



**MERMER TOZU VE ENDÜSTRİYEL ATIK İÇEREN
HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cüneyt DOĞAN

DANIŞMAN

Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERMER TOZU VE ENDÜSTRİYEL ATIK İÇEREN HARÇLARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL YÖNTEMLERLE
İNCELENMESİ

Cüneyt DOĞAN

DANIŞMAN

Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Cüneyt DOĞAN tarafından hazırlanan “Mermer tozu ve endüstriyel atık içeren harçların mekanik özelliklerinin deneysel yöntemlerle incelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 07/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği/** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman

: Prof. Dr. İsmail DEMİR

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Başkan

: Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye

: Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

İmza

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07/01/2019



Cüneyt DOĞAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MERMER TOZU VE ENDÜSTRİYEL ATIK İÇEREN HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Cüneyt Doğan

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail DEMİR

Mermer tozu (MT) inşaat teknolojisi üzerinde miktar ve kalite açısından önemli bir etkiye sahiptir. Farklı endüstriyel atıkların mermer tozu ile birlikte kullanılması, farklı amaçlarla kullanılan harçların üretimine imkan sağlar. Bu çalışmada, mermer tozunun uçucu kül ile birlikte harçlarda kullanımı araştırılmış ve bu malzemelerin harcın mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi için deneysel bir çalışmanın sonuçları sunulmuştur. İnce agreganın, sırasıyla mermer tozu, uçucu kül ve hem mermer tozu hem uçucu kül ile ikame edildiği toplam 27 harç karışımı CEM I 42,5 R tipi çimento ile hazırlanmıştır. Sabit (0,58) su / çimento oranı ile hazırlanan ve işlenebilirlik süperakışkanlaştırıcı ile dengelenen numunelere 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır. Standart kumun mermer tozu ile ikamesinde %5 mermer tozu ikamesinin optimum eğilme ve basınç mukavemeti sağladığı bulunmuştur. Benzer şekilde %20 uçucu kül ikamesi 49,55 MPa basınç mukavemetine ulaşarak harçlarda optimum mekanik özellik gösterdiği elde edilmiştir. Ayrıca, %15 mermer tozu ile %15 uçucu kül kullanımının harçların mekanik özelliklerini geliştirdiği belirlenmiştir. Uçucu kül, puzolanik özellik sayesinde harçlarda daha avantajlı bir malzeme olduğu elde edilmiştir.

2019, ix + 79 sayfa

Anahtar Kelimeler:Mermer tozu, uçucu kül, endüstriyel atık, puzolan

ABSTRACT
M.Sc Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF MORTARS
CONTAINING MARBLE POWDER AND INDUSTRIAL WASTE WITH
EXPERIMENTAL METHODS

Cüneyt DOĞAN

Afyon Kocatepe University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. İsmail DEMİR

Marble powder has a significant impact on the quantity and quality of construction technology. The use of different industrial wastes in combination with marble dust results in the production of mortars serving different purposes. In this study, the use of marble powder in mortar with fly ash was investigated and the results of an experimental study to determine the effect of these materials on the mortar mechanical properties are presented. A total of 27 mortar mixtures were prepared with CEM I 42.5 R type cement, in which the fine aggregate was replaced with marble dust, fly ash, both marble dust and fly ash. 7 and 28 days of bending and compression tests were applied to the samples prepared with constant 0,58 water/cement. It was found that 5% marble powder substitution provides optimum bending and compression strength in the substitution of the standard sand with marble powder. Similarly, 20% fly ash substitution achieved an optimum mechanical properties in mortars by achieving a compressive strength of 49,55 MPa. 15% marble powder and 15% fly ash use have improved the mechanical properties of mortars. Due to the pozzolanic properties of fly ash is a more advantageous material for using in mortars.

2019, ix + 79 pages

Keywords: Marble Powder, fly ash, industrial waste, pozzolan

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail DEMİR'e, araştırma ve deneysel çalışmalar süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Mustafa Serhat BAŞPINAR'a, Sayın Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN'a ve Sayın Arş. Grv. Erhan KAHRAMAN'a her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Cüneyt DOĞAN
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Çimento	3
2.1.1 Çimento Tarihsel Gelişimi.....	3
2.1.2 Çimento Üretimi	4
2.1.3 Çimento Kimyasal Özellikleri	6
2.1.3.1 Alit	6
2.1.3.2 Belit	7
2.1.3.3 Aluminat	7
2.1.3.4 Ferrit	7
2.1.4 Çimento Fiziksel Özellikleri.....	8
2.1.4.1 Tane Boyutu	9
2.1.4.2 Mukavemet	9
2.1.4.3 Hidratasyon Isısı	9
2.1.4.4 Priz Süresi.....	9
2.2 Uçucu Kül (UK)	9
2.2.1 Uçucu Kül Üretimi	10
2.2.2 Uçucu Kül Özellikleri.....	10
2.2.3 Uçucu Kül Puzolanik Özelliği	12
2.2.5 Uçucu Kül Kullanım Alanları.....	13
2.2.6 Uçucu Külün Taze ve Sertleşmiş Betona Etkileri	15
2.3 Mermer Tozu (MT)	19
2.3.1 Mermer Tozu Kullanım Alanları	21
2.3.2 Mermer Tozunun Taze ve Sertleşmiş Betona Etkileri	21

3. MATERYAL VE METOT.....	27
3.1 Kullanılan Malzemeler	27
3.1.1 Çimento	27
3.1.2 İnce Agrega.....	28
3.1.2.1 İnce Kum ($d_{max}=1mm$).....	28
3.1.2.2 Standart Kum ($d_{max}=2mm$)	29
3.1.2.3 Kaba Kum ($d_{max}=5,6mm$)	30
3.1.3 Uçucu Kül (UK)	31
3.1.4 Mermer Tozu (MT)	34
3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı Katkı.....	36
3.1.6 Su	36
3.2 Metot.....	37
3.3 Uygulanan Analiz ve Deneyle.....	40
3.3.1 Eğilme ve Basınç Mukavemeti Deneyle.....	40
3.3.2 X Işını Kırınım (XRD) Analizi.....	41
3.3.3 Birim Hacim Ağırlık Analizi.....	42
3.3.4 Porozite Analizi	42
4. BULGULAR	43
4.1 Harç Karışımların Eğilme Mukavemeti Değerleri	43
4.1.1 İMT ve KMT Serileri 28 Günlük Eğilme Mukavemeti Değerleri.....	43
4.1.2 MT Serisi 7 ve 28 Günlük Eğilme Mukavemeti Değerleri	44
4.1.3 UK Serisi 7 ve 28 Günlük Eğilme Mukavemeti Değerleri.....	45
4.1.4 MU Serisi 7 ve 28 Günlük Eğilme Mukavemeti Değerleri.....	47
4.2 Harç Karışımların Basınç Mukavemeti Değerleri	48
4.2.1 İMT ve KMT Serileri 28 Günlük Basınç Mukavemeti Değerleri	48
4.2.2 MT Serisi 7 ve 28 Günlük Basınç Mukavemeti Değerleri	49
4.2.3 UK Serisi 7 ve 28 Günlük Basınç Mukavemeti Değerleri	50
4.2.4 MU Serisi 7 ve 28 Günlük Basınç Mukavemeti Değerleri.....	52
4.3 Harç Karışımlarının XRD Analizi.....	53
4.4 Harç Karışımlarının Porozite Değerleri.....	54
4.5 Harç Karışımlarının Birim Hacim Ağırlık Değerleri	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
6. KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	73
EKLER	74

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

μm	Mikrometre
MPa	Megapaskal
C_3S	Trikalsiyum silikat
C_2S	Dikalsiyum silikat
C_3A	Trikalsiyum aluminat
C_4AF	Tetrakalsiyum aluminoferrit
Fe_2O_3	Demir oksit
SiO_2	Silisyum dioksit
Al_2O_3	Alüminyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit
CaCO_3	Kalsiyum karbonat
Na_2O	Sodyum oksit
K_2O	Potasyum oksit
CaOH_2	Kalsiyum hidroksit

Kısaltmalar

ASTM	American Society Testing for Materials
CSH	Kalsiyum silika hidrat
MT	Mermer Tozu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu kül
XRD	X ışını kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1	İnce kuma ait tane boyutu analiz grafiği	29
Şekil 3.2	Standart kuma ait tane boyutu analiz grafiği	30
Şekil 3.3	Kaba kuma ait tane boyutu analiz grafiği	31
Şekil 3.4	UK SEM görüntüsü.....	33
Şekil 3.5	UK X Işınları kırınımı analizi	33
Şekil 3.6	UK'e ait tane boyutu analiz grafiği	34
Şekil 3.7	MT'na ait tane boyutu analiz grafiği.....	36
Şekil 4.1	İMT ve KMT serileri 28 günlük eğilme mukavemeti grafiği.....	44
Şekil 4.2	MT serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti grafiği	45
Şekil 4.3	UK serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti grafiği	46
Şekil 4.4	MU serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti grafiği.....	47
Şekil 4.5	İMT ve KMT serileri 28 günlük basınç mukavemeti grafiği.....	49
Şekil 4.6	MT serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti grafiği.....	50
Şekil 4.7	UK serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti grafiği	51
Şekil 4.8	MU serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti grafiği	52
Şekil 4.9	İMT serisi porozite grafiği	55
Şekil 4.10	KMT serisi porozite grafiği.....	55
Şekil 4.11	UK serisi porozite grafiği.....	56
Şekil 4.12	MU serisi porozite grafiği	57
Şekil 4.13	İMT serisi birim hacim ağırlık grafiği	58
Şekil 4.14	KMT serisi birim hacim ağırlık grafiği.....	59
Şekil 4.15	UK serisi birim hacim ağırlık grafiği	59
Şekil 4.16	MU serisi birim hacim ağırlık grafiği	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Çimento fazları, bileşenleri ve kimyasal formülleri.....	6
Çizelge 2.2	Klinker ve çimento kimyasal analizi.....	8
Çizelge 2.3	ASTM kuruluşunun belirlediği UK sınır değerler	11
Çizelge 2.4	Türkiye’de üretilen bazı UK’lerin kimyasal yapısı.....	12
Çizelge 2.5	UK’ün A.B.D. deki kullanım alanları ve miktarları	14
Çizelge 3.1	CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	28
Çizelge 3.2	UK kimyasal kompozisyonu	32
Çizelge 3.3	UK puzolanik aktivite indeksi.....	34
Çizelge 3.4	MT kimyasal kompozisyonu.....	35
Çizelge 3.5	Süperakışkanlaştırıcı beton katkısının teknik özellikleri	36
Çizelge 3.6	Ön hazırlık harç numunelerinin kütlece karışım oranları	37
Çizelge 3.7	Harç numunelerinin kütlece karışım oranları.....	39
Çizelge 3.8	Analizde kullanılan XRD cihazının bazı teknik özellikleri	41
Çizelge 4.1	İMT ve KMT serileri 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri.....	43
Çizelge 4.2	MT serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri.....	44
Çizelge 4.3	UK serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri.....	46
Çizelge 4.4	MU serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri	47
Çizelge 4.5	İMT ve KMT serileri 28 günlük basınç mukavemeti değerleri	48
Çizelge 4.6	MT serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri	50
Çizelge 4.7	UK serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri	51
Çizelge 4.8	MU serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri.....	52
Çizelge 4.9	Numune kristal fazlarının saniyede sayım şiddeti değerleri	53
Çizelge 4.10	Harç karışımlarının porozite değerleri	54
Çizelge 4.11	Harç karışımlarının birim hacim ağırlık değerleri	58

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 İscehisar mermer tozu döküm alanı	19
Resim 3.1 Portland çimento ve standart kum.....	27
Resim 3.2 İnce kum	29
Resim 3.3 Kaba kum.....	31
Resim 3.4 Uçucu kül ve mermer tozu.....	35
Resim 3.5 Yayılma tablası	38
Resim 3.6 Sarsma tablası ve mikser.....	39
Resim 3.7 Kalıplara dökülmüş numuneler ve kür tankındaki numuneler.....	40
Resim 3.8 Numunelerin basınç deneyi ve eğilme deneyi	40
Resim 3.9 XRD cihazı	41

1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı, artan kentleşme, gelişen yaşam standartları ve teknolojik yenilikler endüstriyel, madencilik, evsel ve tarımsal kaynaklı katı atıkların hem miktarını hem de çeşitliliği arttırmaktadır (Dhanapandian *et al.* 2009). Atık yönetimi konusunda toplum politikası atık üretimini azaltarak atık oluşumunu en aza indirmeye dayanır ancak temiz teknolojilerin uygulanmasıyla geri dönüşümü teşvik etmek ve atıkları yeniden kullanmak atıkların neden olduğu kirliliği azaltmanın en iyi yoludur (Eliche-Quesada *et al.* 2012). Bununla birlikte, mevcut stratejiyi en verimli şekilde kullanmak için kullanım stratejisi, çevresel ve enerji hususları ile birleştirilmelidir (Tsakiridis *et al.* 2008).

Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanımı çevreyi ve doğal kaynakları koruduğu gibi, yapay puzolan olarak kullanımı hidrolik bağlayıcıların mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağlar. Depolanması küresel sorun haline gelen bu atıkların geri kazanılması günümüz inşaat teknolojilerinde büyük öneme sahiptir.

Enerji üretimi için termik santraller kullanılmaya başladığından beri milyonlarca ton uçucu kül (UK) ve ilgili yan ürün açığa çıkmıştır. Dünya çapında yıllık kömür külü üretimi yaklaşık 600 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir ve üretilen toplam külün %75-80'i yaklaşık 500 milyon tonu ise UK'dür (Ahmaruzzaman 2010). Ayrıca, UK'ün küresel depolama maliyeti yaklaşık olarak yıllık 1,2 milyar ABD doları olarak tahmin edilmektedir (Dermatas and Meng 2003).

UK'ün atık sahalarında depolanması birçok ülke için ilk seçenektir. Bununla birlikte UK'ün sahip olduğu element ve bileşikler, UK'ün hammadde olarak geri kazanılma potansiyelini arttırmaktadır. Bu sayede, atıkların bertaraf edilmesi ve doğal kaynakların korunumu faydalarına ek olarak düşük maliyetli hammadde kullanımına olanak sağlamıştır (Ferreira *et al.* 2003).

Türkiye'de yılda 7 milyon ton mermer üretilir ve bu tesislerin atık malzemelerinin milyonlarca tona ulaştığı görülebilir (Ulubeyli ve Artir 2015). Bu atık malzemelerin stoklanması imkansızdır (Alyamaç ve İnce 2009). Sayısız faydalar nedeniyle, inşaat

teknolojisinde mermer tozu (MT) geri dönüşümü, devam etmekte olan birçok araştırma için odak noktasıdır.

İnce boyutlu mermer atıkları rüzgarın etkisi ile kolayca dağılabilir ve yağmur ve kar etkisi ile toprağa karışabilir. Böylece ince boyutlu mermer atıkları diğer mermer atıklarından daha fazla kirliliğe neden olur. Mermer blokları kesilirken 2 mm'den ince parçacıkların açığa çıkması mermer endüstrisi için önemli bir sorundur. 1 m³ mermer blok 2 cm kalınlığında levhalara kesildiğinde, açığa çıkan MT toplam atık miktarının %25'i kadardır (Bilgin *et al.* 2012).

Bu çalışmada, F sınıfı UK ve İncehisar bölgesinden alınan MT'nun harçların mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, ince agreganın belirli oranlarda UK ve MT ile ikame edilmesiyle üretilen harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç mukavemetleri incelenmiştir. X Işınlı Kırınımı (XRD) analizi ile harçların kristal fazları incelenerek gelişen fazlar belirlenmiştir ve harç karışımlarının porozite özellikleri belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu bölümde çalışma konusu olan malzemelerin özellikleri ve bu alanda daha önce yapılmış çalışmalar sunulmuştur.

2.1 Çimento

Çimento ince öğütülmüş, metalik olmayan, inorganik bir tozdur ve su ile karıştırıldığında sertleşen bir macun oluşturur. Bu hidrolik sertleşme, esas olarak, karıştırma suyu ve çimento bileşenleri arasındaki reaksiyonun bir sonucu olarak kalsiyum silikat hidratların oluşmasından kaynaklanır. Çimento, yapılar için temel malzemedir. Avrupa'da, büyük şehirlerde çimento kullanımı antik döneme kadar uzanabilir. Beton yapımında en çok kullanılan çimento olan Portland çimentosu 1824 yılında patentlenmiştir (European Commission Joint Research Centre 2013).

Çimento; kireçtaşı, kil ve alçıdan üretilir. Bu hammaddeler kireç, silika, alümina ve demir gibi gerekli temel bileşenleri sağlar (Salas *et al.* 2016). 19. yüzyılda endüstriyel çimento üretimi şaft fırınlarıyla başlamıştır ve günümüzde birçok yeni teknoloji ile donatılmış ekipmanlar sayesinde küresel üretim kapasitesi artan çimento ihtiyacını karşılayabilecek seviyeye ulaşmıştır (Al Amin *et al.* 2017).

2015 yılında küresel çimento üretimi 4,2 milyar ton olarak ölçülmüştür (Gao *et al.* 2017). Çimento üretimindeki artış en çok Çin ve Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerde öngörülmektedir (Schneider *et al.* 2011). Çimento üretiminin gelişimi, ekonomik faaliyete, sanayileşme ve altyapı geliştirme seviyelerine bağlıdır. Gelişmiş ülkelerde çimento talebinin yoğunluğu azalmakta ve birçok gelişmekte olan ülkede artmaktadır (Stafford *et al.* 2016).

2.1.1 Çimento Tarihsel Gelişimi

Günümüzde kullandığımız portland çimento icat edilene kadar, insanlık ilkel bağlayıcı malzemeler kullanmıştır. Şimdiye kadar bulunan en eski bağlayıcı malzeme kullanımı

1985 yılında güney Galilee, İsrail’de yol çalışmaları sırasında bulunan MÖ 7000 yılına ait zemin yapısına aittir. Pişirilerek öğütülmüş sönmemiş kireçten üretilen bu bağlayıcı malzeme, su ve kireçtaşı karıştırılarak ilkel beton elde edilmiştir. Sönmemiş kireç, MÖ 2500 yılında inşaa edilen Gize Büyük Pirmaiti’nde de kullanılmıştır (British Cement Association 1999).

Roma İmparatorluğu’nda ise puzolanlara ismini veren Pozzuoli bölgesinde, kireç harcına ince volkanik kül veya öğütülmüş volkanik mineraller ekleyerek, Yunanlılar ve Romalılar tarafından hidrolik kireç üretilmiştir. Romalılar ayrıca ezilmiş çinilerin yapay puzolan olarak da kullanılabilceğini keşfetmiştir. Hem doğal hem de yapay puzolanlar, su ile karıştırıldığında, kireçten kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek hidratlanmış kalsiyum silikatlar ve alüminatlar verecek şekilde bazı alüminaya sahip silikadan oluşur. Bu önemli örnekler, portland çimentolarında bulunan özelliklere çok benzemektedir. Hem puzolanın hem de kirecin harç içinde mevcut olması ve hidratların çözünmezliği ve kuvveti, bağlayıcının hidrolik özelliğinin ortaya çıkmasına yol açar. Kireç-puzolan çimentoları, Roma döneminden 19. yüzyıla kadar su ile temas halinde bulunan tek hidrolik bağlayıcılardır (Hall 1976).

1818 yılında Vicat, yapay Roma çimentosu hazırlamıştır. Kireçtaşı ve kilden oluşan bu karışımın kalsine edilmesi ile bu çimento portland çimentosunun öncüsü olmuştur. Portland çimentosu, 1824 yılında Joseph Aspdin tarafından patentlenmiştir. Kullanılan düşük kalsinasyon sıcaklığı nedeniyle çimento oldukça zayıf mukavemette üretilmiştir. Ürün portland çimentosu olarak adlandırıldı çünkü elde ettiği çimento, portland adasından getirilen yapısal taşlara benzemektedir (Gani 1997).

2.1.2 Çimento Üretimi

Dünyada her insan için ortalama olarak yılda yaklaşık 1 ton beton üretilmektedir. Bu nedenle çimento, dünyanın en önemli imal edilen malzemelerinden biridir. Dünya pazarında bolluğu nedeniyle, beton ve çimento üretimini anlamak gittikçe önem kazanmaktadır (Huntzinger and Eatmon 2009).

Çimento, kalsine edilmiş kireç ve kil gibi ana maddeler içeren ince öğütülmüş bir maddedir. Kullanılan kil, silis, alümina ve demir oksit sağlarken, kalker temel olarak kalsiyum oksit sağlar. Çimento üretiminde çimento hammaddeleri kalker ve kil madenlerde patlatma yöntemi ile elde edilir ve silolarda depolanır. Kırma ve parçalama işlemlerinden sonra, belirli oranlarda kil, kalker ve üretilen çimentonun türüne bağlı olarak diğer gerekli malzemeler ön homojenizasyon olarak bilinen bir işlemle karıştırılır. Konik silindirler yardımı ile farin değirmeni adı verilen öğütme işlemi uygulanır. Ek olarak, malzemenin çelik bilyeler vasıtasıyla toz haline getirildiği yatay değirmenler de kullanılabilir. Farin silolarında depolanan karışım, ön ısıtma işlemi ile birlikte 3-4 cm çapında küçük, koyu gri bir yarı mamül olan klinkere dönüştürülmesi için döner fırınlarda 1400 °C'de kalsine edilir. Klinker fırının alt ucundan boşalır, kırmızı-sıcakken, çeşitli basamaklarla soğutulur, öğütülür ve az miktarda alçı, çimento tipine bağlı olarak puzolan, kalker, UK v.b. gibi katkıları ile öğütülmesi sonucu çimento elde edilir. Çimentonun öğütülmesinde yaygın olarak bilyalı değirmenler kullanılır. Boyutu 1- 200 mikron arasında ince toz halinde öğütülen çimento, silolarda depolanır (Dunuweera and Rajapakse 2018).

Çimento üretimi için gerekli hammaddelerin ana bileşenleri kalsiyum oksit (CaO), silikon dioksit (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve demir oksittir (Fe₂O₃) (Telschow *et al.* 2012). Çimento üretim işleminin temel kimyası, kalsiyum karbonatın (CaCO₃) kalsiyum oksite (CaO) ve serbest karbon dioksit (CO₂) dönüşmesi için yaklaşık 900 °C'de kalsine edilmesi ile başlar. Bunu, kalsiyum oksidin silisleri, alüminatları ve kalsiyum ferritlerini oluşturmak için silis, alümina ve demir oksit ile 1400 - 1500 °C'de reaksiyona girdiği klinker işlemi takip eder. Hammadde nemine göre 4 farklı çimento üretim metodu vardır; kuru metod, yarı kuru metod, yarı ıslak metod ve ıslak metod (European Commission 2001).

TS EN 197-1 standardı genel amaçlı çimentoları 5 ana tip içerisinde toplamaktadır (TS EN 197-1):

CEM I Portland çimentosu

CEM II Portland - kompoze çimento

CEM III Portland Yüksek Fırın Cürufllu Çimento

- CEM IV Puzolanik çimento
CEM V Kompoze çimento

2.1.3 Çimento Kimyasal Özellikleri

Çimentonun ana bileşeni olan klinker, çeşitli kristal fazlardan oluşur. Bunların en önemlileri alit, belit, alüminat ve ferrittir. Alit ve belit kalsiyum silikat fazlarıdır. Bunlar sadece CaO ve SiO₂'den oluşan, alit trikalsiyum silikat fazı (Ca₃SiO₅) ve belit dikalsiyum silikat fazıdır (Ca₂SiO₄). Saf CaO ve saf Al₂O₃ tarafından oluşturulan alüminat fazı, trikalsiyum alüminat fazıdır (Ca₃Al₂O₆) ve saf CaO, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ tarafından oluşturulan ferrit fazı, tetrakalsiyum alüminoferrit fazıdır (Ca₄Al₂Fe₂O₁₀). Çimento fazları, bileşenleri ve kimyasal formülleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. (Telschow *et al.* 2012).

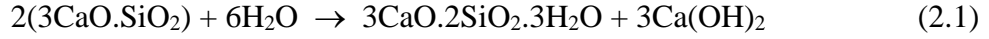
Çizelge 2.1 Çimento fazları, bileşenleri ve kimyasal formülleri (Telschow *et al.* 2012).

