



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALÇI – KİREÇ – PUZOLAN ESASLI HARÇLARDA BAZI ATIK
KİREÇ KAYNAKLARININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

GAMZE KOYUTÜRK

DANIŞMAN

DOÇ. DR. MUHAMMED YASİN DURGUN

BARTIN-2022



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALÇI – KİREÇ – PUZOLAN ESASLI HARÇLARDA BAZI ATIK KİREÇ
KAYNAKLARININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gamze KOYUTÜRK

BARTIN-2022

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Muhammed Yasin DURGUN danışmanlığında hazırlamış olduğum “ALÇI – KİREÇ – PUZOLAN ESASLI HARÇLARDA BAZI ATIK KİREÇ KAYNAKLARININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

12.12.2022

Gamze KOYUTÜRK

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olan pek kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Muhammed Yasin DURGUN'a, lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince değerli bilgilerini benimle paylaşmaktan kaçınmayan Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi öğretim üyelerine, hayatım boyunca maddi ve manevi sonsuz desteklerini ensemde hissettiğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışma Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2021-FEN-CY-001).

.

.

Gamze KOYUTÜRK

Babam Yavuz Koyutürk'e ithafen...

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÇI – KİREÇ – PUZOLAN ESASLI HARÇLARDA BAZI KİREÇ ATIK KAYNAKLARININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Gamze KOYUTÜRK

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muhammed Yasin DURGUN

Bartın-2022, sayfa: 90

Son yıllarda yapı malzemeleri üretiminde çok çeşitli mineral katkıları kullanılmaktadır. Doğal ya da yapay olabilen bu mineral katkıların büyük çoğunluğu endüstriyel yan ürünlerden oluşmaktadır (uçucu küller, silis dumanları, yüksek fırın cürüfları vb.). Bu katkıların kullanım sebepleri arasında teknolojik katkıların yanı sıra ekonomik ve ekolojik nedenler de yer almaktadır. Bilindiği üzere puzolanik özelliğe sahip mineral katkıları ile kireç arasında puzolanik reaksiyonlar adı verilen bazı reaksiyonlar meydana gelmekte ve oluşan bu reaksiyonların sonucu olarak çimento ile su arasında meydana gelen hidrasyon reaksiyonlarının ürünlerine benzer oluşumlar meydana gelmektedir. Böylece puzolanik reaksiyonlar nihai ürünün mekanik özelliklerine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte endüstriyel yan ürün olan puzolanik malzemelerin yapı malzemelerinde kullanımı, atık olan bu ürünlerin değerlendirilmesini sağlayarak çevresel problemlerin çözümüne katkı sunmaktadır. Aynı zamanda atık olan bu ürünlerin ekonomik olarak değeri olmadığından yapı malzemelerinin maliyetinin daha uygun bir hale gelmelerini sağlayabilmektedir. Puzolanik malzemeler beton ve çimento esaslı ürünler sıklıkla kullanılmaktadır ancak literatürde kireç esaslı harçlarda da puzolanik malzemelerin kullanımına dair birçok çalışma bulunmaktadır.

Bilinen en eski bağlayıcılardan olan kireç ve alçı günümüzde inşaat sektöründe oldukça yaygın kullanım alanına sahiptir. Bilindiği üzere kireç, kireçtaşının kalsine edilmesi ile meydana gelmektedir. Bilinçsizce artan bir tüketim doğal kaynakların tükenmesine neden olacaktır. Aynı zamanda kalsinasyon işlemi enerji gerektiren bir işlem olduğu için bilinçsiz tüketim aynı zamanda enerji sarfiyatına da neden olmaktadır. Birçok endüstriyel süreç yan ürün olarak kireç içeren atıklar ortaya çıkarmaktadır. Bu proje kapsamında bir dizi kireç harcı hazırlanacaktır. Bu kireç harçları, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi adına puzolanlar ile geliştirilecektir. Kireç harçları ile birlikte yüksek derecede puzolanik özelliğe sahip olduğu bilinen uçucu kül, pirinç kabuğu külü ve metakaolin kullanılmıştır. Aynı zamanda doğal kireç kaynaklarını koruyabilmek için kireç yerine çeşitli atık kireç kaynakları kullanılarak, ayrı ayrı adı geçen puzolanlar ile değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında atık kireç kaynağı olarak Afşin – Elbistan uçucu külü, şeker fabrikası atığı (filtre keki), kolemanit atığı (triyaj atığı) ve öğütülmüş atık yumurta kabuğu kullanılmıştır. Aynı zamanda priz süresini ayarlamak için karışımlarda alçı kullanılmıştır. Harç örneklerine nem ve buhar kuru olmak üzere iki farklı kür yöntemi uygulanmıştır. Üretilen harçların, yayılma değerleri, basınç ve eğilme dayanımları, birim ağırlıkları, ultrasonik ses geçiş hızları, kılcal su emme ve atmosferik su emme değerleri incelenmiştir. Aynı zamanda X-ışını difraksiyonu, Termogravimetrik analiz ve Taramalı Elektron Mikroskopu analizleri kullanılarak mikro yapı incelemelerinde bulunulmuştur. Böylece çevreci ve ekonomik yönü artırılmış, mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirilmiş kireç – alçı – puzolan harçlarının elde edilmesi hedeflenmiştir

Anahtar Kelimeler: Kireç, alçı, puzolan, kireç içeren atıklar.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATING THE USABILITY OF SOME WASTE LIME SOURCES IN GYPSUM - LIME - POZZOLAN BASED MORTARS

Gamze KOYUTÜRK

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Muhammed Yasin DURGUN

Bartın-2022, pp: 90

In recent years, various mineral additives have been used in the production of building materials. Most of these mineral additives, which can be natural or artificial, consist of industrial by-products (fly ash, silica fumes, blast furnace slag, etc.). Among the reasons for the use of these additives, besides their technological contributions, there are also economic and ecological reasons. As it is known, some reactions called “pozzolanic reactions” occur between mineral additives with pozzolanic properties and lime, and as a result of these reactions, formations similar to the products of hydration reactions between cement and water occur. Thus, pozzolanic reactions contribute to the mechanical properties of the final product. In addition, the use of pozzolanic materials, which are industrial by-products, in building materials contributes to the solution of environmental problems by making use of these waste products. At the same time, since these products, which are waste, have no economic value, they can make the cost of building materials more affordable. Pozzolanic materials are frequently used in concrete and cement-based products but there are many studies in the literature on the use of pozzolanic materials in lime-based mortars.

Lime and gypsum, one of the oldest known binders, is widely used in the construction industry today. As it is known, lime is formed by calcining limestone. An unconsciously increasing consumption will cause the depletion of natural resources. At the same time, since the calcination process is a process that requires energy, unconscious consumption also causes energy consumption. Many industrial processes generate wastes containing lime as a by-product. A series of lime-based mortars will be prepared in this project. These lime mortars was developed with pozzolans in order to improve their mechanical properties. Fly ash, rice husk ash and metakaolin, which are known to be highly pozzolanic, were used together with lime mortars. At the same time, in order to protect natural lime resources, various waste lime resources was used instead of lime, and evaluated separately with the mentioned pozzolans. Within the scope of the study, Afşin - Elbistan fly ash, sugar factory waste (filter cake), colemanite waste (trriage waste) and ground waste egg shell was used as waste lime source. At the same time, gypsum will be used in the mixtures to adjust the setting time. Two different curing regimes were applied to the produced mortars as steam cure and humid cure. Flow diameter values, compressive and bending strengths, unit weights, ultrasonic pulse velocities, capillary water absorption and atmospheric water absorption values of the produced mortars were examined. At the same time, X-ray diffractometry, Thermogravimetric analyze and Scanning Electron Microscopy Analysis were performed for microstructure investigations. Thus, it is aimed to obtain lime - gypsum - pozzolan mortars with increased environmental and economic aspects and improved mechanical and physical properties.

Keywords: Lime, gypsum, pozzolan, waste containing lime.

İÇİNDEKİLER

BEYANNAME.....	i
ÖNSÖZ.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ.....	xii
KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Alçı Nedir?.....	2
1.1.1. Alçının Üretimi.....	2
1.1.2. Alçının Özellikleri.....	3
1.1.3. Alçının Kullanım Alanları.....	4
1.2. Kireç Nedir?.....	5
1.2.1. Kireç Üretimi.....	6
1.2.2. Kireç Türleri.....	6
1.2.2.1.Hava Kireci.....	6
1.2.2.2. Su Kireci.....	6
1.2.3. Kirecin Özellikleri.....	7
1.2.4. Kirecin Kullanım Alanları.....	8
1.3. Puzolan Nedir?.....	8
1.3.1. Puzolanların Sınıflandırılması.....	9
1.3.1.1. Doğal Puzolanlar.....	9
1.3.1.2. Yapay Puzolanlar.....	9
1.3.2. Çalışmada Kullanılan Puzolanlar.....	10
1.3.2.1. Uçucu Kül.....	10
1.3.2.2.Pirinç Kabuğu Külü.....	10
1.3.2.3.Metakaolin.....	11
1.4. Atıkların Değerlendirilmesi.....	11
1.4.1. Şeker Fabrikası Atığı.....	12
1.4.2. Kolemanit Atığı.....	13
1.4.3. Afşin-Elbistan Uçucu Külü.....	14

1.4.4. Yumurta Kabuğu.....	14
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	16
2.1. Kireçle Yapılan Çalışmalar.....	16
2.2. Alçı ile Yapılan Çalışmalar.....	17
2.3. Alçı ve Kireç ile Yapılan Çalışmalar.....	18
2.4. Puzolan ile Yapılan Çalışmalar.....	19
2.5. Kireç ve Puzolan ile Yapılan Çalışmalar.....	20
2.6. Alçı Puzolan ile Yapılan Çalışmalar.....	21
2.7. Alçı, Kireç ve Puzolan ile Yapılan Çalışmalar.....	22
2.8. Kireç, Puzolan ve Atık Malzeme ile Yapılan Çalışmalar.....	22
2.9. Alçı, Kireç, Puzolan ve Atık Malzeme ile Yapılan Çalışmalar.....	23
3. MATERYAL VE METOT.....	24
3.1. Materyal.....	24
3.2. Metot.....	27
3.2.1. Karışım Oranları ve Örneklerin Üretilmesi.....	27
3.2.2. Deneysel Çalışma.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	32
4.1. Buhar Kürü Uygulanmış Örneklerin Sonuçları	32
4.1.1. Birim Ağırlık.....	32
4.1.2. Görünür Porozite.....	34
4.1.3. Su Emme.....	36
4.1.4. Kılcal Su Emme.....	38
4.1.5. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı.....	40
4.1.6. Basınç Dayanımı.....	42
4.1.7. Eğilme Dayanımı.....	46
4.2. Nem Kürü Uygulanmış Örneklerin Sonuçları.....	48
4.2.1. Birim Ağırlık.....	48
4.2.2. Görünür Porozite.....	51
4.2.3. Su Emme.....	53
4.2.4. Kılcal Su Emme.....	55
4.2.5. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı.....	57
4.2.6. Basınç Dayanımı.....	59
4.2.7. Eğilme Dayanımı.....	61
4.3. Mikroyapı İncelemeleri	63

4.3.1.X-Işını Difraktometresi (XRD) İncelemeleri	63
4.3.2.Termogravimetrik Analiz (TGA).....	69
4.3.3.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	82
KAYNAKLAR.....	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
3.1: Toz malzemelerin partikül boyutu analizleri	26
3.2: Kullanılan malzemelerin SEM görüntüleri	26
3.3: Örneklerin üretim aşamaları	29
3.4: Deneysel Çalışmalar	30
4.1: UK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları	32
4.2: MK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları	32
4.3: PK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları	33
4.4: UK içeren örneklerin görünür porozite değerleri	34
4.5: MK içeren örneklerin görünür porozite değerleri	35
4.6: PK içeren örneklerin görünür porozite değerleri	35
4.7: UK içeren örneklerin su emme değerleri	36
4.8: MK içeren örneklerin su emme değerleri	37
4.9: PK içeren örneklerin su emme değerleri	37
4.10: UK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları	38
4.11: MK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları	39
4.12: PK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları	39
4.13: UK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri	40
4.14: MK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri	41
4.15: PK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri	41
4.16: UK içeren örneklerin basınç dayanımları	42
4.17: MK içeren örneklerin basınç dayanımları	43
4.18: PK içeren örneklerin basınç dayanımları	43
4.19: UK içeren örneklerin eğilme dayanımları	46
4.20: MK içeren örneklerin eğilme dayanımları	47
4.21: PK içeren örneklerin eğilme dayanımları	47
4.22: UK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları	49
4.23: MK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları	49
4.24: PK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları	50
4.25: UK içeren örneklerin görünür porozite değerleri	51
4.26: MK içeren örneklerin görünür porozite değerleri	51

4.27: PK içeren örneklerin görünür porozite değerleri	52
4.28: UK içeren örneklerin su emme değerleri	53
4.29: MK içeren örneklerin su emme değerleri	53
4.30: PK içeren örneklerin su emme değerleri	54
4.31: UK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları	55
4.32: MK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları	56
4.33: PK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları	56
4.34: UK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri	57
4.35: MK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri	58
4.36: PK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri	58
4.37: UK içeren örneklerin basınç dayanımları	59
4.38: MK içeren örneklerin basınç dayanımları	60
4.39: PK içeren örneklerin basınç dayanımları	60
4.40: UK içeren örneklerin eğilme dayanımları	62
4.41: MK içeren örneklerin eğilme dayanımları	62
4.42: PK içeren örneklerin eğilme dayanımları	63
4.43: Buhar kürü uygulanmış UK/R, MK/R ve PK/R örn. XRD analizleri	64
4.44: Buhar kürü uygulanmış UK serisinden seçilmiş örneklerin XRD analizleri	65
4.45: Buhar kürü uygulanmış MK serisinden seçilmiş örneklerin XRD analizleri	65
4.46: Buhar kürü ve nem kürü uygulanmış UK/R örneklerinin XRD analizleri	67
4.47: Buhar kürü ve nem kürü uygulanmış MK/R örneklerinin XRD analizleri	68
4.48: Referans örneklerinin TGA-DTG analizleri	69
4.49: Buhar kürü uygulanmış UK serisinden seçilmiş örneklerinin TGA-DTG analizleri	70
4.50: Buhar kürü uygulanmış UK serisinden seçilmiş örneklerinin TGA-DTG analizleri	70
4.51: Buhar kürü ve nem kürü uygulanmış UK/R örneklerinin TGA-DTG analizleri	73
4.52: Buhar kürü ve nem kürü uygulanmış MK/R örneklerinin TGA-DTG analizleri	73
4.53: Buhar kürü uygulanmış referans örneklerin SEM görüntüleri	74
4.54: Buhar kürü uygulanmış UK serisine ait örneklerin SEM görüntüleri	76
4.55: Buhar kürü uygulanmış MK serisine ait örneklerin SEM görüntüleri	77
4.56: Nem kürü uygulanmış UK serisine ait örneklerin SEM görüntüleri	79
4.57: Nem kürü uygulanmış MK serisine ait örneklerin SEM görüntüleri	80

TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
3.1: Temel malzemelerin ve puzolanların özellikleri	24
3.2: Kireç ikamesi olarak kullanılan malzemelerin özellikleri	25
3.3: Ön denemelerde kullanılan karışım oranları	27
3.4: Karışım dizaynı (% , ağırlıkça)	28

KISALTMALAR

A	:Alçı
AEUK	:Afşin Elbistan uçucu külü
MK	:Metekaolin
K	:Kireç
KA	:Kolemanit atığı
P	:Puzolan
PK	:Pirinç kabuğu külü
ŞF	:Şeker fabrikası atığı
UK	:Uçucu kül
YK	:Yumurta kabuğu

1. GİRİŞ

Eski Yunan, Roma ve onu izleyen dönemlerden, çimentonun bulunmasına kadar geçen sürede yapıların inşasında kireçli harçlar kullanıldığı bilinmektedir. Kireç harcının üretimi, bağlayıcı olarak kireç, su ve dolgu malzemesinin karıştırılması şeklindedir. Yapı üretiminde kullanılan en eski bağlayıcılar bilindiği üzere alçı ve kireçtir. Mısırlıların da harç üretirken kireç kullandıkları sanılmaktadır. Romalıların ürettikleri ve zamanımıza kadar dayanan yapılarda kirece puzolan adı verilen maddeyi ilave ettikleri görülmektedir. (Aubert vd., 2012).

Günümüze kadar ayakta kalan tarihi yapılarda kullanılan harçlarda alçı, kireç ve kireç puzolan bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Agregada malzemesi olarak keçi kılı ile nehir kumu, çakıl taşları, tuğla parçaları ve tozları ve lif görevi gören saman, at kılı kullanılmıştır. Ülkemizde Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerine ait yapılarda değişen karışım oranlarında Horasan harcı ile karşılaşmak da mümkündür. Bu şekilde üretilen harç, beton kadar güçlüdür ve kirecin, agregada olarak kullanılan farklı oranlarda nehir kumu ve tuğla parçaları ve/veya tozu ile birleştirilmesi şeklinde üretilir. Horasan harcı, özellikle 15. yüzyıla ait yapılarda ve sonraki dönemde Osmanlı yapılarında yaygın olarak kullanılmıştır. 18. ve 19. yüzyıllarda İtalyan puzolanından yapılmış "kraliyet harcı" olarak adlandırılan kireç harcı kullanılmıştır. Kireç harcı aslında puzolan ile birleştiğinde suya dayanıklı olan hidrolik olmayan kireçten oluşur. Bu sayede sert ve suya dayanıklı hidrolik kireç oluşur. Bu nedenle tarihte Horasan betonu olarak da bilinir. Puzolan ve tuğla parçalarından yapılan kireç harcı Romalılar tarafından 'opus sementicium' olarak adlandırılmış ve günümüze kadar varlığını sürdürmüştür. Ayrıca bu harçlar, günümüz çimento teknolojisinin gelişmesine hizmet etmiştir (Arıoğlu ve Acun, 2005).

Nüfusta meydana gelen artış ve insanların gereksinimleri aynı oranda artmaktadır. Tarım alanında bilinçsiz olarak kullanılan kimyasal malzemeler, çarpık kentleşme, yoğun ve bilinçsiz artış gösteren endüstrileşme ve önlem almadan faaliyet gösteren sanayi tesislerinin meydana getirmiş olduğu kirlilik göz ardı edilemez. Çevreye verilen zarar bununla da sınırlı değildir. Bilinçsiz tüketim çevre kirliliğinin yanı sıra doğal kaynakların hızla tüketilmesine de neden olmaktadır. Doğal kaynaklarının korunması adına günümüzde atıkların değerlendirildiği birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda endüstriyel atıkların değerlendirilmesi, çevre kirliliğinin olabildiğince azaltılması ve enerji tasarrufu sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca atıklar bu şekilde değerlendirilmediği takdirde depolama ve stoklama için ayrı bir maliyet kalemi ortaya çıkmaktadır. Bunun önlenmesi

adına atıkların yeni bir yapı malzemesi üretiminde doğal kaynak ikame malzemesi olarak kullanılması büyük önem taşımaktadır. İnşaat sektöründe doğal kaynak tüketimi ve çevre kirliliğinin hat safhada olduğu düşünüldüğünde özellikle bu sektörde atık değerlendirilmesi önem arz etmektedir (Damar Tekin, 2014). Bu sebeple bu çalışmada atıkların değerlendirilmesi ve bu sayede çevreye verilen zararı en alt seviyeye getirmek, buna ek olarak da maliyetin azaltılması adına araştırmalar yapılmıştır.

Sıva harcı gerek iç mekanlarda gerek de dış cephede kullanılabilir. Dış cephede kullanılan sıva harcının durabilitesinin yani çevresel etkilere karşı dayanıklılığının üst seviyede olması şarttır.

Bu çalışma kapsamında mekanik özelliklerden ödün vermeyen çevre dostu bir sıva harcı elde etmek hedeflenmiş olup hedef doğrultusunda ilave ve ikame malzemeler kullanılmıştır.

İlave malzeme olarak, silis dumanı, metakaolin ve uçucu kül; kireç ikame malzeme olarak ise, Afşin Elbistan Uçucu Külü, şeker fabrikası atığı, kolemanit atığı, yumurta kabuğu tozu kullanılması planlanmıştı ancak silis dumanı ile üretilen örneklerin kalıptan çıkarılırken dağıldığı görüldüğünden silis dumanı yerine pirinç kabuğu külü öğütülerek kullanılmıştır.

1.1. Alçı Nedir?

Alçı taşının çeşitli derecelerde pişirilmesi sonucu elde edilen ve su ile karıştırıldığında kısa süre içinde katılaşma özelliği gösteren beyaz renkli inorganik esaslı bağlayıcı türüne alçı adı verilmektedir. Alçının hammaddesi jips, alçıtaşının sulu halidir. Alçıtaşının çift sulu bileşiğine jips adı verilirken susuz türüne anhidrit adı verilmektedir. Isıtılan jips yapısındaki kristal suyunun bir parçasını ya da tümünü yitirir (Beydemir, 2006).

En eski bağlayıcılardan olarak bilinen alçı, günümüzde bağlayıcı olmaktan ziyade tek başına bir malzeme olarak kullanılmaktadır (Tekin, 2014).

1.1.1. Alçı Üretimi

Alçı, alçıtaşının (jips) uygun sıcaklıkta (140-200 °C) ısıtılarak, atmosfer basıncı altında kısmi dehidratasyon işlemine uğratılıp, öğütülmesi ve elenmesi ile elde edilir. Bu şekilde elde edilen alçıya β -yarımhidrat veya β alçı adı verilir ve piyasada yaygın olarak kullanılır. Kalsinasyon yüksek buhar basıncı altında otoklavlarda gerçekleştirilirse α yarımhidrat adı verilen daha iyi kalitede bir alçı elde edilir (Sayıl ve Gürdal, 1997), (Tekin, 2014).

1.1.2. Alçının Özellikleri

Alçı, özelliklerinden dolayı geçmişten günümüze yapıda sıklıkla tercih edilmektedir.

Alçının ısı iletkenlik değerinin ahşaba çok yakın olduğu bilinmektedir. Isıyı diğer malzemelere göre daha az iletmediğinden ısıtmada enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Alçının birim hacim ağırlık değerine bağlı olarak ısı iletkenliği değişkenlik göstermektedir. Birim hacim ağırlık değeri de alçı/su oranına bağlı olduğundan su oranı ısı iletkenlik oranını etkilemektedir. (Tekin, 2014)

Alçı yapı elemanlarının içeriğinde bulunan boşluklar sayesinde sesi karşı tarafa geç iletmediğinden ses yalıtımı özelliği vardır. Akustik amaçlarla üretilmiş elemanlar yardımı ile ses yalıtımına olanak sağlanabilir.

Alçının belki de en önemli özelliklerinden biri de yanmazlık ve yangın önleme özellikleridir. Şöyle ki, 42 derece ısıda açığa çıkmaya başlayan su, ısı daha da arttıkça yani yangın halinde buharlaşmaya kadar ısınır, buhara dönüşür. Suyun buharlaşabilmesi için büyük oranda ısı enerjisi gerekmekte ve mevcuttaki ısı bu şekilde harcandığından o bölgede ısı 100 derecenin üzerine çıkamaz. Alçı bu yüzden yangına karşı dayanıklıdır (Akbaş, 1996).

15 cm kalınlığında alçıdan yapılmış bir duvar elemanının dış yüzeyinde sıcaklık 1000 °C iken iç yüzeyde sıcaklığın 55 °C civarında olduğu tespit edilmiştir. Yani dıştaki sıcaklığı içe aktarması hemen gerçekleşmemektedir. Bu gibi niteliklerden dolayı alçı içerikli yapı elemanlarının çok uzun süreli olmasa da alevi kestiği düşünülmektedir (Koçu;2000).

Alçı, oldukça hafif bir malzemedir. Taşınma maliyeti benzerlerine göre daha azdır. Yoğunluğu taze alçı ürünlerde 1200 kg/m³ mertebelerinde olsa da kurumuş ürünlerde 950-1100 kg/m³ civarındadır. Bu nedenle de alçı tercih sebebi olabilmektedir. (Gürdal ve Acun, 2005)

Alçı yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Hafif olması, yangına dayanıklı olması ve iyi termal özelliklere sahip olması nedeniyle tercih edilmektedir (Durgun, 2020).

Alçı işlenebilirliği yüksek bir yapı malzemesidir. Hemen işlenmeye başlanabilir. Ancak priz süresi kısa olduğundan ivedilikle işlenmelidir.

Alçının onarım kolaylığı da mevcuttur, herhangi bir nedenle ortaya çıkacak çatlaklar, hızla onarılabilir. (Gürdal ve Acun, 2005)

İşlenebilirliğin yanı sıra alçıya istenilen şekil kısa sürede verilebilir, kolayca montaj yapılabilir.

Alçı, mevcut kimyasal yapısı sayesinde bünyesinde bakteri barındırmamaktadır. pH değeri insan cildi ile aynı oranda olduğundan cilde dosttur. Bu nedenle tıbbi nedenlerle kullanımı alanı geniştir (Turan, 2017).

Ayrıca, vitrifiye üretiminde de alçının kullanımı pek çok aşamada karşımıza çıkmaktadır. Alçı kalıbın tercih edilmesinin en önemli nedeni, alçının su emme özeliğidir. Ayrıca alçının deformasyonu azdır, ısıya karşı dayanıklıdır, aşınmaya karşı dayanıklıdır, rutubeti dengeler, yüzeye nefes aldırma gibi özelliklere sahip, hafif bir malzemedir. Bu sebeplerle alçı tercih sebebi olmaktadır (Ural, 2017).

Yoğuşma nedeniyle Kapalı bir ortamda bulunan su buharı birçok yapı elemanının bozulmasına neden olabilirken alçının buhar geçirme direnci ve ısı iletkenlik katsayısı düşük olduğundan yoğuşmayı geciktirir. Alçı ortamdaki fazla nemi absorbe eder sonrasında ortam nemi azaldığında geri vererek ortamın nem oranını düzenler (Koçu, 2000).

Alçı demiri paslandırmaktadır. Bu paslandırma özeliği nedeniyle yapı elemanlarına uygularken pas payı bırakılmalıdır. Uygulamalarda da paslanmayacak malzemeler kullanılması önerilmektedir. Alçının ahşaba yapışma özeliği olmasa da tuğla, taş vb. malzemelere yapışma özeliği mevcuttur (Baradan, 2006).

Alçı suya dayanıklı olmadığından dış cephede kullanıma uygun değildir.

Normal alçıda priz süresi en az sekiz dakika olmalıdır. Katkılı alçılarda priz süresi ise yirmi dakikadan az olmamalıdır. Saten alçıda priz süresi en az 130 dakika olmalıdır.

Yapı alçılarının basınç dayanımı TS 370 standardına göre en az 7.00 Mpa olmalı iken saten alçının basınç dayanımı 2.50 mega paskaldan fazla olmalıdır (Baradan vd., 2012).

1.1.3. Alçının Kullanım Alanları

Alçı birçok farklı alanda kullanılarak hayatımızı kolaylaştıran bir malzemedir.

Hüsem (2014), yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında alçının kullanım alanlarını aşağıdaki şekilde sıralamıştır;

- Ham jips beyaz boya ve kağıt dolgu malzemesi olarak kullanılır.
- Mekansal akustik kriterlerinin elde edilmesinde kullanılır.
- Kuyumculuk sektöründe kalıp malzemesi olarak kullanılır.
- Sıcak ve soğuk yalıtım malzemesi olarak kullanılır.
- Tutkal yapımında kullanılır.
- Kömür işletmelerinde kömür tozunda kül oranını arttırmak için kullanılır.
- Bira sanayiinde mayalandırma için kullanılır.
- Binalarda ses izolatörü olarak kullanıldığı gibi diğer ses yalıtımı gereken yerlerde de kullanılmaktadır.
- Binalarda rutubet düzenleyici olarak kullanılır.
- Tıp sektöründe kullanılır.
- İç ve dış mimaride estetik ürünlerin üretiminde kullanılır.
- Plastik üretiminde kullanılır.
- Cam sanayiinde kullanılır.
- Tarımda doğal gübre yapımında kullanılır.
- Böcek ilacı yapımında kullanılır.
- Gıda sanayiinde kullanılır.
- Diş sektöründe kalıp malzemesi olarak kullanılır.
- Yapay kükürt yapımında kullanılır.
- Hayvan yemi üretiminde kullanılmaktadır.
- Mekânda estetik çözümler için alçı duvar sistemlerinde kullanılmaktadır.

1.2. Kireç Nedir?

Kireç bilinen en eski bağlayıcılardan biridir. Eski Babil, Mısır, Finikeliler, Persler ve Hitit uygarlıkları tarafından hava kireci bağlayıcı malzeme olarak yapılarda kullanılmıştır.

Romalılar devrinde su kireci bulunmuş ve su içi inşaatlarında kullanılmıştır.

Horasan harcı tuğla kırığı ve kireç kullanılarak hazırlanır ve tarihi yapıların yapılmasında kullanılan en önemli bağlayıcı malzemelerden biridir. Bu tür bağlayıcının isimleri farklı bölgelerde farklı isimler olarak anılmaktadır. Örneğin; Mısır'da Homra, Hindistan'da Surkhi adı altında bilinmektedir. Bizans'ta kireç sıva fresk tekniği altında uygulanmıştır. Orta çağda ise bu sanayide daha fazla bir ilerleme görülmez (Gökhan, 2006).

1.2.1. Kireç Üretimi

Kireç, kireç taşının çeşitli derecelerde (850-1400 °C) pişirilmesi sonucu elde edilir. Su ile karıştırıldığında çeşidine göre su ya da havada katılacak beyaz renkli inorganik esaslı bir bağlayıcı türüdür (Beydemir, 2006).

Kireç ve kireçtaşı bazen birbirlerinin yerine kullanılabilen veya karıştırılabilen deyimlerdir. Kireçtaşı, kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonattan oluşur. Kireçtaşı genellikle alümina ve silis gibi safsızlıklar içerir. Kireç ise kireçtaşının kalsine olması sonucu oluşur. Kalsinasyon işlemi kalsiyum karbonattan karbondioksitin çıkartılması ile meydana gelir. Geriye kalan kalsiyum oksit sönmemiş kireç olarak adlandırılır. Sönmemiş kireç su ile reaksiyona girer ve sönmüş kirece dönüşür (Tekin,2014).

1.2.2. Kireç Türleri

Hava kireci ve doğal hidrolik kireç olmak üzere iki tür kireç vardır.

1.2.2.1. Hava Kireci

Kireç, içindeki kil miktarına bağlı olarak yalnız havada katılma özelliği gösteren kireç türüne hava kireci denilmektedir. Yapıda kullanılan kireçler, hava kireci türünden olup kireç sözcüğünün kullanımı yaygın anlamıyla hava kirecini ifade etmektedir (Bulut, 2007). Hidrolik olmayan kireçlerde priz süresi hidrolik kirece oranla daha uzundur (Güney,2012).

1.2.2.2. Su Kireci

Su kireci içinde %10 - %25 kil bulunan kalkerin pişirilmesi ile elde edilir. Bu pişirme ile kalkerin ayrışması sonucu meydana gelen kireç, kilin içinde bulunan silis ve alüminle birleşir. Bu bağlayıcı maddelerin toz haline getirilmesi doğrudan kirecin söndürülmesiyle sağlanır. Fırından çıkan parçalar su ile temas ettirilince kirecin yaptığı reaksiyon sonucunda meydana gelen hacim artışı çıkan parçaların ince toz haline gelmesini sağlar.

Bu olayın oluşması için su kirecindeki kalsiyum oksit miktarının %10'dan büyük olması gerekir (Görhan, 2006), (Tekin, 2014).

Kireç bilinen en eski bağlayıcılardan biridir. Eski Babil, Mısır, Finikeliler, Persler ve Hitit uygarlıkları tarafından hava kireci bağlayıcı malzeme olarak yapılarda kullanılmıştır.

Romalılar devrinde su kireci bulunmuş ve su içi inşaatlarında kullanılmıştır.

Horasan harcı tuğla kırığı ve kireç kullanılarak hazırlanır ve tarihi yapıların yapılmasında kullanılan en önemli bağlayıcı malzemelerden biridir. Bu tür bağlayıcının isimleri farklı bölgelerde farklı isimler olarak anılmaktadır. Örneğin; Mısır'da Homra, Hindistan'da Surkhi adı altında bilinmektedir. Bizans'ta kireç sıva fresk tekniği altında uygulanmıştır. Ortaçağ'da ise bu sanayide daha fazla bir ilerleme görülmez (Gökhan, 2006).

1.2.3. Kirecin Özellikleri

Kireç birçok özelliği nedeniyle geçmişten günümüze oldukça fazla kullanılan bir malzemedir.

Hava kireçleri verimli bir malzemedir. 1 kilogram sönmemiş hava kirecinden en az 2 litre kaymak kireç elde edilebilmektedir (Beydemir, 2007).

Kireç sıvalar düşük mukavemete sahip olmalarına karşın yüksek aderansa sahip bir yapıya sahiptir. Bu nedenle tavan ve iç duvarlarda kullanılmaya uygun bir sıva malzemedir. Ancak suya karşı dayanıksız olmasından dolayı dış cephede kullanımı önerilmemektedir (Beydemir, 2007).

Suya dayanıksız ve mukavemetsiz olmasından dolayı tek başına kullanılamamaktadır. Yapıda sıva olarak kullanılırken kum ve su ile karıştırılarak kullanılır.

Kireç kullanımı eski önemini yitirse de hijyenikliği, nefes aldırma kabiliyeti, uygulama kolaylığı ve ucuzluğu gibi konular sebebiyle hala yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Aderansı artırmak için kireç badana yapımında zeytinyağı, tutkal gibi bazı katkı maddeleri ilave edilebilmektedir (Eriç, 1994).

Kireç, nötralizasyon, absorpsiyon, kostikleştirme vb. gibi kimyasal proseslerin ana girdisidir. Kimyasallar ile hızlıca reaksiyona girer ve istenmeyen maddeleri bünyeden uzaklaştırabilmektedir. Pahalı kimyasalları geri kazanılmasındaki rolü de göz ardı edilemez. Ayrıca kireç aynı zamanda organik canlılar için önemli bir besi maddesidir. Ve

en önemlisi de ucuz ve kolay bulunabilir bir malzemedir. Bu nedenler, kirecin yaygın biçimde kullanılmasında önemli rol oynamaktadır (Gençtürk, 2011).

1.2.4. Kirecin Kullanım Alanları

Kireç geçmişten günümüze birçok alanda farklı amaçlarla kullanılmıştır.

