

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFU İLE ALKALİ AKTİVE
EDİLMİŞ CAM LİFİ VE ATIK MERMER TOZU KATKILI
HARÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Merve Nur MISIR

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yapı Malzemeleri Bilim Dalı

ŞUBAT 2021

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

**ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFU İLE ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ
CAM LİFİ VE ATIK MERMER TOZU KATKILI HARÇLARIN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Tez Yazarı
Merve Nur MISIR

Danışman
Prof. Dr. Servet YILDIZ

ŞUBAT 2021
ELAZIĞ

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “ Elazığ Ferrokrom Cürufu ile Alkali Aktive Edilmiş Cam Lifi ve Atık Mermer Tozu Katkılı Harçların Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

01.02.2021

Merve Nur MISIR



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimde bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, her konuda bilgisini ve desteğini esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Servet YILDIZ'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tezimin hazırlanmasında bana yol gösterip, bilgisini paylaşan saygı değer hocam Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na teşekkür ederim.

Malzeme temininde yardımcı olan Eti Krom A.Ş. ve Vessam Prefabrik yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Desteklerini esirgemeyen aileme ve bu süreçte yardımcı olan arkadaşım Oğuzhan TAŞTİMUR'a teşekkür ederim.

Merve Nur MISIR

ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Alkali Aktivasyonlu Harçlar.....	1
1.2. Puzolanlar	1
1.2.1. Puzolanların Çeşitleri	2
1.3. Elazığ Ferrookrom Cürufu.....	5
1.4. Mermer Tozu	5
1.5. Cam Lifi	6
1.6. Literatür Özeti	6
2. MATERYAL VE METOD	12
2.1. Materyal.....	12
2.1.1. Elazığ Ferrookrom Cürufu	12
2.1.2. Atık Mermer Tozu.....	13
2.1.3. Cam Lifi	15
2.1.4. Alkali Aktivatör	15
2.1.5. Agrega.....	17
2.2. Metod.....	18
2.2.1. Beton Karışım Oranlarının Belirlenmesi	18
2.2.2. Numunelerin Hazırlanması.....	19
2.2.3. Alkali Aktivasyonlu Hamurlar Üzerinde Yapılan Deneyler.....	21
2.2.4. Sertleşmiş Beton Numunelerine Uygulanan Deneyler	22
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	30
3.1. Priz Süresinin Tayini Sonuçları.....	30
3.2. Kıvam Tayini Sonuçları.....	30
3.3. Birim Ağırlık Deney Sonuçları.....	31
3.4. Ultrases Deney Sonuçları	32
3.5. Kapilerite Deney Sonuçları	33
3.6. Basınç Dayanım Sonuçları	36
3.7. Aşınma Deneyi Sonuçları	38
3.8. Sülfat Direnci Deneyi	40
3.9. Donma-Çözünme Deneyi	40
3.10. Sem Analizi Görüntüleri.....	42
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Elazığ Ferrokrom Cürufu ile Alkali Aktive Edilmiş Cam Lifi ve Atık Mermer Tozu Katkılı Harçların Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi

Merve Nur MISIR

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Şubat 2021, Sayfa: xii + 51

Geleneksel betondan farklı olarak, içerisinde çimento yerine puzolanların, su yerine ise alkali aktivatörlerin tercih edilmesi ile elde edilen kompozitlere alkali aktivasyonlu betonlar denmektedir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklar, düşük maliyetleri ve kolay temin edilebilmeleri nedeniyle alkali aktivasyonu betonlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Alkali aktivasyonlu betonların çimento kullanılmadan üretilebiliyor olması, dolayısıyla çevreye zararlı etkileri olmayan bir kompozit olması birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir.

Bu çalışmada, çimento kullanılmadan onun yerine aynı incelikte öğütülmüş ferrokrom cürufu ve katkı maddesi olarak mermer tozu ve cam lifi kullanılarak alkalilerle aktive edilen harç üretimi hedeflenmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri kullanılmıştır. Karışımda NaOH/ Na_2SiO_3 oranı ön deneyler sonucu 1/2 olarak belirlenmiştir. Alkali aktivatör için 90°C sıcaklık uygulanmıştır. 90°C aktivasyon sıcaklığı 24 saat boyunca uygulanmıştır. Çalışmada aktivatör (NaOH+ Na_2SiO_3) / bağlayıcı (cüruf) oranı 0.35, 0.40 ve 0.45 olarak denenmiştir. Bu oranlar hazırlanırken % 5, % 10 ve % 15 oranlarında mermer tozu eklenerek farklı karışımlar hazırlanmıştır. Her numuneye tüm karışımın % 0,5'i oranında cam lifi katkı maddesi olarak eklenmiştir. Numunelerin 7 ve 28 günlük deney sonuçları incelenmiştir. Harç numunelerine kıvam tayini ile priz başlama ve bitiş süreleri tayini deneyleri uygulanmıştır. Harç numuneler üzerinde her bir oran için basınç dayanımı, aşınma dayanımı, birim ağırlık deneyi, kapilerite deneyi, ultrases deneyi ve ayrıca 28 günlük numunelere sülfat etkisi ve donma-çözünme deneyleri uygulanmıştır. Çalışmada mikro yapı incelemeleri için SEM analizlerinden faydalanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ferrokrom Cürufu, Mermer Tozu, Cam Lifi, Alkali Aktive Edilmiş Harç

ABSTRACT

Determination of Engineering Properties of Elazığ Ferrochrome Slag, Alkali Activated Glass Fiber and Waste Marble Powder Added Mortars

Merve Nur MISIR

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Civil Engineering Technologies

February 2021, Pages: xii + 51

Unlike conventional concrete, composites obtained by using pozzolans instead of cement and alkali activators instead of water are called alkali activated concretes. Industrial wastes such as fly ash and blast furnace slag are widely used in alkali activation concretes due to their low cost and easy availability. The fact that alkali activated concretes can be produced without the use of cement, thus being a composite that has no harmful effects on the environment has attracted the attention of many researchers.

In this study, it is aimed to produce ferrochromium slag, which is ground at the same fineness instead of cement, and concrete activated with alkalis using marble dust and glass fiber as additives. Sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) solutions were used as alkaline activators. The ratio of NaOH / Na_2SiO_3 in the mixture was determined as 1/2 as a result of preliminary tests. 90°C temperatures was applied for the alkaline activator. Activation temperature of 90°C was applied for 24 hours. In the study, the activator (NaOH + Na_2SiO_3) / binder (slag) ratio was tested as 0.35, 0.40 and 0.45. While preparing these proportions, different mixtures were prepared by adding marble powder in the proportions of 5 %, 10 % and 15 %. Glass fiber was added to each sample as an additive at the rate of 0.5% of the whole mixture. 7 and 28 days test results of the samples were examined. Determination of consistency and setting start and end time tests were applied to the mortar samples. Compressive strength, abrasion resistance, unit weight test, capillarity test, ultrasound test as well as sulphate effect and freeze-thaw tests were applied on the concrete samples for each ratio. In the study, SEM analysis was used for microstructure investigations.

Keywords: Ferrochrome Slag, Marble Powder, Glass Fiber, Alkali Activated Mortar

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Puzolanların şematik olarak sınıflandırılması	3
Şekil 2.1. Los angeles cihazı	12
Şekil 2.2. Cüruf eleme işlemi	13
Şekil 2.3. Mermer tozu eleme işlemi	14
Şekil 2.4. Cam lifi.....	15
Şekil 2.5. Sodyum hidroksit (NaOH)	16
Şekil 2.6. 16 mol $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ karışımı (alkali aktivatör)	17
Şekil 2.7. Agregalar	17
Şekil 2.8. Agregada en büyük tane büyüklüğü 5 mm olan agregada tane büyüklük dağılımı eğrisi ve sınır değerler	18
Şekil 2.9. Etüve atılarak 90°C de bekletilen numuneler	20
Şekil 2.10. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0.35, 0.40 ve 0.45 olan % 5-% 10-% 15 mermer tozu katkılı % 0,5 cam lifi ilaveli 5*5*5 cm'lik küp ve 7*7*7 cm'lik küp numuneler	21
Şekil 2.11. Vicat aleti	22
Şekil 2.12. Basınç deneyi	23
Şekil 2.13. Böhme aşınma cihazı	24
Şekil 2.14. Aşınma deneyi için ölçüm noktaları	24
Şekil 2.15. Ultrases geçiş hızı deneyi	27
Şekil 2.16. Birim ağırlık deneyi	28
Şekil 2.17. SEM şematik görüntüsü	29
Şekil 3.1. Her bir oran için hazırlanan numunelerin yayılma çapı değerleri (mm)	31
Şekil 3.2. 7 ve 28 Günlük numunelerin birim hacim ağırlık deney sonuçları	32
Şekil 3.3. 7 ve 28 Günlük numunelerin ultrases geçiş hızı deney sonuçları	33
Şekil 3.4. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 ve 0,40 olan numunelerin zamana göre kapiler su emme(mm) katsayıları	34
Şekil 3.5. Tüm serilere ait kapiler su emme deney sonuçları	35
Şekil 3.6. 16 mol 90 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiş farklı aktivatör/bağlayıcı oranlarındaki 7 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımı sonuçları	36
Şekil 3.7. 16 mol 90 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiş farklı aktivatör/bağlayıcı oranlarındaki 28 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımı sonuçları	37
Şekil 3.8. 16 mol 90°C sıcaklıkta 24 saat bekletilen 7*7*7 cm'lik küp numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama ağırlık kayıpları	38

Şekil 3.9. 16 mol 90°C sıcaklıkta 24 saat bekletilen 7*7*7 cm’lik küp numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama hacim kaybı sonuçları	39
Şekil 3.10. Sülfata bırakılan numunelerdeki ortalama basınç değerleri	40
Şekil 3.11. Donma-çözünme deneyi sonrası ortalama basınç değerleri	41
Şekil 3.12. Donma-çözünme sonrası fiziksel değişim.....	41
Şekil 3.13. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 5 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerin SEM görüntüleri	42
Şekil 3.14. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 10 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerin SEM görüntüleri	43
Şekil 3.15. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 15 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerin SEM görüntüleri	44



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Elâzığ ferrokrom cürufunun kimyasal analizi.....	13
Tablo 2.2. Mermer tozunun kimyasal analizi.....	14
Tablo 2.3. Cam lifine ait özellikler	15
Tablo 2.4. Alkali aktivatörlerin özgül ağırlığı (%).....	16
Tablo 2.5. Geopolimer harç karışım oranları	19
Tablo 2.6. Beton kalitesi tahmin tablosu.....	26
Tablo 3.1. Her bir oran için hazırlanan numunelerde priz başlangıç ve bitiş süreleri (dk)	30
Tablo 3.2. Her bir oran için kapiler su emme deney sonuçları.....	35

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ	: Eğilme Dayanımı
L	: Mesnetler Arası Uzaklık
P	: Kırılma Yüğü
V_{OC}	: Açık Devre Gerilimi
ΔV	: Böhne Yüzey Aşınma Kaybı Değeri
Δd	: Yüzey Aşınma Kaybı Değeri (cm/50cm ²)
k	: Kapilerite Katsayısı
Q	: Numunenin Absorbe Ettięi Su Miktarı
W_k	: Numunelerin Etöv Kuruşu Ağırlığı (g)
W_d	: Numunelerin Doygun Yüzey Kuru Ağırlığı(g)
W_s	: Numunelerin Su Altındaki Ağırlıkları
I_k	: İncelik Modülü

Kısaltmalar

SiO ₂	: Silisyum Dioksit
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Fe ₂ O ₃	: Demir Oksit
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
GYFC	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
EFC	: Elâzığ Ferrokrom Cürufu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
MgO	: Magnezyum Oksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit
Cr ₂ O ₃	: Krom Oksit
ÖGYFC	: Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
AAECB	: Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufu Beton
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
AAE	: Alkalilerle Aktive Edilmiş
MT	: Mermer Tozu
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
μs	: Mikro Saniye

mm	: Milimetre
°C	: Santigrat
cm	: Santimetre
g	: Gram
Kg	: Kilogram
W	: Ağrlık
N	: Kırılma Yüğü
MPa	: Megapascal
kN	: Kilonewton



1. GİRİŞ

1.1. Alkali Aktivasyonlu Harçlar

Alkali aktive edilmiş harçlar bağlayıcı malzeme ve bu malzemelerin aktivasyonunu sağlayan alkali aktivatörlerden meydana gelmektedir. Alkali aktivatörlü harçlar da bağlayıcı olarak genellikle ferrokrom cürufu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, volkanik tüf, metakaolin, silis dumanı kullanılırken aktivatör olarak alkali tuzlar ve kostik alkaliler kullanılmaktadır [1].

Bağlayıcı malzemelerin çeşitlerine göre alkali aktivatörlü harçlar beş gruba ayrılmıştır:

- Alkali aktivatörlü puzolan harçlar
- Alkali aktivatörlü cüruf/puzolan-kireç harçlar
- Alkali aktivatörlü cüruf harçları
- Alkali aktivatörlü hibrid harçlar
- Alkali aktivatörlü kalsiyum alüminat harçlar

Alkali aktive edilmiş harçlarda bağlayıcı olarak en çok kullanılan malzemeler uçucu kül, cüruf ve silis dumanıdır [2].

Alkali aktive edilmiş harç ve betonlarda alkali aktivatör olarak genellikle alkali hidroksitler veya alkali tuzları kullanılmaktadır. Alkali aktivatörler, Glukhovsky ve diğerleri tarafından kimyasal kompozisyonlarına göre altı grupta sınıflandırılmıştır. Bütün alkali grupları içinde NaOH, Na_2CO_3 , $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ve Na_2SO_4 geniş kullanım alanına sahip ve ekonomik alkali aktivatörlerdir. Son zamanlarda potasyum kökenli alkali aktivatörler de laboratuvar ortamında deneylerde kullanılmaya başlanmıştır ancak maliyeti ve doğadaki potansiyeli sebebiyle uygulanabilirliği kısıtlıdır. Potasyum kökenli alkali aktivatörlerle yapılan deneysel çalışmalarda sonuç olarak sodyum kökenli alkali aktivatörlere benzer sonuçlar ortaya çıkmaktadır [3].

1.2. Puzolanlar

Beton yapımında kullanılan mineral katkı maddelerinin tamamına yakını puzolanik özelliklidir. Bağlayıcılık değeri olmayan veya çok düşük bağlayıcılık değerine sahip, ancak ince taneli halde suda kalsiyum hidroksitle kombine edildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan silikalı ve alüminalı malzemeler puzolanlardır. Doğal puzolan ve yapay puzolan olarak ikiye ayrılırlar. Doğal puzolanlar; volkanik kül, volkanik tüf, diatomlu toprak ve pişirilmiş kildir. Yapay puzolanlar ise uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve pirinç kabuğu külüdür. Doğal puzolanlar, suya dayanıklı harçlar ve sönmüş kireç ile birlikte su altında sertleşebilen bir beton türü yapmak için binlerce yıldır kullanılmaktadır.

Portland çimentosunun icadından sonra, portland çimento betonu üretiminde mineral katkı maddesi olarak hem doğal puzolanlar hem de yapay puzolanlar kullanılmaktadır.

Beton karışımının içerisinde çimento ağırlığının % 50'sine varan miktarlarda kullanılması nedeniyle, aynı zamanda betonun birçok özeliğini iyi yönde değiştirmesi ve portland çimentosundan daha ucuz olmasından dolayı beton endüstrisinde önemli bir konumdadır [4].

Puzolanik malzemenin bağlayıcılığının iyi olabilmesi için aşağıdaki şartlara uyması gerekmektedir:

- İçinde bulunan silika ve alümina miktarı fazla olmalıdır. (Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlardaki “ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ” miktarının en az % 70 olması istenmektedir.)

- Amorf yapıda olmalıdır.

- Saf haliyle çok ince olmalı ya da öğütülerek ince duruma getirilmelidir [5].

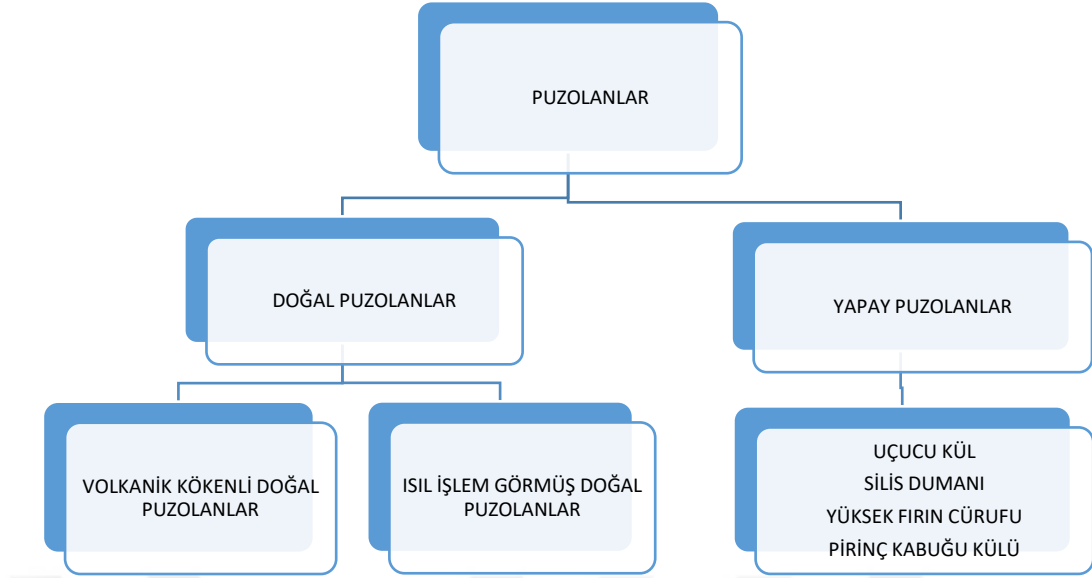
Puzolanik katkı maddelerinin dışında kalan her türdeki katkı maddesinin beton karışımında kullanıldıkları miktarlar çok az olmaktadır, puzolanik katkı maddelerinin kullanıldıkları miktarlar, genel olarak çimento miktarının % 10 - % 50'si kadardır. Bazı betonların yapımında, bu oran % 50'nin de üstünde olabilir [6].

