

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALKALİ VE ÇİMENTO İLE BİRLİKTE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ
UÇUCU KÜL GEOPOLİMER HARCININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİ**

**Hazırlayan
OMEED ADWAL ALİ ALİ**

**Danışman
Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ**

Yüksek Lisans Tezi

**Aralık 2016
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALKALİ VE ÇİMENTO İLE BİRLİKTE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ
UÇUCU KÜL GEOPOLİMER HARCININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
OMEED ADWAL ALİ ALİ**

**Danışman
Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
FTY-2016-6656 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**ARALIK 2016
KAYSERİ**

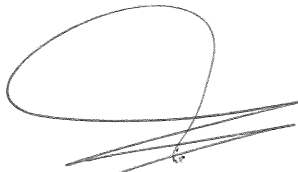
Bu çalışmada tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



Omeed ADWAL ALİ ALİ

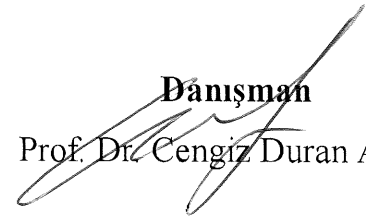
YÖNERGEYE UYGUNLUK

Alkali ve Çimento ile Birlikte Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Harcının Mekanik Özellikleri Araştırılması adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Tezi Hazırlayan

OMEED ADWAL ALI ALI



Danışman

Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ



İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Fatih ALTUN

İmza

Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ danışmanlığında **Omeed Adwal Ali ALİ** tarafından hazırlanan “Alkali ve Çimento İle Birlikte Aktifleşmiş Uçucu Kül Geopolymer Harcının Mekanik Özellikleri” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

02.12.2016

JÜRİ:

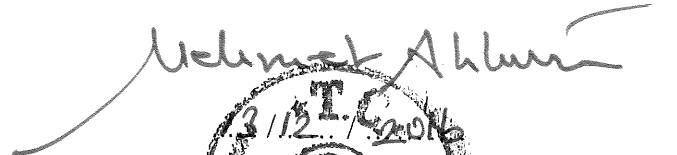
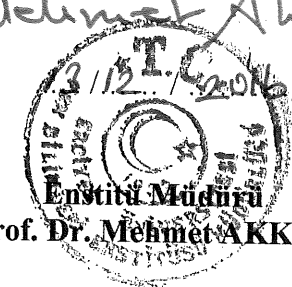
Başkan : Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

Üye DOÇ.DR. Burak UZAL - ABDULLAH GÜL ÜNİV

Üye DOÇ. DR. Okan KARAHAN

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 13/12/2016 tarih ve 2016/54006 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Mehmet AKKURT

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Tez konumun seçiminde, çalışmalarım sırasında bana her türlü yardımda bulunan, ve bilimsel katkıyla beni Aydınlatan hocam Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ ' e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel Tez çalışmalarımı ve laboratuvar cihazların kullanım süresince her türlü desteğini ve ilgisini, bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen Doç.Dr. Okan KARAHAN hocama ve Arş.Gör. Serhan İLKERTAPAR teşekkür ederim.

yüksek lisans eğitimim süresince bana emeği geçen Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan değerli hocalarıma derin saygılarımla teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FYL-2016-6656) teşekkür ederim.

Beni yetiştiren ve bu seviyeye gelmemde maddi ve manevi yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip büyük fedakârlıklarda bulunarak bana daima destek olan sevgili Rahmetli Babama, Anneme, aileme ve kardeşlerime teşekkürü bir borç bilirim.

ALKALİ VE ÇİMENTO İLE BİRLİKTE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ ÜÇUCU KÜL GEOPOLİMER HARCININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

OMEED ADWAL ALİ ALİ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2016

Danışman: Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

ÖZET

Bu çalışmada uçucu küllün alkali ve çimento ile birlikte aktivasyonun deneysel olarak incelenmiştir. Çimento ve alkali aktivasyonun harç karışımları üzerinde yürütülmüştür. Harç karışımlarında bağlayıcı kum oranı sırasıyla 1:3 olarak alınmıştır. Su bağlayıcı oranı ise sodyum hidroksit ile aktifleştirilen karışımlarda 0.33 sodyum meta silikat ile aktifleştirilen karışımlarda ise 0.47 olarak alınmıştır. Uçucu kül ve çimento kendi aralarında ikame edilerek sırasıyla 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 oranlarında harmanlanmıştır. karışımlar iki farklı kür durumunda kürelendirilmiştir. Birinci kür durumunda karışımlar, kalıp içinde ve kalıptan çıkarıldıktan sonra da sıcaklığı 20 °C olan ve bağıl nemi %60 olan laboratuvar ortamında deney gününe kadar gelişme bırakılmışlardır. İkinci kür durumunda ise karışımlar kalıplarıyla beraber 75 °C olan fırında 24 saat tutulduktan sonra kalıplarından çıkarılmış ve devamında yukarıda belirtilen laboratuvar ortamında deney gününe kadar gelişme bırakılmıştır. Üretilen numuneler kalıplanma başlangıcından itibaren 1, 3, 7, 28, 90 ve 180 gün olmak üzere deney zamanına kadar kür edilmiştir. Numuneler üzerinde taze haldeyken işlenebilirlik deneyi, katılaşmış haldeyken ise eğilme ve basınç deneyleri yürütülerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül ; Alkali aktivasyonu, Geopolimer, Dayanım

MECHANICAL PROPERTIES OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER MORTAR ACTIVATED BY ALKALI AND CEMENT SIMULTANEOUSLY

OMEED ADWAL ALİ ALİ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, December 2016

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

ABSTRACT

In this work, activation of fly ash together with cement and alkali was studied. Study was carried out on mortar mixtures. Binder - sand ratio of mortar mixture was taken as 1:3 for binder and sand respectively. Water - binder ratio was taken 0.33 for the mixture activated by sodium hydroxide, it was taken 0.47 for the mixture activated by sodium meta silicate. As the binder, fly ash and cement were replace each other and blended in 100/0,75/25, 50/50, 25/75, 0/100 rates. the mortar mixture prepared were cured at two different curing environments. First curing condition was only laboratory environment from the beginning of casting at 20 °C temperature with %50 relative humidity. Second curing condition was initially curing the specimens at 75 °C temperature for 24 hours later curing them in above mentioned laboratory environment until testing day. the specimens produced were cured from the beginning of casting specimens until the testing time at 1, 3, 7, 28, 90 and 180 day. Workability testing was carried out on fresh mortar mixtures, and flexural tensile testing and compressive strength testing were carried out on hardened mortar mixtures. the results were evaluated accordingly.