Söndürülmüş kireç yalnızca su ile veya farklı renk ve plastik maddeler katıldıktan sonra üzerine badana şeklinde sürülerek süsleyici malzeme olarak da kullanılabilir. (Saraylı; 1975).

Kireç,

- İnşaat harç ve sıvalarında bağlayıcı,
- Portland çimento ve beton yapımında hammadde komponenti,
- Demir-çelik endüstrisinde safsızlaştırıcı,
- Yol inşaatlarında dengeleyici olarak ve asfaltta aşınmaya karşı katkı maddesi,
- Çeşitli kimyasal maddelerin elde edilmesinde ara reaksiyon kimyasalı veya nihai ürün komponenti,
- Çevre denetiminde arıtma kimyasalı,
- Asitli toprakların iyileştirilmesinde pH dengeleyicisi,
- Gaz beton endüstrisinde bağlayıcısı başta olmak üzere pek çok alanda kullanıma elverişlidir (Gençtürk, 2011).

1.3. Puzolan Nedir?

ASTM C618-15, (2015)'e göre puzolanlar, tek başlarına bağlayıcılık özelliği taşımayan veya çok az bağlayıcılık taşıyan ancak, yeteri kadar ince taneliyken ve nemli ortamda, bağlayıcılık özelliğine sahip bileşikler oluşturmak amacıyla, kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona giren silisli veya silisli ve alüminli malzemelerdir.

Puzolan ismi, İtalya'daki Vezüv yanardağının yakınında bulunan Pozzuoli kasabasının adından gelmektedir. Eski Romalılar bu kasaba civarında volkanik kül ve söndürülmüş kirecin su ile karıştırılmasıyla hidrolik bağlayıcı özellik gösteren bir malzeme oluştuğunu fark etmişler. Bu sebeple su altında sertleşebilen bu malzemeye 'puzolan' ismi verilmiştir. (Tekin,2014)

Romalılar, pişirilmiş kil, öğütülmüş tuğla ve kiremitin de puzolanik özellik gösterdiğinin bilincinde bir yaşam sürmüşlerdir. Romalılar volkanik kül, volkanik küllü toprağı veya pişirilmiş kili, sönmüş kireçle ve suyla birleştirerek, su altında da sertleşebilen bağlayıcı hamur elde etmişlerdir. Ayrıca bu bağlayıcıların içerisine taş da ekleyerek bugünkü betona benzer (Roma betonu olarak bilinen) karışımlar yapmışlardır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Roma betonunun tuğla ve taş duvarlarda kullanılmasıyla hem sağlam hem de suya dayanıklı duvarlar oluşturulmuştur. Roma betonu aynı zamanda sualtı yapıların inşasında da büyük kolaylık oluşturmuştur (Kozlu, 2010).

1.3.1. Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar iki alt başlıkta sınıflandırılır: doğal ve yapay puzolanlar.

Doğal puzolanlar kendi içerisinde üçe ayrılır: Volkanik camlar, volkanik tüfler, silisler.

Yapay puzolanlar ise kendi içerisinde üçe ayrılır: pişirilmiş ve endüstriyel (Bulut, 2007).

1.3.1.1. Doğal Puzolanlar

Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar, diatomlu topraklar ve bazı killer ve şeyller doğal puzolanlara örnek malzemelerdir. Doğal puzolanlar, düşük hidrasyon ısı, yüksek dayanım, düşük geçirimsizlik (permeabilite), yüksek sülfat dayanımı ve düşük alkali-silika aktivitesi gibi yararlı özelliklerinden dolayı çimento ya da betonda tercih edilmektedir. Doğal puzolanlar ülkemizde genellikle “tras” olarak adlandırılmaktadır. (Bulut, 2007)

1.3.1.2. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar, doğal puzolanların içerisindeki SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO oksit bileşenlerini içerdiği bilinen sanayi üretim atıklarıdır (Barış, 2016). Yapay puzolanlara silis dumanı, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğı külü ve uçucu kül birer örnektir (Tekin,2014). Aktifleştirmek için yakılarak üretilen kil ya da şistler de yapay puzolan sınıfına dahildir (Barış,2016).

Silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıklarıyla indirgenmesi sonucu oluşan çok ince taneli tozlar silis dumanı olarak adlandırılmaktadır (Tekin,2014).

Uçucu kül, termik santralin bir atığıdır. Yüksek fırın cürufu kok demiri üretim aşamasında

ortaya çıkmaktadır.

Kil, içerisinde yeterli miktarda silika ve alümina bulundurmasına rağmen bu malzeme doğal haliyle puzolanik davranış gösterememektedir. Çünkü kildeki mineraller kristal yapıya sahiptir. Isıl işleme tabii tutulduğunda kristal yapı bozulur ve amorf bir yapı oluşur böylece pişirilmiş kil puzolanik özellik gösterir(Tekin, 2014).

1.3.2. Çalışmada Kullanılan Puzolanlar

1.3.2.1. Uçucu Kül

Termik santral ile elektrik üretimi sırasında kullanılan taş kömürü ve linyit kömürünün yakılmasıyla bacada tutulan küllere uçucu kül adı verilmektedir.

ASTM C 618'e göre, C ve F sınıfı olmak üzere iki çeşit uçucu kül vardır.

Bitüm esaslı kömürün yakılması sonucu oluşan ve toplamda $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ oranı %70'ten çok olan küller F sınıfına dahildir. Diğer taraftan kalsiyum oksit (CaO) oranı yüzde %10'un aşağısında olduğundan kireç oranı düşük uçucu küller şeklinde adlandırılırlar. $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ değeri %50'nin yukarısında olan, kalsiyum oksit (CaO) oranı yüzde %10'nun altında olan ve yarı bitümlü kömürden veya linyitin yakılması sonucu ortaya çıkan uçucu küller ise C sınıfı uçucu küllere dahildir. C sınıfı uçucu kül, silika ve alüminalı ve bir arada tutucu niteliktedir (Tokay, 2019).

Uçucu külün kullanımı ile mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanında ekonomik ve çevresel kazanımlar da sağlanmaktadır. Endüstriyel üretim sonucunda ortaya çıkan bu atıklar ucuz olması ve stoklama ihtiyacını azaltması nedeniyle maliyeti düşürmektedir. Atık sahalarından alınarak kullanılması ile çevre kirliliğinin azalmasına da katkı sağlamaktadır (Baba, 2022).

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül Çatalağzı Termik Santrali'ne ait olup, F sınıfı uçucu küldür.

1.3.2.2. Pirinç kabuğu külü

Tahıllar içerisinde üretim yoğunluğu en fazla olan ürün olan pirinç üretimi yaklaşık olarak ekilebilen alanın %11'ine denk gelmektedir. Pirincin hasadından sonra ortaya aşırı miktarda pirinç kabuğu atığı çıkmaktadır. Bu pirinç kabukları yakılarak değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra atık malzeme hacmini azaltmak amacıyla da yakım

gerçekleştirilebilmektedir. Yakılan pirinç kabuğunun yaklaşık %20 hacminde pirinç kabuğu külü meydana gelmektedir (Özdemir, 2020).

Pirinç kabuğu külü bünyesinde %92 oranında SiO₂, azar miktarlarda kalsiyum oksit, magnezyum oksit, alümina, demir oksit ve alkaliler içermektedir. Büyük oranda amorf silika içeren pirinç kabuğu külü, yüksek yüzey alanına ve çok ince tanelere sahip yüksek reaktiflikte puzolanik özellikli bir malzemedir (Özdemir, 2020).

Pirinç üretiminin yoğun olduğu bölge ve etrafında ortaya çıkan bu kabuklar çevre kirliliğine neden olmaktadır. Çevreye verilen zararı azaltmak, maliyeti düşürmek, özellikleri iyileştirebilmek, çevre dostu ürünler üretebilmek adına günümüzde farklı yapı malzemelerinde pirinç kabuğu külü kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada da benzer amaçlarla pirinç kabuğu külü kullanılmıştır.

1.3.2.3. Metakaolin

Saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle ortaya metakaolin ürünü çıkmaktadır. Rengi beyaz ve amorf yapıda olan bir alümina silikattır. Normal nem ve sıcaklığa sahip ortam koşullarında kaolin kili kararlı bir yapıdadır. Sıcaklığa bağlı olarak değişimler kaydeder. 100 ila 400 °C sıcaklık aralığında adsorbe sularını kaybederken, 400 ila 650°C sıcaklık aralığında dehidrolize olarak bünyesinde bağlı halde bulunan suyun yaklaşık %14'ünü de kaybeder ve metakaoline dönüşür. Bu dönüşümün ardından kaolin amorf bir hal alır ve kimyasal olarak reaktif hale geçer (Bensted ve Barnes, 2002), (Karahüseyin,2019).

Metakaolin, puzolan olarak çimento harçlarının üretiminde yaklaşık 60 yıldır kullanılmaktadır. Çalışmalarda alınan olumlu sonuçlar neticesinde farklı malzemelerde de kullanımı gittikçe yaygınlaşmış ve günümüzde oldukça popüler bir malzeme haline gelmiştir.

1.4. Atıkların Değerlendirilmesi

Bilindiği üzere nüfus artışı beraberinde birçok sorunu getirmektedir. Tüketimin artması da nüfus artışından kaynaklanan önemli sorunlardan biridir. Günümüzde nüfusa bağlı olarak

tüketimin artması, atık miktarı ve çeşidinin de artmasına neden olarak atık krizine yol açmaktadır. Sanayi ve çeşitli alanlarda oldukça fazla atık meydana çıkmaktadır. Ayrıca, bugün ortaya çıkan atıkların çoğunun yüzlerce ve hatta binlerce yıl çevrede kalması da olasıdır. Atıklar çevre kirliliği ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Atık malzemelerin değerlendirilerek üretimde kullanılması, bahsi geçen olumsuz durumların azaltılmasına yardımcı olacaktır (Topçu, 2022).

Doğal kaynakların yüksek oranda tüketilmesi, yüksek miktarlarda endüstriyel kalıntı veya atık madde oluşumu ve çevre kirliliği, sürdürülebilir kalkınma için yeni çözümler gerektirmektedir (Topçu ve Boğa, 2015).

Kireç veya kireç harcının fiziksel özelliklerini geliştirmek, karbonatlaşmayı hızlandırmak amacıyla kireç harçları hazırlanırken karışımlara organik ve inorganik maddelerin eklendiği bilinmektedir (Mahrebel, 2006).

Atıkların değerlendirilmesi, çevre dostu ve ekonomik ürünler üretilmesi adına bu çalışmada kireç ikame malzemesi olarak şeker fabrikası atığı, kolemanit atığı, Afşin Elbistan uçucu külü ve yumurta kabuğu kullanılmıştır.

1.4.1. Şeker Fabrikası Atığı

Ülkemizde 1926 yılında Alpullu Şeker Fabrikası ile başlayan şeker üretimi bugün Güneydoğu Anadolu Bölgesi dışında bütün bölgelerimizde, ülke tarımı, sanayisi ve ekonomisinin gelişmesine önemli katkılar sağlamaktadır (Özkan, 2014).

Günümüzde nüfus artışına bağlı olarak kullanımı da artan şekeri karşılamak için şeker fabrikalarında oldukça yoğun bir üretim gerçekleştirilmektedir.

Pancardan şeker üretimi aşamalarını, temel süreçler, kullanılan başlıca makine ve tesisler ile bu tesislerde yapılan işlemler göz önünde bulundurulduğunda; fabrika meydan tesisleri ve atık su arıtımı bölümü, şerbet üretimi, arıtımı, koyulaştırılması işlemleri ve son olarak şekerin üretimi ve depolanması şeklinde 3 aşamaya ayırmak mümkündür (Özkan, 2014).

Kristal beyaz şeker üreten fabrikalarda, üretim aşamasında çok fazla su tüketilmektedir. Proses sonucunda kirli sıvı atık, çamur ve katı atık ortaya çıkmakta ve bu atıklar çevre kirliliğine neden olmaktadır (Akın, 2010).

Şeker üretim aşamasından biri olan ham şerbetin arıtma kısmında ham şerbetin içindeki pancardan gelen şeker dışı maddeler kireç sütü ile parçalanır ve çöktürülür. (Kireç sütü, kirecin su veya şekerli su ile söndürülmesi ile elde edilen sulu sönmüş kirece verilen isimdir.)

Bu aşamada kireç kullanım sebepleri; ucuz bir ham madde olması, her yerde kolayca bulunabilmesi, ekipmana zarar vermemesi, kullanımının kolay olması, süzülerek şerbetten ayrılabilmesi, çevreye zararsız bir madde olması şeklinde sıralanabilir (Akın, 2010).

Şerbet arıtım bölümüyle geriye kalan kireç çamuru atıkları da çevre kirliliğine neden olmaktadır. Son zamanlarda şeker fabrikasının bir atığı olan bu çamur çalışmalarda sıklıkla değerlendirilmeye başlanmıştır.

Bu çalışmada ülke ekonomisine, çevre kirliliğinin önlenmesine katkı sağlamak amacıyla kireç içeren bu atık kireç ikame malzemesi olarak tercih edilmiştir.

1.4.2. Kolemanit atığı

Bor; periyodik tabloda III A grubunda yer alan, B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81 olan, iki kararlı izotoptan oluşan ve metal olmayan (ametal) tek elementtir. Bor, tabiatta hiçbir zaman serbest halde bulunmayan, yerkabuğunda yaygın olarak bulunan 51. elementtir. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinse de maddi değere sahip olanları tinkal, kolemanit ve üleksit olarak sıralamak mümkündür (Çağlar, 2018).

Bor; cam, seramik, inşaat sektörü, temizleme ve beyazlatma sanayisi, tarım, nükleer sanayisi gibi alanlar öncelikli olmak üzere pek çok alanda tercih edilmektedir (Durgun, 2011).

En yaygın bor çeşidi olan kolemanitin kimyasal bileşimi $Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$ şeklindedir. Kil içerisinde bulunan cevher oyuklarında iri, renksiz, saydam ve parlak kristaller halinde bulunur (Eyyüboğlu, 2013).

Türkiye'de Emet, Bigadiç, Kırka, Sultançayır ve Kestelek yataklarında yaygın olarak bulunmaktadır. Dünyada ise ABD'de yaygın olarak bulunmaktadır (Ulusoy, 2012).

Kolemanit sanayide; başta nükleer atık depolama olmak üzere, tekstil kalite cam elyafında,

bor metalurjik cüruf yapımında, çeliğin sertliğini arttırma gibi önemli alanlarda kullanılmaktadır (Çağlar, 2018).

Kolemanit atığı, kolemanit borunun işlenmesiyle geride kalan atıklara verilen isimdir.

Bu atık esas olarak tesis alanı içine boşaltılan B_2O_3 , Na_2O , CaO , SiO_2 ve bazı safsızlıklardan oluşur. Bor ve bileşikleri toprak ve su kirliliği gibi bazı çevre sorunlarına yol açabileceğinden bu atıkların değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca içeriğinde kıymetli B_2O_3 bulunduran bu atığın kullanılmaması ekonomik olarak bir kayıptır. Bu nedenle çimento, harç ve beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanımı son yıllarda araştırma konusu olmuştur (Topçu ve Boğa, 2015).

Bu çalışmada bor mineralinden faydalanmak, atıkları değerlendirmek, kireç kullanımını azaltmak amacıyla kireç ikame malzemesi olarak kolemanit atığından faydalanılmıştır.

1.4.3. Afşin-Elbistan Uçucu Külü

Bilindiği üzere elektrik enerjisinin büyük çoğunluğu termik santraller ile üretilmektedir. Termik santrallerde kullanılan taşkömürü, linyit gibi malzemeler sonucunda ortaya birçok atık çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu atıklar çevremize vermiş olduğu zararların yanı sıra işletmelere de çeşitli sorun yaratmaktadır. Örneğin santrallerde meydana gelen atık malzemeler işletmelerde stok sorunlarına, nakliye problemlerine yol açmaktadır. Bu sorunlar ise yüksek mali giderler oluşturmaktadır. Bu vb. nedenler dolayısıyla tesislerde oluşan bu atıkların değerlendirilerek yeniden endüstriye kazandırılması hem çevre için hem de işletmeler için büyük kolaylık sağlayacaktır (Kahraman, 2012).

Afşin- Elbistan termik santralinde linyit kömürü kullanıldığından ortaya çıkan uçucu kül C sınıfı uçucu küldür.

Yine içeriğinde CaO bulundurması sebebiyle bu çalışmada kireç ikame malzemesi olarak değerlendirilmiştir.

1.4.4. Yumurta kabuğu

Yumurta kabuğu pek çok farklı şekilde tanımlanmış olsa da raporların çoğu, ana bileşenin kalsit formundaki kalsiyum karbonat (%94-95) olduğu konusunda hemfikirdir. Kalıntı malzeme, magnezyum karbonat veya kalsiyum fosfat gibi inorganik bileşenler içerir.

Ayrıca yumurta kabuğunun kendisi yaklaşık %3 organik madde içermektedir. Bu malzeme en yaygın kalsiyum karbonat kaynaklarından biridir (Baláz, 2018).

Hızla büyüyen dünyamızda endüstriyel gelişime bağlı olarak meydana gelen çevre sorunları, gün geçtikçe daha da önlenemez bir hale gelmiştir. Yukarıda bahsedilen atıklarda da olduğu gibi yemek fabrikalarında ve pastanelerde ortaya çıkan atık yumurta kabukları da çevre sorunlarına neden olabilmektedir (Binici vd., 2013).

Günümüzde yumurta kabuğu kalsiyum içeriğinden dolayı toz halinde gıda üretiminde, zirai alanda ve birçok farklı mühendislik dalı çalışmalarında kullanılabilir.

Atıkların değerlendirilmesi ve ekonomik ürünler elde etmek amacıyla kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada yine benzer amaçla kireç ikame malzemesi olarak yumurta kabuğu da kullanılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Kireçle Yapılan Çalışmalar

(Gençtürk, 2011) tarafından yapılan ‘Sönmüş Kireç ile Çimento ve Pr Plast Kullanımının Asfalt Kaplamaların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri’ adlı çalışmada bitümlü karışımların performansını artırmak amacıyla farklı katkıları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Çalışma kapsamında asfalt kaplamada katkı maddesi olarak sönmüş kireç, pr plast ve çimento seçilmiştir. Performansı test etmek için Marshall oranı tercih edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda; pr plastın karışımda güçlendirici olarak, sönmüş kireç ve çimentonun ise aktif filler olarak değerlendirilebileceği verileri elde edilmiştir.

(Hatipoğlu, 2014) tarafından yapılan tez çalışmasında ise yığma yapılarda kullanılan çimento ve kireç harçlarının taze ve sertleşmiş özelliklerinin toz haline getirilmiş Bayburt taşlarıyla ve zeolitle geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada Manisa/Gördes’ten alınan zeolit ve Bayburt ilinden temin edilmiş olan Bayburt sarı, beyaz ve yeşil taşları kullanılmıştır. Bayburt taşlarının puzolanik özellik gösterebilmesi ve zeolit ürünü ile kıyaslanabilmesi amacıyla taşlar benzer oranlarda öğütülmüştür. Kireç harçları 28. gün, 56. gün ve 91. günlerde eğilme ve basınç dayanım testlerine tabii tutulmuştur. Basınç ve eğilme dayanımı dışında taze hal testleri de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde zeolit ve Bayburt taşları katkısının kireç harçlarının basınç dayanımını %60 oranlarına kadar artırdığı, su iletme kapasitesini dört kat arttığı, su iletme süresini ise dört kat azaldığı, priz süresinde %40'lara varan oranlarda iyileşme sağlandığı görülmüştür.

(Handar, 2021) yüksek lisans tez çalışmasında nüfus artışının; su, gıda ve enerji gibi yaşamın temel gereksinimlerin tüketiminin artmasına yol açtığına değinerek bu temel gereksinimleri karşılamak için enerji üretilirken çevre üzerinde yoğun bir etki oluştuğuna dikkat çekmiştir.

Dolayısıyla çalışmacılar enerji talebini karşılamak hem de çevre dostu olabilecek yenilenebilir ve sürdürülebilir yeni enerji kaynakları üzerinde çalışmalara yoğunlaşmışlardır. Bu çalışma ile jeotermal enerjiden yararlanma kabiliyetini değerlendirmek için Libya'daki Trablus zeminlerinin termal iletkenliğinin farklı koşullarda incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışma için üretilen seriler, her numunede farklı su içeriğine sahip zemin numunesi (W

serisi), %10 su içeriğine sahip kireç ilaveli zemin numunesi (L Serisi) ve %10 su içeriğine ve farklı yoğunluklara sahip zemin numunesi (D Serisi) dir.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar zeminin ısı iletkenliği ile ilgili sonuçların sıralamasının W serisi, D serisi ve L serisi şeklinde olduğunu göstermektedir.

2.2. Alçı ile Yapılan Çalışmalar

Gençel O vd. (2014), hafif alçıtaşına düşük ısı iletkenliğine sahip genişletilmiş vermikülit ve polipropilen lifler eklemiş ve çeşitli incelemeler yapmışlar. Vermikülit ilavesi ile kompozitlerin ısı iletkenliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Polipropilen liflerin eklenmesiyle ise kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirildiği görülmüştür. Katkı madde konsantrasyonlarını değerlendirmek ve optimize etmek, ayrıca katkı maddelerinin mekanik dayanım üzerindeki etkilerini anlamak için üç noktalı bir bükme modelinin doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli ve bir deney analizi tasarımı geliştirilmiştir.

Çalışmacıların elde ettikleri sonuçlara göre kompozitlerin birim ağırlıkları, karışımdaki vermikülit ve lif konsantrasyonuna bağlı olmakla beraber vermikülit, basınç dayanımını azaltırken, polipropilen lifleri gücü bir miktar artırmıştır. Kompozitlerin ısı iletkenliğinin, artan vermikülit içeriği ile azaldığı görülmüştür.

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık doğrusal olmayan alçı kompozitlerin modellenmesi ve analizinde uygun bir araç olarak görülmüştür. Alçı kompozitlerini başarılı bir şekilde incelemek için William-Warnke beton-inşaat demiri yapısal modeline sahip üç noktalı bir bükülme numunesi FEM modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model, çatlama ve ezilme olaylarını hesaba katarak ve arıza durumunda plastik mafsallık ve direnç kaybını açıkça göstererek, alçı kompozitlerin yapısal davranışını yüksek derecede doğrulukla yeniden üretebilecektir.

Alçı kompozitlerinin lif oranını incelemek ve optimize etmek için matematiksel bir model olarak geliştirilen bu metodoloji, yapısal ilkelere dayalı yapı ürünlerine fayda sağlayacaktır.

Durgun, M.Y. (2021) ise 'ortam ve yüksek sıcaklıklarda geri dönüştürülmüş kiremit tozu içeren alçı esaslı karışımlar üzerinde deneysel araştırma' adlı çalışma yapmıştır. Çalışmacı Alçı esaslı karışımlar içerisine eklemek üzere yıkım alanları ve zeminlerden atık kiremit toplamıştır. Alçı macunu ve alçı harcı olmak üzere iki tür numune grubu oluşturulmuş ve iki numune grubuna da %10, 20 ve 30 oranlarında atık malzeme eklenmiştir. Ayrıca salt

alçı kullanılan harç ve macun da referans olarak üretilmiştir. Numunelere 600°C ve 800 °C ısı uygulanmıştır. Numuneler yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce ve sonra birim ağırlıklar, kütle kayıpları, ultrasonik darbe hızları, eğilme dayanımları, basınç dayanımı, hacim değişiklikleri ölçülmüş ve görsel incelemeler yapılmıştır. Ayrıca karışımların görünür gözeneklilik, su emme ve ısı iletkenliği araştırılmıştır. Karışımların mikroyapısal değişimlerini araştırmak için taramalı elektron mikroskopu incelemeleri ve XRD analizleri yapılmıştır. Çalışmacı sonuç olarak atık ilavesiyle karışımların mukavemetinin azaldığı, görünen gözenekliliğin ve su absorpsiyonunun arttığı ve bununla birlikte kütle kaybını, termal iletkenliği ve yüksek sıcaklık direncini arttırdığı kanaatine varmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan hacim değişiklikleri, atık kullanılarak önemli ölçüde azaltıldığı gözlemlenmiştir.

2.3. Alçı ve Kireç ile Yapılan Çalışmalar

Golez vd. (2018), çalışmalarında kireç alçı süspansiyonu hazırlamak için Barok Dönemini örnek almış ve Slovenya’da bulunan Novo Celje Konağı’nda kullanılan harcı inceleme altına almışlardır. Alçı dehidrasyon süreçlerini içeren modern yapı malzemeleri endüstrisi, Barok Çağı'nın aksine, yeterli elektrik enerjisine sahiptir, bu nedenle kireç söndürme sırasında ekzotermik reaksiyonun kullanılması gibi bazı geleneksel bilgiler unutulmuştur.

Yapılan laboratuvar testlerinin sonuçları, Barok periyodundan elde edilen doğal alçının, pigment ilavesinden sonra kullanılan bir kireç-alçı süspansiyonu hazırlamak için bir doğal alçı (birincil alçı) ve sönmemiş kireç karışımı söndürülerek dehidrate edildiğini göstermiştir. Tarihsel materyallerde bulunan alçıtaşı sıklıkla ikincil kaynaklı olduğu için (yani asit yağmurunun karbonatla reaksiyonu sonucu oluştuğu için), planlanan restorasyon çalışmaları yapılmadan önce bu tür materyallerin kaynağının incelenmesi önemlidir.

Aksi takdirde, koruma uzmanları ve restoratörler genellikle alçıtaşı çözünür olmayan bir baryum sülfat formuna stabilize etmeye karar verirler. Malzemelerin ekzotermik özelliklerinden yararlanmaya dayanan geleneksel teknikler sürdürülebilirdir ve bu tür malzemeler karbon ayak izinin azalmasına katkıda bulunduğunu, bu nedenle teknolojik süreçteki iyileştirmelere dayalı yapı malzemelerinin modern üretiminde kullanılmaları gerektiğini söylemişlerdir.

Arioğlu ve Acun (2005) da Golez vd. ile benzer bir konuyu ele almışlar ve geleneksel sıva harçlarının incelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Geçmişte kullanılan kireç, alçı vb bağlayıcı içeren harçların tanımlarını ve içeriklerini belirtmiştir. Ayrıca bu harçların

günümüzde çimento teknolojisinin gelişmesine katkı sağladığından bahsetmiştir. Tarihi yapılarda kullanılan harç ve sıvanın değerlendirilmesinde ilk adımı, kullanılan orijinal malzemenin ve bozulmaya neden olan sebeplerin doğru tespit edilmesi olarak ifade etmişlerdir.

Middendorf'un 2002 yılında yaptığı çalışmada uygulamış olduğu testlere göre kireç harçlarının basınç dayanımı 4 ile 10 MPa arasında değişirken, alçı-kireç harçlarının ortalama basınç dayanımı 22 MPa'dır. Bu sonuçlar, harcın alçı içeriği ne kadar yüksekse, basınç dayanımının o kadar yüksek olduğunu göstermektedir.

2.4. Puzolan ile Yapılan Çalışmalar

Demirbağ, H., 2021 yılında yapmış olduğu 'vollastonit ve pirinç kabuğu külü içeren uçucu kül ve cüruf esaslı geopolimer kompozitlerin taze, reolojik, mekanik ve durabilite özelliklerinin belirlenmesi' adlı yüksek lisans tez çalışması yapmıştır. Bu çalışmada öncelikle referans numune olarak uçucu kül ve cüruf içeren karışımlar hazırlanmıştır. Sonrasında uçucu kül yerine %3, %6, %9 oranlarında sentetik vollastonit ve pirinç kabuğu külü malzemelerini ayrı ayrı ve beraber kullanmak üzere 3 grup numune üretilmiştir.

Özdemir, İ. ise, 2020 yılında yapmış olduğu ve çimento harcında ikame malzeme olarak pirinç kabuğu külü tercih ettiği çalışmada hidrasyon gelişiminin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemektedir. Ayrıca çalışmacı, endüstriyel yan atık ürünlerinin çevreye vermiş olduğu zararlara ve stoklama maliyetlerine değinerek pirinç kabuğu külünün değerlendirilmesi üzerine öneri sunmaktadır. Çalışmacı, dünya genelinde yapılmış olan çalışmalarda pirinç kabuğu külünün beton geçirimsizliğini azaltarak basınç dayanımını artırdığından söz ederek ülkemizde pirinç kabuğu külünün hidrasyon gelişimine yönelik fazla çalışma yapılmamasından hayıflanmıştır.

Bu çalışmada referans çimentolar ve çeşitli oranlarda pirinç kabuğu külü ikameli çimentolar için 2., 7., 28., 56. ve 90. günlük basınç dayanımlarını tespit etmiştir. Ayrıca kritik süre olan 28. hidrasyon gelişimindeki özellikler SEM, TG, XRD, FT-IR gibi analiz tekniklerini kullanmıştır. Ulaşılan sonuçları mukayese ederek, pirinç kabuğu külünün çimento yerine ikame edilmesiyle meydana gelen reaksiyonu tespit etmeye çalışmıştır. Pirinç kabuğu külü ikame edilmesiyle; su ihtiyacı ve priz süresinin arttığı, hidrasyon süresi boyunca meydana gelen portlandit miktarının azaldığı kanaatine varılmıştır.

Uygunoğlu, T. vd., 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada beton kilitli bloklara çimento yerine uçucu külün ve kırma kumtaşı agregasının yerine farklı atıkların kullanılmasının

etkilerini incelemişlerdir. Beton kilitli blokların basınç mukavemeti, çekme yarma mukavemeti, yoğunluk, görünür gözeneklilik, ağırlığa göre su emme, aşınma direnci, alkali-silika reaksiyonu ve donma-çözülme direnci testleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda kırma kum taşının beton atığı ve mermer atığı ile değiştirilmesinin daha düşük fiziksel ve mekanik özelliklerle sonuçlandığı görülmüştür. Buna karşılık, çimentonun uçucu kül ile değiştirilmesi (%10'dan %20'ye kadar), beton parke bloklarının önemli özelliklerini arttırmada önemli bir etkiye sahip olduğu kanaatine varılmıştır.

2.5. Kireç ve Puzolan ile Yapılan Çalışmalar

Malıkzade A. (2021)'nin yapmış olduğu araştırmanın amacı, alüvyonlu yol dolgusunun stabilizasyonunda kireç ve uçucu külün rolüne ilişkin bir analiz ve değerlendirme yapmaktır. Bu amaca sistematik olarak ulaşmak için öncelikle dane boyutunun alüvyon zemin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Geoteknik indeks özelliklerini belirlemek için; yaş elek analizi, plastik limit, likit limit, özgül ağırlık, standart sıkıştırma testleri yapılmıştır. Alüvyonal zeminin sıkıştırma özellikleri ve uçucu külün alüvyonal zeminlerin sıkıştırma davranışına etkisi incelenmiştir. % 2, % 4, %6, %10 oranlarında kireç ve %10, %15, %20 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Kürlenme süresinin alüvyonal zeminlerin CBR üzerindeki etkisini incelemek için farklı kürlenme süreleri uygulanmıştır. Kireç ve uçucu kül ilavesinin alüvyonal zeminlerin CBR değerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmış olmakla beraber alüvyonal zeminlerin CBR değerini hem dane boyutu hem de kürlenme süresi etkilediği ortaya çıkmıştır.

Barış K (2016), doğal puzolan katkılı kireç bağlayıcının otoklavla kür koşullarının değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmacı kür koşullarını araştırarak, puzolan katkılı kireç harcı üzerinde, su ve sıcaklık etkisinin bir arada sağlandığı düşük sıcaklık ve buhar basınçlı otoklav kürünün en iyi sonuçları verdiği kanaatine vararak çalışmasında otoklav kürünü kullanmayı tercih etmiştir.

Bu çalışmanın amacı, Datça çevresindeki volkanik tüfler ve sönmüş kireç karışımından üretilen hidrolik bağlayıcı malzemenin, yapı bloğu olarak kullanımını araştırmak ve yapılarda sıva ve derz harcı olarak kullanım olanaklarını belirlemektir.

Ünver (2008), 'kireç ve uçucu kül ile iyileştirilmiş şişebilen killerin şişme ve esneklik modülü odaklı olarak statik ve tekrarlı yükler altındaki özellikleri' adlı çalışma yapmıştır. Bu çalışma kapsamında Bilkent kili ve Esenboğa kili olmak üzere iki farklı kil tipi üzerinde denemeler yapılmıştır. Her iki kile de farklı oranlarda olmak üzere yalnız kireç,

yalnız uçucu kül ve uçucu kül ile kireç birlikte eklenerek çeşitli testler yapılmıştır. Bu çalışmada sönmüş kireç katkısının her iki yüksek plastisiteli şilen kilin iyileştirilmesinde (özellikle şişme özelliklerinde) oldukça iyi sonuçlar verdiği ancak uçucu kül katkısının yalnız başına kullanımının aynı sonuçları vermediği sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu nedenler uçucu külün bu tarz killerle birlikte kullanılmasında kriterleri sağlayabilmesi için kireç veya çimento ilavesiyle kullanılması tavsiye edilmiştir. Son olarak endüstriyel bir atık olan uçucu külün zemin iyileştirmesinde kullanılarak değerlendirilmesi özellikle ekonomik ve çevresel açılardan oldukça avantajlı olduğuna dikkat çekilmiştir.

Görüldüğü gibi gerek puzolan gerekse kireç zemin iyileştirme çalışmalarında da sıklıkla kullanılmaktadır.