İnce taneli puzolanik katkı maddelerinin betona etkileri olumlu etkileri

- İşlenebilirliği artırır,
- Segregasyonu ve terlemeyi azaltır,
- Hidratasyon ısısının miktarını ve hızını azaltır,
- Su geçirgenliği azaltır,
- Alkali-agrega reaksiyonunu azaltır,
- Sülfata karşı mukavemeti artırır,
- Nihai basınç mukavemetinin fazla olmasına neden olur,
- Ekonomik açıdan yarar sağlar [7].

1.2.1. Puzolanların Çeşitleri

Puzolanların elde edilişleri sırasında kimyasal bir işlem uygulanmamaktadır. Genellikle kırma öğütme ve eleme ile oluşurlar. Puzolanlar doğal ve yapay olarak ikiye ayrılmaktadır. Puzolanlara ait sınıflandırma şematik olarak Şekil 1.1'de verilmektedir. Yapay puzolanlar endüstri kollarında yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır [8].



Şekil 1.1. Pozolanların şematik olarak sınıflandırılması

Volkanik Kökenli Doğal Pozolanlar

Erimiş magmanın püskürmesiyle meydana gelmişlerdir. Erimiş magmanın patlama sırasında bir anda basıncının düşmesi ile atmosferde hızlı bir şekilde soğumasıyla, yüzeye yakın bölgelerde düzensiz hali ile amorf veya camı faz oluşturur. Magmanın yüksek seviyede püskürmesiyle, yüksek pozolanik aktiviteli camı malzemeler meydana gelirken daha zayıf seviyedeki püskürmeler, camı volkanik malzemelere kıyasla, kireçle daha az kimyasal reaksiyona giren volkanik külleri oluşturur. Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar ve volkanik küller olarak ayrılırlar.

Volkanik Camlar

Reaktif olmayan feldspat, mika ve kuvars gibi mineral kristalleri, camı faz içinde bulunabilir. İnce hale getirildiğinde yüksek pozolanik özelliğe sahip olurlar.

Isıl İşlem Görmüş Doğal Pozolanlar

Killer ve Şeyller

Plaka veya çubuk şeklinde olan kil ve killi zeminler ebatları 0.002 mm' den daha az parçalardan meydana gelirler.

Küçük parçalar, orijinal kayaların daha az sabit olan bileşenlerinin kırılmasından meydana gelen ve çoğunlukla alümina silikat bulunduran kil minerallerinden oluşurlar.

Şeyller, killer ile benzer özelliklere sahiptir ancak içindeki su miktarı killerden daha düşüktür. Killerin ve şeyllerin saf hali pozolanik değildir, kil mineralleri kristal haldedir.

Ancak 700° ile 900°C arasında ısıtılma ile kalsine hale gelir ve puzolanikliğe sahip olurlar. Isıl işlem, killerin ve şeyllerin amorf yapılarını bozar ve bozulmuş alumina silikat yapısına ya da yarı amorf şekle dönüştürür.

Diatomitler

Diatomitler, hücre duvarları silikadan oluşan, opal ve hidrate silika içeren, mikroskopik su bitkisi olan diatomların kalıntılarıdır. Bazı topraklarda olan bu organik kalıntılar % 94 oranında silis içerirler. Diatomitlerin puzolanik aktivitesi, içerdiği amorf silis miktarına bağlıdır [9].

Yapay Puzolanlar

Uçucu Kül

Uçucu kül, termik santrallerde kömür ve linyitin yakılması ile oluşan endüstriyel bir yan ürün ya da atık malzemedir. Puzolan olmaları nedeniyle çimento üretiminde ve geopolimer beton üretiminde kullanılır.

Silis Dumanı

Ferrokrom tesislerinde silikon metali veya alaşımlarının oluşması sırasında meydana gelen silis buharının yoğunlaştırılmasıyla oluşan atık malzeme olup, genellikle mikro silis ya da silika tozu olarak adlandırılır. Çok ince bir toz (0,1-0,2 mikron) formunda olup ebatları portland çimentosuna göre 100 kat daha incedir. İçeriğinde yüksek oranda amorf SiO₂ bulunması ve çok ince tane boyutunda bulunması nedeniyle yüksek puzolanik özelliklidir. Su ile birleştirildiğinde, yapısındaki karbon miktarına göre rengi koyu siyah olur. Diğer puzolanlardan farkı betonda kullanıldığı zaman erken dayanım avantajı sağlar. Boyutları ince olduğundan hidrasyon ısı ve su ihtiyacını artırır.

Yüksek Fırın Cürufu

Demir-çelik üretimi sırasında demir cevherleri yüksek sıcaklıkta ısıtılarak (1700-1800°C), eritilirler. Demir-çelik üretiminde demir oksitteki oksijen ile yakıt olarak kullanılan kok kömürünün karbonu birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit gazlarını oluşturur ve fırından ayrılırken geriye eriyik haldeki demir ve eriyik haldeki cüruf kalır. Eriyik haldeki cürufun farklı şekillerde soğutulmasıyla; granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu meydana gelmektedir. Yüksek fırından çıkan cüruf, su ile bir anda soğutulup GYFC meydana getiren bir yan ürün ortaya çıkmaktadır. Hızlı soğutulursa kristal yapıya ulaşır ve incelti olarak kullanıldığında puzolanik özellik kazanır.

Cürufun beton özelliklerine etkileri:

- Dayanıma etkisi gün geçtikçe artar.
- Deniz suları ve sülfata karşı mukavemeti yüksektir.
- Alkali-silisten oluşan genleşmeler daha düşüktür.
- Geçirimsizliği düşüktür.
- Sıcaklığa karşı dayanımı daha yüksektir [10].

1.3. Elazığ Ferrookrom Cürufu

Türkiye’de Antalya Ferrookrom İşletmesi ve Elazığ Ferrookrom İşletmesinden cüruf çıkarılmaktadır. Bu cürufların çoğu stok alanlarında depolanıp, bu cürufların ciddi anlamda değerlendirilmesi söz konusu olmamıştır [11].

Elazığ ferrookrom cürufu; Elazığ Maden ilçesinde mevcut Eti Krom işletmesinde krom cevheri üretimi sonrasında meydana çıkan yan üründür. Madenden getirilen krom içeren kayaçların 1500 ve 1700 °C sıcaklıklarda eritilmeleri, madenin ve cürufun ayrılması sonucunda ferrookrom cürufu ortaya çıkmaktadır [12]. Elazığ yöresinde gerçekleştirilen önceki üretimlerden kalan cüruflarla birlikte şu anda ferrookrom üretim sürecinden çıkan cüruflar fabrikada bulunan sahalarda muhafaza edilmektedir. Ferrookrom cürufunun beton içerisinde çimento yerine kullanılmasının çevresel problemlerin azaltılması ve enerji tasarrufu gibi birçok fayda sağlayacağı düşünülmektedir [13].

1.4. Mermer Tozu

Mermer tozu, boyutu çok küçük olan mermer atıklarıdır. Mermer işleme tesislerinde plakaların ve blokların kesilmesi ile oluşan ve hemen hemen hepsi 1 mm’den küçük olan mermer tanecikleridir. Kesme işlemi suyla yapıldığından atıklar suya karışır ve kek olarak arıtma tesislerinden aynı zamanda slam durumunda çöktürme havuzlarından alınır.

Mermer atıkları doğal dengeyi değiştirmeyen, iklimi etkilemeyen, çevre kirliliği oluşturmayan, radyoaktif olmayan ve inşaat sektöründe kullanılabilen bir atık malzemedir [14].

Mermer endüstrisini son yıllarda ilgilendiren konulardan biri çevresel kirliliğe neden olan atıklardır. Ama mermer işletmeciliğinde paledyen ve moloz toz ürünleri değerlendirilebilir bir madde olmaları nedeniyle, üretim esnasında ortaya çıkan havuz çökeltileri de birtakım işlemlerden sonra işe yarayan hem bir hammadde hem de ekonomik değeri olabilen bir malzeme olarak kullanılabilir [15].

Mermer tozları farklı alanlarda hammadde veya dolgu malzemesi olarak kullanılır. Atıklar, farklı özelliklere sahip mermer tozlarından ve içine gelen yabancı maddelerden oluşmaktadır.

Buna engel olmak için atık sulardaki mermer tozunu saf ve temiz olarak hidrosiklon uygulamaları daha iyi sonuç olarak vermektedir [16].

Mermer tozunun inşaat sektöründe kullanım alanları şunlardır:

- * Yapı ve İnşaat Sanayi
- * Çimento İmalat Sanayi
- * Yol Yapımında

1.5. Cam Lifi

Eritilmiş haldeki camın çok küçük delikler yardımıyla akıtılıp sertleşmesi ile elde edilir. Isıl iletkenlik değeri düşük olduğu için yalıtım malzemesi olarak kullanılır. Yüksek dayanıma sahip olduklarından diğer malzemelerle bir araya gelerek kompozit malzeme üretiminde kullanılabilirler. Cam lifleri, yüksek sıcaklık mukavemetine ve stabilitesine, saydamlık ve teknik amaçlara uygundur. Bu sebeple meydana gelen cam lifleri teknik amaçla ve ısı yalıtım malzemesi olarak tercih edilmektedir. Cam lifleri tekstil alanında kullanılmayacak kadar az bir alana sahiptir [17].

Beton, yapı alanında birçok ögeden oluşan, heterojen, boşluklu bir yapı malzemesidir. Betonun iç kısmındaki mikro çatlaklar, betonun bozulmasına sebep olabilir. Betonda daha çok kullanılan lifler; çelik, polimer (polipropilen, PVA), karbon ve cam içeriklidir.

Liflerin betona dâhil edilmesiyle, betonun; çekme ve eğilme mukavemetini, sürekliliği, enerji tüketme miktarını, mekanik özelliklerini ve çatlak gelişim karakteristiklerini arttırmada etkili yöntemlerden biridir.

Bu sebeplerden ötürü hava limanı pistlerinde, limanlarda, şehirlerarası otobüs terminallerinde, sulama kanalı beton kaplamalarında ve dolu savaklarda tercih edilmektedir. Lifler, kendi çekme mukavemetlerine varıncaya kadar beton basınç ve çekme gerilmelerinden meydana gelecek olan çok sayıdaki kılcal çatlak oluşumunu en az seviyeye düşürmektedir [18].

1.6. Literatür Özeti

Yazıcıoğlu ve Gönen (2005); bu çalışmada Elâzığ Ferrookrom İşletmesinden çıkarılan cürufun betonun basınç mukavemetini ve çarpma enerjisine etkilerini araştırmıştır. Betonun maksimum agrega çapı 4, 8, 16 ve 32 mm belirlemiştir. Çimento kadar inceltlen cüruf, beton karışımına portland çimentosu (CEM I 32,5) ve ağırlıkça % 1, % 3, % 5, % 7 ve % 10 oranlarında kullanılmıştır. Çalışma, slump altında (6-9 cm) yapılarak numunelerin 28 günlük basınç dayanımları ve çarpma enerjileri incelenmiştir. Maksimum agrega tane çapı arttıkça betonun basınç dayanımında ve çarpma enerjisinde artma gözlenmiştir.

Cüruf oranı % 3 olan betonların dayanımı kontrol betonundan fazla ve % 5 ilaveli betonlarda ise kontrol betonuna eşit dayanımlar bulunmuştur. Çalışma sonucuna göre, ekonomiklik sağlama açısından cüruf oranın % 5'e kadar çimento ile birlikte kullanımı uygun görülmüştür [19].

Mahmut ve Emiroğlu (2016); yapılan çalışmada, çimento inceliğine getirilmiş Elâzığ Ferrokrom cürufunun NaOH-Na₂SiO₃ kullanılarak 40, 65 ve 90°C aktivasyon sıcaklığında alkali ile aktivasyonu sonucu harç üretim potansiyeline bakılması amaçlanmıştır. Kullanılan aktivatörler 6, 9 ve 12 mol olacak biçimde kullanılarak aktivasyon sıcaklıkları ise 1, 2 ve 4 gün süreyle uygulanmıştır. Yapılan harçlara; kıvam ve priz başlama ve sona erme süreleri deneyleri uygulanmıştır. Sertleşen numunelerde her bir sıcaklıkta ve etüvde kalma süresi sonunda; ultrases geçiş hızı, birim ağırlık, kapiler su emme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, çimento kullanılmadan bağlayıcı olarak EFC'nin kullanıldığı 15 MPa basınç dayanımı üzerinde alkali aktive edilmiş harç üretildiği sonucu elde edilmiştir [20].

Erdoğan (2011); çalışmada hemen hemen üçte ikisi SiO₂ ve Al₂O₃'den meydana gelen ve Elâzığ'dan alınan ferrokrom cürufu kullanmıştır. Cürufun içeriğinde % 30'dan fazla MgO bulunmaktadır ve bu sayede standart geopolimer malzemelerinden ayrılır. Cüruf alkali içeren kimyasallarla kullanıldığında ve oda sıcaklığından daha fazla etüve kısa zamanlı olarak yerleştirildiğinde portland çimentolu harçlar ile kıyaslanabilecek basınç mukavemetleri, oda sıcaklığında kürlendiğinde ise daha düşük mukavemetler gözlenmiştir.

Sertleşen numuneler çeşitli bozucu kimyasallara ve asite maruz bırakıldığında Portland çimentolu numunelere göre daha az bozulma gözlenmiştir. Numuneler 1100 °C'a kadar ısıtılıp bir süre bekletilip tekrar soğumaya bırakıldıklarında ise gözlenen dayanım kayıpları portland çimentolu numunelere göre daha az olmuştur. Hatta bazı numunelerin basınç mukavemetlerinde artış gözlenmiştir [21].

Maraş ve Murat (2013); çalışmada EFC, çimento gibi inceltip, alkali ile aktivasyonu sağlandıktan sonra, bağlayıcılığı yüksek bir geopolimer malzeme oluşturulmasını hedeflemiştir.

Geopolimer hamur numuneleri 3 farklı silis modülü (0.50, 0.60 ve 0.70) ve 4 farklı sodyum oksit ile (% 4, 7, 10 ve 12) üretilmiştir. Geopolimer hamur numunelerinde hidratasyon ısısı, priz süresi ve basınç mukavemeti incelenmiştir. Aynı olmayan Na₂O içeriğine göre priz süreleri 120 ve 870 dakika arasında değişim göstermiştir. 28 günlük en yüksek basınç mukavemeti silis modülü 0.70 ve Na₂O içeriği % 7 olan geopolimer hamur numunelerinden sağlanmıştır.

Geopolimer bağlayıcı, çimento yerine kullanılarak farklı su/bağlayıcı (w/b) oranlarında (0.30, 0.35 ve 0.40) ve 3 farklı kür ortamında harç numuneler meydana getirilmiştir. Genellikle bu geopolimer harç numunelerin w/b oranının artmasıyla basınç mukavemetleri düşmüştür. Geopolimer harç numunelerin 28 günlük en yüksek basınç mukavemeti w/b oranı 0.30 olan ve laboratuvar ortamında kür edilen numunelerde saptanmıştır.

Bağlayıcı madde ve agregası (dere agregası ve kırma kum) kullanılarak geopolimer beton numuneleri oluşturulmuştur. Üretilen geopolimer beton numunelerinin basınç mukavemetleri (3, 7 ve 28 gün) ve sülfata karşı dirençleri incelenmiştir. Maksimum basınç dayanım değeri geopolimer beton numuneler için yaklaşık 35 MPa olarak bulunmuştur. Numunelerin farklı magnezyum sülfat çözeltileri içerisinde (ağırlıkça % 3, % 5 ve % 7) basınç mukavemeti, ağırlık değişimi, boy değişimi, pH değişimi ve görsel görünümü incelenmiştir.

Geopolimer beton numunelerin magnezyum sülfata karşı direncinin iyi olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda, geopolimer beton numunelerinin fiziksel şeklinde bir bozulma görülmemiştir [22].

Kantarıcı (2013); çalışmada, EFC çimento inceliğinde öğütülmüş ve aktivatör (Na_2SiO_3 ve NaOH karışımından oluşan) ile birleştirilerek bağlayıcılığı olan madde oluşturulmuştur. Bu madde ve agregası (dere agregası ve kırma kum) kullanılarak geopolimer beton numuneler yapılmıştır. Elde edilen geopolimer beton numunelerinin basınç mukavemetleri (3, 7 ve 28 gün), birkaç fiziksel özelliği, yangın mukavemetleri (100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700 °C) ve mikro yapılarına bakılmıştır. Bununla birlikte elde edilen veriler Portland çimentolu beton numunelerle kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, EFC ve aktivatör kullanılarak üretilen dere agregalı geopolimer beton numunelerde 28 günlük basınç dayanımı değerinin yaklaşık 35 MPa olduğu gözlenmiştir. Bu değer aynı kür şartları altında üretilen normal Portland çimentolu beton numunelerde elde edilen basınç mukavemetine göre (31.8 MPa) fazladır.

Yangına karşı basınç mukavemetinde kontrol numunelerine göre, bütün karışımlarda 100 ve 300 °C sıcaklıklarda basınç mukavemetlerinde artış gözlenmiştir. 700 °C'de ise bütün beton numunelerinde en az basınç mukavemeti kaydedilmiştir [23].

Vapur vd. (2013), Elâzığ ilinde demir-çelik üretimi sonrası açığa çıkan ferrokrom atıklarının agregası olarak kullanılabilirliğine bakmıştır. Cürufun kimyasal ve fiziksel özellikleri belirlendikten sonra Los Angeles, Schmidt test çekici, noktasal yük dayanımı, alkali agregası reaktivasyonu, donma ve çözünme deneyleri ve asitle çözünen sülfat gibi deneyler uygulanmıştır. Sonuçta ferrokrom cürufunun agregası olarak kullanılabileceği bulunmuştur [24].

Bingöl (2018), bu çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu sodyum metasilikat ile aktive edilerek mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Mekanik deneylerin uygulamasında farklı sodyum oranları belirlenerek, harç karışımına farklı oranlarda eklenmiştir. Mekanik deneyler sonucunda optimum sodyum oranları belirlenmiştir.