Keywords: Fly Ash, Alkali activation, Geopolymer, Strength

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	
GENEL BİLGİLER	4
2.1.1 Çimento ve Portland Çimento	4
2.1.2 Çimento Üretimi.....	7
2.1.3 Çimento Ana Bileşenleri.....	9
2.1.4 Çimento Tipleri ve Sınıfları	10
2.1. 5 Çimentonun Genel Özelliği	14
2.2. Beton Katkıları	17
2.2.1 Hava Katkı Maddeleri	17
2.2.2 Kimyasal Katkı Maddeleri	18
2.2.3 Mineral Katkı Maddeleri	19
2.2.4 Çeşitli Katkı maddeler	19
2.3. Uçucu Kül	20
2.3.1 Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özelliği	21
2.3.2 Termik Santralarda Uçucu Külün Toplaması	22
2.3.3 Uçucu Küllün Sınıflandırılması	23
2.3.4 Uçucu Küllün Pozolanik Özelliği	24
2.4.1 Geopolymer	26
2.4.2 Geopolymer Tarihçe	26
2.4.3 Uçucu Kül esaslı geopolymer	28
2.5 Önceki çalışmalar	29
2.5.1 Uçucu kül ile yapılmış önceki çalışmalar	29
2.5.2 Alkali ile Aktifleştirilmiş Harçların önceki çalışmaları	30

2.5.3	Geopolimer önceki çalışmalar.....	33
BÖLÜM 3		
YÖNTEMLER.....		35
3.1.	Malzemeler.....	35
3.1.1.	Çimento.....	35
3.1.2.	Uçucu Kül	35
3.1.3.	Su.....	37
3.1.4.	Standart Küm	38
3.1.5.	Aktivatörler	39
3.1.6.	Sodyum Hidroksit.....	39
3.1.7.	Sodyum meta silikat	40
3.2	Deneysel Çalışmalar	41
3.2.1.	Karışım Oranları.....	41
3.2.2	Numunelerin Hazırlanması	42
3.2.3.	Kür Yöntemi.....	44
3.3	Deneyler	46
3.3.1.	İşlenilebilirlik Tayini	45
3.3.2.	Dayanım Tayini.....	48
3.3.2.1.	Eğilme Dayanımın Tayini.....	49
3.3.2.2.	Basınç Dayanımın Tayini	51
BÖLÜM 4		
BULGULAR VE TARTIŞMA		53
4.1.	İşlenilebilirlik Deney Sonuçları	55
4.2.	Basınç Dayanımın Deney Sonuçları.....	55
4.2.1	Sodyum hidroksit içeren hazırlanan harçlar.....	55
4.2.2	Sodyum meta silikat içeren hazırlanan harçlar	57
4.3	Eğilme Dayanımın Deney Sonuçları	59
4.3.1	Sodyum hidroksit içeren hazırlanan harçlar.....	59
4.3.2	Sodyum hidroksit içeren hazırlanan harçlar.....	61
4.4	Kür durumları ve zamanının arasında karşılaştırma	63

BÖLÜM 5

5.1	SONUÇLAR	64
5.2	ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR.....		66
ÖZGEÇMİŞ.....		70

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Çimentonun ana bileşenleri	9
Tablo 2.2. Çimentonun ana bileşenleri özellikleri.....	9
Tablo 2.3. Çimento Tipleri.....	10
Tablo 2.4. Çimento sınıflarının özellikleri	15
Tablo 2.5. Çimento kimyasal özellikleri.....	16
Tablo 2.6. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonlarının sınırları	23
Tablo 2.7. TS EN 639 Uçucu küllün kimyasal özellikleri	25
Tablo 3.1. Çimento ve Uçucu küllün kimyasal kompozisyonu	36
Tablo 3.2. Çimentonun fiziksel özellikleri.....	37
Tablo 3.3. Uçucu küllün fiziksel özellikleri	37
Tablo 3.4. İnce agreganın granulometresi ve standart sınır değerleri	38
Tablo 3.5. Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu	39
Tablo 3.6. Sodyum meta silikatın kimyasal kompozisyonu	40
Tablo 3.7.a Sodyum hidroksitin harç karışım oranları	41
Tablo 3.7.b Sodyum meta silikatın harç karışım oranları	42
Tablo 4.1.a Sodyum hidroksit içeren karışımların işlenilebilirlik sonuçları.....	53
Tablo 4.1.b Sodyum meta silikatın içeren karışımların işlenilebilirlik sonuçları.....	54
Tablo 4.2. Sodyum hidroksit içeren oda sıcaklığında kür edilen numuneler sonuçları .	55
Tablo 4.3. Sodyum hidroksit içeren sıcak kür edilen numuneler sonuçları	56
Tablo 4.4. Sodyum meta silikat içeren oda sıcaklığında kür edilen numuneler sonuçları	57
Tablo 4.5 Sodyum meta silikat içeren sıcak kür edilen numuneler sonuçları.....	58
Tablo 4.6 Sodyum hidroksit içeren oda sıcaklığında kür edilen numuneler sonuçları ..	59
Tablo 4.7. Sodyum hidroksit içeren sıcak kür edilen numuneler sonuçları	60
Tablo 4.8 Sodyum meta silikat içeren oda sıcaklığında kür edilen numuneler sonuçları	61
Tablo 4.9. Sodyum meta silikat içeren sıcak kür edilen numuneler sonuçları.....	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Eski beton karma yöntemi	4
Şekil 2.2. .Portland çimento üretimin işlemleri	7
Şekil 2.3. .Çimento çeşitleri	16
Şekil 2.4. Uçucu kül.....	20
Şekil 2.5. Uçucu küllünün tane çeşitleri.....	25
Şekil 3.1. TS EN 196 - 1 kullanılan standart kum.	38
Şekil 3.2. Hobart mikserinin görünümü.	43
Şekil 3.3 Kür için hazırlanan numunelerin görünümü.	44
Şekil 3.4. Kullanılan kalıp, kalıp yağı ve numunelerin görünümü.	45
Şekil 3.5. Yayılma tablasında taze harcın kıvam tayini	47
Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan çimento presi.	48
Şekil 3.7. Prizma numunelerin eğilme deneyi	50
Şekil 3.8. Prizma numunelerin basınç deneyi	52

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Geopolimer beton yapı teknolojisinde çevre dostu ve yenilikçi bir ürün olarak bilinmektedir, ayrıca Portland çimentolu betonlara karşı da bir alternatiftir. Geopolimer, çimentonun kullanılması sonucu ortaya çıkan yüksek oranda CO₂ salınım oranında düşüş sağlamaktadır.

Geopolimer ismi 1978 yılında Fransız malzeme bilimcisi Joseph Davidovits tarafından inorganik moleküllerin oluşturduğu polimerik yapılara verilmiştir. Geopolimer bağlayıcı genellikle uçucu kül, yüksek fırın cüruf, gibi atık malzemelerden oluşmaktadır. Uçucu küller termik santrallerden, yüksek fırın cürufu ise demir çelik tesislerinde ortaya çıkmaktadır. Uçucu küller ve cüruf uygun teknoloji ile proses edilerek yada hiç işlem yapılmadan beton içinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Böylece çelik üretim fabrikalarının ve termik santrallerin atık stokları düzenlenmiş olurken, Portland çimentosu elde etmek için ortaya çıkan yüksek miktarda CO₂ salınmada azalmaktadır. Geopolimer oluşturacak kaynakların içinde genellikle doğal malzemeler olan silikon ve alüminyum bulunmaktadır. Bu malzemeler alkali kullanılarak aktive edilmekte ve moleküler arası bağları güçlendirilerek polimerleştirilmektedir. Bu yolla elde edilen bağlayıcılara genellikle alkali aktivasyonlu veya inorganik polimer bağlayıcı adı verilmiştir.

