırılması sırasında bilgi, tecrübe ve görüşlerini benimle paylaşan, değerli vaktini ayıran, her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR'e teşekkür ederim.

Akademik hayatım boyunca benden bilgilerini esirgemeyen Prof. Dr. Ayhan KESİMAL, Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI ve diğer bölüm hocalarıma teşekkürü borç bilirim.

Laboratuvar çalışmaları aşamasında çalışma boyunca bilgi, deneyim ve yardımlarını benden esirgemeyen Maden Yüksek Mühendisi Yunus AKYOL ve Maden Yüksek Mühendisi Sinan OCAK'a teşekkür ederim. Ayrıca bana destek olan tüm hocalarıma, bölüm çalışanlarına ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her aşamasında maddi ve manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim ve saygılarımı sunarım.

Meryem KURTULUŞ

Trabzon, 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Yüksek Fırın Cürufunun Aktifleştirilmesinde Aktivatör Tipinin ve Aktivatör Ekleme Zamanının Macun Dolgu Özelliklerine Etkisi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/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. 11/06/2019

Meryem KURTULUŞ

Trabzon, 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Tezin Amacı	2
1.3. Alkali Aktive Bağlayıcılar.....	3
1.3.1. Alkali Aktive Bağlayıcıların Kronolojik Gelişimi	4
1.3.2. Alkali Aktivatörler.....	6
1.3.2.1. Sodyum Hidroksit (Kostik Soda)	7
1.3.2.2. Sodyum Silikat ve Sodyum Meta Silikat (SMS-Katı Sodyum Silikat).....	8
1.3.3. Puzolanik Mineral Katkı Maddeleri	9
1.3.3.1. Puzolanik Maddeler	9
1.3.3.1.1. Yüksek Fırın Cürufu.....	10
1.4. Aktifleştirilmiş Bağlayıcılarda Dizayn Esasları	12
1.5. Madencilikte Dolgu İşlemi	12
1.5.1. Macun Dolgu Yöntemi	14
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	16
2.1. Giriş	16
2.2. Tezde Kullanılan Malzemelerin Karakterizasyonu	17
2.2.1. Atık Malzeme	17
2.2.2. Bağlayıcı Maddeler	19
2.2.2.1. Çimento	19
2.2.2.2. Yüksek Fırın Cürufu.....	20
2.2.2.3. Alkali Aktivatörler.....	21

2.2.3.	Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması	22
2.2.4.	Numunelerin Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testlerinin Yapılması	26
2.2.5.	pH ve SO_4^{-2} Analizleri.....	27
2.2.6.	Mikroyapı Analizleri	28
2.2.7.	Ultrasonik P- Dalga Hızı Testi	29
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	30
3.1.	Macun Dolgu Numunelerinin Dayanım Testleri	30
3.1.1.	Sodyum Metasilikat (SMS) ile Aktive Cürufun Dolgu Dayanımına Etkisi	30
3.1.2.	Sıvı Sodyum Silikat (LSS) ile Aktive Cürufun Dolgu Dayanımına Etkisi	31
3.1.3.	Sodyum Hidroksit (NaOH) ile Aktive Cürufun Dolgu Dayanımına Etkisi	33
3.2.	Bağlayıcı Dizaynı ve Karışım Ortamına İlave Şeklinin Macun Dolgu pH'ına Etkisi.....	34
3.3.	Bağlayıcı Dizaynı ve Karışım Ortamına İlave Şeklinin Macun Dolguda Sülfat İçeriği Değişimine Etkisi	37
3.4.	AAC Dizaynı ve Dolgu Ortamına İlave Şeklinin Macun Dolguda Gözenekli Yapıya Etkisi	39
3.5.	AAC Dizaynı ve Dolgu Ortamına İlave Şeklinin Macun Dolguda Ultrasonik P-Dalga Hızına Etkisi	42
4.	SONUÇLAR.....	45
5.	ÖNERİLER	47
6.	KAYNAKLAR.....	48

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN AKTİFLEŞTİRİLMESİNDE AKTİVATÖR TİPİNİN VE AKTİVATÖR EKLEME ZAMANININ MACUN DOLGU ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Meryem KURTULUŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR
2019, 53 Sayfa

Bu tez çalışmasında aynı dizayna sahip farklı formlarda hazırlanarak macun dolgu karışım ortamına ilave edilen katı sodyum metasilikat (SMS), sıvı sodyum silikat (LSS) ve sodyum hidroksit (NaOH) ile aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufunun dolgu özelliklerine etkisi araştırılmıştır. SMS örnekleri, Cem I 42.5R, LSS ve NaOH numunelerine kıyasla uzun dönemde (360 gün) sırayla ortalama 4.82 kat, %16 ve 1.94 kat; LSS örnekleri, NaOH ve Cem I 42.5R örneklerine kıyasla uzun dönemde sırayla 1.82 ve 4.38 kat; NaOH örnekleri ise Cem I 42.5R numunelerine kıyasla 2.41 kat yüksek dayanıma sahiptir. Bağlayıcı jelin başlangıçta mekanik olarak karıştırılarak hazırlanması LSS ve NaOH örneklerinde %3.6 ila %9.01 oranında düşük dayanımlara sebep olmuştur.

SMS, LSS ve NaOH örnekleri Cem I 42.5R örneklerine göre toplam poroziteyi sırasıyla %14.24, %15.78 ve %10.68 oranlarında azaltmıştır. LSS ve SMS etkili aktivatörler olup Karışım-1 ve Karışım-6 dizaynları macun dolgu gözenekli yapısını en iyi iyileştiren bağlayıcı dizaynlardır. SMS, LSS ve NaOH ile farklı formlarda hazırlanan macun dolgu numunelerinin ultrasonik P-dalga hızı (UPV) değerleri Cem I 42.5R içeren örneklere kıyasla sırasıyla ortalama %25.14, %21.87 ve %20.84 oranında yüksektir. Ortalama UPV değerleri en yüksekten en düşüğe doğru SMS > LSS > NaOH > Cem I 42.5 R şeklindedir. UPV ve dayanım değerleri arasında benzer eğilimler izlenmiştir. Ancak, AAC numuneleri Cem I 42.5 R numunelerinden ortalama 2.23-4.82 kat daha yüksek dayanım sonuçları üretirken UPV değerleri arasındaki fark %1.21-1.25 aralığındadır.

Anahtar Kelimeler: Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufu, Sodyum Metasilikat, Sodyum Silikat, Sodyum Hidroksit, Yüksek Fırın Cürufu, Macun Dolgu

Master Thesis

SUMMARY

EFFECT OF ACTIVATOR NATURE AND TIMING OF ACTIVATOR ADDITION FOR ACTIVATION OF BLAST FURNACE SLAG ON THE PROPERTIES OF PASTE BACKFILL

Meryem KURTULUŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ferdi CİHANGİR
2019, 53 Pages

In this thesis, the effect of alkali activated blast furnace slag with solid sodium metasilicate (SMS), liquid sodium silicate (LSS) and sodium hydroxide (NaOH) which is prepared in different forms at the same design and added into the paste backfill mixture was investigated. SMSs produced higher unconfined compressive strengths (UCSs) of 4.82 times, 16% and 1.94 folds in average in the long term (360 days) compared to LSS, NaOH and Cem I 42.5Rs, respectively. LSSs gave 1.82 and 4.38 times higher UCSs at the end of the 360 day compared to NaOHs and Cem I 42.5Rs. NaOHs had 2.41-fold higher UCSs than Cem I 42.5Rs. Mechanical preparation by mixing the activator solution and slag was seen to reduce UCSs about 3.6% to 9.01% in all alkali activated slag samples (AACs) of LSSs and NaOHs.

The samples prepared with SMS, LSS and NaOH decreased the total porosity by 14.24%, 15.78% and 10.68% compared to Cem I 42.5Rs, respectively. SMS and LSS are the most effective activators improving the micro-porous structure of CPBS for Mixture-1 and Mixture-6, respectively, where the latter has the lowest porosity. AACs significantly improved the porous microstructure of CPB prepared by Cem I 42.5R.

The ultrasonic P-wave velocity (UPV) values of the SMSs, LSSs and NaOHs prepared with different forms were higher than Cem I 42.5Rs about 25.14%, 21.87% and 20.84%, respectively. Mean UPV values are as SMS > LSS > NaOH > Cem I 42.5 R. Similar trends were observed between in UCSs and UPVs. However, AACs produced 2.23-4.82 times higher UCSs than the Cem I 42.5 Rs while the difference between the UPV values was in the range of 1.21-1.25%

Key Words: Alkali Activated Slag, Sodium Metasilicate, Sodium Silicate, Sodium Hydroxide, Blast Furnace Slag, Cemented Paste Backfill

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Günümüze ulaşan eski Roma eserleri	5
Şekil 2. Alkali aktive bağlayıcıların kullanılması ile değişik yapı türlerinin inşası	6
Şekil 3. Puzolanların sınıflandırılması	10
Şekil 4. Atık malzemenin tesisten alınması	17
Şekil 5. Atık malzeme ve yüksek fırın cürufunun tane boyut dağılımları.....	18
Şekil 6. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimento (a) ve yüksek fırın cürufu (b)	20
Şekil 7. Deneysel çalışmalarda aktifleştirme işleminde kullanılan aktivatörler	21
Şekil 8. Malzemelerin mikserde karıştırılması (a) ve uygun kıvamda hazırlanması (b) ..	23
Şekil 9. Numunelerin sıkılanması (a), bünye serbest suyunun drene edilmesi (b), numunelerin hava ile temasının kesilmesi (c), kür dolabında bekletilmesi (d)...	24
Şekil 10. Tek eksenli basınç dayanımı testlerinin gerçekleştirilmesi	26
Şekil 11. pH ve sülfat analizlerinin aşamaları	27
Şekil 12. Civalı porozimetre cihazı ile porozite analizleri	28
Şekil 13. Macun dolgu numunelerinin ultrasonik P-dalga hızı ölçümlerinin yapılması ..	29
Şekil 14. SMS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolgu dayanım ve duraylılığına etkisi	31
Şekil 15. LSS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	32
Şekil 16. NaOH ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi.....	33
Şekil 17. SMS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolgu pH'ına etkisi	35
Şekil 18. LSS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolgu pH'ına etkisi	36
Şekil 19. NaOH ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolgu pH'ına etkisi....	36
Şekil 20. SMS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda sülfat içeriği değişimine etkisi	37
Şekil 21. LSS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda sülfat içeriği değişimine etkisi	37
Şekil 22. NaOH ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda sülfat içeriği değişimine etkisi	38
Şekil 23. SMS+C dizayn ve karışım ortamına ilave şeklinin macun dolgu gözenekli yapısına etkisi	40
Şekil 24. LSS+C dizayn ve karışım ortamına ilave şeklinin macun dolgu gözenekli yapısına etkisi	40

Şekil 25. NaOH+C dizayn ve karışım ortamına ilave şeklinin macun dolgu gözenekli yapısına etkisi	41
Şekil 26. SMS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda ultrasonik P-dalga hızına etkisi	42
Şekil 27. LSS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda ultrasonik P-dalga hızına etkisi	43
Şekil 28. NaOH ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda ultrasonik P-dalga hızına etkisi	43



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. NaOH kimyasalına ait genel özellikler	7
Tablo 2. Anhidrit ve hidrat sodyum silikatların fiziksel ve termodinamik özellikleri ((Vail ve Wills, 1952-Shi vd. 2006'dan) (Cihangir, 2011)	8
Tablo 3. Yüksek fırın cürufunun ve çimentonun çevresel etkiler açısından karşılaştırılması	11
Tablo 4. Dolgu tipleri ve özellikleri (Erçikdi, 2009)	13
Tablo 5. Atık malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri	19
Tablo 6. Bağlayıcı maddelerin fiziksel özellikleri	20
Tablo 7. Bağlayıcı maddelerin kimyasal özellikleri	21
Tablo 8. CEM I 42.5R içeren kontrol numunelerinin deneysel çalışma koşulları	24
Tablo 9. Sodyum metasilikat (SMS) ile hazırlanan macun dolgu malzemelerinin deneysel çalışma koşulları	25
Tablo 10. Likit sodyum silikat (LSS) ile hazırlanan macun dolgu malzemelerinin deneysel çalışma koşulları	25
Tablo 11. Sodyum hidroksit (NaOH) ile hazırlanan macun dolgu malzemelerinin deneysel çalışma koşulları	26
Tablo 12. AAC ve CEM I42.5R içeren macun dolgu numunelerinin gözenekli yapılarına ait teknik parametrelere ait değerler	39

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

AAC	: Alkali aktive cüruf
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CEM I 42.5R	: Erken yüksek dayanımlı normal Portland çimentosu (CEM I 42.5)
CH	: Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat
CO ₂	: Karbondioksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
Ca(OH) ₂	: Portlandit
C ₃ A	: Kalsiyum Alüminat
C ₃ S	: Trikalsiyum Silikat, Alit
LSS	: Sıvı (likit) sodyum silikat
M _s	: Modül oranını (ağırlıkça SiO ₂ /Na ₂ O oranı; M _s =SiO ₂ /Na ₂ O)
Na ₂ O	: Sodyum oksit
Na ₂ O·2SiO ₂	: Sodyum silikat (2 modül)
Na ₂ CO ₃	: Sodyum Karbonat
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
NaOH	: Sodyum hidroksit
SMS	: Sodyum Metasilikat
SiO ₂	: Silisyum dioksit
SO ₄ ⁻²	: Sülfat iyonu
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği

1.GENEL BİLGİLER

1.1.GİRİŞ

Madencilik sektöründe yeraltı dolgu uygulamalarında asit ve sülfat etkilerine karşı dayanıklı bağlayıcılarla imal edilen malzemeler büyük önem taşımaktadır. İnşaat ve madencilik sektörlerinde yapı malzemelerinin inşasında, portland çimentosu en yaygın kullanılan hidrolik bağlayıcı olmasına karşın yüksek CaO, C₃S ve C₃A içeriğine sahip olmasından dolayı asit ve sülfat etkilerine karşı dayanıksız bir bağlayıcıdır (Cihangir vd., 2012). Ayrıca çimentonun dünya çapında çok büyük hacimlerde üretilmesi nedeniyle, portland çimentosu üretimi, ekonomi, enerji ve çevreyle ilgili sorunlar da beraberinde getirmektedir. 1 ton portland çimentosu üretimi, atmosfere yaklaşık 1 ton CO₂ yayılmasına sebep olmakta ve bu da dünyada fosil yakıt bazlı toplam CO₂ emisyonlarının %10'una; tüm sera gazı emisyonlarının %6 CO₂ eşdeğerine karşılık gelmektedir.

Endüstriyel faaliyetler nedeni ile her yıl milyonlarca ton puzolanik özelliğe sahip yan sanayi atığı açığa çıkmaktadır. Bu malzemeler uygun koşullar altında ve kontrollü bir şekilde depolanmadığı zaman çevresel açıdan zararlı etkilere neden olabilmektedir. Dolayısıyla, mineralojik ve kimyasal bileşimlerine bağlı olarak bu malzemelerin ikincil hammadde ürünleri olarak kullanılması hem çevresel açıdan hem de doğal kaynakların korunması açısından oldukça önem taşımaktadır. Bu nedenle hem daha iyi performans sergileyen hem de çevresel açıdan duyarlı bağlayıcı sistemler üzerinde araştırmaların ve yeni çalışmaların yapılması büyük önem arz etmektedir.

Çimento üretimiyle bağlantılı olarak, ekonomi, enerji ve çevre ile ilgili sorunları çözenin yollarından biri portland çimentosuyla benzer özelliklerde alternatif bağlayıcılar geliştirmektir. Son yıllarda, silikoalüminli doğal malzemeler, endüstriyel yan ürünler (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb.) ve atık cam gibi atıkların alkali kimyasallar ile aktive edilmesiyle alkali aktive bağlayıcılar veya jeopolimer bağlayıcılar üretilmektedir.

Alkali aktive bağlayıcılar veya jeopolimer bağlayıcılar, puzolanik özelliğe sahip mineral katkıların alkali kimyasallar kullanılarak aktifleştirilmesi ile elde edilen inorganik bağlayıcılardır. Puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddelerinin bağlayıcı maddelerle hazırlanmış numunelerde dayanım kaybını engelleyerek dayanıklılığı arttırırken, enerji

maliyetlerini, bağlayıcı maliyetlerini ve CO₂ emisyonlarını azalttığı bilinmektedir. Puzolanik özelliğe sahip atık, yan sanayi ürünleri yada endüstriyel ürünlerin çimentoya katkı olarak yada alternatif olarak kullanılması durumunda, CO₂ emisyonlarının %30 ila %50'ye kadar azaltılabilmek potansiyeli bulunabilmektedir (Roskovic ve Bjegovic, 2005; Ehrenberg, 2005). Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcıların, normal Portland çimentoları ve betonlarına göre yüksek erken dayanım verebilme kabiliyeti, düşük hidrasyon ısısına sahip olmaları, korozif ortamlara ve donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılıkları, daha güçlü bağ kuvvetine sahip olmaları gibi birçok önemli avantaja sahip olması son yıllarda bu tür bağlayıcılara yönelik çalışmaların yoğunlaşmasına olanak sağlamıştır.

1.2. Tezin Amacı

Alkali aktive bağlayıcıların karışım ortamına ilave şekilleri ve aktivatörlerin önceden koşullandırılmalarının farklılık arz edebileceği görülmüştür (Shi vd., 2006). Bu tez çalışmasında aynı bileşimlere sahip farklı formlarda hazırlanarak karışım ortamına ilave edilen alkali aktive bağlayıcılar ile hazırlanan macun dolgu malzemelerinin dayanım, jeokimyasal (pH ve sülfat iyon konsantrasyonu), gözenekli mikroyapı ve ultrasonik hız özellikleri araştırılmıştır. Dolgu malzemelerinin hazırlanmasında kullanılmak üzere sülfürlü maden tesis atıkları tercih edilmiştir. Böylece aynı bileşime sahip farklı bağlayıcı formlarının kullanılması ile hazırlanan homojen macun dolgu numunelerinin kürlenilerek test edilmesi ve dayanım, ultrasonik p-dalga hızı, gözenekli mikroyapı ve jeokimyasal özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda normal Portland çimentosu kontrol amaçlı kullanılmak üzere, katı (toz) sodyum silikat (sodyum meta silikat-SMS), sıvı (likit) sodyum silikat (LSS) ve sodyum hidroksit (NaOH) ile 8 farklı formda alkali aktive yüksek fırın cürufu (AAC) kullanılarak macun dolgu numuneleri hazırlanmıştır. Test malzemeleri macun kıvamında (macun dolgu malzemesi) homojen bir şekilde hazırlandıktan sonra 14-28-56-112-224-360 günlük kür işlemine tabi tutulmuşlardır. SMS kullanımının öncelikli amacı ise sıvı formdaki bazik alkali aktivatörlerin kullanımı sırasındaki problemler ve riskleri ortadan kaldırması ve daha pratik kullanıma sahip olmasıdır (Chowdhury, 2013).