2.6. Alçı ve Puzolan ile Yapılan Çalışmalar

Cengiz O. (2009), doktora tez çalışmasında doğal alçı hamurlarına puzolan ilavesi yapmış ve kür koşullarının dayanıma ve suya dayanıklılığa nasıl etki ettiğini incelemiştir. Bu çalışmada, doğal alçıya puzolan katımının ve değişik kür rejimleri uygulamanın alçılı karışımların suya dayanıklılıkları ve dayanımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 13 değişik tip karışımdan oluşan toplam bin yüz yirmi iki adet 5'er cm'lik küpler hazırlanarak çeşitli deneyler uygulanmış ve bu deneylerin sonucunda, puzolan içeren alçı karışımlarının suya dayanıklılıklarının arttığı ve dayanım özelliklerinde gelişmeler kaydedildiği görülmüştür. Ayrıca gelişmeye katkı sağlayan bir diğer etmen de yüksek sıcaklıkta kür uygulamasıdır. Çalışmada alçı harçlarına puzolan ilavesi yapılarak ve yüksek sıcaklıkta kürlenerek hazırlanan karışımların dış cephede de kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

Yazıcı H. (2014) ise, doktora tez çalışmasında termik santralin atığı olan alçı, uçucu kül ve taban külünün değerlendirmenin büyük önem arz ettiğine değinerek termik santral baca temizliği için kullanılan yapay alçı olarak adlandırılan alçının kullanımının yaygınlaşmadığından dem vuran çalışmacı bu üç atığın birlikte değerlendirildiği bir çalışma yapmıştır. İçerisine farklı malzemeler de ekleyerek dayanımına katkı sağlayan Yazıcı, %90 oranında atık içeren malzemenin taşıyıcı olmayan kompozit malzemelerde kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

2.7. Alçı, Kireç, Puzolan ile Yapılan Çalışmalar

Damar Tekin (2014) yaptığı yüksek lisans tezi çalışmasında farklı oranlarda uçucu kül ve kireç kullanılarak 5 farklı karışım hazırlamış ve %10 alçı (kartonpiyer alçısı, fosfojips ve kalsine olmak üzere 3 farklı türde alçı) ilaveli ve ilavesi karışımları karşılaştırmıştır. Bunun sonucunda uçucu külün artması ile tane boyutuna bağlı olarak boşluk azalmış ve işlenebilirlik artmıştır. Yine uçucu küle bağlı olarak puzolanik reaksiyonların 28 günde gerçekleşmesiyle 28. gün basınç dayanımlarının arttığını gözlemlemiştir. Kireç oranı arttığında su ihtiyacı artmış ve buna bağlı olarak dayanım düşmüştür. Alçılı Karışımların mekanik özelliklerinin alçısız karışımlara göre daha iyi olduğunu gözlemlemiştir.

Demir İ. ve Başpınar M. 2008 yılında Uçucu kül-kireç-alçı karışımının teknik özellikleri üzerine silis dumanı ve genleşmiş perlit ilavesinin etkisi adlı çalışma yapmışlardır. Bu çalışmadaki temel amaç farklı puzolan katkılarının çimento içermeyen hafif bloğa etkilerinin araştırılmasıdır. Bunun için fiziksel, mekanik ve termal özellik tespiti için numunelere farklı testler uygulanmıştır. Uçucu kül, kireç, alçı karışımına geliştirilmiş perlit ilavesi sonucu ısı iletkenliğinin iyileştirildiği görülmüştür. Silis dumanı ve geliştirilmiş perlitin birlikte kullanılması sayesinde ise optimum mukavemet, ısı iletkenlik kombinasyonu elde edilmiştir.

2.8. Kireç, Puzolan ve Atık Malzeme ile Yapılan Çalışmalar

Beydemir (2007), yüksek lisans tezi için yapmış olduğu araştırmada kireç harcı üretimi esnasında puzolanik birer malzeme olan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, endüstri atığı mineral katkı maddeleri kullanılmıştır. Bu maddeler kireç miktarının %30'u oranında katılmış dört farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Agregata olarak silis esaslı standart kum kullanılmıştır. Belirlenen 4 grup numunede 7. 28. ve 365. günlerde eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Puzolanların taze harç özelliklerine, eğilme ve basınç dayanımına etkisi bir yıl süren mekanik deneyler ile araştırılmış puzolanların dayanıklılığa etkisi kapsam dışı bırakılmıştır. Deney sonuçlarına göre kireç harcına belirli oranda puzolan malzeme katılması harçların dayanımını arttığını belirtmiştir.

Vergül (2019) ise yüksek lisans tezi çalışmasının sonucunda, bu araştırmada kullanılmış olan silis dumanının çok iyi hidrofobik özellik gösteremediği, kullanılan çinko stearat ile

kalsiyum stearatın da iyi bir mekanik davranış gösteremediği gözlenmiştir. Buna karşın silis dumanının sıva örneklerinin mekanik özelliklerini arttırarak dayanımlarına katkı sağladığı, çinko stearat ile kalsiyum stearatın ise sıva numunelerinin hidrofobik özelliklerini arttırarak su geçirmeyen yüzeyler elde edilmesini sağladıkları ve bundan dolayı durabilite özelliklerinde iyileşmeler sağlandığı gözlenmiştir.

2.9. Alçı, Kireç, Puzolan ve Atık Malzeme ile Yapılan Çalışmalar

Aubert vd. tarafından 2012 yılında, kireç ve alçı karışımlarına mineral ilavesinin reaktiviteyi nasıl etkilediğini ölçmek için bir makale hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan mineral ilaveleri; silisli dolgu, puzolan, atık kağıt çamur külüdür. Referans olarak silisli dolgu ilaveli numune tercih edilmiştir. Kalsiyum alüminat içeriği nedeniyle önemli miktarda alçı tüketen, hidrolik olan atık kağıt çamur külü kullanılan numunelerde kirecin hiçbir amaca hizmet etmediği görülmüştür. Çalışma sonucunda iki farklı karışım oranı kimyasal açıdan optimize edilmiştir: %80 puzolan+ %15 kireç+ %5 alçı ve %80 atık kağıt çamur külü+%20 alçı. Bu karışımlarda etrenjit oluşumu nedeniyle genleşmeler meydana gelebileceği anlaşılmıştır. Son olarak Aubert vd. yöntemin kesinliğini geliştirmek için benzer çalışmalar yapılmasını, ayrıca killi toprak, metakaolin veya uçucu küller üzerinde de deneme yapılması için öneriler sunmuşlardır.

Geçmişte yapılan çalışmalar da incelendiğinde birçoğunun hedefinin yapı malzemelerinin çevremize vermiş olduğu zararları göz ardı etmeyerek verilen zararların en aza indirilmesi adına alternatif yapı malzemeleri üretmek olduğu görülmektedir. Bu amaç doğrultusunda çalışmada farklı atık malzemeler kullanılmış ve sonuçları incelenmiştir.

Ve son olarak bu çalışmada da Kireç-Alçı-Puzolan ve Kireç ikame malzemesi olarak çeşitli atıklar kullanılarak eski yapılmış çalışmalarda hedeflendiği gibi doğaya verilen zararı azaltarak özellikleri iyileştirilmiş bir malzeme üretmek amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Malzemeler

Çalışmada ana bağlayıcı olarak kireç ve alçı kullanılmıştır. Kullanılan alçı ve kireç ticari ürün olarak temin edilmiştir. Puzolanik katkı olarak uçucu kül (UK), metakaolin (MK) ve pirinç kabuğu külü (PK) kullanılmıştır. Çalışmanın başlangıç ve deneme çalışmaları aşamalarında yüksek silis kaynağı olabilecek bir puzolanik katkı olarak silis dumanı seçilmiştir. Ancak ön denemeler sonunda silis dumanı ile üretilen örneklerin dağılması ve hiçbir dayanım gösterememesi sonucu başka bir yüksek silis içeriğine sahip puzolan kullanılmış, pirinç kabuğu külü ile çalışmalara devam edilmiştir. Kullanılan uçucu kül Çatalağzı Termik Santrali'ne ait olup, F sınıfı uçucu küldür. Metakaolin ve pirinç kabuğu külü ise ticari olarak temin edilmiştir. Pirinç kabuğu külü kullanılmadan önce 60 dk süreyle bilyeli değirmende öğütülmüştür. Kullanılan temel malzemelerin ve puzolanların özellikleri Tablo 3.1'de verildiği gibidir.

Tablo 3.1: Temel malzemelerin ve puzolanların özellikleri

Kimyasal Bileşen (%)	Alçı	Kireç	Çatalağzı Uçucu Külü	Metakaolin	Pirinç Kabuğu Külü
SiO ₂	0,30	0,47	58,70	50,02	42,71
Al ₂ O ₃	0,06	0,13	24,37	45,69	0,55
Fe ₂ O ₃	0,06	0,13	5,65	0,22	1,12
CaO	33,30	79,56	1,96	0,25	3,30
MgO	-	-	1,87	0,20	-
Na ₂ O	-	-	3,38	0,05	2,01
K ₂ O	-	0,06	3,70	0,20	2,01
SO ₃	32,61	0,62	0,43	-	1,27
Cl ⁻	-	-	0,05	-	0,03
Yoğunluk (g/cm ³)	2,93	2,24	2,23	2,53	2,15

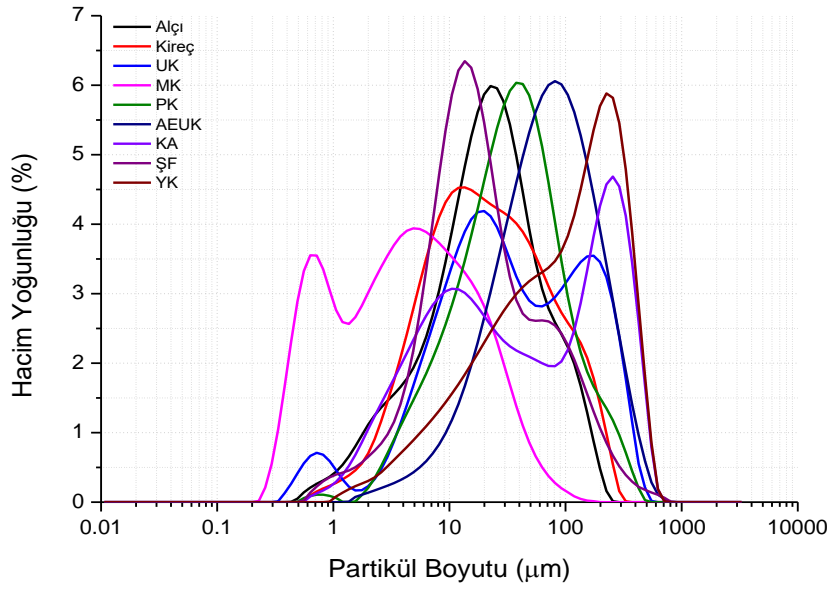
Kireç yerine kullanılacak atık malzemeler ise sırasıyla Afşin-Elbistan uçucu külü (AEUK), şeker fabrikası atığı (ŞF), kolemanit atığı (KA) ve yumurta kabuğudur (YK). Afşin-Elbistan uçucu külü, Afşin-Elbistan Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Şeker fabrikası atığı ise Elbistan'da faaliyet gösteren bir şeker fabrikasından elde edilmiştir. Kolemanit atıkları ETİ Maden işletmelerinin Kütahya / Emet tesislerinde oluşan triyaj atıklarından elde edilmiştir. Yumurta kabukları ise Bartın'da faaliyet gösteren pastanelerden

toplanmıştır. Şeker fabrikası atığı, kolemanit atığı ve yumurta kabukları bilyeli değirmende öğütülerek toz hale getirilmiştir. Yumurta kabukları bilyeli değirmende öğütülmeden önce 105 °C’de 24 saat bekletilmiştir. Kireç ikamesi olarak kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

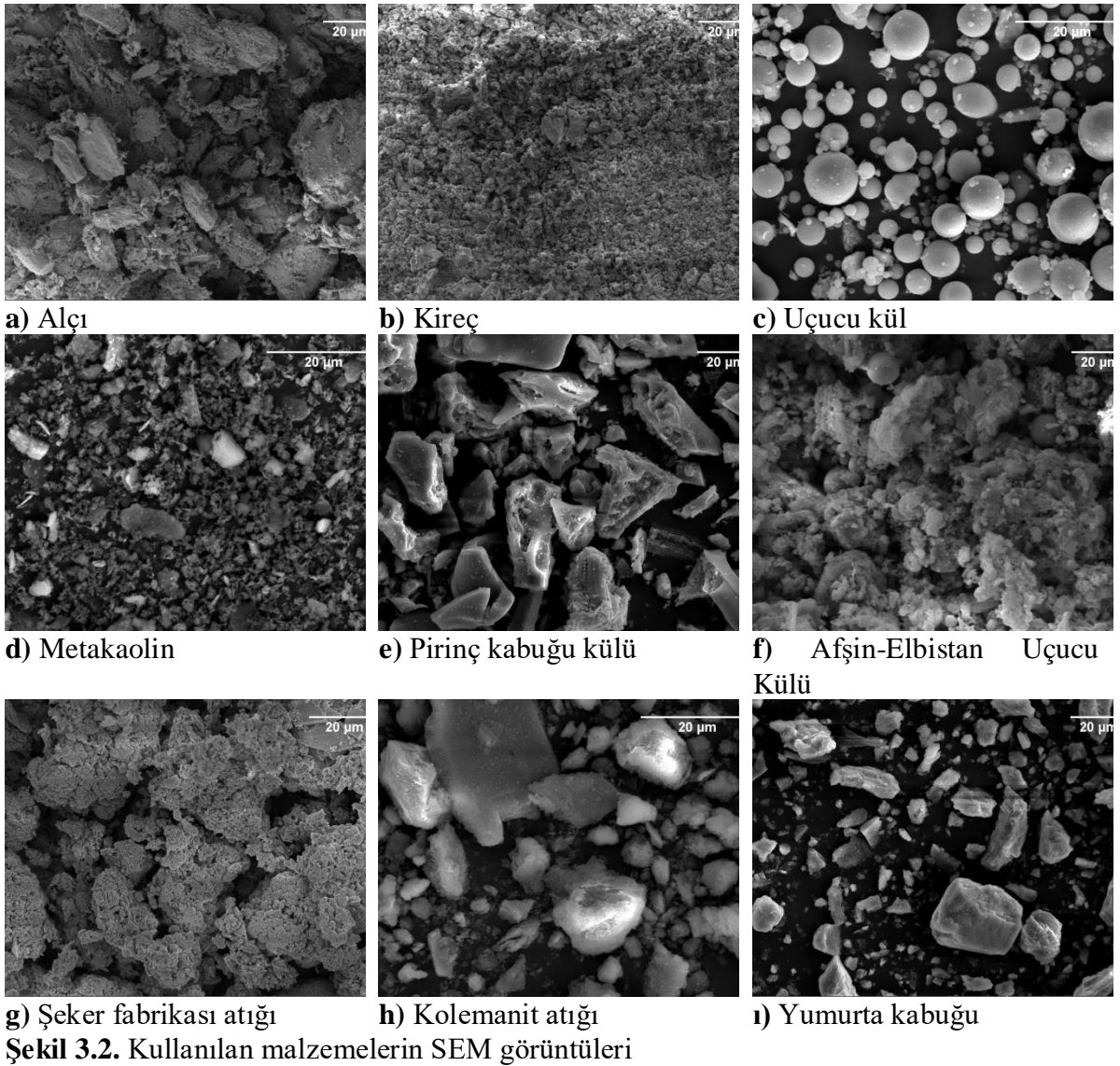
Tablo 3.2: Kireç ikamesi olarak kullanılan malzemelerin özellikleri

Kimyasal Bileşen (%)	Afşin-Elbistan Uçucu Külü	Şeker Fabrikası Atığı	Kolemanit Atığı	Yumurta Kabuğu
SiO ₂	22,73	2,10	18,03	0,46
Al ₂ O ₃	9,67	0,55	7,23	0,10
Fe ₂ O ₃	4,63	1,26	0,34	0,12
CaO	42,94	61,81	23,45	67,23
MgO	1,99	-	18,98	-
Na ₂ O	0,28	-	0,10	-
K ₂ O	0,52	0,22	-	0,10
SO ₃	9,01	0,58	0,40	2,28
B ₂ O ₃	-	-	2,30	-
Cl ⁻	0,01	-	-	0,03
Yoğunluk (g/cm ³)	2,91	2,11	2,14	2,56

Kullanılan malzemelerin bazılarının hazır toz formda temin edildiği gibi bazıları öğütme işlemi sonrası toz hale getirilmiştir. Bu nedenle malzemelerin partikül boyutlarının bilinmesi önemlidir. Şekil 3.1. kullanılan malzemelerin partikül boyutu analizlerini göstermektedir. Şekil 3.2.’de ise kullanılan malzemelerin SEM (taramalı elektron mikroskobu) altındaki tane yapıları görülmektedir.



Şekil 3.1: Toz malzemelerin partikül boyutu analizleri



Şekil 3.2. Kullanılan malzemelerin SEM görüntüleri

3.2. Metot

3.2.1. Karışım Oranları ve Örneklerin Üretilmesi

Çalışmanın başlangıç aşaması olarak öncelikle alçı-kireç ve puzolan karışımındaki alçı, kireç ve puzolan miktarının ne kadar seçileceği araştırılmıştır. Yapılan literatür incelemeleri sonucu benzer çalışmalarda kullanılan en yaygın karışım oranları göz önüne alınarak deneme üretimleri yapılmış ve çalışmada devamında kullanılacak olan tasarım belirlenmiştir. Kullanılan ön deneme oranları Tablo 3.3.'de verilmiştir. Deneme karışımlarında puzolan olarak uçucu kül kullanılmıştır.

Tablo 3.3: Ön denemelerde kullanılan karışım oranları

Deneme No	Karışım oranları (%)			Yayılma (cm)	Uygulanan Kür Yöntemleri	Uygulanan Testler
	Alçı	Kireç	Puzolan			
1	9,5	63,3	27,2	15-18	•Buhar Kürü •Nem Kürü	• Basınç testi • Eğilme testi
2	9,5	53,5	37			
3	9,5	47,6	42,9			
4	16,8	58,2	25			
5	16,8	49,2	34			
6	16,8	43,4	39,8			

Yapılan ön denemeler sonucunda 6 karışım içerisinde en iyi sonuç toplam bağlayıcı miktarı %100 kabul edildiğinde %16,5 alçı - %43,4 kireç - %39,8 puzolan kullanılan 6 numaralı karışımdan elde edilmiştir. Buna göre belirlenen karışım oranları kullanılarak puzolanlar değiştirilmiş (UK-MK ve PK olarak) ayrıca kireç yerine atık kireç kaynakları ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında kullanılmıştır. Taze örnekler TS EN 1015-3'e göre yayılma testi uygulanmıştır. Bütün karışımların yayılma değeri 15-18 cm arasında olacak şekilde karışım suyu ayarlaması yapılmıştır. Tablo 3.4. karışım oranlarını göstermektedir. Tabloda verilen kodlar, daha önce verilen puzolanların ve kireç ikame malzemelerinin kısaltılmış isimleri ve kullanım oranları kullanılarak oluşturulmuştur. Örneğin UKAE10 kodunun ilk iki harfi kullanılan puzolanı (uçucu kül), ikinci iki harfi ise kullanılan ikame malzemesini ifade etmektedir (Afşin-Elbistan uçucu külü). Sonra gelen sayı ise kireçte ikame oranını ifade etmektedir (ağırlıkça %10 kireçten ikame). R harfi içeren kodlar ise "Referans" örnekleri belirtmektedir. Bu örnekler kireç yerine atık malzeme ikamesi yapılmadan, yalnızca kireç kullanılarak üretilen örnekleri ifade etmektedir.

Tablo 3.4: Karışım dizaynı (% ağırlıkça)

Kod	Alçı	Kireç	Kum	UK	MK	PK	AEUK	ŞF	KA	YK
UK-R	5,6	14,4	66,7	13,3	-	-	-	-	-	-
UK/AE-10	5,6	12,96	66,7	13,3	-	-	1,44	-	-	-
UK/AE-20	5,6	11,52	66,7	13,3	-	-	2,88	-	-	-
UK/AE-30	5,6	10,08	66,7	13,3	-	-	4,32	-	-	-
UK/ŞF-10	5,6	12,96	66,7	13,3	-	-	-	1,44	-	-
UK/ŞF-20	5,6	11,52	66,7	13,3	-	-	-	2,88	-	-
UK/ŞF-30	5,6	10,08	66,7	13,3	-	-	-	4,32	-	-
UK/KA-10	5,6	12,96	66,7	13,3	-	-	-	-	1,44	-
UK/KA-20	5,6	11,52	66,7	13,3	-	-	-	-	2,88	-
UK/KA-30	5,6	10,08	66,7	13,3	-	-	-	-	4,32	-
UK/YK-10	5,6	12,96	66,7	13,3	-	-	-	-	-	1,44
UK/YK-20	5,6	11,52	66,7	13,3	-	-	-	-	-	2,88
UK/YK-30	5,6	10,08	66,7	13,3	-	-	-	-	-	4,32
MK-R	5,6	14,4	66,7	-	13,3	-	-	-	-	-
MK/AE-10	5,6	12,96	66,7	-	13,3	-	1,44	-	-	-
MK/AE-20	5,6	11,52	66,7	-	13,3	-	2,88	-	-	-
MK/AE-30	5,6	10,08	66,7	-	13,3	-	4,32	-	-	-
MK/ŞF-10	5,6	12,96	66,7	-	13,3	-	-	1,44	-	-
MK/ŞF-20	5,6	11,52	66,7	-	13,3	-	-	2,88	-	-
MK/ŞF-30	5,6	10,08	66,7	-	13,3	-	-	4,32	-	-
MK/KA-10	5,6	12,96	66,7	-	13,3	-	-	-	1,44	-
MK/KA-20	5,6	11,52	66,7	-	13,3	-	-	-	2,88	-
MK/KA-30	5,6	10,08	66,7	-	13,3	-	-	-	4,32	-
MK/YK-10	5,6	12,96	66,7	-	13,3	-	-	-	-	1,44
MK/YK-20	5,6	11,52	66,7	-	13,3	-	-	-	-	2,88
MK/YK-30	5,6	10,08	66,7	-	13,3	-	-	-	-	4,32
PK-R	5,6	14,4	66,7	-	-	13,3	-	-	-	-
PK/AE-10	5,6	12,96	66,7	-	-	13,3	1,44	-	-	-
PK/AE-20	5,6	11,52	66,7	-	-	13,3	2,88	-	-	-
PK/AE-30	5,6	10,08	66,7	-	-	13,3	4,32	-	-	-
PK/ŞF-10	5,6	12,96	66,7	-	-	13,3	-	1,44	-	-
PK/ŞF-20	5,6	11,52	66,7	-	-	13,3	-	2,88	-	-
PK/ŞF-30	5,6	10,08	66,7	-	-	13,3	-	4,32	-	-
PK/KA-10	5,6	12,96	66,7	-	-	13,3	-	-	1,44	-
PK/KA-20	5,6	11,52	66,7	-	-	13,3	-	-	2,88	-
PK/KA-30	5,6	10,08	66,7	-	-	13,3	-	-	4,32	-
PK/YK-10	5,6	12,96	66,7	-	-	13,3	-	-	-	1,44
PK/YK-20	5,6	11,52	66,7	-	-	13,3	-	-	-	2,88
PK/YK-30	5,6	10,08	66,7	-	-	13,3	-	-	-	4,32

Karışımları hazırlamak için laboratuvar tipi çimento mikseri kullanılmıştır. Bütün toz malzemeler mikserde konularak 60 s boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyu eklenerek 180 s boyunca homojen bir karışım elde edilebilmesi için karıştırılmıştır. Üretilen örneklerin TS EN 1015-3'e göre kıvam tayinleri yapılmıştır. Örnekler 40x40x160 mm boyutlara sahip kalıplara yerleştirilmiş ve vibrasyona tabi tutulmuştur. Kalıplara yerleştirilen örnekler streç film ile sarılmıştır. Bu şekilde nem kaybı engellenerek 3 gün boyunca kalıpta bekletilmiştir. 3. günün sonunda kalıptan çıkartılan örneklere 2 farklı kür

yöntemi uygulanmıştır. Bir kısım örnekler 70 °C’de 6 gün boyunca buhar kürüne maruz bırakılmıştır. Diğer kısım örnekler ise içerisinde su bulunan kapalı bir kap içerisinde direkt olarak suya temas etmeden, 90 gün boyunca nem ile kürlenmiştir. Proje öneri aşamasında 28 ve 90 günlük olarak iki kür süresi ön görülmüş ancak deneme çalışmaları 28 günlük sürenin örneklerin dayanım kazanması için yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Bu nedenle sadece 90 günlük kür süresi esas alınmıştır. Şekil 3.3’de üretim aşamalarından bazı görüntüler görülmektedir.



Şekil 3.3: Örneklerin üretim aşamaları

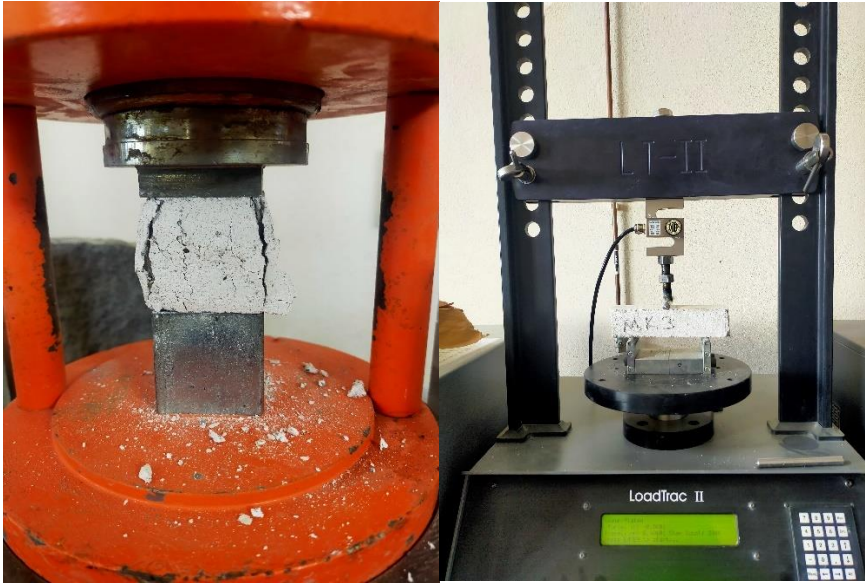
3.2.2. Deneysel Çalışma

Kürleme işlemi tamamlanan örnekler testler uygulanmadan önce etüve konularak 40 °C’de 24 saat bekletilmiştir. Kurutulan örneklerin ağırlıkları tartılarak birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra örnekler ASTM C597 standardına uygun olarak ultrasonik ses geçiş hızı testine tabi tutulmuştur. Aynı zamanda ASTM C20 standardına uygun olarak örneklerin su emme ve görünür porozite testleri gerçekleştirilmiştir. TS EN 1015-18’e

uygun olarak kılcal su emme testi gerçekleştirilmiştir. TS EN 196-1 standardına uygun olarak eğilme ve basınç testleri uygulanmıştır. Şekil 3.4'de deneysel çalışmalardan bazı görüntüler verilmiştir.



a) Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Görünür Porozite Testleri



b) Basınç ve Eğilme Testleri



c) Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Testi

Şekil 3.4: Deneysel Çalışmalar

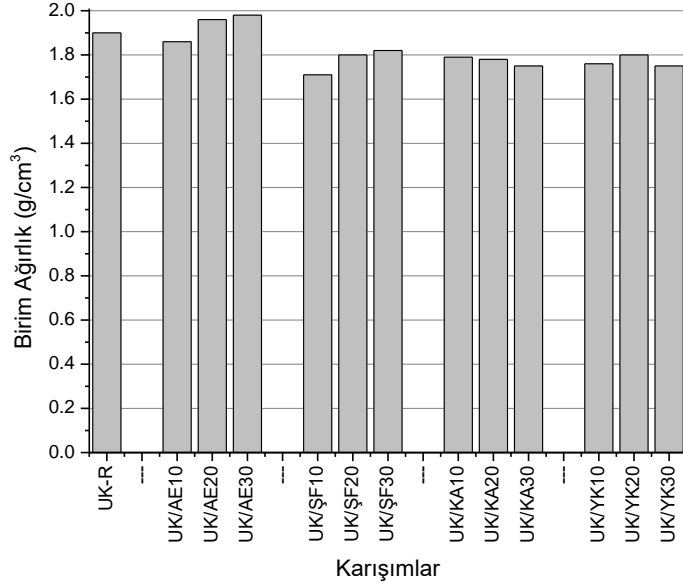
Testleri tamamlanmış bazı harçlardan örnekler alınarak mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Hammaddelerin ve örneklerin barındırdıkları fazları analiz etmek için XRD (X-Işını Difraktometresi) kullanılmıştır. Oluşan reaksiyon ürünlerinde sıcaklıkla meydana gelen bozunmalar ve buna karşılık gelen kütle kayıplarını incelemek için TGA (Termogravimetrik Analiz) yöntemi kullanılmıştır. Aynı zamanda seçilmiş bazı örneklerin matris yapılarının durumu, agrega taneleri ile matris yapısının uyumunu incelemek üzere SEM (taramalı elektron mikroskobu) incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

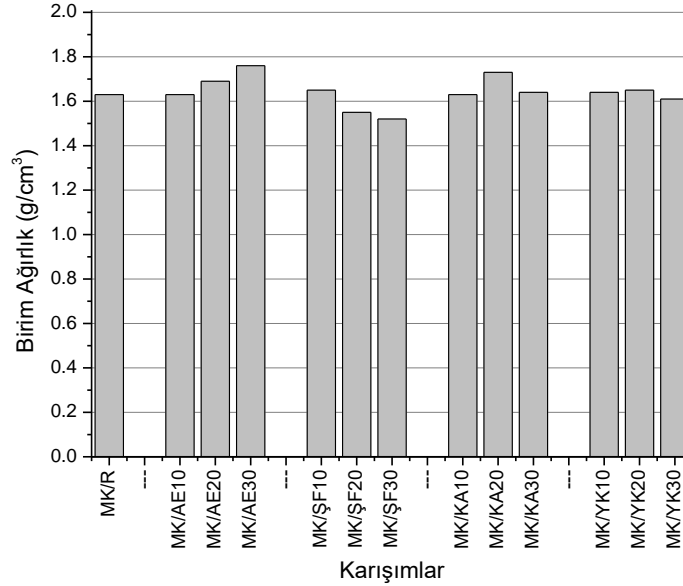
4.1. Buhar Kürü Uygulanmış Örneklerin Sonuçları

4.1.1. Birim Ağırlık

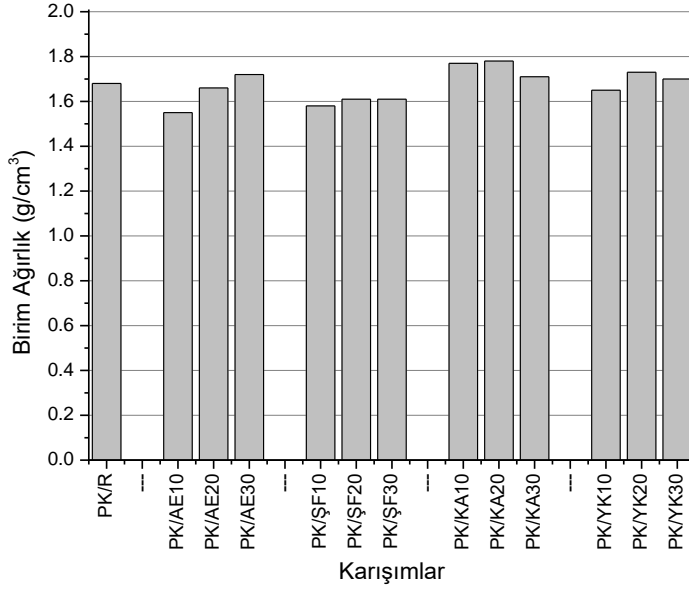
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örnekler için birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.1: UK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları



Şekil 4.2: MK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları



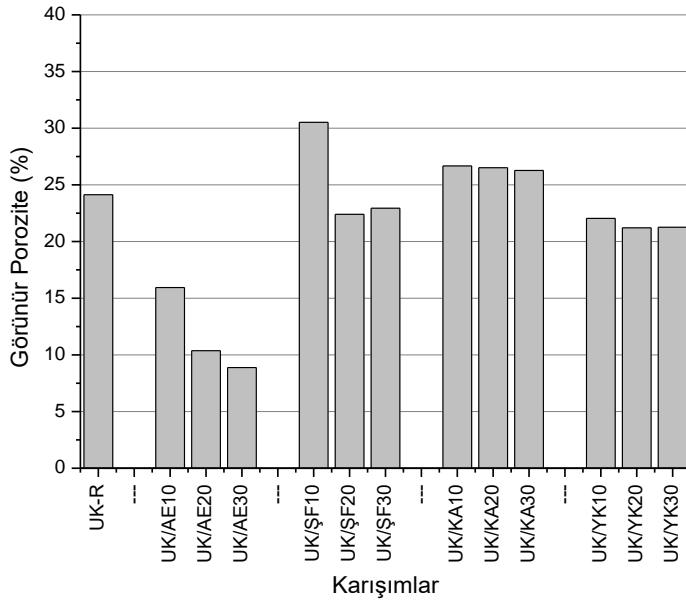
Şekil 4.3: PK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları

UK içeren örneklerin birim ağırlıkları $1,71 - 1,98 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Bu aralık MK içeren örnekler için $1,52 - 1,76 \text{ g/cm}^3$ olurken PK içeren örnekler için ise $1,55 - 1,78 \text{ g/cm}^3$ 'tür. UK serisi için en düşük birim ağırlık UK/ŞF10 örneğinden elde edilmiştir. Bu örnek MK serisinde MK/ŞF30 ve PK serisinde PK/AE10'dur. Birim ağırlığı en yüksek örnekler ise UK, MK ve PK serisi için sırasıyla UK/AE20, MK/AE30 ve PK/KA20'dir. Yine belirtilen sıra ile referans serilerinin birim ağırlıkları sırasıyla 1,90, 1,63 ve 1,68 g/cm^3 olarak tespit edilmiştir. Bütün örnekler genel olarak incelendiğinde örnekler arasında çok ciddi farklılıklar oluşmadığı gözlenmektedir. Bununla birlikte UK serisinin MK ve PK serilerine göre daha yüksek birim ağırlığa sahip olduğu görülmektedir. Aslına bakılırsa kullanılan üç puzolan içerisinde yoğunluğu en yüksek olan MK'dır. Yoğunluklar üzerinden bir değerlendirme yapılırsa en yüksek birim ağırlığın MK serisinden elde edilmesi gerekmektedir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken husus, karışımların sabit su içeriği değil de sabit yayılma esasına göre tasarımının gerçekleştirilmiş olmasıdır. Bu durumda partikül boyutuna bakıldığında MK diğer puzolanlara göre daha düşük ortalama tane boyutuna sahiptir (bkz. Şekil 3.1.). Buna göre sabit kıvamı erişmek için MK serilerinde daha fazla su kullanılmış ve bünyedeki fazla suyun birim ağırlık değerlerini etkilemiş olduğu düşünülebilir. Seriler kendi içerisinde değerlendirildiğinde UK serisinde katkılı örneklerin AEUK içeren örnekler hariç referans örneğinden hafifçe daha düşük olduğu söylenebilir. MK ve PK içeren serilerde ise ortalama olarak değerlendirildiğinde katkılı örneklerin referans değerinde çok büyük sapmalar göstermediği görülmektedir. PK

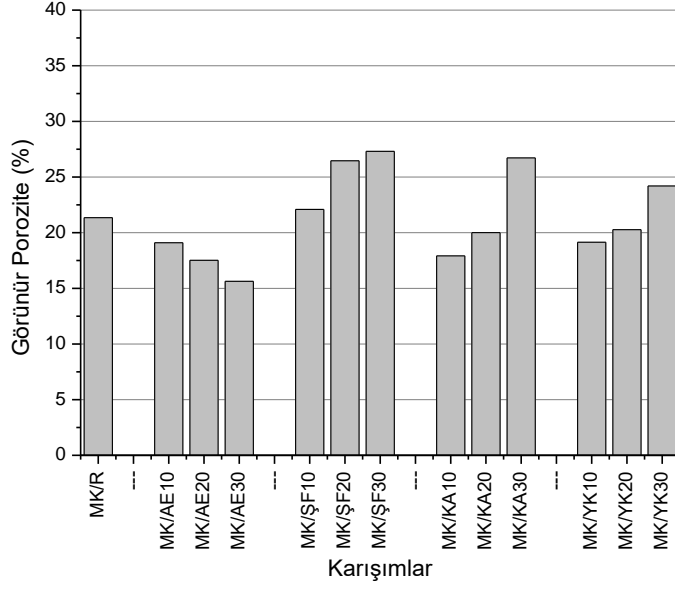
serisinde ise KA içeren örnekler referanstan hafifçe yüksek değerler vermiştir. Görhan yaptığı çalışmada uçucu kül %75 UK ve %25 kireç kullanarak ürettiği harçların birim ağırlığının $1,15 \text{ g/cm}^3$ olduğunu belirtmiştir (Görhan, 2006). Beydemir ise %30 UK ve %70 kireç kullanarak hazırladığı kireç harçlarının birim ağırlık değerini $1,88 \text{ g/cm}^3$ olarak bulmuştur (Beydemir, 2007). Damar Tekin, sabit miktarda alçı kullanarak farklı oranlarda uçucu kül-kireç kombinasyonları ile ürettiği harçlardan $1,39 - 1,59 \text{ g/cm}^3$ arası birim ağırlık değerleri elde etmiştir (Damar Tekin, 2014).