Portland çimentosu kalker ve kil karışımı hammaddelerinin pişirilmeleri ile ortaya çıkan, klinker olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen, ve daha sonra su ile birleştğinde bağlayıcı özellik kazanan bir malzemedir. 1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentine yakın Portland isimli küçük bir adadan getirilen taşı, Joseph Aspdin isimli bir duvar ustası kalker ve kil karışımı ile pişirerek çimentoyu üretmiştir. Bugün tüm dünyada bu çimentoya Portland çimentosu denmektedir [1].

Dünya nüfusun artması, teknolojinin ilerlemesi ile birlikte günden güne enerji ihtiyacı artmaktadır. Bu enerji ihtiyacını karşılayabilmek için özellikle yüksek veya düşük kalorili kömürlerden önemli ölçüde yararlanılmaktadır. Bu amaçla dünyada ve Türkiye'de kömür yakan birçok termik santral bulunmaktadır[2].

Termik santrallerde elektrik üretimi sırasında kömürün yanması sonucu baca çıkışlarında elektro filtrenin yardımıyla tutulan çok ince tanecikler oluşmaktadır. Atık malzeme olarak ortaya çıkan sıcaklık etkisiyle uçabilen ve çok ince taneli olan ve yapay puzolan sınıfındaki bu küllere Uçucu kül (UK) denir[3].

Uçucu kül, koyu gri renkte ince bir malzemedir Renginin koyuluğu açıklığı elde edildiği kömür ve yanış özelliğine bağlıdır, içindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça siyaha yakın koyu bir renk almaktadır. İyi yanma sonucu oluşan uçucu küller diğerlerine göre daha açık renktedir[4].

Uçucu külün inceliği öncelikle kazana verilen kömürün öğütülme derecesine bağlıdır, İnceliğe etki eden ikinci faktör küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına mani olunarak tutulmasıdır ve bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar.

Boyutları genellikle 0.5 ile 200 mikron arasında değişen camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır, özgül yüzeyleri $1800 - 5000 \text{ cm}^2 / \text{gr}$ arasında değişmekle birlikte, ortalama $2800 - 3800 \text{ cm}^2 / \text{gr}$ dolayındadır. Uçucu küllerin mutlak yoğunluğu $2.2 - 2.7 \text{ gr} / \text{cm}^3$ arasındadır [7,8]. Kimyasal özellikleri incelendiğinde ise uçucu külde bulunan başlıca bileşenler oksitler, SiO_2 , AL_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO ve SO_3 gibi oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden; SiO_2 (%25- 60), AL_2O_3 (%10 - 30), Fe_2O_3 (%1 - 15), CaO (% 1 - 40) oranında bulunmaktadır [9,10].

Uçucu küllün kimyasal ana bileşenleri çimentonun ana bileşenlerine benzer olduğu için uçucu küller çimento ile kısmi olarak yer değiştirme ile kullanılabilir. Ayrıca Geopolimer üretiminde alkali ile aktifleştirilerek kullanılmaktadır.

Doğayı kirleten endüstriyel atıkların beton üretiminde kullanılmak üzere değerlendirilmesi, günümüzde yapılan çalışmaların çoğunluğunu teşkil etmektedir ve bu eğilim gün geçtikçe artmaktadır [5].

Demir, çelik ve krom gibi bazı metallerin üretimlerinde elde edilmek istenen esas ürünün yanı sıra amacın dışında fazla miktarda yan ürünler ortaya çıkmaktadır. Atıl durumdaki bu ürünlerin depolanması, atılması veya yok edilmesi büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bu atıl ürünlerin çeşitli sektörlerde ve özellikle inşaat sektöründe çimento

katkı maddesi ve agrega olarak kullanılabilirliği üzerine çeşitli araştırmalar yapılmış ve halen yapılmaya devam etmektedir [2]. Atıkların en verimli şekilde ekonomiye tekrar kazandırılması ve miktarlarının azaltılması hem ekonomik hem de çevre sorunları açısından oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasında Sugözü uçucu külü alkali ve çimento ile birlikte aktifleştirerek uçucu kül esaslı Geopolimer harç tipi elde edilip, basınç ve çekme dayanımını özelliğini incelemek üzere çalışma yapmıştır. Çalışmanın amacı Çimentonun da alkali ile birlikte uçucu külü aktifleştirmede kullanıldığında mekanik özellikler üzerinde ortaya çıkacak etkiyi belirlemektir.

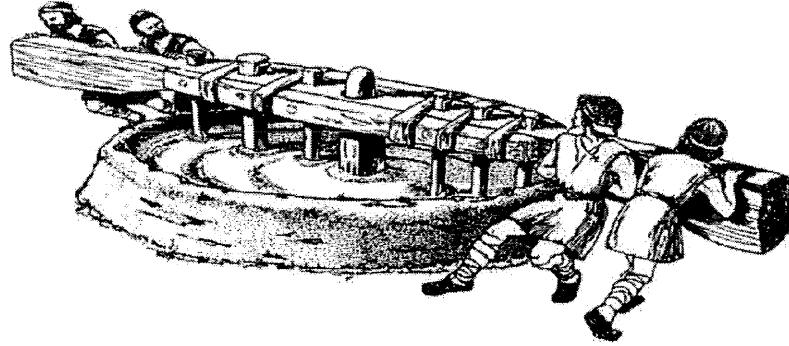
Çalışmada uçucu kül farklı oranlarda çimento ile ikame edilerek iki tip alkali ile aktifleştirilmiştir. Elde edilen karışımlar üzerinde işlenebilirlik, basınç ve eğilme dayanımı ölçölmüştür. Alkali ile birlikte kullanılan çimentonun dayanım özelliklerini nasıl etkilendiği belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1.1 Çimento ve Portland çimentosu

Çimento kelimesi yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince "caementum" kelimesinden türemiştir.



Şekil 1.1 Eski beton karması yöntemi

Duvar bloklarını birleştirmekte kullanılan ilk bağlayıcı malzemeler olarak alçı ve kireçten söz edilir. Eski Mısır piramitlerinde hangisinin daha fazla kullanıldığı zaman tartışma konusu olmuştur. Alçı taşının 190 - 200°C da pişirilmesi ile adi alçı elde edilirken hava kirecinin kalkerden daha yüksek (900°C) sıcaklıklarda elde edilişi belki de alçının daha önceleri kullanıma girdiğini kanıtlar. Her iki bağlayıcının da suya karşı dirençsiz oluşu ve hava kirecinin su içinde sertleşememesi kullanımlarını ve dayanıklılıklarını kısıtlayan faktörlerdir.