Bu tez çalışması; alkali aktive cüruf malzemesinin karışım ortamına ilave şeklinin malzemenin dayanım, gözenekli mikroyapı ve ultrasonik P-dalga hızına etkisine yönelik

ilk çalışmadır. Dolayısıyla bu çalışma, bağlayıcının karışım ortamına ilavesine yönelik gerek literatür gerekse pratik uygulamalar açısından önemli katkılar sunacaktır.

1.3. Alkali Aktive Bağlayıcılar

Portland çimentosu inşaat ve madencilik sektörlerinde yapı malzemelerinin inşasında yaygın olarak kullanılmasına rağmen yüksek CaO, C₃S ve C₃A içeriğinden dolayı asit ve sülfat gibi kimyasal etkilere karşı istenilen dayanımı gösterememektedir. Norveç'te 1970'lerden sonra normal portland çimento kullanılarak inşa edilen köprülerin %25'inin korozyon problemlerine maruz kaldığı, Birleşik Devletler'de ise 600.000 köprünün %40'ının korozyon problemlerinden etkilendiği ve toplam onarım bedelinin 50 milyar \$ olduğu belirtilmiştir (Torgal vd, 2008a). Normal çimento ile üretilmiş beton, yüksek permeabiliteye sahip olması nedeniyle bünyesine su ve agresif elementlerin girişine izin vererek karbonasyon ve korozyon problemlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca bünyesinde bulunan Ca(OH)₂, çözülmüş asit ve sülfat bileşenleri ile reaksiyona girerek beton yapısına zarar veren bileşiklerin oluşmasına sebep olmaktadır (Torgal vd., 2008b). Bu yüzden çimento endüstrisinde, yüksek miktarda enerji ve hammadde gerektiren, doğayı kirleten üretim süreçleri nedeniyle daha çevreci bağlayıcı imalatına yönelik çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir.

Normal Portland çimentosu günümüzde en yaygın kullanılan çimento olmasına rağmen katkılı çimento üretimi ve kullanımı da çevresel kaygılardan dolayı giderek yaygınlaşmaktadır. Böylece çimento üretiminde yakıt ve enerji tasarrufu sağlanırken, çimento üretim maliyetleri ve atmosfere salınan zararlı gaz emisyonlarının miktarı da azaltılmaktadır.

Puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddelerinin bağlayıcı maddelerle hazırlanmış numunelerde dayanım kaybını engelleyerek dayanıklılığı arttırırken, enerji maliyetlerini, bağlayıcı maliyetlerini ve CO₂ emisyonlarını azalttığı bilinmektedir. Puzolanik özelliğe sahip atık, yan sanayi ürünleri yada endüstriyel ürünlerin çimentoya katkı olarak yada alternatif olarak kullanılması durumunda, CO₂ emisyonlarının yaklaşık %30 ila %50'ye kadar azaltılabilme potansiyeli bulunmaktadır (Ruskovic ve Bjugovic, 2005; Ehrenberg, 2005). Ayrıca mineral katkı maddelerinin çimentoya katkı olarak kullanılması durumunda çimento üretimi esnasındaki enerji maliyetlerinden yaklaşık %50 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir (Flower ve Sanjayan, 2007).

Günümüzde Portland çimentosu yerine kullanılan en ilgi çekici bağlayıcılar yüksek fırın cürufu, uçucu kül vb. puzolanik malzemelerin alkali aktivatörler ile aktivasyonu sonucu elde edilen bağlayıcılardır. Alkali aktivatörlerin kullanılması ile asit, sülfat, yangın vb. etkilere daha dayanıklı alkali aktive yüksek fırın cürufu çimentosu (Glukhovsky, 1959; Krivenko, 1986; Wu vd. 1990; Wang ve Scrivener. 1995; Fernandez-Jimenez vd., 1999; Shi vd., 2006) ve uçucu kül, metakaolin gibi malzemelerin aktifleştirilmesiyle de jeopolimer çimentolar (Davidovids ve Sawyer, 1985; Fernandez-Jimenez vd., 2005; Yip, vd., 2008; Bondar vd., 2011) geliştirilmiştir.

Aktifleştirilmiş bağlayıcı sistemler ile; milyonlarca ton yan sanayi ürünü ve atıkların etkin ve çevreye duyarlı bağlayıcı sistemler olarak kazanılması, erken kür sürelerinde yüksek dayanım, kimyasal etkilere karşı çok yüksek dayanıklılık, daha düşük enerji maliyetleri ve daha düşük gaz emisyonlarını mümkün kılmaktadır.

1.3.1. Alkali Aktive Bağlayıcıların Kronolojik Gelişimi

Ülkemizde, Mısır'da, Mezopotamya'nın değişik yörelerinde ve dünyanın değişik yerlerinde kirecin harç malzemesi olarak kullanılmasıyla inşa edilen ve günümüze kadar ulaşan yapı örnekleri mevcuttur. Eski Yunanlılar ve Romalılar günümüze ulaşan eserlerinde, kireci bağlayıcı üretiminde kullanmışlardır (Şekil 1).

MÖ 70-25 yıllarında yaşamış Mimar Vitruvius 'On Architecture' (Mimarlık Üzerine) adında 10 ciltlik bir kitap yazmıştır. Bu kitapta kireç ve puzolanik maddelerin karışımlarının bağlayıcı özelliklerinden bahsetmiştir. Ayrıca akarsu ve deniz kenarlarına iskele ve liman inşalarına yönelik kullanılabilecek harç için karışım oranı vermiştir. Ayrıca bazı araştırma sonuçlarına göre de Anadolu'da Çatalhöyük'teki birçok evin inşasında kullanılan sıvanın 7000 yıl öncesine ait olduğu belirtilmiştir.

Ülkemizde de Çorum, Tokat ve Malatya başta olmak üzere antik Hitit kentlerinde puzolanik maddelerin kireç ile karıştırılmasıyla hazırlanan harç yapıların inşasında kullanılmıştır. Ayrıca, Güneydoğu Anadolu Bölgesinde Asurlulardan kalma tarihi kalıntılarda da puzolanik malzemelerle kirecin karıştırılması ile elde edilen malzemelerin kullanılmış olması, Romalılar ve Yunanlılardan önce Anadolu'da çimento benzeri maddelerin kullanıldığının kanıtlarıdır. Bununla birlikte Teos (İzmir), Efes (İzmir), Afrodisias (Aydın) ve Kinidas (Muğla) gibi antik kentlerde de benzer özellikte hazırlanmış olan harç örneklerine yaygın olarak rastlanmıştır.



Şekil 1. Günümüze ulaşan eski Roma eserleri

Portland çimentoya alternatif olarak kullanılabilen alkali aktive çimentolara yönelik 1940’lardan bu yana literatüre giren çalışmaların da yer aldığı önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Glukhovsky (1959), ilk kez, eski Roma ve Mısırlıların yaptığı yapıların C-A-S-H içerdiğini, bu yapıların günümüze kadar gelme sebebinin ise yapılarının bünyesinde bulunan ansit kristallerinden kaynaklandığını keşfetmiştir. Bu araştırmaların ışığında, alüminyo silikat içeren yan sanayi ürünlerinden “zemin-çimentosu (soil-cement)” olarak isimlendirdiği alkali aktive bağlayıcıları geliştirmiştir. Glukhovsky vd. (1980), yüksek fırın cürufunun aktifleştirilmesiyle oluşan kalsiyum silikat hidrat, kalsiyum ve sodyum alüminosilikat hidrat ile killi malzemelerin alkali aktivasyonu sonucunda alüminyum silikat hidrat oluşumlarını belirlemiştir (Torgal vd.,2008a).

Davidovits (1979), eski Mısırlıların ve Romalıların çok eski dönemlerde yaptıkları ve günümüze kadar ulaşan tarihi yapıtlarını alkali aktive bağlayıcıları kullanarak yaptıklarını rapor etmiştir. Örneğin, Davidovits (1979) Mısır piramitlerinin çok ince kırılmış kireç taşının NaOH ve Na₂CO₃ gibi aktivatörler ve su kullanılarak yerinde kurulan kalıplar yardımı ile inşa edildiklerini belirtmiştir. Bu tezini ise mısır piramitleri üzerinde yürüttüğü mineralojik ve kimyasal analizler ile piramitlerin yapısal ve dokusal özelliklerini araştırarak desteklemiştir (Torgal vd., 2008a).

Alkali aktive bağlayıcılar genel olarak; temel beton yapıları, beton büzler, beton parkeler, istinad duvarları, beton direkler, kuyular, kanallar, refrakter betonlar, tehlikeli ve radyoaktif maddelerin stabilizasyonu gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Alkali aktive bağlayıcıların kullanılması ile değişik yapı türlerinin inşası

1.3.2. Alkali Aktivatörler

Puzolanik özelliğe sahip mineral malzemeler genellikle katkılı çimento üretiminde kullanılmaktadır. Bu mineral katkı maddeleri alkali aktivatörlerle aktifleştirildiğinde çimento yerine alternatif olarak kullanılabilir. Glukhovsky (1981), kimyasal bileşimlerine göre alkali kimyasalları “M” alkali iyonları olmak üzere altı gruba ayırmıştır:

1. Kostik alkaliler; MOH
2. Silikat içermeyen zayıf asit tuzları; M_2CO_3 , M_2SO_4 , M_3PO_4 , MF
3. Silikatlar; $M_2O.nSiO_2$
4. Alüminatlar; $M_2O.nAl_2O_3$
5. Alüminosilikatlar; $M_2O.Al_2O_3.(2-6)SiO_2$
6. Silikat içermeyen kuvvetli asit tuzları; M_2SO_4

Bu aktivatörlerden en yaygın ve ekonomik olanları sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3), sıvı sodyum silikat ($\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$) ve sodyum sülfattır (Na_2SO_4). Bu tez çalışmasına yönelik deneysel çalışmalarda alkali aktivatör olarak katı sodyum meta silikat (SMS) ve sıvı sodyum silikat (LSS) ($\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2$) ile sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır.

1.3.2.1. Sodyum Hidroksit (Kostik Soda)

Moleküler formülü NaOH olan sodyum hidroksit kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan kimyasallardan biridir. Piyasada hidrit ve anhidrit formda küçük ince taneli, boncuğumsu vb. katı yada değişik konsantrasyonlarda çözelti formlarında bulunabilir. Katı hidratlar $\text{NaOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaOH}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaOH}\cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaOH}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{NaOH}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ olmak üzere beş formda bulunur. 20 C° deki çözünebilirlik derecesi %53'tür. Anhidrit sodyum hidroksit (NaOH) normal oda sıcaklığında su ile eşit oranlarda çözünebilir.

NaOH çözünürken yüksek miktarda enerji açığa çıkar. Bundan dolayı katı NaOH taneciklerini ergitirken yada konsantre NaOH çözeltisini seyreltirken çok dikkatli olmak gerekmektedir. Derişik NaOH çözeltisinin üzerine ve katı NaOH taneciklerinin üzerine kesinlikle su ilave edilmemelidir. Tablo 1'de NaOH genel özellikleri verilmiştir.

NaOH çimento hidratasyonunda priz hızlandırıcı olarak yada puzalonik özelliğe sahip mineral maddelerin aktifleştirilmesinde kullanılır. Ancak bu işlemlerde kullanılırken ya çözelti formunda kullanılmalı veya anhidrit katı NaOH önce çözülerek kullanılmalıdır.

Tablo 1. NaOH kimyasalına ait genel özellikler

Tanım	Değer/Birim
Moleküler formül	NaOH
Kütle	39.9925 g/mol
Görünüş	Beyaz opak kristal
Yoğunluk	2.13 g/cm ³
Ergime noktası	318 C°
Kaynama noktası	1388 C°
Suda Çözünebilirlik (20 C°de)	1110 g/dm ³
Metanolde Çözünebilirlik	238 g/dm ³
Etanolde Çözünebilirlik	<139 g/dm ³
Buhar Basıncı (20 C°de)	<18 mm Hg

1.3.2.2. Sodyum Silikat ve Sodyum Meta Silikat (SMS-Katı Sodyum Silikat)

Sodyum silikat, sodyum oksit (Na_2O) ve silisyumdioksit (SiO_2) içeren ve $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$ genel formülü ile gösterilen değişik oranlardaki bileşimlerin genel adıdır. Burada “n” bir sayıdır ve “n” in farklı değerleri için $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$ endüstriyel uygulamalar açısından farklılık arz eder. Likit sodyum silikat için bu değer 1.60-3.85 aralığında değişir. Bu aralığın dışındaki bileşime sahip likit sodyum silikat özelliklerini uzun süre koruyamaz ve kullanımı pratik değildir.

Ticari kalitedeki likit $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$ genel olarak 1,60-3,85 modül oranlarında üretildiğinden, belirli bir kimyasal bileşimi yoktur. Dolayısıyla modül oranına bağlı olarak farklı özelliklere sahiptir. Fakat moleküler olarak aynı Na_2O ve SiO_2 oranına sahip çözeltiler yoğunlaştırılırsa kristalin (katı) sodyum silikat (sodyum metasilikat) elde edilebilir.

Kullanım alanları genel olarak; tekstil işlemleri, temizlik ürünleri, metal sanayi, zemin stabilizasyonu, hızlandırıcı madde, kağıt üretimi, döküm sanayinde yüksek sıcaklık bağlayıcılarının imalatı şeklinde sıralanabilir. Ayrıca sodyum silikat betonda yaygın bir şekilde priz hızlandırıcı olarak kullanılmaktadır.

Sodyum meta silikat (SMS), moleküler olarak eşit oranda Na_2O ve SiO_2 oranına sahip çözeltilerin konsantre edilmesi ve yoğunlaştırılmasıyla üretilirler. SMS; $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ şeklinde farklı formda bulunabilir. Sıvı ve katı sodyum silikatın fiziksel ve termodinamik özellikleri aşağıda Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Anhidrit ve hidrat sodyum silikatların fiziksel ve termodinamik özellikleri ((Vail ve Wills, 1952-Shi vd. 2006’dan) (Cihangir, 2011))

Formül	Yoğunluk (g/cm^3)	Ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Oluşum ısısı ΔH (Kcal/g·mol)	Serbest Enerji ΔG (Kcal/g·mol)	Entropi S
$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$	2.61	1089	-359.8	-338	29
$\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2$	2.50	874	-576.1	-541.2	39.4
$\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$	-	-	151.8-208.3n	-142.6-195.6n	18+11n
$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.75	72.2	-722	-631.5	77
$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.81	62.9	-792.6	-688.2	87
$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot 9\text{H}_2\text{O}$	1.65	47.9	-1005.1	-803.3	107

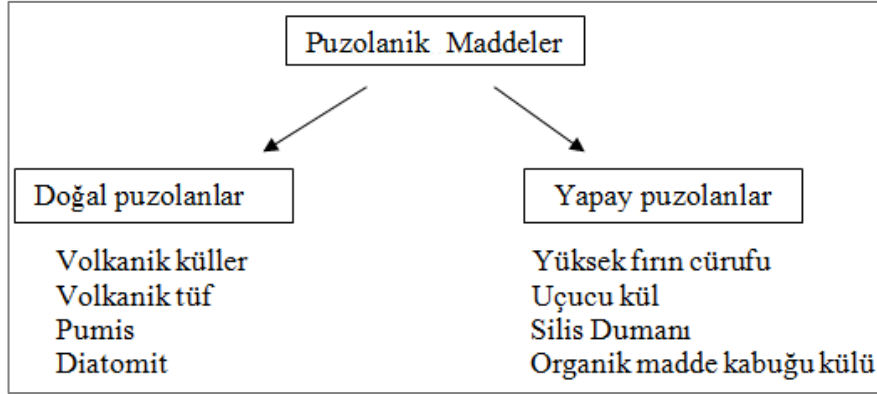
1.3.3. Puzolanik Mineral Katkı Maddeleri

Puzolanik mineral katkı maddeleri, çimento ve beton üretiminde kullanılan çeşitli endüstriyel yan ürünler (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, atık cam, vb.) ve/veya atıklar ve doğal maddeleri (doğal puzolan, kil, kalker, vb.) ifade eden genel bir terimdir. Mineral katkıların çimento ve betonda bir bileşen olarak değerlendirilmesi, ekonomik, teknik ve çevresel sebeplerden dolayı oldukça önemlidir. Bu malzemeler, puzolanik bağlayıcı ve dolgu maddesi özellikleri nedeniyle, çimento veya betonda katkı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Mineral katkı maddeleri, özellikle erken yaşlarda düşük hidrolik reaktivite gösterirler. Bu sebeple, zaman zaman kimyasal, mekanik veya termal işlemlerle aktive edilmeleri yoluna gidilmektedir.

Son yıllarda puzolanik mineral katkı maddelerinin alkali aktivatörler ile aktifleştirilmesi ve çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılmasına yönelik bilimsel ve uygulamalı çalışmalarda büyük artış olmuştur.

1.3.3.1. Puzolanik Maddeler

Puzolanlar, çok ince öğütüldüğünde bağlayıcı özelliğe sahip olan normal sıcaklıklarda nem varlığında kalsiyum hidroksit gibi aktive edici maddeler ile tepkimeye giren silis/silisli ve alüminyum içerikli maddelerdir. Puzolanik maddeler, doğal puzolanlar (volkanik küller, volkanik tüf, pümis, diatomit vb.), ve yapay puzolanlar (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, organik madde kabuğu külü, yakılmış kil, şeyl vb.) olmak üzere iki ana grup altında toplanabilir (Şekil 3). Puzolanik maddelerin puzolanik etkinliği, malzemenin fiziksel özelliği (tane boyut dağılımı ve tane şekli), kimyasal ve mineralojik bileşimi ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin, iyi bir puzolanik etkinliğe sahip malzeme, mineralojik olarak yüksek oranda camsı faz ($\geq 80\%$) ve alkali feldispat, düşük oranda kil minerali içermektedir. Ayrıca puzolan olarak kullanılacak mineral malzemelerde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının en az %70, inceliğinin de en az $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ olması gerekmektedir (TS 25, 1975). Özgül yüzey alanının artması, malzemenin puzolanik etkisinin artmasına yol açmakta ve dayanım ve duraylılığın artmasına olumlu yönde katkı sağlamaktadır.