İsim	Oksit Bileşeni	Kimyasal Formülü	Kısaltma
Alit (Tricalcium silicate)	3CaO.SiO ₂	Ca ₃ SiO ₅	C ₃ S
Belit (Dicalcium silicate)	2CaO.SiO ₂	Ca ₂ SiO ₄	C ₂ S
Alüminat (Tricalcium aluminate)	3CaO.Al ₂ O ₃	Ca ₃ Al ₂ O ₆	C ₃ A
Ferrit (Tetracalcium aluminoferrite)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	C ₄ AF

2.1.3.1 Alit

Alit, portland çimentosu klinkerinde başlıca klinker fazıdır ve temel olarak çimentoun başlangıç ve nihai mukavemetini oluşturur. Portland çimentosunda klinkeri yaklaşık ağırlıkça %50 - 70 alit içerir ve alit ağırlıkça %71-75 CaO, %24-22 SiO₂ ve %3 - 4 iyon içerir. Alit kristalleri içinde genel olarak bulunan iyonlar Mg²⁺, Al³⁺ ve Fe³⁺'dir (Telschow *et al.* 2012). Alit hidrasyonu sonucu Ca(OH)₂ ve tobermerit adı verilen kalsiyum silikat hidrat (CSH) jel oluşur. Alit fazının hidrasyon formülü Formül 2.1'de verilmiştir (MacLaren and White 2003).

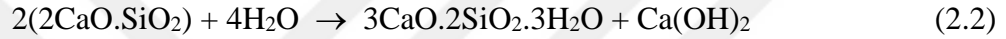
Hidratasyon Formülü;



2.1.3.2 Belit

Portland çimentosunda ikinci en büyük klinker fazı belittir. Hidratasyon ürünü, alitle benzer bir dayanıklılık sağlar, ancak çok daha yavaştır. Belit, Portland çimentosu klinkerinin ağırlıkça %15 ila 30'u arasında bulunur ve %60-65 CaO, %29-35 SiO₂ içerir. Belit fazının hidratasyon formülü Formül 2.2'de verilmiştir (Telschow *et al.* 2012).

Hidratasyon Formülü;



2.1.3.3 Alüminat

Portland çimentosu klinkerindeki en reaktif fazıdır. Klinkerin %5 ila 10'unda bulunur. Saf C₃A, ağırlıkça %62 oranında CaO ve %38 oranında Al₂O₃'ten oluşur (Telschow *et al.* 2012). Klinker öğütme aşamasında jips (CaSO₄) ile birlikte öğütülür. Alçıtaşı, ani çimento hidratasyonunu önlemek için ön-indüksiyon periyodunu yavaşlatır. Etrenjit adı verilen alüminat ve sülfalüminat fazları oluşturmak için trikalsiyum alüminat ile reaksiyona girer. Alüminat fazının hidratasyon formülü Formül 2.3'te verilmiştir (MacLaren and White 2003).

Hidratasyon Formülü;



2.1.3.4 Ferrit

Kalsiyum alüminoferrit, ağırlıkça %5 ila 15 oranında portland çimentosu klinkerini oluşturur. Saf ferrit ağırlıkça %46 CaO, ağırlıkça %21 Al₂O₃, ağırlıkça %33 Fe₂O₃ içerir, ancak endüstriyel klinkerde ağırlıkça %10'a kadar çıkan MgO ortaya çıkar. Ferrit fazının hidratasyon formülü Formül 2.4'te verilmiştir (Telschow *et al.* 2012).

Hidratasyon Formülü;



Üretici bir firmanın yapmış olduğu klinker ve çimento (CEM I 42,5 R) kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2.2’de verilmiştir (İnt.Kyn.1).

Çizelge 2.2 Klinker ve çimento kimyasal analizi (İnt.Kyn.1).

Özellik (%)	Klinker Numunesi	CEM I 42,5 R
Kızdırma Kaybı	0,19	3,59
SiO ₂	20,90	18,90
Al ₂ O ₃	5,53	5,15
Fe ₂ O ₃	3,70	3,36
CaO	65,51	63,59
MgO	1,76	1,57
SO ₃	0,72	2,65
Na ₂ O	0,41	0,40
K ₂ O	0,73	0,77
Cl	0,0027	0,238
Çözünmeyen Kalıntı	-	0,91
Na ₂ O Alkali	0,89	0,31
Serbest CaO	2,56	-
C ₃ S	54,94	-
C ₂ S	18,52	-
C ₃ A	8,39	-
C ₄ AF	11,26	-
Kireç Standardı	97,12	-
Silikat Modülü	2,26	-
Alüminyum Modülü	1,49	-

2.1.4 Çimento Fiziksel Özellikleri

Portland çimento, fiziksel özelliklerine göre karakterize edilir. Bazı önemli parametreler çimento kalitesini kontrol eder.

2.1.4.1 Tane Boyutu

Çimento parçacıklarının büyüklüğü inceliğidir. Çimento üretim sürecinin son aşamasında klinkerin öğütülmesiyle gerekli çimento inceliği elde edilir. Çimentonun hidrasyon oranı çimento tane büyüklüğü ile doğrudan ilişkili olduğundan, çimento inceliği çok önemlidir.

2.1.4.2 Mukavemet

Su/çimento oranı, kürlenme koşulları, tane boyutu ve şekli, kalıplama ve karıştırma şekli, yükleme koşulları ve yaşı gibi çeşitli faktörler mukavemeti etkiler.

2.1.4.3 Hidrasyon Isısı

Hidrasyon, çimento kalitesini etkileyebilecek ve soğuk havalarda kürlenme sıcaklığının korunmasında faydalı olabilecek ısı üretir. Diğer taraftan, ısı üretimi yüksek olduğunda, özellikle büyük yapılarda, istenmeyen gerilmelere neden olabilir. Hidrasyon ısısı en çok C₃S ve C₃A tarafından etkilenir. Portland çimentosunun hidrasyon ısısı, kuru ve kısmen sulu çimento arasındaki farkın belirlenmesiyle hesaplanır.

2.1.4.4 Priz Süresi

Çimento, su ile karıştırıldığında priz oluşur ve sertleşir. Bu priz süresi, tane boyutu, su/çimento oranı, kimyasal içerik ve katkı maddeleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir.

2.2 Uçucu Kül (UK)

Günümüzde dünya enerji talebini karşılamak için birçok enerji kaynağı kullanılmaktadır. Doğayı ve doğal kaynakları korumak adına yenilenebilir enerji kullanılmasına rağmen, kömür hala en önemli elektrik üreten yakıtlardan biridir. Artan enerji talebi ile pek çok sanayileşmiş ve gelişmekte olan ülke, gelecek yıllarda da enerji üretimi için kömür

kullanmaya devam edecektir. Herhangi bir enerji kaynağı, bazı çevresel avantaj ve dezavantajların yanı sıra bazı teknolojik avantaj ve dezavantajları da beraberinde getirir. Kömür bazlı enerji üretimi, dünya çapında büyük miktarlarda UK üretimine neden olur (Izquierdo and Querol 2012). 2003 yılında dünya toplam UK üretimi 413,7 milyon ton olarak ölçülmüştür ve 20 milyon ton UK'ün atmosfere karıştığı tahmin edilmektedir (Ahmed *et al.* 2016).

UK, elektrik üretimi amacıyla kömür yakan termik santrallerde öğütülmüş veya toz haline getirilmiş kömürün yanması sonucu ortaya çıkan ve yanma bölgesinden filtreler sayesinde elde edilen çok ince bir tozdur (Thomas *et al.* 2017). UK ağırlıklı olarak küçük, camsı, içi boş parçacıklardan oluşur. Tane çapı 0,01 ila 100 µm arasındadır ve özgül ağırlığı 2,1 ile 2,6 arasında değişir (Carlson and Adriano 1993).

2.2.1 Uçucu Kül Üretimi

Termik santrallerde toz haline getirilmiş kömür, sıcaklığı 1500 °C'ye ulaşan fırının içine oksijen ile üflenir. Fırında hidrokarbonlar ve oksijen gibi yanıcı maddeler tutuşur ve kömürde bulunan yanmaz mineraller eriyerek sıvı damlacıklar haline gelir. Bu damlacıkların içi oldukça yavaş soğur ve bazı kristal fazlar meydana gelir. Bu parçacıklar UK olarak adlandırılır ve mekanik ve elektrostatik çökelticiler veya torba filtreler kullanılarak baca gazlarından toplanır (Thomas *et al.* 2017).

Filtreleme yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntem olan elektrostatik çökelticiler kullanılarak elde edilen UK'ler, elektrik yüklü plakalar arasından geçirilen baca gazından, plakalara çekilir. UK taneleri periyodik olarak plaka üzerinden sıyrılır ve plakanın altında bulunan haznelerin içine düşer. Haznelerde biriken UK depolama silolarına pnömomatik yöntemle nakledilir (Ramme and Tharaniyil 2004).

2.2.2 Uçucu Kül Özellikleri

UK, hem amorf hem de kristal fazlardan oluşan karmaşık heterojen bir malzemedir. Genel olarak alüminyum, silisyum, demir, kalsiyum, potasyum ve sodyum içeren bir ferro-

alüminosilikat mineral olarak kabul edilir. UK doğal olarak oluşan tüm elementleri içerir ve kömür ile karşılaştırıldığında UK önemli ölçüde elementlerce zenginleştirilmiştir (Carlson and Adriano 1993).

UK'ün fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri, büyük ölçüde değişebilir ve malzemenin betondaki davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. UK tane çapı ortalama 20 µm'dir ve maksimum tane çapı ise 150 µm'dir (Asokana *et al.* 2005). UK'ün kimyası ve mineralojisi, kömürün yanmaz, inorganik bileşenlerinin bileşimine bağlıdır; Bunlar, çok çeşitli miktarlarda alçı, pirit, feldispat ve kil gibi mineralleri içerir. UK'ün özellikleri ayrıca fırın içindeki yanma koşullarına, toplama ve depolama yöntemlerine bağlıdır (Thomas *et al.* 2017).

UK'ün mineralojik analizleri, tanelerin %70 ila %90'ının camsı küreler olduğunu, ve silika (SiO₂), mullit (3Al₂O₃.2SiO₂), hematit (Fe₂O₃), manyetit (Fe₃O₄) ve %1 ila %2 oranında yanmamış karbon içerdiğini göstermektedir. Bu minerallere ek olarak, UK'de kalsiyum karbonat (CaCO₃), turmalin, boraks, rodyum borit, bor arsenit ve bor fosfat bulunmaktadır (Adriano *et al.* 1980).

ASTM C618, UK'leri F sınıfı ve C sınıfı olarak iki kategoriye ayırmaktadır. Taş kömürünün yanması F Sınıfı UK üretir. Kalsiyum oranı düşüktür (CaO < %10) ve SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bileşiklerinin toplam yüzdeleri %70'in üzerindedir. Linyit veya alt bitümlü kömürün yanması C sınıfı UK üretir. Kalsiyum oranı yüksektir (CaO > %10) ve SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bileşiklerinin toplam yüzdeleri %50'in üzerindedir (ASTM 1991). American Society for Testing and Materials (ASTM) kuruluşunun belirlediği UK sınır değerler Çizelge 2.3'te verilmiştir (ASTM standard C 618 – 95).

Çizelge 2.3 ASTM kuruluşunun belirlediği UK sınır değerler (ASTM standard C 618 – 95).

Özellikler	UK	
	F sınıfı	C sınıfı
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃), en az, %	70	50
SO ₃ , en çok, %	5	5
Na ₂ O, en çok, %	1,5	1,5
Nem oranı, en çok, %	3	3
Kızdırma kaybı, en çok, %	6	6

Türkiye’de üretilen bazı UK’lerin kimyasal yapısı Çizelge 2.4’te verilmiştir (Aruntaş 2006).

Çizelge 2.4 Türkiye’de üretilen bazı UK’lerin kimyasal yapısı (Aruntaş 2006).

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan
SiO ₂	27,4	56,8	58,59	49,13
Al ₂ O ₃	12,8	24,1	21,89	15,04
Fe ₂ O ₃	5,5	6,8	9,31	8,25
S + A + F	45,7	87,7	89,79	72,42
CaO	47,0	1,4	4,43	13,2
MgO	2,5	2,4	1,41	4,76
Na ₂ O	0,3	0,3	0,24	2,2
K ₂ O	-	-	1,81	1,76
SO ₃	6,2	2,9	0,41	3,84
Kızdırma Kaybı	2,4	0,6	1,39	0,72

Bu sınıflandırmalara ilaveten kül içerisinde bulunan CaO miktarına göre de bir sınıflandırma yapılabilmektedir. Bu sınıflandırma UK’lerin aktivitesine göre yapılmakta ve UK’ün aktivitesi CaO içeriyle tanımlanmaktadır. UK’ler aktivitesine göre;

- Çok düşük aktiviteli küller: $CaO < \%3,5$
- Düşük aktiviteli küller: $\%3,5 < CaO < \%7$
- Aktif küller: $\%7 < CaO < \%14$
- Çok aktif küller: $CaO > \%14$ olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılmıştır (Görhan *et al.* 2009).

2.2.3 Uçucu Kül Puzolanik Özelliği

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya bağlayıcılık değeri çok az olan, fakat ince öğütüldüklerinde sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan silikalı ve alüminatlı malzemelerdir. Portland çimentosunun hidratasyonu ile üretilen kalsiyum hidroksit ile puzolan malzemelerin içerdiği silis ve alüminanın puzolanik reaksiyonu sonucu oluşan ilave CSH, betonda mukavemet artışı sağlamaktadır (Robl *et al.* 2017).

Bir malzemenin puzolanik aktivitesi, bu malzemenin kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girme kabiliyetini tanımlar. Bu aktivitenin iki bileşeni vardır; malzemenin bir araya getirilebildiği toplam CH miktarı ve CH ile reaksiyonun meydana gelme hızıdır. Yüksek derecede reaktif ve ince öğütülmüş puzolanlardan olan silika dumanı ve metakaolin, CH'yi hızla tüketir ve nispi miktar 28 günde çok azalır. Öte yandan, düşük kalsiyumlu UK, 28 günde CH'de nispeten az bir azalma gösterir, ancak daha sonraki yaşlarda önemli miktarda tüketim vardır. Çok olgun sistemlerde %40 UK kalsiyum hidroksiti tamamen tüketmek için yeterlidir (Robl *et al.* 2017). Puzolanik tepkime Formül 2.5, Formül 2.6 ve Formül 2.7'de gösterilmiştir.



2.2.5 Uçucu Kül Kullanım Alanları

Portland çimentosu, inşaat sektöründe en çok kullanılan bağlayıcı malzemedir. Yapılan araştırmalar, portland çimentosunun UK ile kısmen yer değiştirebileceğini göstermiştir. UK ikameli portland çimentosu, azaltılmış rötre ve büzülme indeksi gibi üstün özellikler sergilemiştir. UK geopolimer harçlar üretmek için de bir hammadde olarak kullanılabilir. İşlenmemiş düşük CaO içeren UK, aynı zamanda, bir kum ikame maddesi olarak betonda da başarıyla kullanılabilir. Temel olarak, UK'ün çimentoda kullanılması için, SiO₂ içeriği %25'ten fazla ve toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ oranı %70'den daha büyük olmalıdır. UK'ün puzolanik aktivitesi kullanım için çok önemlidir. UK, topraktan daha ucuz bir malzemedir, bu nedenle dolgu malzemesi olarak toprak yerine UK kullanılması tercih edilir. UK, toprak özelliklerini iyileştiren ve aynı zamanda dengeleyici görevi gören arazi dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Dolgu yapımında kullanılan toprakların aksine, UK'ün kil boyutlu parçacıklardan oluşan büyük bir bütünlük katsayısı vardır. UK kullanımını etkileyecek mühendislik özellikleri; setlerin tane büyüklüğü dağılımı, basınç karakteristikleri, kayma mukavemeti, geçirgenlik ve don duyarlılığıdır. Dolgularda kullanılan neredeyse tüm UK'ler, F sınıfıdır. UK, su altı dolgular, hafif dolgular ve hafif yapısal dolgu uygulamaları gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında etkili bir dolgu

malzemesi olarak kullanılabilir. UK'ün dolgu malzemesi olarak kullanılması, daha yüksek toprak fiyatları nedeniyle sürdürülebilir olarak kabul edilir. UK, mukavemet, taşıma kapasitesi ve yer değiştirmeyi azaltmak gibi mühendislik özelliklerini geliştirmek için yumuşak topraklarda yararlı katkı maddesidir ve karayolu yapımında kullanımı uzun süredir uygulanmaktadır. UK'ün yol ve set yapılarında kullanımı uygundur. UK, yol inşaatlarında taban, alttemel, temelde ve kaplamanın üst tabakasında kullanılabilir. Portland çimentosu ile ağırlıkça %2–10 ikame edilmiş F sınıfı UK, yol yapımında temel malzemesi olarak çok etkili bir şekilde kullanılabilir. UK, kum ve kireç ile karıştırılarak tuğlalar, seramik karolar ve beton bloklar geliştirilmiştir. Tuğla üretmek için portland çimentosu ile ikame edilmiş F sınıfı UK, alçıtaşı, kalsiyum karbonat ve kireç kullanılmıştır. Çeşitli oranlarda kil ile karıştırılan UK'den yapılan tuğlalar geleneksel kil tuğlalara göre daha yüksek kırılma mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, geleneksel tuğlalara kıyasla UK esaslı tuğla üretiminde %30'a varan maliyet tasarrufu elde edilmiştir. UK esaslı tuğlaların, daha hafif ağırlıkta daha yüksek basınç mukavemeti gösterdiği ve geleneksel kil tuğlalara kıyasla daha düşük su emilimini gösterdiğini doğrulanmıştır. Beton bloklar, içi boş bloklar ve kaldırım taşları portland çimentosu ile ikame edilmiş F sınıfı UK ile üretilebilir (Jayaranjan *et al.* 2014). UK'ün A.B.D. deki kullanım alanları ve miktarları Çizelge 2.5'te verilmiştir (ACAA 2016).

Çizelge 2.5 UK'ün A.B.D. deki kullanım alanları ve miktarları (ACAA 2016).

Kullanım alanı	Miktar (milyon ton)
Hazır beton ürünleri	14,3
Çimento ürünleri	2,6
Akışkan dolgu	0,08
Yapısal dolgular - setler	1,7
Yol temeli - alt temel	0,47
Toprak stabilizasyonu	0,43
Mineral asfalt dolgusu	0,04
Madencilik uygulamaları	1,04
Atık stabilizasyonu	0,76
Tarımsal faaliyetler	0,002
Petrol – doğalgaz saha kullanımı	0,19
Kömür atık göllerinin kapatılması	0,25
Diğer	0,6
Toplam	22,634

UK aynı zamanda cam seramik sektöründe ve yanmaz malzeme üretiminde hammadde olarak, atık su uygulamalarında süzgeç olarak, tarımsal faaliyetlerde sentetik gübre olarak ve madenlerde asit dengeleyicisi olarak kullanılabilir (Dwivedi and Jain 2014).

2.2.6 Uçucu Külün Taze ve Sertleşmiş Betona Etkileri

Mangaraj ve Krishnamoorthy (1994), su/çimento oranı 0,60 olan harç numuneler için ince agrega ile %0 - %30 UK ikame oranlarını incelemiştir. Artan UK ikamesi ile UK'ün betonun işlenebilirliği üzerindeki olumsuz etkilerini telafi etmek için su muhtevasının artırılmasına ihtiyaç duyulmasına rağmen, basınç mukavemetleri artış gözlemlenmiştir.

Hwang vd. (1998), su/çimento oranı 0,30 – 0,50 kullanarak ince agrega %25 ve %45 oranında UK ikame edilmiş harç numunelerinde mukavemet gelişimi üzerine yaptığı deneylerde eğilme ve basınç mukavemetinde artış ve karbonatlaşma rötresine karşı dayanıklılık tespit etmiştir.

Rebeiz vd. (2004), polimer betonda uçucu külün kum ikamesi olarak kullanması üzerine yapılan araştırmayı bildirmişlerdir. Beton karışımında kum %15 oranında uçucu kül ile ikame edilmiştir ve basınç mukavemeti yaklaşık %30 artmıştır. Aynı zamanda eğilme mukavemeti artan numunelerin geçirgenliği azalmıştır. 80 termal döngüye tabi tutulduğunda uçucu kül ikameli polimer beton, uçucu kül içermeyen polimer betona göre daha iyi termal döngü direnci sergilemiştir.

Pofale ve Deo (2010), kumun %27 oranında UK ile ikame edilmesinin basınç mukavemetini yaklaşık %20 ve eğilme mukavemetini %15 arttırdığını bildirmişlerdir. Bu çalışmada uçucu kül bazlı portland pozzolana çimentosu kullanılmıştır. Ayrıca, uçucu kül bazlı betonun referans betonuna göre işlenebilirliğinde yaklaşık %25 arttığını elde etmişlerdir.

Shi ve Qian (2001), çimentoyu UK ile kısmen ikame ederek 7, 28 ve 56 günlük yaşlarda harçların basınç mukavemetinde azalma olduğunu bildirmişlerdir. %50 ve %70 UK ikame edilmiş numuneler için 7 günlük basınç mukavemetindeki azalma sırasıyla %50 ve

%80,8 iken, 28 günlük basınç mukavemetindeki azalma sırasıyla, %41,54 ve %60 olarak elde edilmiştir. 56 günlük basınç mukavemetindeki azalma sırasıyla %37,5 ve %52,5 olmuştur.

Kumar vd. (2007), su/çimento oranı 0,4 olarak çimentonun %50 oranında UK ikame edilmiş numunelerin, 7, 28 ve 90 günlük eğilme mukavemetinde sırasıyla %25,84; %15,11 ve %3,76 azalma göstermiştir. 180, 256 ve 365 günlük eğilme direncinde sırasıyla %2,85; %1,82 ve %1,74 oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir. %60 UK ikameli numunelerde ise 7, 28, 90, 180, günlük yaşlarda sırasıyla %19,11; %5,93; %1,9 ve %2,73 azalma elde edilmiştir.

Jiang ve Guan (1999), çimentonun, UK ile kısmen ikame edilmesiyle 3, 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda harçların basınç mukavemetinde azalma olduğunu bildirmişlerdir. Bu azalma, UK içeriği arttıkça artmıştır. %50 ve %70 UK ikameli numunelerde 3 günlük basınç mukavemetinde düşüş oranı sırasıyla %67,3 ve %76,98 iken, 28 günlük basınç mukavemetindeki düşüş oranı sırasıyla %28,3 ve %68,63'tür.

Shah ve Modhera (2014), çimentonun yüksek miktarlarda UK ile ikame edilmesinde, betonların 7, 28 ve 56 günlük basınç mukavemetinde azalma olduğunu belirtmiştir. %50, %60 ve %70 UK ikameli numunelerin 7 günlük basınç mukavemetindeki düşüş sırasıyla %21,57; %36,77 ve %46,57 elde edilmiştir. 56 günlük basınç mukavemetinde ise düşüş sırasıyla %17,64; %34,22 ve %42,9 olarak ölçülmüştür.

Supit vd. (2014), çimentonun yüksek miktarlarda UK ile ikame edilerek üretilen harçların 7 ve 28 günlük basınç mukavemetlerinde azalma meydana geldiğini bildirmiştir. Bu azalma, UK içeriği arttıkça artmıştır. %50, %60 ve %70 UK içeren 28 günlük basınç mukavemetindeki düşüş sırasıyla %40, %54,29 ve %74,29 elde edilmiştir.

Poon vd. (2000), çimentonun %45 oranında UK ile ikame edilmesi hidratasyon ısısında azalma olduğunu bildirmişlerdir. Referans çimento harcının hidratasyon ısısı 2,4 W/kg iken, %45 UK ikameli harç için 1,27 W/kg olmuştur. İlk 72 saatte, hem maksimum ısı oluşumu oranı hem de kümülatif ısı değişimi %45 UK ikame edilmesiyle azalmıştır. %45

UK ikame edilmesi, kümülatif ısı değişiminde %36 oranında azalma ile sonuçlanmıştır. Ayrıca 0,24 oranında su/çimento ve %45 UK içeriğine sahip harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç mukavemeti %25, %8,39 ve %12,18 oranında azalma elde edilmiştir. 0,19 su/çimento oranına sahip numunelerde, bu azalma sırasıyla %36,17; %14,66 ve %13,29 oranında görülmüştür.