Eski Romalılar hava kirecini Vezüv yanardağı eteklerindeki Pozzuoli kasabası civarındaki volkanik tüflerle birlikte ince öğüterek daha yüksek dayanımlı ve suya karşı dirençli bir bağlayıcı elde etmişlerdir. Benzer malzeme Santorin adasındaki tüfleri kullanarak Eski Yunanlılar, pişmiş tuğla ve kiremit tozlarını kullanarak Orta Doğu uygarlıkları tarafından da geliştirildi. Kendi başlarına bağlayıcı olmasalar da kireçle

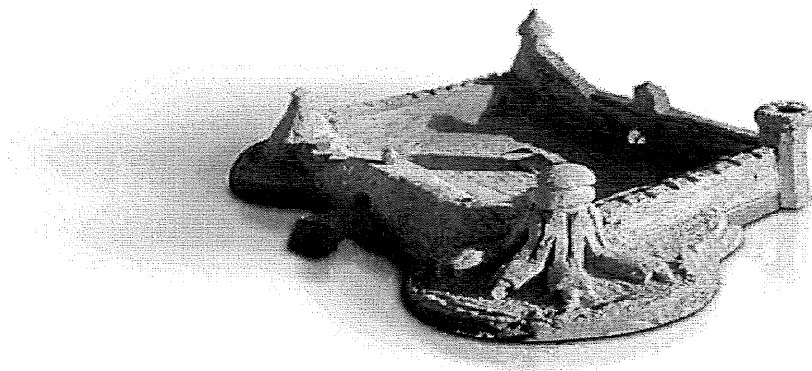
birleştiklerinde suda sertleşebilen ve suya dirençli yani “hidrolik” bir bağlayıcı oluşturan bu tür malzemelere de “puzolan” (Pozzuoli’den gelen anlamında) olarak anılmıştır. Eski çağlarda kireç, puzolan karışımı bağlayıcılarla yapılan bir çok yapının günümüze kadar ayakta kaldığı bilinmektedir.

Orta çağlarda bağlayıcı malzeme teknolojisi fazla gelişme göstermemiştir. Volkanik tüfler her yerde bulunmamaktaydı. Bu arada kalker yerine killi kalker 1000 °C da pişirerek hava kireci yerine hidrolik özelliğe sahip su kireci elde edilmeye başlanmıştır.

1750 yılında Cornwall, İngiltere’de Eddystone deniz feneri binasının yapımını üstlenen John Smeaton ile çeşitli kalker, kil ve alçı bileşimleri kullanarak elde ettiği su kireçlerinin deniz suyuna karşı dirençlerini puzolan da katarak inceledikten sonra en uygun ham maddeleri belirleyip, su kirecinin özelliklerini geliştirmiştir. Bu tür çalışmalar Fransa’da Louis Vicat tarafından devam ettirilmiştir. 1812 yıllarında, Killi kalkerlerin 1200 °C sıcaklığa kadar pişirilmesi ile daha yüksek dayanımlı bir su kirecinin elde edilmesi ve mineral katkılarla priz sürelerinin ayarlanması mümkün olmuştur. Tabii (doğal) çimento olarak da anılan bu bağlayıcı malzeme çeşitli ülkelerde uzun süre, Portland çimentosu üretimi başladıktan sonra da, kullanım bulmuştur[7].

Portland çimentosunun 1824 yılında İngiltere’de bir duvarcı ustası olan Joseph Aspdin tarafından keşfedildiği kabul edilir. Aspdin doğal killi kalkerler yerine 3 kısım kalker ve 1 kısım kili uygun bir bileşim elde etmek üzere karıştırıp yüksek sıcaklıkta pişirerek üstün dayanım ve dayanıklılığa sahip yetişmesi gri renkte bir çimento elde etti. Rengi güney İngiltere’de Portland yarımadasındaki killi kalkerleri andırdığından çimentoyu Portland Çimentosu ismi ve 5022 sayılı patent ile tescil ettirmiştir. Ancak benzer ve daha gelişmiş çimentolar 19.yüzyıl içerisinde diğer ülkelerde de üretilmeye başlandı. Temelde ham madde ve üretim prensipleri aynı olan bütün bu çimentolar da Portland türü çimentolar olarak anıldılar. Bu gün dünyada kullanılan hidrolik çimentoların büyük çoğunluğu Portland tipi türündendir.

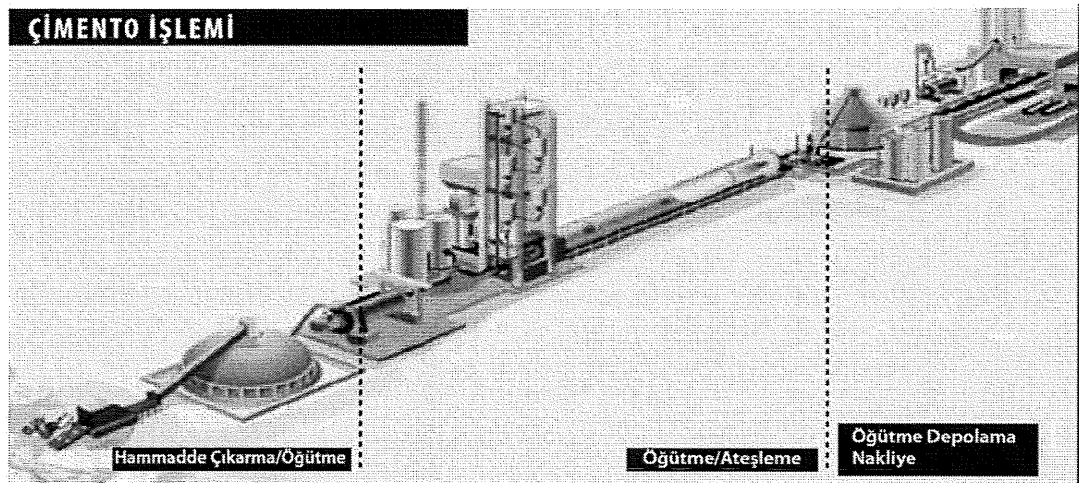
Günümüze kadar geçen süre içinde Portland çimentosu özellik ve üretim prosesleri gelişmiştir [7].



Aslında J. Aspdin tarafından üretilen çimento, üretim esnasında malzemelerin yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirtmediği ve öğütme işleminin çok iyi yapılmadığı için, bugün kullanılmakta olan Portland çimentosunun özelliklerine tamamen sahip olmamıştır. Kil ve kalker karışımli hammaddelerin yüksek sıcaklıklara kadar yeterince pişirilip öğütülmesi sonucu çimento elde edilebilmesi, ilk olarak 1845 yılında Isaac Johnson isimli bir İngiliz tarafından bulunmuştur.