% 4, % 8 ve % 12 sodyum oranlı harç karışımları üretilerek 1 gün etüvde 75 °C'de, 28 gün suda ve 28 gün havada kür edilerek durabilite deneyleri uygulanmıştır. Çalışmada; rötre, aşınma, asit etkisi, baz etkisi, karbonatlaşma, hızlı klor geçirimsizliği, yüksek sıcaklık, ıslanma-kuruma, birim hacim ağırlık, kılcal su emme ve işlenebilirlik deneyleri uygulanmıştır.

Ayrıca geopolimer harçların sonuçlarını karşılaştırmak için kontrol harçları (portland çimentolu (CEM I 42.5 R) üretilmiştir. Yüksek fırın cürufu geopolimer harçların kontrol harçlarına göre daha iyi performans gösterdiği elde edilmiştir [25].

Balçıklı (2016); bu çalışmada, sodyum konsantrasyonu, silikat modülü, kür sıcaklığı ve kür süresi bağımsız değişkenlerine bağlı olarak üretilen alkalilerle aktive edilmiş cürufu betonların (AAECB) mekanik (basınç, yarmada çekme dayanımı, aşınma miktarı, çekip çıkarma yükü, ultrasonik dalga hızı) ve geçirimsizlik (basıncı su geçirimsizliği, kılcal su emme, su emme oranı, gaz ve hızlı klor geçirimsizliği, ısı iletkenlik) özelliklerini araştırmıştır. Deneysel tasarım, deney tasarımı yöntemlerinden olan Tepki Yüzeyi Yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Belirtilen bağımsız değişkenlerle 0.52 alkali çözelti-cüruf oranı, 400 kg/m³ cüruf dozajı ve 20±2 cm çökme değeri elde edilebilecek 21 farklı karışım belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlere bağlı olarak elde edilen bağımlı değişkenler (mekanik ve geçirimsizlik özellikleri) istatistiksel olarak analiz edilerek, bağımlı değişkenlerle bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilecek regresyon modelleri bulunmuştur. Elde edilen regresyon modelleri kullanılarak belirlenen objektif fonksiyonlar (mekanik özellikleri maksimum, geçirimsizlik özelliklerini minimum) belirlenen kısıtlar altında çoklu objektifli olarak optimize edilmiş ve optimum bağımsız değişken parametreleri belirlenmiştir. Optimum bağımsız değişken değerleri ile laboratuvar ortamında yeniden üretimler gerçekleştirilerek teorik olarak bulunan optimum sonuçların laboratuvar şartlarında ne kadar uygulanabilir olduğu gözlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, AAECB mekanik ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde en etkili bağımsız değişkenin sodyum konsantrasyonu olduğu, gerçekleştirilen çalışmanın kısıtları altında, en optimum üretim koşullarının, sodyum konsantrasyonu % 5,92, silikat modülü 1.82, kür sıcaklığı 48,3 °C ve kür süresinin de 8.28 saat olduğu elde edilmiştir [26].

Balçıklı, Özbay ve Türkay (2015); yapılan çalışmada farklı miktarlarda yüksek fırın cürufunun (YFC) alkalilerle aktive edilmesiyle üretilen çimentosuz harçların eğilme ve basınç mukavemetleri, aşınma ve çekip çıkarma mukavemetlerine bakılmıştır. Karışım miktarı ağırlıkça 1:2.75:0.485 oranlarında bağlayıcı (çimento, cüruf), ince agrega, su kullanılarak, % 50 ve % 100 oranlarında ve özelliklerin karşılaştırılması amacıyla % 0 oranında cüruf, çimento ile yer değiştirilmiştir. Cürufun aktive edilmesi amacıyla karışımın sodyum oranı % 5 olacak şekilde sodyum hidroksit (NaOH) ve modülü 3 olan (SiO₂/Na₂O) sodyum silikat (Na₂SiO₃) çözeltisi ilave edilmiştir.

Her bir oranda hazırlanan harç karışımları için kür sıcaklıkları 40, 60 ve 80°C olarak tercih edilmiş ve etüv süreleri 6, 12 ve 24 saat olarak uygulanmıştır. Sonuçlara göre sıcaklık kürünün % 100 YFC'li alkalilerle aktive edilmiş (AAE) harçlarda mukavemeti yükseltici yönde etkisi olduğu, fakat 80 °C'de tüm numunelerin özelliklerine olumsuz etkisi olduğu görülmüştür.

AAE cürüflü harçların eğilme mukavemetlerinin kontrol numunelerine oranla daha az olduğu gözlenmiştir. Çekip çıkarma deney sonuçlarının da basınç mukavemetinde görüldüğü gibi en fazla % 100 YFC içeren AAE harçlarda, en düşük ise % 50 YFC içeren AAE harçlarda olduğu gözlenmiştir. Ayrıca YFC içeren AAE harç numunelerin aşınma dirençlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir [27].

Dumangöz (2014); bu çalışma kapsamında ince malzeme olarak mermer tozu ve YFC, KYB karışımlarında kullanılmıştır. Üretilen KYB numunelerinin ilk olarak reolojik ve işlenebilirlik özellikleri ve diğer sertleşmiş beton özellikleri deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Daha sonra bu numunelerin kalıcılık özelliklerinden, sülfat etkisi, donma çözülme direnci ve aşınma direnci deneyleri yapıp mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilerek MT ve YFC'nin bağ yapısındaki etkilerine bakılmıştır. MT ve YFC'nin ileri yaş performansları ise kalıcılık deneyleri sonuçlarına bakılarak belirlenmiştir. Böylece mermer tozu ve YFC'nin KYB teknolojisinde değerlendirilebilirliği incelenmiştir [28].

Çakır (2006), yüksek fırın cürufu eklenmesiyle üretilen farklı türdeki betonu farklı ortam koşullarına maruz bırakarak yapılacak deneyler sonrası elemanın korozyon durumunun tahmin edilmesini hedeflemiştir. Araştırmacı sonuç olarak beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılmasının beton performansına olumlu etkide bulunduğunu ve üretilen betonda toplam korozyon ve donatı korozyonunun düştüğünü gözlemlemiştir [29].

Canbaz (2007), çalışma kapsamında Türkiye'de bulunan üç demir çelik fabrikasından aldığı yüksek fırın cürufunu betonda çimento yerine % 0, % 25, % 50, % 75, % 85, % 90, % 95, % 100 oranlarında kullanmıştır. Aktivatör olarak da sodyum karbonat, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanmıştır. Deney numunelerini 28, 56 ve 90 gün kür koşullarında bekletmiştir.

Yaptığı deneyler neticesinde en uygun aktivatörlerin sodyum hidroksit ve sodyum karbonat olduğunu gözlemiş ayrıca çimento yerine % 75-100 oranında alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu kullanımının dayanımı arttıracaklarını elde etmiştir [30].

Aydın (2010), yapmış olduğu çalışmada amorf karakterli yüksek fırın cürufunun aktivatörler ile aktive edilerek iyi özellikte bağlayıcı elde etmeyi hedeflemiştir. İlk olarak kullanılacak en iyi aktivatör belirlenmiş sonrasında yüksek performanslı lifli kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozitin reolojik, mekanik ve mikroyapı özellikleri yapılan deneylerle belirlenmiş ve klasik portland çimentolu betonun özellikleriyle kıyaslanmıştır. Deney sonuçları genel olarak alkali aktive edilmiş betonun normal betona göre dış etkilere dayanıklılığının fazla olduğunu göstermiştir [31].

Literatür taramaları sonucunda krom cürufu ile alkali aktive edilmiş beton ve harç numunesi üretimi hakkında son on yılda yapılmış çalışmalara rastlanmaktadır. Ancak krom cürufu, mermer tozu ve cam lifinin birlikte kullanımının harçlar üzerindeki etkileri ile ilgili yeterince çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Bu çalışmada atık malzeme olması, kanserojen ve radyoaktif olmaması, ekonomik olması nedeniyle katkı maddesi olarak mermer tozu kullanılmıştır. Beton numunelerinde kullanılan cam lifinin betonda oluşan mikro çatlakları kapaması ve böylece çekme mukavemeti arttırması nedeniyle, bu malzemenin harç numunesinde etkisini incelemek amaçlanmıştır. Yapılan literatür taramaları sonucunda benzer bir çalışmaya rastlanılmamış ve konunun araştırmaya açık, özgün bir konu olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, harç üretiminde çimento kullanmak yerine çimento ile aynı incelikte öğütölmüş krom cürufu kullanılmış, katkı maddesi olarak mermer tozu ve cam lifi ilave edilerek alkalilerle aktive edilmiş harç üretimi hedeflenmiştir.



2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

2.1.1. Elazığ Ferrokrom Cürufu

Çalışma için gerekli olan cüruf Elâzığ Ferrokrom İşletmesinden alınmıştır. TS EN 1097-2 standardına göre Los Angeles cihazı ile toz haline getirilmiştir. Los Angeles aletinin tamburu standarda uygun olarak 31-33 devir/dakika hızda döndürülmüştür. Cüruf 240 dakika boyunca tambur ortalama 7440 tur dönerek öğütülmüştür. Los Angeles cihazı Şekil 2.1’de verildiği gibidir.



Şekil 2.1. Los angeles cihazı

Öğütmeden sonra cüruf 0.125 mm’lik elekten elenmiştir. Elazığ ferrokrom cürufunun özgül ağırlığı 2,86 g/cm³ tür. Elazığ ferrokrom cürufunun kimyasal analizi Tablo 2.1’de verilmiştir. Cüruf eleme işlemi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Elazığ ferrokrom cürufunun kimyasal analizi

Analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃
EFC (%)	30,95	20,13	2,72	2,58	34,83	6,22



Şekil 2.2. Cüruf eleme işlemi

Çalışmada kullanılan Elazığ Ferrokrom cürufunun yüksek oranda silisyum, alüminyum ve magnezyumdan oluştuğu anlaşılmaktadır. Elazığ Ferrokrom cürufunun CaO oranı % 2,58 olarak çok düşük olduğu anlaşılmaktadır. Alkali aktivasyonlu kompozitlerde aktivasyonun sağlanması için SiO₂, Al₂O₃ ve CaO önemli bileşenlerdir. Ayrıca alkali aktivasyonlu kompozitlerde kalsiyum bulunması sayesinde oda sıcaklığında da aktivasyonun sağlanması mümkün olmaktadır [32, 33]. Elazığ ferrokrom cürufunda CaO miktarının düşük olması ve atık mermer tozunun çevresel etkilerinin azaltılması dışında yüksek kalsiyum içeriğine sahip olması nedeniyle alkali aktivasyonlu harç karışımlarda atık mermer tozunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2.1.2. Atık Mermer Tozu

Çalışmada Elazığ Uluğaç Antalya Karo'dan mermer tozu temin edilmiştir. Los Angeles cihazında TS EN 1097-2' ye göre öğütülmüş ve ardından 0.125 mm'lik elekten elenmiştir.

Elazığ yöresi Uluğaç Antalya Karo'dan temin edilen mermer malzemenin özgül ağırlığı 2,62 olarak raporlanmıştır. Mermer tozunun eleme işlemi Şekil 2.3'te verilmiştir.

Elâzığ yöresinden elde edilen mermer malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Mermer tozunun kimyasal analizi

Analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Mermer Tozu (%)	0,31	0,56	0,02	98,24	0,83

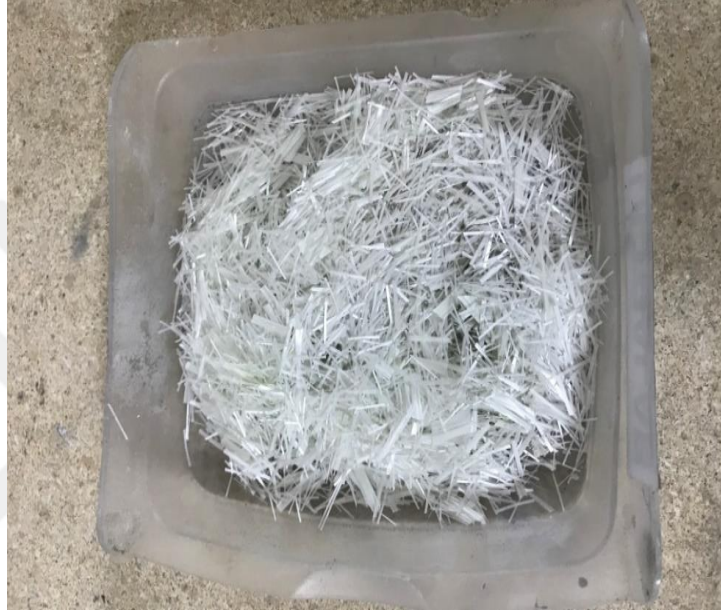


Şekil 2.3. Mermer tozu eleme işlemi

Çalışmada kullanılan mermer tozu yüksek oranda (% 98,24) CaO'dan oluşmaktadır. Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların bilinen dezavantajlarından biri çiçeklenme sorunudur. Mahmut (2015), Elazığ ferrokrom cürufu ile ürettiği sertleşmiş geopolimer harçlarının nemli veya sulu ortamlarda bekletildiğinde yüzeylerinde beyaz renkte kabarmış lekelerin oluştuğunu rapor etmiştir [34]. Bunu önlemek için karışımda kalsiyum-alüminatlı bileşenlerin kullanılması önerilmektedir [35]. Bu nedenle bu çalışmada atık olarak elde edilen mermer tozu kullanımının fayda sağlayacağı beklenmektedir.

2.1.3. Cam Lifi

Şekil 2.4'te verilen cam lifi Doğusan Yapı Malzemelerinden temin edilmiştir. Cam lifi karışıma tüm karışımın ağırlıkça % 0,5'i kadar eklenmiştir. Bu oran sabit tutulmuştur. Oran arttığında aktivatör ihtiyacının arttığı ve homojen dağılımın zorlaştığı görülmüştür. Kullanılan cam lifinin özellikleri Tablo 2.3'te verilmektedir.



Şekil 2.4. Cam lifi

Tablo 2.3.Cam lifine ait özellikler

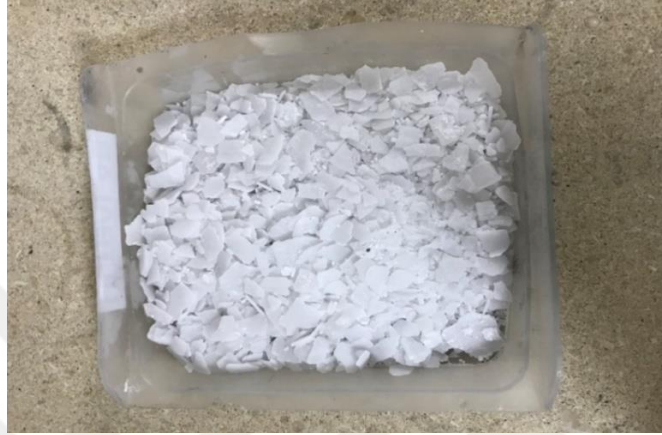
Lif Çeşidi	Lif Boyu(mm)	Lif Çapı (µm)	Özgül Yüzey(m ² /kg)	Bağlı Yoğunluk(mg/m ³)	Elastisite Modülü(Mpa)	Çekme Dayanımı(Mpa)
Cam	10-15	12-14	105	2,68	72000	1700

2.1.4. Alkali Aktivatör

Bu çalışmada aktivatör olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Sodyum silikat sıvı haldedir. Diğer adları su camı ya da sıvı camdır. Sulu çözeltide ya da bir katı ile kullanılabilir. Saf hali renksiz ya da beyazdır. 1400 °C sıcaklığında, sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve kuvars kumunun ergitilmesi sonucu sodyum silikat üretilir.

Kuvars kumu % 99,7 SiO_2 ve düşük miktarlarda alüminyum, demir, magnezyum ve kalsiyum oksitlerini içermektedir [36].

Sodyum hidroksitin bilinen diğ er adı kostik sodadır. Bazik özellik gösterir. Katı haldedir. Kullanım alanları; ilaç, boya, tekstil gibi alanlardır [37]. Ş ekil 2.5'te NaOH 'ın katı hali verilmiştir. NaOH su ile karıştırılıp üzerine sodyum silikat ilave edilmiş olup 16 mol karışım hazırlanmıştır.



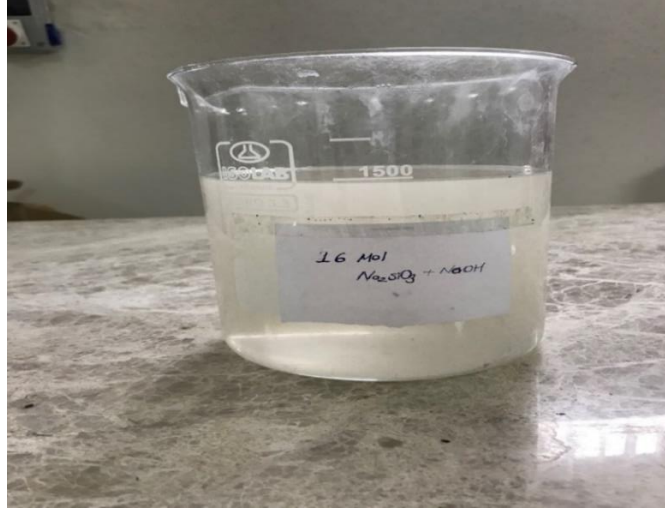
Ş ekil 2.5. Sodyum hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit sulu çözeltisi hazırlanırken TS EN 1008'e göre Elazığ ili şebeke suyu kullanılmıştır. Tablo 2.4'te kullanılan alkali aktivatörün özgül ağırlığı verilmiştir.

Tablo 2.4. Alkali aktivatörlerin özgül ağırlığı (%)

Alkali Aktivatörler	Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)	Sodyum Hidroksit (NaOH)
Özgül Ağırlık	1,45	1,33

Deney için hazırlanan 16 mol Na_2SiO_3 +NaOH karışımı Ş ekil 2.6'da verilmiştir. 16 mol seçilmesinin nedeni mol oranının arttıkça priz alma süresinin kısılması ve kalıba yerleştirmede güçlük çekilmesidir. Bu oran ön çalışmalar sonucu belirlenmiştir.