4.1.2. Görünür Porozite

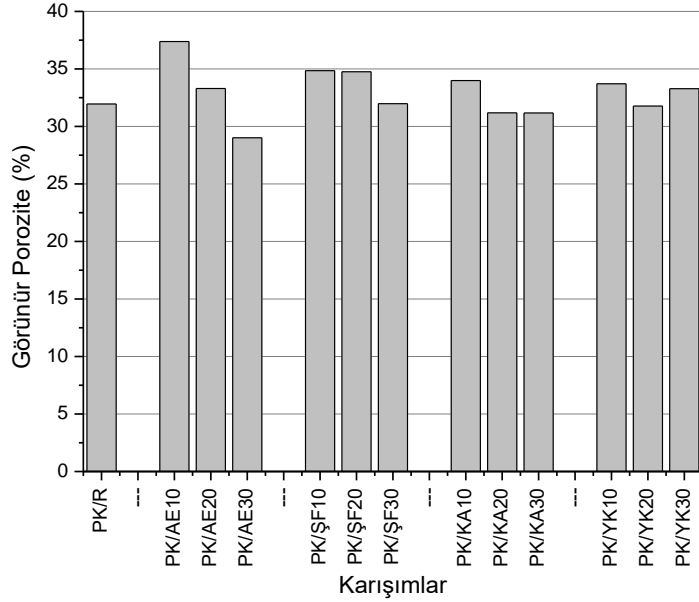
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’te verilmiştir.



Şekil 4.4: UK içeren örneklerin görünür porozite değerleri



Şekil 4.5: MK içeren örneklerin görünür porozite değerleri



Şekil 4.6: PK içeren örneklerin görünür porozite değerleri

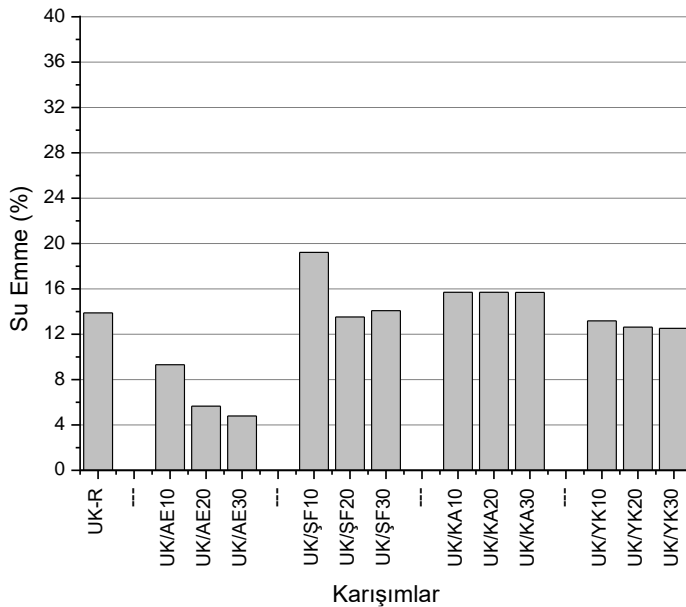
Görünür porozite testi, Arşimet prensibine göre yapılmaktadır. Yani bu durum su emebilen boşlukların miktarı ile ilişkilidir. Gerçek porozite ile aynı olmayıp, dışa kapalı boşlukların göz önüne alınmadığı bir yöntemdir. Ancak uygulama kolaylığı nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. UK serilerinde porozite değeri %8,88 – %30,52 arasında değişmektedir. Bu aralık MK serisi için %15,63 - %27,31, PK serisi için ise %29,01 - %37,38'dir. Referans örnekleri sırasıyla %24,13, %21,35 ve %31,95 değerlerine sahiptir. Her üç seri içinde en düşük porozite değeri %30 AEUK içeren örnekten elde edilmiştir. En yüksek değerler incelendiğinde UK/ŞF10, MK/ŞF30 ve PK/AE10 görülmektedir. Bütün serilerinde AEUK grubu ortalama en düşük poroziteye sahip grup olarak değerlendirilebilir. PK serisinin

incelendiğinde porozite değerleri sınırlı bir aralık içerisinde dağılmış ve belirgin farklılıklar göstermemiştir. Özellikle UK serisi için olmak üzere, UK ve MK serisinde AEUK kullanımının porozitede önemli bir düşüşe neden olduğu söylenebilir. PK serisi için bu durum yalnızca %30 AEUK kullanımında söylenebilir. PK ve MK serilerinde ŞF kullanımı her koşulda poroziteyi artırırken, UK serisinde yalnızca %10 ŞF kullanımı böyle bir etki göstermiştir. KA ve YK kullanımı için ise seriler arasında ve serilerin kendi içerisinde tutarsızlıklar mevcuttur. Her üç seri içinde ortak olan ve vurgulanması gereken bir başka nokta ise AEUK kullanım oranının artışı, kullanılan puzolandan bağımsız olarak porozitede bir azalma sağlamıştır. Bu durum kullanılan puzolanla ve kireç arasındaki reaksiyonlara ek olarak AEUK ve kireç arasında meydana gelen muhtemel reaksiyonlardan kaynaklanabilir.

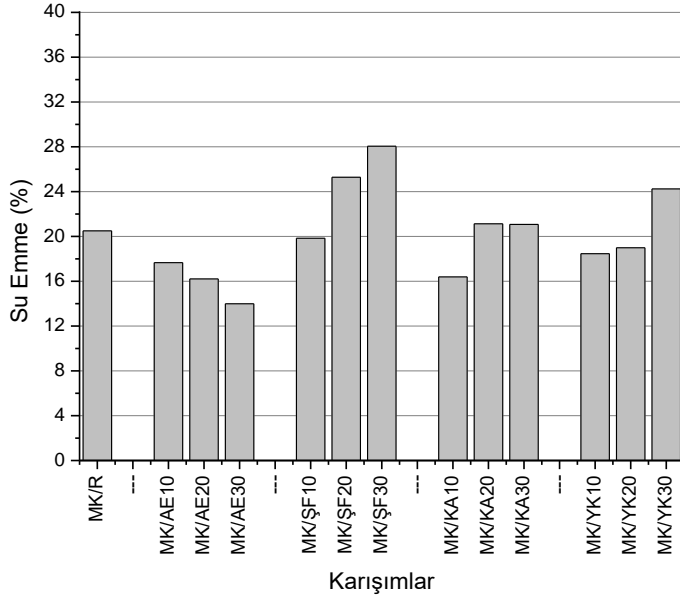
Görhan, ürettiği kireç-uçucu kül harçlarında yaklaşık %46-47 porozite olduğunu ifade etmiştir (Görhan, 2006). Bulut ise ürettiği perlitli kireç harçlarında %18 porozite olduğunu gözlemlemiştir (Bulut, 2007). Vimrova, alçı-kireç-metakaolin harçlarında en düşük %50,3 porozite değerine ulaşmıştır (Vimmrová vd., 2014). Demir ve Başpınar ise ürettikleri uçucu kül-alçı-kireç üçlü karışımında %55,8 porozite olduğunu belirtmişlerdir (Demir and Baspınar, 2008).

4.1.3. Su Emme

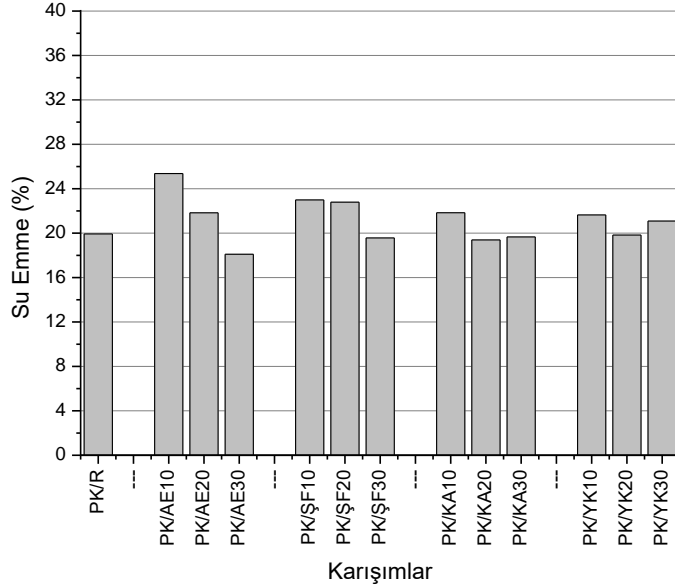
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklerle ait su emme testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.7: UK içeren örneklerin su emme değerleri



Şekil 4.8: MK içeren örneklerin su emme değerleri



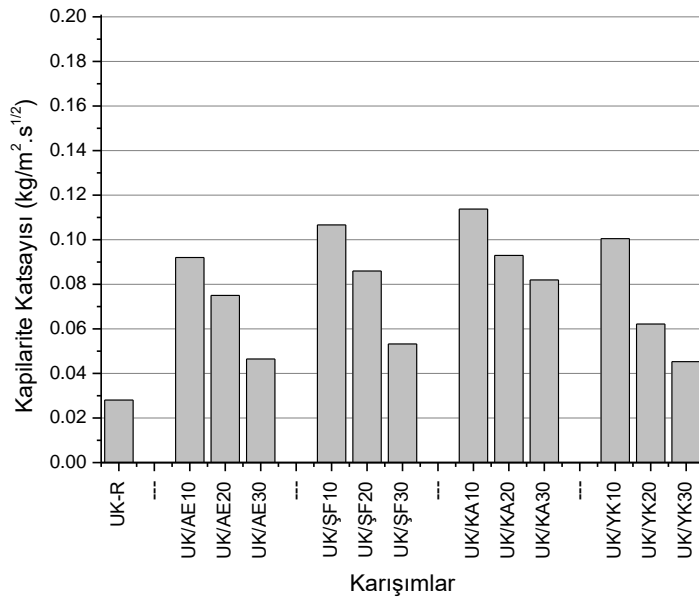
Şekil 4.9: PK içeren örneklerin su emme değerleri

Örneklerin su emme değerleri incelendiğinde, elde edilen eğilimlerin çok büyük oranda görünür porozite sonuçlarının eğilimleri ile örtüştüğü görülmektedir. UK serisinin su emme değerleri %4,79 - %19,22 arasında değişmektedir. Bu aralık MK serisi için %16,21 – %28,05 ve PK serisi için %18,10 - %25,37’dir. Referans örneklerinin su emme değerleri sırasıyla %13,88, %20,50 ve %19,93’tür. En düşük su emme değerleri her üç seri için de %30 oranında AEUK içeren örneklerden elde edilmiştir. En yüksek değerler ise UK/ŞF10, MK/ŞF30 ve PK/AE10 örneklerinden elde edilmiştir. UK serisi için AEUK kullanımının su emme üzerinde olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Diğer taraftan %10 ŞF kullanımı

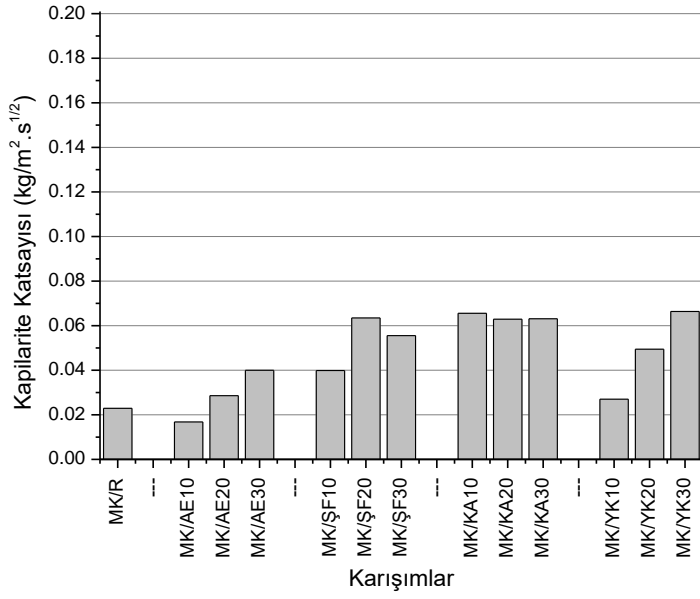
olumsuz bir etki oluşturmuş ancak %20 ve %30 oranları referans değerlere oldukça yakın değerler vermiştir. KA kullanımı su emme değerini hafifçe artırmış ancak kendi içerisinde KA oranının değişiminin çok etkili olmadığı görülmüştür. Aynı durum YK kullanımı için de geçerlidir, ancak KA'nın tersine, YK kullanımı değerleri hafifçe azaltmıştır. AEUK kullanımı MK serisi içinde olumlu bir etki göstermiştir. Kullanım oranı arttıkça bu olumlu etki daha da belirginleşmiştir. ŞF kullanımı ise UK serisinde gösterdiğinin tam tersi bir etki göstermiş, %10 oranında su emmeyi hafifçe azaltırken, %20 ve %30 değerlerinde oldukça olumsuz bir durum oluşturmuştur. KA kullanımı %10 oranında olumlu bir etki göstermiş ancak %20 ve %30 oranlarında bir değişikliğe neden olmamıştır. YK kullanımı ise %10 ve %20 oranlarında su emmeyi hafifçe azalmış, %30 oranında ise artırmıştır. AEUK kullanımı PK serisinde önceki serilerle aynı etkiyi göstermemiştir. Sadece %30 oranında kullanıldığında referanstan daha düşük değerler vermiştir. %10 ve %20 oranlarında ŞF, %10 KA ve %10 YK kullanımı su emmeyi hafifçe artırırken diğer kullanımlar çok belirgin bir etki göstermemiştir. Mavi, ürettiği kireç harcında %12,3 su emme tespit ederken, puzolan içeren kireç harçlarında bu değerlerin %11,7-%11,8 olduğunu görmüştür (Mavi, 2000).

4.1.4. Kılcal Su Emme

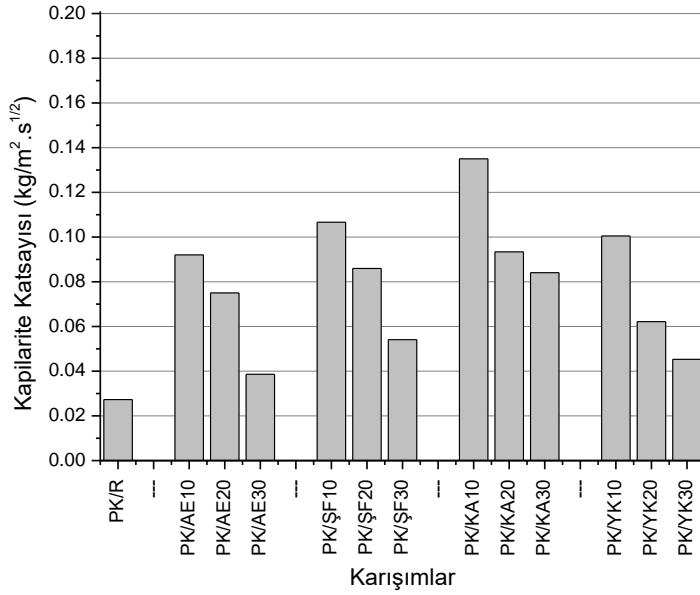
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklerle ait kılcal su emme testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.10: UK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları



Şekil 4.11: MK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları



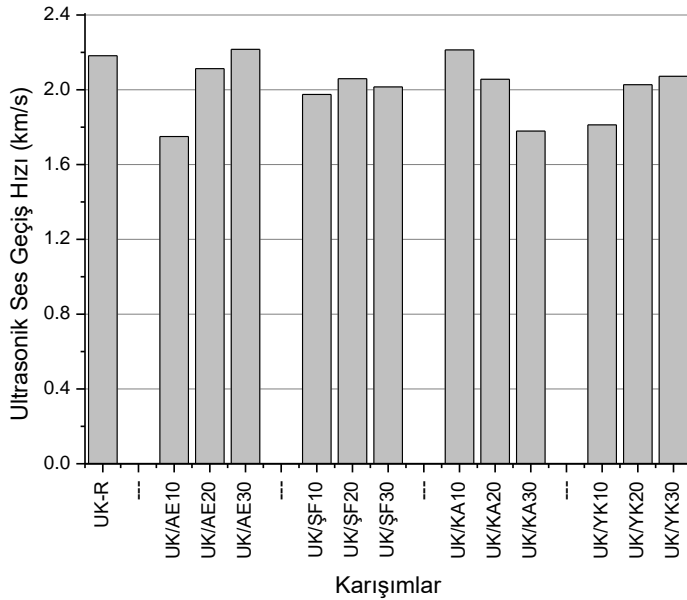
Şekil 4.12: PK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları

Grafiklerde 24 saatlik süre sonunda örneklerin kılcal yolla emdiği su miktarlarından yola çıkılarak hesaplanan kılcallık katsayıları görülmektedir. Her üç seri toplam kılcal su emilimi açısından değerlendirildiğinde MK serilerindeki kılcal su emilim oranının diğer iki seriyeye göre daha düşük olduğu görülmektedir. PK serisinin ise UK serisi ile oldukça benzer bir kılcal su emilim oranına sahip olduğu söylenebilir. 24 saatlik süre sonunda UK ve PK serilerinde en düşük kılcal su emilimi referans örneğinde görülmüştür. MK serisinde ise en

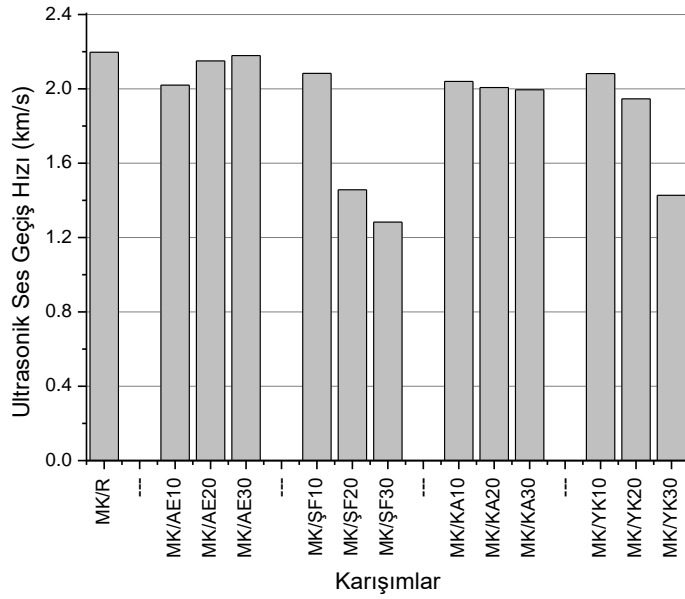
düşük kılcal su emilimi %10 AEUK içeren örnekte elde edilmiştir. Kireç yerine katkı kullanımının kılcallık açısından bütün serileri olumsuz etkilediği söylenebilir. Tüm seriler arasında MK/AE10 örneği hariç, 24 saatlik süre sonunda kılcallık katsayısının referans örneğinden düşük olduğu katkı bir örnek bulunmamaktadır. Bütün serilerde en yüksek kılcallık katsayısı ise KA10 örneklerinden elde edilmiştir. KA kullanımı genel olarak kılcallığı artırmıştır. Kılcallığı en az artıran katkı ise AEUK olmuştur. Kılcal su emilimini etkileyen en önemli etkenlerden biri kılcal boşluklarının çaplarıdır. Kireç yerine ikame katkıların kullanımının kılcal boşluk yapısını olumsuz etkilediği söylenebilir. Bu durum boşluk yapısında meydana gelen bir daralma ile açıklanabilir. Diğer taraftan genel olarak porozitede meydana gelen olumsuz etkilenmelerin de kılcal su emme üzerinde etkisinin bulunduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak kılcallık bakımından en etkili puzolanik katkının MK olduğu görülürken, en etkili kireç ikamesinin de AEUK olduğu söylenebilir. Ancak genel sonuç kireç yerine yapılan ikamelerin kılcallık açısından olumsuz bir etki oluşturduğudur.

4.1.5. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı

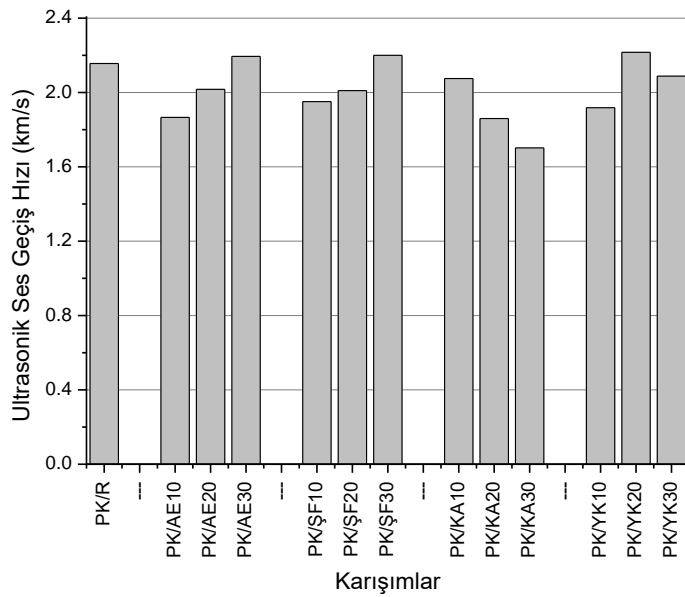
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.13: UK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri



Şekil 4.14: MK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri



Şekil 4.15: PK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri

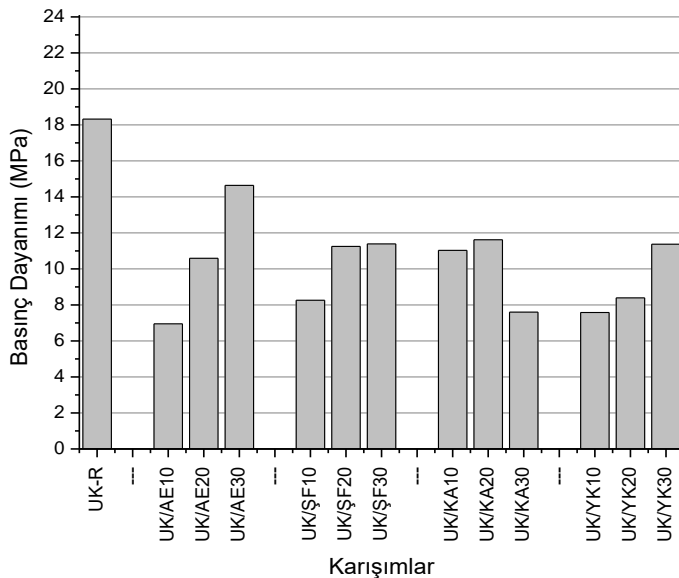
Bir örneğe ultrasonik ses dalgası gönderildiğinde, bu ses dalgası örneğin yapısında bulunan bir hava dolu boşluk veya çatlak ile karşılaştığında, ses dalgası bu kusurun dışına doğru itilir böylece boşluklu bir ortamda ses dalgasının ilerleme hızı daha yavaş olur (Concu and Trulli, 2018). Genel olarak bir örneğin boşlukluluğunun fazla olması durumunda ultrasonik ses geçiş hızı değerinin görece daha düşük olmasını, daha dolu ve sıkı bir içyapıya sahip örneklerin ise daha yüksek ultrasonik ses geçiş hızlarına sahip olmasını bekleriz. UK içeren serilerde ultrasonik ses geçiş hızı değerleri 1,75 – 2,22 km/s arasında değişmektedir.

Bu aralık MK serisi için 1,28 – 2,20 km/s ve PK serisi için 1,70 – 2,22 km/s'dir. Sırasıyla referans değerler 2,18 km/s, 2,20 km/s ve 2,17 km/s şeklindedir. En düşük ultrasonik ses geçiş hızları UK/AE10, MK/ŞF30 ve PK/KA30 örneklerinde elde edilirken en yüksek geçiş hızları ise UK/AE30, MK/R, PK/YK20 örneklerinden elde edilmiştir. UK serisinde bir örnek dışında kalan örneklerin tamamı referans örneğinden daha düşük ses geçiş hızları vermiştir. MK serisinde ise bütün örnekler referanstan daha düşük değerlere sahiptir. Her üç seride de AEUK kullanımının artması ultrasonik ses geçiş hızını artırmış, KA kullanımının artması ise düşürmüştür. ŞF ve YK kullanımında ise tam bir tutarlılık sözkonusu değildir. ŞF kullanımındaki artış MK serisinde oldukça olumsuz bir etki oluşturmuş, ultrasonik ses geçiş hızı değeri oldukça düşmüştür. %30 oranında YK kullanımı da benzer bir düşüşe neden olmuştur. Genel olarak değerlendirildiğinde katkı kullanımı ultrasonik ses geçiş hızlarında düşüşlere neden olmuştur. Bu durumu boşluk yapısında meydana gelen artışlar ile ilişkilendirmek mümkündür.

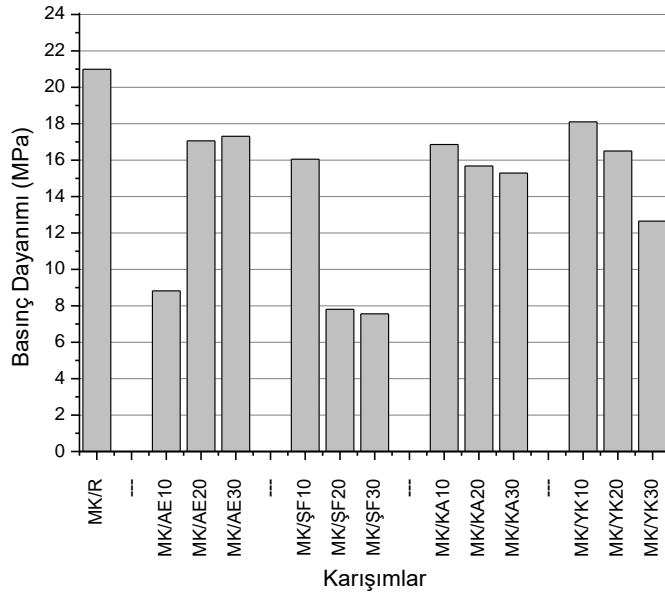
Bulut, yaptığı çalışmada 91 günlük perlit içeren kireç harçlarına ultrasonik ses geçiş hızı testi uygulamış ve oda sıcaklığında kürlenmiş örneklerde 2,83 km/s, 55 °C'de kürlenmiş örneklerde ise 2,03 km/s değerlerini elde etmiştir (Bulut, 2007). Mavi, 270 günlük kireç harçlarında 1,54 km/s değeri elde ederken, yüksek oranda doğal puzolan katkılı kireç harçlarından ise 1,52 km/s değerini elde etmiştir (Mavi, 2000).

4.1.6. Basınç Dayanımı

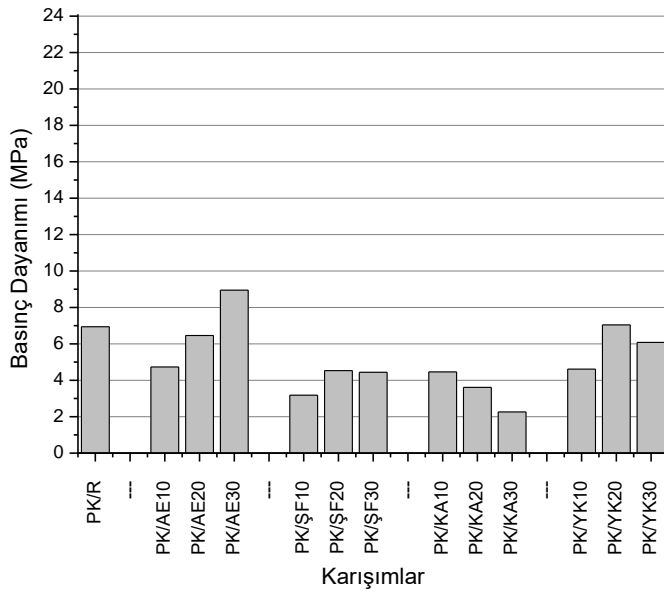
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait basınç dayanımı testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.16: UK içeren örneklerin basınç dayanımları



Şekil 4.17: MK içeren örneklerin basınç dayanımları



Şekil 4.18: PK içeren örneklerin basınç dayanımları

UK içeren örneklerin basınç dayanımı değerleri 6,95 – 18,32 MPa arasında değişmektedir. Bu aralık MK içeren örnekler için 7,56 – 20,99 MPa ve PK içeren örnekler için 2,26 – 8,95 MPa'dır. UK içeren örnekler arasında en yüksek basınç dayanımı referans örneğinden elde edilmiştir. En düşük dayanım değeri ise UK/AE10 örneğinden elde edilmiştir. Atık kireç kaynaklarının kullanıldığı bütün örnekler referans örneğinden düşük dayanım vermiştir. Atık katkı içeren örnekler içerisinde en yüksek dayanım UK/AE30 örneğinden elde

edilmiştir (14,64 MPa). AEUK, ŞF ve YK kullanımı ile değerler önce bir miktar düşmüş, daha sonra atık katkı kullanımının artmasıyla yükseliş göstermiştir. KA kullanımında ise en iyi oran %20 olarak görülmüştür. MK içeren serilerde de en yüksek basınç dayanımı referans örneğinden elde edilmiştir. Yine bütün atık katkı içeren örnekler referans örneğinden düşük değerler vermiştir. Ancak UK serisi ile karşılaştırıldığında ortalama basınç dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Atık içeren örnekler arasında en yüksek basınç dayanımı 18,10 MPa ile MK/YK10 örneğinden elde edilmiştir. UK serisi için atık içeren örnekler arasında en yüksek dayanıma sahip olan %30 AEUK içeren örnek, MK serisinde 17,31 MPa basınç dayanımı vermiş ve MK/YK10 örneğinden sonra ikinci en yüksek dayanıma sahip atık içeren örnek olmuştur. AEUK kullanımı UK serisinde olduğu gibi önce önemli bir azalmaya neden olmuştur. Kullanım oranındaki artış, basınç dayanımında da bir artışa neden olmuştur. ŞF kullanımı ise %10 oranında en iyi sonucunu verirken, kullanım oranındaki artış olumsuz etki göstermiştir. KA kullanımının artışı ile basınç dayanımlarında bir düşüş gözlenirken, bu düşüşün diğer atık katkıların kullanımındaki kadar belirgin olmadığı söylenebilir. Aynı şekilde YK kullanımı da katkı oranı arttıkça basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. MK serisi için en düşük basınç dayanım değeri 7,56 MPa ile %30 ŞF içeren örnekten elde edilmiştir. PK serisi için en yüksek basınç dayanımı %30 AEUK içeren örnekten elde edilmiştir. Diğer iki puzolan grubunun aksine referans örneğinden yüksek sonuçlar bulunmaktadır. En düşük basınç dayanımı ise PK/KA30 örneğinden elde edilmiştir. AEUK kullanımı tıpkı diğer iki gruptaki gibi önce basınç dayanımını düşürmüştü, daha sonra kullanım oranına bağlı olarak yükseltmiştir. ŞF kullanımı UK serisindekine benzer bir etki göstermiştir. KA kullanımı ise MK serisindeki etkisine benzer bir etki göstermiş, kullanım oranına bağlı olarak basınç dayanımını düşürmüştür. YK kullanımında ise en iyi oran %20 olarak bulunmuştur.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde UK ve MK içeren serilerde atık katkı kullanımının olumsuz bir etki oluşturduğu görülmektedir. PK serisinde ise iki örnek hariç, kalan örneklerde olumsuz bir durum söz konusudur. Ancak UK ve MK serilerinde elde edilen değerlerin tamamına yakını EN 998-1 standardında kagir harçları için verilen en yüksek olan 7,5 MPa'nın üzerindedir. UK serisinde basınç dayanımı değeri en düşük olan UK/AE10 örneği ise 6,95 MPa ile bu üst sınıra oldukça yakındır. Aynı durumu PK serisi için söylemek mümkün değildir. Ancak aynı standardın en düşük dayanım sınıfı olan CSI'in alt limiti ise 0,4 MPa'dır ve PK serisi de dahil atık katkı içeren bütün örnekler bu limitin çok üzerinde sonuçlar vermiştir. Aynı zamanda atık katkı içeren örnekler EN

13279-2 standardınca belirlenmiş sıva alçılardan beklenen 2 MPa'lık alt sınırı da sağlamaktadır. Basınç dayanımı açısından genel bir değerlendirme yapıldığında üretilen harçların yapısal bir malzeme olarak kullanılması pek mümkün görünmese de harç olarak kullanılmasının mümkün olabileceği söylenebilir.