1824 yılında Joseph Aspdin "Portland çimentosu" adı altında patent aldığı hidrolik bağlayıcısı daha sonraki yıllarda büyük gelişmeler göstermiş olmakla birlikte, "Portland" ismini aynen korumuştur ve Türkiye dahil bütün ülkeler de, bu ismi kullanılmaktadır[8]. Çimentolar hidrolik bağlayıcı maddeler olup, gerek kendi başına gerekse kum, çakıl, kırma taş gibi malzemelilerle birlikte su ile karıştırılıp, hamur haline getirildikten sonra hem havada hem de su içinde yavaş yavaş sertleşerek yapay taş haline dönüştürler. Çimentonun ana maddeleri kalker, kil, alçı taşı(%3 - %6 oranında), silisli kumdur. Bunların, belli oranda karıştırılıp öğütülmesiyle sin terleşene kadar döner fırında pişirilmesiyle elde edilen ürün "Çimento klinkeri" olarak bilinir. Portland çimentosu klinkeri oksitleri olarak ifade edilen CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ve az miktarda diğer maddeler içeren ham maddelerin kesin şekilde belirlenmiş (farin, pasta veya çamur) sin terleşmesi ile hazırlanır. Farin, pasta veya çamur çok ince öğütülmüş, hassas şekilde karıştırılmış, dolayısıyla homojen olmalıdır. Portland çimentosu klinkeri, kütlece $2/3$ oranında kalsiyum silikat bileşiklerini içermelidir, klinkerde CaO/SiO_2 oranı ≥ 2.0 olmalıdır. Ayrıca klinkerde MgO miktarı kütlece ≤ 5.0 olmalıdır. Fırından çıkan ve hava ile soğutulan koyu gri renkli çimento klinkeri, bu haliyle suya karşı hassas değildir ve su ile birleşerek sertleşmez. Klinker, ince öğütülmek suretiyle hidrolik özelliğini kazanır. Sade öğütülen klinker su ile hemen sertleşir ve işlenebilme imkanı yoktur. Bunu önlemek için klinkere % (3 - 6) oranında tabii alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) karıştırılarak öğütülür[9].

2.1.2 Çimento üretimi



Şekil 2.2 Portland çimento üretimin işlemleri

130 yıldan beri üretilmekte olan Portland çimentosunun günümüze kadar üretim teknolojisinde büyük değişimler olmuş, buna karşın bileşimi hemen hemen aynı kalmıştır. Son 50 yılda doğal ve yapay birçok puzolanik madde değişik oranlarda klinkere katılarak Portland çimentosuna göre farklı özellikler taşıyan çimentolar üretilmiştir.

Portland çimentosu esas olarak kili ve kalkerli maddelerin uygun oranlarda karıştırılması ve yaklaşık 1400 - 1500 °C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir. Klinker üretimi için gerekli olan başlıca hammaddeler kalsiyum oksit ve silisyum dioksitler. Ayrıca klinkerin erime sıcaklığını düşürmek için az miktarlarda alüminyum oksit ve demir oksit de ihtiyaç vardır. Bu kimyasal maddeleri içeren mineraller genellikle kalker ve kildir. Aynı amaçla bunların doğal karışımı olan "kalkerli marn" da kullanılabilir. Kalkerden klinker için gerekli olan kalsiyum oksit, kilden silisyum dioksit, alüminyum oksit, ve demir oksit gereksinimlerini karşılanır. Bazı durumlarda klinkerin silisyum dioksit ve demir dioksit ihtiyacı yeterli olmaz ve hammadde harmanına ayrıca örneğin kuvars kumu veya demir cevheri katılarak ayarlanır. Ancak elde edilecek klinkerin bileşimi dikkate alınarak hammaddeyi oluşturan harmanın kimyasal bileşimi çok hassas bir şekilde kontrol altında tutulur. Özellikle fırına giren hammadde karışımı içinde CaCO_3 miktarının %(75-79) arasında kalmasına özen gösterilir.

Döner fırından önce ham maddeler üzerinde yapılan işlemler yaş, yarı kuru (Lepol) ve kuru sistemler olarak uygulanabilir. Yaş sistemde ham maddeler sulu olarak karıştırılıp çamur değirmeninde öğütülürler. Yarı kuru sistemde ham madde karışımına %15 civarında su püskürtülerek granüller oluşturulur. Bugün fabrikalarımızın hemen tümünde ham maddelerin kurutularak işlem gördüğü kuru sistem uygulanmaktadır.

1- Modern çimento fabrikalarında farin enerji tasarrufu amacı ile fırına girmeden önce bir ön ısıtmaya tabi tutulur. Yükseklikleri 60 metreyi geçen ön ısıtma kulelerinde seri halindeki siklonlarda farin taneleri fırından gelen sıcak egzoz gazları içinde savrularak ısınırlar ve kısmen kalsın olurlar.

2- Bazı ön ısıtıcılarda kulenin altında ve döner fırından hemen önce bir ön kalsinasyon ünitesi bulunur. Son siklon aşamasından buraya sıcak hava ve yakıtla birlikte giren farin tanelerinde kalsinasyon, ham maddelerden CO₂'in ayrıştırılması, % 95'e varan ölçüde tamamlanabilir.

3- Döner fırın dünyada endüstri tesislerinde bulunan en büyük proses elemanı olarak kabul edilir. Çapı 3-7 m, uzunluğu 50-75 m kadar olup 50 mm kalınlığında çelik saçtan yapılmış, refrakter tuğla astarlı dev bir borudur. Yaklaşık %3-4 eğimli olarak monte edilen fırın dakikada 1.5-4 devir yaparak döner. Ön ısıtıcıdan gelen malzeme fırına yukarı uçtan girer ve fırınla beraber dönerek, yuvarlanarak, kayarak daha sıcak bölgelere, alt uçtaki aleve doğru ilerler. Bu arada geri kalan CO₂'de malzemeden ayrılır ve ilerde özetlenecek bir dizi kimyasal reaksiyon meydana gelmeye başlar.

4- Döner fırının alt ucunda toz kömür, doğal gaz, petrol gibi yakıtların yakılması ile oluşturulan alevin çıktığı boru bulunur. Alev borusundan çıkan beyaz kor halindeki alevin sıcaklığı 1870°C değerine –yani güneş yüzeyindeki sıcaklığın üçte birine– ulaşır. Bu en sıcak bölgede sıcaklığı 1480°C' e varan kalsine malzeme kısmen ergiyip sıvılaşmaya başlar, ince taneler birbirlerine yapışıp daha büyük boydaki klinker tanelerini oluştururlar. Fırının alt ucundan çıkan klinker üzerinde soğutma işlemi uygulanır.

2.1.3 Çimentonun ana bileşenleri

Tipik bir Portland çimentosu klinkerinde bileşimin % 90'ından fazlasını karma oksit formundaki dört ana bileşen oluşturur. Döner fırındaki reaksiyon ifadelerinden de görüleceği gibi bunlar:

Tablo 2.1 Çimentonun ana bileşenleri

kalsiyum alümina ferrit	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
kalsiyum tri alüminat	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
kalsiyum di silikat	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
kalsiyum tri silikat	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S

Bu dört ana bileşen gerek su ile reaksiyon hızları ve çıkardıkları ısı miktarları, gerekse çimentonun bağlayıcılık değerine katkıları yönlerinden birbirlerinden farklı karakter gösterirler[10].