Şekil 2.6. 16 mol $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ karışımı (alkali aktivatör)

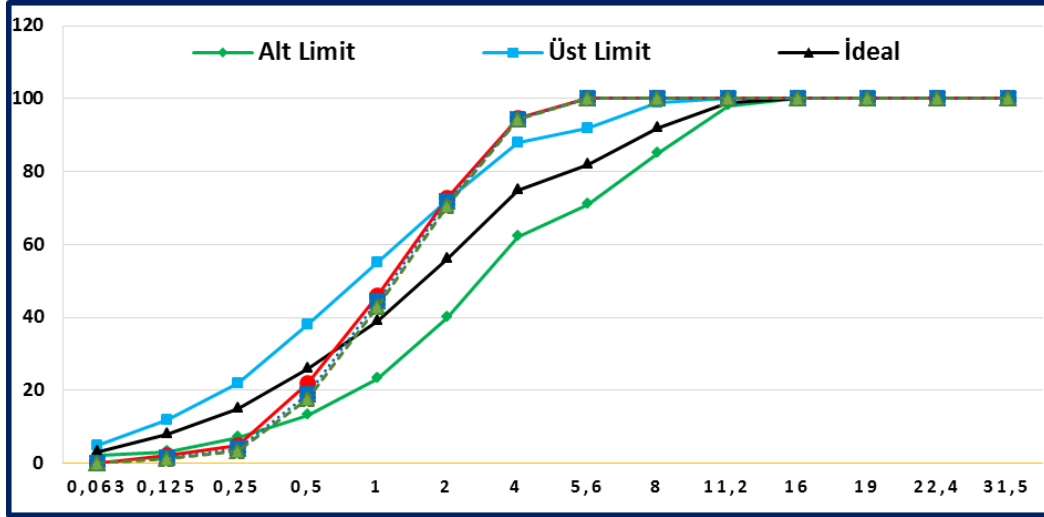
2.1.5. Agregalar

Çalışmada Şekil 2.7’ de gösterilen, Elâzığ Vessam Prefabrik ’ten temin edilen 0-5 mm boyutlarında kırma taş ince agregalar kullanılmıştır. Agreganın özgül ağırlık değeri 0-5 mm boyut için 2.64 ve su emme oranı % 2,7 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.7. Agregalar

Beton karışımında maksimum agregalar boyutu 5 mm olarak seçilmiştir. Agregalar tane büyüklük dağılımı TS 802 (2009)’da verilen sınır değere göre çizilmiştir. Yapılan elek analiz grafiği Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Agrega en büyük tane büyüklüğü 5 mm olan agreganın tane büyüklük dağılımı eğrisi ve sınır değerler

2.2. Metod

2.2.1. Beton Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Öncelikle agreganın çapı 0-5 mm olarak seçilmiştir. Tablo 2.5'te gösterilen aktivatör ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) 20 mol olarak denenmiş ve numunenin prizini çok hızlı aldığı, kalıplara yerleştirilemediği gözlenmiştir. Aktivatör 16 mol olarak devam edilmiştir. Aktivatör ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) / bağlayıcı (çüruf) oranı 0,35, 0,40 ve 0,45 olarak seçilmiştir. Katkı maddesi olarak mermer tozu oranı çüruf miktarının ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 olarak kullanılmış ve cam lifi tüm karışımın % 0,5'i (ağırlıkça) olarak kullanılmıştır. Dökümden sonra her bir numune üzerinde 7 ve 28 günlük deneyler yapılmıştır.

Tablo 2.5. Geopolimer harç karışım oranları

Alkali Aktivatör (NaOH+Na ₂ SiO ₃) /bağlayıcı (cüruf)	Mol	Atık Mermer Tozu Oranı (%)	Cam Lifi Oranı (%)	EFC (g)	Atık Mermer Tozu (g)	Agrega (g)	Cam Lifi (g)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)
0,35	16 mol	%5	%0,5	332,5	17,5	700	5,25	40,83	81,67
		%10	%0,5	315	35	700	5,25	40,83	81,67
		%15	%0,5	297,5	52,5	700	5,25	40,83	81,67
0,40	16 mol	%5	%0,5	332,5	17,5	700	5,25	46,67	93,33
		%10	%0,5	315	35	700	5,25	46,67	93,33
		%15	%0,5	297,5	52,5	700	5,25	46,67	93,33
0,45	16 mol	%5	%0,5	332,5	17,5	700	5,25	52,5	105
		%10	%0,5	315	35	700	5,25	52,5	105
		%15	%0,5	297,5	52,5	700	5,25	52,5	105

Bu oranlarda numuneler 7 ve 28 gün olarak dökülmüş. Etüvde 1 gün 90 °C de bekletilip, kalan sürelerde laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

2.2.2. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan malzemeler; agrega, bağlayıcı olarak 0.125 mm'den daha küçük öğütülmüş Elâzığ ferrokrom cürufu ve katkı maddesi olarak atık mermer tozu ile cam lifi, aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikattır(Na₂SiO₃). Çalışmada aktivatör / bağlayıcı oranı 0.35, 0.40 ve 0.45 olarak denenmiştir. Tüm oranlar üzerinde ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Numuneler karışım oranlarına göre agrega, ferrokrom cürufu, mermer tozu ilave edilerek karıştırılmış ve daha sonra cam lifi homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla küçük parçacıklar haline gelmesi sağlanmıştır. Hazırlanan karışıma alkali aktivatör verilen oranda eklenerek hızlıca harç haline getirilmiştir.

Kalıplar harç yerleştirilmeden önce rahatça çıkabilmesi için 10 numara motor yağı ile yağlanmıştır. Kalıplara üç tabaka halinde her biri 25 defa olmak üzere şişlenerek yerleştirilmiştir. Kullanılan şiş 20 cm uzunluğunda, 5 mm çapındadır. Üst yüzeyi mala yardımı ile düzelterek döküm işlemi tamamlanmıştır.

Numuneler aktivasyonun sağlanabilmesi için 90 °C de 1 gün etüvde bekletilmiş, kalan günler laboratuvar ortamında muhafaza edilmiştir. Etüvde bekletilen numuneler Şekil 2.9'da verilmiştir. 7 ve 28 günlük numuneler Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Etüve atılarak 90°C de bekletilen numuneler



Şekil 2.10. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0.35, 0.40 ve 0.45 olan % 5-% 10-% 15 mermer tozu katkılı % 0,5 cam lifi ilaveli 5*5*5 cm'lik küp ve 7*7*7 cm'lik küp numuneler

Şekil 2.10'da verilen 5*5*5 cm'lik numuneler üzerinde basınç, sülfat etkisi ve donma-çözünme deneyi uygulanmıştır. Aynı şekilde verilen 7*7*7 cm'lik numuneler üzerinde birim ağırlık, ultrases, kapiler su emme, aşınma deneyleri uygulanmıştır.

2.2.3. Alkali Aktivasyonlu Hamurlar Üzerinde Yapılan Deneyler

Kıvam tayini

Bu deney TS EN 196-3'e (2017) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 500 g numune yapılmıştır. Yapılan numune yağlanan vicat halkası içine yerleştirilmiştir. Taşan kısım spatula ile düzeltilmiştir. Sondanın ucu hazırlanan vicat halkasının ortasına pastanın üst kısmına dokunacak şekilde indirilip bırakılmıştır. Sonda 30 saniye içinde cüruf pastasının içine girmiştir. Sondanın batma işi bittiğinde sonda ucu ile taban plakası arasındaki mesafe mm cinsinden kaydedilmiştir. Sondanın batma işlemi tamamlandığında sonda ucu ile taban plakası arasındaki mesafe mm cinsinden okunmuştur. Sondanın tabanda bulunan cam levhaya 5-7 mm kalıncaya kadar inene kadar deney farklı oranlarda yapılmıştır. Normal kıvam, sonda serbest bırakıldığı zamandan itibaren 30 sn. içinde çimento karışımı içine, cam levhaya 5 mm-7 mm mesafe kalıncaya kadar batmasını sağlayan kıvam olarak tanımlanır. Sonda ucu ile alt yüzey arası mesafe 5 cm'den az ise sulu kıvam olarak, 7 cm'den daha fazla ise kuru kıvam olarak tanımlanır.

Kıvam tespiti için yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Yayılma tablası deneyi TS EN 1015-3(2000)'e uygun olarak yapılmıştır.

Hazırlanan harç karışımları taban çapı 100 mm olan koni kabına yerleştirilmiş 15 saniyede 15 defa düşürülerek hesaplanmıştır. Yayılan harcın çapı iki noktadan ölçülmüş, ortalaması alınmıştır.

Priz Süresinin Tayini

Priz başlama ve bitme süresi tayini TS EN 196-4/2017'ye uygun olarak yapılmıştır. Numune için 500 g harç hazırlanmıştır. Vicat aletine iğne takılmış ve iğne cam levha üzerine indirilmiştir. Karıştırma kabına alkali aktivatör ve 500 g malzeme katılmıştır. Bu karışım vicat halkasına 30-40 s içinde doldurulmuştur. Alete göre iğne 1 cm içeride olacak şekilde yerleştirilmiştir. Priz başlangıç süresi için 10 dakika beklenip iğne serbest bırakılmıştır. Saat yönünün tersine doğru sürekli daire çizilerek her 10 dakikada batırma işlemi devam ettirilmiştir. Batma derinliği 3-5 mm olduğunda priz başlama süresi belirlenerek kaydedilmiştir.

Priz sona erme süresi için de vicat halkası ters çevrilmiş ve priz sona erme süresinin tayininde kullanılan iğne takılmıştır. Batma derinliği 0,05 mm olduğunda priz sona erme süresi belirlenerek dakika olarak kaydedilmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Vicat aleti

2.2.4. Sertleşmiş Beton Numunelerine Uygulanan Deneyler

Basınç Dayanımı Deneyi

Bu deneyin yapılmasındaki amaç betonun basınç mukavemetini ve gerilme deformasyon arasındaki ilişkinin belirtilmesidir. Numunelerin yük-şekil değiştirme ilişkisi belirtmek istendiğinde yükleme esnasında mekanik komperatör veya dijital deformasyon ölçerler kullanılır [38].

Basınç dayanım deneyi için her oranda 3'er adet 50×50×50 mm ölçekli küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu deney TS EN 12390-3/2010'a uygun olarak yapılmıştır.

Numune basınç makinesine yerleştirilmeden önce yüzeyi temizlenmiştir. Küp numuneler düzgün yüzey olacak şekilde dik yerleştirilmiştir. Uygulanan numuneler için 0,9 kN/m² sabit yükleme hızı seçilmiştir. Yük numuneye uygulanarak göstergeden okunan değer kaydedilmiştir. Bu üç numunenin ortalaması kaydedilmiştir. Basınç deneyinin yapıldığı cihaz Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Basınç deneyi

Aşınma Deneyi

Aşınma dayanımı bir yüzey özelliğidir ve beton yüzeyinin özelliği ile ilgilidir. Beton yüzey dayanımı ve sertliğinin artırılması ile aşınma kaybı azalır [39].

Bu deney TS 2824 ve TS 699 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Deneyde her oran için 3’er tane 70×70×70 mm’lik küp numuneler dökülmüştür. 7 ve 28 gün bekletilerek Şekil 2.13’te verilen Böhme aşınma cihazında deney uygulanmıştır. Deneye başlamadan aşınacak yüzeyin dokuz farklı noktadan uzunluğu ölçülerek kaydedilmiştir. 7. ve 28. günde ağırlık kaybını bulmak amacıyla hassas terazide tartılarak kaydedilmiştir. Böhme aşınma cihazında standarda uygun olarak aşınma için demir tozu kullanılmıştır. Her bir yüzey 22 dönüşten oluşmak üzere 16 devir aşınma işlemi yapılmıştır. Her bir dönüşte deney izine aşındırıcı olarak 20 g demir tozu konulmuştur. Disk numuneye 294±3 N’luk kuvvet uygulayarak döndürülmüştür. Her bir devir sonrası temizlenmiş ve tekrar 20 g konulmuştur. Bu da numunenin alt yüzeyinde birikme olmasını engellemiştir. Dönüş esnasında demir tozunun deney izinden ayrılmaması için spatula ile disk sağ ve soldan desteklenmiştir.

Bir yüzey için 16 devir sonrası numune 90° döndürülmüş ve diğer yüzey aşındırılmıştır. Şekil 2.14'te verilen dokuz noktadan ölçülerek kaydedilmiştir. Ağırlık ve hacim kaybı hesaplanmıştır. Hacim kaybı verilen formüldeki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta V = ((V_0 - V_1) / A) * 50 \quad (2.2)$$

ΔV = Böhme yüzey aşınma kaybı değeri

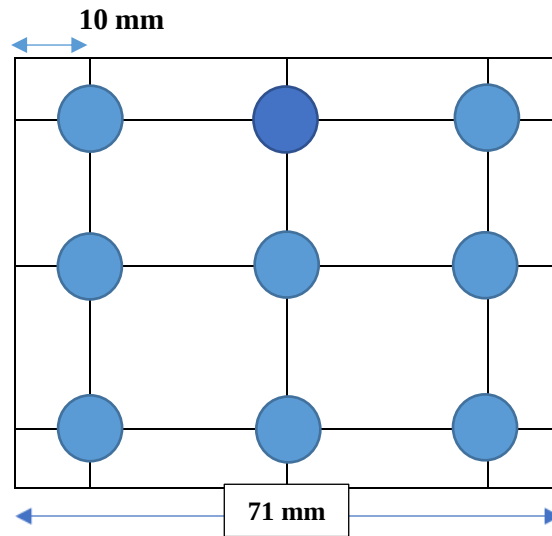
V_0 = Deneyden önceki hacim

V_1 = Deneyden sonraki hacim

A = Aşınma uygulanan yüzey alanı ($\text{cm}^3 / 50 \text{cm}^2$)



Şekil 2.13. Böhme aşınma cihazı



Şekil 2.14. Aşınma deneyi için ölçüm noktaları

Sülfat Direnci Deneyi

Beton ve betonarme gibi yapıların deforme olmasında sülfatın önemli derecede etkisi vardır. Yapılan çalışmada da geopolimer harçlar üzerinde sülfat etkisi incelenmiştir. Bu deney ASTM C 1012'ye uygun olarak yapılmıştır. Her bir oran için 3'er adet 50×50×50 mm'lik küp numuneler dökülmüştür. Bu numuneler 28 gün MgSO₄ (% 5) sulu çözeltisinde bekletilerek fiziksel durumları karşılaştırılmıştır. Sülfat ortamında bekletilen numuneler üzerinde sülfat etkisi sonrasında basınç dayanım deneyi yapılmış ve sülfata maruz bırakılmamış numunelerin basınç dayanımlarına göre değişimleri karşılaştırılmıştır.

Donma-Çözünme Deneyi

Bu deney yapılırken TS 699 ve TS EN 12371'e uygun olarak gerçekleştirilmiş olup aşağıda belirtilen aşamalar uygulanmıştır.

- Dökümü yapılmış olan 5*5*5 cm olan küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımı belirlenen standartlara göre tamamlandıktan sonra bu numuneler 20±2 °C'deki suda 12 saat bekletilip doygun hale getirilmiştir.
- Doygun haldeki 5*5*5 cm olan küp numuneler su içerisinden alınıp 4 saatte -20±2 °C'ye düşecek şekilde ayarlanan dondurucu içerisine bırakılıp 12 saat bekletilmiştir.
- Dondurucudan çıkarılan küp numuneler 20 °C suya tekrar bırakılıp 12 saat beklenilmiştir. Dondurucu içerisinde oluşan buzların çözünmesi sağlanmıştır.
- Yukarıda sıralanan adımlar donma çözünme deneyinin 1 döngüsünü oluşturmuş olup bu döngünün 30 kez tekrarlanması amaçlanmış ancak 7.çevrimde numunelerde çatlamlar görülmüştür.
- Son döngü tamamlandıktan sonra küp numune suda çözünme sırasında numunenin aldığı suyu absorbe etmek amacıyla 105 °C sıcaklığı ayarlanan etüvde kurutulmuştur. Daha sonra basınç dayanım deneyi yapılp donma-çözünme uygulanmayan numunelerin basınç dayanımları ile kıyaslanmıştır.

Donma çözünme sonucu meydana gelen basınç dayanım değişikliği verilen formülle hesaplanmıştır.

$$\Delta\sigma_{deg} = \frac{\sigma_{ilk} - \sigma_{son}}{\sigma_{ilk}} * 100 \quad (2.3)$$

$\Delta\sigma_{deg}$ = Basınç dayanımında meydana gelen azalma

σ_{ilk} = Donma çözünme deneyi uygulanmayan küp numunelerin basınç dayanımı, MPa

σ_{son} = Donma çözünme deneyi uygulanan küp numunelerin basınç dayanımı, MPa

Ultrases Deneyi

Bu deney yönteminde 3'er adet 70×70×70 mm'lik numuneler kullanılmıştır. Bu deney TS EN 12504-4/2004'e göre yapılmıştır. Tahribatsız deney yöntemlerinden biridir. Ölçüm yapılacak yüzeylerin düzgün olmasına dikkat edilmiştir. Deney yapılacak numuneler üzerinde ölçüm noktaları belirlenerek boşlukların dolması için vazelinlenmiştir. Ölçüm direkt okuma tekniği ile yapılmıştır. Okuma sonucunda zaman değerleri elde edilmiş ve numune kalınlığından dalganın geçiş hızı tespit edilmiştir (Şekil 2.15).

Ultrases Geçiş Hızı (mm/μs) = Ultrases dalgasının aldığı mesafe (mm)/ Ultrases dalgasının yol aldığı süre (μs)

Bu formül ile ultrases hızı bulunmuş ve kaydedilmiştir. Bu değer ile Tablo 2.6'dan betonun kalitesi tahmin edilebilmektedir.