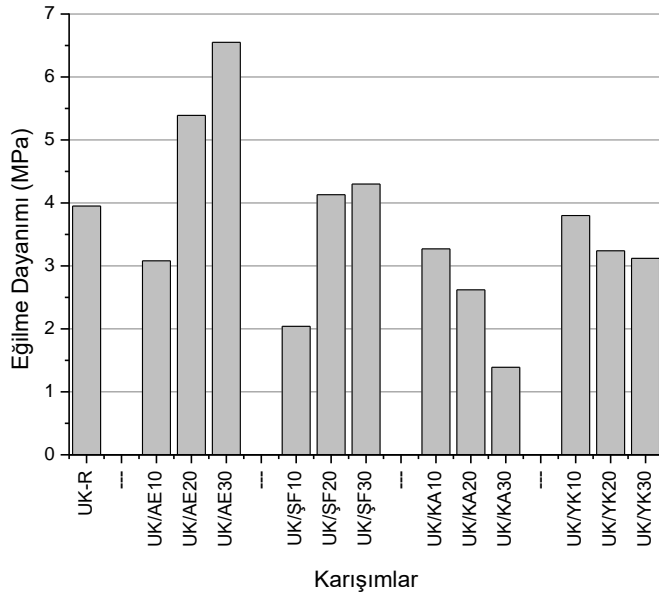
AEUK katkısının düşük oranlarda basınç dayanımını düşürdüğü ancak kullanım miktarının artmasıyla önemli ölçüde yükselme sağlamıştır. AEUK her ne kadar beton için kullanıma uygun olmayan bir uçucu kül olsa da yapısında CaO'nun yanı sıra önemli miktarda silika ve alümina bulunmaktadır. Bu bileşenlerin kireç ile reaksiyona girerek puzolanik etki gösterdiği ve dayanıma katkı sağladığı bilinmektedir. AEUK kullanımının meydana getirdiği artış belirtilen bu durum ile ilişkilendirilebilir. Benzer şekilde KA'nın da bir miktar silika ve alümina içerdiği bilinmektedir. Ancak dayanıma katkısının AEUK kadar olmadığı görülmektedir. UK ve MK içeren serilerde dayanımı düşürmesine rağmen, özellikle %10 ve %20 oranlarında kullanımı atık katkılı örnekler arasında ortalama değerlere sahiptir. PK serisi için ise düşük değerler elde edilmesine neden olmuştur. Meydana getirdiği bu olumsuz etkinin KA'nın yapısında bulunan MgO ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Porgieter vd. (Potgieter vd., 2003), yaptıkları çalışmada MgO içeriğinin kirecin reaktivitesine etkisini incelemişler ve MgO içeriğinin artmasıyla reaktivitenin düştüğünün gözlemlemişlerdir. Nitekim, TS EN 459-1 standardına göre yapı kireçlerinde maksimum MgO oranı %5 ile sınırlandırılmıştır. ŞF kullanımından elde edilen sonuçların basınç dayanımı üzerine etkinin tutarlı olmadığı görülmektedir. UK serisinde kullanım oranı ile dayanım artarken, MK serisinde %10 oranında kullanımı ortalama bir dayanım sergilemiş ancak kullanım oranının artması sonuçları olumsuz etkilemiştir. PK serisinde ise genel sonuç üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğu söylenebilir. YK kullanımını her üç puzolan serisinde de ortalama seviyede dayanımlar elde edilmesini sağlamıştır. UK serisinde kullanım oranının artmasına bağlı olarak basınç dayanımı yükselmiştir. MK serisinde ise tam tersi bir durum görülmüştür. PK serisinde ise %20 ve %30 oranlarında referans örneğine çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Elde edilen yüksek değerlerin her seride aynı şekilde tutarlı olmasa da yapısındaki kirecin reaksiyonlara katılmasıyla meydana geldiği düşünülmektedir.

İstanbul Büyük Şehir Belediyesi Koruma Uygulama ve Denetim Bürosu (KUDEB) tarafından yürütülen bir projede birçok farklı harç karışımının özellikleri etraflıca incelenmiştir. Bu proje kapsamında sadece kireç kullanılarak üretilen harçlardan en yüksek

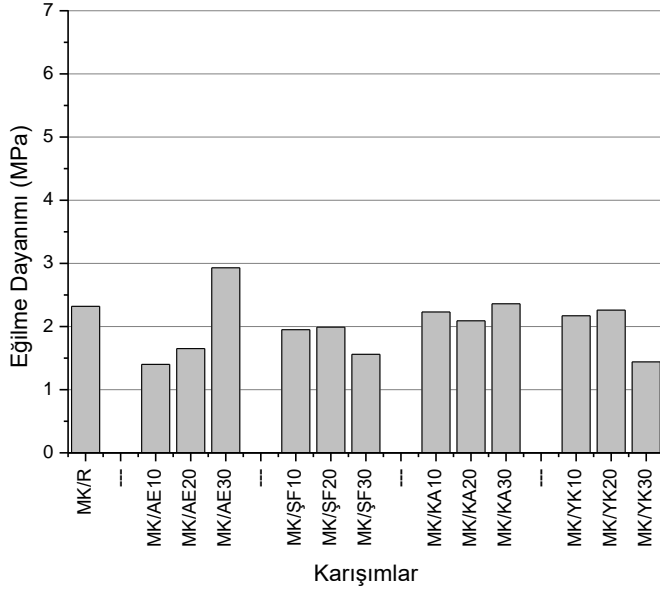
0,96 MPa, kireç-puzolan harçlarından en yüksek 7,5 MPa ve alçı-kireç harçlarından ise 1,14 MPa elde edilmiştir. (Ersen vd., 2016). Eriç, hava kireçlerinin 0,7 MPa basınç dayanımı vermesi gerektiğini, daha karmaşık bir yapıya sahip olan su kireçlerinin ise 48 saatlik basınç dayanımının 6-8 MPa arasında olması gerektiğini ifade etmiştir (Eriç, 2014). Demir ve Başpınar, 6 saat buhar kürü uyguladıkları uçucu kül-alçı-kireç harcından 8 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir (Demir and Baspınar, 2008). Damar Tekin, uçucu kül-kireç-alçı karışımlarına buhar kürü uygulayarak 90 günlük süre sonunda 9 MPa'nın üzerinde değerler elde edebilmiştir (Damar Tekin, 2014). Vimmrova alçı-kireç karışımında puzolan olarak metakaolin kullanmış ve 16 MPa'nın üzerinde basınç dayanımı elde edebilmiştir (Vimmrová vd., 2014). Kireç-alçı karışımlarında puzolan olarak %30 uçucu ve %40 metakaolinin beraber kullanıldığı bir başka çalışmada ise yaklaşık 27 MPa basınç dayanımına ulaşılabileceği ifade edilmiştir (Morsy vd., 2012).

4.1.7. Eğilme Dayanımı

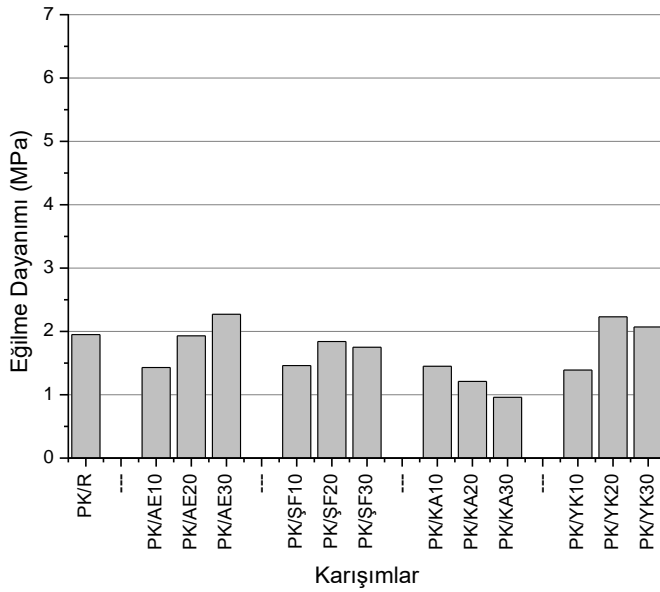
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.19: UK içeren örneklerin eğilme dayanımları



Şekil 4.20: MK içeren örneklerin eğilme dayanımları



Şekil 4.21: PK içeren örneklerin eğilme dayanımları

UK içeren örneklerin eğilme dayanımı değerleri 1,39 – 6,55 MPa arasında değişmektedir. Referans örneği 3,95 MPa dayanım değeri vermiştir. En yüksek dayanım değeri %30 oranında AEUK içeren örnekte elde edilmiştir. Dayanım gelişiminin atık katkı oranlarıyla ilişkisi incelendiğinde eğilimlerin genel olarak basınç dayanımı sonuçları ile paralel olduğu gözlemlenmiştir. %20 ve %30 oranlarında AEUK kullanımı referans değerinden daha yüksek eğilme dayanımı değerleri verirken, aynı oranlarda ŞF kullanımı referans örneğine çok yakın sonuçlar vermiştir. Bunun dışında kalan örnekler referans örneğinden daha düşük

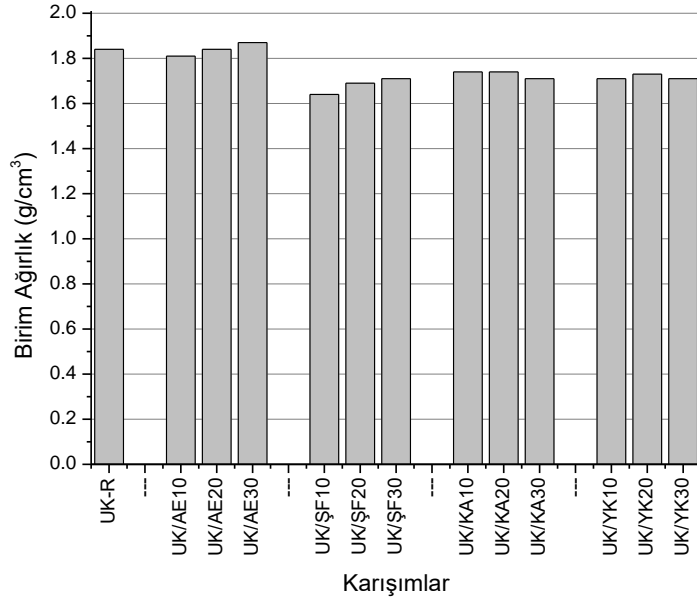
eğilme dayanımına sahiptirler. Genel olarak en düşük dayanım KA katkılı örneklerden ve en düşük dayanım %30 KA kullanılan örnekten elde edilmiştir. MK içeren serilerde ise eğilme dayanımları 1,40 – 2,93 MPa arasında değişmektedir. Referans örneğinden 2,32 MPa dayanım elde edilmiştir. En yüksek dayanım %30 AEUK kullanılan örnekten elde edilirken, en düşük dayanım ise %10 AEUK kullanılan örnekten elde edilmiştir. AEUK kullanımı %10 ve %20 oranlarında eğilme dayanımının düşmesine neden olurken %30 oranında önemli bir yükselme sağlamıştır. KA içeren örnekler bütün oranlarda referans örneğine çok yakın sonuçlar vermiştir. Aynı şekilde %10 ve %20 oranında YK kullanımı da referans örneğine benzer sonuçlar vermiştir. %30 KA ve %30 YK kullanımı ile dayanımda belirgin bir düşüş gözlenmiştir. PK serisinde de en yüksek dayanım değeri %30 AEUK içeren örnekten elde edilmiştir (2,27 MPa). Diğer gruplarda olduğu gibi AEUK kullanımı önce eğilme dayanımını azaltmış, ancak kullanım oranı arttıkça artırmıştır. Referans örneğinden 1,95 MPa dayanım elde edilmiştir. PK/AE30 örneği dışında PK/YK20 ve PK/YK30 örnekleri hafifçe bu değer üzerinde sonuçlar vermiştir. En düşük dayanım değeri PK/KA30 örneğinden elde edilmiştir (0,96 MPa). Diğer atık katkıları içeren gruplarla karşılaştırıldığında KA grubunun daha düşük değerler verdiği görülmektedir.

Damar Tekin, buhar kürü uygulanmış uçucu kül-kireç-alçı karışımlarından 90 gün sonunda maksimum 4,32 MPa dayanım elde edebilmiştir (Damar Tekin, 2014). Beydemir, tek başına kireç kullanarak ürettiği harçlardan 365 gün sonunda 0,80 MPa basınç dayanımı elde ederken, uçucu kül kullanarak neredeyse aynı sonucu elde edebilmiştir (0,81 MPa) (Beydemir, 2007). Vimrova, kireç-alçı karışımında puzolan olarak metakaolin kullanarak maksimum 5,79 MPa eğilme dayanımına ulaşmıştır (Vimrová vd., 2014). Morsy ise çalışmasında kireç-alçı karışımlarında puzolan olarak uçucu kül ve metakaolini birlikte kullanarak 4 MPa'nın biraz üzerinde eğilme dayanımı elde edebilmiştir (Morsy vd., 2012).

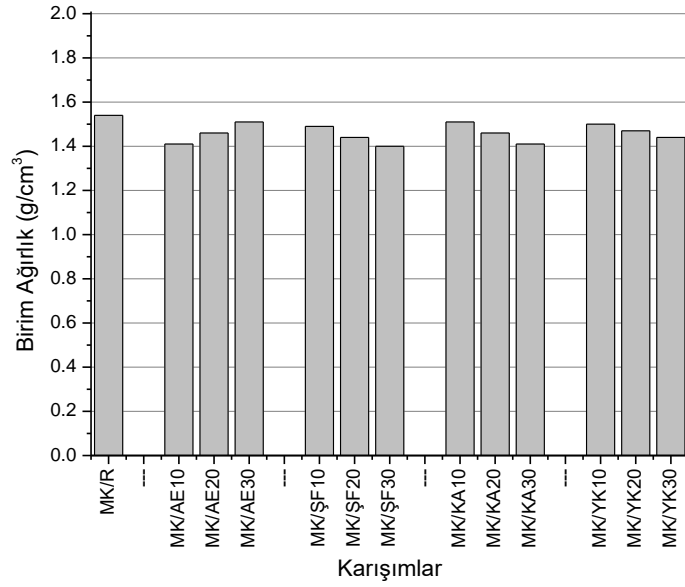
4.2. Nem Kürü Uygulanmış Örneklerin Sonuçları

4.2.1. Birim Ağırlık

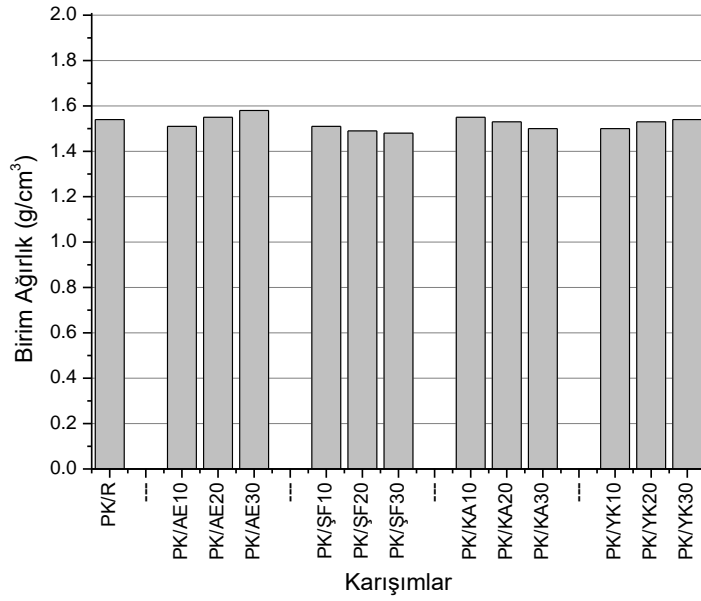
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'de verilmiştir.



Şekil 4.22: UK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları



Şekil 4.23: MK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları

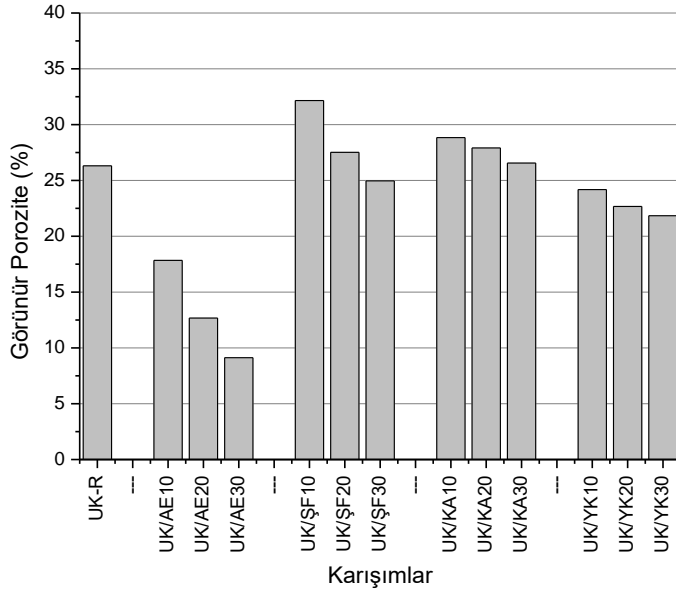


Şekil 4.24: PK içeren örneklerin birim hacim ağırlıkları

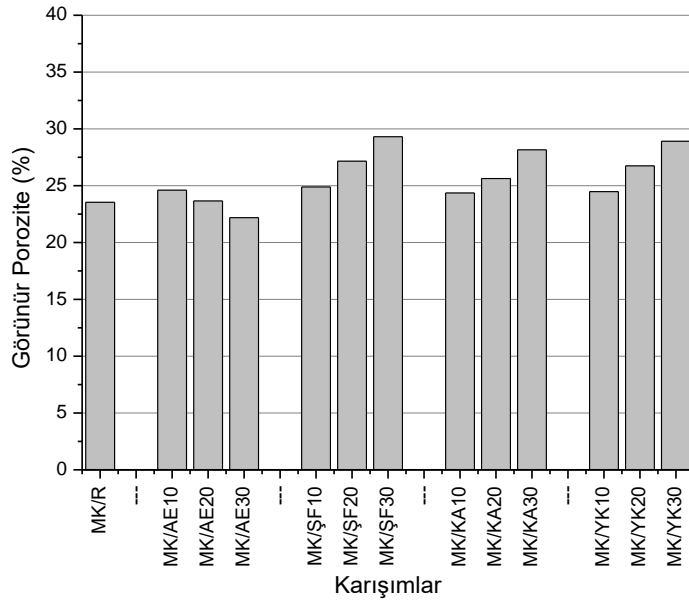
UK içeren örneklerde birim ağırlık değerleri $1,64 - 1,87 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. En yüksek değer %30 AEUK içeren örnekten elde edilmiştir. En düşük değer ise %10 ŞF kullanılan örnekten elde edilmiştir. Referans örneği ise $1,84 \text{ g/cm}^3$ birim ağırlığa sahiptir. AEUK serisi genel olarak referans örneğine çok yakın değerler verirken, diğer atık katkılar referanstan daha düşük ancak birbirlerine çok yakın değerler vermiştir. MK içeren örneklerde birim ağırlık değerleri $1,40 - 1,54 \text{ g/cm}^3$ aralığındadır. Bu seri için en yüksek birim ağırlık referans örneğinden elde edilmiştir. En düşük birim ağırlık ise MK/ŞF30 örneğinden elde edilmiştir. AEUK serisi hariç diğer atık katkılar kullanım oranları arttıkça birim ağırlık değerinde bir miktar düşüşe neden olmuşlardır. Ancak ortalama değerler olarak değerlendirildiğinde örneklerin birbirlerinden çok farklı değerler verdiği söylenemez. Aynı durum PK serisi için de geçerlidir. Örnekler referans örneğine çok yakın değerler vermektedirler. Değer aralığı $1,48 - 1,58 \text{ g/cm}^3$ aralığındadır. En yüksek değer PK/AE30 örneğinden, en düşük değer ise PK/ŞF30 örneğinden elde edilmiştir. Referans örneği ise $1,54 \text{ g/cm}^3$ değerine sahiptir. Nem kürü uygulanmış seriler arasında en yüksek ortalama birim ağırlıklar UK serisinden elde edilirken, MK serisi diğer gruplara göre daha düşük ortalama değerler vermiştir. Buhar kürü yapılan örnekler ile karşılaştırıldığında bütün örneklerin daha düşük değerler verdiği görülmektedir. Bu durum buhar kürü ile reaksiyonların daha iyi geliştiği ve oluşan içyapının daha az boşluklu olduğu düşünülebilir. Bu durum görünür porozite ve dayanım sonuçlarında gözlemlenecektir.

4.2.2. Görünür Porozite

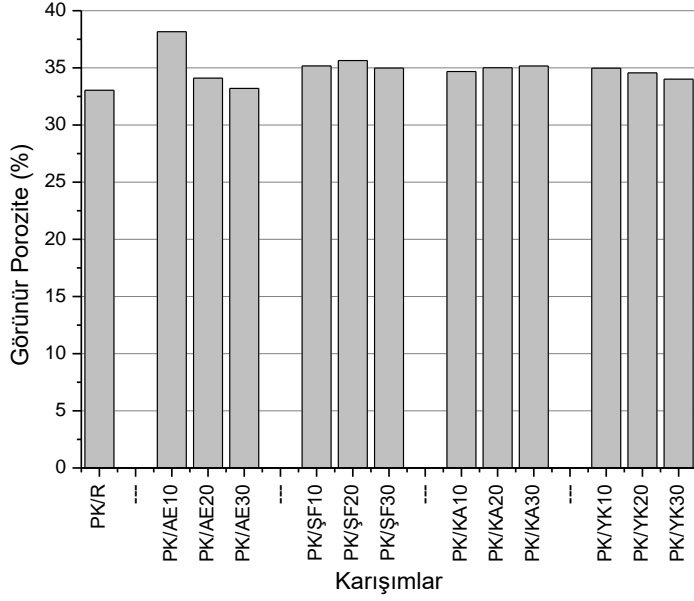
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.25: UK içeren örneklerin görünür porozite değerleri



Şekil 4.26: MK içeren örneklerin görünür porozite değerleri



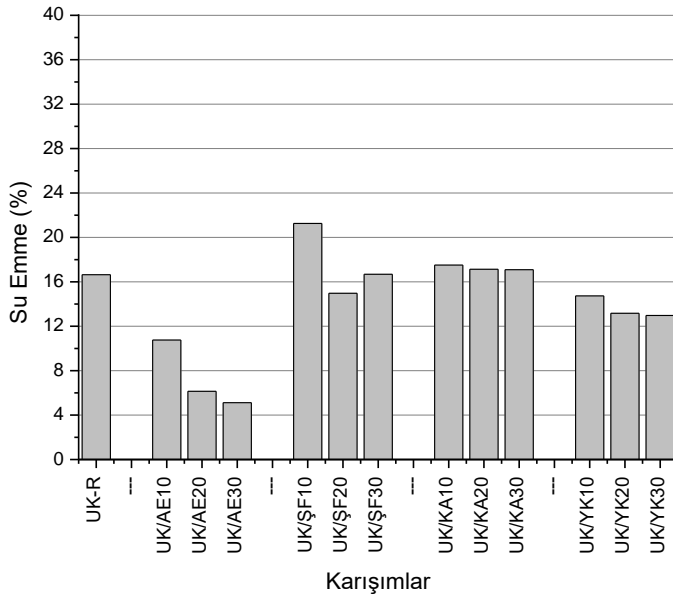
Şekil 4.27: PK içeren örneklerin görünür porozite değerleri

UK içeren serilerin porozite değerleri %9,12 - %32,16 arasında değişmektedir. En düşük porozite değeri UK/AE30 örneğinden elde edilmiştir. En yüksek porozite değeri ise UK/ŞF10 örneğinden elde edilmiştir. Referans örneği ise %26,31 porozite değerine sahiptir. Diğer seriler ile karşılaştırıldığında AEUK kullanımının porozite değerlerini önemli ölçüde düşürdüğü gözlenmiştir. YK kullanımı da porozite değerinin referans örneğinden daha düşük bir hale getirmiştir. Diğer taraftan ŞF ve KA kullanımının poroziteyi hafifçe artırdığı söylenebilir. MK içeren serilerde porozite değerleri %22,19 - %29,31 arasında değişmektedir. Referans örneğinin porozite değeri %23,54'tür. En düşük porozite yine %30 AEUK içeren örnekten elde edilirken en yüksek değer ise MK/ŞF30 örneğinden elde edilmiştir. MK serisi içerisinde referanstan daha düşük porozite değeri veren tek örnek MK/AE30 örneğidir. Diğer örneklerin tamamı referans örneğinden daha poroz olarak bulunmuştur. Diğer taraftan kullanım oranının artması ile poroziteyi azaltan tek grup da AEUK grubudur. Diğer gruplarda kullanım oranının artıyor olması UK serisindekinin aksine poroziteyi artırmıştır. PK serisi ise tüm seriler içerisinde en yüksek ortalama poroziteye sahip seri olmuştur. Değerler %33,04 - %38,16 arasındadır. Çok geniş bir aralık söz konusu değildir. Birçok değer birbirine yakındır ve yaklaşık %35 seviyesindedir. En yüksek porozite değeri PK/AE10 örneğinden elde edilmiştir. En düşük değer ise referans örneğinden ölçülmüştür. Atık katkı kullanımının PK serisinin porozite değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Bütün seriler için atık katkı kullanımının kendi içerisinde porozite değerlerini azalttığı görülmüştür. Buhar küreine tabi tutulan örnekler ile

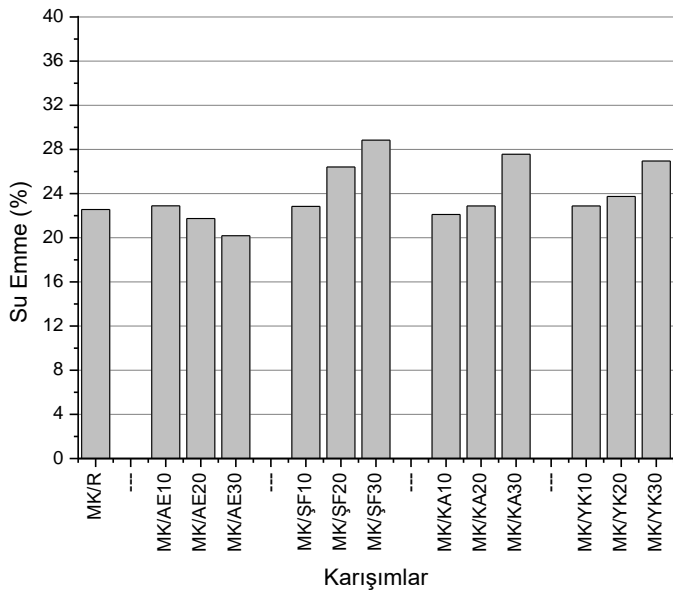
karşılaştırıldığında bütün değerlerin daha yüksek olduğu görülmektedir. Nem ile kürlenme, örneklerin porozite açısından da daha olumsuz bir performansa sahip olmalarına neden olmuştur.

4.2.3. Su Emme

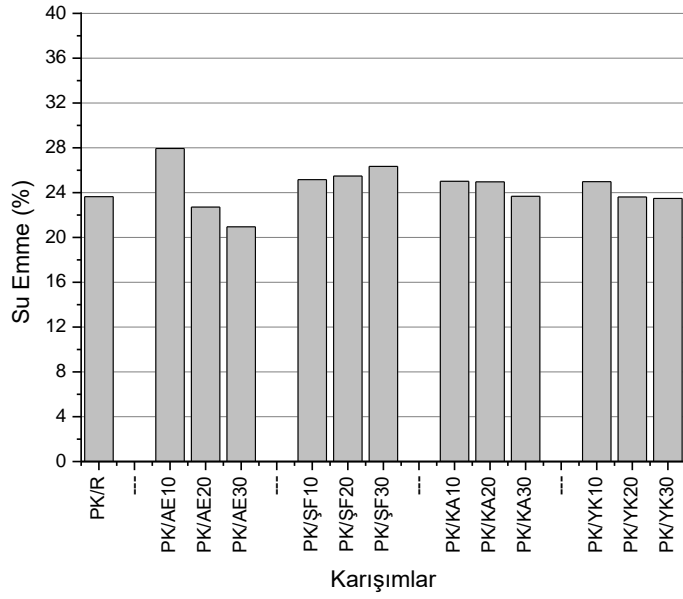
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.28: UK içeren örneklerin su emme değerleri



Şekil 4.29: MK içeren örneklerin su emme değerleri



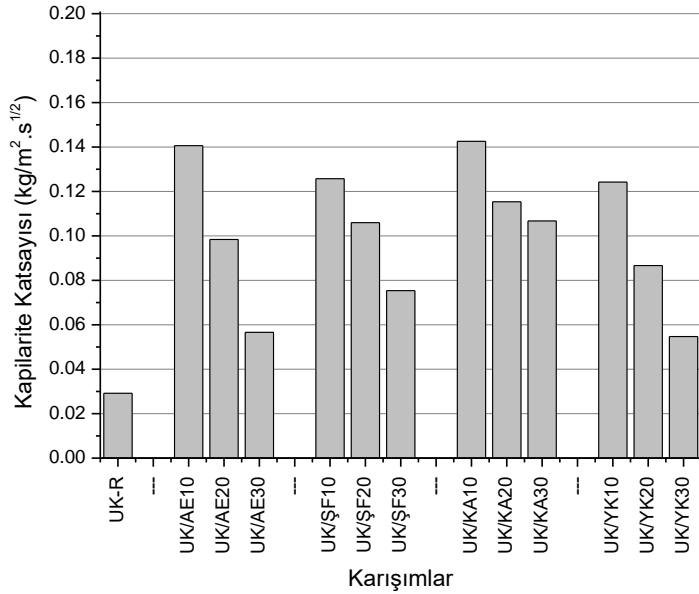
Şekil 4.30: PK içeren örneklerin su emme değerleri

UK içeren serilerde su emme değerleri %5,12 - %21,16 arasında değişmektedir. Referans örneğinin su emme değeri %16,64'tür. En yüksek değer UK/ŞF10 örneğinden elde edilirken, en düşük değer UK/AE30 örneğinden elde edilmiştir. AEUK kullanımı tüm oranlarda daha düşük bir su emme değeri sağlamıştır. Kullanım oranının artması ile tıpkı porozite değerlerinde olduğu gibi su emme değerlerinde de bir azalma gözlemlenmiştir. YK kullanılan serilerde de referans örneğinden daha düşük bir su emme değeri elde edilmiştir. KA serisi referans örneğine çok yakın değerler verirken ŞF serisinde elde edilen değerler tutarsızdır. %10 ŞF kullanımı su emmeyi oldukça artırırken bu değer %20'ye çıkması referans örneğinden daha az bir su emme değeri sağlamıştır. %30 oranında kullanıldığında ise tekrar referans seviyesine yükselmiştir. MK serisinde ise su emme değerleri %20,18 – %28,84 arasında değişmektedir. En düşük su emme değeri MK/AE30 örneğinden elde edilirken en yüksek değer ise MK/ŞF30 örneğinden elde edilmiştir. Referans örneği ise %22,56 su emme değeri vermiştir. AEUK kullanımının %20 ve %30 oranlarında olması referans örneğinden daha düşük bir su emme değeri elde edilmesini sağlamıştır. Diğer atık katkıları su emme değerini yükseltmiştir. AEUK dışındaki katkıların kullanım oranı arttıkça su emme değeri de artmıştır. PK serisinde ise porozite değerlerinde olduğu gibi birbirinde çok farklı olmayan değerler elde edilmiştir. Değerler %20,95 - %27,94 arasında değişmektedir. En yüksek su emme değeri PK/AE10 örneğinden elde edilirken en düşük su emme değeri PK/AE30 örneğinden elde edilmiştir. Referans

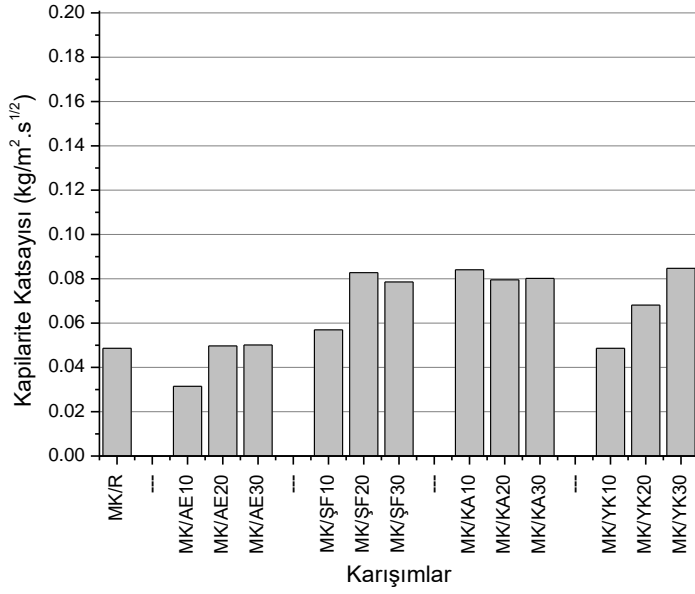
örneğin su emme değeri ise %23,64'tür. %20 ve %30 oranında AEUK kullanımı tıpkı MK serisindeki gibi su emme değerlerini azaltmıştır. Ancak diğer atık katkıları için aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Değerlerin referans değerine oldukça yakın olduğu söylenebilir. Buhar kürü uygulanan örnekler ile karşılaştırıldığında, artış ve azalış eğilimlerinin çok benzer olduğu görülmektedir. Ancak değerler buhar kürü uygulanan örneklere nazaran daha yüksektir. Bu durum daha önceki bölümlerde birim ağırlık ve porozite gibi değerlerde nem kürü uygulanması ile meydana gelen artış ile bağdaştırılabilir.

4.2.4. Kılcal Su Emme

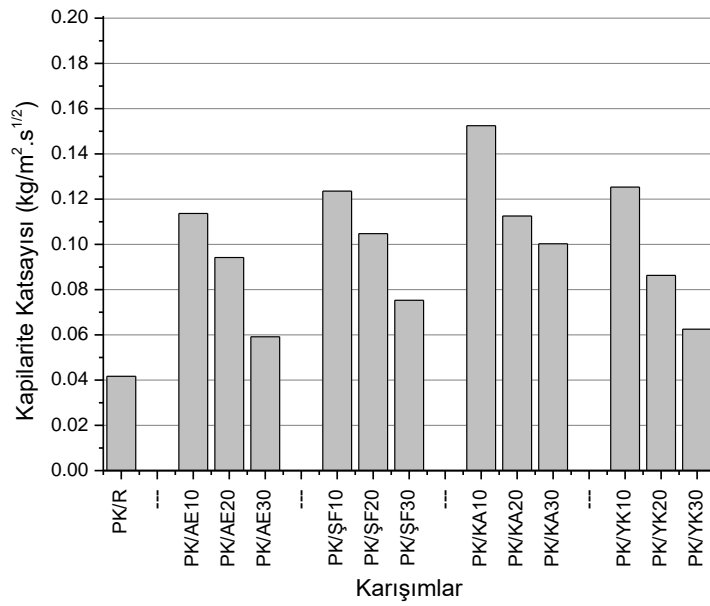
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örnekler için birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'de verilmiştir.