Şekil 3. Pozolanların sınıflandırılması

Pozolanlar, katkı maddesi olarak doğrudan çimento ile karıştırılarak kullanılabilir. Ayrıca, belirli oranlarda klinker ile birlikte öğütülerek pozolanik çimento üretiminde de kullanılabilir. Son yıllarda alkali aktivatörler ile pozolanik özelliğe sahip özellikle uçucu kül, yüksek fırın cürufu, fosfor cürufu vb. maddelerin aktifleştirilmesi ile elde edilen bağlayıcılara yönelik çalışmalarda oldukça artış gözlenmektedir. Sülfürlü atıkların kullanılması ile hazırlanan macun dolguda normal portland çimentosu yerine aktifleştirilmiş yüksek fırın cüruflarının kullanılması durumunda, asit, sülfat vb. içeren ortamlara karşı daha yüksek dayanıma sahip ve daha dayanıklı dolgu malzemelerinin üretilebileceği belirtilmiştir (Cihangir, 2011)

Pozolanların mineral katkı maddesi olarak çimentolu karışımlarda kullanılması başlıca;

- i) porozite, boşluk oranı ve geçirgenliği azaltma,
- ii) alkali-silika reaksiyonu ve asit sülfat etkisi nedeniyle oluşan dayanım ve dayanıklılık kaybını engelleme,
- iii) çimento maliyetini ve tüketimini azaltma,
- iv) pozolanlarla ilgili atık depolama/rehabilitasyon maliyetlerini azaltma ve olumsuz çevre problemlerini azaltma şeklinde sıralanabilir.

1.3.3.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

Çimento ve beton endüstrisinde kullanılan ve mineral katkı olarak adlandırılan silisli-alüminli malzemeleri alkali ile aktive ederek alkalın bağlayıcılar veya alkali ile aktive çimentolar üretilmektedir.

Alkali aktive çimentoların eldesinde kullanılan mineral katkıları genel olarak demir cürufu (yüksek fırın cürufu), çelik cürufu, fosfor cürufu, uçucu kül, volkanik tuf, zeolit, metakaolin ve silis dumanı şeklinde sıralanabilir. Bu mineral katkıları arasında en yaygın olarak kullanılanlar uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur. Çimento endüstrisinde en yaygın kullanılan puzolan yüksek fırın cürufudur. Yüksek fırın cürufunun hidrolik aktivitesi diğer cürüflardan daha yüksek olduğu için, alkali aktivasyon derecesi de yüksektir (Shi ve Li, 1989; Adam, 2009).

Macun dolguda CEM I 42.5 R yerine aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu kullanıldığında, yüksek miktarda sülfürlü mineral ve sülfat konsantrasyonu içeren tesis atıklarının kullanıldığı agresif ortamlarda (DIN 4030) kimyasal etkilere karşı 5 kat daha yüksek dayanım sonuçlarına sahip dolgu malzemeleri üretilebilmektedir (Cihangir, 2012). Günümüzde yüksek fırın cürufu kullanımı hazır beton sektöründe giderek artış göstermektedir. Yüksek fırın cürufunun betonun uzun dönem dayanımını ve durabilitesini artırdığı, beton geçirimsizliğini azalttığı ve kimyasal etkenlere karşı betonun dayanıklılığını artırdığı birçok çalışmada gözlenmiştir.

Ayrıca bir atık olarak cürufun çimento ile ya da doğrudan betona katılması yolu ile doğa korunmakta, çimento üretiminde daha az hammadde kullanılmakta ve enerji tüketimi azaltılmaktadır. Higgins (2006), çimento ve yüksek fırın cürufunu çevresel etkileri bakımından Tablo 3'te kıyaslamıştır.

Sonuç olarak yüksek fırın cürufu kullanımı daha az çevre kirlenmesi, enerji tüketiminin azalması, yüksek performanslı ve servis ömrü yüksek betonların yapılmasına yardımcı olmaktadır.

Tablo 3. Yüksek fırın cürufunun ve çimentonun çevresel etkiler açısından karşılaştırılması

Çevresel Etki	Değerlendirme Kriteri	Etki	
		Bir ton yüksek fırın cürufu	Bir ton portland çimento
İklim değişikliği	CO ₂	0.07 ton	0.95 ton
Enerji ihtiyacı	Gerekli enerji	1.300 MJ	5.000 MJ
Mineral kazısı	Miktar olarak gereksinim	-	1.5 ton
Atık uzaklaştırma	Uzaklaşan miktar	1 ton ekstra kazanım	0.02 ton

1.4. Aktifleştirilmiş Bağlayıcılarda Dizayn Esasları

Shi vd. (2006), alkali bağlayıcıların karışım ortamına ilave şekillerinin ve aktivatörlerin önceden koşullandırılmasının farklılık arz edebileceğini ifade etmiştir. Cüruf çimentoların alkali aktivasyonu için alkali aktivatörler karışım ortamına; suda çözündürülerek, cürufle öğütülerek ve su ilavesinden önce cürufle karıştırılmak üzere 3 farklı şekilde ilave edilebilir.

Bununla birlikte alkali aktivatörlerle aktifleştirilen bağlayıcıların karışım ortamına ilave şeklinin, araştırma ve uygulama şekillerinde farklılıklar arz ettiği görülmüştür. Örneğin; laboratuvar ortamında bağlayıcı madde (cüruf) belirli bir formülde su + aktivatör ile önceden karıştırılıp jel şeklinde hazırlanmış, daha sonra karışım ortamına (kum, agrega vb.) ilave edilebilmektedir.

Endüstriyel uygulamada ise bağlayıcı madde (cüruf) öncelikle mikserde dolgu ana malzemesi (agrega, kum vb.) ile döküm noktasına gelmeden önce su ile karıştırılarak koşullandırılmaktadır. Aktifleştirici maddenin ise işlenebilirlik problemlerini ortadan kaldırmak için dökümden çok kısa süre önce mikserde ilave edildiği görülmüştür.

1.5. Madencilikte Dolgu İşlemi

Derin yeraltı madenlerinde karşılaşılan çok yüksek basınçlar, maden cevherinin ekonomik bir şekilde alınması ve emniyetli bir operasyonun yürütülebilmesi için farklı tahkimat sistemlerini gerekli kılmaktadır. Dolgu işlemi, bu sistemlerin temel bir unsuru olarak kabul edilmektedir.

Dolgu, yeraltı madencilik çalışmaları sırasında güvenli çalışma ortamı sağlamak amacıyla yeraltında madenin üretilmesi ile oluşan boşlukları uygun bir çimentolu malzeme ile doldurma işlemidir. Madenlerde dolgu, malzemesi özelliklerine bağlı olarak genellikle üç farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlar; i) hidrolik dolgu, ii) kaya dolgusu ve iii) macun dolgudur (Nasir ve Fall, 2009; Fall vd., 2010). Bu dolgu malzemelerine ait özellikler Tablo 4'te verilmiştir.

Kaya dolgu, yeraltı madencilik çalışmaları sırasında yan kayaç içinde açılan galeri aynalarından çıkan çeşitli boyutlardaki kaya parçalarının madeni alınmış boşlukların doldurulmasında pasa olarak kullanıldığı dolgu tipidir. Kaya dolgu sisteminin uygulanması, zenginleştirme tesisinin madenden çok uzakta olması veya proseste

öğütmenin çok ince olması sonucu olabilir (Karapınar, 2009). Kaya dolgu yönteminde kullanılacak malzemenin taşocağı vb. yerlerden temin edilmesi durumunda maliyet artacaktır.

Tablo 4. Dolgu tipleri ve özellikleri (Erçıkıd, 2009a)

Özellikler	Kaya Dolgu	Hidrolik Dolgu	Macun Dolgu
Katı Oranı	%100	%60-75	%75-85
Bağlayıcı	çimentolu veya çimentosuz	çimentolu veya çimentosuz	yalnızca çimentolu
Dayanım	yüksek	düşük	orta
Nakliye	nakliye kuyusu ve mobil ekipmanlar	sondaj kuyusu ve boru hattı	sondaj kuyusu ve boru hattı
Tane Boyu	>20 cm	>20 µm (≥%90)	<20 µm (≥%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 problemi yok	malzeme temini ve hazırlaması kolay, sınıflandırılmış atıklar kullanılır, kullanımı yaygın	daha az çimento tüketimi, tüm atıklar kullanılır, dolguda çok az su, uygulanması kolay
Dezavantajları	yüksek nakliye giderleri, boşlukların yapısı, tesis atıkları kullanılamaz	fazlalık suyun üretim panosundan uzaklaştırılması, yüksek çimento tüketimine karşılık düşük dayanım	ileri teknoloji gerektirir, pompalama ve susuzlandırma işlemleri nispeten pahalı

Hidrolik dolgu, yeraltında üretimi yapılan boşlukların su ile taşınan malzeme ile doldurulması ve fazlalık suyun katı kısımdan ayrılması sonunda altta çöken malzemenin sertleşmesi esasına dayanır. Hidrolik dolgu genellikle ağırlıkça % 70 katı oranında hazırlanır ve gerekli permabiliteyi sağlamak için 10 µm altı malzeme miktarının ağırlıkça % 10'dan fazla olması istenmez.

İdeal olarak hidrolik dolgu, içerisinde bulunan suyun mümkün olduğu kadar çabuk uzaklaşabilmesi ve fazla gözenek suyu basıncı oluşmaması için serbest drenaj özelliğine sahip olmalıdır (Abdul-Hussain, 2011). Hidrolik dolgunun en önemli avantajı kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli olmasıdır.

Macun dolgu ise, ağırlıkça %70-85 arasında katı içeren tesis atıklarının su ile karıştırılması ile elde edilen bir malzemedir. Macun dolgunun gerekli pompalanabilirlik ve işlenebilirlik için 20µm altı malzeme içeriğinin en az %15 olması istenir (Landriault, 2001).

İşletme maliyetinin düşük olması ve ihtiyaca yönelik dayanımlara yönelik dizayn özellikleri macun dolgu yöntemini, hidrolik ve kaya dolgu metodlarına göre avantajlı kılmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajlarından bir diğeri ise cevher zenginleştirme tesis atıklarının en az %50'sinin yeraltında depolanmasına imkân kılmasıdır. Böylece atık depolama ve madencilik faaliyetleri ve sonrasındaki rehabilitasyon maliyetlerini önemli ölçüde azaltmasıdır.

1.5.1. Macun Dolgu Yöntemi

Cevher zenginleştirme işlemleri sırasında üretilen atıkların güvenli bir şekilde depolanması için alternatif atık yönetimi metodu olarak geniş ölçüde kullanılmakta olan macun dolgu yöntemi ilk olarak 1970'li yılların sonlarında Almanya'da Bad Grund Madeni'nde uygulanmıştır.

Macun dolgu ülkemizde 1999 yılından itibaren Çayeli Bakır İşletmeleri'nde uygulanmaya başlanmış olup, günümüzde de başarılı bir şekilde uygulaması devam etmektedir. 2012 yılında Eti Bakır A.Ş. (Kastamonu Küre yeraltı bakır işletmesi), zenginleştirme tesisinin ve atık barajındaki atıkların madencilik faaliyetleri sonucu yeraltında açılan üretim boşluklarının doldurulmasına yönelik macun dolgu tesisinin kurulumu için altyapı çalışmalarına başlamıştır.

İzmir Efemçukuru altın madeninde de atıkların %50'lik kısmı susuzlandırma işlemlerinden sonra yerüstünde depolanmaktadır. Geriye kalan atıklar ise yeraltı üretim açıklıklarının dolgusuna yönelik macun dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Erçıkı vd.,2012).

Macun dolguyu oluşturan malzemelerin özellikleri, macun dolgunun kısa ve uzun dönemdeki dayanım, duraylılık, pompa-boru sistemi ile taşınması ve boşluklarda yerleştirilmesi gibi reolojik özelliklerini etkilemektedir.

Yeraltına açılan boşlukların doldurulmasına yada atıkların depolanmasına yönelik uygulanan macun dolgu işlemlerinde dolgunun sıvılaşıma riskini elimine etmek için bir günlük dayanımının 0,15-0,3 MPa (Bloss, 2002), dolgunun kendi stabilitesini

sağlayabilmesi için 28 günlük kür süresinde 0.7 MPa (Stone, 1993; Brackebusch, 1994; Landriault, 1995), uzun dönemde (>91 günlük kür süresi 1,0 MPa (Stone, 1993) ve tahkimat olarak kullanılabilmesi için minimum 5,0 MPa (Stone, 1993; Belem ve Benzaazoua, 2004) dayanıma sahip olması istenmektedir.

Macun dolgunun hazırlanmasında yaygın olarak normal Portland çimentosu ve puzolanik Portland çimentoları kullanılmaktadır. Macun dolguda normal çimento yerine aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufalarının kullanılması durumunda, agresif ve korozif ortamlara (asit sülfat vb.) karşı daha yüksek dayanıma sahip daha duraylı dolgu malzemelerinin üretilebileceği belirtilmiştir (Cihangir, 2011).

Macun dolguda da aktifleştirilmiş bağlayıcıların kullanılması durumunda yüksek miktarlarda sülfürlü mineral ve yüksek sülfat iyonu konsantrasyonu içeren tesis atıklarının kullanılması durumunda çimentoyla kıyaslandığında yaklaşık 5 kat daha yüksek dayanım sonuçlarına sahip duraylılığı yüksek dolgu malzemeleri elde edilebilmektedir (Cihangir vd., 2012; Cihangir vd., 2018).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Portland çimentosuna alternatif olarak geliştirilen ve puzolanik özelliğe sahip mineral katkıların alkali kimyasallar kullanılarak aktifleştirilmesiyle oluşan bağlayıcılar asit ve sülfat etkilerine karşı oldukça dayanıklıdırlar ve bu tür ortamlarda dahi yüksek dayanım ve duyarlılık özelliklerine sahip numunelerin üretilmesine imkân kılmaktadırlar.

Macun dolguda alkali aktive yüksek fırın cüruflarının kullanılması durumunda, zenginleştirme prosesleri nedeni ile yüksek sülfat içeren tesis atıklarının kullanıldığı agresif ortamlarda ve kendiliğinden asit ve sülfat üreten ortamlardaki kimyasal korozyonlara karşı 5 kat oranında yüksek dayanıma sahip dolgu malzemeleri üretilmektedir (Cihangir vd., 2012).

Cürufların alkali aktivasyonu için alkali aktivatörler üç farklı şekilde kullanılabilir (Shi vd., 2006):

1. Suda çözündürülerek
2. Cürufla öğütülerek
3. Su ilavesinden önce cürufla karıştırılmaktadır.

Bu şekilde hazırlanan bağlayıcılar karışım ortamına 3 farklı şekilde ilave edilebilmektedir.

Bununla birlikte alkali aktivatörlerle aktifleştirilen bağlayıcıların karışım ortamına ilave şeklinin, araştırma ve uygulama şekillerinde farklılıklar arz ettiği görülmüştür. Örneğin; laboratuvar ortamında bağlayıcı madde belirli bir formülde su + aktivatör ile önceden karıştırılıp jel şeklinde hazırlanmış, daha sonra karışım ortamına (kum, agrega vb.) ilave edilmiştir. Endüstriyel uygulamada ise puzolanik bağlayıcı madde (cüruf+agrega/kum+su) karışımına dökümden hemen önce aktivatör ilavesinin yapıldığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, yaklaşık %7 bağlayıcı oranında kontrol amaçlı normal portland çimentosu ve farklı alkali aktivatörler kullanılarak yüksek fırın cürufunun farklı şekillerde aktifleştirilmesi ile elde edilen bağlayıcı formlardan macun dolgu numuneleri

hazırlanmıştır. Çalışmalar kapsamında aktivatörler (katı sodyum metasilikat (SMS), sodyum silikat (LSS) ve sodyum hidroksit (NaOH)), yüksek fırın cürufu ve maden tesis atıkları ile farklı zamanlarda karıştırılmıştır. Elde edilen nihai karışım malzemesi macun dolgu malzemesi olarak 54×108 mm'lik kutulara dökülerek 14, 28, 56, 112, 224 ve 360 günlük kür işlemine tabi tutulmuştur.

2.2. Macun Dolgu Malzemelerinin Karakterizasyonu

2.2.1. Atık Malzeme

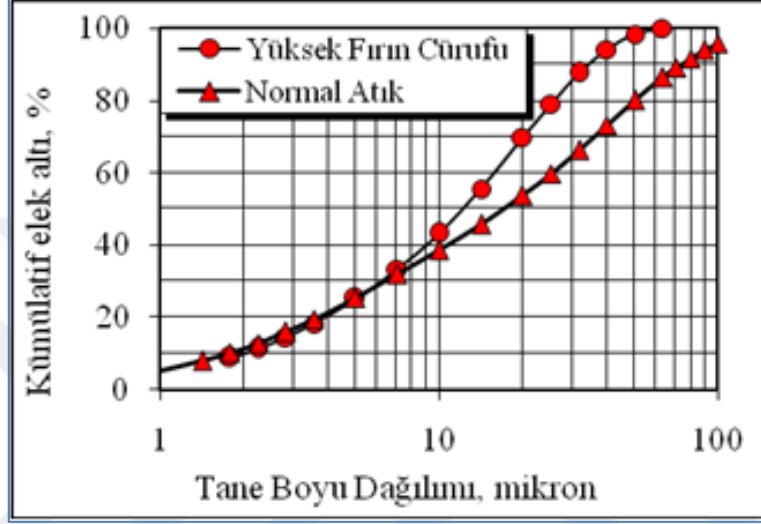
Macun dolgu malzemelerinin hazırlanmasında kullanılan atık malzeme, Rize İli Çayeli İlçesi Madenköy Beldesinde madencilik faaliyetlerini yürüten Çayeli Bakır İşletmeleri'nden temin edilmiştir. Tesis atığı, bakır cevherinin flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesi sonucu ortaya çıkan malzemedir yaklaşık %60 katı oranında alınmış (Şekil 4), daha sonra laboratuvarında homojenleştirilmesi sağlanmıştır. Macun dolgu malzemesinin istenen işlenebilirlik özelliklerine sahip olması ve yeraltı boşluklarına taşınması esnasında bünyesinde su tutması, segregasyon nedeniyle pompa ve boru sisteminde çökmelere neden olmadan kolaylıkla taşınabilmesi ve yeraltındaki boşluklarda uygun şekilde yerleşebilmesi için 20 mikron altı ince malzeme miktarının en az %15 olması gerekmektedir (Brackebusch, 1994).



Şekil 4. Atık malzemenin tesisten alınması

Atık malzemenin tane boyut dağılımı Malvern Mastersizer Hydro 200 MU ile yapılmıştır (Şekil 5). Atık malzemenin 20 µm altı malzeme miktarı ağırlıkça %53.70'tir. Atık bu özelliğinden dolayı orta boyutlu atık (%35-60 < 20µm için) sınıfına girmektedir (Landriault, 2001).