Tablo 2.6. Beton kalitesi tahmin tablosu

SES HIZI İLE BETONUN KALİTESİNİN TAHMİN EDİLMESİ	
Beton Kalitesi	Ses Hızı (V) km/s
Çok İyi	> 4,5
İyi	3,5-4,5
Orta	3,0-3,5
Zayıf	2,0-3,0
Çok zayıf	< 2,0



Şekil 2.15. Ultrases geçiş hızı deneyi

Kapilerite Deneyi

Bu deney için her oran için 3'er adet 70×70×70 mm ölçekli küp numuneler üzerine uygulanmıştır. TS EN 3526 standardına uygun olarak yapılmıştır. Numuneler 24 saat etüvde bekletilmiş daha sonra laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. 7 ve 28 günlük numunelere uygulanmıştır. İlk olarak numunelerin 7. ve 28. gündeki ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra numuneler tek bir yüzeyi suya değecek şekilde kaba yerleştirilmiştir. Bunu sağlamak için kenarlarına su geçirmeyen boya kullanılmıştır. Numunelerin 5., 10., 20., 30., 60., 180. ve 360. dakikalarındaki ağırlıkları hassas terazide tartılıp kaydedilmiştir. Verilen bağıntı ile k kılcallık kat sayıları bulunmuştur.

$$q^2 = k \cdot t \quad (2.4)$$

$$q^2 = (Q/A)^2 \quad (2.5)$$

Q: Numunenin emdiği su miktarı (g)

A: Suyu emen yüzeyin alanı (cm²)

q: Birim alandan emilen su miktarı(g/cm²)

k: Kılcallık katsayısı

Birim Ağırlık (Yoğunluk) Deneyi

Bu deney her oran için 3'er 70×70×70 mm ölçekli küp numunelere uygulanmıştır. TS 706 EN 12620 standardına uygun yapılmıştır. Bu deney harç numunelerinin su içerisindeki çözünmeleri ve çiçeklenme benzeri kusurların incelenmesi ve tüm çalışmalarda yapılan standart ve tahribatsız bir deney olduğu için uygulanmıştır. Her bir numunenin 7 ve 28. gün ağılıkları, 24 saat suda bekletilerek suya doymun ağırlıkları ve arşimet terazisinde suya doymun ağırlıkları tartılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki formülde yerine yazılarak yoğunlukları bulunmuştur (Şekil 2.16).

$$P(\text{yoğunluk}) = \frac{W_{\text{KURU}}}{W_{\text{DOYGUN}} - W_{\text{SUDA}}}$$



Şekil 2.16.Birim ağırlık deneyi

SEM Analizi

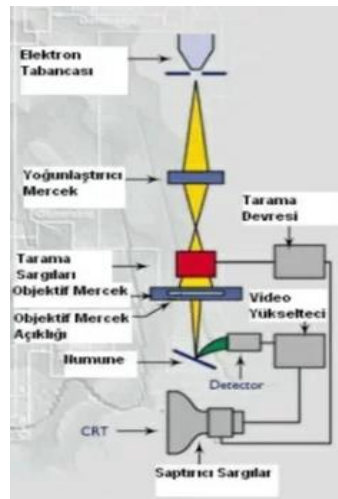
SEM veya taramalı elektron mikroskobu, odaklanan elektron demeti ile numunenin üst yüzünü tarayıp görüntü veren elektronik bir mikroskop tipidir. Elektronlar numune içerisindeki atomlar ile etkileşime girerek numunenin üzerindeki kompozisyon ve topoğrafı hakkında bilgileri olan farklı şekillerde sinyaller oluşturur. Raster tarama ile elektron demeti öncelikle yüzeyi tarar ve daha sonra algılanmış olan sinyallerle demetin konumu eşleştirilip görünüm ortaya çıkarılır. SEM Analizi ile 1 nm'den daha fazla çözünürlüğe varılabilir. Standart SEM analizi araçları maksimum vakumda, iletken ve kuru yüzeyleri araştırmak ve incelemek için yararlıdır. Fakat nemli ortamlarda, düşük vakumda sıcaklık farklarının fazla olduğu ortamlarda kullanılabilen değişik ortamlarda çalışabilen cihazlar da bulunmaktadır.

SEM analizinde görünüm elde etmek için en fazla uyarı gönderilen elektron demeti aracılığıyla numune içerisindeki atomların yaydığı ikincil elektronlardan (SE) yararlanılır.

Numunelerin ayrı bölgesinden koparılan ikincil elektronların miktarındaki farklılık ilk önce yüzeyin demetle buluşma açısına yani farklı bir tabirle yüzeyin kompozisyonuna bağlıdır. İkincil elektronların ya geri saçılan elektronlar (BSE), ışık (elektron demeti) (CL), karakteristik X-ışınları, numune akımı ve aktarılan elektronlarla da numuneden çeşitli sinyaller alınarak istenilen özellikte kompozisyon ve topoğrafi analizleri uygulanır.

Elastik olmayan girişimi sonucunda, enerjisi yüksek olan demet elektronları numune içerisindeki atomların dış yörüngesindeki elektronlar ile düşük enerjili Auger elektronlarını oluşturur. Bu elektronlar bize numune içerisindeki boşluklar ve yüzey hakkında bilgi aktarır ve Auger spektroskopisinin ana yapısını oluşturur. Ayrıca demet elektronlarının enerjisinin azalması ve numunelerin üzerine doğru yönelerek toplanması ikincil elektronları oluşturur. Bu elektronlar sintilatörde toplanır. Sintilatör numune odasında bulunur ve burada ikincil elektron görüntü sinyaline dönüşür. Numune yüzeyinin 10 nanometre ve daha düşük derinliğinden gelen ikincil elektronlar, numunelerin daha yüksek çözünürlükte olmasında ve tomografik görüntünün ortaya çıkmasında faydalıdır [40]. SEM analizinin şematik görüntüsü şekilde verilmiştir (Şekil 2.17).

Numunelerin mikro yapı incelemesinde SEM analizinden yararlanılmıştır. SEM analizleri Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Merkezinde yapılmıştır. SEM'e basınç dayanımları en yüksek çıkan (aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 5, % 10 ve % 15 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı) her orandan numune gönderilmiştir. SEM görüntüleri alınmıştır. Görüntü alınırken netliğe göre görüntü alınıp aynı oranda büyütme tüm numunelere uygulanmıştır. Böylece aynı noktada daha küçük ve daha büyük büyütme ile numune gözlemlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 2.17. SEM şematik görüntüsü

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Priz Süresinin Tayini Sonuçları

Vicat aleti ile yapılan priz başlangıç ve bitiş deneyleri sonucu Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Her bir oran için hazırlanan numunelerde priz başlangıç ve bitiş süreleri (dk)

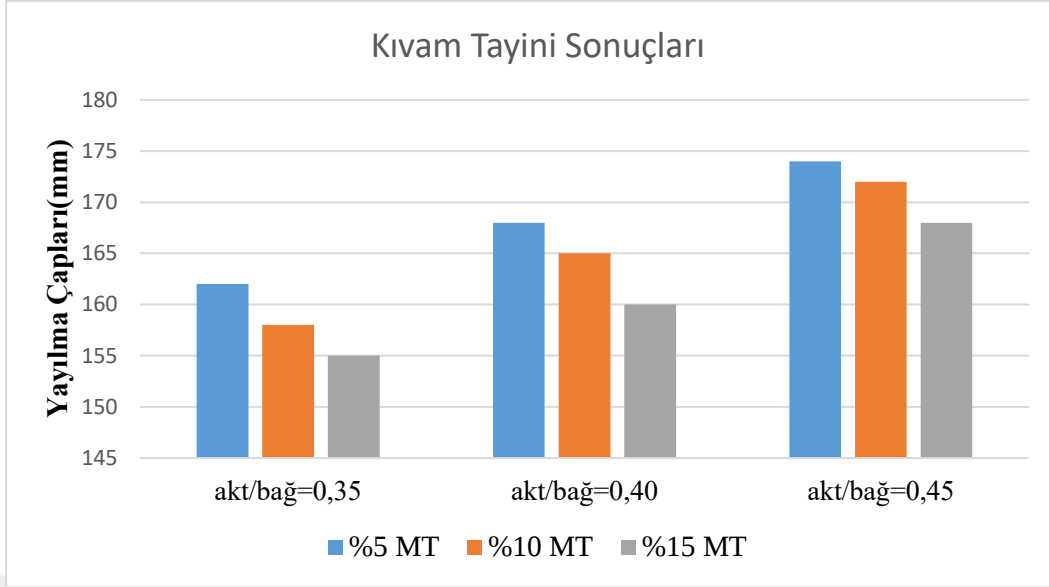
	Priz Başlangıç Süresi(dk.)	Priz Bitiş Süresi(dk.)
Alkali/bağlayıcı =0,35 olan % 5 Mermer Tozu	40-50	130-140
Alkali/bağlayıcı =0,35 olan % 10 Mermer Tozu	30-40	110-120
Alkali/bağlayıcı =0,35 olan % 15 Mermer Tozu	30-40	100-110
Alkali/bağlayıcı =0,40 olan % 5 Mermer Tozu	10-20	60-70
Alkali/bağlayıcı =0,40 olan % 10 Mermer Tozu	10-20	50-60
Alkali/bağlayıcı =0,40 olan % 15 Mermer Tozu	10-20	50-60
Alkali/bağlayıcı =0,45 olan % 5 Mermer Tozu	0-10	10-20
Alkali/bağlayıcı =0,45 olan % 10 Mermer Tozu	0-10	10-20
Alkali/bağlayıcı =0,45 olan % 15 Mermer Tozu	0-10	10-20

Priz başlangıç sürelerinin 0-50 dakika arasında olup oldukça kısa olduğu gözlenmiştir. Beton üretiminde bu istenmeyen bir durum olduğundan dezavantaj olarak yorumlanabilir.

En yüksek priz bitiş süresinin de 135 dakika ile 0,35 oranlı % 5 mermer tozu katkılı numunelerde olduğu gözlenmiştir. Karışımlarda alkali/bağlayıcı değeri arttıkça priz süresinin kısaldığı gözlenmiştir. Karışımlarda alkali/bağlayıcı değerinin artmasıyla priz sürelerinin 10 dakikaya kadar düşmesi karışımların kalıplara yerleştirilmesi ve yüzey işlemlerinin yapılmasında engeller oluşturmuştur. Numunelerin kalıplara yerleştirilme ve yüzey işlemlerinin yapılmasının maksimum 5 dakikada tamamlanmasına dikkat edilmeye çalışılmıştır.

3.2. Kıvam Tayini Sonuçları

Hazırlanan harç numuneleri üzerinde her bir aktivatör/bağlayıcı oranı için yapılan yayılma tablası ölçüm sonuçları Şekil 3.1’de verilmiştir.

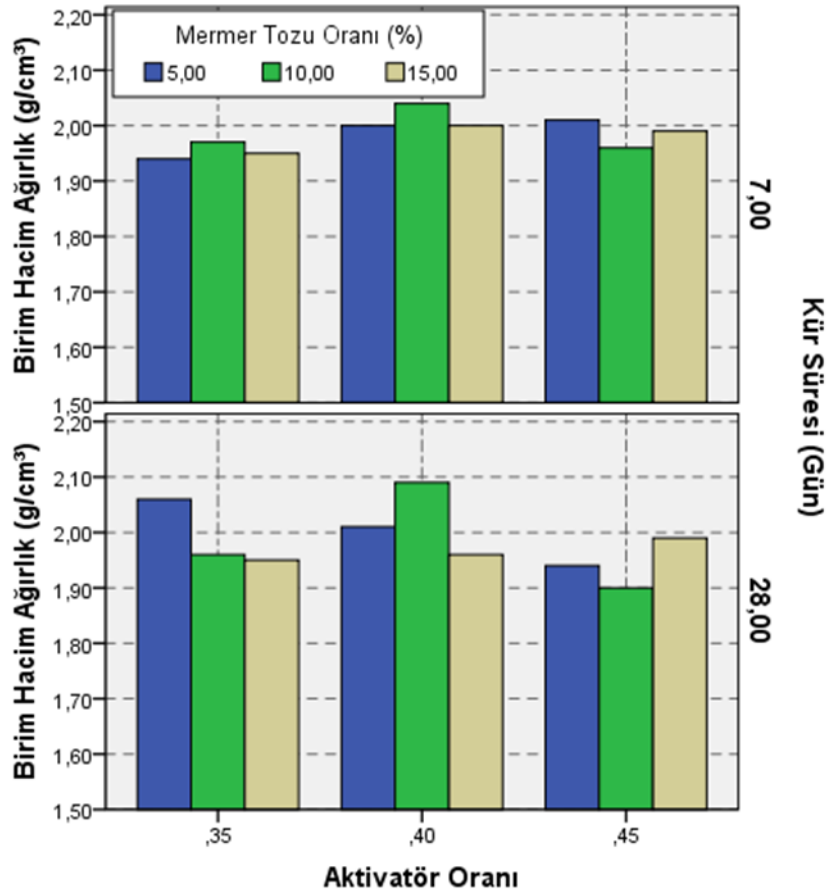


Şekil 3.1. Her bir oran için hazırlanan numunelerin yayılma çapı değerleri (mm)

Yayılma tablası sonuçlarına göre her aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça taze harç numunelerinin yayılma çapları da artmıştır. En yüksek yayılma çapı değerleri aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerde en düşük yayılma çapı değerleri ise aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan harçlarda gerçekleşmiştir. Karışımlarda mermer tozu ikame edilmesi harç numunelerinin yayılma çapı değerlerini azalttığı görülmektedir. Mermer tozunun yüksek oranda su emme kapasitesine sahip olması nedeniyle harç numunelerinde mermer tozu ikamesi arttıkça yayılma çapı değerlerinde azalma meydana geldiği düşünülmektedir. Karışımların kıvamlarının aktivatör içeriğinin artması ile arttığı belirlense de priz sürelerinin de aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerde 10 dakika gibi düşük sürelerde olması tepkimenin hızlı gerçekleştiğini, taze harçlarda elde edilen kıvamın yalnızca belirli sürelerde sağlanabildiği anlaşılmaktadır.

3.3. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Numunelere ait birim hacim ağırlık deney sonuçları 7 ve 28 günlük kür süreleri ardından tespit edilmiş ve Şekil 3.2’de verilmiştir.

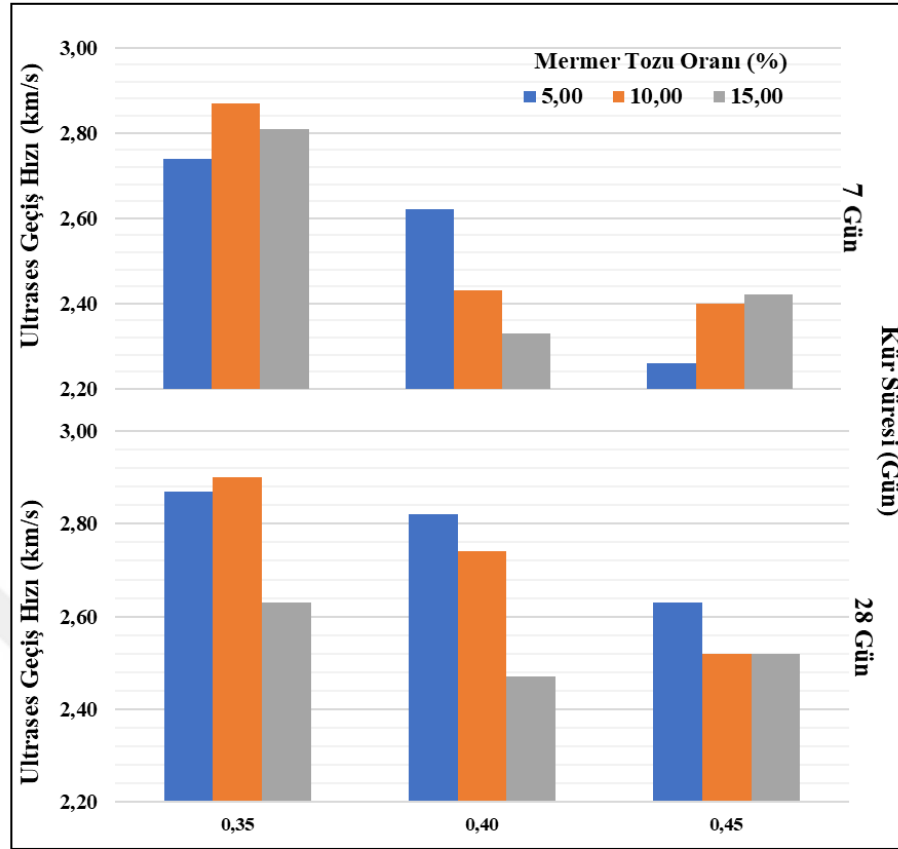


Şekil 3.2.7 ve 28 Günlük numunelerin birim hacim ağırlık deney sonuçları

7 günün ardından yapılan birim hacim ağırlık deney sonuçları incelendiğinde, harç numunelerinin birim hacim ağırlık değerlerinin 1,94 ile 2,04 g/cm³ arasında değiştiği ve en yüksek birim hacim ağırlık değerlerinin 0,40 oranında alkali aktivatörün kullanıldığı serilerde elde edildiği anlaşılmaktadır. 7 günlük 0,35 ve 0,40 oranlı numunelerde mermer tozu ikamesine bağlı olarak numunelerin birim hacim ağırlık değerleri genel olarak artış göstermiştir. Ancak 0,45 oranlı numunelerde mermer tozu artışı ile birim hacim değerlerinde azalma gözlenmektedir. 28 günlük numunelerinde 0,40 aktivatör/bağlayıcı oranında en yüksek birim hacim ağırlık değeri 2,09 g/cm³ değeri ile % 10 atık mermer tozu ihtiva eden numuneden elde edilmiştir. Genel olarak bakıldığında değerler birbirine çok yakın olduğundan numune yoğunluklarının yakın olduğu söylenebilir.

3.4. Ultrases Deney Sonuçları

Üretilen numunelerin 7 ve 28 gün ardından ölçümlenen ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 3.3'te verilmiştir.