Malhotra (1990), UK ikameli betonda yaptığı deneylerde, yüksek miktarlarda F sınıfı UK içeren beton, yüksek eğilme ve basınç mukavemeti, tekrarlanan donma ve çözülmeye karşı iyi dayanıklılık, klorür iyonlarına çok düşük geçirgenlik elde etmiştir. Ayrıca, UK ikameli betonda reaktif agregalar betona dahil edildiğinde genleşme meydana gelmemiştir.

Maslehuddin (1989), ince agrega %0, %20 ve %30 oranlarında UK ile ikamesi ile ürettiği betonlarda su/çimento oranlarını 0,35; 0,40; 0,45 ve 0,50 kullanarak basınç mukavemeti ve korozyona dayanıklılık testleri yapmıştır. Beton karışımında UK ikamesinin, erken yaş basınç mukavemetini ve uzun süreli korozyon dayanıklılığı özelliklerini arttırdığı sonucuna varmıştır.

Yoon vd. (2014), çimento karışımında %50 ve %60 UK katkılı beton karışımlarının işlenebilirliğinde artış olduğunu, çimento miktarı ve su/çimento oranının sırasıyla 450 kg/m³ ve 0,3 olduğunu bildirmiştir. Slump değerindeki artış sırasıyla %50 ve %60 UK ikameli numuneler için %50 ve %25 olmuştur.

Wu vd. (2006), çimentonun UK ile ikame edilmesiyle beton karışımlarının işlenebilirliğinde artış olduğunu bildirmiştir. 0,3 su / çimento oranında, %50, %60 ve %70 UK içeren numunelerin slump değerindeki artış sırasıyla %54,27; %57,32 ve %52,44 olarak ölçülmüştür.

Huang vd. (2013), UK içeren beton karışımlarının daha yüksek işlenebilirliğe sahip olduğunu elde etmiştir. Referans çimento miktarı 280 kg/m³ iken, %60 ve %80 oranlarında UK ikame edilmesiyle slump değeri %31,25 ve %37,5 artmıştır.

Siddique (2004), beton karışımlarında çimentonun ağırlıkça %45 ve %50 oranlarında UK ile ikame edilmesi işlenebilirliği arttırdığı bildirmiştir. UK içeriği arttıkça işlenebilirlik artmıştır. Slump değerindeki artış, referans ile karşılaştırıldığında, sırasıyla %45 ve %50 UK ikameli numuneler için %38,46 ve %53,85 elde edilmiştir.

Siddique (2003), ince agreganın %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında F sınıfı kül ikameli betonlarda 7, 14, 28, 56, 91 ve 365 günlerde yaptığı deneylerde, UK ikameli beton numuneleri ile referans numunesi arasındaki mukavemet artışının 28 gün sonra daha belirgin olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, tüm UK ikame yüzdeleri için basınç mukavemeti ile birlikte sertlik, eğilme mukavemeti ve esneklik modülünün ileriki yaşlarda artmaya devam ettiğini belirtmiştir.

Matsufuji vd. (2001). UK ve sabit çimento miktarı ile ürettiği numunelerde su/çimento oranını 0,65 kullanarak UK ikameli betonlarda eğilme ve basınç deneyleri yapmıştır. Betonun eğilme ve basınç mukavemetinin, 300 L/m³'e kadar UK'ün karışım miktarına bağlı olarak arttığı görülmüştür.

Namagga ve Atadero (2009), UK ikameli betonunun basınç mukavemetinin, kürlendiği gün sayısı ile orantılı arttığını göstermiştir. %35 ve daha fazla oranlarda UK ikameli numunelerde, beton ilk 3 gün içinde düşük mukavemet artış hızına sahiptir ve mukavemet artışı sonraki 7 gün içinde hızlanmıştır. UK'lü numune kürlenmenin ilk 7 günü içinde mukavemetinin yaklaşık %70 - %80'ine, 28 günde ise gerekli tasarım gücüne ulaşmıştır.

Dura`n-Herrera vd. (2011), çimento ikamesi olarak UK içeren beton karışımlarının priz başlama ve bitiş zamanlarında artış olduğunu bildirmiştir. Priz süresindeki artış, artan UK içeriği ile artmıştır. Su/çimento oranı 0,5 ve %45, %60 ve %75 oranlarında UK ikamesi priz süresinde sırasıyla %20,22; %41,57 ve %58,43 oranında artış gözlemlenmiştir.

Bentz (2014), referans ile kıyaslandığında çimento ikamesi olarak %60 UK içeren harç karışımının daha uzun priz başlama süresi olduğunu tespit etmiştir. 15°C, 25°C, 40°C sıcaklıklarda priz başlama süresindeki artış sırasıyla %101,53; %114,23 ve %155,23'tür.

2.3 Mermer Tozu (MT)

MT, mermer bloklarının ocaktan çıkarılması sırasında veya fabrikalarda levhalara kesilirken ortaya çıkan, ortalama tane boyutu 5 µm olan bir endüstriyel atıktır. 2014 yılında küresel mermer ve granit üretimi 155 milyon ton olarak ölçülürken, ağırlıkça %20 - %30 oranında MT üretildiği tahmin edilmektedir (Ashish 2018, Gussoni 2016).

Mermer işleme tesislerinin yoğunlaştığı bölgelerdeki mermer atık sahaları, kamuoyu gözünde çevreye ve doğal güzele zarar verdiği gerekçesiyle tepkilere neden olmaktadır. Mermerlerin ocaktan çıkarılması, blok mermerin fabrikada işlenmesi esnasında ortaya çıkan ve mamul mermer üretiminden geriye kalan bütün mermer parça ve tozları mermer atığı olarak kabul edilmektedir. Mermer atıkları, oluşum yerlerine göre ocaklarda ve fabrikalarda oluşan atıklar, boyutlarına göre; molozlar, kapaklar, paledyenler ve toz atıkları olarak adlandırılıp sınıflandırılmaktadırlar. Afyonkarahisar bölgesinde faaliyet gösteren mermer işletmeleri toz boyutundaki atıkları farklı depolama alanlarına dökmektedirler. Bu alanların en büyüğü İscehisar ilçesinde bulunmakta olup 25 milyon ton mermer tozu atığı biriktiği tahmin edilmektedir (Resim 2.1) (Demir *et al.* 2008, Sounthararajan *et al.* 2013, Binici *et al.* 2007).



Resim 2.1 İscehisar mermer tozu döküm alanı.

Mermerin işlenmesi sırasında, mermer blok, elmas kesiciler kullanılarak çeşitli kalınlıklarda levhalara kesilir. Kesicileri soğutmak ve kesme işlemi sırasında oluşan tozu emmek için kesiciler üzerine su damlatılır. Bu işlemde kaynaklanan atık su miktarı çok büyüktür. Su çok yüksek derecede alkali olduğundan geri dönüştürülmez, parlatılacak levhaların kararmasına yol açacağından ötürü tekrar kullanımı uygun değildir. Blokların levhalar halinde kesildiği büyük fabrikalarda, soğutma suyu askıda kalan MT çökeltilene kadar sedimentasyon tankları içinde depolanır. Daha sonra çamur halindeki MT kamyonlarda toplanır, atık depolama alanlarında kurumaya bırakılır. Bu yöntem sonucu, çamur güneşte kurur ve MT havaya karışır. Çevre kirliliğinin yanı sıra, MT'nun havaya karışması hava kirliliği sorunlarına da yol açar (Hamza *et al.* 2011, Malpani *et al.* 2014, Aruntaş *et al.* 2010).

MT, atık depolama maliyetinin artması, nakliye, imha ve üretim maliyeti gibi birçok ekonomik ve çevresel sorunlara neden olmaktadır. Soğutma suyunun yüksek maliyeti ve toz bertarafı ile ilgili çevresel sorunları, ekonomik kayıpları ve çevresel etkileri azaltmak için birçok yöntem denenmiştir (Alzboon and Mahasneh 2009, Akbulut *et al.* 2003).

Değişik sanayi kollarında kullanım alanı bulabilen MT, alternatiflerinin yerine kullanıldığı takdirde çok daha ucuz bir hammadde olabilmektedir. Mermer fabrikalarında üretim atığı olarak çıkan toz atıklar genellikle değerlendirilememekte ve çevre kirliliği açısından da sorunlar yaratmaktadır. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından yapılan araştırma ve jeolojik etüd raporlarına göre Türkiye'nin mermer rezerv toplamı (görünür + muhtemel + mümkün) 5,161 milyon m³ olarak belirlenmiştir (DPT Raporu 2006).

Mermer tozu yüksek Blain inceliğine sahip olup (1,5 m²/g), %90'ı 50 µm elekten geçmektedir (Corinaldesi *et al.* 2007). İnce tane boyutu sayesinde agrega ile kolayca karışarak mükemmel bağ oluşturur. Mermer tozu betonun mevcut boşlukları doldurarak ve normal betona göre basınç mukavemetini arttırmaktadır. Kireç içeriği nedeniyle reaktiviteyi arttırdığı için mermer tozunun betonda potansiyel kullanımı ideal bir seçenektir (Corinaldesi *et al.* 2010, Wu *et al.* 2001, Dhoka 2013).

2.3.1 Mermer Tozu Kullanım Alanları

MT, geleneksel beton üretiminde ince agrega olarak kum veya çimento ile ikame edilebilir. Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde mineral katkı olarak çimento veya agrega ile ikame edilebilir. Polimer beton üretiminde maliyetleri azaltmak için kullanılabilir (Demirel ve Alyamaç 2018, Ergün 2011). Yol inşaatlarında marshall stabilitesini arttırdığı, yüksek basınç ve çekme mukavemeti nedeniyle MT'nun asfalt betonlarda dolgu malzemesi olarak kullanılması oldukça avantajlıdır (Chandra *et al.* 2002). Ayrıca, şişen zeminlerin stabilizasyonu için yol alt temel tabakasında kullanılır (Gupta and Sharma 2014). Kağıt üretiminde CaCO_3 dolgusu olarak MT kullanımını üretim maliyetini düşürür (El-Sherbiny *et al.* 2015). Aynı zamanda, MT, metilen mavisinin sulu çözeltilerden çıkarılması için absorban olarak kullanılabilir (Hamed *et al.* 2013). İncehisar'da bulunan bir mermer işletmesinden alınan MT'nun kimyasal yapısında ağırlıklı olarak CaO baskın oksit olarak yer almaktadır (Ünal ve Uygunoğlu 2003).

2.3.2 Mermer Tozunun Taze ve Sertleşmiş Betona Etkileri

Bonavetti ve Irassar (1994), 0,48 su/çimento oranında hazırlanan harç karışımlarında ince agreganın %5 ve %20 oranlarında MT ile ikame edilmiş numunelerin işlenebilirliğini araştırmışlardır. MT'nun geniş yüzey alanı nedeniyle su talebinde artmasına ve işlenebilirliğin azalmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır. Aynı zamanda, MT'nin harç karışımlarında kullanılmasının erken yaşlarda basınç ve eğilme mukavemetlerini arttırdığını gözlemlemişlerdir. %20 ikameye kadar MT harcının 28 günlük mukavemeti, referans numunesine benzer mukavemet göstermiştir. %5 ve %10 MT ikameli harçlar 28 günlük mukavemet değerlerinde iyileşme göstermiştir. MT ikamesi, C_3A ve C_3S 'nin hızlandırılmış hidrasyonuna, artmış portlandit kristalleşmesine, modifiye CSH jellerine ve geliştirilmiş karbo-alüminatlara yol açmıştır. Bu değişiklikler, bu harç karışımlarında Portland çimentosunun hidrasyonunu hızlandırmış olabilir. İnce agreganın MT ile ikamesinin hidrasyon oranını arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Çelik ve Marar (1996), kırmataş ince agreganın MT ile ikame edilmesinin fizibilitesini araştırmıştır. Toplamda, yedi agrega karışımının (%5, %10, %15, %20 ve %25) bir kısmı

0,50 su/çimento oranında MT ile ikame edilerek hazırlanmıştır. Beton karışımlarının işlenebilirliği slump testi kullanılarak ölçülmüştür. İnce agregaların MT ile artan ikamesi, işlenebilirliğin azalmasına neden olmuştur. İnce agregaların MT ile ikamesinin artan su talebine ve agreganın özgül yüzey alanının yükselmesine yol açtığını gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme mukavemetinin %10 ikameli MT oranına kadar yükseldiğini bulmuştur. Bununla birlikte, MT içeriği %10'u aştığında, mukavemet azalmıştır. Artan MT ikamesi nedeniyle ince agrega çok yüksek yüzey alanına ulaşmıştır ve matriste tüm agrega tanelerini kaplayacak yeterli çimento olmaması mukavemet kaybına yol açmıştır.

Gameiro vd. (2014), %0, %20, %50 ve %100 oranlarında MT içeren betonun işlenebilirliğini ve mukavemetini incelemiştir. Betonda MT ikamesinin olumsuz etkisini dengeleyecek şekilde süperakışkanlaştırıcı kullanılması önerilmiştir. Aynı zamanda, ince agreganın %20 oranında MT ikame edilerek hazırlanan beton numunesinde 72 saatlik kılcal su emilimini azalttığını gözlemlenmiştir.

Kockal (2013), çimentonun %5, %10 ve %15 oranlarında MT ile ikame edilerek 0,50 su/çimento ile hazırlanan numunelerde süperakışkanlaştırıcı miktarı referans numunesi işlenebilirliğe ulaşmak için aşamalı olarak artırılmıştır. %15 MT ikame oranında 212 ± 13 mm slump değeri elde etmek için süperakışkanlaştırıcı miktarı %100 artırılmıştır.

Silva vd. (2013), beton karışımlarında mermer ocağı atıklarından elde edilen ince agregaların çeşitli oranlarını (%0, %20, %50 ve %100) içeren beton üzerinde çalışma gerçekleştirmiştir. MT kullanımı işlenebilirlik kaybına neden olmuştur. İdeal slump değerini (125 ± 10 mm) elde etmek için MT içeren karışımların su/çimento oranı artırılmıştır. Araştırmada kullanılan MT, diğer maden ocağı tozlarından daha düşük su emilimine sahip olmasından dolayı işlenebilirlikte artış beklenmiştir ancak ince agrega oranı, kaba agrega oranı ve MT oranı doğal özelliklerinin beklenmedik bir eğilim ile sonuçlandığını bildirmiştir.

Vijayalakshmi vd. (2013), doğal ince agregaların yerine MT atıklarının kullanılmasının uygunluğunu incelemiştir. Beş beton karışımı, %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 MT

ikamesi ile 0,40 su/çimento oranıyla hazırlanmıştır. Değişimdeki artışla birlikte slump kaybı gözlenmiştir. Yüksek incelik, pürüzlülük, açısallık ve su emilimi nedeniyle MT ikameli beton karışımlarında kaba agrega ile harç arasındaki artan iç sürtünme, MT ikameli betonunun işlenebilirliğinin azalmasına neden olmuştur. Aynı zamanda, %15 ikame oranına kadar MT'nun betona dahil edilmesinin, 7, 28 ve 90 günlük testlerde, betonun basınç mukavemetini önemli ölçüde etkilemediğini gözlemlemiştir. %20 ve %25 ikame oranlı MT içeren karışımlar, düşük işlenebilirlik ve artan gözeneklilik nedeniyle düşük mukavemet göstermiştir. %15 ikame oranına kadar MT içeren betonun 7 günlük basınç mukavemeti, hızlandırılmış hidrasyon ve nükleasyon etkisine bağlı olarak referans numunesi basınç mukavemetinden daha yüksek elde edilmiştir. İkame oranı %15'ten daha yüksek olan numunelerde önemli ölçüde mukavemet kaybı gözlemlenmiştir. Mukavemetteki azalma, agrega ve çimento harcı arasındaki zayıf aderans nedeniyle meydana geldiği elde edilmiştir.

Keleştemur vd. (2014), ince agreganın MT ile kısmi ikamesi, harcın basınç mukavemetini arttırdığını tespit etmişlerdir. Mukavemet artışı, dolgu etkisine ve geçiş bölgesindeki iyileşmeye bağlanmıştır. Ayrıca, cam elyafların MT ikameli harçlara eklenmesiyle eğilme mukavemetini daha da arttırabildiğini belirtmişlerdir.

Agarwal ve Gulati (2006), MT ve diğer endüstriyel atıkların (uçucu kül, silika dumanı ve yüksek fırın cürufu) harçların basınç mukavemetine çimento ikamesi olarak etkisini araştırmışlardır. Karışımlar, çimentonun %10 oranında MT ile ikame ederek ve çimentonun %10 oranında MT ve %10 oranında puzolanik malzeme (uçucu kül, cüruf ve silika dumanı) karışımı ile ikame edilerek hazırlanan harç numunelerin 3, 7, ve 28 günlük basınç mukavemetlerinde artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, %10 MT ve %10 silis dumanı ikame edilerek hazırlanan harç karışımları en yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu anlaşılmıştır.

Almeida vd. (2007), ince agreganın %5 oranında MT ile ikame edilmiş numunelerin 7 ve 28 günlük basınç mukavemetinin referans numunesi basınç mukavemetinden daha yüksek olduğunu elde etmiştir. Bu mukavemet artışı, artmış hidrasyona ve MT'nun neden olduğu mikro dolgu etkisine bağlanmıştır. Daha yüksek ikame oranı, mukavemet

azalmasına yol açmıştır. Bununla birlikte, en yüksek eğilme mukavemeti %5 ikame oranı için gözlenmiştir. %5 MT ikame edilmiş numunenin eğilme mukavemeti, referans numunesi eğilme mukavemetinden %14,3 daha yüksektir.

Hebhoub vd. (2011), ince agregaların beton üretiminde MT ile ikame edilmesi araştırmalarında %25, %50, %75 ve %100 oranlarda MT ikame ettiler ve MT ikamesinin beton yoğunluğunu değiştirmediğini ve ince agregaların MT ile ikamesinin betonun basınç ve eğilme mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlediler. %25, %50 ve %75 oranında MT ikamesine sahip betonların 28 günlük basınç mukavemeti referans numuneye göre sırasıyla %22,2; %16,84 ve %16,84 oranında artmıştır. Ayrıca, 90 günlük eğilme mukavemetleri sırasıyla %13, %33 ve %11 oranında artmıştır. Bununla birlikte, %100 MT ikameli numunede hem basınç hem eğilme mukavemetleri azalmıştır. Ayrıca, MT'nun artan ikame oranı ile işlenebilirliğin azaldığını gözlemlemişlerdir. %100 ikame oranında, işlenebilirlik %80 oranında azalmıştır.

Aliabdo vd. (2014), beton üretiminde MT kullanımının uygulanabilirliğini araştırmıştır. Su/çimento oranı 0,5 oranında ve ince agrega %0, %5, %7,5, %10 ve %15 MT ile ikame edilmesiyle hazırlanmıştır. %15 ikame oranına kadar MT içeren numunelerin basınç ve eğilme mukavemeti artmıştır. Aynı zamanda, çimentonun %10 oranında MT ile ikame edilmiş ve su/çimento 0,4 belirlenmiş betonun basınç mukavemetinin arttığını gözlemlemiştir. Bununla birlikte, aynı beton karışımının su/çimento 0,50 belirlenerek üretilen betonlarda mukavemet düşüşü gözlenmiştir.

Omar vd. (2012), ince agregayı betonda %5, %10 ve %15 oranlarında MT ile ikame etmiş ve modifiye betonların mukavemetlerini karşılaştırmıştır. %15 oranında MT, esneklik modülünü %1,2 - %5,1 arttırmıştır, ancak betonun işlenebilirliğini azaltmıştır. Bütün ikame oranlarında, MT 7., 28. ve 90. günlerde basınç mukavemetini belirgin bir şekilde arttırmıştır. 350 kg/m³ çimento yoğunluğu ve %5 MT ikamesine sahip numunelerde, 7., 28. ve 90. günlerde basınç mukavemeti artmıştır. Ayrıca, tüm MT ikamelerinde eğilme mukavemeti %10 artmıştır.

Talah vd. (2015), MT'nun yüksek performanslı betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. %15 MT ikameli numune ile MT içermeyen referans numunesini test ettiler. Referans numunenin 7, 28, 90, 180 ve 365 günlükteki basınç mukavemetleri sırasıyla 26, 38, 44, 46 ve 48 MPa olarak ölçülmüştür ve %15 MT ikameli numunenin basınç mukavemeti ise sırasıyla 39, 52, 58, 62 ve 65 MPa olarak ölçülmüştür. %15 MT ile ikame edilen betonun dayanıklılığının daha da arttırılabileceğini vurgulamıştır.

Tennich vd. (2015), çeşitli mikro dolgu malzemelerinin kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Mikro dolgu malzemesi olarak betonun 200 kg/m^3 MT (çimento ağırlığının yaklaşık %75'i) ile karıştırılmasının, kendiliğinden yerleşen betonun basınç mukavemetini geleneksel betona göre %42,7 arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, ultrasonik ses hızı %2,6 oranında, dinamik ve statik elastik modüllerde sırasıyla %12,8 ve %16 oranında azalma ve eğilme mukavemetinde %41 oranında artma gözlemlenmiştir.

Corinaldesi vd. (2010), süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan, çimentonun %10 oranında MT ile ikame edilerek hazırlanan harç numunelerinin, 28 ve 56 günlük mukavemet değerlerinin referans numunesine göre %20 azalma meydana geldiğini bildirmiştir. Aynı oranlara sahip karışım, süperakışkanlaştırıcı kullanılarak çimentonun %10 oranında MT ile ikame edilen numuneler 7 günlük mukavemet değerleri, referans numunesinden daha yüksek olduğu elde edilmiştir. Bununla birlikte, 28 ve 56 günlük mukavemet değerlerine göre %10 oranında mukavemet kaybı gözlemlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı kullanılması, MT'nun dolgu etkisini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Rodrigues vd. (2015), çimentonun MT ile ikame oranı arttıkça, beton basınç ve yarmada çekme mukavemetinin azaldığını bildirmişlerdir. çimentonun MT ile %10 ve daha az ikame oranının, betonun mekanik özellikleri üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Yapısal betonda çimento ikamesi olarak %10 oranında MT kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

Rana vd. (2015), çimentonun MT ile belirli oranlarda ikamesiyle hazırlanan betonun basınç ve eğilme mukavemetini değerlendirmiştir. Artan ikame oranları ile mukavemette

sürekli düşüş gözlemlenmiştir. Mukavemetteki azalmaya, beton bileşenleri arasındaki aderans için matristeki çimento miktarının yetersizliği neden olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, %10 ikameye kadar MT içeriği ile hazırlanan karışımların mukavemeti, referans numunesi mukavemetine yakın değerlere sahiptir. %5 ve %10 MT ikamesi ile hazırlanan karışımlar 28. günde 40 MPa hedef basınç mukavemetine ulaşmıştır.

Elmoaty (2013), çimentonun %5, %7,5; %10 ve %15 oranlarında MT ile ikame edilmesiyle hazırlanan beton karışımları 0,45 su/çimento oranına sahiptir. %5 MT ikamesi 7, 14, 28 ve 56 günlük basınç ve yarmada çekme mukavemetini arttırmıştır. Daha yüksek MT ikamesi, azalan çimento oranı nedeniyle betonun basınç mukavemetini olumsuz yönde etkilemiştir. %5 ikame oranındaki mukavemet artışı, fiziksel dolgu etkisinden meydana gelmiştir.

Rai vd. (2011), %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ince agregayı MT ile ikame etmiş ve elde edilen betonların mekanik özelliklerini incelemiştir. Referans numuneye göre, 28 günlük basınç mukavemeti %5, %10 ve %15 ikameli numunelerde %5 oranında artmış, ancak %20 ikameli numunede bir miktar azalmıştır. %15 MT ikamesinin, eğilme mukavemetini %25 arttırdığı, daha yüksek oranlarda, eğilme mukavemeti azalttığı belirtilmiştir. Slump değeri artan MT oranıyla artmıştır.

Demirel (2010), ince agreganın %25, %50 ve %100 oranlarında MT ile ikamesinin betonun mekanik özellikteki etkilerini incelemiştir. Referans numuneye göre, %100 MT ikameli numunelerin 28 günlük basınç mukavemeti ve dinamik elastisite modülü sırasıyla %9,67 ve %25 oranında artmıştır ve gözeneklilik %8 oranında azalmıştır. Ultrasonik ses hızında %10'luk artış gözlemlenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri ve uygulanan yöntemler bu bölümde sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda, çimento, ince agrega, UK ve MT kullanılarak hazırlanan prizma harç numunelerine eğilme ve basınç mukavemeti deneyleri ve X-ışını kırınım (XRD) analizi ve porozite analizi uygulanmıştır.