Atık malzemenin tane boyu dağılımına bağlı diğer fiziksel özellikleri ve kimyasal analizi de Tablo 5’te verilmiştir. Atık malzemenin kimyasal analizi Kanada’da ACME laboratuvarlarında ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy) kimyasal analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kimyasal analize göre malzemedeki S⁻² (Sülfid Kükürdü) içeriğinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Atık malzeme ve yüksek fırın cürufunun tane boyu dağılımları

Atık malzemenin kimyasal bileşimine bakıldığında baskın mineralin pirit olduğu görülmektedir. Atık içerisinde ayrıca kuvars, albit, kalsit, barit, muskovit, dolomit gibi minerallerde bulunmaktadır. Atık malzemelerde kısa ve uzun dönem dayanım ve uzun dönemde durabilite açısından, atıkların tane boyutlarının yanında minerolojik içerikleri de büyük önem taşımaktadır. Bilindiği üzere pirit minerali su ve oksijen bulunan ortamlarda oksidasyona uğramakta ve asit ve sülfat ürünleri oluşturmaktadır. Oksidasyon ürünleri portlandit gibi hidrotasyon ürünleriyle reaksiyona girerek genleşme özelliğine sahip jips ve etrenjit minerali oluşumuna ve dolgunun yapısal bütünlüğünün bozulmasına neden olmaktadır (Kesimal vd., 2004; Kesimal vd., 2005; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2009b; Erçikdi vd., 2010a, b). Alçıtaşı ve etrenjit 2,2 ve 2,8 kata kadar genleşme özelliği göstererek dolgu içerisinde 70-200 MPa’lık bir gerilme oluşturabilmektedir. Ayrıca pH’ın 9’un altına düşmesi hidrotasyon ürünlerinin bağlayıcılık özelliklerini yitirmesine ve dolgu duraylılığını kaybetmesine yol açmaktadır (Erçikdi vd., 2009c; Cihangir vd., 2012).

Tablo 5. Atık malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal bileşim	Atık (%)	Fiziksel özellikler	Atık
SiO ₂	12.8	Özgül ağırlık	3.93
Al ₂ O ₃	4.33	Özgül yüzey(cm ² /g)	3000
Fe ₂ O ₃	46.32	D ₁₀	1.757
CaO	2.55	D ₃₀	6.464
MgO	2.37	D ₅₀	17.157
TiO ₂	0.09	D ₆₀	25.478
CrO ₃	0.016	D ₉₀	73.836
Na ₂ O	0.17	C _u	14.5
K ₂ O	0.25	C _c	2.88
MnO	0.11		
P ₂ O ₅	0.09		
Kızdırma Kaybı	26.20		
S ⁻² (Sülfid Kükürdü)	30.09		
Toplam Kükürt	34.22		
Başlangıç pH değeri	9.17		
Başlangıç SO ₄ ⁻² (ppm)	2500		

2.2.2. Bağlayıcı Maddeler

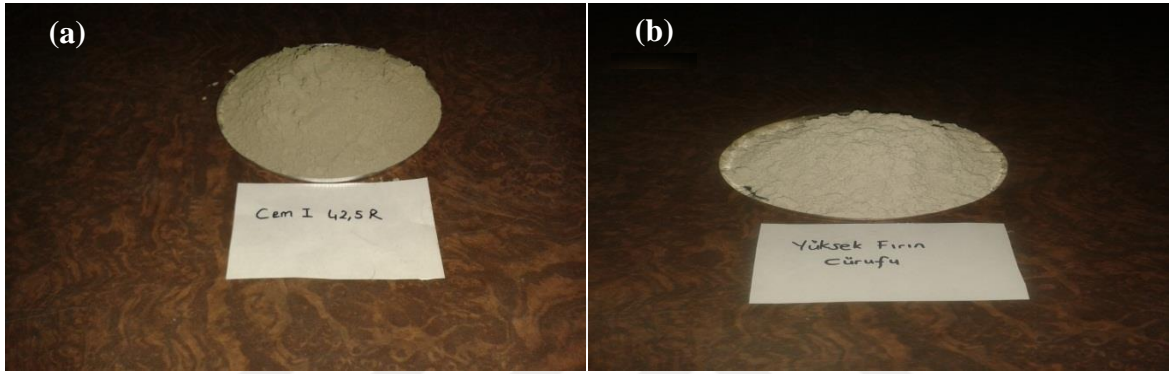
2.2.2.1. Çimento

Çimentonun kimyasal ve mineralojik özellikleri, asit ve sülfat etkilerine karşı dayanıklı ürünlerin üretilmesi açısından önemlidir. Yüksek C₃A içeriği ve yüksek C₃S/CaO oranına sahip bağlayıcılar asit ve sülfat etkilerine karşı dayanıksızlardır. Bu yüzden sülfür içeriği yüksek atıkların stabilizasyonunda kullanılacak çimento türü bağlayıcıların düşük C₃A içeriği, düşük C₃S/C₂S oranı ve yüksek SiO₂/CaO oranına sahip olması önerilmektedir (Hossain ve Lachemi, 2006; Şahmaran vd., 2007).

Bu tez çalışmasında, aynı bileşimlere sahip farklı formlardaki alkali aktive bağlayıcılar ile hazırlanan malzemelerin performans özelliklerini incelenmek için karşılaştırmada kontrol amaçlı kullanılan normal portland çimentosu (CEM I 42.5R), bir çimento fabrikasından temin edilmiştir (Şekil 6a).

2.2.2.2. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufunun betonun uzun dönem dayanımını ve durabilitesini artırdığı, beton geçirimsizliğini azalttığı ve kimyasal etkenlere karşı betonun dayanıklılığını artırdığı birçok çalışmada gözlenmiştir. Deneysel çalışmalarda bağlayıcı olarak kullanılmak üzere yüksek fırın cürufu kullanılmıştır (Şekil 6b). Cüruf malzemesi Kardemir Demir Çelik fabrikasından temin edilmiştir.



Şekil 6. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimento (a) ve yüksek fırın cürufu (b)

Yüksek fırın cürufun kimyasal özellikleri esas alındığında asidik karakterli olduğu görülmektedir. Yüksek fırın cürufunun aktifleştirilmesinde modül oranı 2.0 (ağırlıkça $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı; $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) olan sıvı sodyum silikat ($\text{LSS}:\text{Na}_2\text{O}/2\text{SiO}_2$), %99.5 saflıkta granüle sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum metasilikat (SMS) kullanılmıştır. Bağlayıcı maddelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6 ve Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 6. Bağlayıcı maddelerin fiziksel özellikleri

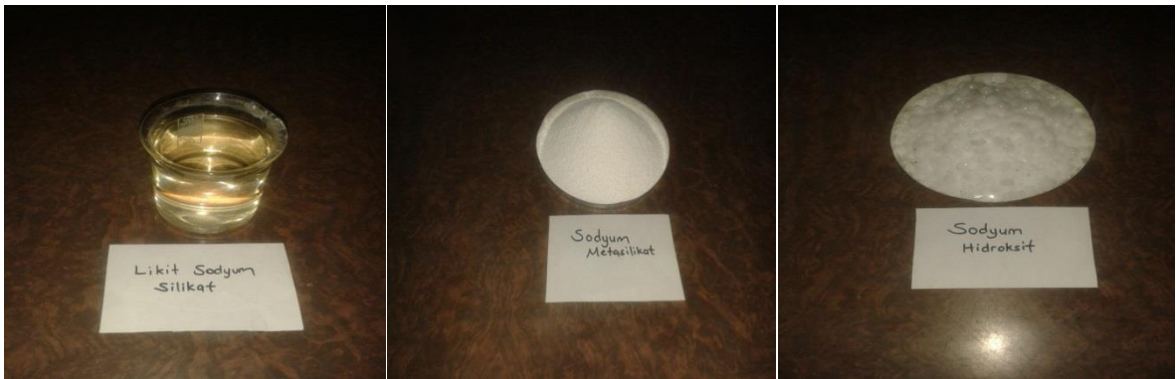
Fiziksel özellikler	CEM I 42.5 R	Yüksek Fırın Cürufu
Özgül ağırlık	3.16	2.92
Özgül yüzey (cm^2/g)	4170	4270
90 μm elek bakiyesi (%)	-	-
45 μm elek üstü (%)	2.33	3.78
32 μm elek üstü (%)	7.65	9.17

Tablo 7. Bağlayıcı maddelerin kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	CEM I (%)	Cüruf (%)
SiO ₂	19.93	39.62
Al ₂ O ₃	5.12	11.38
Fe ₂ O ₃	3.13	0.68
CaO	69.72	36.15
MgO	2.59	5.87
TiO ₂	0.26	0.98
CrO ₃	0.04	0.01
Na ₂ O	0.28	0.29
K ₂ O	0.69	1.19
MnO	0.07	2.00
P ₂ O ₅	0.11	<0.01
Serbest Kireç	2.96	-
Kızdırma Kaybı (LOI)	3.90	0.20
SO ₃	2.95	1.62

2.2.2.3. Alkali Aktivatörler

Deneysel çalışmalarda yüksek fırın cürufunun aktifleştirilmesinde sodyum silikat (LSS:N₂O.2SiO₂), sodyum metasilikat (SMS) ve sodyum hidroksit (NaOH) olmak üzere üç farklı alkali aktivatör kullanılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Deneysel çalışmalarda aktifleştirme işleminde kullanılan aktivatörler

Yüksek fırın cürufunun aktifleştirilmesinde kullanılan sıvı sodyum silikatın (LSS) modül oranı 2.0, granüle sodyum hidroksit (NaOH) %99.5 saflıktadır. Tez çalışmasında

$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ formunda SMS kullanılmış olup $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 1.0'dır. NaOH ve SMS Merck kimyasallarından temin edilmiştir.

Aktifleştirme işlemlerinde sodyum silikatın modül oranı (ağırlıkça $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı; $M_s=\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) NaOH ile ayarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda NaOH suda çözüldükten sonra hazırlanan dizayn özelliklerine göre karışım ortamına ilave edilmiştir.

2.2.3. Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda, 3 farklı alkali aktivatör aşağıda verilen formlarda hazırlanarak karıştırma ortamına ilave edilmiştir.

1. SMS ile aktive cüruf dizaynı ve aktivatörün karışım ortamına ilave zamanı:

- a) % 7 (Katı SMS-cüruf ön karışımı)'nın atık malzeme ve su ile karıştırılması sonucu macun malzemenin elde edilmesi (Karışım-1-%7 C-Katı SMS-ÖK (K1))
- b) %7 (cüruf-Katı SMS)'in atık ve su ile beraber karıştırılması sonucu macun malzemenin elde edilmesi (Karışım-2-%7 C-Katı SMS-NK (K2))
- c) %7 (cüruf ile sıvı SMS'in ön karışımı) ile jelin eldesi sonrası atık ve su ile karıştırılarak macun malzemenin elde edilmesi (Karışım-3-%7 C-Sıvı SMS-ÖK (K3))
- d) %7 (cüruf + sıvı SMS)'in atık ve su ile beraber karıştırılması sonucu macun malzemenin elde edilmesi (Karışım-4-%7 C-Sıvı SMS-NK (K4))

2. LSS ile aktive cüruf dizaynı ve aktivatörün karışım ortamına ilave zamanı:

- e) % 7 (LSS + NaOH + cüruf ön karışımı) ile jelin eldesi sonrası atık ve su ile karıştırılarak macun malzemenin elde edilmesi (Karışım-5-%7 C-LSS-ÖK (K5))
- f) % 7 (LSS + NaOH + cüruf)'un atık ve su ile beraber karıştırılması sonucu macun malzemenin elde edilmesi (Karışım-6-%7 C-LSS-NK (K6))

3. NaOH ile aktive cüruf dizaynı ve aktivatörün karışım ortamına ilave zamanı:

- g) %7 (NaOH + cüruf ön karışımı) ile jelin eldesi sonrası atık ve su ile karıştırılarak macun malzemesinin elde edilmesi (Karışım-7-%7 C-NaOH-ÖK (K7))
- h) % 7 (NaOH + cüruf)'un atık ve su ile karıştırılması sonucu macun malzemenin elde edilmesi (Karışım-8-%7 C-NaOH-NK (K8))

Deneysel çalışmalarda, belirtilen dizaynlarda hazırlanan macun dolgu malzemeleri Univex SRMF20 Stand Model (20.8 litre) bir mikserde karıştırılarak homojenleştirilmiştir (Şekil 8a). Karıştırma işlemi her dizayn için 105 devir/dk'lık dönme hızında 7 dakika süreyle yapılmıştır. Hazırlanan taze dolgu malzemelerinin başlangıçtaki slump değerleri yaklaşık 7.5 inç (19 cm) olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 8b).

Yukarıda belirtilen dizaynlar için macun dolgu malzemeleri %7 bağlayıcı oranında hazırlanmıştır. Bağlayıcı oranı, toplam katı miktarının (atık+bağlayıcı) ağırlıkça %'sidir. Aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu aktivatör dozajı (Na_2O) %8 ve sodyum silikat modül oranı ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 1.0 olarak seçilmiştir. Tasarımlarda yüksek fırın cürufu ve normal Portland çimento için bağlayıcı miktarları ağırlıkça eşittir. Macun dolgu numuneleri bu tez çalışmasında 54 mm çapında ve 108 mm yüksekliğinde silindirik numune kaplarına, her kademedeki sıkılama yapılmak üzere 3 kademedeki dökülmüştür. Her bir kür süresi için 3 adet numune hazırlanmıştır. Atığın bünyesinde bulunan suya ilaveten, macun dolgu numunelerinin 7.5 (19 cm) inç slampta hazırlanmasında musluk suyu kullanılmıştır. Karışım içerisindeki fazla suyun drene olması için silindir kapların tabanında 7 adet 2 mm çapında delikler mevcuttur. Hazırlanan numuneler daha sonra bünyesindeki fazla suyun drene olması için ortalama 6-12 saat drenaj masalarında bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler, hava ile teması kesilecek şekilde sızdırmaz plastik poşetlere konulmuş ve poşetlerin ağızları bağlanmıştır. Numuneler 14-28-56-112-224-360 günlük kür sürelerinde dayanım testleri gerçekleştirilmek üzere, sıcaklık ve nem kontrollü kür dolabında $20\text{ C}^0 \pm 0.5\text{ C}^0$ kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 9).



Şekil 8. Malzemelerin mikserde karıştırılması (a) ve uygun kıvamda hazırlanması (b)



Şekil 9. Numunelerin sıkılanması (a), bünye serbest suyunun drene edilmesi (b), numunelerin hava ile temasının kesilmesi (c), kür dolabında bekletilmesi (d)

Yüksek fırın cürufunun farklı şekillerde aktifleştirilmesi ile elde edilen bağlayıcı formlarının macun dolgunun özelliklerine etkisini değerlendirmek için CEM I 42.5R ile kontrol numuneleri hazırlanmıştır. CEM I 42.5R içeren numunelerde deneysel çalışma koşulları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. CEM I 42.5R içeren kontrol numunelerinin deneysel çalışma koşulları

Bağlayıcı oranı (%)	Bağlayıcı (Çimento) Tipi	Katı Oranı	Su (%)	Atık (%)	Bağlayıcı (%)	Su / Bağlayıcı Oranı	Slamp değeri (inç)
7	CEM I 42.5R	76.82	23.18	71.44	5.38	4.31	7.6

Yüksek fırın cürufunun aktifleştirilmesinde sodyum silikat, sodyum metasilikat ve sodyum hidroksit olmak üzere 3 farklı alkali aktivatör farklı formlarda hazırlanarak kullanılmıştır. Her üç aktivatör tipi için aktivatör dozajı (Na_2O) %8 ve bağlayıcı oranı %7 alınarak macun dolgu numuneleri hazırlanmıştır.

Farklı alkali aktivatörler kullanılarak, yüksek fırın cürufunun farklı şekillerde aktifleştirilmesi ile elde edilen bağlayıcı formlarının macun dolgu performansına etkisine yönelik deneysel çalışma koşulları, kullanılan farklı alkali aktivatörler için Tablo 9, Tablo 10 ve Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 9. Sodyum metasilikat (SMS) ile hazırlanan macun dolgu malzemelerinin deneysel çalışma koşulları

Bağ. Oranı (%)	Aktivatör tipi / Na_2O Dozajı (%)	Kod	Cüruf Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)	Katı Oranı (%)	Su (%)	Atık (%)	Bağ. (%)	Su / Bağ. Oranı	Slamp değeri (inç)
7	SMS/8	K1	4270	79.19	20.81	73.65	5.54	3.76	7.7
7	SMS/8	K2	4270	79.43	20.57	73.87	5.56	3.70	7.7
7	SMS/8	K3	4270	79.43	20.57	73.87	5.56	3.70	7.5
7	SMS/8	K4	4270	79.43	20.57	73.87	5.56	3.70	7.6

Tablo 10. Likit sodyum silikat (LSS) ile hazırlanan macun dolgu malzemelerinin deneysel çalışma koşulları

Bağ. Oranı (%)	Aktivatör tipi / Na_2O Dozajı (%)	Kod	Modül Oranı	Cüruf Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)	Katı Oranı (%)	Su (%)	Atık (%)	Bağ. (%)	Su / Bağ. Oranı	Slamp değeri (inç)
7	LSS/8	K5	1	4270	79.45	20.55	73.89	5.56	3.70	7.5
7	LSS/8	K6	1	4270	79.38	20.62	73.82	5.56	3.71	7.5

Tablo 11. Sodyum hidroksit (NaOH) ile hazırlanan macun dolgu malzemelerinin deneysel çalışma koşulları

Bağ. Oranı (%)	Aktivatör tipi / Na ₂ O Dozajı (%)	Kod	Cüruf Özgül Yüzey Alanı (cm ² /g)	Katı Oranı (%)	Su (%)	Atık (%)	Bağ. (%)	Su / Bağ. Oranı	Slamp değeri (inç)
7	NaOH/8	K7	4270	77.67	22.33	72.23	5.44	4.10	7.5
7	NaOH/8	K8	4270	77.67	22.33	72.23	5.44	4.10	7.5

2.2.4. Numunelerin Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testlerinin Yapılması

Hazırlanan dolgu numuneleri 14-28-56-112-224 ve 360 günlük kür süreleri sonunda her seriden üç macun dolgu numunesi 50 kN yükleme kapasitesine sahip olan bilgisayar kontrollü, dijital basınç ünitesinde 0.5 mm/dk sabit yükleme hızında tek eksenli basınç dayanımı testine tabii tutulmuştur (Şekil 10).