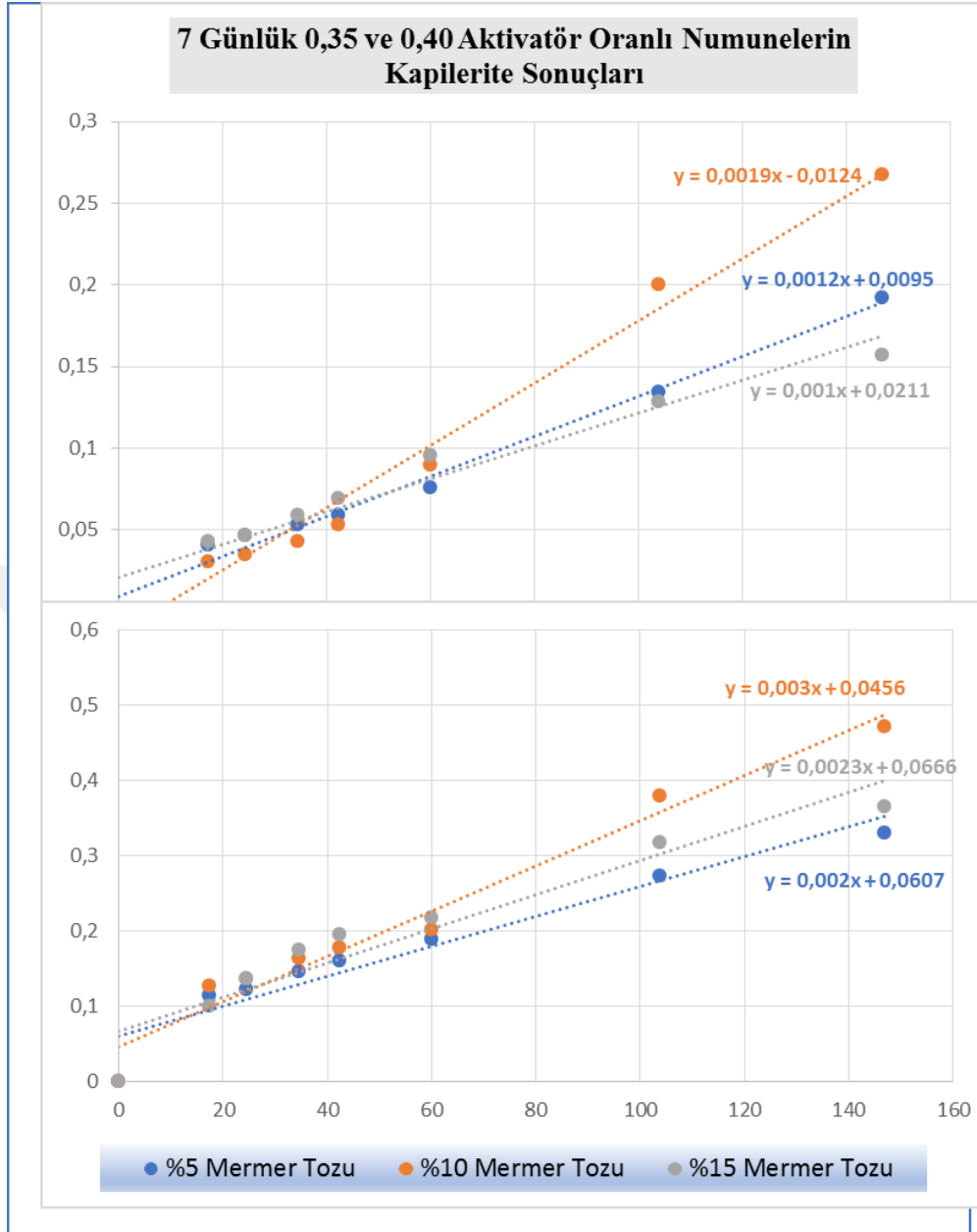
Şekil 3.3. 7 ve 28 Günlük numunelerin ultrases geçiş hızı deney sonuçları

Şekil 3.3 incelendiğinde 7 günlük ve 28 günlük numunelerde aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça ultrases geçiş hızında düşüş gözlenmektedir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda ultrases değerlerinin basınç değerleri ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu durum literatürdeki Mahmut ve Emiroğlu (2016) çalışması ile benzerlik göstermektedir.

En yüksek ultrases değeri aktivatör/ bağlayıcı oranı 0,35 olan % 10 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı 28 günlük numunelerden 2,87 mm/μs olarak bulunmuştur.

3.5. Kapilerite Deney Sonuçları

Üretilen alkali aktivasyonlu cüruf harçlarının kapilerite katsayıları her bir seri için TS EN 3526 standardının öngördüğü biçimde Şekil 3.4'te örnek olarak verildiği üzere belirlenmiştir.



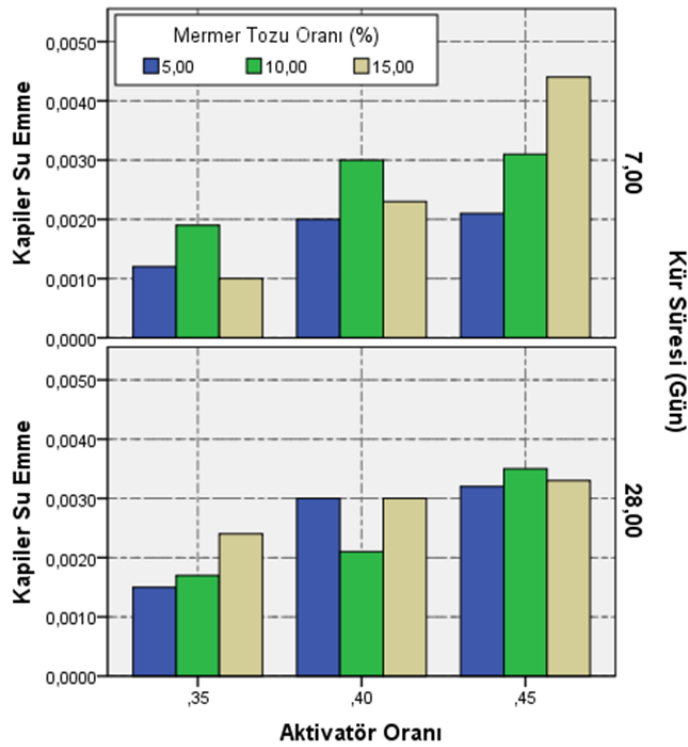
Şekil 3.4. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 ve 0,40 olan numunelerin zamana göre kapiler su emme(mm) katsayıları

Şekil 3.4’de belirtildiği şekilde hesaplanan kapilerite katsayılarına ait tüm sonuçlar Tablo 3.2 ve Şekil 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.2.Her bir oran için kapiler su emme deney sonuçları

Kür Süresi (Gün)	Aktivatör/Bağlayıcı Oranı	Ortalama Kapiler Su Emme Katsayıları ($cm/sn^{1/2}$)		
		Mermer Tozu İkamesi (%)		
		%5	%10	%15
7	0,35	0,0012	0,0019	0,0010
	0,40	0,0020	0,0030	0,0023
	0,45	0,0021	0,0031	0,0044
28	0,35	0,0015	0,0017	0,0024
	0,40	0,0030	0,0021	0,0030
	0,45	0,0032	0,0035	0,0033

Tablo 3.2 incelendiğinde 7 günlük kür süresi sonunda en yüksek kapilarite değerinin aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 ve mermer tozu ikamesinin % 15 olduğu seride elde edildiği, 28 günlük kür süresi sonunda en yüksek kapilarite değerinin aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 ve mermer tozu ikamesinin % 10 olduğu seride elde edildiği gözlemlenmiştir. Aktivatör oranı arttıkça kapiler su emme katsayıları artmıştır.

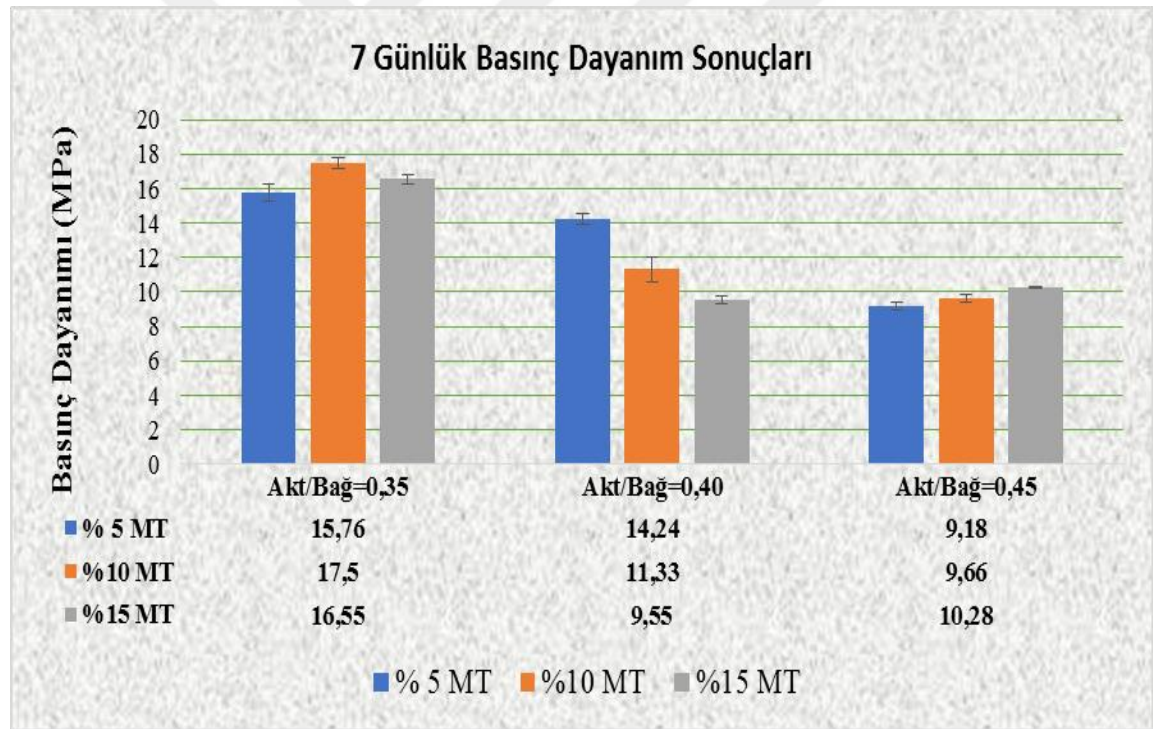


Şekil 3.5.Tüm serilere ait kapiler su emme deney sonuçları

Şekil 3.5 incelendiğinde, alkali aktivatör oranındaki artışa bağlı olarak numunelerin kapilerite katsayıları da artış göstermiştir. Ultrases geçiş hızı ve birim hacim ağırlık deneylerinin tersine harç karışımlarında mermer tozu kullanımı kapiler boşluk miktarını artırmıştır. Bu durum, mermer tozunun beklendiği üzere kalsiyum silikat fazlarının oluşumuna dahil olmadığı yalnızca dolgu etkisi yaparak makro boşlukları doldurduğu şeklinde yorumlanmıştır. Kapilerite deney sonuçları incelendiğinde, numunelerin su emme değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlenmektedir. En yüksek değer aktivatör / bağlayıcı oranı 0,45 olan % 15 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerden elde edilmiştir.

3.6. Basınç Dayanım Sonuçları

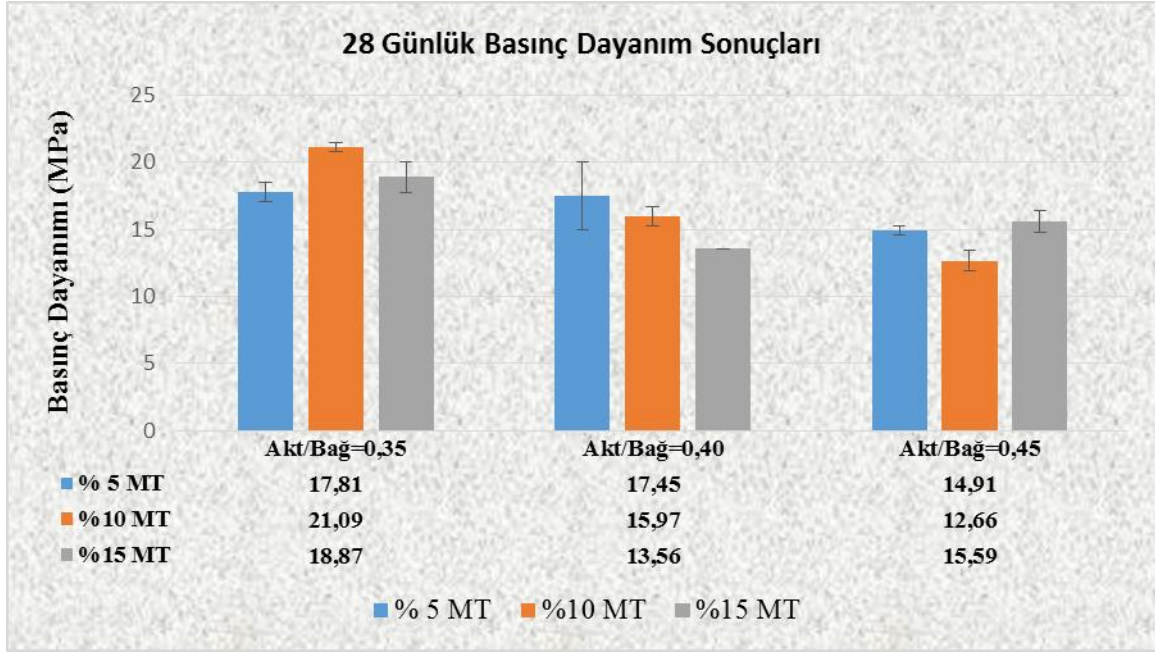
Üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de verildiği gibidir.



Şekil 3.6. 16 mol 90 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiş farklı aktivatör/bağlayıcı oranlarındaki 7 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımı sonuçları

Şekil 3.6’ya bakıldığında 7 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanım değerleri aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan numunelerden elde edilmiştir. Genel olarak aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir.

7 günlük numuneler incelendiğinde özellikle 0,35 ve 0,45 oranına sahip numunelerde mermer tozunun artması ile basınçta artma gözlenmiştir. Ancak 0,40 oranında tam tersi azalma gözlenmiştir.



Şekil 3.7. 16 mol 90 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiş farklı aktivatör/bağlayıcı oranlarındaki 28 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımı sonuçları

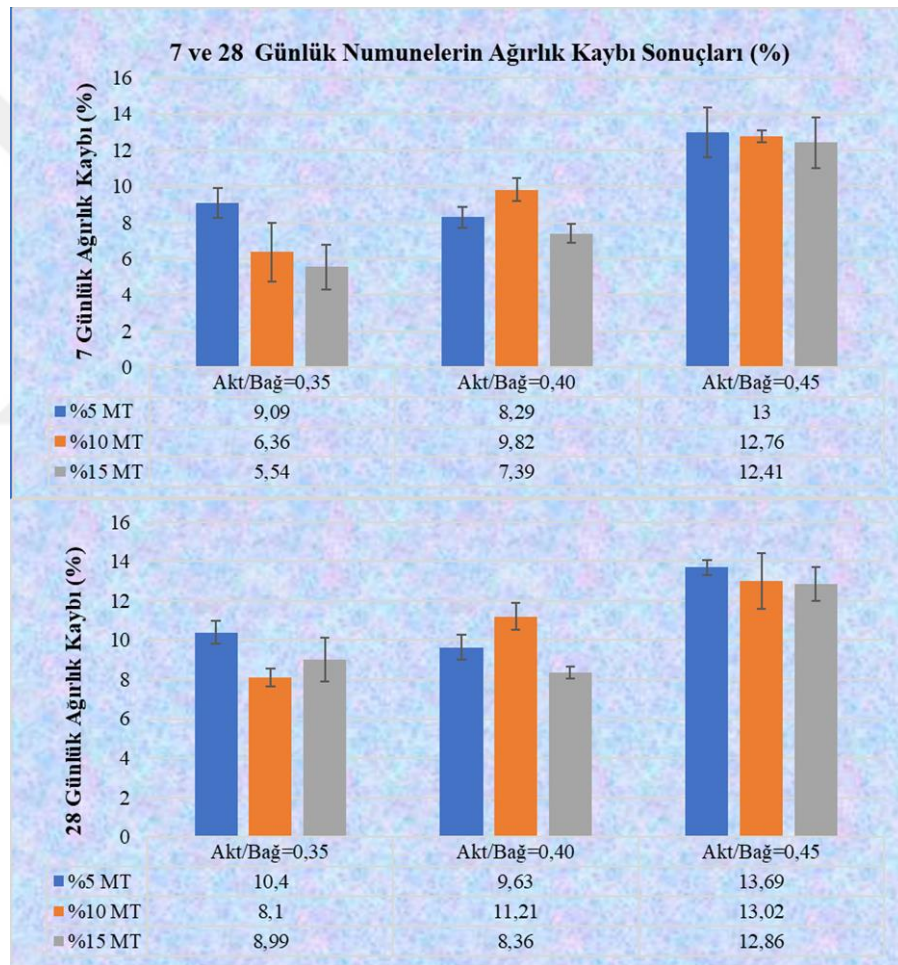
Her bir oran için 3'er seriler halinde dökülen 50*50*50 mm'lik ve etüvde 90 °C'de kürlenmiş numunelerden elde edilen deney sonuçlarına bakıldığında en yüksek basınç dayanımı 28 günlük numunelerde aktivatör / bağlayıcı oranı 0,35 olan % 10 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerden 21,09 MPa olarak elde edilmiştir. Aktivatör/bağlayıcı oranlarına bakacak olursak 0,35 oranlı numunelerde mermer tozunun % 10 oranında kullanılmasının uygun olduğu, bu orandan sonra dayanımını düşürdüğü gözlenmiştir. Aktivatör / bağlayıcı oranının 0,40 olduğu durumu incelersek mermer tozu artışının dayanımı düşürdüğü sonucu elde edilmiştir. Aktivatör / bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerde mermer tozu kullanımı genel olarak artışa sebep olmuştur. Mermer tozunun 0,35 ve 0,45 oranlı numunelerde dolgu etkisi nedeni ile dayanıma katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Kullanılan aktivatör oranının değişmesinin dayanıma etkilerinin farklı olduğunu söyleyebiliriz. Aktivatör/ bağlayıcı oranının artmasıyla basınç dayanımlarında genel bir düşme söz konusudur.

7 ve 28 günlük numuneler kıyaslandığında basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. Ancak yüksek seviyede bir artış olmaması bize alkali aktivasyonlu harçların hızlı dayanım kazandığını göstermektedir.

Maraş (2013), yaptığı çalışmada cüruf çimento inceliğinde öğütülüp, alkali ile aktive edildikten sonra, bağlayıcı özelliğe sahip bir geopolimer malzeme oluşturulmasını amaçlamış ve çalışmada geopolimer harç numunelerinin aktivatör/bağlayıcı oranının arttıkça basınç dayanımında düşme gözlemlendiğini belirtmiştir. Yapılan çalışma literatürle benzerlik göstermektedir.