3.1 Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde harç numunelerini üretmek için kullanılan malzemeler açıklanmıştır.

3.1.1 Çimento

Hazırlanan harçlarda bağlayıcı malzeme olarak Afyon Çimento Sanayi üretimi CEM I 42,5 R portland çimentosu kullanılmıştır. TS EN 197-1 standartına uygun CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Numunelerde kullanılan portland çimento Resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1 Portland çimento ve standart kum.

Çizelge 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

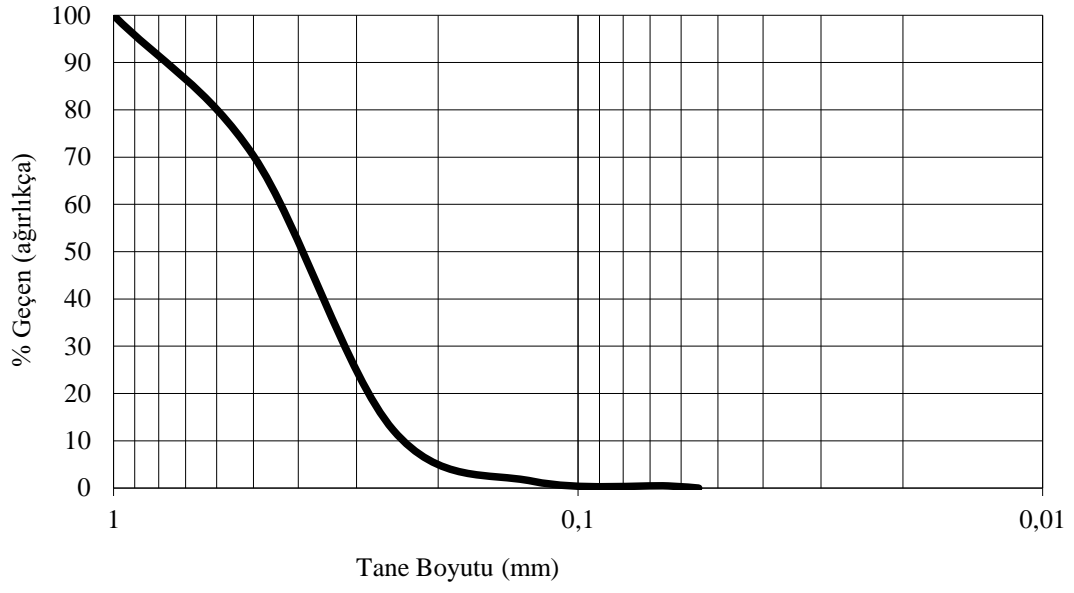
Analiz Grubu	Deney	Sonuç	
Kimyasal Özellikler	SO ₃ (%)	2,91	
	MgO (%)	2,33	
	Kızdırma kaybı (%)	1,92	
	Cl (%)	0,06	
	Çözünmeyen kalıntı (%)	0,67	
Fiziksel Özellikler	Kıvamlilik suyu (%)	30	
	Özgül yüzey (cm ² /gr)	3685	
	Priz süresi	Başlama (saat-dak)	2sa.52dak
		Sonu (saat-dak)	4sa.36dak
	İncelik	No.70de kalan (%)	0,13
		No.200de kalan (%)	3,15
	Özgül Ağırlık (kg/dm ³)		3,07
Basınç Mukavemeti (N/mm)	2 gün	26,5	
	7 gün	38,7	

3.1.2 İnce Agrega

İnce agrega olarak ince kum, standart kum ve kaba kum kullanılmıştır.

3.1.2.1 İnce Kum ($d_{max}=1mm$)

Elenmiş ve yıkanmış ince kuma ait tane boyutu analiz grafiği Şekil 3.1’de verilmiştir. Tane boyutu analizine göre göre 1mm’lik elekten %100 geçmiştir. İnce kum görünümü Resim 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 İnce kuma ait tane boyutu analiz grafiği.

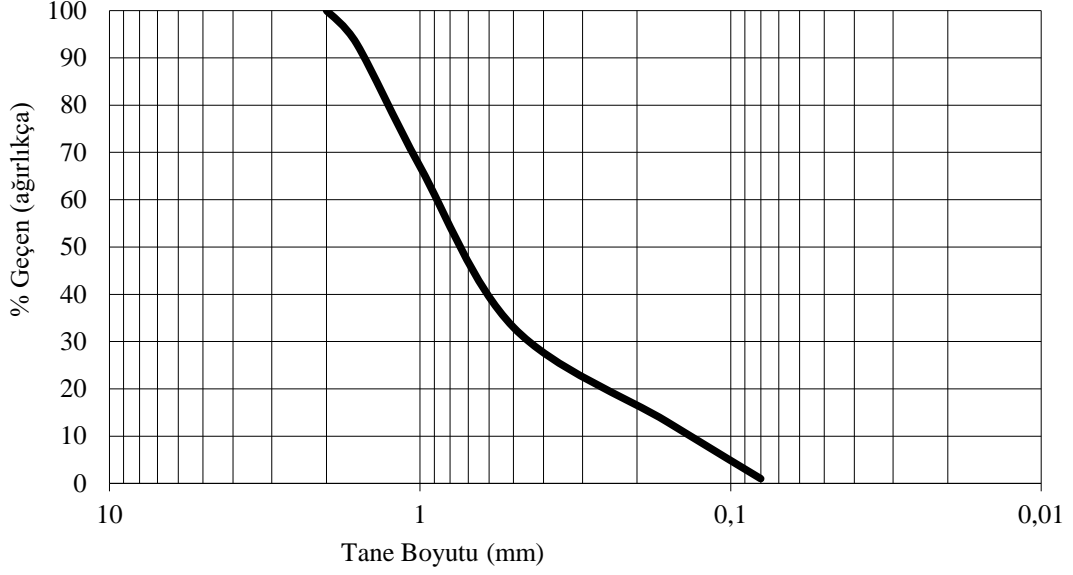


Resim 3.2 İnce kum.

3.1.2.2 Standart Kum ($d_{max}=2mm$)

Prizma harç üretiminde TS EN 196-1 standartına uygun Rilem Cembureau (CEN) standart kum kullanılmıştır. Standart kum Trakya Çimento Fabrikasından temin

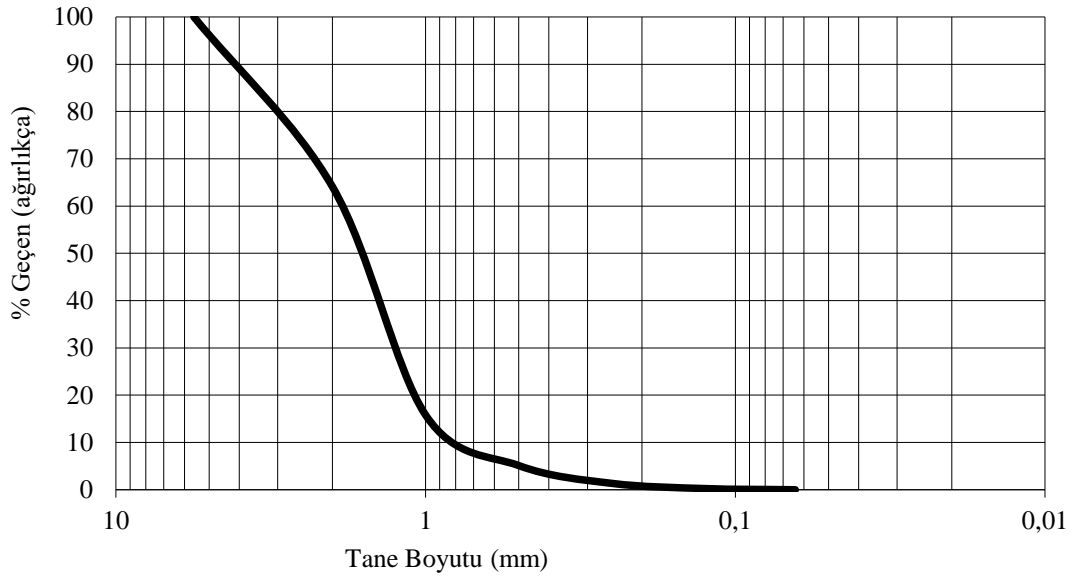
edilmiştir. Standart kuma ait tane boyutu analiz grafiği Şekil 3.2’de verilmiştir. Buna göre 1mm’lik elekten %65 geçmiştir. Standart kum görünümü Resim 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Standart kuma ait tane boyutu analiz grafiği.

3.1.2.3 Kaba Kum ($d_{max}=5,6mm$)

Kaba kuma ait tane boyutu analiz grafiği Şekil 3.3’te verilmiştir. Tane boyutu analizine göre 1mm’lik elekten %15 geçmiştir. Kaba kum görünümü Resim 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3 Kaba kuma ait tane boyutu analiz grafiği.



Resim 3.3 Kaba kum.

3.1.3 Uçucu Kül (UK)

Harç numunelerinde kullanılan UK yerel bir beton işletmesinden alınmıştır. Numunelerde kullanılan UK kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2’de, UK SEM görüntüsü Şekil 3.4’te,

UK X Işınları kırınımı analizi Şekil 3.5'te verilmiştir (Görhan *et al.* 2009). UK'ün (SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃) toplamı %88,21 olup F sınıfına girmektedir (ASTM C 618).

Çizelge 3.2 UK kimyasal kompozisyonu.

Bileşik	%
SiO ₂	56,02
Al ₂ O ₃	22,38
Fe ₂ O ₃	9,81
S + A + F	88,21
CaO	2,10
MgO	3,72
Na ₂ O	0,18
P ₂ O ₅	0,22
K ₂ O	2,05
TiO ₂	1,00
SO ₃	0,56
Kızdırma Kaybı	1,01

UK puzolanik aktivite deneyi uygulanmıştır (TS EN 450). Puzolanik aktivite indeksi %70'in üzerinde olup puzolanik özelliğe sahiptir (Çizelge 3.3). Numunelerde kullanılan UK görünümü Resim 3.4'de, UK'e ait tane boyutu analiz grafiği Şekil 3.6'da verilmiştir. Tane boyutu analizine göre uçucu külün %84'ü 100 µm'den küçük tane boyutuna sahiptir.

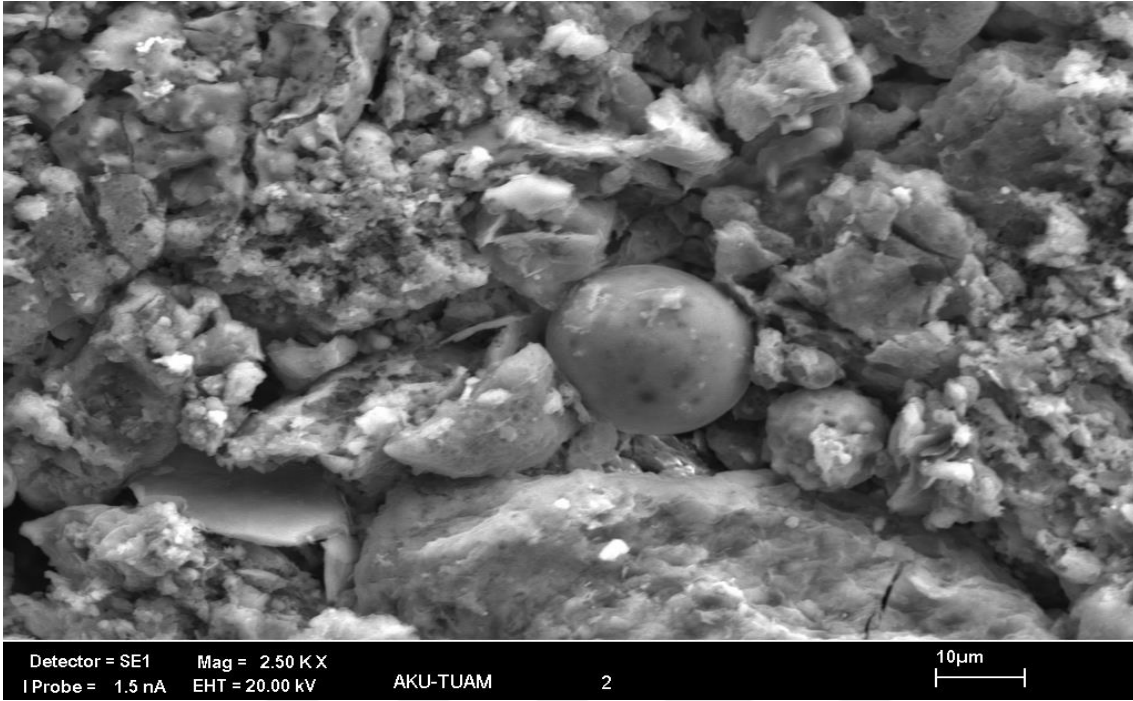
Puzolanik aktivite, puzolanik malzemeye yapılan deneyler sonucunda tayin edilmektedir. TS EN 450 nolu standarda göre, kütlece %75 oranında referans çimento + %25 oranında puzolan ile hazırlanmış karışımlar ile sadece referans çimento ile hazırlanan karışımların 7 ve 28 günlük mukavemetleri belirlenerek puzolanik aktivite değerleri belirlenmiştir. Puzolanik aktivite, dayanım aktivite indeksi olarak adlandırılan bir değer hesaplanmasıyla ifade edilmektedir (Formül 3.1).

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = \left(\frac{A}{B}\right) \times 100 \quad (3.1)$$

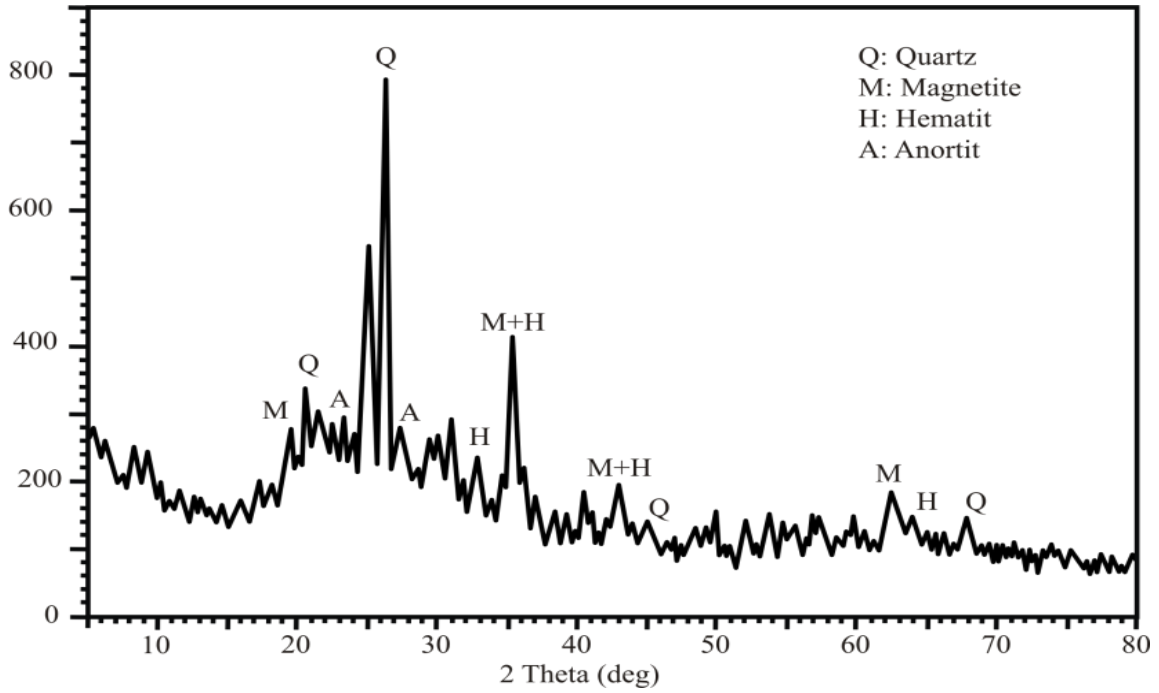
Burada;

A: Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı

B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı (Demir *et al.* 2008).



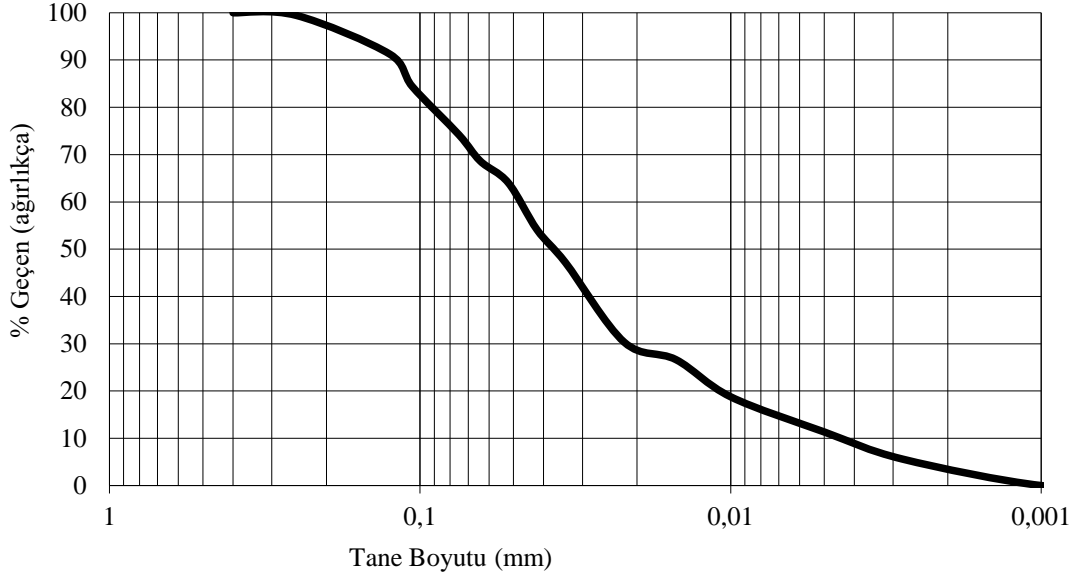
Şekil 3.4 UK SEM görüntüsü (Görhan *et al.* 2009).



Şekil 3.5 UK X Işınları kırınımı analizi (Görhan *et al.* 2009).

Çizelge 3.3 UK puzolanik aktivite indeksi.

Puzolanik Aktivite İndeksi (%)	
7 günlük	28 günlük
62,49	72,55



Şekil 3.6 UK'e ait tane boyutu analiz grafiği.

3.1.4 Mermer Tozu (MT)

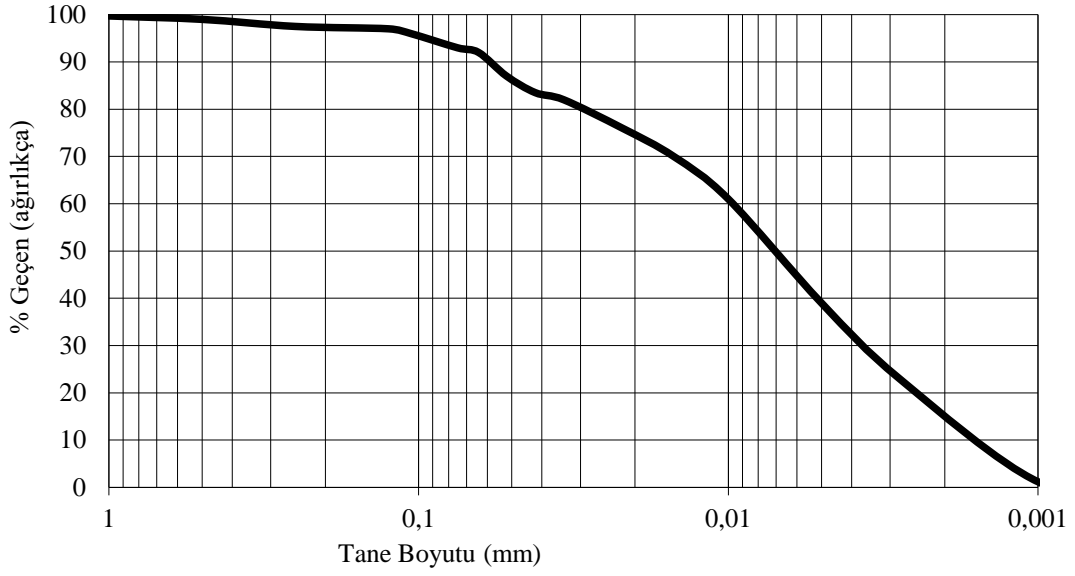
Numunelerde kullanılan MT İncehisar bölgesi mermer işletmesinden alınmıştır. Numunelerde kullanılan MT kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.4'te verilmiştir. Buna göre MT'nda major oksit olarak %55 oranında CaO yer almakta ve kızdırma kaybı %43,7 değerine sahiptir. Kızdırma kaybı büyük oranda CaCO₃'ün kalsinasyonu sırasında açığa çıkan CO₂ 'den kaynaklanmaktadır. MT görünümü Resim 3.4'te, MT'na ait tane boyutu analiz grafiği Şekil 3.7'te verilmiştir. MT, d₂₀=2,5 µm, d₅₀= 7 µm, d₉₅= 100 µm inceliğe sahiptir. UK'e göre oldukça ince taneli yapıda bulunmaktadır.

Çizelge 3.4 MT kimyasal kompozisyonu.

Bileşik	%
SiO ₂	0,20
Al ₂ O ₃	0,12
Fe ₂ O ₃	0,05
CaO	55,03
MgO	0,39
Na ₂ O	0,05
P ₂ O ₅	0,03
K ₂ O	0,01
SO ₃	0,07
Kızdırma Kaybı	43,74



Resim 3.4 Uçucu kül ve mermer tozu.



Şekil 3.7 MT'na ait tane boyutu analiz grafiği.

3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı Katkı

Hazırlanan harç numunelerinde polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. TS EN - 934 – 2 standartına uygun olan süperakışkanlaştırıcı beton katkısının teknik özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Süperakışkanlaştırıcı beton katkısının teknik özellikleri.

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Kahverengi – sıvı
Özgül ağırlık (20°C'de)	1,082 – 1,142 kg/l
pH değeri	6 - 7
Alkali içeriği (%)	≤ 3 (ağırlıkça)
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0,10 (ağırlıkça)

3.1.6 Su

Hazırlanan harç numunelerinde Afyonkarahisar şebeke içme suyu kullanılmıştır.

3.2 Metot

Harçların karışım ve su/çimento oranlarını belirlemek amacıyla ince kum, kaba kum ve mermer tozu kullanılarak ön hazırlık harçları hazırlanmıştır. Afyonkarahisar’da mermer tozu büyük bir çevre sorunu olduğundan karışım oranları %0 (referans numunesi) %5, %10, %20, %30, %40 ve %50 olmak üzere İMT (ince kum, mermer tozu) ve KMT (kaba kum, mermer tozu) 2 seri hazırlanmıştır. Yayılma tablası kullanılarak yapılan denemelerde su/çimento oranı 0,58 seçilmiştir (Resim 3.5). Harç numuneleri Çizelge 3.6.’da verilen karışım oranlarına göre sırasıyla mikserde karıştırılarak hazırlanmıştır. Belirlenen oranlara göre bütün malzemeler hassas terazide ayrı ayrı tartılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan malzemeler karışım işlemi için mikserde yerleştirilmiştir. Karışım kabına ilk önce su konulup devamında bağlayıcı malzeme ilave edilerek 20-30 saniye karıştırılıp şerbet elde edilmiştir. Daha sonra ince agrega, MT veya UK ilave edilerek yaklaşık 2-3 dakika homojenlik sağlanıncaya kadar karıştırılmıştır ve boyutları 40x40x160 mm ölçülerinde olan prizmatik kalıplara dökülerek sarsma tablası kullanılarak sıkıştırılmıştır. Üretimden 24 saat sonra kalıplar sökülmüş ve numuneler 20°C sıcaklıktaki kür tankına konulmuştur.

Çizelge 3.6 Ön hazırlık harç numunelerinin kütlece karışım oranları.