Şekil 10. Tek eksenli basınç dayanımı testlerinin gerçekleştirilmesi

Örneklerin boy/çap oranı 2/1'dir. Deneylerden önce örneklerin alt ve üst yüzeylerinin paralelliği sağlanmıştır. Üç örnek için elde edilen dayanım değerlerinin ortalaması alınarak ilgili kür sürelerinin analizlerinde temsili olarak kullanılmıştır. Pratikte madencilik uygulamalarında macun dolgunun yeraltında kendi stabilitesini ve uzun dönemde de duraylılığını sağlaması için kısa ve uzun dönemde 1.0 MPa dayanım değerini sağlamasının

yeterli olduğu görülmektedir. Bu çalışmada dayanım ve duraylılık değerlendirmelerinde karşılaştırma dayanım değeri olarak 1.0 MPa esas alınmıştır.

2.2.5. pH ve SO₄⁻² Analizleri

Tek eksenli basınç dayanımı testlerinden sonra macun dolgu numunelerinde dayanım ve duraylılığı olumsuz etkileyen pH ve sülfat iyon konsantrasyonlarına yönelik analizler yapılmıştır (şekil 11). pH ve sülfat analizlerinin yapılmasında Cihangir vd. (2012)'de izlenen yöntem takip edilmiştir. detaylı bilgi ilgili kaynaktan elde edilebilir.

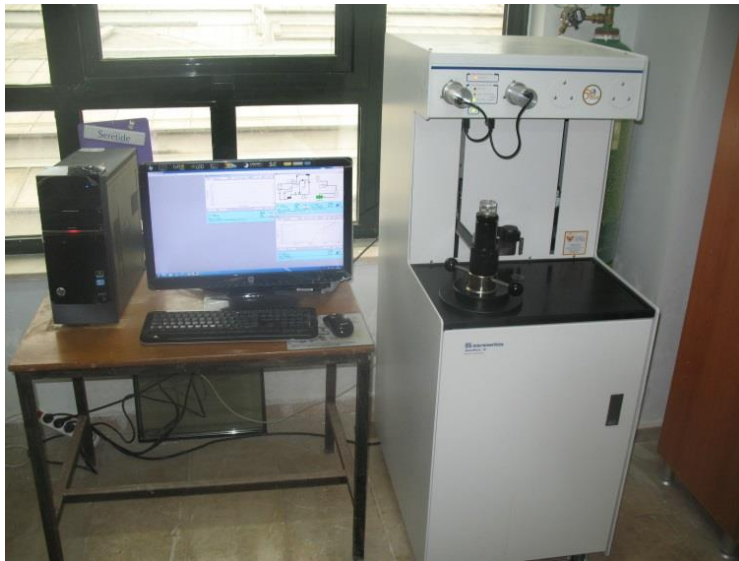


şekil 11. pH ve sülfat analizlerinin aşamaları

2.2.6. Poroziteli Mikroyapı Analizleri

Aktivatör ve cüruf kimyasına bağlı olarak farklı bağlayıcı bileşimleri ve bağlayıcı oranlarında hazırlanan ve tek eksenli basınç dayanımına tabi tutulan macun dolgu numunelerinden alınan örneklerin gözenekli yapılarına yönelik mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı değerlendirmesi MIP (civalı porozimetre) analizleri ile gerçekleştirilmiştir. MIP testleri için toplam 18 ilave numune hazırlanmıştır.

Porozite ölçümü 56 günlük numuneler üzerinde Micromeritics Autopore IV 9410 model civalı porozimetre cihazı (Şekil 12) ile ASTM D 4404 (2002) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numuneler deney öncesinde etüvde 60 °C'de 36 saat kurutulmuş ve nemden etkilenmemesi için desikatöre konulmuştur. Numuneler 0.003 µm'lik gözeneklere Hg intrüzyonunu sağlayacak şekilde 0-414 MPa (60,000 psi) aralığında hidrostatik basınç altında deneye tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalarda Hg yüzey çekimi 0.485 N/m ve Hg ile numune yüzeyleri arasındaki kontak açısı 130° olarak kullanılmıştır (Yılmaz, 2010). Bu çalışmada gözenek karakterizasyonu, Uluslararası Kuramsal ve Uygulamalı Kimya Sınıflaması Birliği'nin (IUPAC, 1972) çimentolu malzemeler için karakterize ettiği gözenek boyutuna göre sınıflanmıştır. Bu sınıflamada 0.002 µm'den küçük çapa sahip gözenekler mini gözenek, 0.002-0.05 µm arası çapa sahip gözenekler orta boyutlu gözenek, 0.05 µm'den büyük çapa sahip gözenekler ise büyük boyutlu gözenek olarak sınıflandırılmıştır. MIP testleri büyük ve orta boyutlu gözenekleri ölçebilmektedir.



Şekil 12. Civalı porozimetre cihazı ile porozite analizleri

2.2.7. Ultrasonik P- Dalga Hızı Testi

54×108 mm boyutunda hazırlanan toplam 162 adet silindirik macun dolgu numunelerinin ultrasonik P- dalga hızı testleri, önceden belirlenen kür süreleri (14-28-56-112-224-360) sonunda ASTM C 597 (2009) standartlarına uygun olarak 0.1 µs hassaslıkta sinyal süresine ve 54 kHz sinyal frekansına sahip Pundit- Plus model test cihazı ile yapılmıştır (Şekil 13).

Test işlemlerinde her kür süresi için üçer adet numune kullanılmış olup testlerden önce numunelerin alt ve üst yüzeyleri düzeltilerek temizlenmiş ve daha sonra alıcı ve gönderici jeofon arasında sağlıklı bir bağlantı kurmak ve hava boşluklarını engellemek için ultrasonik jel ile kaplanarak ölçüme hazır hale getirilmiştir. Test yöntemi olarak daha güvenli ve daha doğru sonuçlar verdiği için doğrudan iletim tekniği kullanılmış ve numunelere temas ettirilen gönderici ve alıcı jeofonlara herhangi bir baskı uygulanmamıştır. Alınan okumalar sonucunda en çok tekrar eden geçiş süreci test sonucu olarak kaydedilmiş ve ultrasonik P- dalga hızı (V_p) " $V_p = X / t$ " eşitliği ile belirlenmiştir. Burada " V_p ; P-dalga hızını-m/s", " X ; numune uzunluğunu-mm" ve " t ; sinyalin numune üzerinden geçiş süresini-µs" ifade etmektedir.



Şekil 13. Macun dolgu numunelerinin ultrasonik P-dalga hızı ölçümlerinin yapılması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Macun Dolgu Numunelerinin Dayanım Testleri

Macun dolgu dayanım ve durabilite değerlendirmelerinde, kısa dönem kür süreleri için (<28 gün) minimum dayanımın 0,7 MPa ve uzun dönemde (>90 gün) durabilite açısından gerekli dayanımın 1,0 MPa olması istenmektedir. Tez çalışmasında durabilite değerlendirmelerinde uzun dönem kür süresi olarak 112 gün esas alınmıştır.

3.1.1. Sodyum Metasilikat (SMS) ile Aktive Cürufun Dolgu Dayanımına Etkisi

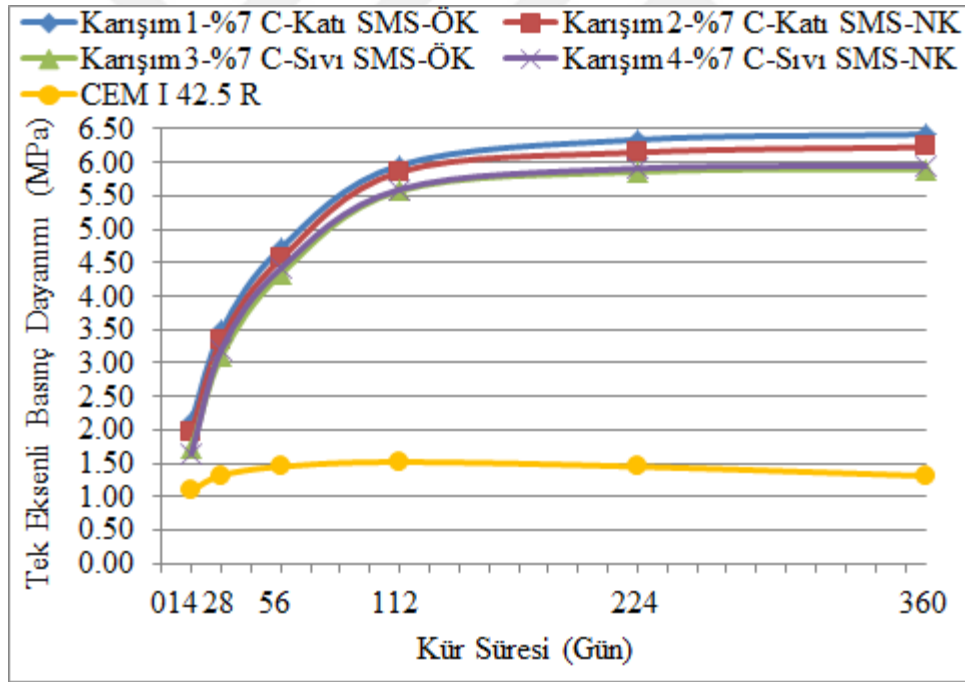
Sodyum metasilikat ile farklı formlarda aktive edilen cürufun ağırlıkça %7 bağlayıcı oranında kullanılması ile hazırlanan silindirik macun dolgu numunelerinin 14-360 günlük kür süresi aralığındaki tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Şekil 14’de verilmiştir. Bütün macun dolgu numunelerinin, kısa ve uzun dönem kür süreleri için gerekli dayanım değerini sağladığı görülmektedir. %7 bağlayıcı oranında portland çimentosu kullanılarak kontrol amaçlı hazırlanan CEM I 42.5R numunelerinde 112 günden sonra %13.82 dayanım kaybı görülmüştür. CEM I 42.5R numunelerinde dayanım kaybının CEM I 42.5R’nin asit ve sülfat etkilerine karşı dayanıksız olmasından kaynaklanmaktadır (Cao vd., 1997; Erçikdi vd., 2009a; Cihangir ve Akyol 2018).

SMS ile aktifleştirilerek hazırlanan numunelerde ise kür süresi boyunca dayanım artışı görülmüştür. Ancak 224 günden sonra dayanım bütün numunelerde önemsenmeyecek derecede (~%1) artmıştır. Kısa ve uzun dönemde en yüksek dayanımı katı formda gerek cüruf ile önceden karıştırılan gerekse doğrudan dolgu ortamına ilave edilen Karışım-1 ve Karışım-2 numuneleri vermiştir. Katı SMS ile hazırlanan macun dolgu numuneleri CEM I 42.5R numunelerine kıyasla kısa dönemde (14 gün) ortalama 1.9 kat ve uzun dönemde (360 gün) ortalama 4.82 kat yüksek dayanım değerleri üretmiştir. Karışım-1 ile Karışım-2 arasındaki dayanım farkı ortalama %3.98 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumun cüruf ile aktivatörün önceden tam homojen karıştırılmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

SMS suda çözülüp cüruf ile karıştırılarak bağlayıcı jel hazırlandıktan sonra (Karışım-3) ve doğrudan dolgu ortamına ilave edilmesi ile (Karışım-4) hazırlanan dolgu numuneleri

ise katı SMS değerlerine kıyasla nispeten düşük dayanım sonuçları üretmiştir. Portland çimentosu örneklerine göre kısa dönemde 1.54 ve uzun dönemde 4.52 kat daha yüksek dayanım sonuçları elde edilmiştir.

Katı SMS numuneleri sıvı SMS numunelerine kıyasla erken kür sürelerinde biraz daha yüksek olmak üzere ortalama %9.01 daha yüksek dayanıma sahiptir. Erken dayanımın SMS örneklerinde biraz daha yüksek olmasının, katı SMS taneciklerinin karışım ortamında çözünürken ısı açığa çıkarması (Chowdhury, 2013; Fernández-Jiménez vd., 2013) ve karışım ortamının ısısının yükselmesinden dolayı cüruf taneciklerinin sıvı SMS'in karıştırıldığı ortama göre biraz daha hızlı ve yüksek oranda çözünmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, Ravikumar ve Neithalath (2012) toz sodyum silikat kullanıldığı zaman priz alma süresinin sıvı sodyum silikata göre daha hızlı olduğunu ifade etmiştir.

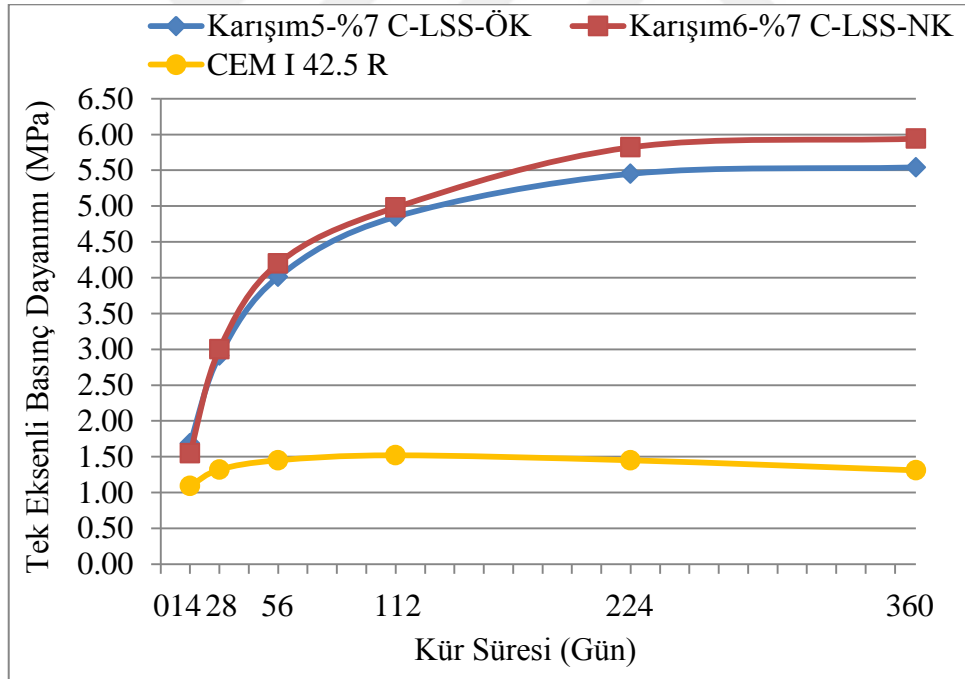


Şekil 14. SMS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolgu dayanım ve duraylılığına etkisi

3.1.2. Sıvı Sodyum Silikat (LSS) ile Aktive Cürufun Dolgu Dayanımına Etkisi

Sıvı sodyum silikat ile aktive cüruf kullanılarak %7 bağlayıcı oranında iki farklı formda hazırlanan silindirik macun dolgu numunelerinin 14-360 günlük kür süresi

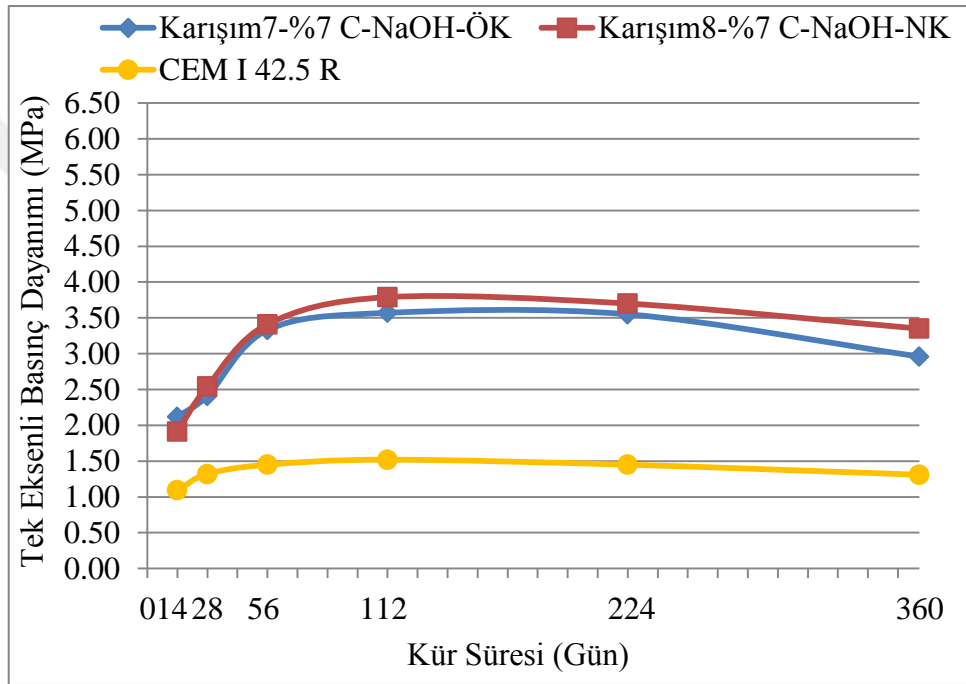
aralığındaki tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Şekil 15'te verilmiştir. Tüm numunelerin kısa ve uzun dönem kür süreleri için gerekli dayanım değerini sağladığı görülmektedir. 14 günlük kür süresinde cüruf ile karıştırılarak bağlayıcı jel hazırlandıktan sonra (Karışım-5) dolgu ortamına ilave edilen bağlayıcı içeren numuneler doğrudan dolgu malzemesi karışım ortamına ilave edilen bağlayıcı (Karışım-6) ile hazırlanan numunelerden %9 oranında yüksek dayanım üretmiştir. Ancak bu kür süresinden itibaren Karışım-6 örneği bütün kür sürelerinde Karışım-5'ten %4.9 yüksek dayanımla sonuçlanmıştır. LSS örnekleri (Karışım-5 ve Karışım-6) uzun dönemde daha yüksek olmak üzere CEM I 42.5R numunelerinden ortalama 3.01 kat yüksek dayanım değerleri vermiştir. Katı SMS örnekleri (Karışım-1 ve Karışım-2) ve sıvı SMS örnekleri (Karışım-3 ve Karışım-4) LSS örneklerinden (Karışım-5 ve Karışım-6) sırasıyla ortalama %16 ve %6.49 daha yüksek dayanıma sahiptir. Dolayısıyla, katı SMS kullanımının dayanım kazanımı açısından sıvı SMS ve LSS aktivatörlerine kıyasla daha avantajlı olduğu görülmektedir.



Şekil 15. LSS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

3.1.3. Sodyum Hidroksit (NaOH) ile Aktive Cürufun Dolgu Dayanımına Etkisi

Şekil 16, sodyum hidroksit ile aktive edilen cüruf kullanılarak %7 bağlayıcı oranında iki farklı formda hazırlanan macun dolgu numunelerinin 14-360 günlük kür süresindeki tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Tüm numuneler kısa ve uzun dönemde dayanım ve duraylılık açısından gerekli dayanım değerini sağlamaktadır. Bütün kür süreleri boyunca Karışım-8, Karışım-7'den ortalama %3.6 yüksek dayanım üretmiştir.