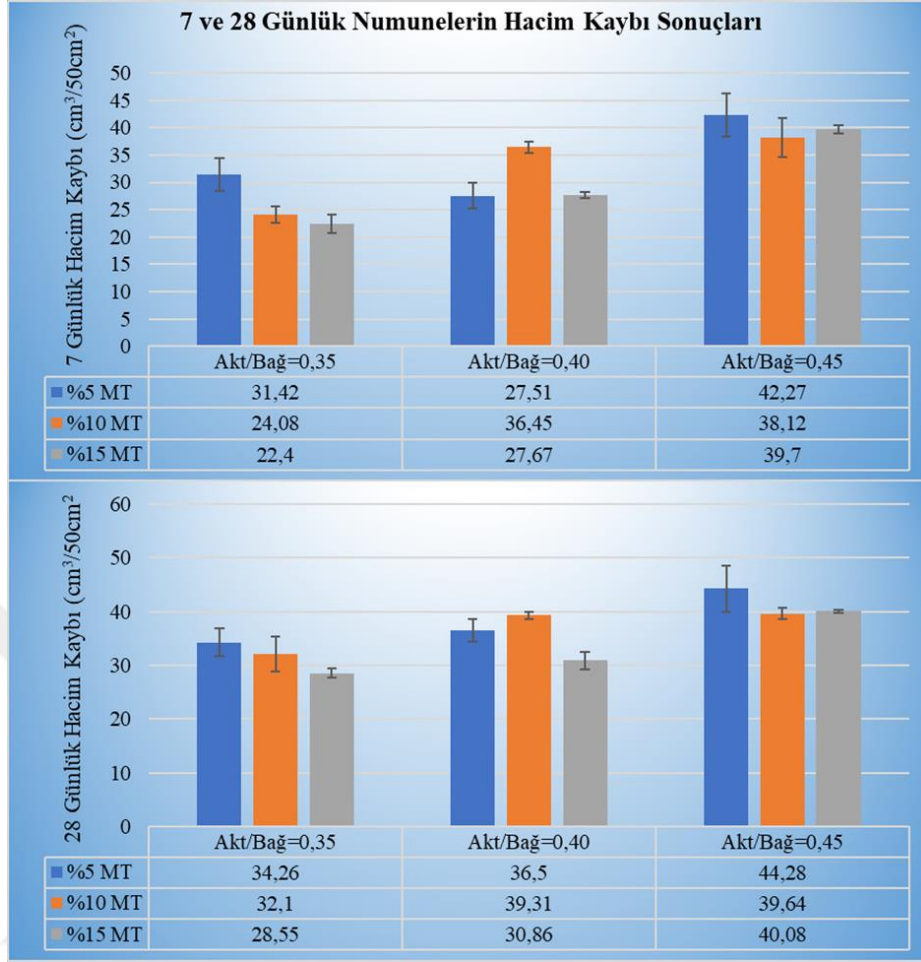
3.7. Aşınma Deneyi Sonuçları

Üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük ağırlık ve hacim kaybı değerleri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmektedir.



Şekil 3.8. 16 mol 90°C sıcaklıkta 24 saat bekletilen 7*7*7 cm'lik küp numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama ağırlık kayıpları

Şekil 3.8'de verilen 7 günlük numunelerin ağırlık kaybı değerlerine bakıldığında aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça aşınma kaybının arttığı gözlenmiştir.



Şekil 3.9. 16 mol 90°C sıcaklıkta 24 saat bekletilen 7*7*7 cm'lik küp numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama hacim kaybı sonuçları

Şekil 3.9'da verilen 28 günlük numunelerde, 7 günlük numunelerde olduğu gibi aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça aşınma kaybı artmış, aşınmaya karşı direnç azalmıştır.

Her bir oran için 3'er seriler halinde dökülen 70*70*70 mm'lik numuneler etüvde 90°C'de kürlendikten sonra 7 günlük ve 28 günlük aşınma dirençleri incelenmiştir. En yüksek ağırlık kaybı aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 olan % 5 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerden % 13,69 olarak bulunmuştur.

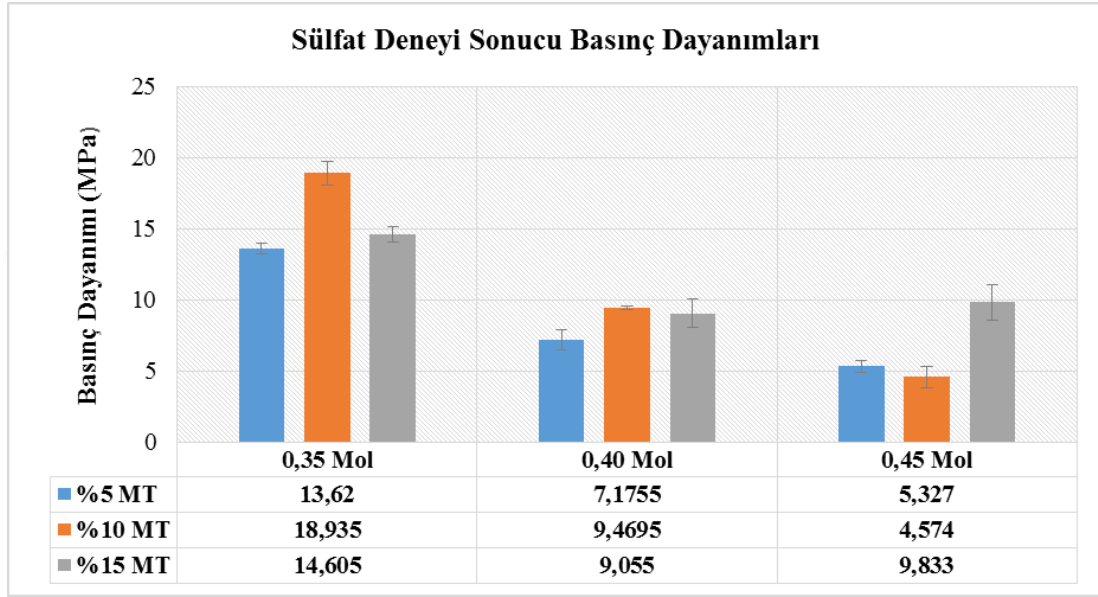
Aynı zamanda hacim kaybı da aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 olan % 5 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerden 44,28 cm³/50 cm² olarak bulunmuştur. Aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça hem ağırlık kaybının hem de hacim kaybının arttığı görülmüş, mermer tozu oranı arttıkça ise hem ağırlık kaybında hem de hacim kaybında genel bir düşüş gözlenmiştir. Yani cüruf miktarı azaldıkça ağırlık ve hacim kaybı düşmüş, aşınma direnci arttığı gözlenmiştir.

Balçıklı, Özbay ve Türker (2015), yaptığı çalışmada yüksek fırın cürufu ile aşınma deneyini uygulamış ve yüksek fırın cürufunun artmasıyla aşınma direncinin azaldığını

gözlemlenmiştir. Yapılan deneyde de Elazığ Ferrookrom cürufunun artmasıyla aşınma direncinin azaldığı gözlenmiştir.

3.8. Sülfat Direnci Deneyi

Sülfata maruz bırakılan 28 günlük numunelerin basınç dayanımı sonuçları Şekil 3.10'da verildiği gibidir.

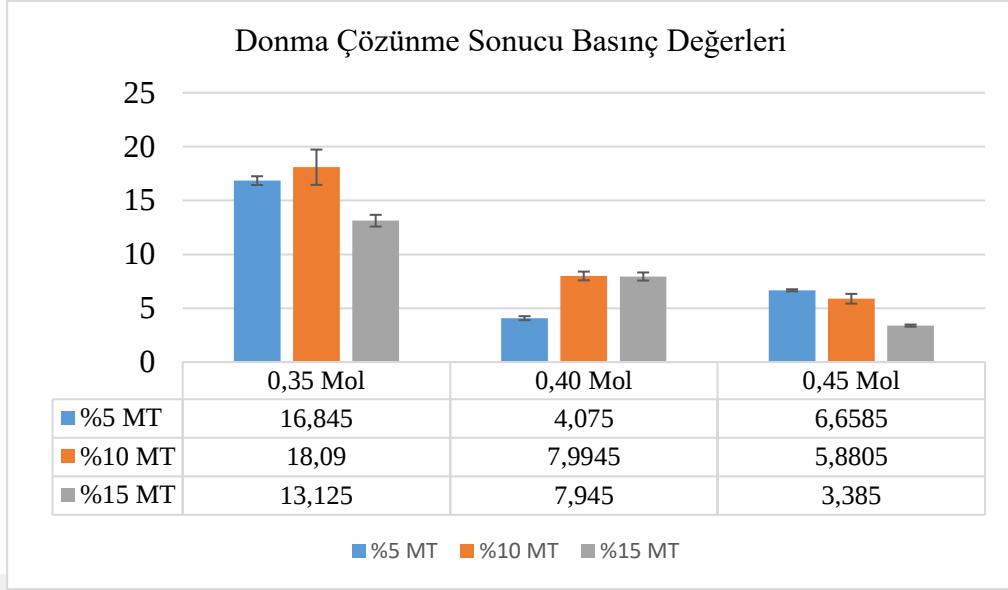


Şekil 3.10. Sülfata bırakılan numunelerdeki ortalama basınç değerleri

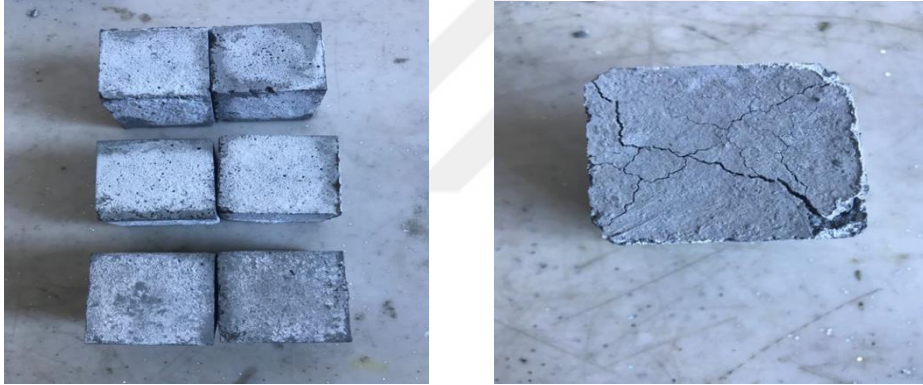
Sülfata maruz kalan numunelerden 0,40 ve 0,45 oranlarında hafif çatlaklıklar gözlenmiştir. Şekil 3.10'a bakıldığında sülfata maruz kalmayan numunelerde olduğu gibi aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan numunelerin daha dayanıklı olduğu gözlenmiş ve diğerlerine göre dayanımlarında düşük miktarda azalma gözlenmiştir. Aktivatör içeriği arttıkça numunelerin kıvamları artmaktadır. Ancak numuneler bu kıvamlarını uzun süre koruyamamaktadır. Özellikle 0.45 aktivatör oranında 10 dakika gibi kısa bir sürede (numunelerin kalıba yerleştirme, yüzey düzeltme vb. işlemleri tamamlanmamışken) priz alması nedeniyle kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

3.9. Donma-Çözünme Deneyi

Donma-çözünme deneyi uygulanan 28 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri ve fiziksel görünüşleri Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de verilmektedir.



Şekil 3.11. Donma-çözünme deneyi sonrası ortalama basınç değerleri



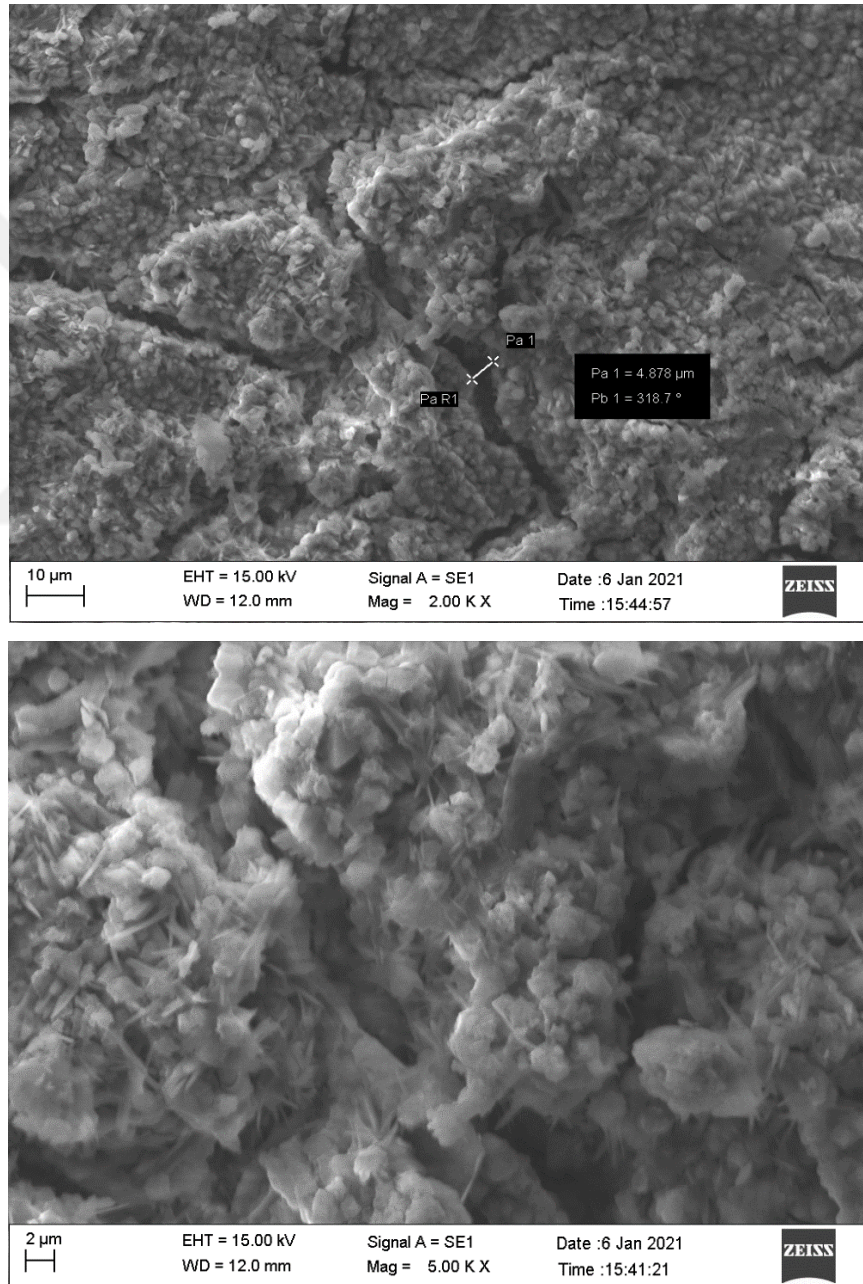
Şekil 3.12. Donma-çözünme sonrası fiziksel değişim

Şekil 3.11’de verilen donma-çözünme sonuçlarına bakıldığında aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 oranlı numunelerin fiziksel görüntüsünün normal olduğu ancak 0,40 ve 0,45 oranlılarda çatlama gözlenmiştir. Donma-çözünmeye 7. çevrim sonucu dayanıklılığı en yüksek olan numunenin aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 10 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numune olduğu bulunmuştur. Sülfat deneyinde olduğu gibi donma-çözünme deneyinde de aktivatör içeriği arttıkça numunelerin kıvamları artmaktadır. Ancak numuneler bu kıvamlarını uzun süre koruyamamaktadır. Özellikle 0.45 aktivatör oranında 10 dakika gibi kısa bir sürede (numunelerin kalıba yerleştirme, yüzey düzeltme vb. işlemleri tamamlanmamışken) priz alması nedeniyle kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

3.10. Sem Analizi Görüntüleri

Alkali aktivatörler hazırlanmış betonlar içerisinde aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 5, % 10 ve % 15 oranında atık mermer tozu ilave edilerek hazırlanmış numunelerden alınan SEM görüntüleri ve analizleri Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir.