Numune	Kum		MT		UK		Çimento	Su	SA
	g	g	%	g	%	g			
İMT0	1800	—	—	—	—	600	350	—	
İMT10	1620	180	10	—	—	600	350	—	
İMT20	1440	360	20	—	—	600	350	—	
İMT30	1260	540	30	—	—	600	350	3	
İMT40	1080	720	40	—	—	600	350	4,2	
İMT50	900	900	50	—	—	600	350	4,7	
KMT0	1800	—	—	—	—	600	350	—	
KMT10	1620	180	10	—	—	600	350	—	
KMT20	1440	360	20	—	—	600	350	—	
KMT30	1260	540	30	—	—	600	350	—	
KMT40	1080	720	40	—	—	600	350	—	
KMT50	900	900	50	—	—	600	350	—	

İMT: İnce kum, mermer tozu; KMT: Kaba kum, mermer tozu;



Resim 3.5 Yayılma tablası.

Ön hazırlık çalışmasından sonra MT serisi (mermer tozu), UK serisi (uçucu kül) ve MU serisi (mermer tozu ve uçucu kül) olmak üzere 3 seri hazırlanmıştır. Kütlece karışım oranları Çizelge 3.7’de verilmiştir. Bütün serilerde su/çimento oranı 0,58 olarak sabit tutulmuştur. MT serisinde, standart kum ağırlıkça %0 (referans numunesi) %5, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında MT ile ikame edilmiştir. UK serisinde standart kum ağırlıkça %5, %10, %20 ve %30 UK ile ikame edilmiştir. MU serisinde ise standart kum ağırlıkça %2,5, %5, %10, %15 MT ve %2,5, %5, %10, %15 UK ile ikame edilmiştir. MT, mermer endüstrisi gelişmiş Afyonkarahisar’da büyük çevre sorunlarına yol açtığından ötürü harçlarda MT ikame oranları daha yüksek seçilmiştir. MT, UK ve MU serilerinde çimento 900 gr kullanılmıştır. Sarsma tablası ve mikser Resim 3.6’da sunulmuştur.



Resim 3.6 Sarsma tablası (solda) ve mikser (sağda).

Çizelge 3.7 Harç numunelerinin kütlece karışım oranları.

Numune	Kum		MT		UK		Çimento	Su	SA
	g	g	%	g	%	g			
Referans	2700	—	—	—	—	—	900	525	—
MT5	2565	135	5	—	—	—	900	525	—
MT10	2430	270	10	—	—	—	900	525	—
MT20	2160	540	20	—	—	—	900	525	1,7
MT30	1890	810	30	—	—	—	900	525	3,1
MT40	1620	1080	40	—	—	—	900	525	6
MT50	1350	1350	50	—	—	—	900	525	7
UK5	2565	—	—	135	5	—	900	525	—
UK10	2430	—	—	270	10	—	900	525	2,5
UK20	2160	—	—	540	20	—	900	525	3,5
UK30	1890	—	—	810	30	—	900	525	7
MU2,5	2565	67	2,5	67	2,5	—	900	525	—
MU5	2430	135	5	135	5	—	900	525	—
MU10	2160	270	10	270	10	—	900	525	—
MU15	1890	405	15	405	15	—	900	525	—

MT: Mermer tozu, UK: Uçucu kül, MU: Mermer tozu ve uçucu kül, SA: Süperakışkanlaştırıcı katkı

Kalıplara dökülmüş numuneler ve kür tankındaki numuneler Resim 3.7’te verilmiştir.



Resim 3.7 Kalıplara dökülmüş numuneler (solda) ve kür tankındaki numuneler (sağda).

3.3 Uygulanan Analiz ve Deneyler

Bu bölümde harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen analiz ve deneyler açıklanmıştır.

3.3.1 Eğilme ve Basınç Mukavemeti Deneyleri

Kür havuzunda 7 ve 28 gün bekleyen 40x40x160 mm boyutlarında prizma harç numunelerine üç nokta eğilme mukavemeti deneyi yapılmıştır. Deneylerde 20 Ton basma ve 2 Ton eğilme kapasitesine sahip standart çimento presi kullanılmıştır (Resim 3.8). Eğilme mukavemeti deneyinden elde edilen ikiye bölünmüş numuneler üzerine basınç mukavemeti deneyi yapılmıştır.



Resim 3.8 Numunelerin basınç deneyi (solda) ve eğilme deneyi (sağda).

3.3.2 X Işını Kırınım (XRD) Analizi

Harç numunelerinin X ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile faz analizleri ve kristal yapı tanımlaması bakır x ışını tüplü Shimadzu XRD – 6000 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Basınç mukavemeti deneyi sonrası çok ince öğütülerek toz haline getirilen numune, cihazın numune tutucusuna konarak kristal faz analizi yapılmıştır. XRD cihazı Resim 3.8’de, analizde kullanılan XRD cihazının bazı teknik özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8 Analizde kullanılan XRD cihazının bazı teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Tarama yarıçapı	185 mm
Minimum açı	0,002°(2θ), 0,001°(θ)
Açı tekrarlanabilirliği	±0,001° (2θ)
Tarama açısı aralığı	-6°~163° (2θ), -180°~180°(θ)
Devir hızı	1000°/dakika (2θ)
Tarama hızı	0,1°~50°/dk (2θ), 0,05°~25°/dk (θ)



Resim 3.9 XRD cihazı.

3.3.3 Birim Hacim Ağırlık Analizi

Kür tankı içerisinde 28 gün kür edilen numunelerin birim hacim ağırlığının belirlenmesi için Arşimet prensibinden faydalanılmıştır. TS EN 772-4 (2000)'e uygun olarak yapılan deney sayesinde harçların birim hacim ağırlığı ve görünen porozitesi hesaplanmıştır.

3.3.4 Porozite Analizi

28 gün kirece doymuş su içerisinde kür işlemine tabi tutulan numuneler, kür havuzundan çıkarılarak TS EN 772-4'e uygun olarak porozite analizi yapılmıştır (TS EN 772-4). Numuneler hassas terazide doymuş yüzey kuru ağırlığı (W_{dyk}), sualtındaki ağırlığı (W_{su}) ve etüvde kurutulan numunenin kuru ağırlığı (W_{kuru}) tartılmıştır. Elde edilen bu ağırlıklar Formül 3.2'de kullanılarak porozite değeri elde edilmiştir.

$$P = \frac{(W_{dyk} - W_{kuru})}{(W_{dyk} - W_{su})} \times 100 \quad (3.2)$$

Burada;

P: Porozite (%),

W_{dyk} : Numunelerin doymuş yüzey kuru ağırlığı (kg),

W_{kuru} : Numunelerin etüv kurusu ağırlığı (kg),

W_{su} : Numunelerin su altındaki ağırlığı (kg),

4. BULGULAR

Üretilen harç serileri üzerinde eğilme ve basınç mukavemet deneyleri, XRD analizi ve porozite analizi yapılmış olup sonuçları bu bölümde verilmiştir.

4.1 Harç Karışımların Eğilme Mukavemeti Değerleri

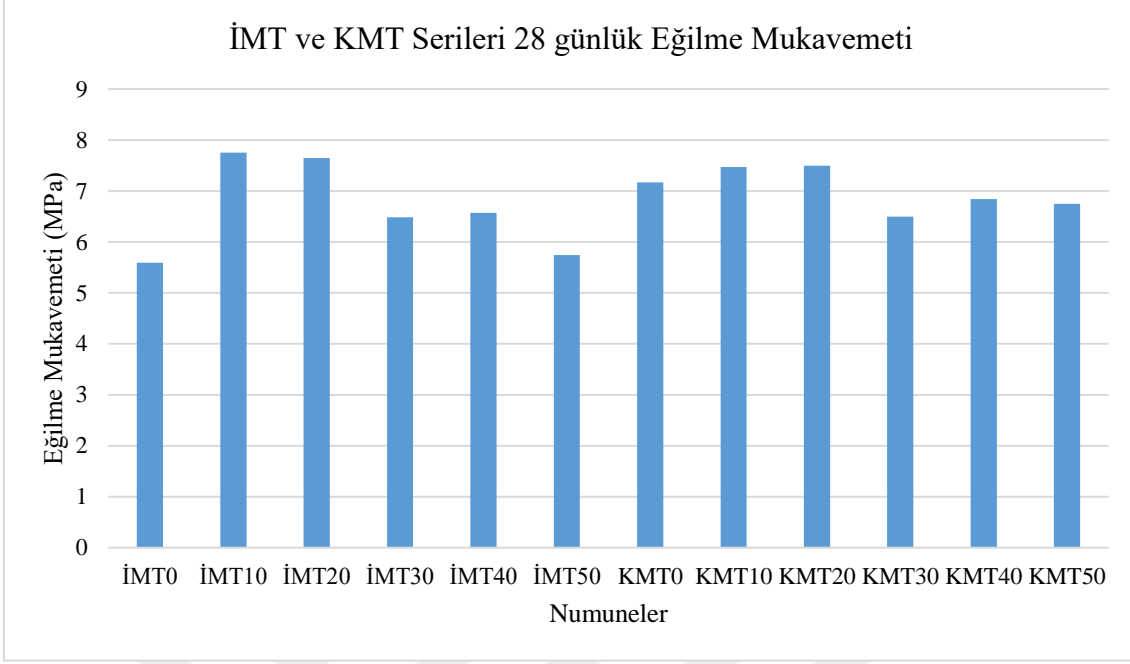
Harç karışımlarının eğilme mukavemeti değerleri bu bölümde sunulmuştur.

4.1.1 İMT ve KMT Serileri 28 Günlük Eğilme Mukavemeti Değerleri

Ön hazırlık olarak üretilen İMT ve KMT serileri 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu eğilme mukavemeti değerleri kullanılarak hazırlanan grafik Şekil 4.1 sunulmuştur.

Çizelge 4.1 İMT ve KMT serileri 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri.

Numune	28 Günlük Eğilme Mukavemeti (MPa)
İMT0	5,589
İMT10	7,750
İMT20	7,648
İMT30	6,484
İMT40	6,570
İMT50	5,742
KMT0	7,171
KMT10	7,468
KMT20	7,492
KMT30	6,499
KMT40	6,843
KMT50	6,750



Şekil 4.1 İMT ve KMT serileri 28 günlük eğilme mukavemeti grafiği.

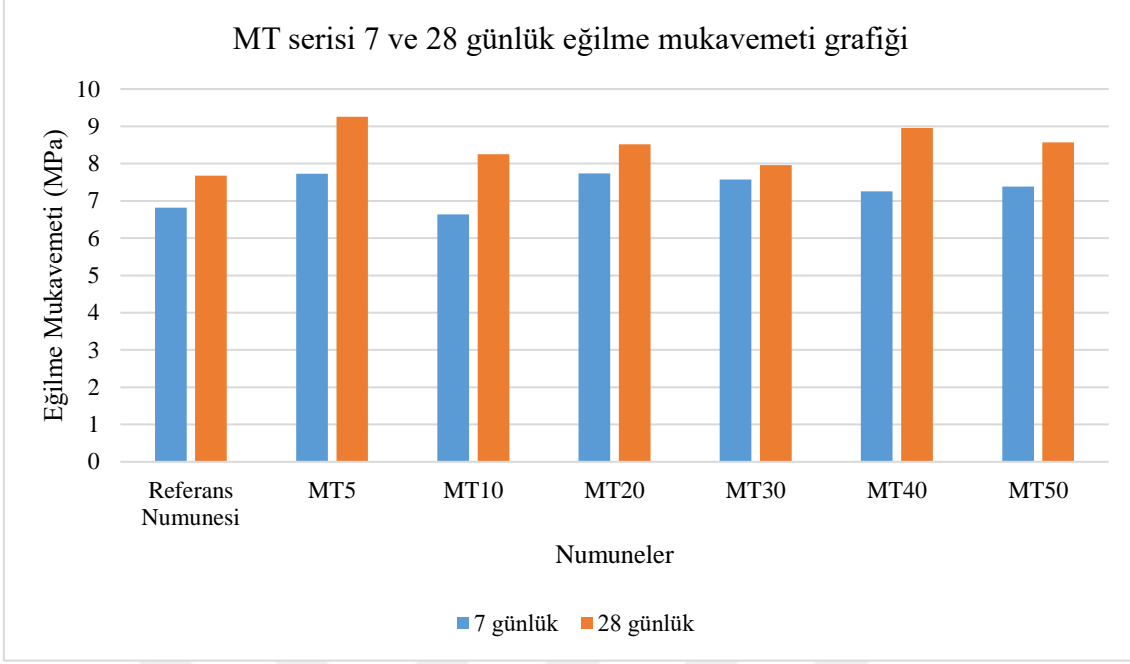
İMT ve KMT serilerinde %10 ve %20 MT ikamesinin 28 günlük eğilme mukavemetini arttırdığı, daha yüksek ikame oranlarının mukavemeti azalttığı elde edilmiştir (Şekil 4.1). Artan MT ikamesinin, işlenebilirlik üzerine olumsuz etkisi mukavemet kaybına neden olmuştur.

4.1.2 MT Serisi 7 ve 28 Günlük Eğilme Mukavemeti Değerleri

MT serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri Çizelge 4.2’de, bu değerler kullanılarak hazırlanan grafik Şekil 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 MT serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri.

Numune	Eğilme Mukavemeti (MPa)	
	7 günlük	28 günlük
Referans	6,820	7,675
MT5	7,724	9,253
MT10	6,635	8,253
MT20	7,734	8,519
MT30	7,574	7,956
MT40	7,258	8,952
MT50	7,387	8,568



Şekil 4.2 MT serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti grafiği.

Şekil 4.2’de en yüksek eğilme mukavemetine sahip numune %5 MT ikamesine sahip MT5 numunesi olduğu elde edilmiştir. MT ikameli bütün numunelerin eğilme mukavemeti referans numunesinden daha yüksek elde edilmiştir ancak optimum 7 ve 28 günlük eğilme mukavemetine MT5 numunesinde ulaşıldığı anlaşılmıştır.

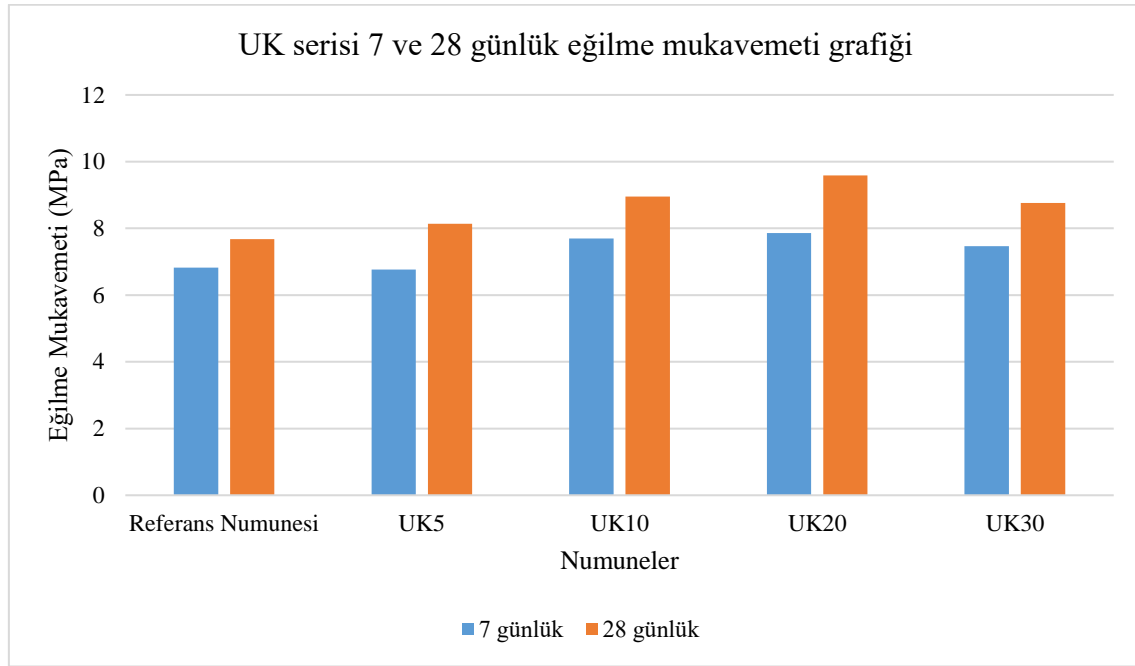
MT harç karışımında mikro dolgu etkisi meydana getirdiği ve bu sayede eğilme mukavemetini arttırdığı anlaşılmıştır. MT ikamesi %5 ikame oranından yüksek numunelerde işlenebilirlik kaybı nedeniyle eğilme mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Elde edilen bulgular, Rana vd. (2015), Vijayalakshmi vd. (2013), Keleştemur vd. (2014), Almeida vd. (2007), Aliabdo vd. (2014), Rai vd. (2011) tarafından elde edilen bulgularla benzerlik göstermektedir.

4.1.3 UK Serisi 7 ve 28 Günlük Eğilme Mukavemeti Değerleri

UK serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri Çizelge 4.3’te, bu değerler kullanılarak hazırlanan grafik Şekil 4.3’te sunulmuştur.

Çizelge 4.3 UK serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri.

Numune	Eğilme Mukavemeti (MPa)	
	7 günlük	28 günlük
Referans	6,820	7,675
UK5	6,768	8,135
UK10	7,693	8,950
UK20	7,860	9,585
UK30	7,466	8,764



Şekil 4.3 UK serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti grafiği.

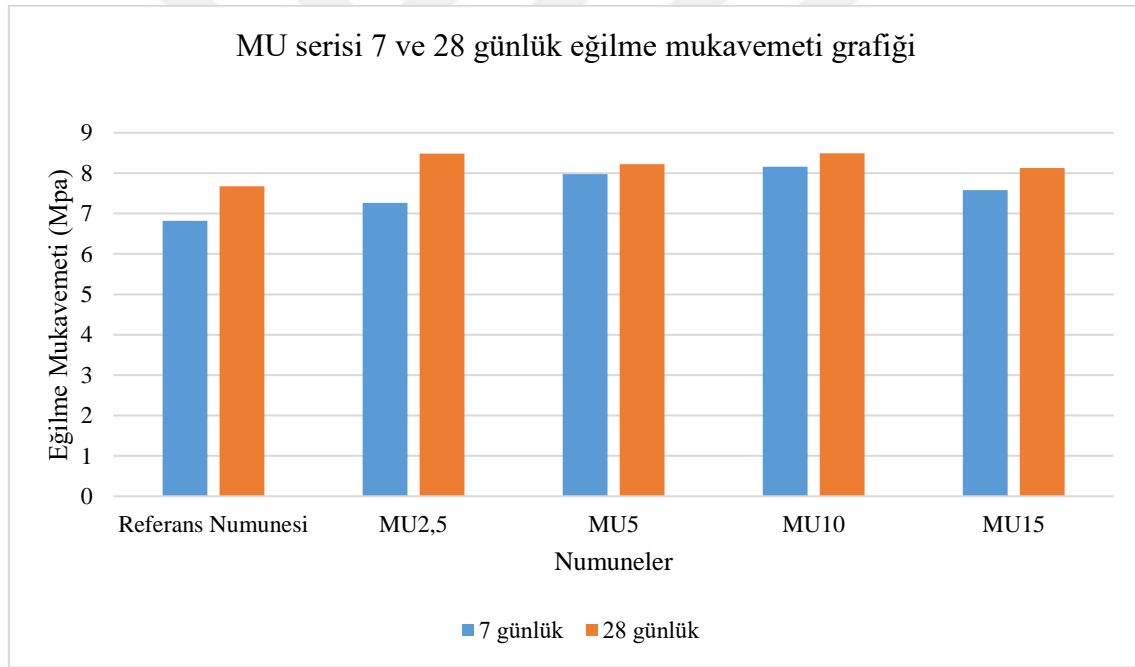
Harçlarda UK ikamesi, harçların eğilme mukavemetini arttırmıştır. Numunelerin 28 günlük eğilme mukavemeti referans numunesine göre %6, %16,6; %25 ve %14,2 yüzdelerlik artış elde edilmiştir. Harçların UK ikamesi ile puzolanik tepkimelerin gerçekleşmesi eğilme mukavemetinde artış sağlamıştır. Elde edilen bulgular, Pofale ve Deo (2010), Rebeiz vd. (2004), Hwang vd. (1998), Siddique (2003) tarafından elde edilen bulgularla benzerlik göstermektedir.

4.1.4 MU Serisi 7 ve 28 Günlük Eğilme Mukavemeti Değerleri

MU serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri Çizelge 4.4'te, bu değerler kullanılarak hazırlanan grafik Şekil 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4 MU serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri.

Numune	Eğilme Mukavemeti (MPa)	
	7 günlük	28 günlük
Referans	6,820	7,675
MU2,5	7,266	8,480
MU5	7,979	8,224
MU10	8,160	8,492
MU15	7,582	8,130



Şekil 4.4 MU serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti grafiği.

Harç numunelerinde en yüksek 28 günlük eğilme mukavemetini %10 MT ve %10 UK ikameli MU10 numunesi sağlamıştır. Eğilme mukavemeti %10 ikame oranına kadar artış göstermiştir ve %15 ikame oranında azalmıştır.

4.2 Harç Karışımların Basınç Mukavemeti Değerleri

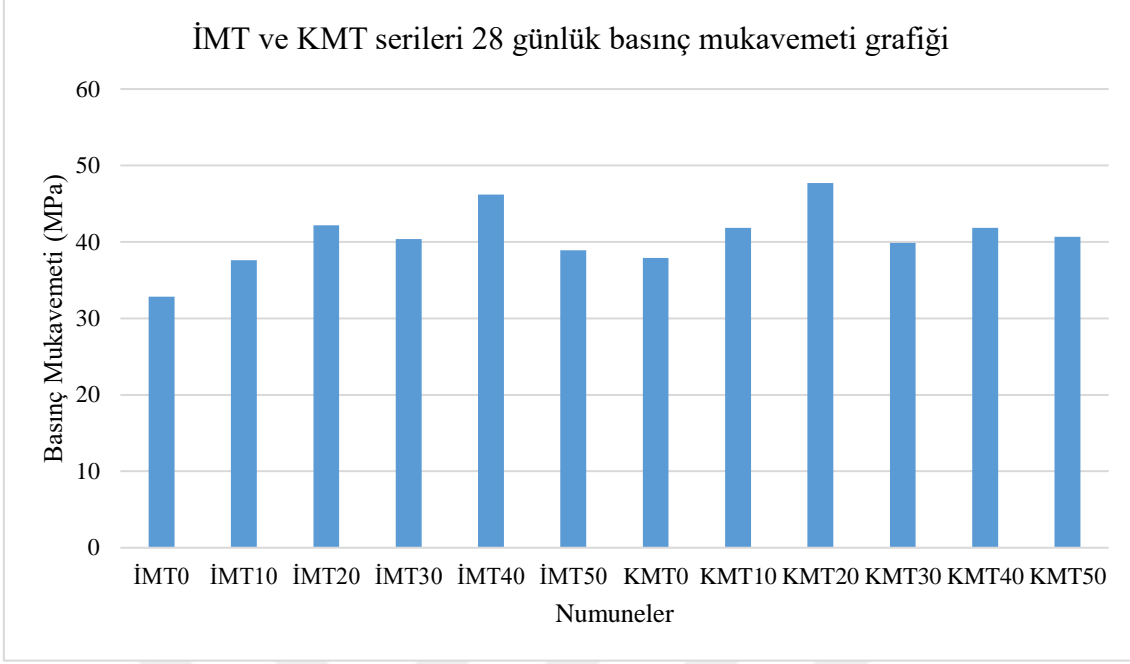
Harç karışımlarının basınç mukavemeti bu bölümde sunulmuştur.

4.2.1 İMT ve KMT Serileri 28 Günlük Basınç Mukavemeti Değerleri

Ön hazırlık olarak üretilen İMT ve KMT serileri 28 günlük basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Bu eğilme mukavemeti değerleri kullanılarak hazırlanan grafik Şekil 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5 İMT ve KMT serileri 28 günlük basınç mukavemeti değerleri.

Numune	28 Günlük Basınç Mukavemeti (MPa)
İMT0	32,86
İMT10	37,61
İMT20	42,18
İMT30	40,39
İMT40	46,19
İMT50	38,92
KMT0	37,91
KMT10	41,84
KMT20	47,72
KMT30	39,87
KMT40	41,83
KMT50	40,67



Şekil 4.5 İMT ve KMT serileri 28 günlük basınç mukavemeti grafiği.