Şekil 16. NaOH ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolgu dayanım ve durabilitesine etkisi

NaOH numunelerinde uzun dönemde yaklaşık %14.35'lik dayanım kaybı görülmüştür. Dayanım kaybının; macun dolgu bünyesindeki atık taneleri birbirine bağlayan bağlayıcı jel ortamındaki Na^+ konsantrasyonunun fazlalığının numunelerde gevrekliğe yol açmasından kaynaklandığı (Fernandez-Jimenez vd., 1999; Cihangir vd., 2015) düşünülmektedir. NaOH numuneleri de CEM I 42.5R numunelerine göre ortalama 2.23 kat yüksek dayanıma sahiptir.

Erken kür süresinde (14 gün) NaOH ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin LSS örneklerine kıyasla ortalama %30 oranında yüksek dayanıma sahip olması, karışım ortamında LSS'ye kıyasla daha yüksek şarj yoğunluğuna ve katı cüruf bağlarını kıran daha

yüksek orandaki OH^- konsantrasyonuna bağlanabilir. Ayrıca erken kür sürelerinde pH değerinin NaOH numunelerinde çok yüksek olması nedeniyle daha fazla cüruf çözünmesi ve daha yoğun bağlayıcı jel oluşmasından (Fernandez–Jimenez ve Puertas, 2003; Shi vd., 2006; Song vd., 2000) da kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Uzun dönemdeki dayanım kaybı ise yüksek konsantrasyonda Na^+ iyonlarının C-S-H ağ yapısının düzenini bozmasına ve iyon özelliğinden dolayı C-S-H iç yapısına penetre edemeyerek C-S-H dış yüzeyinde kompleksler oluşturmasına bağlanabilir (Chowdhury, 2013). Böylece, AAC numunelerinde sadece NaOH numunelerinde dayanım kaybı görülmesi bu numunelerde aşırı Na^+ konsantrasyonu nedeniyle dolgu bünyelerinin gevrekliği ile açıklanabilir (Fernandez-Jimenez vd., 1999; Cihangir vd. 2015).

Karışım-3 ve Karışım-4, Karışım-5 ve Karışım-6 ile Karışım-7 ve Karışım-8 örnekleri kıyaslandığında erken kür süresindeki düşük de olsa yüksek dayanım değerlerinin bağlayıcı jelin başlangıçta mekanik olarak karıştırılarak hazırlanmış olması düşünülebilir. Ancak, ön karıştırma ve atık malzeme ile karıştırma da düşünüldüğünde, ilerleyen bütün kür sürelerinde diğer numunelerin nispeten yüksek dayanımlar sergilemesinin, bu numunelerde fazladan karışım süresinden dolayı jel kalitesinin nispeten düşmesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

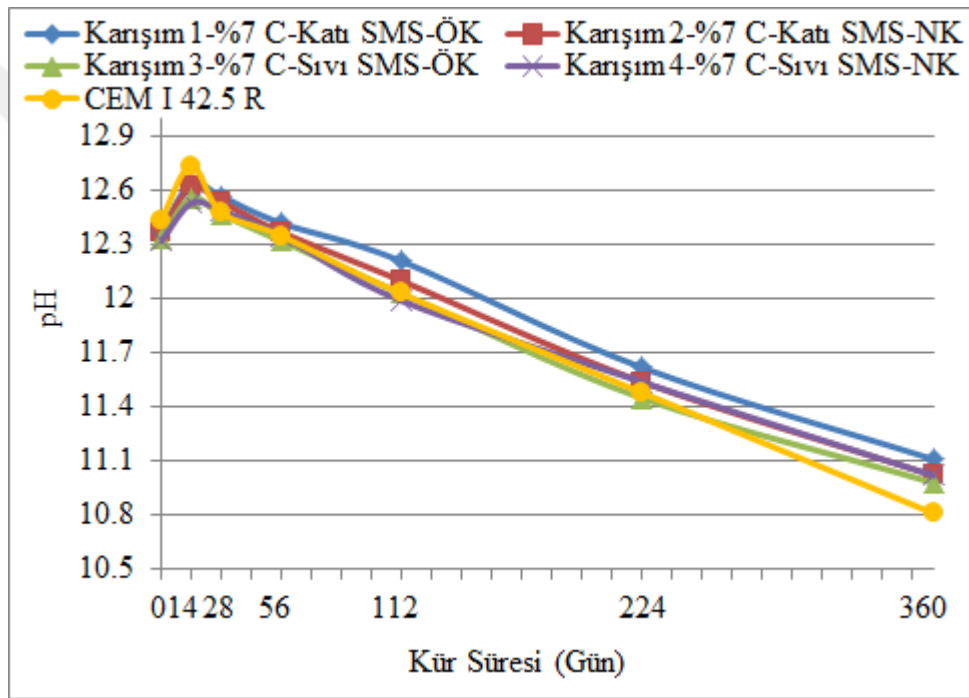
3.2. Bağlayıcı Dizaynı ve Karışım Ortamına İlave Şeklinin Macun Dolgu pH'ına Etkisi

SMS, LSS ve NaOH ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin pH değişimleri kür süresine bağlı olarak Şekil 17-19'da verilmiştir. Bütün macun dolgu numunelerinde pH seviyeleri erken kür sürelerindeki hidrasyon nedeniyle oluşan hidrasyon ürünlerine bağlanmaktadır (Cihangir vd. 2012). SMS ve LSS örneklerinin pH seviyeleri bütün kür süreleri boyunca neredeyse aynıdır. NaOH örnekleri 360 gün boyunca en yüksek pH değerlerini üretmiştir. Cem I 42.5R ise 14-28 günlük kür süreleri haricinde genelde en düşük değerlerde eğilim göstermiştir.

Katı SMS kullanılması durumunda LSS'den biraz daha yüksek pH değerleri elde edilmiştir. 14 günlük kür süresinde tüm numunelerin pH'ı, oluşan hidrotasyon ürünleri sebebiyle yükselme eğilimi göstererek en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Kür süresinin ilerlemesi ile birlikte numunelerin pH'larının düştüğü görülmektedir. Katı SMS ile hazırlanan numunelerin pH'ları genel olarak Sıvı SMS numunelerinin pH'larından küçük

farklar dahilinde yüksek elde edilmiştir. Bu durumun, özellikle çimento hidratasyonu sonucu oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandit) iyonlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

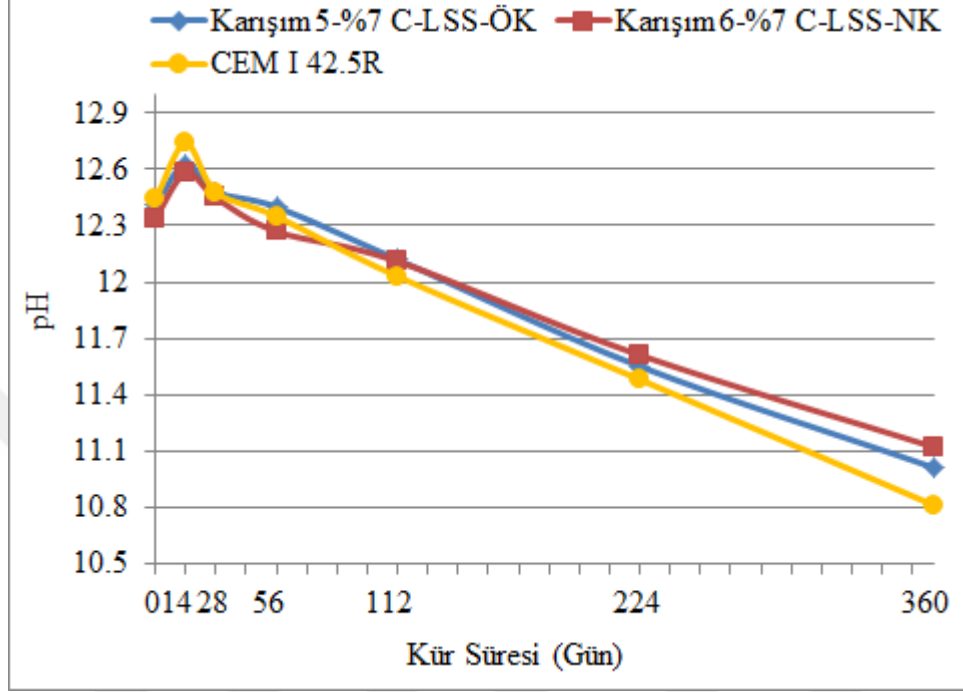
Uzun dönemde en düşük pH Cem I 42.5R numunelerine aittir. Cem I 42.5R numunelerinde pH 112 günlük kür süresinden sonra 12.00'nin altına düşmüştür. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ürünlerinin pH'ın 12'nin altına düşmesi durumunda tamamen çözündüğü belirtilmektedir (Shi ve Stegemann, 2000). Dolayısıyla dolgu bünyesinde geride boşluklu yapılar kalmakta (Gaitero vd., 2008) ve böylece Cem I 42.5R numunelerinde asit ürünleri bağlayıcı jel yapısını zayıflatarak dayanım kayıplarına yol açmaktadır (Cihangir vd., 2018).



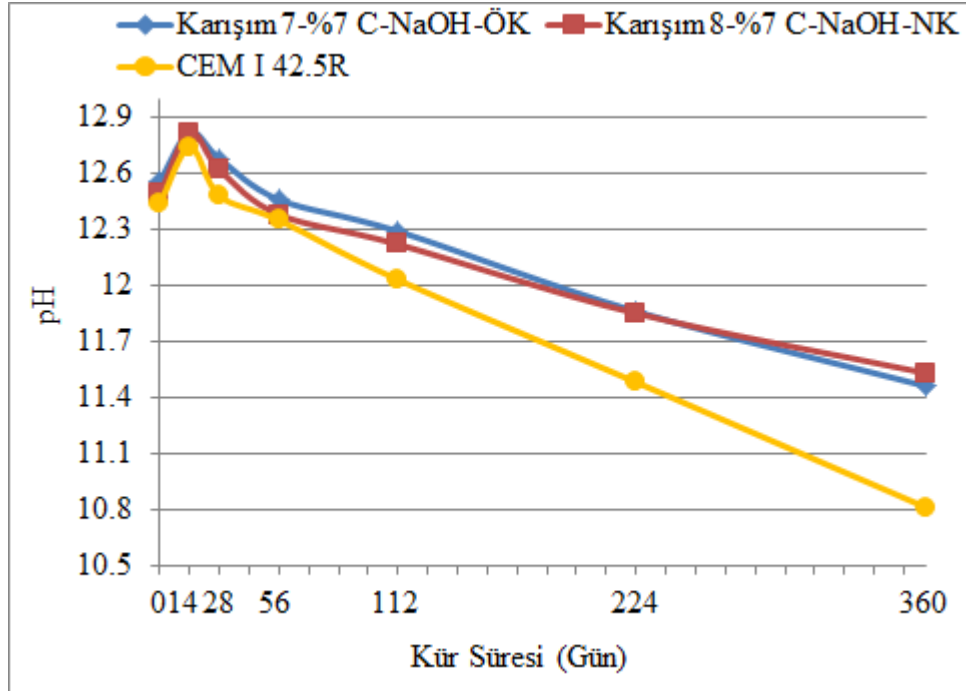
Şekil 17. SMS ile farklı formlarda aktive edilen çürüfün macun dolgu pH'ına etkisi

Diğer taraftan Chen vd. (2006), pH değerinin C-S-H jel ürünlerinin dekalsifikasyonuna neden olacağını belirtmiştir. Dolayısıyla Cem I 42.5 R numunelerinde dayanım kaybının pH'ın 12'nin altına düşmesi nedeniyle ortamdaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin pH ve sülfat iyonlarınca tüketilmesi nedeniyle C-S-H ürünlerinin dekalsifikasyonundan kaynaklandığı söylenebilir (Komljenović vd., 2012; Cihangir ve Akyol, 2018; Cihangir vd., 2018). SMS ve LSS numunelerinde ise bağlayıcı jel bünyelerinin düşük Ca/Si oranında sahip olması hem bu numunelerde jel yapısının asit ve sülfat ürünlerine dayanıklı olmasına hem de jel yapılarının pirit yüzeylerinde geçirimsiz ve Silisyumca zengin

tabakalar oluşturmaları nedeniyle sülfürlü minerallerin reaktivitesini düşürmesine bağlanabilir (Cihangir, 2017; Cihangir ve Akyol, 2018).



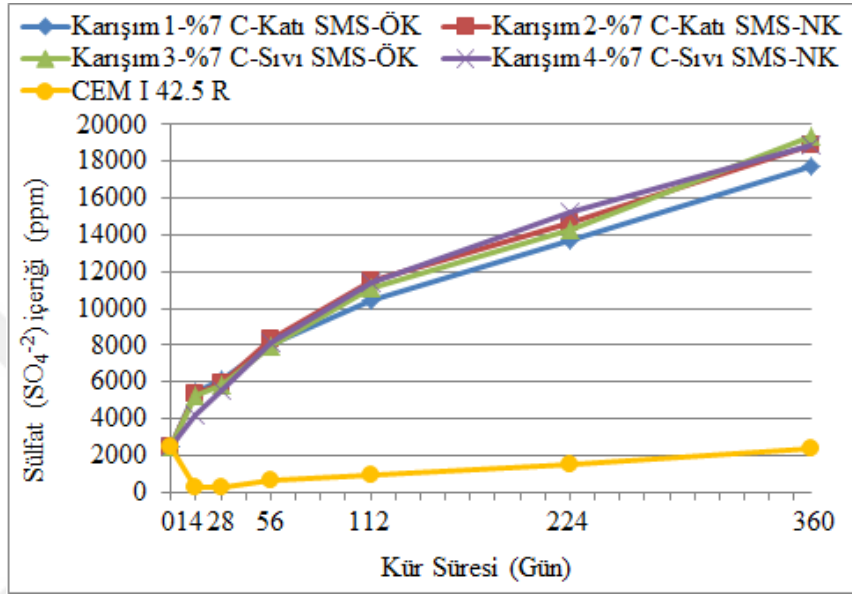
Şekil 18. LSS ile farklı formlarda aktive edilen çürüfün macun dolgu pH'ına etkisi



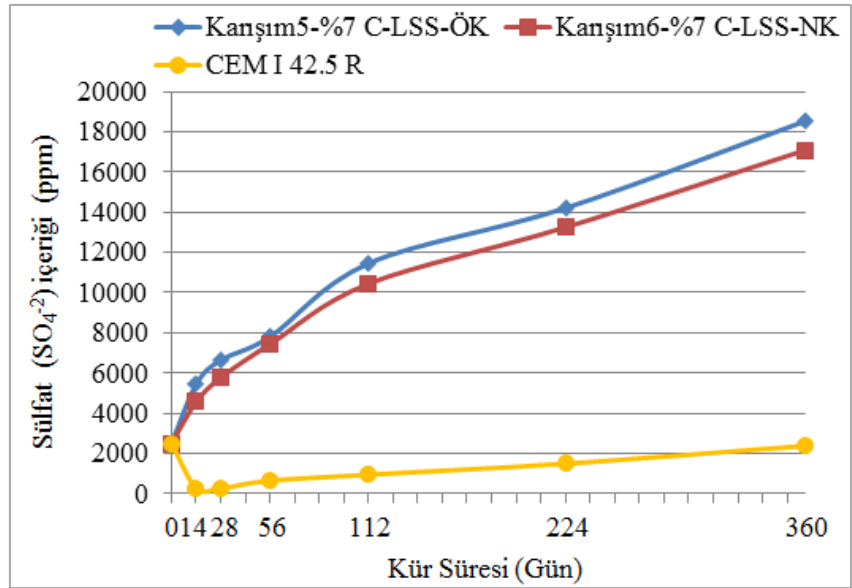
Şekil 19. NaOH ile farklı formlarda aktive edilen çürüfün macun dolgu pH'ına etkisi

3.3. Bağlayıcı Dizaynı ve Karışım Ortamına İlave Şeklinin Macun Dolguda Sülfat İçeriği Değişimine Etkisi

Şekil 20-22'de SMS, LSS ve NaOH ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin 14-360 günlük kür süreleri boyunca sülfat iyonu konsantrasyonları değişimi görülmektedir.



Şekil 20. SMS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda sülfat içeriği değişimine etkisi

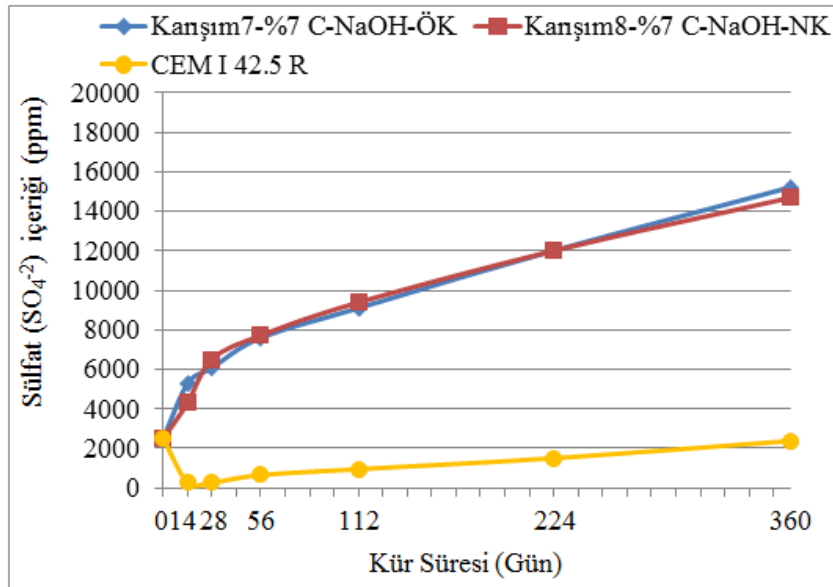


Şekil 21. LSS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda sülfat içeriği değişimine etkisi

360 günlük kür süresi sonunda en yüksek sülfat iyonu konsantrasyonları sırasıyla SMS>LSS>NaOH ile hazırlanan macun dolgu numunelerinde elde edilmiştir. Alkali aktive bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerin tamamında bütün kür süreleri boyunca sülfat iyonu konsantrasyonlarında artış eğilimi izlenmiştir.