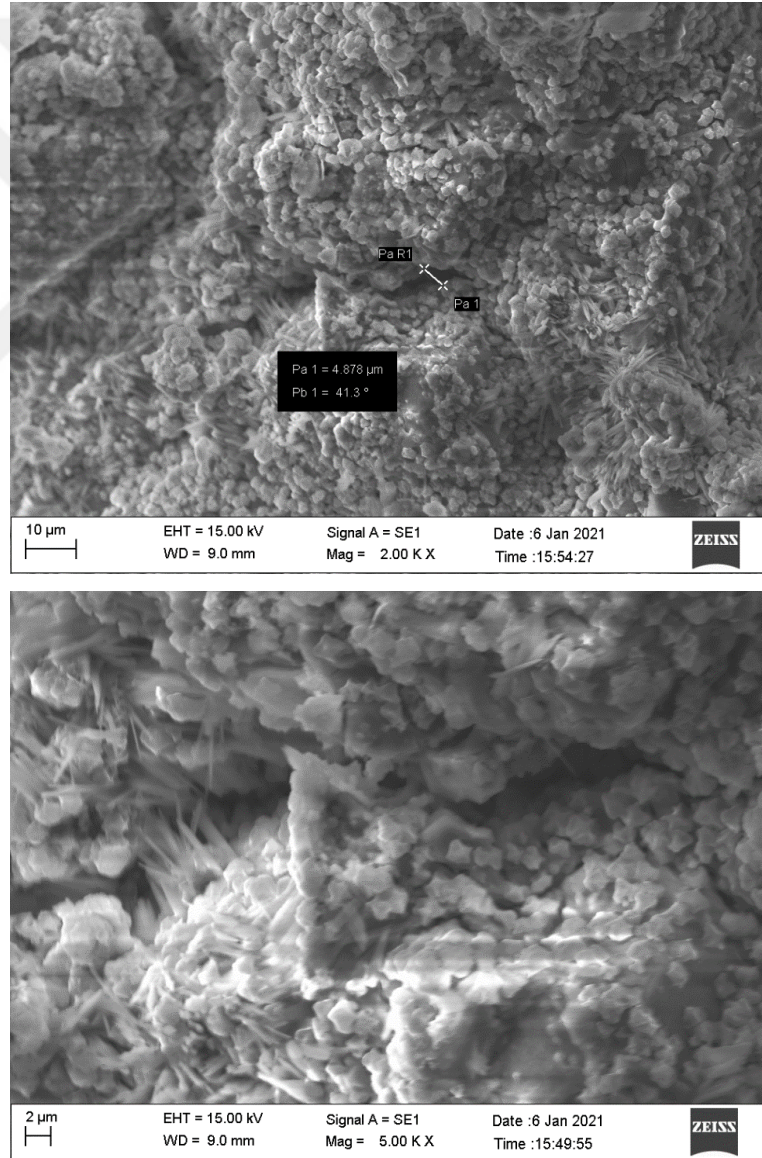
Numunelerde çatlak oluşumu da gözlenmektedir ancak SEM görüntüsü alınan numuneler basınç dayanımı deneyi sonucunda kırılan parçalardan elde edildiğinden bu çatlakların kırılma işlemi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 3.13. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 5 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerin SEM görüntüleri

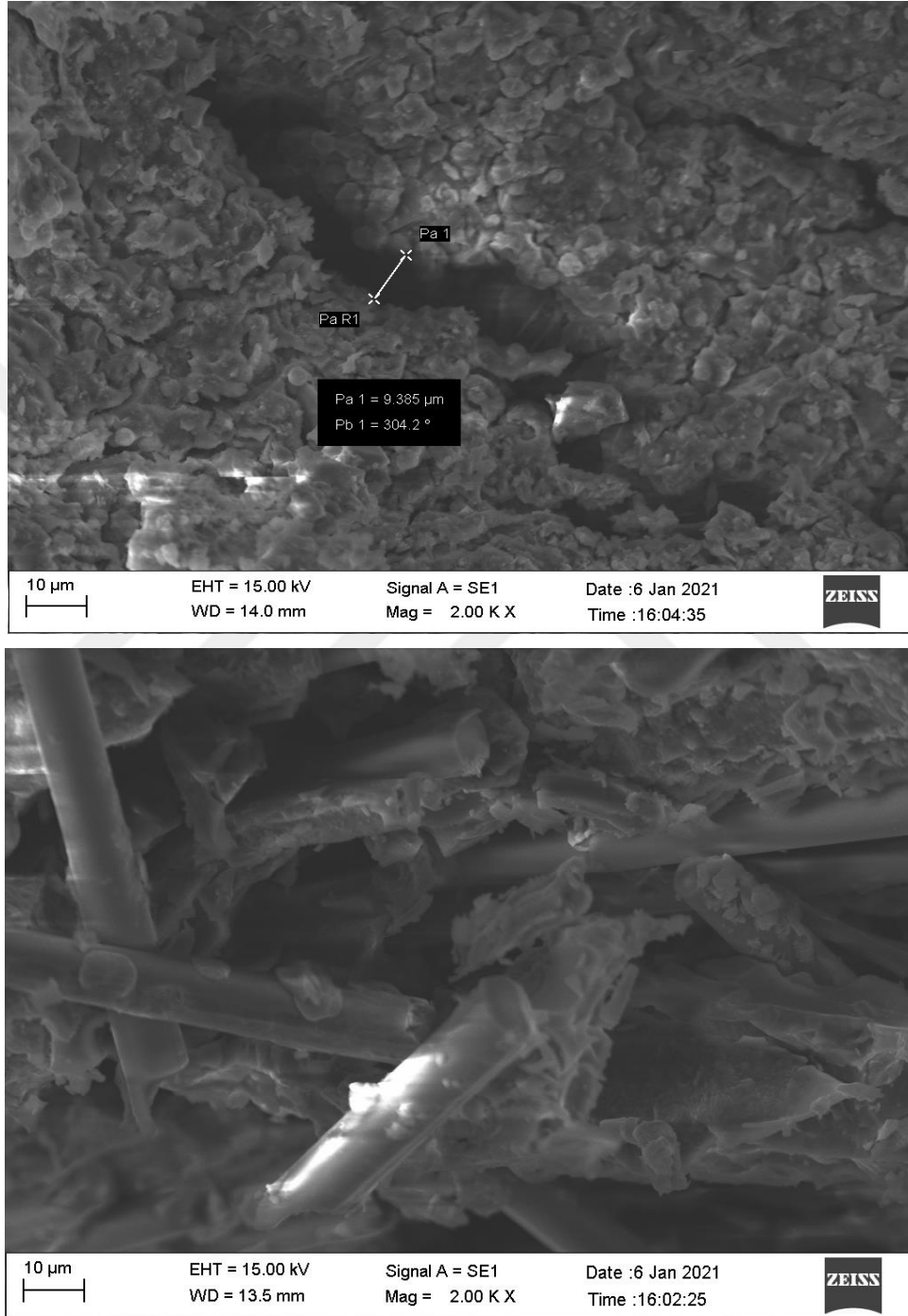
Şekil 3.13 incelendiğinde, 0,35 aktivatör/bağlayıcı oranında sahip % 5 mermer tozu içeren numunelerin yer yer iğnemsisi (hidrate ürünler) ve yoğun bir yapıda olduğu, numune üzerinde yer alan çatlakların 4.8 mikron mertebesine ulaştığı anlaşılmaktadır.

Şekil 3.13'te görülen iğnemsisi yapıların Elazığ ferrokrom cürufu ile kullanılan alkali aktivatörler arasında meydana gelen tepkime ürünleri olduğu anlaşılmaktadır. % 5 oranında mermer tozu ikameli karışımlarda oluşan hidrate ürünlerin daha yoğun yapıda oluşu birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve sülfat testleri ile donma-çözülme testlerindeki sonuçlarla uyum içerisindedir. 28 günlük numunelerde gözlenen iğnemsisi ve yoğun bu hidrate ürünlerin boşlukları lifsi şekilde doldurmaya başladığı anlaşılmaktadır. İğnemsisi şekilde oluşan hidrate ürünlerinin boylarının yaklaşık 2-3 mikron olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.14. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 10 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerin SEM görüntüleri

Mermer tozu ikamesinin % 10 olduğu 0,35 aktivatör/bağlayıcı oranına sahip harç numunelerinin SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 3.14) % 5 mermer tozu ikamesine oranla iğnemi hidrate ürünlerin daha az miktarda oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.15. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 15 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı numunelerin SEM görüntüleri

Şekil 3.15'teki 0,35 aktivatör/bağlayıcı oranına sahip % 15 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi içeren numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde cam liflerinin yüzeylerinde hidrate ürünlerinin daha da az bulunduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında Şekil 3.15'te açıkça görüldüğü üzere cam liflerinin karışım içerisindeki dispersiyonunun düşük mertebede kaldığı söylenebilir.

Cam lifleri çok küçük bir bölgede birikmiştir. Ayrıca alkali aktivasyonlu cüruf harçları ile cam lifleri arasında zayıf bir aderans olduğu söylenebilir. Cam lifi-harç ara yüzeylerinde boşlukların olmasının fiziksel ve mekanik özellikleri olumsuz etkileyeceğinden cam liflerinin daha iyi bir şekilde dağılmasının sağlanması gerektiği düşünülmektedir.



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Elazığ ferrokrom cürufu, atık mermer tozu ve cam lifi kullanımı ile alkali aktivasyonlu harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Alkali aktivasyonlu harç üretiminde alkali / bağlayıcı oranı 0.35, 0.40 ve 0.45, aktivasyon sıcaklığı ise 90°C olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Elâzığ Ferrokrom cürufu ile mermer tozunun birlikte kullanımı değerlendirildiğinde mermer tozunun artışı belli bir noktaya kadar dayanım açısından olumlu sonuçlar vermiş olup en yüksek basınç dayanımı aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan 16 mol karışımda % 10 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkılı, 28 günlük numunelerden 21,09 MPa olarak elde edilmiştir.
- Alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksitin (NaOH) birlikte kullanımı bağlayıcılık açısından harç karışımında olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.
- Priz başlangıç sürelerinin oldukça kısa olduğu gözlemlenmiştir. Beton üretiminde harç numunelerinin kısa sürede katılaşması ve şekil verilemez hale gelmesi istenmediği için priz başlangıç sürelerinin kısa olması dezavantaj olabilir.
- Kıvam tayini sonuçlarına göre aktivatör miktarı arttıkça kıvam artmıştır. Priz süresine bakıldığında ise bu sürenin kısılmasına bağlı olarak alkali aktivasyonlu harçlarda kıvamın sadece belirli sürelerde sağlandığını göstermektedir.
- Ultrases değerleri incelendiğinde genel bir değerlendirme yapılacak olursa ultrases geçiş hızı değerleri numunelerin boşluk oranları hakkında fikir verdiğinden aktivatör oranının artmasıyla numunelerin boşluk oranlarının arttığı söylenebilir. Tüm oranlarda ultrases geçiş hızı 3 km/s altında seyrettiğinden istenilen sonuçlar alınamamıştır. Ultrases geçiş hızının zayıf olduğu görülmüştür.
- Aşınmaya karşı en yüksek direnç gösteren numunelerde aşınma kayıpları % 7 civarında gerçekleşmiştir. En fazla aşınma kaybı ise % 5 mermer tozu katkılı 0,45 oranlı 28 günlük numunede % 13,69 olarak hesaplanmıştır.
- Aşınma sonuçlarına göre hacim kaybına bakıldığında en az aşınma gösteren numune 0,35 oranlı % 15 mermer tozu ikameli numune olup $22,4\text{cm}^3/50\text{ cm}^2$ olarak hesaplanmış en fazla hacim kaybına uğrayan numune ise 0,45 oranlı % 5 mermer tozu ilaveli numunede $44,28\text{cm}^3/50\text{ cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Genel olarak mermer tozu oranı arttıkça hem ağırlık kaybında hem de hacim kaybında genel bir düşüş gözlenmiştir. Yani cüruf miktarı azaldıkça ağırlık ve hacim kaybı düşmüş, aşınma direnci arttığı gözlenmiştir.

- Donma-çözünme sonuçlarına bakıldığında aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 oranlı numunelerin fiziksel görüntüsünün normal olduğu ancak 0,40 ve 0,45 oranlılarda çatlama gözlemlenmiştir. Donma-çözünmeye 7.çevrim sonucu dayanıklılığı en yüksek olan numunenin aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olan % 10 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkı numune olduğu bulunmuştur. 0,35 oranlı numunelerde % 10'dan fazla mermer tozu kullanımının donma-çözünmeye karşı direnci olumsuz etkilediği gözlenmiştir.
- Sülfat deneyi sonuçlarına bakıldığında sülfata dayanıklı numunelerin aktivatör / bağlayıcı oranı 0,35 olan % 10 mermer tozu ve % 0,5 cam lifi katkı numuneler olduğu bulunmuştur. En yüksek dayanım bu oranda 18,94 Mpa olarak bulunmuştur. 0,40 ve 0,45 oranlı numunelerde sülfat içinde numunelerde çatlamlar gözlemlenmiştir.
- Kapilerite sonuçlarına bakıldığında genel olarak mermer tozu artışına bağlı olarak su emmede genel artış gözlenmiştir.
- Çimento kullanılmaksızın, Elazığ ferrokrom cürufu ile 20 MPa üzerinde alkali aktivasyonlu karışımlar elde edildiği gözlenmiştir.

Bu sonuçlara göre alkali aktivasyonlu harçlarda mermer tozunun her aktivatör oranına göre belli bir orana kadar kullanılması gerektiği, aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça numunelerin daha dayanıksız olduğu tespit edilmiştir. Alkali aktivasyonlu harçların prizini hızlı aldığı gözlenmiştir. Bunun önüne geçilmesi amacıyla karışımların priz sürelerinin kontrol edilmesini sağlayacak bazı katkı malzemelerinin kullanımı önerilebilir. Bu konuda yeni çalışmaların yapılması uygun olacaktır.

Farklı sıcaklıklar, farklı kür koşulları ve silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi farklı malzemeler kullanılarak veya aktivatör cinsleri değiştirilerek çalışmanın geliştirilmesi mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] Shi, C., Jimenez, A.F., Palomo, A., 2011, New Cements For The 21st Century: The pursuit of an alternative to portland cement, Cement And Concrete Research, Vol. 41, Issue 7, 750 – 763.
- [2] Abdalqader, A.F., Jin, F., Al-Tabbaa, A., 2016, Development of greener alkali-activated cement: utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures, Journal of Cleaner Production, Vol.113, 66–75.
- [3] Kim, H.K., Jeon, J.H., Lee, H.K., 2012, Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air, Construction And Building Materials, Vol.29, 193 – 200.
- [4] ACI Committee 116, 116R-90, “Cement and Concrete Terminology,” ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1994, pp.116R-1 to 116R-68.
- [5] Erdoğan, T. Y.Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 2004.
- [6] T. Erdoğan ve Y. Erdoğan, Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [7] Ramachandran, V. S, Concrete Admixtures Handbook, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey, U.S.A. 1995.
- [8] Bilim C, Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 2006s, 2006.
- [9] Kamile Tosun, Yapı Malzemeleri Ders Notları.
- [10] Puzolan, Mineral Katkılar, Eskişehir Üniversitesi, (2019).
- [11] Yılmaz, A. Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cüruflarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, (2002).
- [12] Yazıcıoğlu S. Gönen T.ve Çobanoğlu Ö. C. Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betonun Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der. 17 (4), 681-685, (2005).
- [13] Yadollahi M.M., Varolgüneş S., İşsever F., Tr. Doğa ve Fen Der. 6(2), (2007).
- [14] Çelik, M. Y. Mermer Atıklarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, (1996).
- [15] Yavuz, Mermer Ocaklarında Üretim Verimliliğini Etkileyen Jeolojik Parametreler ve Bunların Tespitinin Üretim Verimliliği Üzerindeki Etkileri, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- [16] Çelik, Yavuz; Mermer Artıklarının (Parça-Tozlarının) Değerlendirilmesi Akü. FBE Yüksek Lisans Tezi 1996.
- [17] Arslan M. A. ve Aktaş M., “İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi”, Politeknik Dergisi, 21(2): 299-320, (2018).
- [18] Yaprak, Şimşek, Öneş; Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt: 7 Sayı: 4 s. 353-358, 2004.

- [19] Yazıcıoğlu S. Gönen T.ve Çobanoğlu Ö. C. Elazığ Ferrookrom Cürufunun Betonun Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der. 17 (4), 681-685, (2005).
- [20] Mahmut, Emiroğlu; Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi, 28(1),23-34, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce/Türkiye, (2016).
- [21] Erdoğan, Orta Doğu Teknik Üniv. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Öğütölmüş Ferrookrom Cürufu Kullanılarak Jeopolimer Üretimi , (2011).
- [22] Maraş ve Murat, Elazığ Ferrookrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, (2013).
- [23] Kantarcı, Elazığ Ferrookrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması, İnönü Üniversitesi, (2013).
- [24] Vapur H, Top S, Teymen A, Türkmenoğlu M, Elazığ Ferrookrom Tesisi Cüruflarının Agrega Özelliklerinin Araştırılması, Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Faköltei Dergisi, Haziran, 28(1) (2013) 77-88.
- [25] Bingöl, Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, (2014).
- [26] Balçıklanlı, Alkalilerle aktive edilmiş çimentosuz cürufu betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri ve üretim optimizasyonu, yüksek lisans tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Ocak-2016.
- [27] Balçıklanlı, Özbay ve Türkay; Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 4, Sayı 2, (2015),87-98, Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Çekip Çıkarma ve Aşınma Dirençlerinin Belirlenmesi.
- [28] Dumangöz, Mermer Tozu ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik ve Kalıcılık Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Şeyh Edebalı Üniv. Bilecik, (2014).
- [29] Çakır, Ö. Yüksek Fırın Cürufunun Betonun ve Betonarmenin Kalıcılığına (durabilitesine) Etkisi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2006).
- [30] Canbaz, M. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçların Özellikleri, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2009).
- [31] Aydın, S., Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcı Lifli Kompozit Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2010).
- [32] Chindaprasart, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., & Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. Journal of Materials Science: Full Set - Includes 'Journal of Materials Science Letters', 47(12), 4876.
- [33] Adesina, A. (2020). Performance of fibre reinforced alkali-activated composites – A review. Materialia, 12.
- [34] Mahmut, O. (2015), “Geopolimer Harç Üretiminde Elazığ Ferrookrom Cürufu Kullanımının İncelenmesi”, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [35] F. Pacheco-Torgal, Z. Abdollahnejad, A.F. Camões, M. Jamshidi, Y. Ding, “Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue?”, Construction and Building Materials 30 (2012) 400–405.

- [36] Umwelt Bundes Amt, “Geman Notes on BAT for the Production of Large Volüme Solid Inorganic Chemicals Sodium Silicate”, Federal Environmental Agency, Alfred-Herrhausen, 1-21 (2001).
- [37] Çetin Kurt, Jürgen Bittner (2005). "Sodium Hydroxide", Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Weinheim: Wiley-VCH.
- [38] Felekoğlu ve Türkel, Yükleme Hızının Beton Basınç Dayanımına ve Elastisite Modülüne Etkisi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt:6, Sayı:1, 65-75, Ocak, (2004).
- [39] Özkan Şengül, Canan Taşdemir, Şevket Koruç ve Ziya Yüceer, Agregat Türünün Farklı Beton Sınıflarının Aşınma Dayanımına Etkisi, İMO.
- [40] Daytam, Atatürk Üniversitesi, Taramalı Elektron Mikroskobu, SEM Analizi.



ÖZGEÇMİŞ

[Redacted]

KİŞİSEL BİLGİLER

ARAŞTIRMACI BİLGİLERİ

[Redacted]

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : Elazığ Ferrookrom Cürufu ile Alkali Aktive Edilmiş Cam Lifi ve Atık Mermer Tozu Katkılı Harçların Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi

Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı,
2021

Danışman:Prof.Dr.Servet YILDIZ

Lisans : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2018

Lise : Necip Fazıl Kısakürek Anadolu Lisesi, Elazığ, 2012

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

✓ Basınç Deney Cihazı, Böhne Aşınma Cihazı, Eğilme Dayanım Cihazı, Pundit Ultrases Cihazı