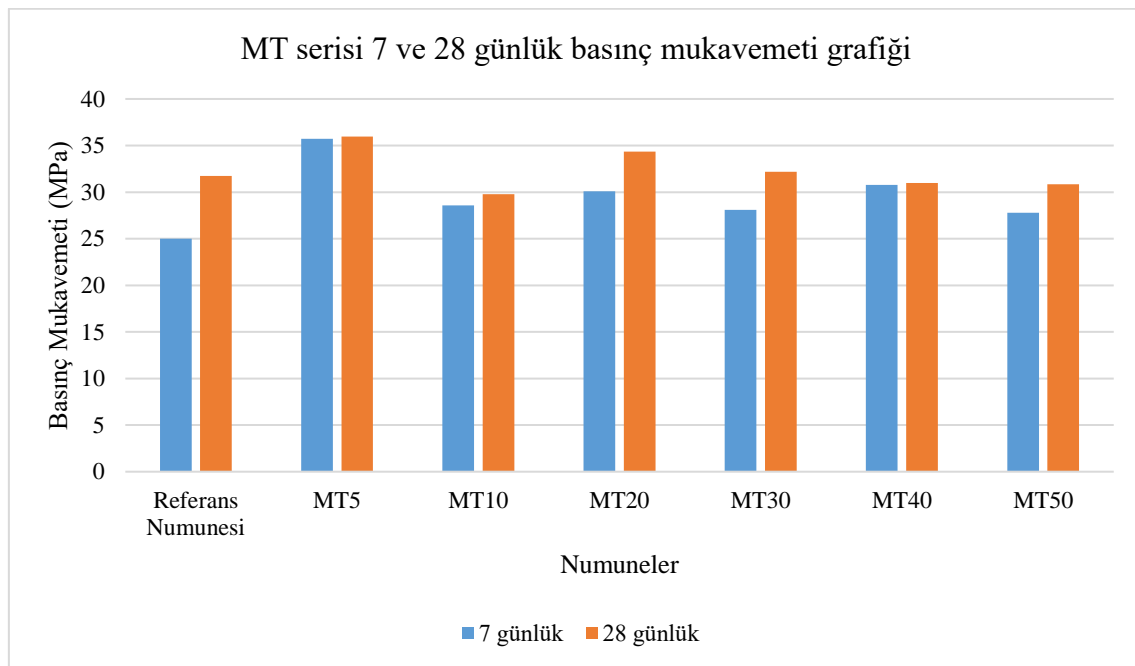
İMT serisinde basınç mukavemeti MT ikamesi ile artış göstermiştir. Çimento miktarının %0,5 oranında süperakışkanlaştırıcı içeren %30 MT ikameli İMT30 numunesinin basınç mukavemetinde azalma tespit edilmiştir ancak çimento miktarının %0,7 oranında süperakışkanlaştırıcı içeren %40 MT ikameli İMT40 numunesinin basınç mukavemetinde artış gözlemlenmiştir. KMT serisinde ise en yüksek basınç mukavemetine %20 MT ikameli KMT20 numunesi ulaşmıştır.

4.2.2 MT Serisi 7 ve 28 Günlük Basınç Mukavemeti Değerleri

MT serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.6'da, bu değerler kullanılarak hazırlanan grafik Şekil 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6 MT serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri.

Numune	Basınç Mukavemeti (MPa)	
	7 günlük	28 günlük
Referans	25,02	31,73
MT5	35,71	35,95
MT10	28,57	29,78
MT20	30,09	34,34
MT30	28,09	32,20
MT40	30,77	30,98
MT50	27,78	30,86



Şekil 4.6 MT serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti grafiği.

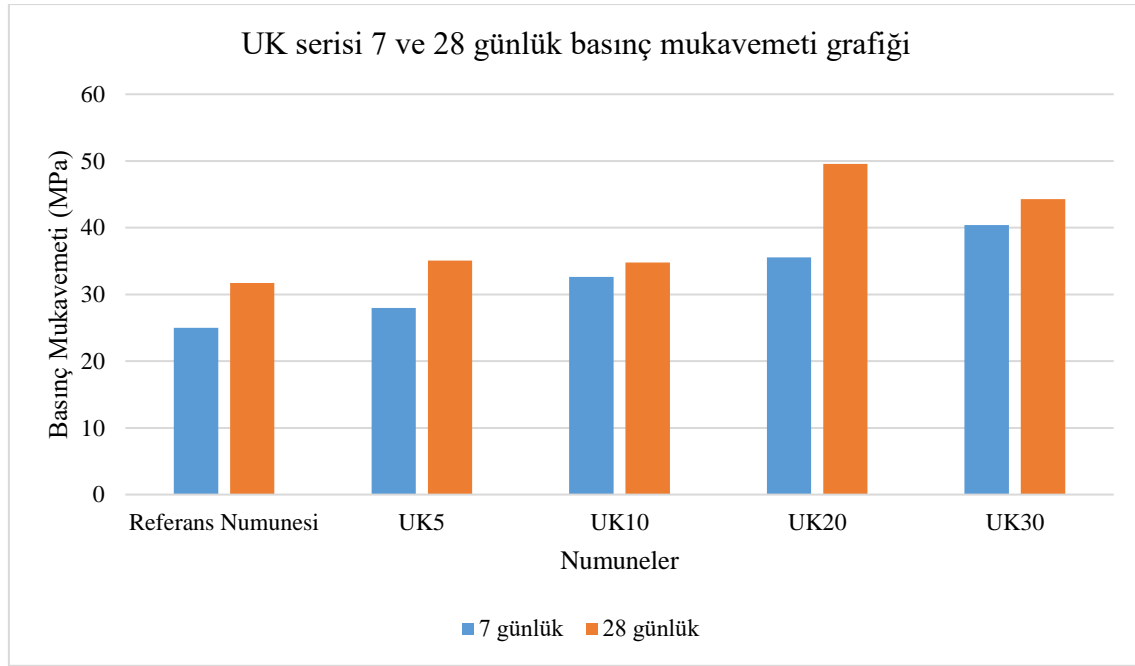
MT serisi en yüksek 7 ve 28 günlük basınç mukavemetine MT5 numunesi olduğu tespit edilmiştir. MT'nun mikro dolgu etkisi ile basınç mukavemeti artmıştır. Yüksek ikame oranlarında MT'nin yüksek yüzey alanı ve içsel sürtünmesi işlenebilirliği azaltmıştır ve basınç mukavemeti azalmasına yol açmıştır.

4.2.3 UK Serisi 7 ve 28 Günlük Basınç Mukavemeti Değerleri

UK serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.7'de, bu değerler kullanılarak hazırlanan grafik Şekil 4.7'de sunulmuştur.

Çizelge 4.7 UK serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri.

Numune	Basınç Mukavemeti (MPa)	
	7 günlük	28 günlük
Referans	25,02	31,73
UK5	27,97	35,09
UK10	32,64	34,79
UK20	35,53	49,55
UK30	40,42	44,28



Şekil 4.7 UK serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti grafiği.

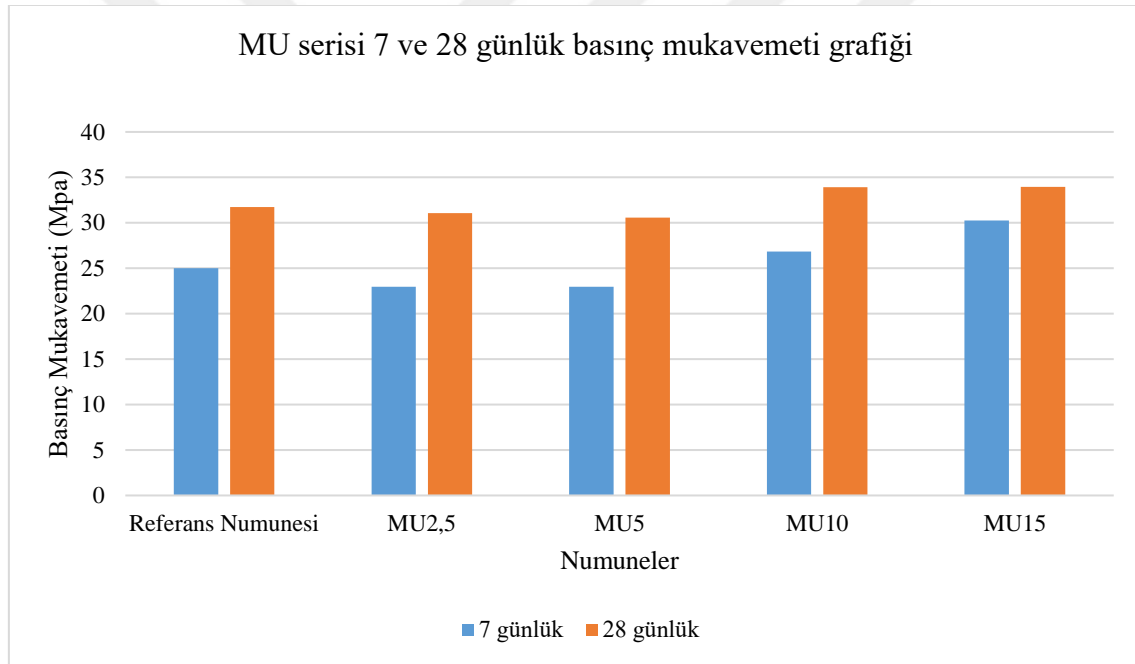
UK serisinde UK ikamesinin artması ile basınç mukavemetinde artış elde edilmiştir. En yüksek mukavemet artışına %20 UK içeren UK20 numunesi ulaşmıştır. Referans numunesi 28 günlük basınç mukavemetine göre yüzdelerle artış sırasıyla %10,6; %9,6; %56,2 ve %39,55 ölçülmüştür. Puzolanik tepkimelerin ileri yaşlarda meydana gelmesi, 28 günlük basınç mukavemetini arttırmıştır. Ayrıca, kumun UK ile ikame edilmesi, 7 günlük basınç mukavemetinde artış sağlamıştır.

4.2.4 MU Serisi 7 ve 28 Günlük Basınç Mukavemeti Değerleri

MU serisi 7 ve 28 günlük eğilme mukavemeti değerleri Çizelge 4.8’de, bu değerler kullanılarak hazırlanan grafik Şekil 4.8’de sunulmuştur.

Çizelge 4.8 MU serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri.

Numune	Basınç Mukavemeti (MPa)	
	7 günlük	28 günlük
Referans	25,02	31,73
MU2,5	22,97	31,05
MU5	22,98	30,57
MU10	26,84	33,92
MU15	30,24	33,95



Şekil 4.8 MU serisi 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti grafiği.

MU2,5 ve MU5 numuneleri 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti referans numunesine göre azalmıştır. MU10 ve MU15 numuneleri 28 günlük basınç mukavemeti ise referans numunesinden %6,9 ve %7 oranlarında daha yüksek elde edilmiştir.

4.3 Harç Karışımlarının XRD Analizi

Harç karışımlarının XRD kalitatif yöntemi ile mineralojik analiz için karışım oranları, eğilme ve basınç mukavemeti değerleri göz önünde bulundurularak referans numunesi, MT5, MT20, MT50, UK20 ve MU10 numuneleri seçilmiştir. Analizlerde 9° - 37° açıları arasında etrenjit, portlandit, kuvars, kalsiyum karbonat, C₃S, C₂S ve CSH tespit edilmiştir. Numunelerde tespit edilen kristal fazların saniyede sayım şiddeti değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Numune kristal fazlarının saniyede sayım şiddeti değerleri.

Numuneler		Kristal Fazlar (cps)						
		Etrenjit	Portlandit	Kuvars	CaCO ₃	C ₃ S	C ₂ S	CSH
Referans numunesi	7 gün	200	800	7200	-	200	400	200
	28 gün	-	4600	9800	-	-	-	200
MT5	7 günlük	200	1000	8200	600	600	-	600
	28 gün	300	500	5400	600	600	-	600
MT20	7 gün	200c	400	4200 s	1100	1100	-	1100
	28 gün	200	500	3700	1400	-	-	1400
MT50	28 gün	-	1100	2700	400	-	-	2100
UK20	7 gün	-	300	4800	-	-	-	400
MU10	28 gün	-	1200	4500	700	500	-	800

Cps: Saniyede sayım şiddeti, CSH: Kalsiyum silika hidrat, C₃S: Trikalsiyum silikat, C₂S:Dikalsiyum silikat

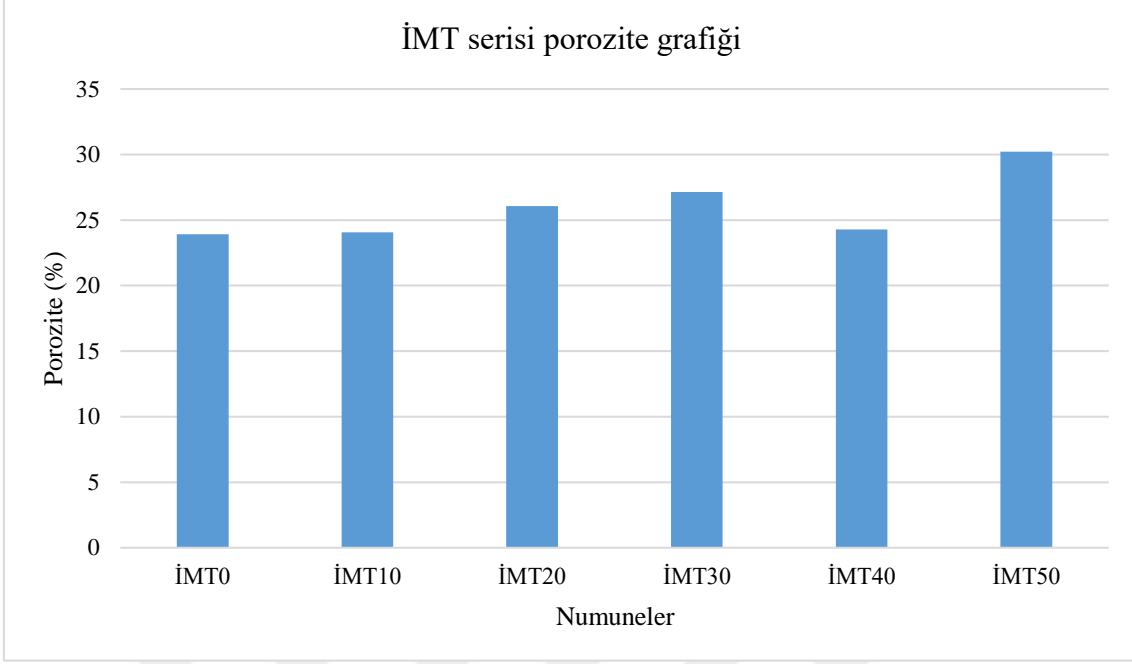
Harç karışımlarının XRD analizinde, MT ikame oranı arttıkça kristal CSH şiddeti artmıştır. MT50 numunesi, 2100 cps sayım şiddetinde kristal CSH içermesine rağmen, en yüksek eğilme ve basınç mukavemetine sahip numune %5 MT içeren MT5 numunesidir. Bu farklılık amorf CSH varlığından ötürü meydana gelmektedir. Referans numunesi 7 günlük portlandit şiddeti 800 cps iken hidrasyon devamı ile 28 günlük portlandit şiddeti 4600 cps olduğu elde edilmiştir. Ayrıca karışımlarda kullanılan kumun %50 azaltılmasıyla kuvars kristalleri %62,5 azalmıştır.

4.4 Harç Karışımlarının Porozite Değerleri

Harç karışımlarının porozite değerleri Çizelge 4.10’da sunulmuştur. İMT serisi porozite grafiği Şekil 4.9’da, KMT serisi porozite grafiği Şekil 4.10’da, UK serisi porozite grafiği Şekil 4.11’de, MU serisi porozite grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir.

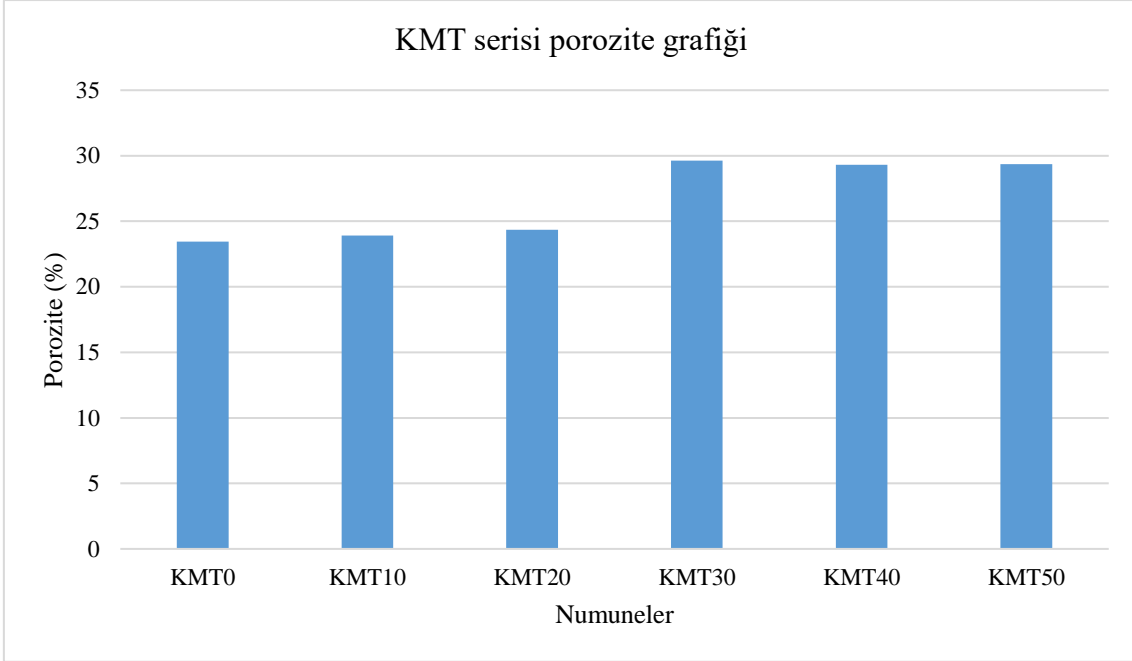
Çizelge 4.10 Harç karışımlarının porozite değerleri.

Numune	Porozite (%)
İMT0	23,91
İMT10	24,06
İMT20	26,08
İMT30	27,14
İMT40	24,29
İMT50	30,22
KMT0	23,44
KMT10	23,92
KMT20	24,36
KMT30	29,64
KMT40	29,30
KMT50	29,37
UK5	21,65
UK10	20,75
UK20	20,49
UK30	19,86
MU2,5	24,75
MU5	24,51
MU10	23,15
MU15	22,85



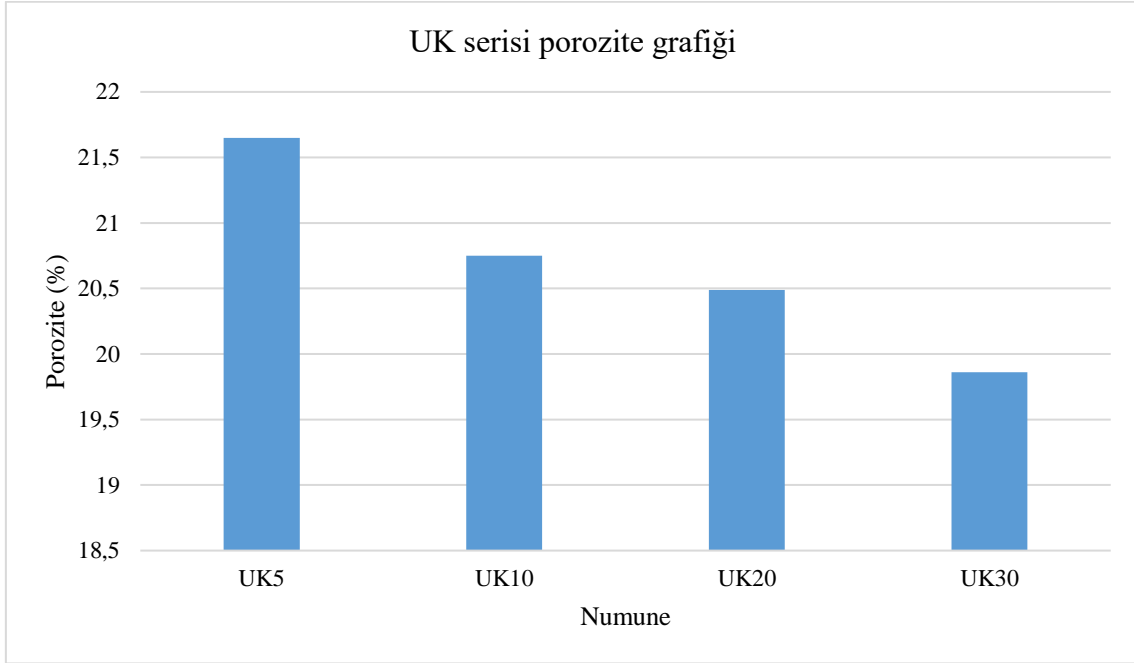
Şekil 4.9 İMT serisi porozite grafiği.

İMT serisi porozite değerleri MT ikame oranı arttıkça işlenebilirliğin azalması nedeniyle artış göstermiştir. İşlenebilirlik azalması, gözeneklilik artışına neden olmuştur ve poroziteyi arttırmıştır.



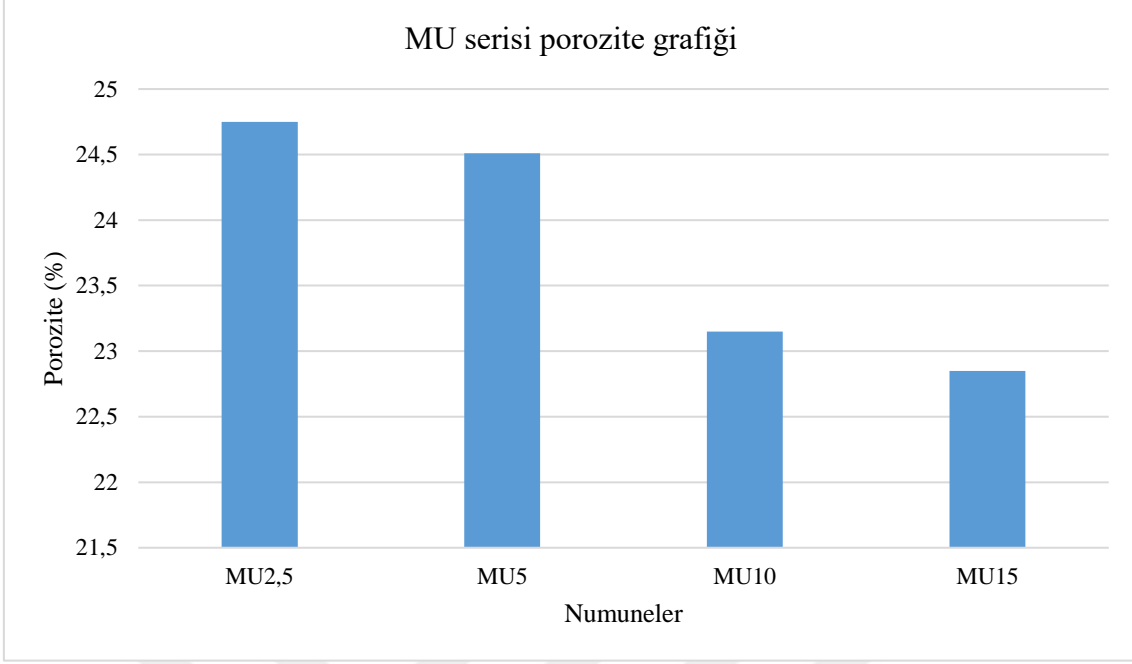
Şekil 4.10 KMT serisi porozite grafiği.

KMT serisi porozite değerleri KMT10 ve KMT20 numunelerinde sırasıyla %0,6 ve %1,9 artarken, KMT30 numunesinde %13,5 artmıştır. Azalan işlenebilirlik poroziteyi arttırmıştır.



şekil 4.11 UK serisi porozite grafiği.