Tablo 2.2 Çimentonun ana bileşenlerinin özellikleri

C_4AF	Su ile reaksiyonu fazla olmayıp bağlayıcılık değeri azdır.
C_3A	Su ile çok hızlı reaksiyona girip çok fazla ısı açığa çıkarır, çimento hamurunun çok çabuk katılaşmasına neden olur. Etkisini yavaşlatmak için klinker alçıtaşı ile öğütülür. Bağlayıcılık değeri azdır. Sülfatların yıpratıcı etkilerine karşı çimentonun direncini zayıflatır.
C_2S	Su ile reaksiyonu yavaştır, az miktarda ısı açığa çıkarır. Yüksek olan bağlayıcılık özelliği kendini ileri yaşlarda gösterir.
C_3S	Su ile reaksiyonu ve ortaya çıkan ısı orta değerlerdedir. Yüksek bağlayıcılık özelliği ilk yaşlardan itibaren etkilidir.

2.1.4 Çimentonun tipleri ve sınıfları.

Yeni genel çimentolar TS EN 197-1’de “CEM çimentosu” olarak adlandırılırlar. Ayrıca bir klinker standardı olmadığı için, klinkerde aranan özellikler de çimento standardının içine alınmıştır. İlgili tanımlamalar şöyle özetlenebilir: CEM çimentosu: hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidrasyon sonucu meydana gelen ve içindeki reaktif CaO ve reaktif SiO₂ toplamının kütlece en az %50 olması gereken çimentodur. Bileşimi Portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılardan oluşabilir. Portland Çimentosu Klinkeri Kalker ve kil gibi hammaddelerin CaO, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ gibi oksitlerini içeren, hassas bir orantı ile birleştirilip ince öğütülmüş karışımının (farinin) döner fırında 1400-1500 °C sıcaklıkta sinterlenmesi sonucu elde edilen yaklaşık 1 - 3 cm çapında granüle malzemedir. Kütlece en az 2/3 oranında kalsiyum silikat içermeli, CaO/SiO₂ oranısı 2,0’dan az olmamalıdır. Ayrıca, MgO içeriği en fazla %5 olarak sınırlanmaktadır[11].

TS EN 197 - 1 Çimento standardı kapsamında 27 farklı tipte genel çimento aşağıdaki Beş ana grupta sınıflandırılmış.

Tablo 2.3 Çimento tipleri.

CEM I	Portland Çimento
CEM II	Portland - Kompoze Çimento
CEM III	Cüruflu Çimento
CEM IV	Puzonlanlı Çimento
CEM V	Kompoze Çimento

➤ Portland çimentoları (CEM I)

Çimentolar içinde en yaygın olarak bilinen çimentodur günümüzde diğer çimentolara göre üretim maliyetinin yüksek olmasından dolayı çok az veya özel istek üzerine yapılmaktadır. Diğer çimento türlerinin bir çoğununu bileşimlerinde yer almaktadır.

Portland Çimentonun Kimyasal bileşimi yaklaşık olarak %65 CaO, %20 SiO₂, %6 AL₂O₃, %3 Fe₂O₃, %3 MgO ve %3 SO₄ tür. Çimentoda reaktif CaO ve reaktif SiO₂ toplamaları en az kütlece %50 olmalıdır. Bu çimentonun ana bileşeni en az %95 klinker ile elde edilen işareti CEM I olarak sınıflandırılan çimentolardır. Portland çimentosu kendi arasında dayanım sınıfı olarak PÇ (32.5 N, 32.5 R, 42.5 N, 42.5 R ve 52.5N, 52.5 R) sınıflandırılır[12].

➤ Portland cürufu çimento (CEM II / A-S)

Bu çimentonun ana bileşeni %80 - %94 klinker, % 6 - 20 Yüksek fırın cürufu ile elde edilen işareti CEM II / A-S olarak sınıflandırılan çimentodur. Yüksek fırın cürufu şu özelliklerde olmalıdır; kütlece en az 2/3 oranında olmalıdır. Ayrıca CaO + MgO / SiO oranı da > 1.0 olmalıdır[12].

➤ Portland cürufu çimento (CEM II / B-S)

Bu çimentonun ana bileşeni %65 - 79 klinker, % 21 - 35 yüksek fırın cürufu ile elde edilen işareti CEM II / B-S olarak sınıflandırılan çimentodur. Yüksek fırın cürufu şu özelliklerde olmalıdır; kütlece en az 2/3 oranında olmalıdır. Ayrıca CaO + MgO / SiO oranı da > 1.0 olmalıdır[12].

➤ Portland silika füme çimento (CEM II / A-D)

Bu çimentonun ana bileşeni %90 - 94 klinker, % 6 - 10 Silika Füme (amorf SiO₂ miktarı kütlece $\geq$ %85 olmalı saatlik yakma süresinde kızdırma kaybı $\leq$ %4 ve özgül yüzey alanı en az 15m²/g olmalı) elde edilen işareti CEM II / A-D olarak sınıflandırılan çimentodur[12].

➤ Portland kalkerli çimento (CEM II / A-L)

Bu çimentonun üretmesinde ana bileşeni %80 - 94 klinker, % 6 - 20 kalker ilave edilen çimentodur. çimento üretiminde kullanılan kalkerlerin CaCO_3 miktarı kütlece $\geq 75\%$, kil miktarı $\leq 1.20\text{g}/100\text{g}$ olmalı ve toplam organik karbon (TOC) miktarına göre kütlece $\leq 0.5\%$ olmalıdır[12].

➤ Portland kalkerli çimento (CEM II / B-L)

Bu çimentonun üretmesinde ana bileşeni % 65 - 79 klinker, % 21 - 35 kalker ilave edilen ve işareti CEM II/B - L olarak sınıflandırılan çimentodur. Çimento üretiminde kullanılan kalkerlerin CaCO_3 miktarı kütlece $\geq 75\%$, kil miktarı $\leq 1.20\text{g}/100\text{g}$ olmalı ve toplam organik karbon (TOC) miktarına göre kütlece $\leq 0.5\%$ olmalıdır[12].

➤ Portland kalkerli çimento (CEM II / A-LL)

Bu çimentonun üretmesinde ana bileşeni %80 - 94 klinker, % 6 - 20 kalker ilave edilen ve işareti CEM II/A - LL olarak sınıflandırılan çimentodur. Çimento üretiminde kullanılan kalkerlerin CaCO_3 miktarı kütlece $\geq 75\%$, kil miktarı $\leq 1.20\text{g}/100\text{g}$ olmalı ve toplam organik karbon (TOC) miktarına göre kütlece $\leq 0.20\%$ olmalıdır[12].

➤ Portland kalkerli çimento (CEM II / B - LL)

Bu çimentonun üretmesinde ana bileşeni % 65 - 79 klinker, % 21 - 35 kalker ilave edilen ve işareti CEM II/B - LL olarak sınıflandırılan çimentodur. Çimento üretiminde kullanılan kalkerlerin CaCO_3 miktarı kütlece $\geq 75\%$, kil miktarı $\leq 1.20\text{g}/100\text{g}$ olmalı ve toplam organik karbon (TOC) miktarına göre kütlece $\leq 0.20\%$ olmalıdır[12].