Şekil 4.31: UK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları



Şekil 4.32: MK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları



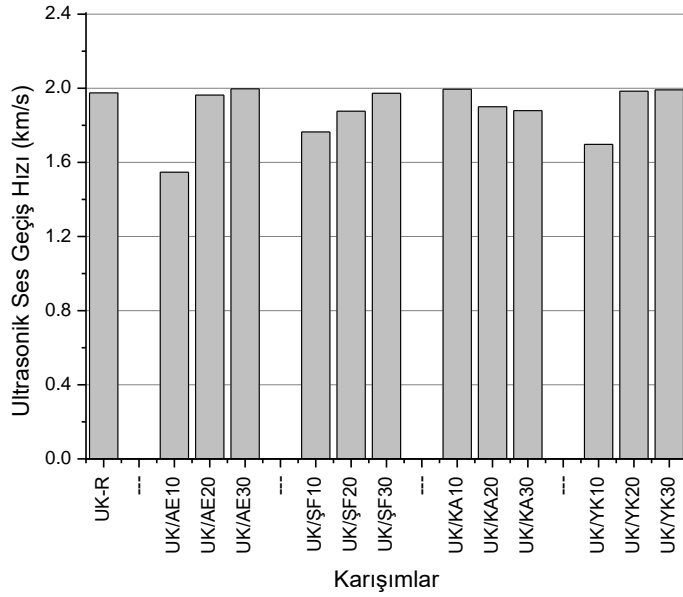
Şekil 4.33: PK içeren örneklerin 24 saat sonundaki kılcallık katsayıları

Tıpkı buhar küre uygulanmış serilerde olduğu gibi 24 saatlik kılcal su emiliminin incelendiği testlerde kılcallık katsayılarının en düşük olduğu seri MK serisi olarak görülmektedir. Yine PK serisinin kılcal su emilimi ise UK serisine göre ortalama olarak biraz daha düşüktür. UK ve PK serileri için en düşük kılcallık katsayısı referans örneklerinde elde edilmiştir. MK serisinde ise MK/AE10 örneği en düşük kılcallık katsayısına sahiptir. UK ve PK serisinin bir başka benzer yönü ise kılcallık katsayısının atık katkı kullanımı ile artış eğiliminde olmasıdır. Aynı zaman her atık grubu kendi içinde

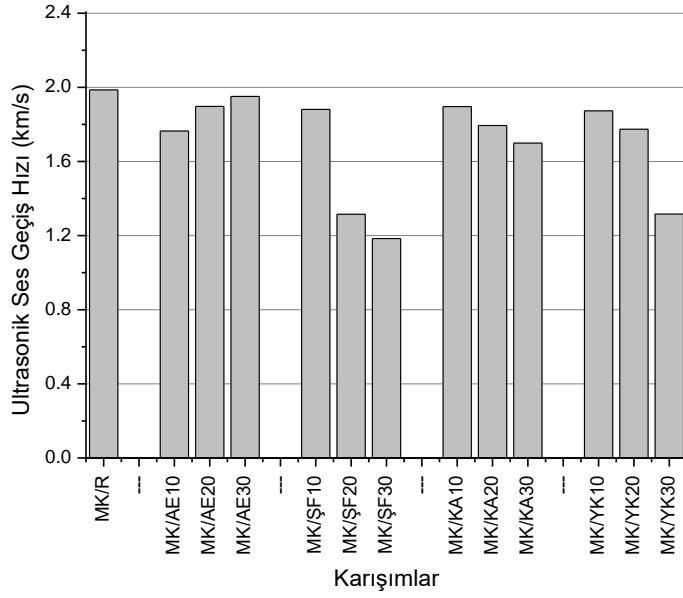
değerlendirildiğinde de bu durumun tersi geçerlidir. Yani atık katkı kullanım miktarı arttıkça kılcallık katsayılarının azaldığı görülmüştür. MK serisinde ise AEUK kullanımının kılcallığı önce bir miktar düşürdüğü sonra referans seviyesine yükselttiği görülmüştür. ŞF ve KA kullanımının kılcallığı artırdığı görülürken %10 oranında YK kullanımının referanstan daha düşük bir kılcallık katsayısı verdiği görülmektedir. %20 ve %30 kullanım oranında ise daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Örneklerin artış ve azalış eğilimleri buhar kürü uygulanmış örnekler ile oldukça benzerdir. Diğer taraftan nem kürü uygulanmış örneklerin kılcallık katsayıları aynı örneğin buhar kürü uygulanmış haline göre daha yüksek bulunmuştur.

4.2.5. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı

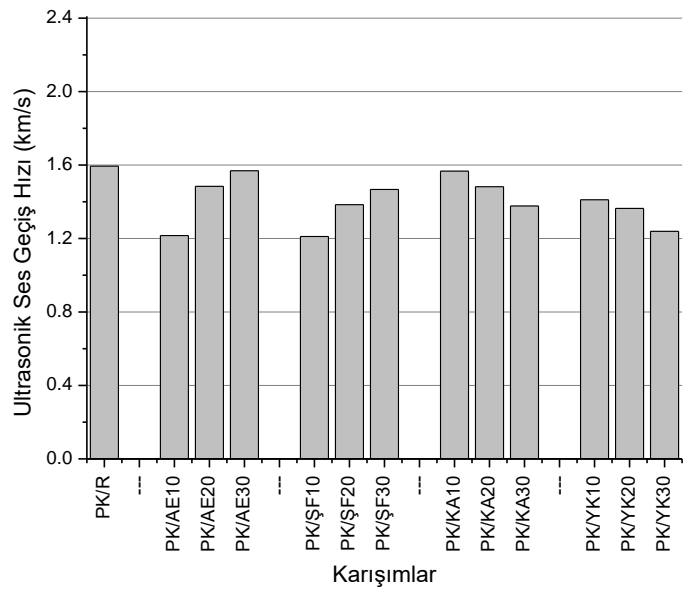
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36'de verilmiştir.



Şekil 4.34: UK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri



Şekil 4.35: MK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri



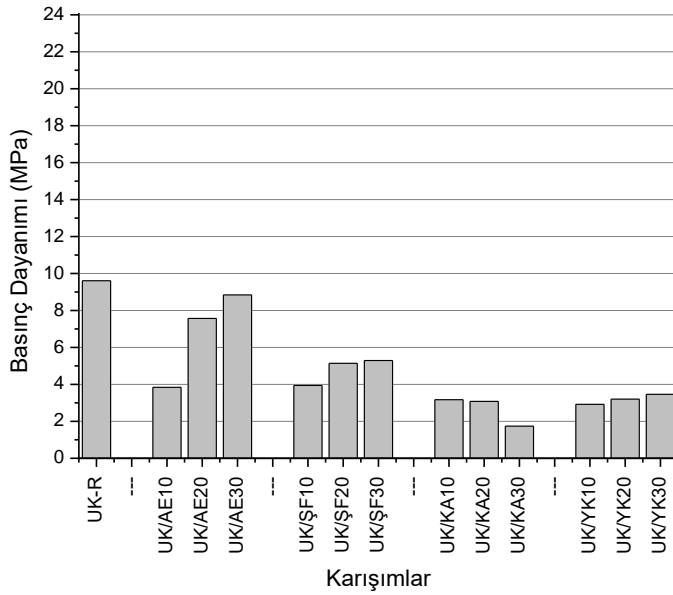
Şekil 4.36: PK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri

UK içeren örneklerin ultrasonik ses geçiş hızları 1,55 – 2,00 km/s arasında değişmektedir. En yüksek ses geçiş hızı %30 AEUK içeren örnekten elde edilirken en düşük ses geçiş hızı %10 AEUK içeren örnekten elde edilmiştir. Referans örneği ise 1,98 km/s ultrasonik ses geçiş hızı değerine sahiptir. Genel olarak birkaç örnek hariç çoğunlukla referans örneğine yakın sonuçlar vermiştir. AEUK, KA ve YK kullanım oranları arttıkça ultrasonik ses geçiş hızı değerlerinde bir artış gözlenmiş ancak KA kullanımında tersi bir etki görülmüştür. MK serisinde ise değerler 1,18 – 1,99 km/s arasında değişmektedir. En yüksek değer referans

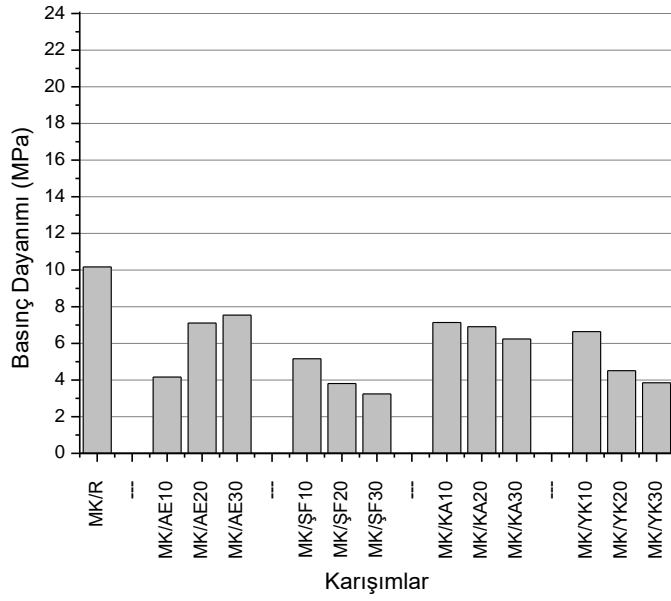
örneğinden elde edilirken en düşük değer MK/ŞF30 örneğinden elde edilmiştir. Referans örneğine en yakın sonuçlar AEUK katkılı örneklerden elde edilmiştir. Diğer bütün gruplar, kullanım oranının artmasıyla ultrasonik ses geçiş hızı değerlerini düşürmüştür. PK serisi diğer gruplara biraz daha düşük değerler vermiştir. Bu grubun değerleri 1,21 – 1,60 km/s arasında değişmektedir. MK grubunda olduğu gibi en yüksek değer referans örneğinden elde edilmiştir ve atık katkı kullanımı ultrasonik ses geçiş hızı değerlerini olumsuz etkilemiştir. AEUK ve KA katkılı gruplar referans örneğine en yakın sonuçları vermişlerdir. AEUK ve ŞF grubunda katkı oranının artması ultrasonik ses geçiş hızı değerlerini artırırken, KA ve YK kullanımında bu değerler katkı oranının artışı ile azalmıştır. Test sonuçlarının artış ve azalış eğilimleri bazı küçük farklılıklar dışında büyük oranda buhar kürü uygulanmış örneklere benzemektedir. Nem kürü uygulanmış örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri daha düşük bulunmuştur. Bu durum daha önce bölüm 8.1.5'te bahsedildiği gibi örneklerin boşluk yapısı ile ilişkilidir. Bu nedenle ultrasonik ses geçiş hızı değerlerine bakılarak nem kürü yapılmasının daha boşluklu bir içyapı oluşturduğu söylenebilir.

4.2.6. Basınç Dayanımı

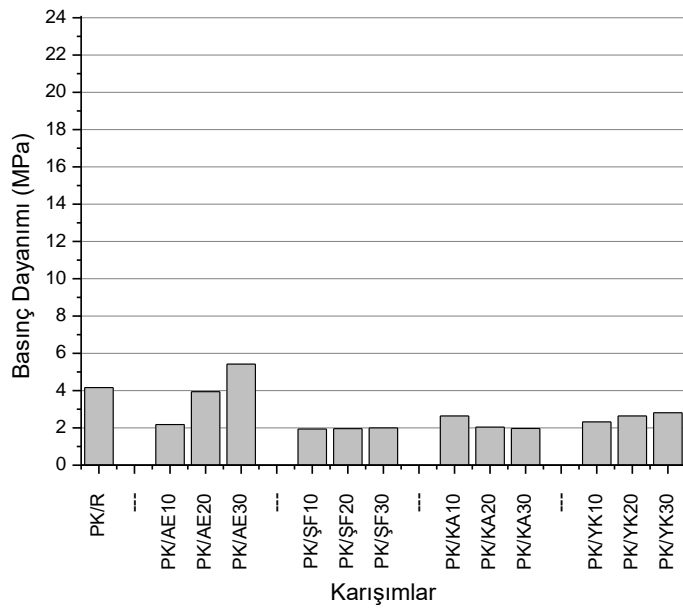
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.37, 4.38 ve 4.39'de verilmiştir.



Şekil 4.37: UK içeren örneklerin basınç dayanımları



Şekil 4.38: MK içeren örneklerin basınç dayanımları



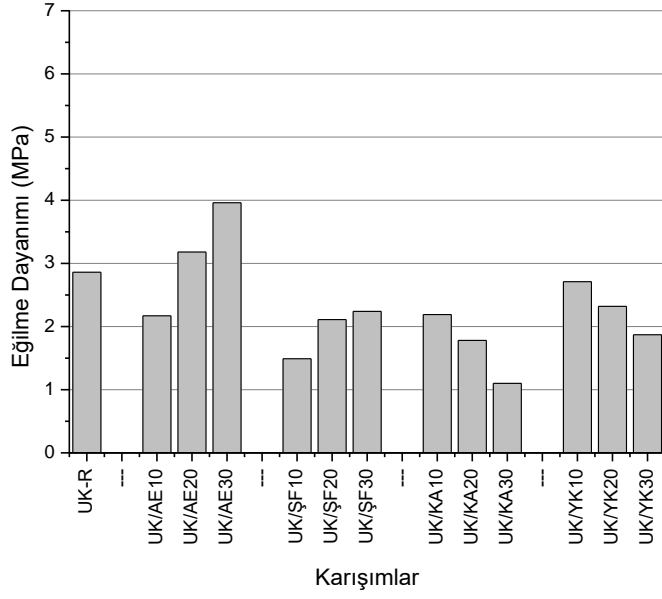
Şekil 4.39: PK içeren örneklerin basınç dayanımları

UK içeren örnekler için basınç dayanım değerleri 1,74 – 9,61 MPa arasında değişmektedir. En yüksek değer referans örneğinden elde edilmiş, atık katkı kullanımı basınç dayanımını düşürmüştür. En düşük değer ise UK/KA30 örneğinden elde edilmiştir. Referans örneğine en yakın değerler AEUK içeren örneklerden elde edilmiştir. Katkılı örnekler arasında en yüksek değer veren örnek UK/AE30 örneğidir (8,84 MPa). Diğer örnek grupları ise tüm oranlarda neredeyse referans örneğinin yarısı kadar bir basınç dayanım değeri verebilmişlerdir. En düşük dayanımlar KA ve YK içeren örneklerden elde edilmiştir. MK

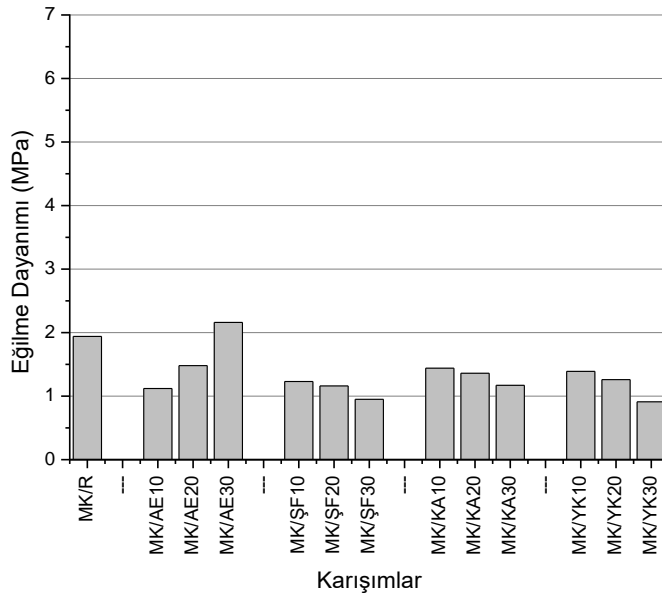
içeren örneklerde ise basınç dayanımı değerleri 3,24 – 10,17 MPa arasında değişmektedir. En yüksek değer UK serisinde olduğu gibi yine referans örneğinden elde edilmiştir. En düşük değer ise MK/ŞF30 örneğinden elde edilmiştir. ŞF, KA ve YK içeren örneklerde atık katkı kullanım oranının artması basınç dayanımlarının daha da düşmesine neden olmuştur. AEUK kullanımında ise tersi bir durum söz konusudur. PK içeren örnekler, bütün örnekler arasında en düşük basınç dayanımı veren örnekler olmuştur. Değerler 1,94 – 5,42 MPa arasında değişmektedir. En yüksek değer PK/AE30 örneğinden elde edilirken en düşük değer PK/ŞF10 örneğinden elde edilmiştir. Referans örneği ise 4,16 MPa değerine sahiptir. PK içeren serilerde ŞF, KA ve YK içeren örnekler oldukça düşük dayanımlar vermiş, referans örneği temel alındığında %20 ve %30 AEUK içeren örneklerden yeterli sonuçlar alınmıştır. Nem kürü uygulanan numuneler, buhar kürü uygulanan örneklere göre çok daha düşük dayanım değerleri vermişlerdir. Uygulanan buhar kürünün bileşenler arası reaksiyonları hızlandırması nedeniyle ürünlerin potansiyelini daha kısa sürede ortaya çıkardığı söylenebilir. Nem kürü uygulanan örneklerde de PK serisine ait bazı örnekler dışında EN 998-1 ve EN 13279-2 standardının alt limitlerin sağlandığı görülmüştür. Ancak buhar kürü uygulanan örnekler bu alt limitleri rahatlıkla sağlayacak kadar yüksek dayanımlar verirken, nem kürü uygulanan örneklerin önemli bir kısmı sınır değerlerde dayanımlar vermiştir.

4.2.7. Eğilme Dayanımı

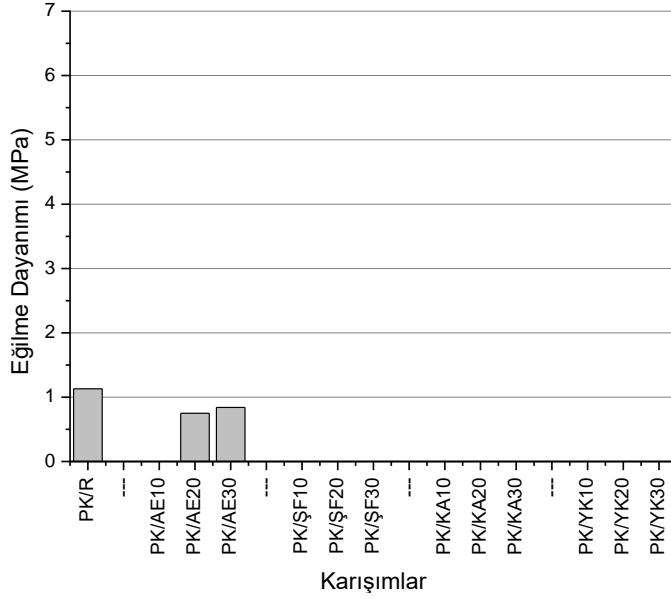
UK, MK ve PK puzolanlarını içeren örneklere ait birim ağırlık testi sonuçları sırasıyla Şekil 4.40, 4.41 ve 4.42’de verilmiştir.



Şekil 4.40: UK içeren örneklerin eğilme dayanımları



Şekil 4.41: MK içeren örneklerin eğilme dayanımları



Şekil 4.42: PK içeren örneklerin eğilme dayanımları

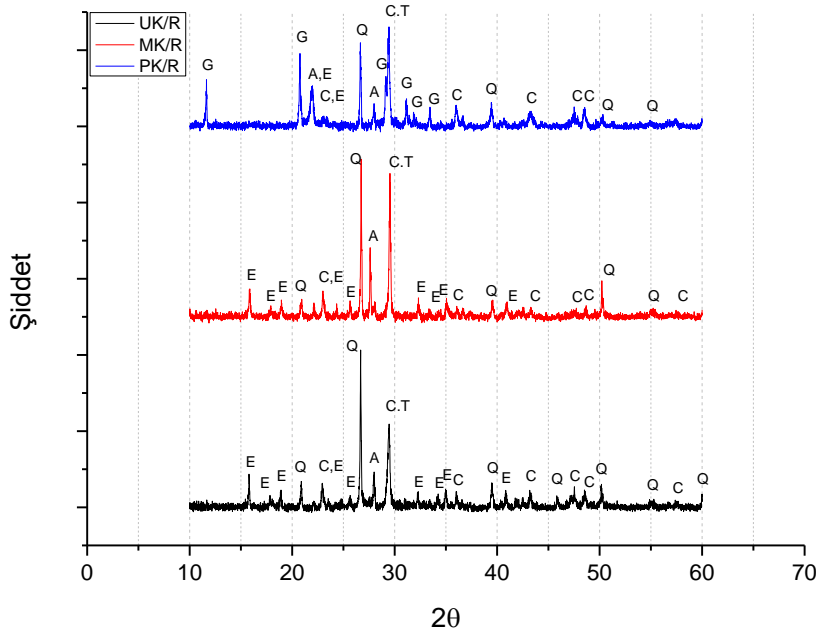
UK içeren örneklerin eğilme dayanımı değerleri 1,10 – 3,96 MPa değerleri arasında değişmektedir. En yüksek değer %30 AEUK kullanılan örnekten elde edilirken en düşük değer %30 KA kullanılan örnekten elde edilmiştir. Referans örneği 2,86 MPa eğilme dayanımına sahiptir. %20 ve %30 oranında AEUK kullanımı eğilme dayanımı değerlerini yükseltmiştir. Diğer gruplardaki bütün değerler referans örneğinden daha düşüktür. MK içeren örneklerde eğilme dayanım değerleri 0,91 – 2,16 MPa arasında değişmektedir. Referans örneği ise 1,94 MPa değer vermiştir. En yüksek değer ise UK serisinde olduğu gibi %30 AEUK içeren örnekten elde edilirken, en düşük değer %30 YK içeren örnekten elde edilmiştir. MK serisinde de referansın üzerinde eğilme dayanımı veren tek örnek MK/AE30 olmuştur. En düşük ortalama dayanım ŞF serisinden elde edilirken KA ve YK serileri birbirlerine benzer sonuçlar vermişlerdir. PK serisinde ise üç numune dışında dayanım değeri okumak mümkün olmamıştır. Referans örneğinden 1,13 MPa dayanım elde edilirken, bunun dışında %20 ve %30 AEUK içeren örneklerden değer elde edilebilmiştir. Bu üç örnek arasında en yüksek değer referans örneğine aittir. Buhar kürü uygulanan örneklerle çok daha düşük eğilme dayanımı değerleri elde edildiği görülmektedir.

4.3. Mikroyapı İncelemeleri

4.3.1. X-Işını Difraktometresi (XRD) İncelemeleri

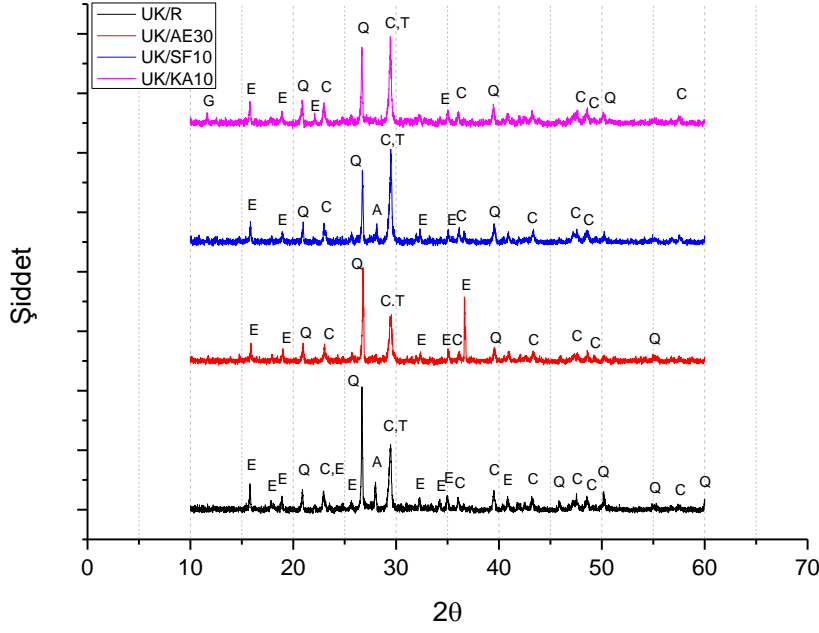
X-Işını difraktometresi için üretilen bütün karışımlardan bazı seçilmiş örnekler kullanılmıştır. Öncelikle her bir puzolan için referans örnekleri seçilmiştir. Bunun dışında

karşılaştırma yapılabilmesi açısından AEUK, ŞF ve KA'nın ise %10 oranında kullanıldığı örnekler tercih edilmiştir ve aynı zamanda AEUK serisinde %30 AEUK katkılı örnekler arasında en iyi dayanımı verdiği için incelenen numuneler arasına alınmıştır. PK serisi genel olarak çok düşük dayanımlar verdiği için ve YK serisi birçok noktada tutarsızlıklar gösterdiğinden bu gruplardan örnek seçilmemiştir. Şekil 4.43 – 4.45'te buhar kürü uygulanmış referans örneklerinin, UK ve MK serisinden seçilmiş örneklerin XRD analizlerini göstermektedir.



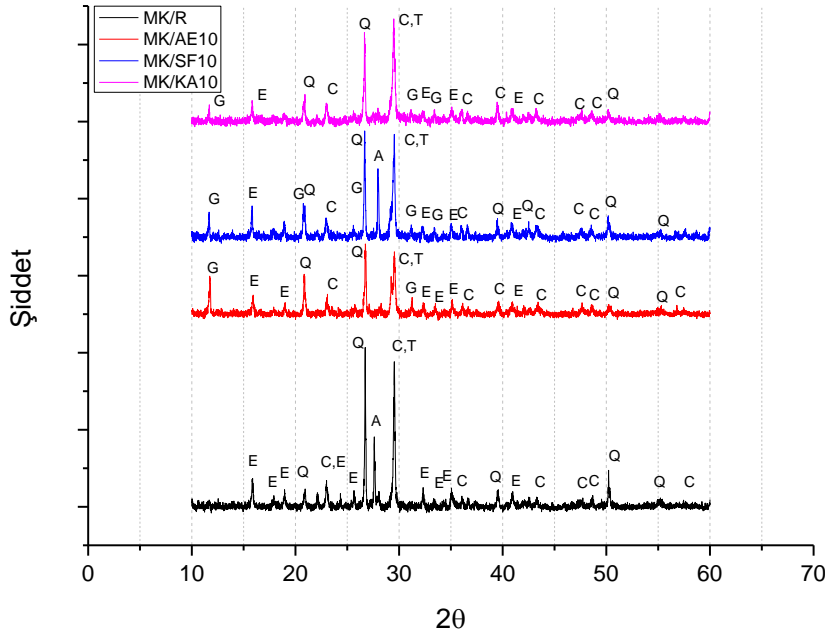
E: Etrenjit, Q: Kuvars, C: Kalsit, T: C-S-H (Tobermorit), G: Kalsiyum sülfat, A: Anortit

Şekil 4.43: Buhar kürü uygulanmış UK/R, MK/R ve PK/R örneklerinin XRD analizleri



E: Etrenjit, Q: Kuvars, C: Kalsit, T: C-S-H (Tobermorit), G: Kalsiyum sülfat, A: Anortit

Şekil 4.44: Buhar kürü uygulanmış UK serisinden seçilmiş örneklerinin XRD analizleri



E: Etrenjit, Q: Kuvars, C: Kalsit, T: C-S-H (Tobermorit), G: Kalsiyum sülfat, A: Anortit

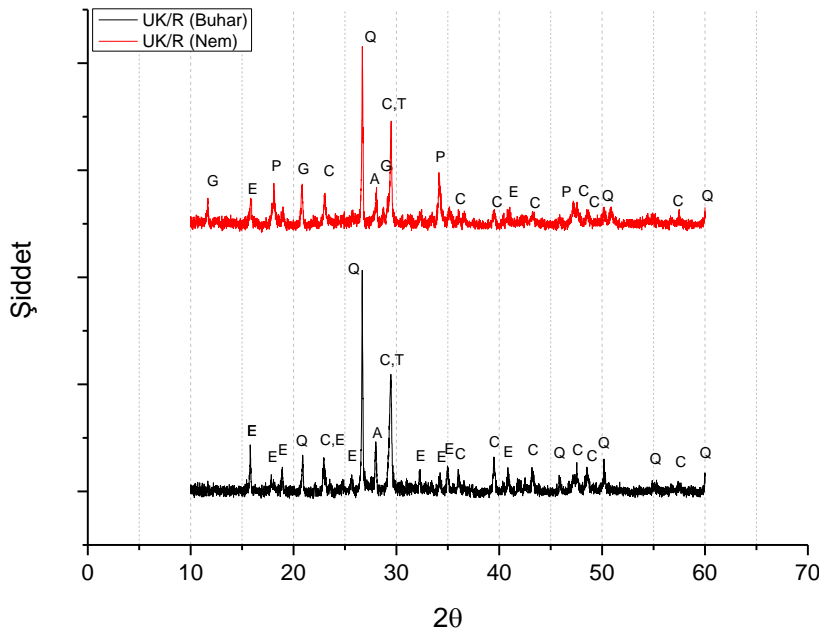
Şekil 4.45: Buhar kürü uygulanmış MK serisinden seçilmiş örneklerinin XRD analizleri

Yapılan XRD analizlerinde referans örneklerde genel olarak AEUK, MK ve PK hammaddelerinin yapısında bulunduğu bilinen belirgin kuvars (SiO_2) piklerine rastlanmaktadır. Bir diğer yaygın pik ise kalsit (CaCO_3) pikidir. Kireç kullanılan bir

karışımında zaten kalsit oluşumu beklenmektedir. Çünkü kalsit karbonatlaşma sürecinin bir ürünüdür. Aynı zamanda hammaddelerin içerisinde de serbest kireç varlığı mümkün olmakta ve bunun sonucu olarak da kalsit oluşabilmektedir. Yapıda aynı zamanda alçı bulunduğu için, oluşan sülfatlı yapılar sonucu etrenjit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) oluştuğu görülebilmektedir. Burada puzolan ve hidrate kireç karışımına alçı eklenmesi puzolanlarda bulunan bir miktar alümina ile alçının birleşmesi ve ortamda bulunan hidrate kireç ile etrenjit oluşturduğu görülmektedir (Cengiz, 2009). Bunun dışında hidrate kirecin puzolanlarda bulunan silika ile reaksiyona girmesi sonucu puzolanik reaksiyonların bir ürünü olarak C-S-H (tobermorit, $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) oluştuğu görülmektedir. Ancak C-S-H jelleri kalsit piki üst üste denk geldikleri için C-S-H pikleri kalsit tarafından gölgelenmektedir (Bilginer vd., 2020). Bunun dışında anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) pikine rastlanmaktadır. Hammaddeler içerisinde Al_2O_3 ve bir miktar Fe_2O_3 barındırmasına rağmen bu ikisine ait herhangi bir pike rastlanmamıştır. Fe_2O_3 miktarının çok az olması bazı başka pikler tarafından gölgeleniyor olabileceğini düşündürmektedir. Al_2O_3 'ün ise tepkimeye girerek anortit oluşturması veya C-A-S-H haline gelmesi muhtemeldir. XRD desenlerinde C-A-S-H pikleri gösterilmemiştir. Literatürde C-A-S-H pikleri ile C-S-H piklerinin aynı açıda oluşabileceği belirtilmiştir (Kapeluszna vd., 2017). Dolayısıyla bu pikler oldukça küçük olabilir veya bir başka mineral tarafından gölgelenmektedir. Bir başka ihtimal de Al_2O_3 'ün amorf yapıda olmasıdır (Güney, 2012). Bazı örneklerde alçı kullanımından kaynaklı kalsiyum sülfat (CaSO_4) piklerine rastlanmıştır. Şekil 4.43 incelendiğinde her üç referans örnek arasındaki en belirgin farklı PK/R örneğinde diğer örneklerden farklı olarak kalsiyum sülfat piklerinin tespit edilmesidir. Aynı zamanda üç örneğin basınç dayanımları arasında bir değerlendirme yapılırsa PK/R örneğinin diğerlerinden daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Burada kalsiyum sülfat pikine rastlanıyor olması ortamdaki kalsiyum sülfatın diğer bileşenlerle yeterince reaksiyona girememiş olmasından kaynaklanabilir. Eğer kalsiyum sülfat diğer bileşenlerle yeterli düzeyde reaksiyon geliştirmiş olsaydı puzolan ve kireç varlığında kalsiyum sülfatların etrenjite dönüşmüş olmaları beklenirdi. Bu durumda kalsiyum sülfat varlığı ve etrenjitin görece daha az oluşu yeterli dayanım gelişmemesinin de bir sebebi olarak görülebilir. Kalsiyum sülfat varlığından doğan SO_4^{2-} iyonları puzolanların fazlarına nüfuz ederek sistemin dengesine müdahale eder ve puzolanların reaktifliklerini artırır (Cengiz, 2009). Buna göre etrenjit varlığı aslında dayanımın da bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Şekil 4.44'te UK serisinde atık katkı içeren örneklerin XRD analizleri görülmektedir. Bütün örneklerde benzer pikler elde edilmiştir. Örnekler arasındaki en

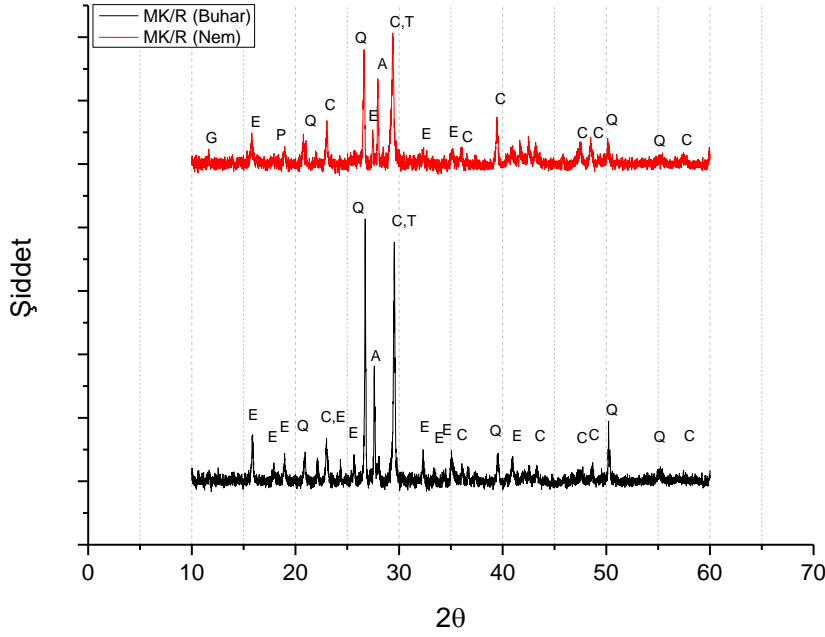
belirgin fark ŞF içeren örnekte ve referans örneğinde görülen anortit pikinin AEUK ve KA içeren örnekte görülmemesidir. Bir başka göze çarpan farklılık da KA içeren örnekte küçük bir kalsiyum sülfat pikinin tespit edilmesidir. Şekil 4.45 ise MK serisinde atık katkı içeren örnekler için XRD analizlerini göstermektedir. UK serisinde olduğu gibi referans örneğinde ve ŞF içeren örnekte anortit piki bulunmaktadır. Diğer taraftan AEUK ve KA içeren örneklerde bu pike rastlanmamaktadır. Bu durum beklenenin aksi bir durumdur. Aslında alüminyum barındıran anortit pikinin alüminyum içeriği diğer hammaddelere göre çok daha düşük olan ŞF serisinde görülüyor olması ve alüminyum içeriği diğer atık katkılara göre daha yüksek olan AEUK ve KA içeren örneklerde görülmemesi açıklanamamıştır. Bunun dışında MK serisinde referans örneği hariç bütün katkı içeren örneklerde kalsiyum sülfat piklerine rastlanmıştır. MK serisine ait dayanım değerleri ile C-S-H piklerinin keskinliği arasında uyumlu bir ilişki bulunmaktadır. UK serisinde bu durum söz konusu değildir.