UK serisi porozite değeri UK miktarı arttıka azalmıştır. Küresel ve düzgün yüzeyli yapısı nedeniyle taze betonun işlenebilirliğini arttırmış ve optimum sıkışmayı sağlayarak poroziteyi azaltmıştır.



Şekil 4.12 MU serisi porozite grafiği.

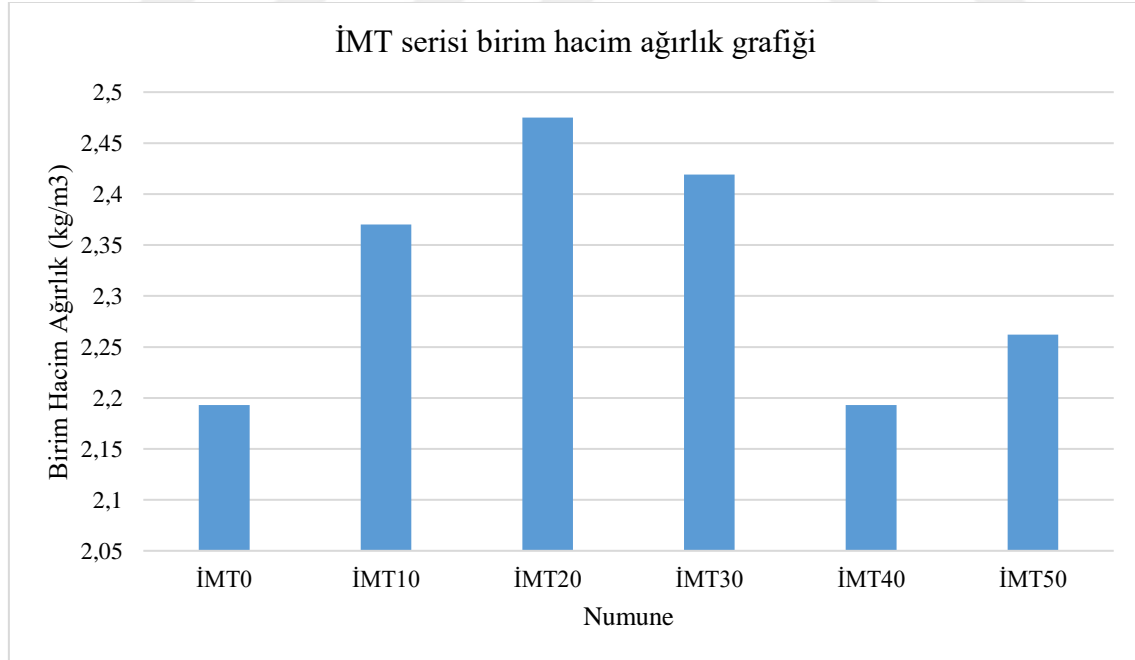
Eşit miktarlarda MT ve UK ikame edilen MU serisinde porozite, UK'ün ikame oranına bağlı olarak azalmıştır. MU5 numunesinde porozite %0,9 azalırken, MU10 numunesinde %6,5 azalmıştır.

4.5 Harç Karışımlarının Birim Hacim Ağırlık Değerleri

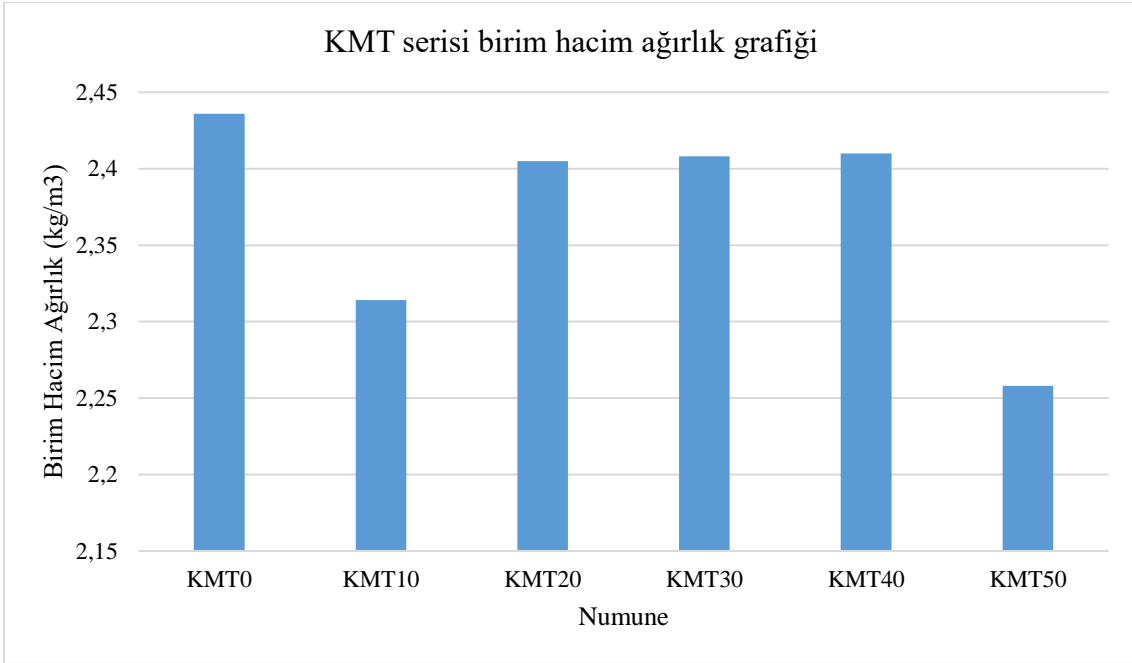
Harç karışımlarının birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.11'de sunulmuştur. İMT serisi birim hacim ağırlık grafiği Şekil 4.13'te, KMT serisi birim hacim ağırlık grafiği Şekil 4.14'te, UK serisi birim hacim ağırlık grafiği Şekil 4.15'te, MU serisi birim hacim ağırlık grafiği Şekil 4.16'de verilmiştir.

Çizelge 4.11 Harç karışımlarının birim hacim ağırlık değerleri.

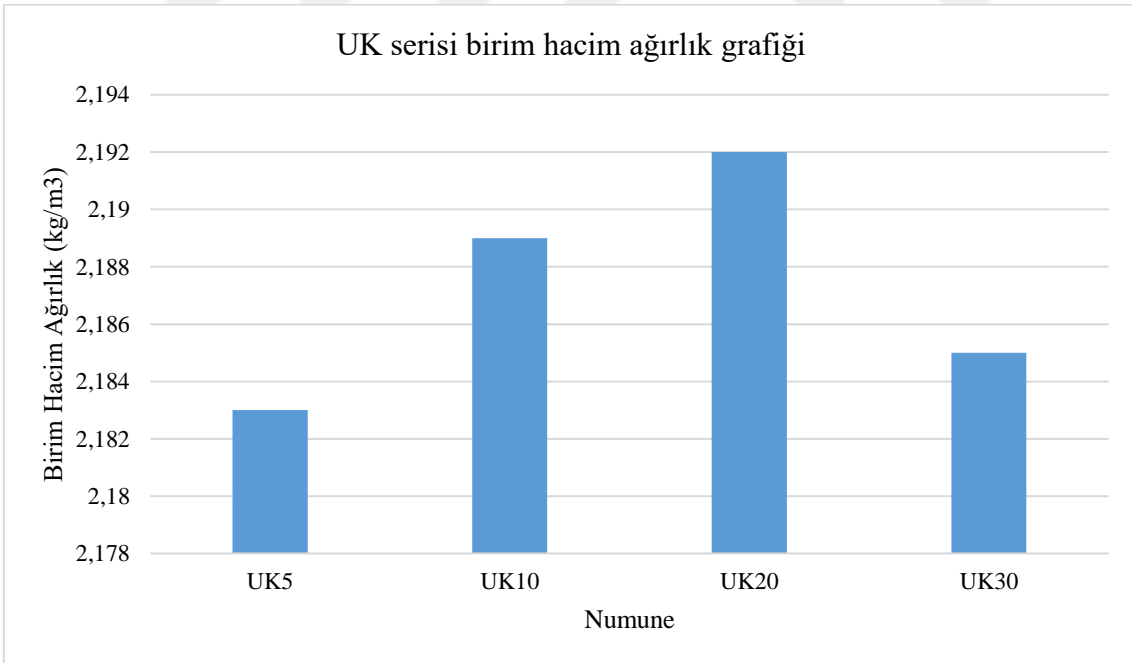
Numune	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
İMT0	2193
İMT10	2370
İMT20	2475
İMT30	2419
İMT40	2193
İMT50	2262
KMT0	2436
KMT10	2314
KMT20	2405
KMT30	2408
KMT40	2410
KMT50	2258
UK5	2183
UK10	2189
UK20	2192
UK30	2185
MU2,5	2335
MU5	2330
MU10	2209
MU15	2202



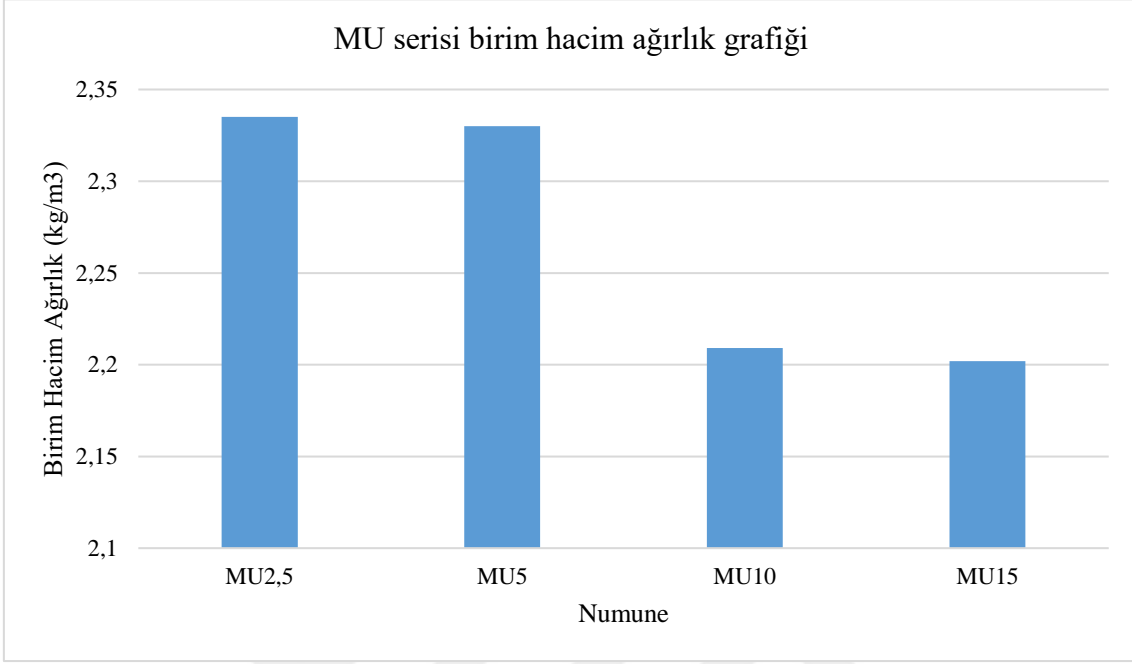
Şekil 4.13 İMT serisi birim hacim ağırlık grafiği.



Şekil 4.14 KMT serisi birim hacim ağırlık grafiği.



Şekil 4.15 UK serisi birim hacim ağırlık grafiği.



Şekil 4.16 MU serisi birim hacim ağırlık grafiği.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mermer tozu ve uçucu kül ince agrega ile belli oranlarda ikame edilerek harç örnekleri üretilmiştir. Örnekler üzerinde fiziksel ve mekanik testler yürütülmüş, mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

- MT kullanılarak üretilen harçların, eğilme ve basınç mukavemeti değerleri referans örneklere göre artış göstermiştir. Buna göre en yüksek eğilme ve basınç mukavemet değerleri %5 MT ikameli numunelerde elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak %5 oranında MT'nun harçta mikro dolgu etkisi gösterdiği ve arayüzeydeki aderansı arttırdığı düşünülmektedir. İkame oranları %10'un üzerindeki harçlarda ince agrega yüzey alanı çok fazla artmış ve işlenebilirlik azalmıştır. İkame oranı %10 ve üzeri karışımlarda referans numuneye göre artış olsa da buna ince tanelerin boşluk yapısını doldurarak bünyenin kompositesini (doluluk) arttırmaktan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
- MT ikamesi ile üretilen harçlarda, MT oranı arttıkça porozite değerinin arttığı belirlenmiştir. Artan MT oranının işlenebilirliği azaltması gözenekliliği artırarak poroziteyi arttırmıştır.
- UK içeren harçlarda, UK oranı arttıkça porozite değerinin azaldığı tespit edilmiştir. UK'ün küresel ve düzgün yüzeyle yapısı çimento matrisinin işlenebilirliğini arttırmış ve harçlarda gözenek oluşumunu azaltarak poroziteyi azaltmıştır. Aynı şekilde, eşit miktarlarda UK ve MT içeren harçlarda da porozite, artan UK ikamesi ile azalmıştır.
- Standart kum ile MT ikame ederek üretilen harçların eğilme mukavemeti, ince veya kaba kum ile MT ikame ederek üretilen harçların eğilme mukavemetinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Tane boyutu $d_{max}=2mm$ olan standart kum çimento matrisinde daha iyi dağılım gösterdiği ve bu sayede aderansı arttırdığı değerlendirilmektedir.

- UK kullanımı, puzolanik özelliği etkisi ile harçların mukavemetini arttırmıştır. 28 günlük eğilme ve basınç mukavemet değerleri, referans numunesi mukavemet değerlerinden daha yüksektir. UK'ün %20 oranında ikamesi ile referans numuneye göre %56,2 basınç mukavemeti artışı sağlamıştır. Harçlarda ince agreganın F sınıfı UK ile ikamesi, puzolanik tepkimeler sonucu CSH jellerinin miktarını arttırmış ve harcın mekanik özelliklerini geliştirmiştir.
- Harçlarda MT ve UK'ün eşit miktarlarda kullanımı, %5 MT ve %5 UK ve daha az ikamelerde referans numunesine oranla basınç mukavemet değerleri azaltmıştır (Şekil 4.4). %10 MT ve %10 UK ve daha fazla ikamelerde referans numunesine oranla artmıştır. Harç karışımındaki UK miktarının artması puzolanik tepkimeleri arttırmış ve oluşan CSH jelleri mukavemeti arttırmıştır.
- MT ikame oranı %5 olan numune optimum mukavemet değerleri sunmasına karşın, UK puzolanik özelliği sayesinde yüksek ikame oranlarında da yüksek mukavemet sunmaktadır. Puzolanik özellik UK'ü harçlarda daha avantajlı bir malzeme olmasını sağlamaktadır.
- Çalışmada yerel ölçekte (Afyonkarahisar Bölgesi) büyük oranlarda açığa çıkan bir endüstriyel atık olan mermer tozunun beton harçlarına olan etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak mermer tozunun belirli oranlarda harçlara ilave edilmesi ile çevreci ve gerekli mekanik fiziksel özellikleri karşılayabilen harçların üretilbileceği belirlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- ACAA. (2016). Coal combustion products (CCP)—production and use. Alexandria, VA: ACAA.
- Adriano, C.D., Page, A., Elseewi, A.A., Chang, A.C. and Straughan, I. (1980). Utilization and Disposal of Fly Ash and Other Coal Residues in Terrestrial Ecosystems: A Review. *Journal of Environmental Quality*, **9**: 333-344.
- Agarwal, S.K. and Gulati, D. (2006). Utilization of industrial wastes and unprocessed micro-fillers for making cost effective mortars. *Construction and Building Materials*, **20**: 999-1004.
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**: 327–363.
- Ahmed, S., Saurikhia, A., Haleem, A. and Gangopadhyay, S. (2016). Geographical Spread Of Fly Ash Generation And Residual Potential For Its Utilization In India. *International Journal of Innovative Research and Review*, **4**: 8-19.
- Akbulut, H, ve Gürer, C. (2006). Atık mermerlerin asfalt kaplamalarda agrega olarak değerlendirilmesi. *İMO Teknik Dergi*, **17**: 3943-3960.
- Al Amin, M., Gupta, H., Tarannum, R. and Ahasan, R. (2017). An Approach to Develop Green Environment in Cement Industry by Proper Material Handling and Maintenance Management System-A Case Study. *Global Journal of Researches in Engineering: G Industrial Engineering*, **17**: 9-16.
- Aliabdo, A.A., Elmoaty, A.E. and Auda, E.M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, **50**: 28-41.
- Almeida, N., Branco, F. and Santos, J.R. (2007). Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. *Building and Environment*, **42**: 810-819.
- Alyamaç, K.E. ve İnce, R. (2009). A preliminary concrete mix design for SCC with Marble Powders. *Construction and Building Materials*, **23**: 1201–1210.
- Alzboon, K. and Mahasneh, K. (2009). Effect of Using Stone Cutting Waste on the Compression Strength and Slump Characteristics of Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **27**: 491-496.

- Aruntaş, H.Y. (2006). UK'lerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **21**: 193-203.
- Aruntaş, H.Y., Gürü, M., Dayı, M. ve Tekin, I. (2010). Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials and Design*, **31**: 4039-4042.
- Ashish, D. K. (2018). Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *Journal of Building Engineering*, **15**: 236–242.
- Asokana, P., Saxenaa, M. and Asolekarb, S. (2005). Coal combustion residues— environmental implications and recycling potentials. *Resources, Conservation and Recycling*, **43**: 239–262.
- ASTM C 618 (1991). Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete, ASTM.
- Bentz, D.P. (2014). Activation energies of high-volume fly ash ternary blends: hydration and setting. *Cement and Concrete Composites*, **53**: 214–223.
- Bilgin, N., Yeprem, H.A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E. ve Marşoğlu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, **29**: 449–457.
- Binici H., Kaplan H. ve Yılmaz S. (2007). Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. *Scientific Research and Essay*, **2**: 372-379.
- Bonavetti, V.L. and Irassar, E.F. (1994). The effect of stone dust content in sand. *Cement and Concrete Research*, **24**: 580-590.
- British Cement Association (1999). Concrete Through The Ages. ISBN 0 7210 1547 6
- Carlson, C.L. and Adriano, D.C. (1993). Environmental Impacts of Coal Combustion Residues. *Journal of Environmental Quality*, **22**: 227-247.
- Chandra, S., Kumar, P. and Feyissa, B.A. (2002). Use of Marble Dust in Road Construction. *Road Materials and Pavement Design*, **3**: 317-330.
- Corinaldesi V., Moriconi, G. and Naik T.R. (2007). Characterization of Marble Dust for its use in Mortar and Concrete. CANMET/ACI Three day International Symposium on Sustainable development of Cement and Concrete, October 5-7, Toronto, Canada.

- Corinaldesi, V., Moriconi, G. and Naik, T.R. (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, **24**: 113-117.
- Çelik, T. ve Marar, K. (1996). Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. *Cement and Concrete research*, **26**: 1121-1130.
- Demir İ., Başpınar M.S., Görhan G. ve Kahraman, E. (2008). Mermer Tozu ve Atıklarının Kullanım Alanlarının Araştırılması. 6. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu, Afyonkarahisar, 26-27 Haziran, 327.
- Demir, İ., Başpınar, M.S., Görhan, G. ve Kahraman, E. (2008). Seyitömer Uçucu Külü Ve Afyonkarahisar Yöresi Volkanik Tüflerinin Puzolanik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **1**: 39-46.
- Demirel, B. (2010). The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. *International Journal of Physical Sciences*, **5**: 1372–1380.
- Demirel, B. ve Alyamaç, K. E. (2018). Waste marble powder/dust. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, **1**: 181–197.
- Dermatas, D. and Meng, X. (2003). Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering Geology*, **70**: 377–394.
- Dhanapandian, S., Gnanavel, B. and Ramkumar, T. (2009). Utilization of granite and marble sawing powder wastes as brick materials. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, **4**: 147 – 160.
- Dhoka, M.C. (2013). Green concrete: Using industrial waste of marble powder, quarry dust and paper pulp. *International Journal of Engineering and Science Invention*, **2**: 67-70.
- DPT- Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.
- Dunuweera S.P. and Rajapakse, R.M.G. (2018). Cement Types, Composition, Uses and Advantages of Nanocement, Environmental Impact on Cement Production, and Possible Solutions. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2018**: 1-11.
- Dura`n-Herrera, A., Juarez, C.A., Valdez, P. and Bentz, D.P. (2011). Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*, **33**: 39–45.

- Dwivedi, A. and Jain, M. (2014). Fly ash – waste management and overview : A Review. *Recent Research in Science and Technology*, **6**: 30-35.
- Eliche-Quesada, D., Corpas-Iglesias, F.A., Pérez-Villarejo, L. and Iglesias-Godino, F.J. (2012). Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. *Construction and Building Materials*, **34**: 275–284.
- Elmoaty, A.E. (2013). Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. *Construction and Building Materials*, **47**: 743-752.
- El-Sherbiny, S., El-Sheikh, S. M. and Barhoum, A. (2015). Preparation and modification of nano calcium carbonate filler from waste marble dust and commercial limestone for papermaking wet end application. *Powder Technology*, **279**: 290–300.
- Ergun, A. (2011). Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, **25**: 806-812.
- European Commission (2001). Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries, Integrated Pollution Prevention and Control. Publications Office of the European Union, Seville, Spain.
- European Commission Joint Research Centre (2013). Best Available Techniques Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Publications Office of the European Union, Seville, Spain.
- Ferreira, C., Ribeiro, A. and Ottosen, L. (2003). Possible applications for municipal solid waste fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, **B96**: 201-216.
- Gameiro, F., Brito, J. and Silva, D. (2014). Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. *Engineering Structures*, **59**: 654-662.
- Gani, M.S.J. (1997). Cement and concrete. CRC Press Taylor & Francis Group, Victoria, Australia.
- Gao, T., Shen, L., Shen, M., Liu, L., Chen, F. and Gao, L. (2017). Evolution and projection of CO₂ emissions for China's cement industry from 1980 to 2020. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **74**: 522–537.

- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S. ve Demir, İ. (2009). UK Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **5**: 33-42.
- Gupta, C. and Sharma, R.K. (2014). Influence of Marble Dust, Fly Ash and Beas Sand on Sub Grade Characteristics of Expansive Soil. International Conference on Advances in Engineering and Technology ICAET, Nagapattinam, March 29-30, 13-18.
- Gussoni, M. (2016). Stone sector 2016—Annual report and prospects for the international stone trade: Marina di Carrara, Italy. Internazionale Marmi e Macchine Carrara S.p.A., 104 p.
- Hall, C. (1976). On the history of portland cement after 150 years. *Journal of Chemical Education*, **53**: 222-223.
- Hamed, M.M., Ahmed, I.M. and Metwally, S.S. (2013). Adsorptive removal of methylene blue as organic pollutant by marble dust as eco-friendly sorbent. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **20**: 2370–2377.
- Hamza, R., Hagggar, S. and Khedr, S. (2011). Utilization of Marble and Granite Waste in Concrete Bricks. International Conference on Environment and BioScience IPCBEE, **21**: 115-119.
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H. and Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction Building Material*, **25**: 1167–1171.
- Huang, C.H., Lin, S.K., Chang, C.S. and Chen, H. (2013). Mix properties and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. *Construction and Building Materials*, **46**: 71–78.
- Huntzinger, D.N. and Eatmon, T.D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, **17**: 668–675
- Hwang, K.R., Noguchi, T. and Tomosawa, F. (1998). Effects of fine aggregate replacement on the rheology, compressive strength and carbonation properties of fly ash and mortar. *American Concrete Institute Special Publication*, **178**: 401–410.
- Izquierdo, M. and Querol, X. (2012). Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology*, **94**: 54–66.