Portland kalkerli (CEM II/A-L,CEM II/B-L,CEM II/A-LL ve CEM II/B-LL) çimentolar 28 günlük basınç dayanımlarına göre, PÇ (32.5N, 32.5R, 42.5N, 42.5R, ve 52.5N, 52.5R) olarak 6 çeşide ayrılır[12].

➤ Portland kompoze çimento (CEM II / A-M)

Bu çimentonun üretmesinde ana bileşeni %80 - 94 klinkerdir, % 6 - 20 oranlarında yüksek fırın cüruf, silika füme doğal ve yapay puzolan, silisli uçucu kül, kalkerli uçucu kül pişmiş sist kalker ($OK \leq 0.20$) ve kalker ($OK \leq 0.50$) katkılarından herhangi birisinin ilave edilmesiyle üretilmektedir[12].

➤ Portland kompoze çimento (CEM II / B-M)

Bu çimentonun üretmesinde ana bileşeni %65 - 79 klinkerdir, % 21 - 35 oranlarında yüksek fırın cüruf, silika füme doğal ve yapay puzolan, silisli uçucu kül, kalkerli uçucu kül pişmiş sist kalker ($OK \leq 0.20$) ve kalker ($OK \leq 0.50$) katkılarından herhangi birisinin ilave edilmesiyle üretilmektedir.

Portland kompoze (CEM II/A-M, CEM II/B-M) çimentolar 28 günlük basınç dayanımlarına göre, (32.5N, 32.5R, 42.5N, 42.5R, ve 52.5N, 52.5R) olarak 6 çeşide ayrılır[12].

➤ Beyaz Portland çimento

Bu çimentonun ana bileşeni %100 klinkerdir ve TS 21'e göre belirlenen işareti BPÇ olarak sınıflandırılan çimentodur. beyaz portland çimentosu üretiminde kullanılan hammaddeler özel nitelikli olup ve portland çimentosundaki kadar kolay bulunmamaktadır. Ayrıca beyaz çimento üretimi için kullanılan pişirme derecesi, genelde biraz daha yüksektir. bundan dolayı maliyeti fazladır. Beyaz portland çimentosu, dekoratif amaçlı beton işleri trafikteki ışık yansımalarının daha iyi olabilmesi için beyaz renkli beton işlerinde, suni taş,sıva mozaik ve renk olarak mimari dekorasyonun gerektirdiği veya renk beton yapımında kullanılır[12].

2.1.5 Çimentonun genel özelliği.

Çimentonun kullanıldığı yere göre farklı özelliklerde olmaları istenir. örneğin, bir çimento normal bir bina için uygun olabilir, ancak bir deniz yapısı için uygun olmayabilir.

Çimentonun veya bir bağlayıcı maddenin mukavemet kazanması için şu üç olayın birbirini izlemesi gerekir,

- Hidratasyon olayı.
- Katılaşma olayı.
- Sertleşme olayı.

Çimentonun inceliği hidratasyon olayı sonunda yüksek dayanımlar elde edilmesi, çimento tanelerinin aktif olmalarına bağlıdır aktiflik çimentonun ince öğütülmesiyle gerçekleşir.

Çimentolarda boyutları 90 mikrondan büyük tanelerin oranının %14 den fazla olmaması istenir. Tanelerin boyutu ne kadar küçükse, çimentonun inceliği o oranda artıyor demektir. İnceliğin artması üretim masraflarını arttırdığı gibi çimento özelliklerine olumsuz etkiler de yapar. İncelik betonun dayanımını artırır, çimentoyu ıslatmak için fazla miktarda su gerekir ve taneler incelidikçe daha büyük ısı açığa çıkar. Çimento inceliği, granülomertri bileşimi ve özgül alan karakteristikleri ile belirlenir. Su kusmasını azalttığı gibi rötrenin ve çatlamalarına artmasına da neden olur.

Çimentonun mekanik ve fiziksel özellikler TS EN 197-1 çimentoları için öngörülen mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 2.4'de "karakteristik" değerler olarak gösterilmiştir. Ayrıca 1997'den önceki çimento standartlarında yer alan tane inceliği ve priz bitiş süreleri ile ilgili sınırlamalar kalkmış bulunmaktadır. İlaveten, 32.5 ve 42.5 dayanım sınıflarında 28 günlük dayanımlar için üst sınır belirtilmektedir.

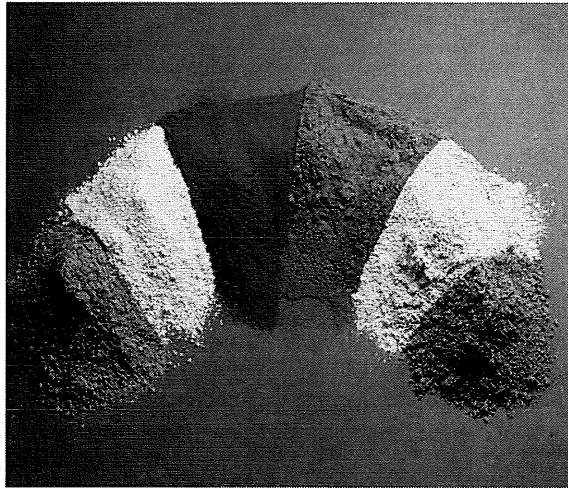
Tablo 2.4 Çimento sınıflarının özellikleri

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)			Priz Başlama Süresi (dakika)	Genleşme mm
	Erken Dayanım		Standard Dayanım		
	2Günlük	7 Günlük	28 Günlük		
32.5N		≥16	≥32.5	≥75	≥10.0
32.5R	≥10.0				
42.5N	≥10.0		≥42.5	≥60	
42.5R	≥20.0				
52.5N	≥20.0		≥52.5	≥45	
52.5R	≥30.0				
	TSEN 196 - 1				TSEN 196 - 1

Çimentonun kimyasal özellikler TS EN 197-1 çimentoları için öngörülen kimyasal özellikler Tablo 2.5’de “karakteristik” değerler olarak gösterilmiştir. 1997’den önceki çimento standartlarında yer alan MgO kısıtlaması bu tabloda yer almamaktadır (Ancak klinker MgO içeriği için %5 sınırı belirtilmiştir). Ayrıca CEM IV, çimentolarının pozolanik özellik kriterini sağlamaları gerekmektedir. İlave açıklamalar standarttaki tablonun dipnotlarında verilmiştir.