CEM I 42.5R numunelerinin erken kür sürelerinde sülfat içerikleri çok düşük seviyelerde iken uzun dönemde artarak başlangıç sülfat konsantrasyonu seviyesine gelmiştir. Bu durum, daha karışım anından itibaren atığın bünyesinde var olan sülfat iyonlarının tamamının portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$;(CH)) iyonları ile reaksiyona girerek tüketildiğini ve pH değerleri göz önünde bulundurulduğunda uzun dönemde de sülfat tüketiminin devam ettiğini göstermektedir.

Fall ve Pokharel (2010), hidrasyon sürecinde oluşan ikincil sülfat içeren bileşiklerin (ikincil alçıtaşı ve etrenjit vb.) macun dolgu bünyesindeki boşlukları doldurarak dayanıma pozitif yönde katkı verdiğini, ancak aşırı sülfatlı ürün oluşumunun dayanımı negatif yönde etkilediğini belirtmiştir. Ayrıca, aşırı oluşan ve genleşme özelliğine sahip sülfatlı ürün içeren ikincil minerallerin macun dolgu bünyesinde heterojen yapı oluşumuna neden olduğu, sülfatlı ürünlerin bağlayıcı C-S-H jel yapısına nüfuz ederek jel kalitesini düşürdüğü ve genleşmeler sonucu dolgu bünyesinde mikro çatlaklara neden olduğu görülmüştür (Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2009a; Fall ve Pokharel, 2010; Cihangir ve Akyol 2018).



Şekil 22. NaOH ile farklı formlarda aktive edilen çürufun macun dolguda sülfat içeriği değişimine etkisi

3.4. AAC Dizaynı ve Dolgu Ortamına İlave Şeklinin Macun Dolguda Gözenekli Yapıya Etkisi

Tablo 12’de AAC ve CEM I42.5R içeren macun dolgu numunelerinin gözenekli yapılarına ait teknik parametreleri verilmiştir. AAC dizaynı ve dolgu ortamına ilave zamanının numunelerin gözenekli yapısına etkisi Şekil 23-25’te verilmiştir. Şekil 23-25’e göre her aktivatör türü için (SMS+C, LSS+C ve NaOH+C) dolgu numunelerinin gözenekli yapı karakteristiği kendi içinde neredeyse aynıdır. Toplam porozite miktarları ve boyuta göre değişen gözenekli yapılarda her aktivatör için oldukça benzerlik arz etmektedir.

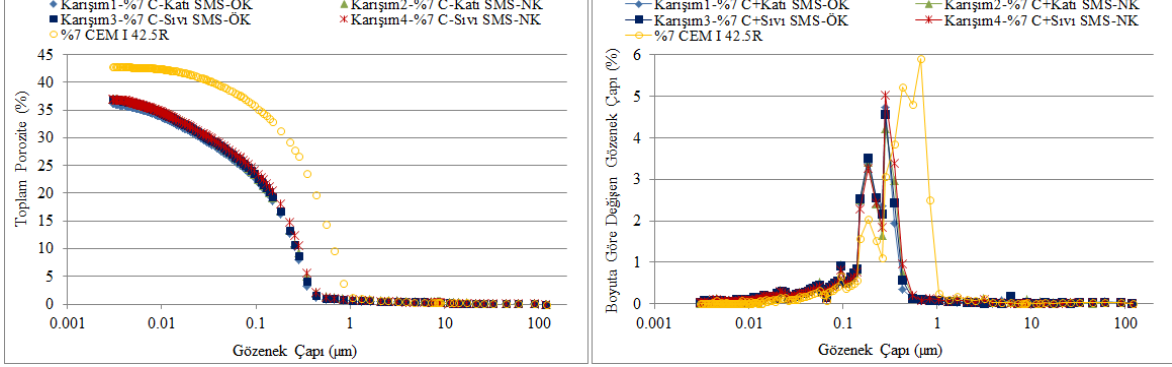
SMS içeren macun dolgu numuneleri ortalama %36.79 toplam gözeneğe sahiptir ve en düşük gözenekli yapı Karışım-1’e aittir (Şekil 23). Genel olarak orta ve büyük boyutlu gözenek miktarları birbirine yakın olup %4’ün altında farkların olduğu izlenmiştir. Eşik ve kritik gözenek çapları da Tablo 12’den görüldüğü üzere birbirine oldukça yakındır.

Tablo 12. AAC ve CEM I42.5R içeren macun dolgu numunelerinin gözenekli yapılarına ait teknik parametrelere ait değerler

Bağlayıcı tipi	Bağlayıcı Oranı (%)	Aktivatör Dozajı (%)	Kritik porozite çapı d_k :(μm)	Eşik porozite çapı d_e :(μm)	Orta boyutlu porozite n_{mezo} (%)	Büyük boyutlu porozite n_{makro} (%)	Toplam porozite n_{top} (%)
C+Katı SMS-ÖK	7	8	4.73	0.88	9.38	26.81	36.19
C+Katı SMS-NK	7	8	4.21	0.84	9.29	27.70	36.99
C+Sıvı SMS-ÖK	7	8	4.57	0.93	9.40	27.63	37.03
C+Sıvı SMS-NK	7	8	5.03	0.92	8.94	27.99	36.93
C+LSS-ÖK	5	8	3.97	0.75	9.42	27.29	36.71
C+LSS-NK	5	8	4.73	0.71	8.03	27.51	35.54
C+NaOH-ÖK	7	8	5.62	25.89	5.96	32.45	38.41
C+NaOH-NK	7	8	4.68	32.94	5.56	32.66	38.22
Cem I 42.5R	7	8	5.92	0.98	4.06	38.83	42.90

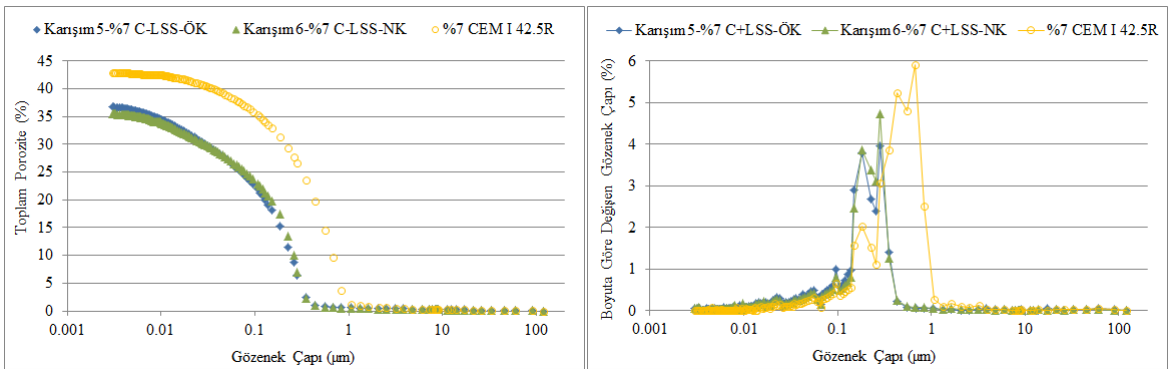
SMS içeren örneklerin toplam ve iri boyutlu gözenek miktarları CEM I 42.5R içeren macun dolgu numunelerinden sırasıyla ortalama %14.24 ve %29.1 daha azdır. Orta boyutlu gözenek miktarı ise CEM I 42.5R örneklerine kıyasla 2.28 kat daha fazladır. SMS örneklerinin kritik gözenek çapları CEM I 42.5R örneklerine göre daha küçüktür.

SMS örnekleri NaOH örneklerinden de %3.74 daha düşük gözeneğe sahiptir. Orta boyutlu gözenek miktarı 1.61 kat fazla, iri gözenek miktarı ise %15.45 daha azdır.



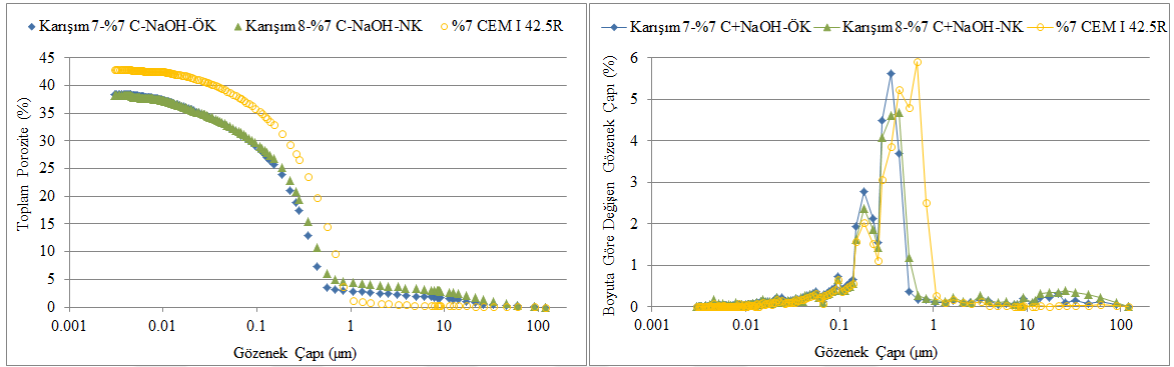
Şekil 23. SMS+C dizayn ve karışım ortamına ilave şeklinin macun dolgu gözenekli yapısına etkisi

Şekil 24'te LSS+C içeren macun dolgu numunelerinin gözenek miktarı ve gözenekli yapı özellikleri verilmiştir. SMS+C içeren numunelere yakın olmak üzere macun dolgu gözenekli yapısını en iyi derecede iyileştiren bağlayıcı türü Karışım-5 ve Karışım-6'yı temsil eden LSS+C'dir. LSS+C, NaOH numunelerine göre toplam ve iri boyutlu poroziteyi sırasıyla %5.72, %15.85 oranında azaltırken orta boyutlu gözenek miktarını da 1.52 kat artırmıştır. Aynı şekilde Cem I 42.5R numunelerine kıyasla orta boyutlu gözenek miktarını 2.15 kat artırırken, toplam ve iri boyutlu poroziteyi sırasıyla %15.78, %29.44 azaltmıştır.



Şekil 24. LSS+C dizayn ve karışım ortamına ilave şeklinin macun dolgu gözenekli yapısına etkisi

NaOH+C numunelerine ait gözenekli yapı özellikleri Şekil 22’de verilmiştir. NaOH+C numunelerinin toplam poroziteleri ortalama %38.32’dir. Cem I 42.5R numunelerine göre toplam ve iri boyutlu gözenek miktarlarını %10.68 ve %16.15 azaltırken orta boyutlu gözenek miktarını %41.87 artırmıştır.



Şekil 25. NaOH+C dizayn ve karışım ortamına ilave şeklinin macun dolgu gözenekli yapısına etkisi

Genel olarak değerlendirildiğinde AAC+C içeren bağlayıcılar Cem I 42.5R’ye kıyasla macun dolgunun gözenekli yapısını oldukça iyileştirmektedir. LSS ve SMS aktivatörleri en etkili aktivatörler olup Karışım-1 ve Karışım-6 macun dolgu gözenekli yapısını en iyi derecede iyileştiren bağlayıcı dizaynları olarak görülmektedir.

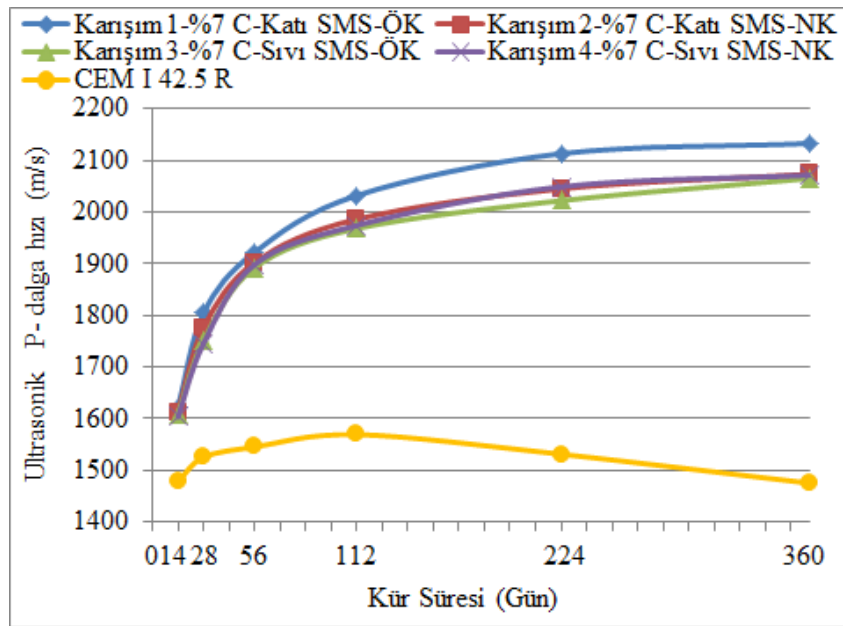
Çimentolu malzemelerde dayanım ve duraylılık bağlayıcı bileşimine, hidrasyon sonucu oluşan gel yapısına, porozite miktarına ve porozite yapısına bağlıdır. Dolayısıyla farklı bileşime sahip çimentolar farklı dayanım özelliklerine sahip olacaktır (Cihangir vd. 2018). Bununla birlikte daha düşük gözenekli yapıya sahip numunelerde bağlayıcı jel yapısının kuvvetine de bağlı olarak (Powers, 1958) dayanım daha yüksek olacaktır (Cihangir vd., 2018). Ayrıca, SMS ve LSS numunelerinde dayanım ve duraylılık, bu numunelerde porozitenin daha düşük, orta boyutlu gözenek miktarının daha fazla olmasına bağlı olarak gözenekli mikroyapının daha iyi kalitede olmasına bağlanabilir (Fall vd., 2005; Fall vd., 2010; Ghirian ve Fall, 2014; Cihangir ve Akyol, 2018).

3.5. AAC Dizaynı ve Dolgu Ortamına İlave Şeklinin Macun Dolguda Ultrasonik P-Dalga Hızına Etkisi

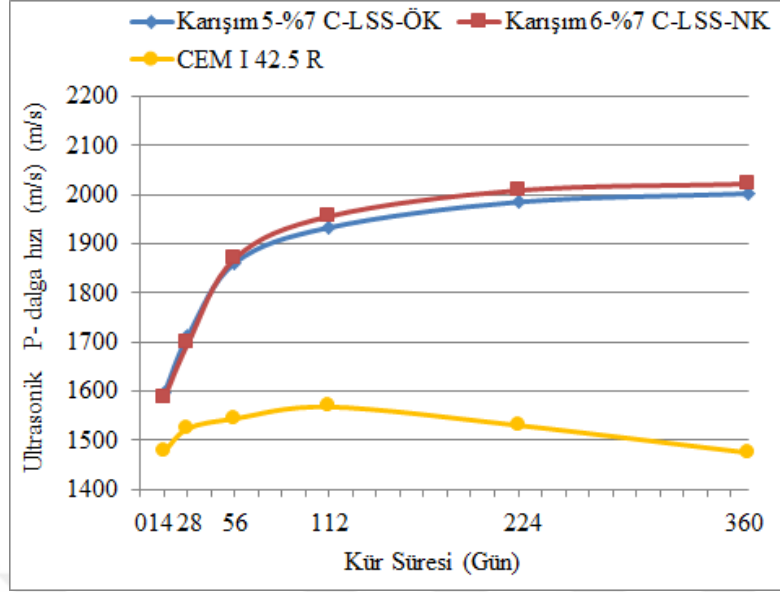
AAC-C ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin ultrasonik P-dalga hızının (UPV)kür süresine bağlı değişimi Şekil 26-28'de verilmiştir. SMS+C, LSS+C ve NaOH+C ile farklı formlarda hazırlanan macun dolgu numunelerinin UPV hızları Cem I 42.5R içeren örneklerle kıyasla sırasıyla ortalama %25.14, %21.87 ve %20.84 oranında yüksek değerler üretmiştir. SMS+C örnekleri LSS+C örneklerinden ortalama %2.68, NaOH örneklerinden ise %3.56 daha yüksek UPV değerlerine sahiptir. Ortalama UPV değerleri en yüksekten en düşüğe doğru SMS+C > LSS+C > NaOH+C > Cem I 42.5 R şeklindedir.

Erken kür süresinde en yüksek UPV değerleri NaOH numunelerine ait iken, 360 günlük kür süresinde NaOH numunelerinin UPV değerlerinde 224 günlük kür süresine göre %1.88 oranında azalma görülmüştür (Şekil 28). NaOH değerlerinin dayanımları ise 112 günlük kür süresinden sonra azalma eğilimine girmiştir. Dolayısıyla UPV ve dayanım değerleri arasındaki azalma yaklaşık paralellik arz etmiştir.

AAC numuneleri Cem I 42.5 R numunelerinden ortalama 2.23-4.82 kat daha yüksek dayanım sonuçları üretmesine rağmen UPV değerleri arasındaki fark %1.22-1.25 aralığında gerçekleşmiştir.

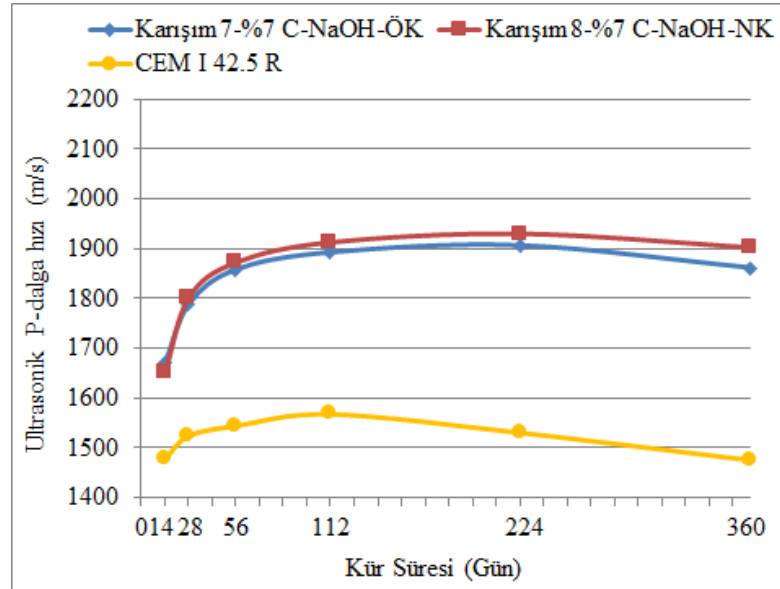


Şekil 26. SMS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda ultrasonik P- dalga hızına etkisi



Şekil 27. LSS ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda ultrasonik P- dalga hızına etkisi

Benzer şekilde Cem I 42.5R içeren macun dolgu numunelerinin UPV değerleri de 112 günlük kür süresinden itibaren azalma eğilimi göstermeye başlamıştır. Cem I 42.5 R numunelerinde dayanım kaybı ortalama %13.82 iken UPV değerinde bu oran %5.99'dur. Dolayısıyla UPV ve dayanım değerleri arasında oldukça benzer eğilimler izlendiği görülmüştür.