- Jayaranjan, M.L.D., Hullebusch, E. and Annachhatre, A. (2014). Reuse Options for Coal Fired Power Plant Bottom Ash and Fly Ash. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **13**: 467-486.
- Jiang, L. and Guan, Y. (1999). Pore structure and its effect on strength of high-volume fly ash paste. *Cement and Concrete Research*, **29**: 631–633.
- Keleştemur, O., Arıcı, E., Yıldız, S. ve Gökçer, B. (2014). Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, **60**: 17-24.
- Kockal, N.U. (2013). Effects of Elevated Temperature and Re-Curing on the Properties of Mortars Containing Industrial Waste Materials. *Iranian Journal of Science and Technology*, **37**: 67.
- Kumar, B., Tike, G.K. and Nanda, P.K. (2007). Evaluation of properties of high-volume fly ash concrete for pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **19**: 906–911.
- MacLaren, D.C. and White M.A. (2003). Cement: Its Chemistry and Properties. *Journal of Chemical Education*, **80**: 623-635.
- Malhotra, V.M. (1990). Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM class F) fly ash. *Cement and Concrete Composites*, **12**: 271– 277.
- Malpani, R., Jegarkal, S.C., Shepur, R., Kiran, R. and Adi, V.K. (2014). Effect of Marble Sludge Powder and Quarry Rock Dust as Partial Replacement for Fine Aggregates on Properties of Concrete. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, **4**: 39-42.
- Mangaraj, B.K. and Krishnamoorthy, S. (1994). Use of pond fly ash as part replacement for mortar and concrete. *Indian Concrete Journal*, **1994(May)**: 279–82.
- Maslehuddin, M. (1989). Effect of sand replacement on the early – age strength gain and long – term corrosion – resisting characteristics of fly ash concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, **86**: 58–62.
- Matsufuji, Y., Koyama, T., Funamoto, K. and Ito, K. (2001). Mix Proportion Principle of Concrete Containing Large Quantity of Coal Ash with Constant Cement Content. *Concrete Research And Technology*, **12**: 51-60.

- Namagga, C. and Atadero, R.A. (2009). Optimization of Fly Ash in Concrete: High Lime Fly Ash as A Replacement for Cement and Filler Material. 2009 World of Coal Ash (WOCA) Conference, May 4-7, Lexington, KY, USA.
- Omar, O.M., Abd Elhameed, G.D., Sherif, M.A. and Mohamadien, H.A. (2012). Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. *HBRC Journal*, **8**: 193–203.
- Pofale, A.D. and Deo, S.V. (2010). Comparative Long Study of Concrete Mix Design Procedure for Fine Aggregate Replacement with Fly Ash by Minimum Voids Method and Maximum Density Method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **14**: 759-764.
- Poon, C.S., Lam, L. and Wong, Y.L. (2000). A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. *Cement Concrete Research*, **30**: 447–455.
- Rai, B., Khan, N.H., Abhishek K, Tabin R.S. and Duggal S.K. (2011). Influence of Marble powder/granules in Concrete mix. *International Journal of Structural and Civil Engineering*, **1**: 827–834.
- Ramme, B. and Tharaniyil, M.P. (2004). Coal Combustion Products Utilization Handbook. We Energies Publication, 3rd Edition, USA.
- Rana, A., Kalla, P. and Csetenyi, L.J. (2015). Sustainable use of marble slurry in concrete. *Journal of Cleaner Production*, **94**: 304-311.
- Rebeiz, K.S., Serhal, S.P. and Craft, A.P. (2004). Properties of Polymer Concrete Using Fly Ash. *Journal of Materials Engineering*, **16**: 15-19.
- Robl, T., Oberlink, A. and Jones, R. (2017). Coal Combustion Products (CCP's) Characteristics, Utilization and Beneficiation. Woodhead Publishing, Duxford, United Kingdom.
- Rodrigues, R., Brito, J. and Sardinha, M. (2015). Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. *Construction and Building Materials*, **77**: 349-356.
- Salas D.A., Ramirez A.D., Rodríguez C.R., Petroche D.M., Boero A.J. and Duque-Rivera J. (2016). Environmental Impacts, Life Cycle Assessment and Potential Improvement Measures for Cement Production: A Literature Review. *Journal of Cleaner Production*, **113**: 114-122.

- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M. and Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*, **41**: 642–650.
- Shah, U.N. and Modhera, C.D. (2014). Process fly ash effect on harden properties of self compacting concrete. *International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications*, **14**: 145–148.
- Shi, C. and Qian, J. (2001). Activated blended cement containing high volume coal fly ash. *Advances in Cement Research*, **13**: 157-163.
- Siddique, R. (2003). Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, **33**: 539–547.
- Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, **34**: 487–493.
- Silva, D., Gameiro, F. and Brito, J. (2013). Mechanical properties of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by the marble quarrying industry. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**: 04014008
- Sounthararajan, V.M. and Sivakumar, A. (2013). Effect of the lime content in marble powder for producing high strength concrete. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, **8**: 260-264.
- Stafford, F.N., Raupp-Pereira, F., Labrincha, A. and Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, **137**: 1293-1299.
- Supit, W.M., Shaikh, U.A., and Sarker, P. (2014). Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, **51**: 278–286.
- Talah, A., Kharchi, F. and Chaid, R. (2015). Influence of Marble Powder on High Performance Concrete Behavior. *Procedia Engineering*, **114**: 685–690.
- Telschow, S., Frandsen, F., Theisen, K. and Dam-Johansen, K. (2012). Cement Formation—A Success Story in a Black Box: High Temperature Phase Formation of Portland Cement Clinker. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **51**: 10983–11004.
- Tennich M., Kallel A. and Ouezdou M.B. (2015). Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. *Construction Building Material*, **91**: 65–70.

- Thomas, M., Jewell, R. and Jones, R. (2017). Coal fly ash as a pozzolan. *Coal Combustion Products (CCP's)*, **1**: 121–154.
- TS EN 196-1, 2016. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2012. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450-1, 2013. Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-4, 2000. Tabii taş kagir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2, 2002. Kimyasal Katkılar - Beton, harç ve şerbet için, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tsakiridis, P.E., Papadimitriou, G.D., Tsvivilis, S. and Koroneos, C. (2008). Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials*, **152**: 805–811.
- Ulubeyli, G.C. ve Artir, R. (2015). Properties of Hardened Concrete Produced by Waste Marble Powder. *Social and Behavioral Sciences*, **195**: 2181 – 2190.
- Ünal, O. ve Uygunoğlu T. (2003). Atık MT Katkılı Betonların Donma-çözülme Etkisinde Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu MERSEM Bildiriler Kitabı, Afyonkarahisar, 18-19 Aralık, 147-157.
- Vijayalakshmi, M. and Sekar, A.S.S. (2013). Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*, **46**: 1-7.
- Wu, Z.S., Yuan, H., Yoshizawa, H. and Kanakubo, T. (2001). Experimental/analytical study on interfacial fracture energy and fracture propagation along FRP-concrete interface. *American Concrete Institute*, **201**; 133–152.
- Wu, J., Pu, X.C., Liu, F. and Wang, C. (2006). High performance concrete with high volume fly ash. *Key Engineering Materials*, **303**: 470–478.
- Yoon, S.M., Paulo J.M., Macphee, D.E., Glasser, F.P. and Imbabi, M.S. (2014). Statistical evaluation of the mechanical properties of high-volume class F fly ash concretes. *Construction and Building Materials*, **54**: 432–442.

İnternet kaynakları

1. <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/62FEA62DEC7C4A2C89AA8471BE110D2C.pdf> Erişim tarihi: 25.09.2018



ÖZGEÇMİŞ

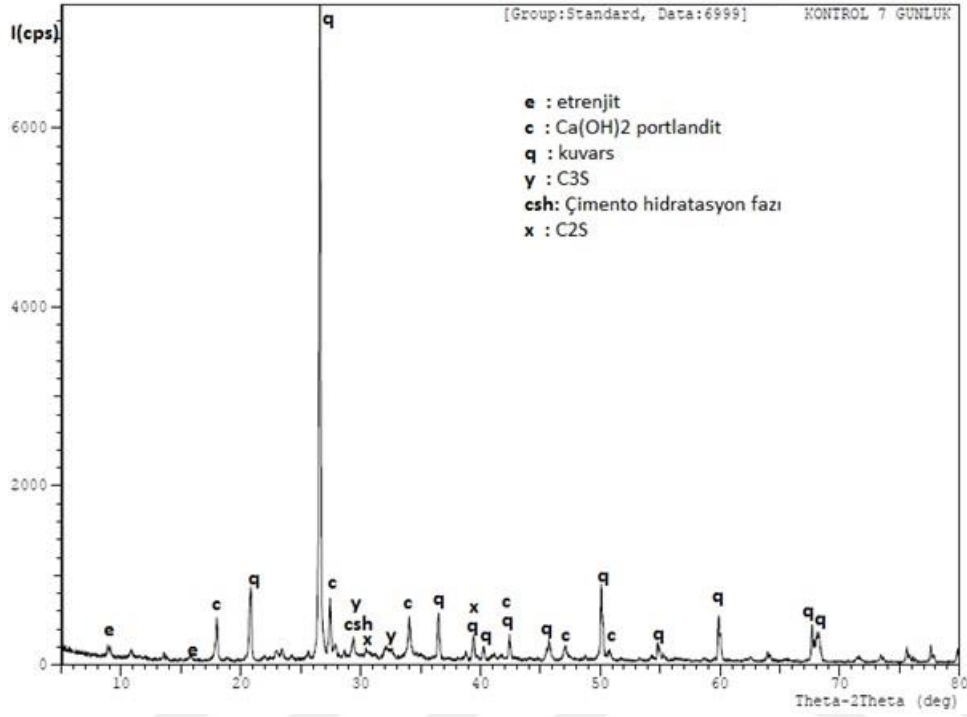
Adı Soyadı : Cüneyt DOĞAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar / 06.05.1990
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0553 190 62 70 / cuneytdogan11@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

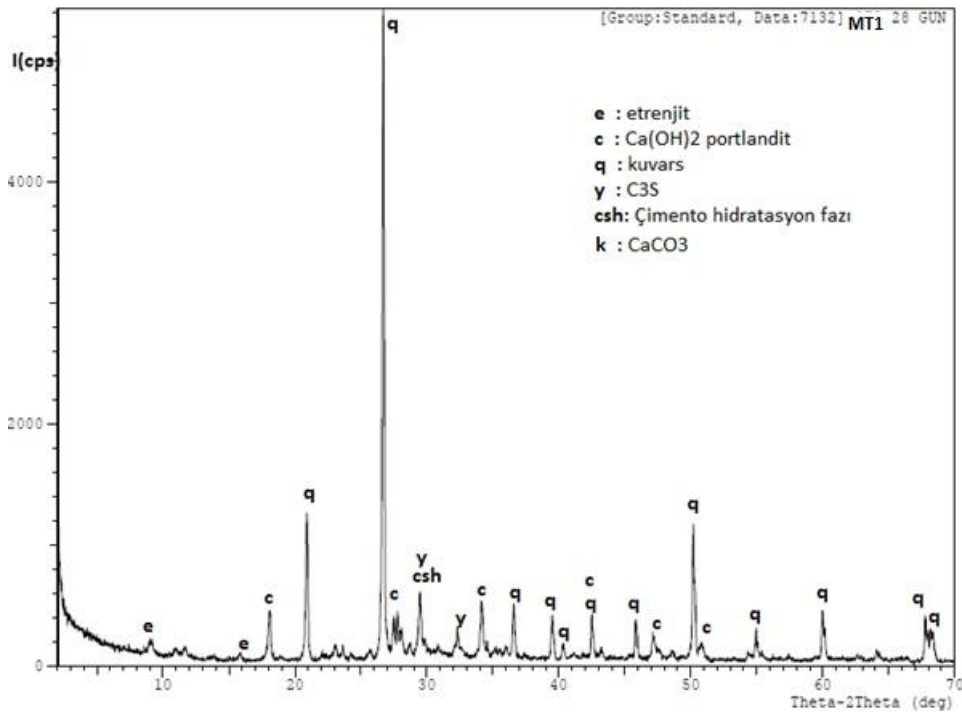
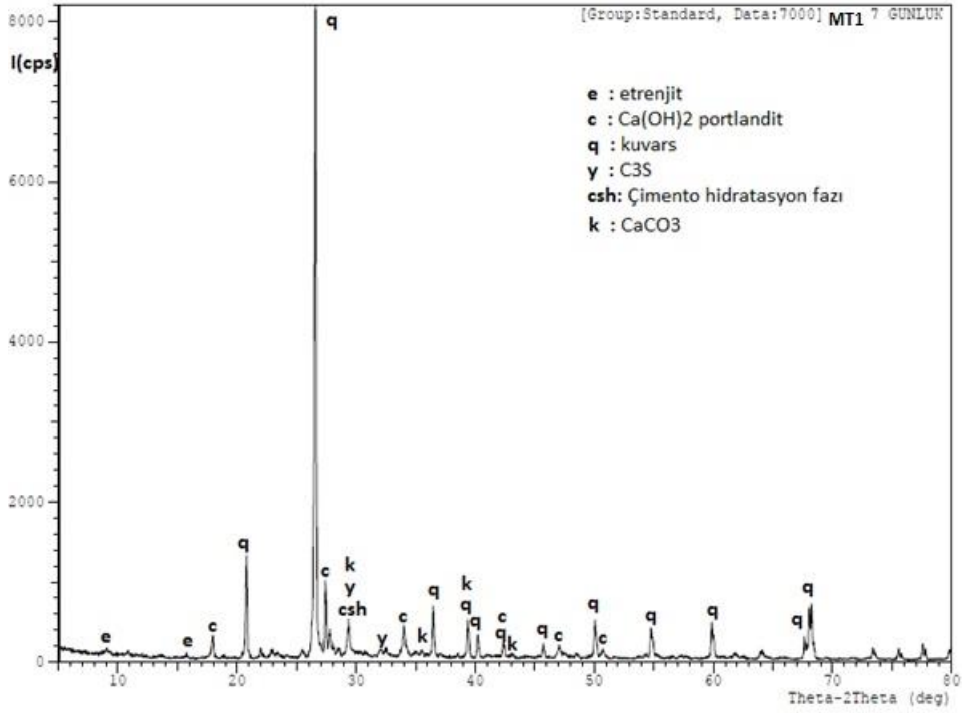
Lise : Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi (2004 – 2008)
Lisans : Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği (2008 – 2015)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı (2016 – 2019)

EKLER

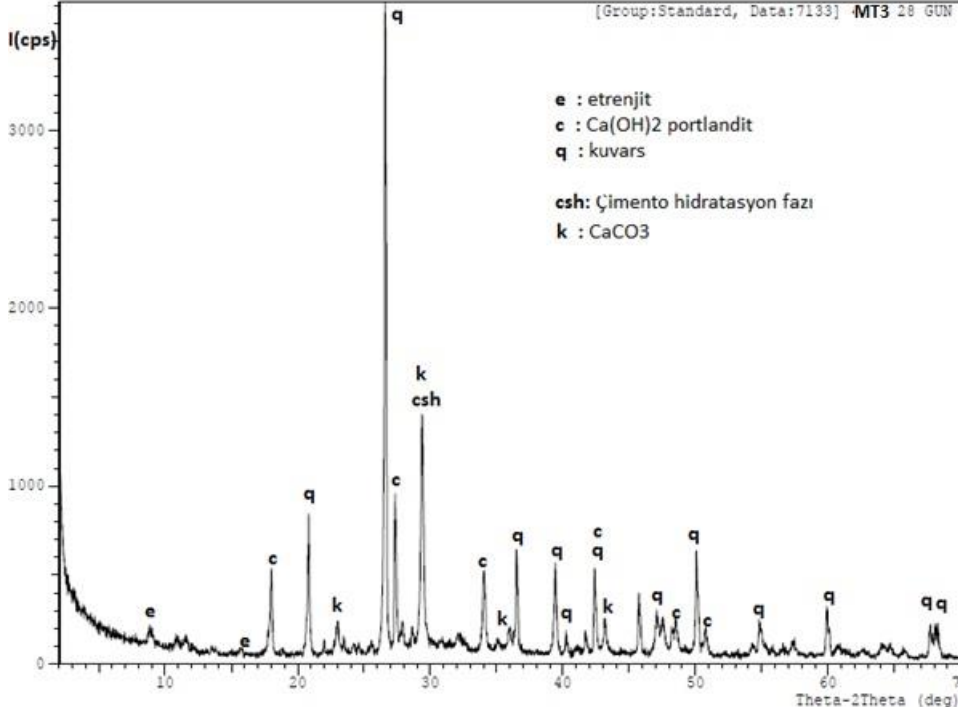
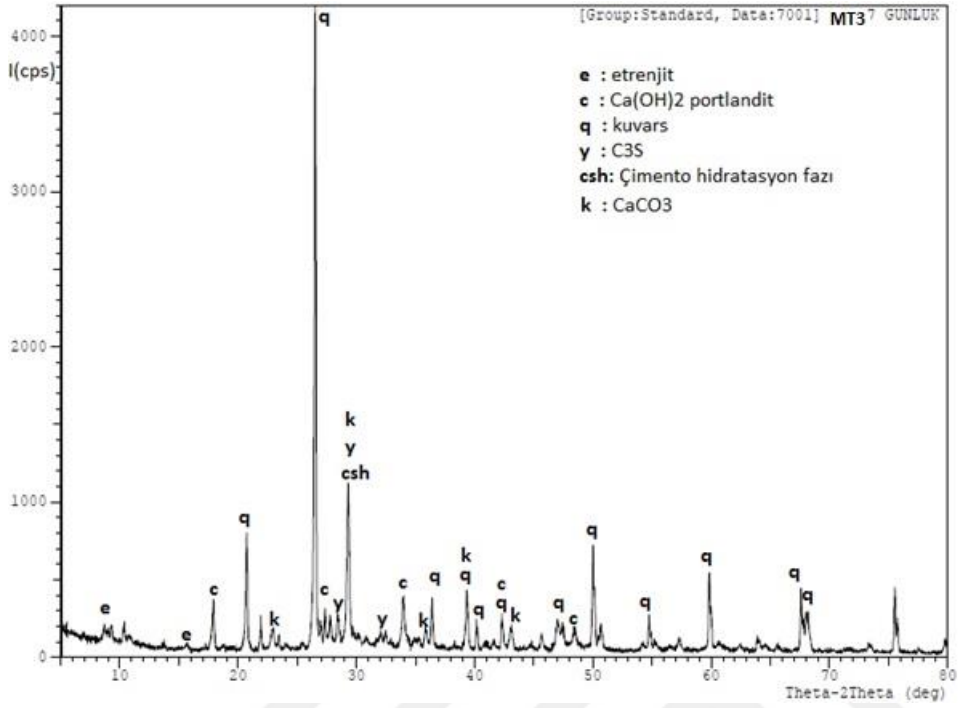
EK 1. Referans Numunesinin 7 ve 28 günlük XRD Analizi



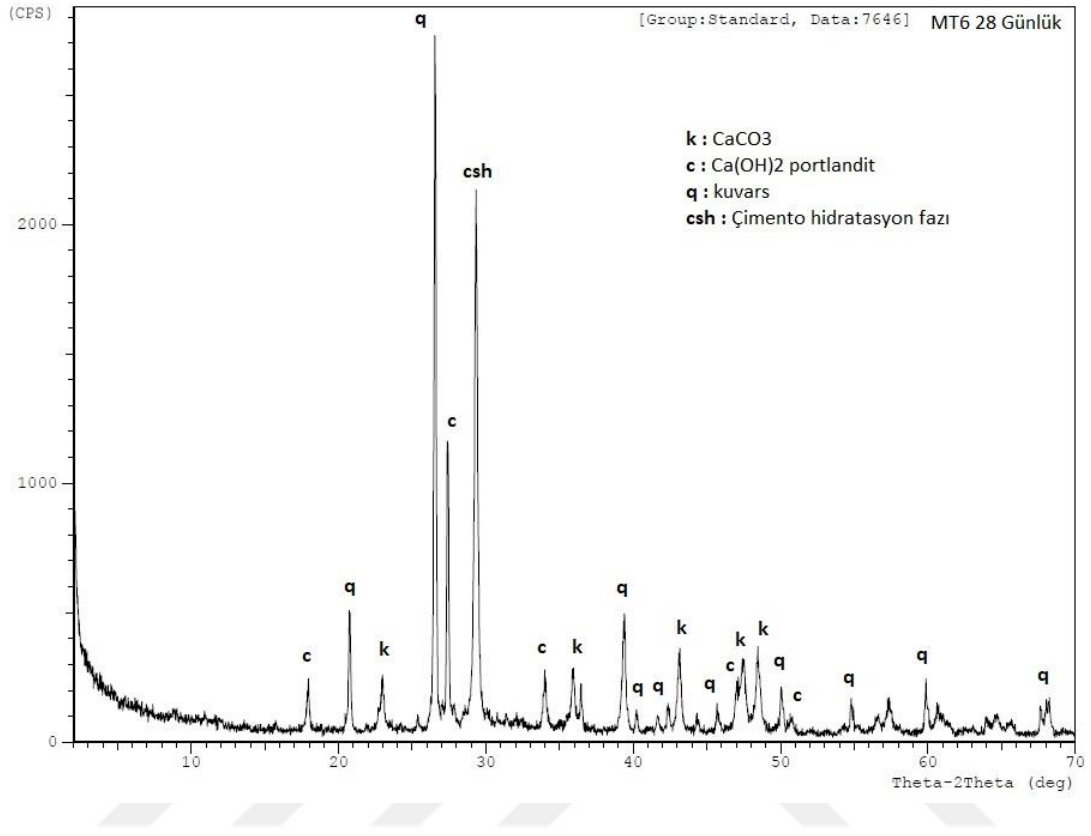
EK 2. MT40 Numunesinin 7 ve 28 Günlük XRD Analizi



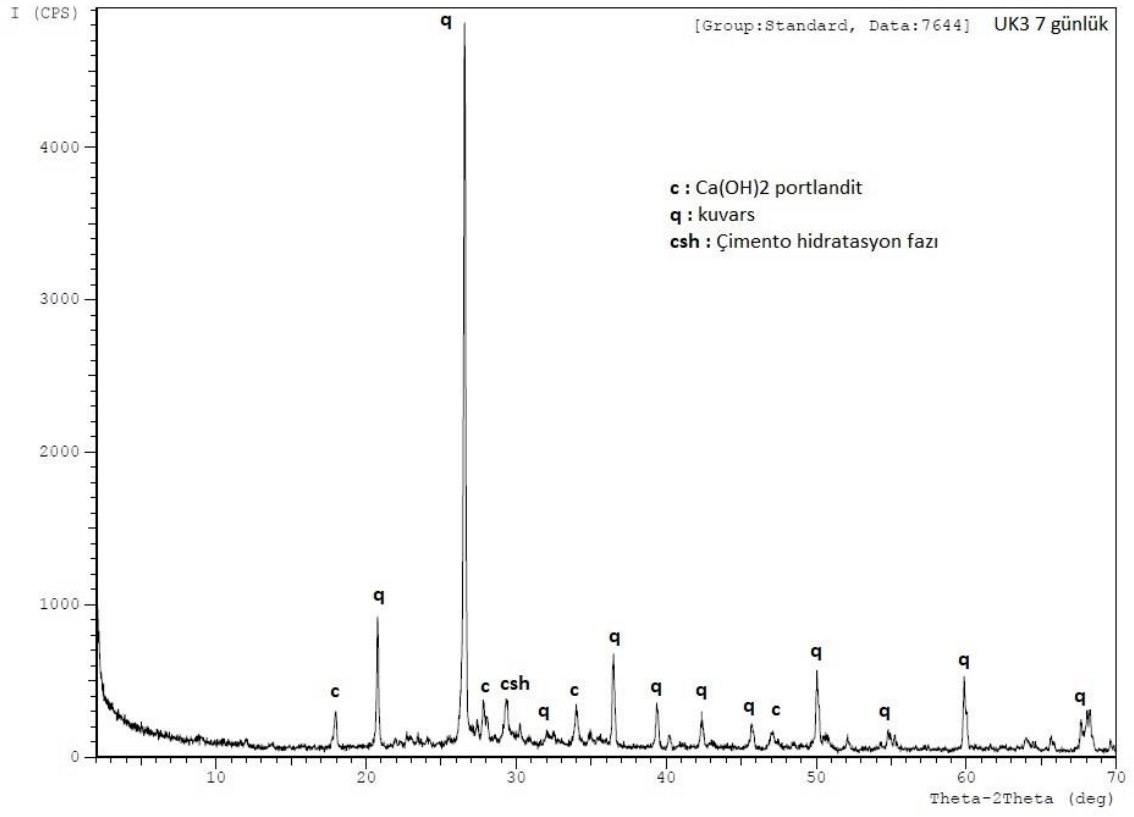
EK 3. MT20 Numunesinin 7 ve 28 Günlük XRD Analizi



EK 4. MT50 Numunesinin 28 Günlük XRD Analizi



EK 5. UK20 Numunesinin 7 Günlük XRD Analizi



EK 6. MU10 Numunesinin 28 Günlük XRD Analizi