Şekil 4.46 ve 4.47’de ise sırasıyla UK ve MK referans örnekleri için buhar ve nem ortamında yapılan kürlenmenin etkisi XRD analizi ile karşılaştırılmıştır.



E: Etenjit, Q: Kuvars, C: Kalsit, T: C-S-H (Tobermorit), G: Kalsiyum sülfat, A: Anortit, P: Portlandit

Şekil 4.46: Buhar kürü ve nem kürü uygulanmış UK/R örneklerinin XRD analizleri



E: Etrenjit, Q: Kuvars, C: Kalsit, T: C-S-H (Tobermorit), G: Kalsiyum sülfat, A: Anortit, P: Portlandit

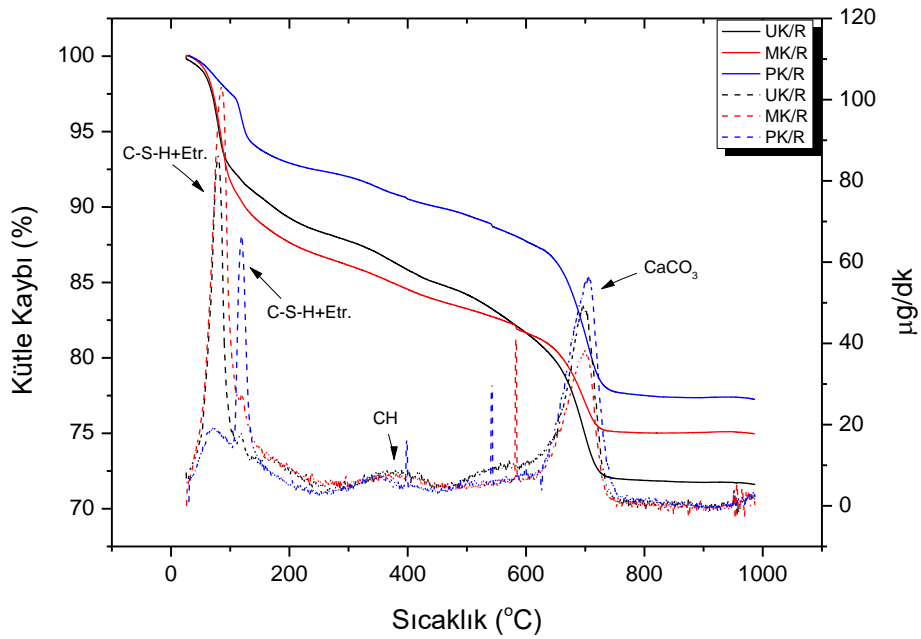
Şekil 4.47: Buhar kürü ve nem kürü uygulanmış MK/R örneklerinin XRD analizleri

Her iki örnek grubu içinde basınç dayanımı değerleri üzerinden bir değerlendirme yapılacak olursa buhar kürü uygulanmış UK/R örneği 18,32 MPa, nem kürü uygulanmış UK/R örneği ise 9,61 MPa vermiştir. Benzer bir durum MK/R örneğinde de görülmektedir. Buhar kürü uygulandığında 20,99 MPa, nem kürü uygulandığında ise 10,17 MPa dayanım elde edilmiştir. Her iki şekil de incelendiğinde buhar kürü uygulanan örnekler ise nem kürü uygulanan örnekler arasında temel fark nem kürü uygulanan örneklerde kalsiyum sülfat piklerine rastlanmış olmasıdır. Aynı zamanda etrenjit piklerinin sayısı da nem kürü uygulanan örneklerde daha azdır. Etrenjit varlığının dayanımla ilişkisi olduğu daha önce ifade edilmiştir. Burada kalsiyum sülfat varlığı, kullanılan alçının bir kısmının puzolan – hidrate kireç sistemine entegre olamadığını düşündürülebilir. Bunun sonucu olarak da etrenjit varlığı daha az olmuştur. Bir başka dikkat edilmesi gereken nokta ise buharda kürlenmiş örneklerde portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – kalsiyum hidroksit) piklerinin görülmemiş ve nem ortamında kürlenmiş olanlarda ise bu piklerin tespit edilmiş olmasıdır. Puzolanik reaksiyonlarda, puzolanlarda bulunan silikatlı bileşenler ise sönmüş kireç arasında bir reaksiyon gerçekleştiği ve sonuç olarak portlanditin tüketildiği bilinmektedir. Şekil 4.43 – 4.45 arasında buhar kürü uygulanan örneklerde belirgin bir portlandite piki görülmeysi, kireç reaksiyonlarının ve puzolanik reaksiyonların geliştiğini ifade edebilir. Şekil 4.46 ve 4.47’de ise nem kürü uygulanmış örneklerde portlandit pikinin görülüyor olması kireç reaksiyonlarının ve puzolanik reaksiyonların tam olarak gelişmediğinin bir belirtisi olarak

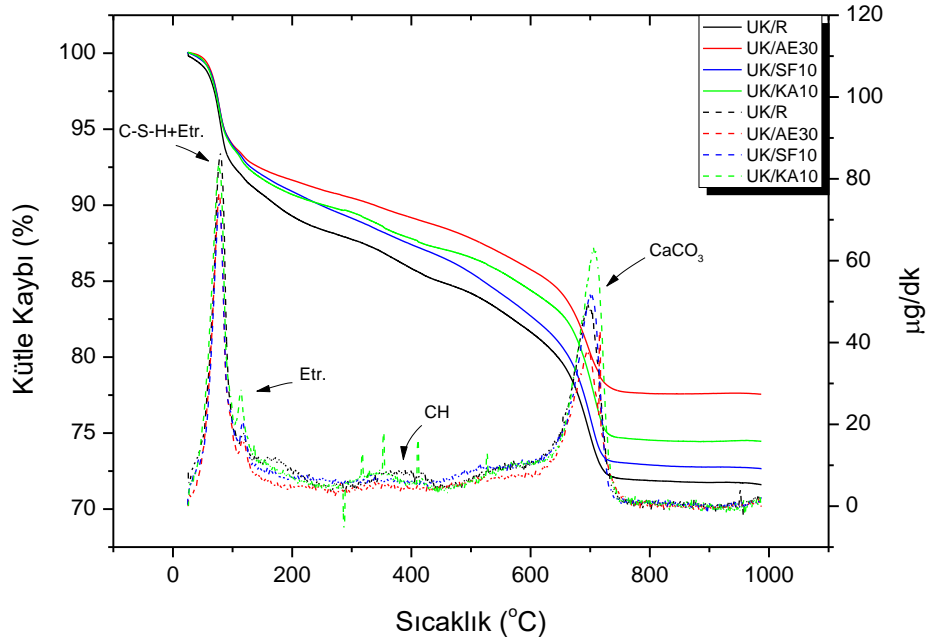
düşünülebilir. Bu nedenle arzu edilen dayanım değerleri elde edilememiştir. Nitekim literatürde sıcaklık ile kürlenmiş alçı – kireç – puzolan karışımlarının suda kürlenmiş olanlara göre daha yüksek basınç dayanımına, daha düşük poroziteye ve su emmeye sahip olduğu rapor edilmiştir (Cengiz, 2009).

4.3.2. Termogravimetrik Analiz (TGA)

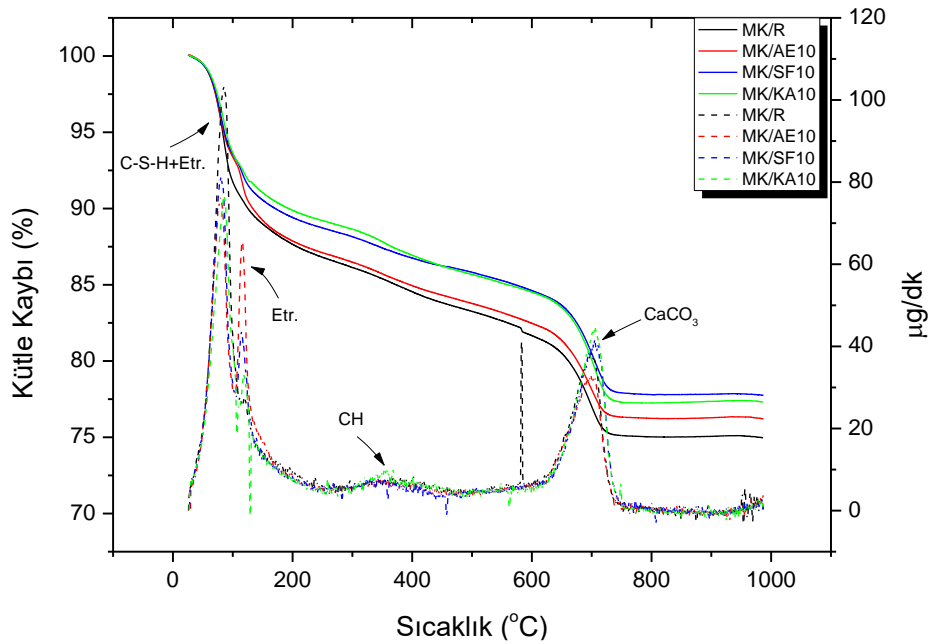
Şekil 4.48 – 4.50 arasında sırasıyla, referans örneklerle, UK serisinden seçilmiş örneklerle ve MK serisinden seçilmiş örneklerle uygulanan TGA sonuçları görülmektedir. TGA sonuçları ile birlikte aynı zaman reaksiyonların hangi sıcaklıklarda gerçekleştiğini ifade eden Diferansiyel Termogravimetrik Analiz (DTG) sonuçları da sunulmuştur. Grafiklerde düz çizgi ile ifade edilen eğriler TGA sonuçlarını ve kesikli çizgi ile ifade edilen eğriler DTG sonuçlarını ifade etmektedir.



Şekil 4.48: Referans örneklerinin TGA-DTG analizleri



Şekil 4.49: Buhar kürü uygulanmış UK serisinden seçilmiş örneklerinin TGA-DTG analizleri



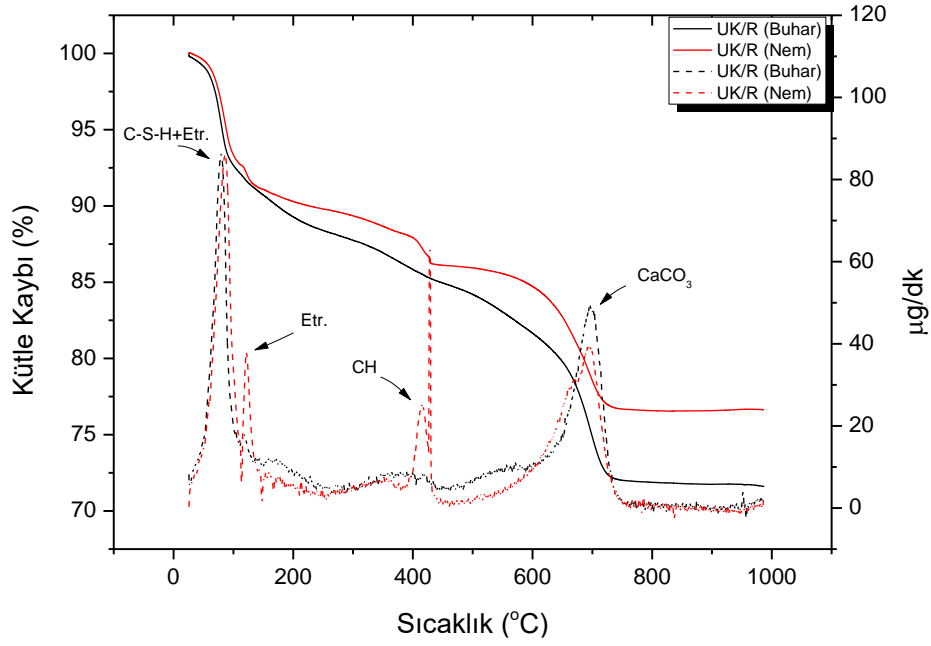
Şekil 4.50: Buhar kürü uygulanmış MK serisinden seçilmiş örneklerinin TGA-DTG analizleri

Örneklerin geneline bakıldığında iki ana pik varlığı gözlenmektedir. Birinci pik analizin hemen başlangıcında 100 – 200 °C arasında görülmektedir. Bu bölümdeki pik çoğunlukla bir büyük ana pik ve hemen yanında küçük bir komşu pik oluşması şeklinde görülmüştür. İkinci pik ise 600 – 750 °C arasında görülmektedir. Yine örneklerin genelinde 300 – 400

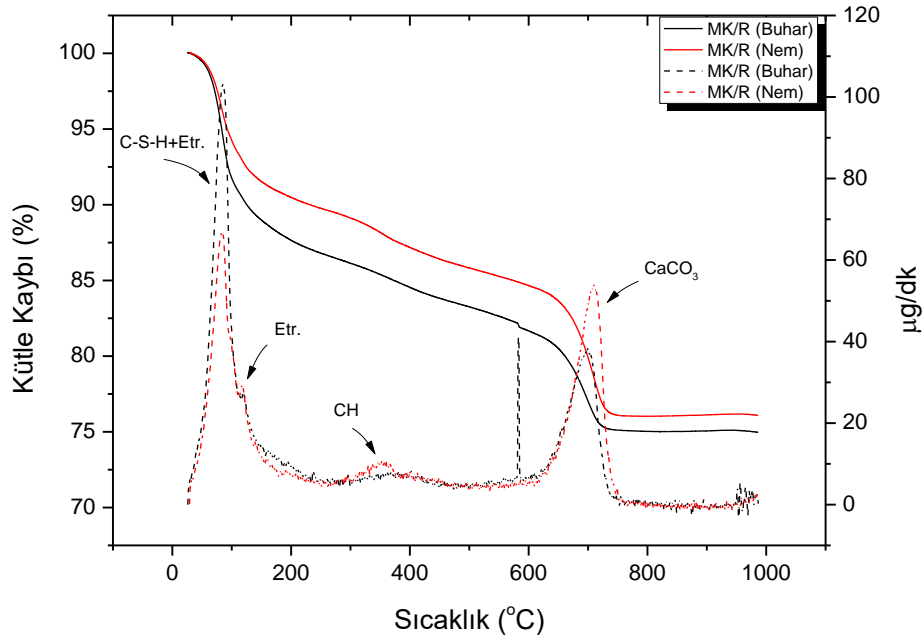
°C arasında çok kuvvetli olmayan hafif belirgin bir pik varlığı daha söz konusudur. Bir kısım örneklerde ise 400- 600 °C arasında bazı pikler görülmektedir. Literatürde belirtilen aralıklarda meydana gelen reaksiyonlara dair bazı değerlendirmeler bulunmaktadır. Neto vd. (2010) hidrate kireç, alçı ve yüksek fırın cürufu kullandıkları bir çalışmada, uyguladıkları TGA analizlerinin sonuçlarına göre 30 – 220 °C arasında meydana gelen kütle kayıplarının C-S-H ve etrenjit gibi alüminatlı fazlara ait olduğunu belirtmişlerdir. 375 – 500 °C arasında meydana gelen kayıpların ise portlandite kaynaklı olduğunu düşünmüşlerdir. 700 °C civarlarında meydana gelen kayıpların ise kalsiyum karbonat (CaCO_3) ve karbonatlı bileşenlerden oluştuğu düşünülmüştür. Wang vd. (2019) çalışmalarında metakaolin, alçı ve kireç içeren örneklere TGA uygulamışlardır. Buna göre 100 – 200 °C arasında meydana gelen kütle kayıplarının C-S-H, etrenjit ve etrenjit fazlarına ait olduğu belirtilmiştir. 400 – 500 °C arasında meydana gelen kayıpları ise portlandit kaynaklı kayıplar olarak değerlendirilmiştir. El-Diadamony vd. (2019) ise 200 °C'nin altında meydana gelen kütle kayıplarının C-S-H ve C-A-S-H gibi ürünlerin jel tabakalar arasındaki suyun dehidrasyonu olarak belirtilmiştir. 420 – 450 °C arasında portlandit ve 700 – 750 °C arasında kalsiyum karbonat kaynaklı kayıplar olduğu ifade edilmiştir. Morin vd. (2011) yaptıkları TGA analizlerinde 110 – 120 °C arasında meydana gelen güçlü piklerin C-S-H kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. Bunu takip eden ve 130 °C civarında oluşan pikin etrenjit ve 180 °C civarında olan pikin ise monosülfat kaynaklı olduğunu belirtmiştir. 400 – 500 °C arasındaki kayıplar ise portandite bağlanmıştır. Bu bilgilerin ışığında bu çalışma kapsamında üretilmiş örneklere uygulanan TGA-DTG eğrileri anlamlandırılmıştır. 100 – 200 °C arasında meydana gelen birinci pikin ve hemen onun yanında bulunan küçük pikin C-S-H ve etrenjit kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir. 400 °C civarı ve 500 °C'ye kadar olan aralıkta meydana gelen kayıpların portlandite kaynaklı olduğu ve 600 – 800 °C arasında meydana gelen kuvvetli piklerin ise kalsiyum karbonat kaynaklı olduğu şeklinde değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirmeler grafikler üzerinde işaretlenmiştir. Buna göre DTG eğrilerinden faydalanarak belirlenmiş bölgelerde meydana gelen kütle kayıpları hesaplanmıştır. Şekil 4.48'deki referans örnekleri incelendiğinde MK/R ve UK/R örneklerinde çok belirgin birer DTG piki görülmektedir. PK/R örneğinde ise aynı pik hafifçe sağda meydana gelmiştir. Literatüre göre bu bölge C-S-H ve etrenjitten kaynaklanmaktadır. Basınç dayanımı değerlerine bakıldığında en yüksek dayanımı veren MK/R örneğinde bu bölgedeki kütle kaybı %9,85 olarak hesaplanmıştır. UK/R örneğinde ise %7,82 ve PK/R örneğinde %6 olarak hesaplanmıştır. C-S-H ve etrenjitin basınç dayanımları üzerinde etkin olduğu düşünüldüğünde elde edilen değerler

ile basınç dayanım değerleri uyumludur. Her üç örnek için de CH (portlandit) bölgesindeki reaksiyonların oldukça zayıf olduğu görülmektedir. CaCO_3 'ün bozulmasından kaynaklı olan kütle kayıpları ise MK/R için %5,86, UK/R için %8,4 ve PK/R için %9,43'tür. UK serisinden seçilmiş örneklerin TGA sonuçlarının incelendiğinde (Şekil 4.49) birinci pikte en fazla kütle kaybı UK/R örneğinden hesaplanmıştır. Bunu sırasıyla UK/AE30 (%7,30), UK/KA10 (%6,96) ve UK/ŞF10 (%6,79) örnekleri takip etmektedir. C-S-H ve etrenjit kaynaklı kütle kayıplarının en yüksek olduğu örneklerde basınç dayanımlarının da diğerlerinin üzerinde olduğu görülmektedir. UK/AE30 örneğinin CaCO_3 pikinde oluşan kütle kaybının diğer örneklerden çok daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi bu örnekte kireç yerine %30 oranında AEUK bulunmasıdır. Bu nedenle kireç reaksiyonlarından meydana gelecek olan CaCO_3 miktarı azalmıştır. Diğer örneklerin bu bölgedeki kütle kaybı ise %8'in biraz üzerindedir. Bu analizlerde de CH bölgesinde ciddi bir reaksiyon olmadığı gözlenmektedir. MK serisinde ise (Şekil 4.50) birinci pikte en fazla kütle kaybı MK/R örneğinden elde edilmiştir. Bunu MK/ŞF10 (%8,58), MK/KA10 (%8,01) ve MK/AE10 (%6,55) örnekleri izlemektedir. Burada MK/ŞF10 ve MK/KA10 örneklerinin basınç dayanımlarının birbirlerine çok yakın olduğu ve C-S-H bölgesinden elde edilen kütle kaybının da benzer olduğu görülmektedir. MK/AE10 örneği ise bu ikisinden daha düşük bir dayanım vermiştir. CaCO_3 bölgesinde ise %5,5 - %6,5 arasında kayıp değerleri elde edilmiştir.

Şekil 4.51 ve 4.52 sırasıyla UK ve MK serileri için buharda ve nemde kürlenmiş referans örneklerinin TGA-DTG eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.51: Buhar kürü ve nem kürü uygulanmış UK/R örneklerinin TGA-DTG analizleri



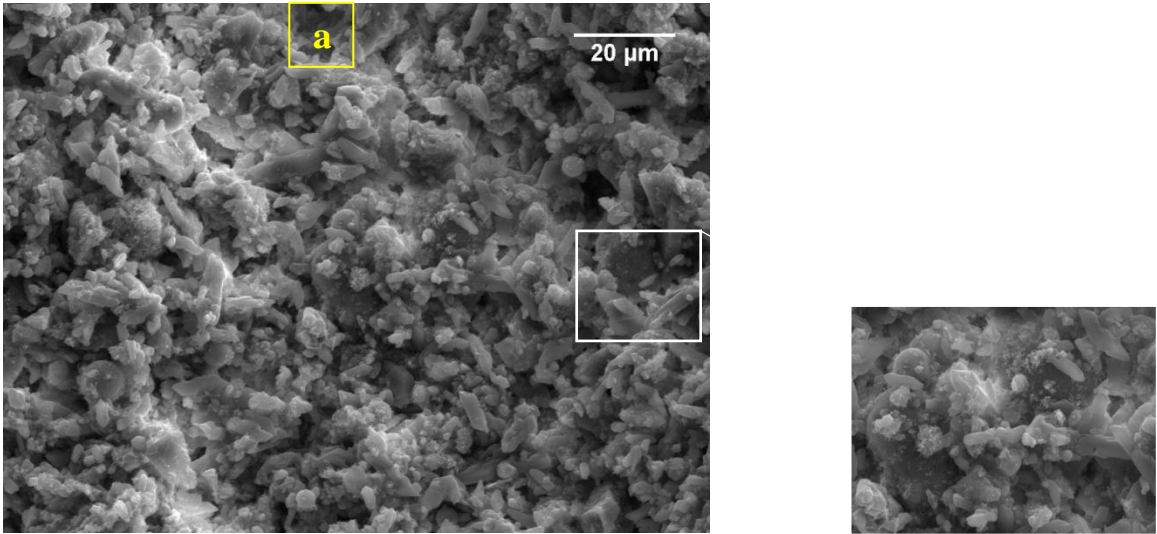
Şekil 4.52: Buhar kürü ve nem kürü uygulanmış MK/R örneklerinin TGA-DTG analizleri

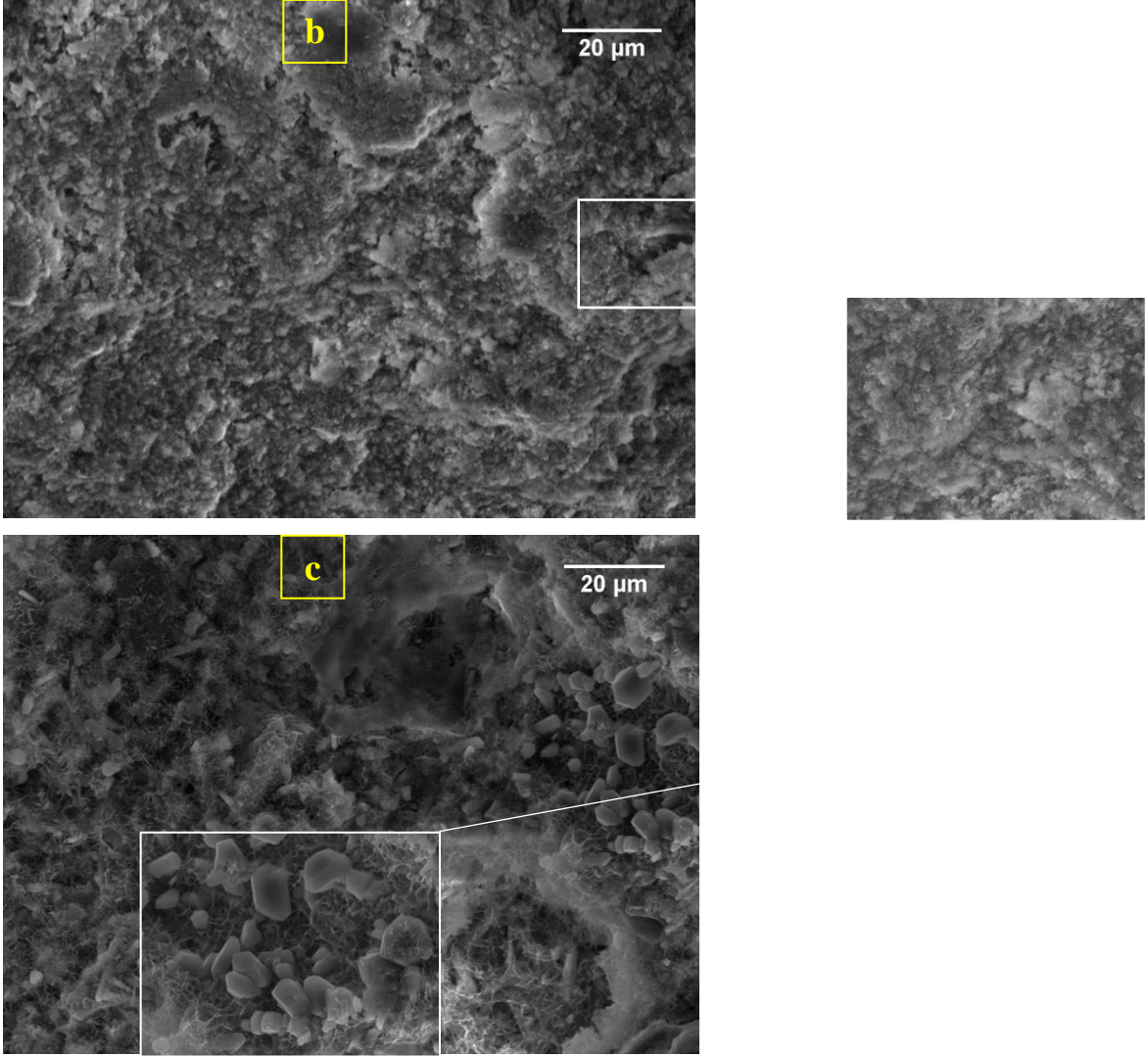
UK serisinde birinci pik bölgesinden elde edilen pik incelendiğinde buhar ile kürlenmiş örnekte %8,4 kütle kaybı elde edilirken nem ile kürlenmiş örnekte %6,40 kütle kaybı elde edilmiştir. İki eğri arasındaki en belirgin fark nem ortamında kürlenmiş örnekte belirgin bir CH (portlandit) pikinin elde edilmiş olmasıdır. Bu bölgede %8,61 değerinde bir kütle kaybı tespit edilmiştir. Son bölge ve toplam kütle kaybı açısından değerlendirildiğinde nem kürü uygulanmış örnekteki kütle kaybının daha düşük olduğu

görülmektedir. Bu durum kirecin dayanım kazanması için yeterli düzeyde reaksiyona giremediği, sonuç olarak yeterli düzeyde dayanım sağlayacak reaksiyon ürünü oluşturamadığı şeklinde yorumlanabilir. Şekil 4.52’de gösterilen MK/R serileri incelendiğinde UK/R serisinden farklı olarak ciddi bir CH piki tespit edilememiştir. Ancak yine de nem ile kürlenmiş örnekte, CH bölgesinde daha belirgin bir pik olduğu söylenebilir. Birinci pik bölgesindeki kütle kaybı değerleri buhar ile kürlenmiş örnek için %9,89 olurken nem ile kürlenmiş örnek için %7,72’dir. Son bölge ve toplam kütle kayıpları değerlendirildiğinde ise UK serisi ile benzer sonuçlar görülmektedir.

4.3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Bu bölümde bazı seçilmiş örneklerden alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile içyapı oluşumları, matris yapısının durumu ve tespit edilebilen agrega-matris ara yüzeyleri incelenmiştir. Şekil 4.53 buhar kürü uygulanmış referans örneklerin SEM görüntülerini göstermektedir.



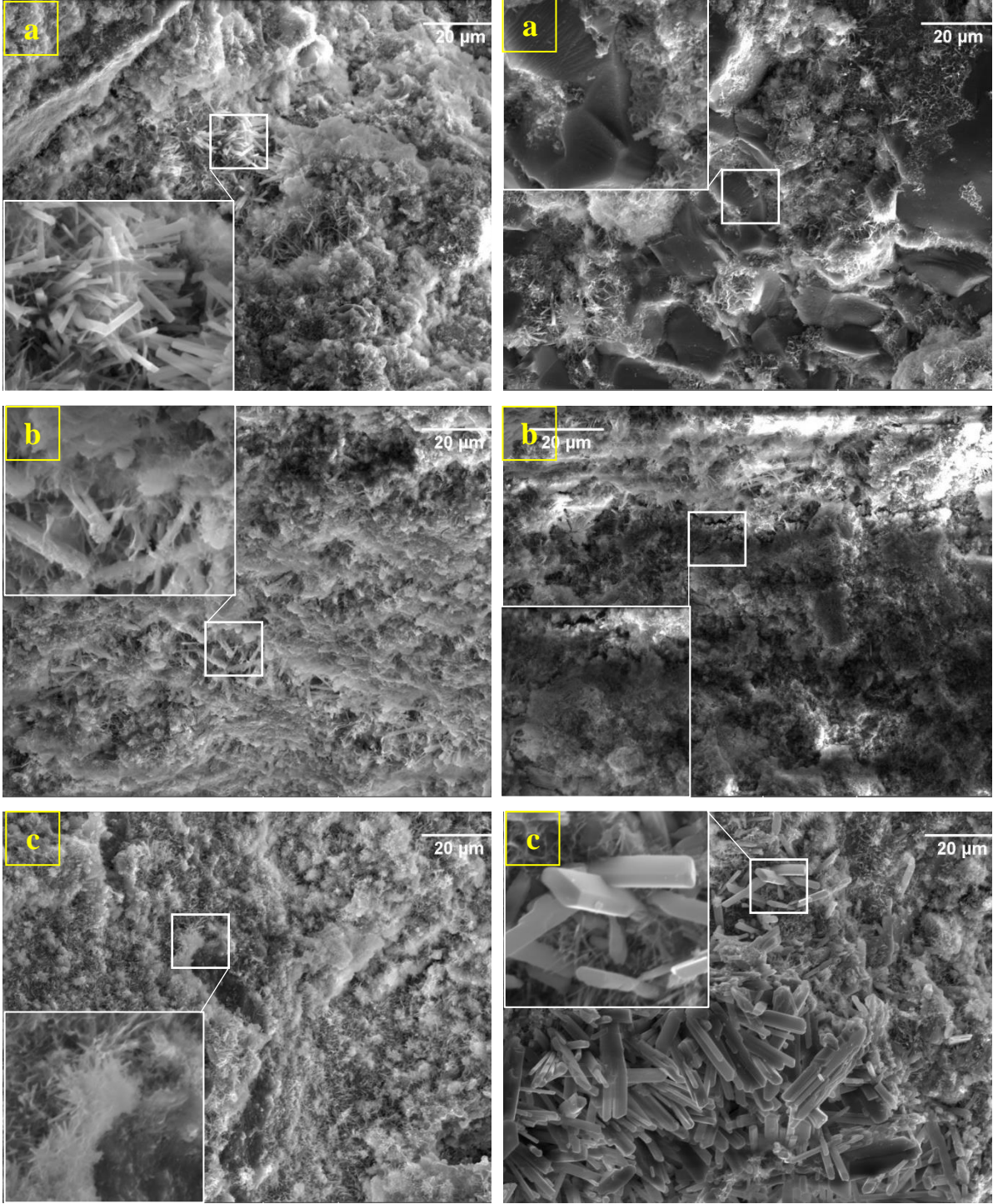


Şekil 4.53: Buhar kürü uygulanmış referans örneklerin SEM görüntüleri

a) UK/R b) MK/R c) PK/R

Her üç referans örneği de incelendiğinde yapılarında bazı belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. UK/R örneğinde (Şekil 4.53(a)) taneli bir yapı görülmektedir. Bunun dışında bazı noktalarda tam olarak reaksiyonlarda yer almamış küresel uçucu kül taneleri ile karşılaşmaktadır. MK/R (Şekil 4.53(b)) örneğinde ise çok daha dolu bir matris deseni ile karşılaşmaktadır. Bu durum reaksiyonların daha iyi gerçekleştiği ve sıkı bir matris yapısı oluşturduğu olarak yorumlanabilir. PK/R (Şekil 4.53(c)) örneği ise daha boşluklu ve hücreli bir yapıya sahiptir. Matris yapısı diğer iki referans örneğe kıyasla daha gevşek ve gözeneklidir. Aynı zamanda altıgen şekilli CH kristalleri (portlandit) yer yer görülmektedir.

Şekil 4.54'te UK serisinden seçilmiş örneklerin SEM görüntüleri görülmektedir.