Şekil 28. NaOH ile farklı formlarda aktive edilen cürufun macun dolguda ultrasonik P- dalga hızına etkisi

SMS ve LSS numunelerinde UPV hızlarının diğer numunelere özellikle de Cem I 42.5R numunelerine göre daha yüksek olması bu bağlayıcılarda silikat polimerizasyonuna bağlı olarak sertleşme prosesinin daha hızlı gerçekleşmesine ve bağların da daha kuvvetli olmasıyla (Shi vd., 2006) açıklanabilir. UPV hızlarının en yüksek SMS ve sonra LSS örneklerinde ölçülmesi, bu numunelerde su/bağlayıcı oranlarının daha düşük ve katı oranlarının da daha yüksek olmasına (Erçikdi vd., 2014; Galaa vd., 2011) bağlanabilir.

Cem I 42.5 R örneklerinde UPV’de 224 günlük kür süresinden sonra meydana gelen düşüşün, bu numunelerdeki yüksek poroziteli yapıdan ve bu numunelerde uzun dönemde meydana gelen asit ve sülfat etkileri nedeniyle oluşan heterojen yapıdan (Cihangir, 2017; Cihangir vd., 2018) kaynaklandığı düşünülmektedir.



4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında aynı dizayna sahip farklı formlarda hazırlanan ve macun dolgu karışım ortamına farklı şekilde ilave edilen alkali aktive yüksek fırın cürufunun macun dolgu malzemelerinin dayanım, jeokimyasal, gözenekli mikroyapı ve ultrasonik P-dalga hızı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada aktivatör olarak katı sodyum metasilikat (SMS), sıvı sodyum silikat (LSS) ve sodyum hidroksit (NaOH) ve puzolan olarak da yüksek fırın cürufu kullanılmıştır.

Kısa ve uzun dönemde en yüksek dayanım değerlerini cüruf ile önceden karıştırılan ve doğrudan dolgu ortamına ilave edilen katı SMS ile hazırlanan Karışım-1 ve Karışım-2 numuneleri vermiştir. Katı SMS ile hazırlanan macun dolgu numuneleri Cem I 42.5R, LSS ve NaOH numunelerine kıyasla uzun dönemde (360 gün sonunda) sırayla ortalama 4.82 kat, %16 ve 1.94 kat yüksek dayanım değerleri üretmiştir.

LSS örnekleri NaOH ve Cem I 42.5R örneklerine göre 360 günlük kür süresi sonunda sırayla 1.82 ve 4.38 kat daha yüksek dayanım üretmiştir. NaOH örnekleri ise Cem I 42.5R örneklerine oranla 2.41 kat yüksek dayanım sonucuna sahiptir. Cem I 42.5R ve NaOH numunelerinde 112 günlük kür süresinden sonra dayanım kayıpları görülmüştür.

Bağlayıcı jelin başlangıçta mekanik olarak karıştırılarak hazırlanan numunelerin uzun dönemdeki dayanımları fazladan karıştırma süresi nedeniyle jel kalitesinin nispeten düşmesinden dolayı doğrudan ortama karıştırılan numunelere oranla %3.6 ila %9.01 oranında düşük dayanımlar üretmiştir.

SMS ve LSS numunelerinin pH ve sülfat seviyeleri benzer eğilim izlemiştir. Uzun dönemde en düşük pH ve sülfat değerleri Cem I 42.5 R örneklerinden elde edilmiştir. AAC numunelerinde en yüksek pH ve en düşük sülfat seviyeleri NaOH numunelerine aittir.

Aktivatör türüne (SMS, LSS ve NaOH) göre gözenekli yapı karakteristiği aynı aktivatör içeren numunelerde birbiri ile neredeyse aynı olup toplam porozite miktarları ve boyuta göre değişen gözenekli yapı özellikleri de oldukça benzerlik arz etmektedir.

SMS, LSS ve NaOH ile hazırlanan örnekler Cem I 42.5R örneklerine göre toplam poroziteyi sırasıyla %14.24, %15.78 ve %10.68 oranlarında azaltmıştır.

AAC içeren bağlayıcılar Cem I 42.5R'ye kıyasla macun dolgunun gözenekli yapısını oldukça iyileştirmektedir.

LSS ve SMS aktivatörleri en etkili aktivatörler olup Karışım-1 ve Karışım-6 macun dolgu gözenekli yapısını en iyi derecede iyileştiren bağlayıcı dizaynlarıdır.

SMS, LSS ve NaOH ile farklı formlarda hazırlanan macun dolgu numunelerinin UPV hızları Cem I 42.5R içeren örneklere kıyasla sırasıyla ortalama %25.14, %21.87 ve %20.84 oranında yüksektir. Ortalama UPV değerleri en yüksekten en düşüğe doğru SMS > LSS > NaOH > Cem I 42.5 R şeklindedir. Dolayısıyla UPV ve dayanım değerleri arasında dayanım artışı ve kaybına yönelik benzer eğilimler izlendiği görülmüştür.

AAC numuneleri Cem I 42.5 R numunelerinden ortalama 2.23-4.82 kat daha yüksek dayanım sonuçları üretmesine rağmen UPV değerleri arasındaki fark %1.22-1.25 aralığında gerçekleşmiştir.



5. ÖNERİLER

AAC ile üretilen macun dolgu numunelerinin sektörde kullanım potansiyeli ve avantajları sektör temsilcileri ile ortak platformlarda paylaşılmalıdır.

AAC içeren macun dolgu numunelerinin uzun dönemde yeraltına tahkimat olarak kullanılma potansiyeli değerlendirilmelidir.

Farklı puzolanik özelliğe sahip yan sanayi ürünlerinin (uçucu kül vb.) alkali aktivasyonu ve macun dolguda kullanılabilirliği araştırılmalıdır.



6. KAYNAKLAR

- Abdul-Hussain, N., 2011. Experimental Study on the Engineering Properties of Gelfill, MSc Thesis, University of Ottawa, Canada, 229 p.
- Adam, A. A., 2009. Strength and Durability Properties of Aktivated Slag and Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Phd. Thesis, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia, 142 s.
- ASTM D 4404., 2002. Standart Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. Annual Book of ASTM Standarts, American Society of Testing Material.
- Belem T. ve Benzaazoua M. 2004. An overview on the Use of Backfill Technology as a Ground Support Method in Cut-and-Fill Mines. Proceedings of the 5th Int. Symp. On Ground Support in Mining and Underground Construction. Villaescusa & Potvin (eds.), 28-30 September 2004, Perth, Western Australia, Australia, Tayler & Francis Group, London, s. 637-650.
- Bloss, M. L., 2002. Below Ground Disposal (Mine Backfill), In: Jewell, Fourine, Lord, editors, Paste and Thickened Tailings: A Guide, University of Western Australia, s. 103-106.
- Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N. Ve Ramezaniapour, A. A., 2011, Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strenght of Alkali-Activated Natural Puzzolans, Cement and Concrete Research, 33, 251-260.
- Brackebusch, F. W., 1994. Basic of Paste Backfill Systems, Mining Engineering, 46, 1, s. 1175-1178.
- Cao, H.T., Bucea, L., Ray, A., Yozghatlian, S., 1997. The effect of cement composition and pH of environment on sulfate resistance of Portland cements and blended cements, Cement and Concrete Composites, 19, 161-171.
- Chen, J.J., Thomas, J.J. and Jennings, H.M., 2006. Decalcification shrinkage of cement paste, Cement and Concrete Research, 36, 801-809.
- Chowdhury, U., 2013. Alkali Activated Systems Understanding the Influence of Curing Conditions and Activator Type/Chemistry on the Mechanical Strength and Chemical Structure of Fly Ash/Slag Systems, MSc Thesis, Arizona State University, 99s.
- Cihangir, F, 2011. Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufunun Macun Dolguda Bağlayıcı olarak Kullanabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 181s.

- Cihangir, F., Erçikdi, B., Kesimal, A., Turan, A. and Deveci, H., 2012. Utilisation of Alkali-Aktivated Blast Furnace Slag in Paste Backfill of High-Sulphide Mill Tailings, Effect of Binder Type and Dosage, Minerals Engineering, 30, 33-43.
- Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Deveci, H., Erdemir, F., 2015. Paste backfill of high-sulphide mill tailings using alkali-activated blast furnace slag: Effect of activator nature, concentration and slag properties. Minerals Engineering, 83, 117–127.
- Cihangir, F., 2017. Macun Dolgu Duraylılığının Ultrasonik P-dalga Hızı ile Değerlendirilmesi. Yerbilimleri, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi, 1301-2894, 38 (1), 15-32.
- Cihangir, F., Akyol Y., 2018. Mechanical hydrological and microstructural assessment of the durability of cemented paste backfill containing alkali activated slag. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 32-2, 123-143.
- Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Ocak, S., Akyol, Y., 2018. Effect of sodium-silicate activated slag at different silicate modulus on the strength and microstructural properties of full and coarse sulphidic tailings paste backfill, Construction and Building Materials, 185C, 555-566.
- Davidovits, J., 1979. Synthesis of New High Temperature Geo-Polymers for Reinforced Plastics/Composites, SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center;. S. 151-154.
- Davidovits, J. ve Sawyer, J.L., 1985. Patent of 'Pyrament' Cement, U.S. Patent No. 4,509,985; EP No. 0153097.
- DIN 4030-1, 2008. Assessment of Water, Soil and Gases, for Their Aggressiveness to Concrete-Part 1: Principles and Limiting Values, German Standards.
- Ehrenberg, A., 2005. Environmental Aspects of Slag Use, Granulated Blast Furnace Slag: Its Advantages with Respect to CO₂ Emissions and Energy Consumption, Cement and Concrete World, ISSN 1301-0859, 10-56, s. 36-51.
- Erçikdi, B., 2009a. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 129 s.
- 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, 268-274.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009c. Utilization of Industrial Waste Products as Pozzolan Material in Cemented Paste Backfill of High Sulphide Mill Tailings, Journal of Hazardous Materials, 168, 2-3, 848-856.

- Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2010a. Effect of Natural Pozzolans as Mineral Admixture on the Performance of Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Tailings, Waste Management and Research, 28, 5, s. 430-435.
- Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. Ve Alp, İ., 2010b. Utilization of Water-Reducing Admixtures in Cemented Paste Bacfill of Sulphide-Rich Mill Tailings, Journal of Hazardous Materials, 179, 1-3, 940-946.
- Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., 2012. Tesis Atıklarının Yönetiminde Macun Dolgu Teknolojisi, Madencilik Türkiye, 24, 54-59.
- Ercıkdı, B., Yılmaz, T., and Külekci, G., 2014. Strength and ultrasonic properties of cemented paste backfill. Ultrasonics, 54, 195–204.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Ouellet, S., 2005. Experimental Characterization of the Influence of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 18 (1), 41–44.
- Fall, M., 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., Célestin, J.C., Pokharel, M. ve Touré, M., 2010. A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill, Engineering Geology, 114 397–413.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J.G. ve Puertas, F., 1999. Alkali-Activated Slag Mortars: Mechanical Strength Behaviour, Cement and Concrete Research, 29, 1313-1321.
- Fernandez-Jimenez, A. ve Puertas, F., 2003. Effect of Activator Mix on the Hydration and Strength Behaviour of Alkali-activated Slag Cement, Advances in Cement Research, 15, 3, 129-136.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. ve Criado, M., 2005. Microstructure Development of Alkali-Aktivated Fly Ash Cement: A Descriptive Model, Cement and Concrete Research, 35, s. 1204-1209.
- Fernández-Jiménez, A., Zibouche, F., Boudissa, N., Garcia-Loderiro, I., Abadlia, M.T. ve Palomo, A., 2013. “Metakaolin-Slag-Clinker Blends.” The Role of Na⁺ or K⁺ as Alkaline Activators of Theses Ternary Blends. Journal of the American Ceramic Society, 96(6), 1991–1998.
- Flower, D. J. M. ve Sanjayan J. G., 2007. Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture, The International Journal of Life Cycle Assesment, 12, 5, s. 282-288.

- Gaitero, J.J., Campillo, I., and Guerrero, A., 2008. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. Cement and Concrete Research, 38, 1112–1118.
- Galaa, A.M., Thompson, B.D., Grabinsky, M.W., and Bawden, F.B., 2011. Characterizing stiffness development in hydrating mine backfill using ultrasonic wave measurements, Canadian Geotechnical Journal, 48, 1174–1187.
- Ghirian, A. ve Fall, M., 2014. Coupled thermo-hydro-mechanical–chemical behaviour of cemented paste backfill in column experiments, Engineering Geology, 170, 11–23.
- Glukhovskiy, V. D., 1959. Soil Silicates, Gosstroizdat Publishers, Kiev, Ukraine.
- Glukhovskiy, V. D., Rostovskaya, G. S. ve Rumyna, G.V., 1980. High Strength Slag Alkaline Cements. In: Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, 3., S. 164-168.
- Glukhovskiy, V.D., 1981. Slag-Alkali Concretes Produced from Fine-Grained Aggregate, Vysscha Shkola Publisher, Kiev, USSR.
- Higgins, D. D., 2006, Sustainable Concrete: How can additions contribute? Institute of Concrete Technology, Annual Technology Symposium.
- Hossain, K. M. A. ve Lachemi, A., 2006. Performance of Volcanic Ash and Pumice Based Blended Cement Concrete in Mixed Sulfate Environment, Cement and Concrete Research, 36, s. 1123-1133.
- IUPAC, 1972. Manual of symbols and terminology. Appendix 2-Part 1: colloid and surface chemistry, Journal of Pure and Applied Chemistry, 31, 578–593.
- Karapınar, N., 2009. Maden Atık Yönetimi; Macun Teknolojisi Kullanımı, Madencilik, 48 (1), 31-42.
- 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, 1817-1822.
- Kesimal, A., Yılmaz E., Erçikdi, B., Alp, İ. ve Deveci H., 2005. Effect of Properties of Tailings and Binder on the Short- and Long- Term Strength and Stability of Paste Backfill, Material Letters, 59, 28, s. 3709-3709.
- Komljenović, M.M., Bašćarević, Z., Marjanović, N. ve Nikolić, V., 2012. Decalcification resistance of alkali-activated slag. Journal of Hazardous Materials, 233-234, 112–121.

- Krivenko, P.V., 1986. Synthesis of Binders with Required Properties in the System $R_2O-RO-R_2O_3-SiO_2-H_2O$, Doct. Tech SC. Degree Thesis, Polytechnic Institute, Kiev, Ukraine.
- Landriault, D. A., 1995. Paste Backfill Mix Design for Canadian Underground Hard Rock Mining, Proceeding of the 97th Annual General Meeting of the CIM Rock Mechanic and Strata Control Session, Nova, Scotia-Canada, s.652-663.
- Landriault, D., 2001. Backfilling in Underground Mining, in: W.A. Hustrulid (Eds.), *Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies*, SME, 15 s.
- Nasir, O. ve Fall, M., 2009. Coupling Binder Hydration, Temperature and Compressive Strength Development of Underground Cemented Paste Backfill at Early Ages, *Tunneling and Underground Space Technology*, 25, 1, 9-20.
- Powers, T.C., 1958. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 41, 1–6.
- Ravikumar, D. ve Neithalath, N., 2012. Reaction kinetics in sodium silicate powder and liquid activated slag binders evaluated using isothermal calorimetry. *Thermochim. Acta*, 546, 32-43.
- Roskovic, R. ve Bjegovic, D., 2005. Role of Mineral Additions in Reducing CO₂ Emissions, *Cement and Concrete Research*, 35, 5, 974-978.
- Shi, C., ve Li, Y., 1989. Investigation on Some Factors Affecting the Characteristics of Alkali-Phosphorus Slag Cement, *Cement and Concrete Research*, 19, 4, 527-533.
- Shi, C. ve Stegemann, J. A., 2000. Acid Corrosion Resistance of Different Cementing Materials, *Cement and Concrete Research*, 30, 6, 803-808.
- Shi, C., Krivenko, P. V. ve Roy, D., 2006. *Alkali-Aktivated Cements and Concretes*. 1st ed. USA: Taylor and Francis, ISBN 10:0-415-70004-3.
- Song, S., Sohn, D., Jennings, H. M. ve Mason, T. O., 2000. Hydration of Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of Materials Science*, 35, 1, 249-257.
- Stone, D. M. R., 1993. The Optimization of Mix Designs for Cemented Rockfill, In *Proceedings 5th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill'93*, Johannesburg, SAIMM, s. 249-253.
- Şahmaran, M., Kasap, O., Duru, K. ve Yaman, İ.O., 2007. Effects of Mix Composition and Water-Cement Ratio on the Sulphate Resistance of Blended Cements, *Cement and Concrete Composites*, 29, 3, 159-167.

- Tariq, A. ve Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings, Waste and Resource Management, 160, 4, 155-166.
- Torgal, F. P., Castro-Gomes, J. ve Jajali, S., 2008a. Alkali-Aktivated Binders: A Review Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechenisms and Hydration Products, Construction and Building Materials, 22 (7), 1305-1314.
- Torgal F. P., Castro-Gomes J. ve Jalali, S., 2008b. Alkali-Activated Binders: A Review. Part 2. About Materials and Binders Manufacture, Construction and Building Materials, 22 (7), 1315-1322.
- TS 25, 1975. Tras. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Wang, S. D. ve Scrivener, K. L., 1995. Hyration Products of Alkali-Aktivated Slag Cement, Cement and Concrete Research, 25 (3), 561-571.
- Wu, X., Jiang, W. ve Roy, D. M., 1990. Early Activation and Properties of Slag Cement at Early Age, Cement and Concrete Research, 20, 961-974.
- Yılmaz, E., 2010. Investigating the Hydrogeotecnical and Microstructural Properties of Cemented Paste Backfill Using the CUAPS Apparatus, Phd. Thesis, University du Quebec en Abititi- Temiscamingue (UQAT), Canada, s.432.
- Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. L. ve Van Deventer, J. S. J, 2008. Effect of Calcium Silicate Sources on Geopolymerisation, Cement and Concrete Research, 38, 554-564.

ÖZGEÇMİŞ

Meryem KURTULUŞ, 05.01.1989 yılında Artvin'in Borçka ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Borçka'da Cumhuriyet İlköğretim Okulu'nda bitirdi. Lise öğrenimini Borçka Şehit Savaş Gedik Lisesi'nde (Yabancı Dil Ağırlıklı) tamamladı. 2008 yılında kazandığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında başarıyla mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılından itibaren Hat-Pek Beton İnşaat Taahhütleri Limited Şirketi'nde Taş Ocağı/Konkasör Tesisi'nde şantiye şefi olarak çalışmaktadır.