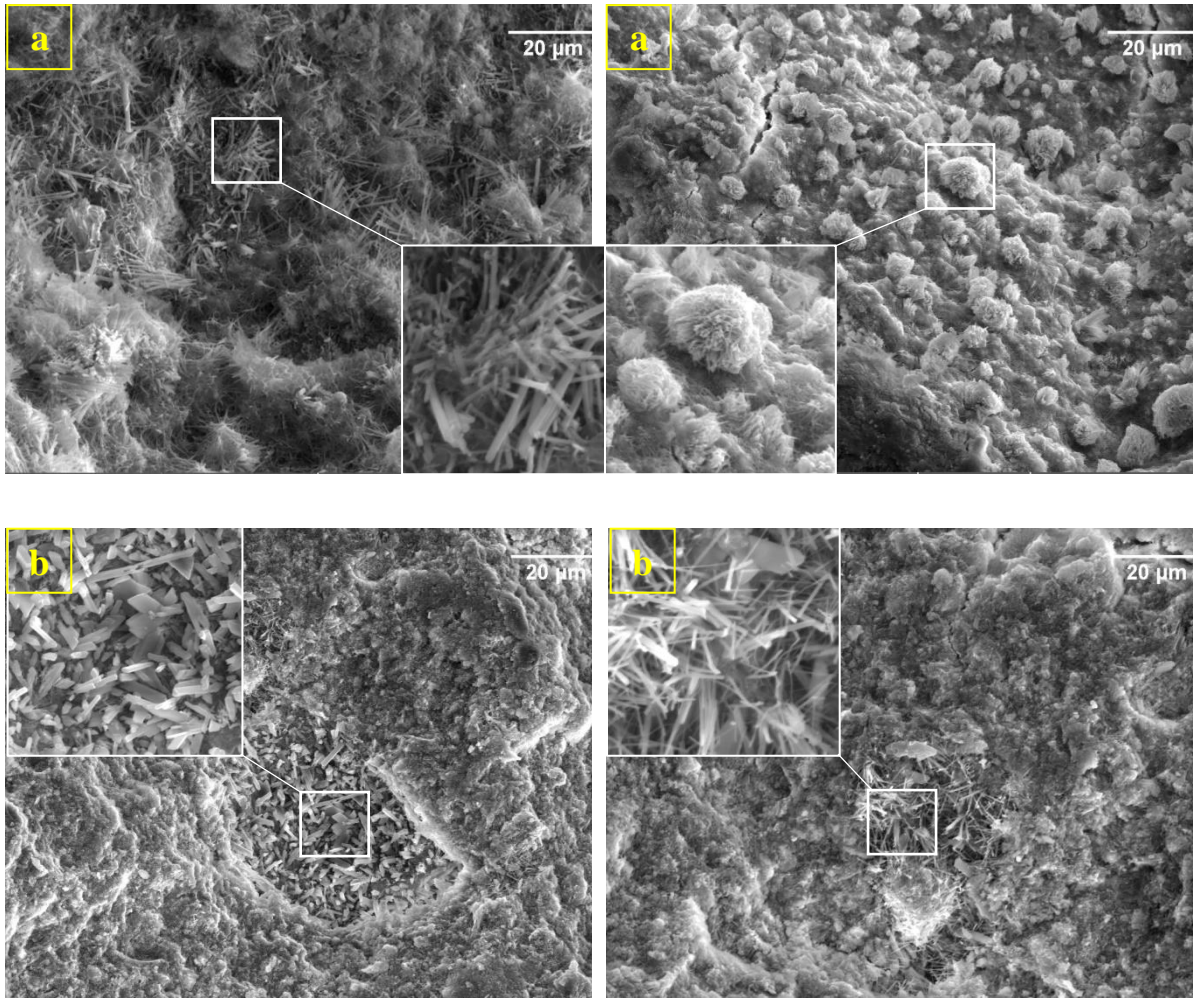
Şekil 4.54: Buhar kürü uygulanmış UK serisine ait örneklerin SEM görüntüleri

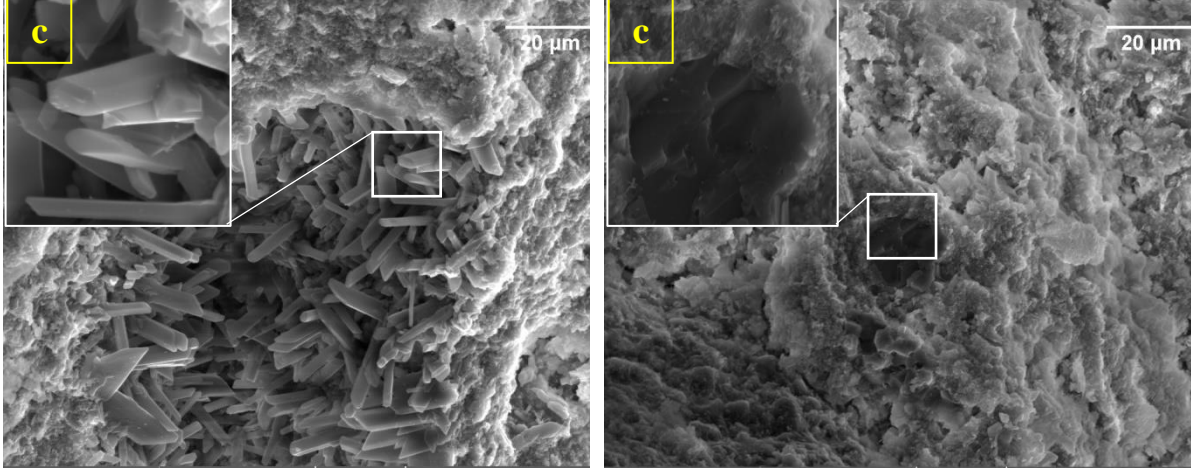
a) UK/AE30 b) UK/ŞF10 c) UK/KA10

Şekil 4.54(a)'da ince ve hücreli bir C-S-H yapısının içinde dağılmış alçı kristalleri görülmektedir. Aynı zamanda agregaların bu yapı içerisinde iyi bir şekilde dağıldığı ve matris ile kenetlenmelerinin iyi olduğu görülmektedir. Matris kenetlenmesinin iyi

olduğunun düşünülmesi, agrega taneleri ile matris fazı arasında boşluk veya çatlakların bulunmayışından ileri gelmektedir. Zaten bu durum yüksek dayanımın da göstergelerinden biridir. Şekil 4.54(b) yine matris yapısı içerisinde dağılmış durumda alçı kristalleri olduğu görülmektedir. Ancak alçı kristallerinin Şekil 4.54(a)'dakinden farklı olarak dış yüzeylerinin kaplı olduğu görülmektedir. Bu durum alçı kristallerinin yeterince gelişmesinin önüne geçebilir. Aynı zamanda UK/ŞF10 örneğine ait sağdaki görüntüde matris fazında birçok çatlakların bulunduğu ve yapının gevşek olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum dayanım değerlerini olumsuz etkilemiştir. Şekil 4.54(c)'de ise yine ince ve lifli C-S-H yapısı ve bunun içerisinde dağılmış alçı kristalleri görülmektedir. Alçı kristallerinin oldukça belirgin ve iyi geliştiğini gözlemlemek mümkündür.

Şekil 4.55'te MK serisinden seçilmiş örneklerin SEM görüntüleri görülmektedir.

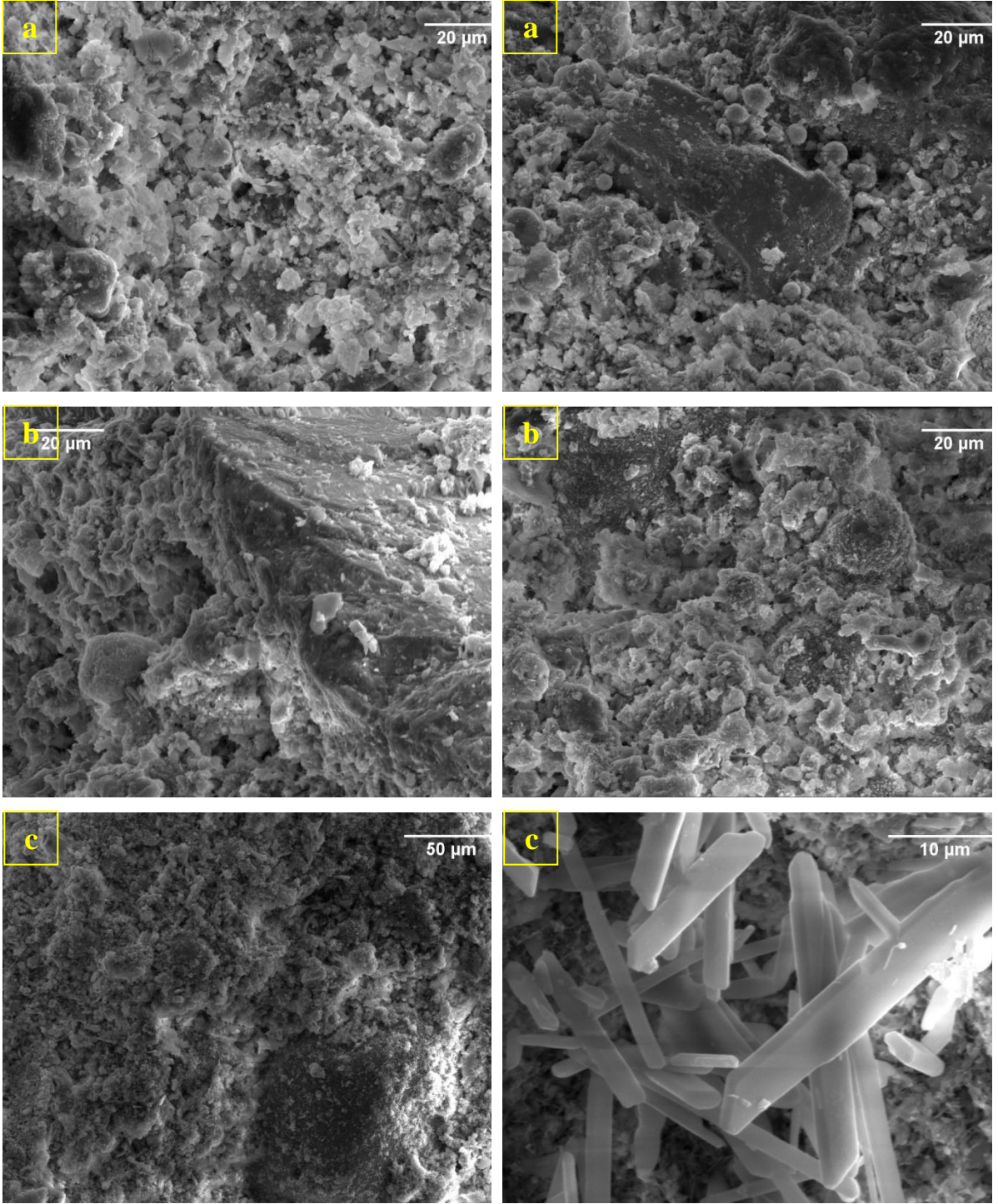




Şekil 4.55: Buhar kürü uygulanmış MK serisine ait örneklerin SEM görüntüleri
a) MK/AE10 b) MK/ŞF10 c) MK/KA10

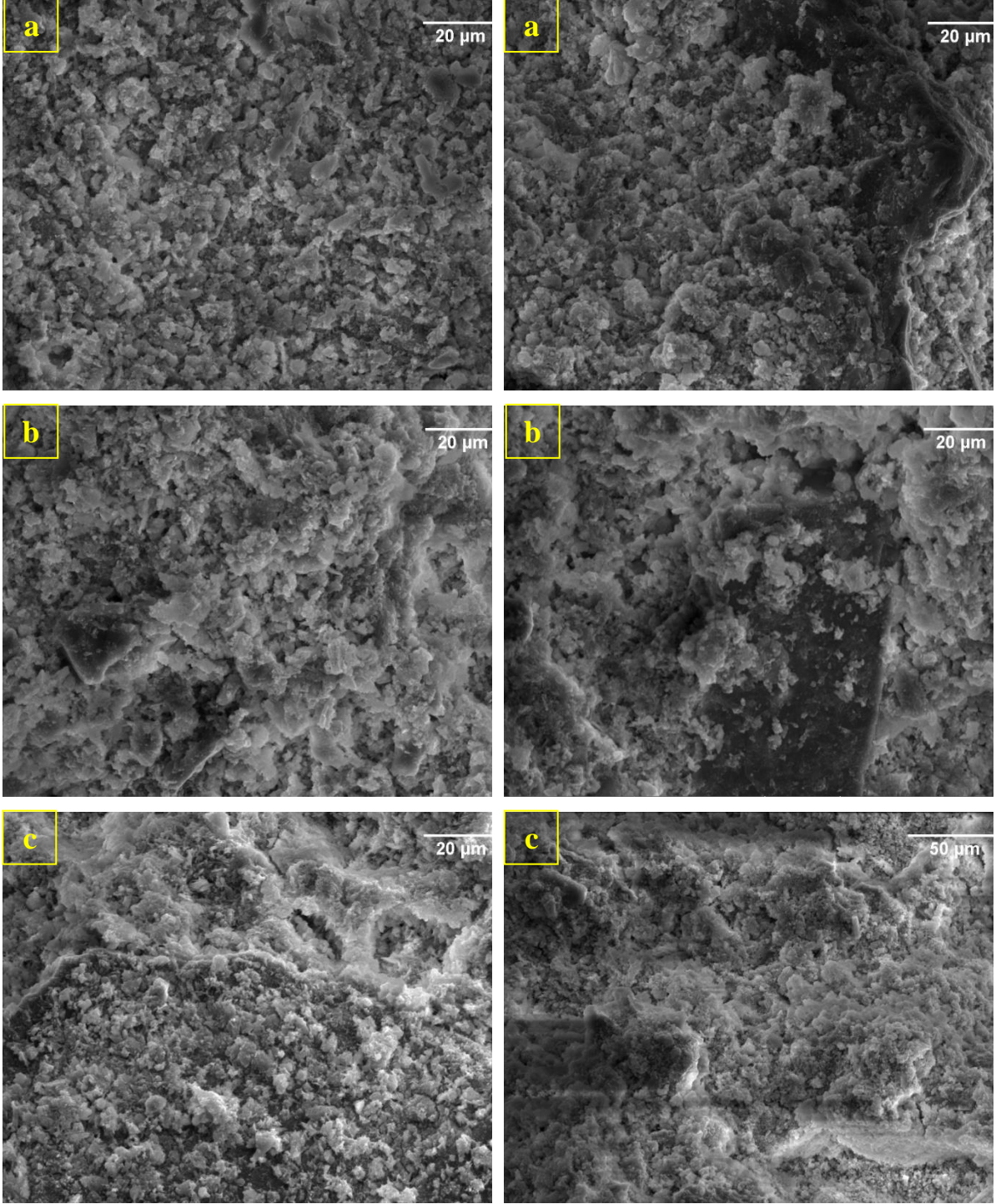
Şekil 4.55(a)'da matris yapısında yoğun şekilde gelişmiş etrenjit fazının varlığı görülmektedir. Normal şartlarda alçı ile aktif edilmiş camsı yapıda puzolanların çözünmesini artırdığı rapor edilmiştir ve bu durum sıkı bir içyapı oluşumuna neden olmaktadır. Diğer taraftan şekilde görülen yapının iyi gelişmiş etrenjit kristallerinin yerine genişlenen etrenjit yapısı olduğu belirtilmiştir (Demir ve Başpınar, 2008). Genleşen etrenjit yapısı ise dayanım kazandırmak yerine kaybettirmektedir. Sağdaki görüntüde ise AEUK taneleri üzerinde oluşan hidrasyon ürünleri görülmektedir. Bu yapıda AEUK tanelerinin reaksiyonlara katılmaktan çekirdeklenme sahası olarak gören yaptıkları düşünülebilir. Şekil 4.55(b)'de düzgün matris yapısı içerisinde gelişmiş alçı kristalleri ve sağdaki resimde etrenjit kristalleri görülmektedir. Şekil 4.55(c)'de ise alçı kristallerinin çok daha iyi geliştiği gözlenebilmektedir. Aynı zamanda sağdaki resimde bir agrega tanesinin matris içerisindeki yerleşimi görülmektedir. Bu tanenin matris içerisindeki kenetlenmesinin iyi olduğu söylenebilir. Zaten MK/ŞF10 ve MK/KA10 örnekleri birbirlerine yakın dayanımlar vermiş, MK/AE10 örneği ise onlara nazaran daha düşük dayanımlar vermiştir.

Şekil 4.56 ve 4.57'de'te UK ve MK serisinden seçilmiş nem kürü uygulanmış örneklerin SEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.56: Nem kuru uygulanmış UK serisine ait örneklerin SEM görüntüleri

a) UK/R b) UK/AE10 c) UK/KA10



Şekil 4.57: Nem kürü uygulanmış MK serisine ait örneklerin SEM görüntüleri

a) MK/R b) MK/AE10 c) MK/KA10

Nem kürü uygulanmış örnekler, buhar kürü uygulanmış örnekler ile karşılaştırıldıklarında yapıda ciddi şekilde farklılıklar görülmektedir. Matrislerin buhar kürü uygulanan örneklere çok daha gevşek olduğu, çok daha düzensiz ve dağınık yapılar olduğu görülmektedir. Şekil 4.56(a)'da oldukça düzensiz bir yapı görülürken, reaksiyonlarda yer almamış küresel uçucu

kül taneleri oldukça belirgindir. Agregalar ile hamur arasında da ciddi boşluklar görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 4.56(b) ve (c)'de matrisin çok düzensiz olduğu, birçok boşluklar içerdiği söylenebilir. Bunlarla birlikte agregalar ile kenetlenmelerdeki zayıflık dikkat çekmektedir. Benzer durumlar MK içeren örneklerde de görülmektedir. Şekil 4.57'deki bütün şekillerde matris yapısında dağınıklıklar görülmektedir. Oysaki MK içeren buhar ile kürlenmiş örneklerde (Şekil 4.55) çok daha düzenli bir yapının olduğu gözlenebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada alçı-kireç-puzolan karışımlarında farklı uçucu kül, metakaolin ve pirinç kabuğu külü olmak üzere üç farklı puzolan kullanılmış ve bununla birlikte kireç yerine Afşin-Elbistan uçucu külü, şeker fabrikası atığı, kolemanit atığı ve atık yumurta kabuğu kullanılarak çevre dostu harçlar üretilmesi hedeflenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Buhar kürü uygulanmış örnekler arasında birim ağırlık değerleri en düşük çıkan seri PK serisidir. En yüksek birim ağırlıklar ise UK serisinden elde edilmiştir. Ancak birim ağırlık değerleri arasında çok ciddi farklılıklar bulunmamaktadır. Nem kürü uygulanan numuneler ise buhar kürü uygulanan örneklerle göre daha düşük birim ağırlık değerleri vermiştir. Bu grupta da en düşük birim ağırlıklar PK serisinden elde edilmiştir.
- Buhar kürü uygulanan örneklerin porozite değerleri nem kürü uygulanan örneklerle göre daha düşük çıkmıştır. Buhar kürü uygulanan seriler arasında porozite değerleri en yüksek olan seri PK serisi en düşük olan seriler ise UK serisi olmuştur. Bu seriler içerisinde ise en düşük porozite değerleri genellikle AEUK kullanılarak üretilen örneklerden elde edilmiştir. Nem kürü uygulanan serilerde de aynı sonuç görülmüştür. PK içeren örneklerden ise oldukça yüksek porozite değerleri elde edilmiştir.
- Buhar kürü uygulanan örnekler arasında en düşük su emme değerleri UK serisinden, bu seri içerisinde de AEUK içeren örneklerden elde edilmiştir. Özellikle %30 AEUK kullanımı iyi sonuçlar vermiştir. MK ve PK içeren serilerde ortalama su emme değerleri benzerdir. Nem kürü uygulanan örnekler arasında da benzer bir ilişki söz konusudur. Ancak buhar kürü uygulanan örneklerle göre su emme değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Kılcal su emme değerleri incelendiğinde UK ve PK gruplarında en iyi sonuçların referans örneklerinden elde edildiği görülmektedir. MK serisinde ise %10 AEUK kullanımı en iyi sonuçları vermiştir. Puzolan gruplarında en düşük kılcal su emme MK serisinden elde edilmiştir. Atık katkıları arasında ise bütün gruplarda AEUK içeren örnekler daha iyi sonuçlar vermişlerdir. Nem kürü uygulanan örneklerde de en iyi sonuçlar MK serisinden elde edilmiştir. Bütün gruplarda sonuçlar buhar kürü uygulanan örneklerle göre oldukça yüksektir.

- Buhar kürü uygulanmış örneklerde her  c puzolan grubu için de ortalama benzer değerler elde edilmiştir. Grupların kendi içerisinde farklılıklar söz konusu olsa da çok ciddi bir fark yoktur. Ancak MK/şF grubunda %20 ve %30 içeren örneklerde ortalama değerlere göre oldukça d şuk sonuçla elde edilmiştir. Nem kürü uygulanmış örneklerde de benzer eğilimler söz konusudur ancak ultrasonik ses geçiş hızları buhar kürü uygulanan serilere göre daha d şuktur. Bu durum içyapının daha boşluklu olduğunun bir göstergesidir.
- Buhar kürü içeren örnekler arasında MK serisi basınç dayanımı açısında en iyi grup olurken PK serisi en başarısız grup olmuştur. UK ve MK serisinde en iyi örnek referans  rneği olmuştur. Atık katkı kullanımı basınç dayanımını d ş rmuştur. Atık katkı içeren gruplarda ise en iyi sonuçlar UK ve PK serisinde %30 AEUK içeren örnekten elde edilmiştir. MK serisinde is bu örnek en iyi ikinci örnek olmuştur. Genel olarak atık katkı kullanımı basınç dayanımı değerlerini düşürse de elde edilen değerler k gir harçları ve sıva alçıları için belirlenen alt sınırları sağlayacak seviyededir.
- Nem kürü uygulanmış örneklerin basınç dayanımı değerleri buhar kürü uygulanmış örneklerle göre daha d şuktur. UK ve MK serisi için yine en başarılı örnekler referans örnekleri olmuştur. Her  c puzolan grubu için de en başarılı atık katkılı  rnek %30 AEUK içeren örnekler olmuştur. Özellikle PK içeren serilerde basınç dayanımı oldukça d şuk olup birçok örnekte yaklaşık 2 MPa seviyesindedir.
- Buhar kürü uygulanmış bütün serilerde %30 AEUK içeren örnekler en yüksek eğilme dayanımını vermiştir. Diğer örneklerin ise önemli bir kısmı referans örneklerinden daha d şuk değerler vermiştir. Nem kürü uygulanmış örneklerde ise yine %30 AEUK içeren örnekler en iyi sonuçları vermişlerdir. Genel olarak nem kürü uygulanmış örnekler buhar kürü uygulanan örneklerde çok daha d şuk değerler vermiş hatta PK serisinde  c örnek dışında eğilme dayanım değeri alınamamıştır.
- XRD analizlerine göre örneklerde en yaygın görülen fazlar kuvars, kalsit, etrenjit, tobermorit ve anortit olmuştur. Bazı örneklerde alçıdan kaynaklı kalsiyum sülfatlara rastlanmış, bir kısım örneklerde de reaksiyonlarda yer alamayan portlandite rastlanmıştır.
- TGA analizlerinde bütün örneklerde iki belirgin pik elde edilmiştir. Bunlardan ilki kuvvetli bir biçimde C-S-H ve etrenjitten kaynaklanan bir pik olurken, diğeri de kalsiyum karbonatın bozulmasından kaynaklanan bir piktir. Örneklerin birçoğunda belirsiz denecek düzeyde portlandit bozulması görülmektedir. TGA sonuçlarında elde

edilen kütle kayıplarının işaret ettiği C-S-H ve etrenjit miktarları basınç dayanımı sonuçlarını destekler niteliktedir.

- SEM görüntülemeleri dayanımı yüksek olan örneklerin birçoğunun içyapısının daha sıkı olduğunu, boşluk ve/veya çatlak miktarının düşük olduğunu göstermiştir. Bazı dayanımı düşük örneklerde alçı kristallerinin veya matris yapısının iyi gelişemediği gözlenmiştir. Dayanımı yüksek örneklerde ise bu gelişimin daha kaliteli olduğu görülmüştür. Nem kürü uygulanmış örneklerdeki dayanıksızlık ise SEM görüntülerinden çok açık şekilde görülmektedir. Bu örnekler çok daha boşluklu ve düzensizdir. Aynı zamanda agregalar ile kenetlenmeleri de oldukça zayıf bulunmuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde özellikle yapı malzemeleri için çok önemli olan basınç dayanımı değerleri göz önüne alındığında, birçok atık katkı içeren örneğin referans örneklerden daha az dayanım sağladığı görülmektedir. Ancak elde edilen değerlerin bir sıva harcı için ihtiyaç duyulan değerlerden daha yüksek olduğu, minimum değerleri sağladığı görülmektedir. Bunun dışında kullanılan atıkların herhangi maddi değeri olmaması, aynı zamanda atık olmaları ekonomik ve ekolojik bir getiri sağlayacaktır. Özellikle birçok örnekte %30 oranında AEUK kullanımının başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer atık katkılarda bazı puzolanların bulunduğu sistemlerde başarılı sonuçlar vermiştir ancak bu sonuçlar genele bakıldığında biraz daha tutarsız ve tekrarlı deneyler ile sağlamalarının yapılmasına muhtaçtır. Gelecek çalışmalarda bu proje kapsamında kullanılan ve AEUK içeren bir kısım örneklerdeki gibi yeterli sonuçları sağlayan harçların “sıva harcı” olabilmesi için gerekli diğer özellikler sağlayıp sağlamadığı irdelenmelidir. Bununla birlikte ekonomik bir değerlendirme yapılması elde edilecek maddi kârın da ortaya konulmasını sağlayacaktır. Bu göstergeler, atık katkılar içeren harçların, her ne kadar referans örneklerden biraz daha düşük dayanım değerleri sağlamış olsalar da sıva harcı olarak kullanımının mümkün olup olmadığı konusunu aydınlatacaktır. Bunu yanında endüstriyel süreçlerin birçoğunun sonucu olarak farklı atık kireç kaynakları da ortaya çıkmaktadır. İleriki çalışmalarda bu malzemeleri de konu alan araştırmalar yapılarak proje kapsamında kullanılan atık katkılardan daha iyi performans veren ürünler elde edilmesi mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

- Akbaş, K.Z. (1996). Fireboard ile Yangından Korunma, Isı, Ses, Su, Yangın Yalıtım Alıplık Akın , B., 2010, şeker Endüstrisi Atık Sularının Kimyasal Koagülasyon Yöntemiyle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi ve Optimum İşletim Koşullarının Belirlenmesi, Ankara.
- Arıoğlu N., Acun S. (2005). A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters: A staging system approach, *Building and Environment* 41: 1223–1230.
- Arslan A. A. (2019). Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçlara Farklı Kür Koşullarının Etkisinin İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Aubert J.E., Segui P., Husson B., Measson M. (2012). A method developed to quantify lime and gypsum consumed by mineral additions, *Cement & Concrete Composites* 34: 874–880.
- Baba, S., 2022, Baraj Dolgu Malzemesi İyileştirmesinde Uçucu Kül ve Mermer Tozu Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi
- Bensted, J. ve Barnes, P., *Structure and Performance of Cements*, 2nd Edition, Spon Press, New York, 2002.
- Beydemir, K., (2007). Puzolan katkılı kireç harçlarının mekanik özellikleri. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bilginer, A., Canberk, O., Erdoğan, S. T., (2020). Activation of blast furnace slag with soda production waste, *J. Mater. Civ. Eng.*, 32.
- Binici, H., Temiz, H., Sevinç, A., vd. Atık Pil Kömürü ve Yumurta Kabuğunun Radyasyon Tutucu Materyal Olarak Üretimde Kullanılması, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1),2013 8 *KSU. Journal of Engineering Sciences*, 16(1),2013.
- Bulut, Ü., (2007). Perlitin puzolanik aktivitesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Cengiz, O., (2009). Effects of Pozzolan Incorporating and Curing Conditions on Strength and Water Resistance of Natural Gypsum Pastes. Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Concu, G., Trulli, N., (2018). Concrete Defects Sizing by Means of Ultrasonic Velocity Maps. *Buildings* 8, 176.
- Damar Tekin, S., (2014). Uçucu kül-kireç bağlayıcısının alçı ile aktivasyonu, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Demir, I., Baspinar, M.S., (2008). Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash–lime–gypsum mixture. *Constr. Build. Mater.* 22, 1299–1304.
- Durgun, M., 2011, Pomza, Kolemanit, Barit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Boyalarla Kaplanan Beton ve Donatların Korozyon Performansı , Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş.
- Ekiz Barış, (2016). Doğal Puzolan Katkılı Kireç Bağlayıcının Otoklavla Kür Koşullarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- El-Diadamony, H., Amer, A. A., Sokkary, T. M., El-Hoseny, S., (2019). Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes, *HBRC Journal*, 14, 150 – 158.
- Ersen, A., Gürdal, E., Güleç, A., Alkan, N., Ersan, H.Ö., Eruş, M., Çağiran, E., Baykır, M., Akıncı, G., (2016). Geleneksel Harçlar ve Koruma Harçları. *Restorasyon ve Konserv. Çalışmaları Derg.* 36–50.
- Eyyüboğlu, S., 2013, Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi , Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Gençtürk, G., 2011, Sönmüş Kireç ile Çimento ve Pr Plast Kullanımının Asfalt Kaplamaların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi.
- Görhan, G., (2006). Hafif yapı blokları üretiminde uçucu külün kireç ve çimento ile birlikte kullanımının araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güney, B. A., (2012). Development of Pozzolanic Lime Mortars for the Repair of Historic Masonry. Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Hüsem, F., 2014, Alçı Taşının Transformasyonu ve Etki Eden Unsurlar, Yüksek Lisans Tezi.
- Kahraman, Y., 2012, Afşin-Elbistan Termik Santrali Küllerinin Tarımda Kullanım Olanakları, Yüksek Lisans Tezi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı Kahramanmaraş.
- Kapeluszna, E., Kotwica, L., Rozycka, A., Golek, L., (2017). Incorporation of Al in C-A-S-H gels with various Ca/Si and Al/Si ratio: Microstructural and structural characteristics with DTA/TG, XRD, FTIR and TEM analysis, *Con. Build. Mat.*, 155, 643 – 653,
- Karahüseyin, S., 2019, Metakaolin Riyolit Kullanımının Gecikmiş Etrenjit Oluşumu Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi.

- Koçu, N. (2000). Yapılarda Alçı Kullanımı Olanaklarının Geliştirilmesi, III. Ulusal Alçı Kongresi, Ankara.
- Mahrebel, H., 2006, Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Matej Baláž, Ball milling of eggshell waste as a green and sustainable approach: A review, *Advances in Colloid and Interface Science* (2018) 256–275.
- Mateja Golež, Zeljko Pogačnik, Ana Mladenović (2018). Laboratory-prepared lime-gypsum mixtures based on the know-how of traditional technology, *Journal of Cultural Heritage* 32: 38–43.
- Mavi, Ö., (2000). Kireç harç ve sıvaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Middendorf, B. (2002). Physico-mechanical and microstructural characteristics of historic and restoration mortars based on gypsum: current knowledge and perspective, *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*, London, pp. 165–176.
- Morin, V., Walenta, G., Gartner, E., Termkhajornkit, P., Baco, I., Casanonne, J. M., (2011). Hydration of a belite-calcium sulfoaluminate-ferrite cement: Aether TM, 13th International Congress on Technology of Cement, Madrid, Spain.
- Morsy, M.S., Alsayed, S.H., Salloum, Y.A., (2012). Development of eco-friendly binder using metakaolin-fly ash-lime-anhydrous gypsum. *Constr. Build. Mater.* 35, 772–777.
- Neto, A. A. M., Cincotto, M. A., Repette, W., (2010). Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum, *Cem. Con. Comp.*, 32, 312 – 318.
- Özdemir, İ., 2020, Pirinç Kabuğu Külü İkameli Çimento Harçlarının Hidratasyon Gelişiminin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Düzce.
- Özkan, M., 2014, Şeker Pancarının İşlenmesi Sürecinin İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden Değerlendirilmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi / Araştırma, ANKARA
- Potgieter, J.H., Potgieter, S.S., De Waal, D., (2003). An empirical study of factors influencing lime slaking Part II: Lime constituents and water composition, *Water SA* 29, 157–160.
- Saraylı, M. Ali, (1975); "Yapı Malzemeleri Bilimi Yapı Malzemelerinin Tanımı, Üretilmesi, Sınıflandırılması, Denenmesi ve Kullanılması, İkinci Kısım Özeti, İ.D.M.M. Akademisi Teknolojileri Dergisi, 7(3), s. 17-16.
- Tokay, H., 2019, Vermikülit ve Uçucu Kül Katkılı Geopolimer Harç Üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi.

- Topçu, H., 2022, Yüksek Plastisiteli Kilin Uçucu Kül ve Nano-Sio2 ile Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi.
- Topçu, I., Boga, A., Effect of boron waste on the properties of mortar and concrete , Eskisehir, Turkey, Los Angeles, London, New Delhi and Singapore 2015, p:626-633.
- Turan, M. 2017, Farklı Lif Çeşitlerinin ve Sodyum Silikat Solüsyonunun Alçı Malzeme Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi.
- Ulusoy, H., 2012, Eskişehir Kırka Yöresinde Bor Madeni Çevresinde Yaşayan İlköğretim Çağındaki Çocuklarda Kan Bor Düzeyinin Ölçülmesi, Tıpta Uzmanlık Tezi, Osmangazi Üniversitesi.
- Ural, M.,2017, Vitrifiye Üretiminde Oluşan Deformasyonlar ve Giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Vergül,T. (2019). Silis Dumanı ve Hidrofobik Malzemelerin Kil Sıvaların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce.
- Vimmrová, A., Keppert, M., Michalko, O., Černý, R., (2014). Calcined gypsum-lime-metakaolin binders: Design of optimal composition. Cem. Concr. Compos. 52, 91–96.
- Wang, Y., Shui, Z., Gao, X., Huang, Y., Yu, R., Ling, G., (2019). Chloride binding behaviors of metakaolin-lime hydrated blends: Influence of gypsum and atmospheric carbonation, Con. Build. Mat., 201, 380 – 390.
- ASTM C20, Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water, American Society of Testing Materials, 2015.
- ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, American Society of Testing Materials, 2016.
- EN 13279-2, Gypsum Binders and Gypsum Plasters Test Methods, European Standards, 2014.
- EN 998-1, Specification for Mortar for Masonry Rendering and Plastering Mortar, European Standards, 2016.
- TS EN 1015-18, Kâgir Harcı – Deney Yöntemleri – Bölüm 18: Sertleşmiş Harcın Kapiler Etkiden Kaynaklanan Su Emme Katsayısının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, 2014.
- TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, 2016.

TS EN 459-1, Yapı Kireci – Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, 2015.

Eriç, M. (2010). Yapı Fiziği ve Malzemesi (3. Baskı.). İstanbul: Literatür Yayıncılık.

Eriç, M., (1994) "Yapı Fiziği ve Malzemesi", İstanbul 1994.

Eriç, M., (2014). Building Materials and Physics. Literature Bookstore, Istanbul.