Tablo 2.5 Çimentonun kimyasal özellikleri

Özellik	Standard	Çimento Tipi	Dayanım sınıfı	Özellikler
Kızdırma Kaybı	TSEN 196-2	CEM I CEM III	Hepsi için	$\leq \% 5.0$
Çözünmeyen Kalıntı	TSEN 196-2	CEM I CEM III	Hepsi için	$\leq \% 5.0$
Sülfat Miktarı (SO ₃ olarak) TSEN 196-2		CEM I CEM II CEM IV CEM V	32.5N 32.5N 42.5N	$\leq \% 3.5$
		CEM III	42.5N 52.5N 52.5N	$\leq \% 4.0$
Klorür içeriği	TSEN 196-21	Hepsi için	Hepsi için	$\leq \% 10.0$
Pozulanik Özellik	TSEN 196-5	CEM VI	Hepsi için	Deneyi sağlar
Hidratasyon ısısı	TSEN 196-8 TSEN 196-9	Hepsinde LH Tipi için	Hepsi için	270 g/j En çok



Şekil 2.3 Çimentonun çeşitleri

2.2 Beton katkıları.

Katkı maddeleri, taze ve/veya sertleşmiş betonun bazı özelliklerini değiştirmek amacıyla, beton karışımı hazırlanırken karışıma ilave edilen kimyasal, doğal veya yapay bir maddedir.

Başlangıçta katkı maddeler yeteri kadar önemsenmemiş ve bunların beton özellikleri üzerine olan yararlı etkilerine kuşku ile bakılmıştır. Ancak son yıllarda kimya endüstrisinde yapılan araştırmalarla birçok yeni formüller geliştirilmiş ve çeşitli türde katkı maddeleri üretiminde büyük artış olmuştur. 1960' yıllarda Almanya'da 340 çeşit, İngiltere'de 275 çeşit beton katkı maddesi ticari olarak üretilmiş ve satılmıştır. Yurdumuzda ise, son yıllara kadar hemen hemen hiç kullanılmayan katkı maddelerinin önemi yeni anlaşılmaya başlanmıştır. Beton katkı maddelerinin yalnız beton kalitesini artırmakla kalmayıp, önemli ölçüde ekonomik kazanç da sağlamakta olduğunun farkına varılmıştır[13].

katkı maddeleri dört ana grup altında toplanabilir :

- 1) Hava Katkı Maddeleri.
- 2) Kimyasal Katkı Maddeleri.
- 3) Mineral Katkı Maddeleri.
- 4) Çeşitli Katkı Maddeleri.

2.2.1 Hava katkı maddeleri.

Hava katkı maddeler, organik maddelerdir. Genellikle su içinde bir eriyik şeklindedir ve taze beton karışımına ilave edildikleri zaman, taze beton içinde birbirinden bağımsız olan hava kabarcıklarının oluşmasına neden olur. Bunlar betonun donma-çözülme direncini arttırmak için ilave edilirler[14].

2.2.2 Kimyasal katkı maddeleri.

Beton kimyasal katkı maddeler, betonun fiziki ve kimyevi özelliklerinin bazılarında değişiklik yapmak amacıyla beton karışım suyuna belli oranlarda katılan maddelerdir. Betonda kullanılacak toplam kimyasal katkı miktarı, imalatçı firma tarafından önerilen en fazla miktar ve daha yüksek miktarlarda kullanımının betonun performans ve dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkisi olmadığı belirlenmemiş ise 1 Kg çimento için 50 gramı geçmemelidir. Yani önlem veya ön deneme yapılmadan fazla miktarda kullanılmamalıdır. Birden fazla (çeşit) katkının aynı beton harmanında kullanılması durumunda katkıların bir biri ile uyumluluğu basınç deney ile kontrol edilerek uyumlu ise kullanılmasına karar verilmelidir[12].

Kimyasal katkı maddeler genel olarak sıvıdır, azda olsa toz halde bulunanlar da vardır. Sıvı katkı maddeleri, beton karışım suyuna çimentonun ağırlıkça yüzdesi olarak katılır. Kimyasal katkı maddenin bir kaç çeşitlerinin etkileri aşağıda etkilere göre kullanılır.

- a) Su miktarını azaltan katkılar (Plastikleştirici, akışkanlaştırıcı).
- b) Priz zamanını arttıran (Prizi yavaşlatan).
- c) Priz zamanını kısaltan (Prizi hızlandıran).
- d) Su miktarını azaltan ve prizi yavaşlatan.
- e) Su miktarını azaltan ve prizi hızlandıran.
- f) Yüksek düzeyde su miktarını azaltan (Süper akışkanlaştırıcı).
- g) Hiper akışkanlaştırıcı.

2.2.3 Mineral katkı maddeleri

Betonun işlenebilirliğini, mukavemetini, durabilitesini, ekonomisini iyileştirmek için yada hidrasyon derecesini ve ısısını kontrol etmek amacıyla beton karışımına katılan katı ve ince bir şekilde öğütülmüş maddelerdir. Doğal puzolanlar, yapay puzolanlar, uçucu kül (fly ash) ve silika dumanı (fume) yada yüksek fırın cürufu gibi malzemeler bu gruba girerler.

Puzolanlar, tek başlarına çimento özelliğine sahip olmadıkları halde, çok ince taneli oldukları için nemli veya sulu bir ortamda uygun sıcaklıkta çimentonun serbest kireci ile reaksiyona girerek çimentonun özellik kazanan silisli ve alüminli malzemelerdir. Puzolanik katkı maddeleri su tutucu özellik gösterirler ve doğadan serbest olarak elde edildiği gibi bir sanayi kuruluşun yan ürün olarak da elde edilebilir. Bunlar arasında uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanıdır.

2.2.4 Çeşitli katkı maddeleri.

Bunlar yukarıdaki gruplara girmeyenlerdir. Aşağıdakiler bu gruba girerler. Renklendirme yapanlar, pompalamaya faydalı olanlar, geçirgenlik azaltanlar, rötre azaltanlar, şişme yapanlar, paslanma engelleyici malzemeler... vd[16].

2.3.1 Uçucu kül

Günümüzde kömür en önemli enerji kaynaklarından biridir. Ülkemizde enerji ihtiyacı karşılamak üzere kurulan büyük kapasiteli kömür yakan termik santrallerde, düşük kalorili, kül oranı yüksek linyitler kullanılmıştır.



Şekil 2.4 Uçucu kül

Kömürün yanması sonucunda uçucu kül, cüruf ve baca gazı gibi atıklar oluşur. Türkiye'de bir yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta ve ortalama 15 milyon ton uçucu kül üretilmektedir. Bu ise önemli derecede ekonomik ve çevresel problemler meydana getirmektedir. Oysaki uçucu küller endüstriyel atık olarak geri kazanılmaya elverişli bir malzeme olup değişik sektörlerde değerlendirme olanakları vardır[17].

Uçucu kül en yaygın puzzolandır. Bu malzeme, termik enerji santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül rutubetli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek silikat hidrat oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir. Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450 milyon tondur ancak toplam uçucu kül miktarının sadece %6 sı çimento ve beton karışımlarında puzzolan olarak kullanılmaktadır. Betonda uçucu kül kullanımının iki ana nedeni vardır[18].

- 1) Betonun maliyetini düşürür.
- 2) Taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirir.

2.3.2 Uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Uçucu kül, koyu gri renkte, çok ufak taneli bir malzemedir. Renginin koyuluğu açıklığı, elde edildiği kömüre ve yanış özelliğine bağlıdır. Yanmanın tam olmadığı durumda oluşan uçucu küle siyah renk veren içindeki yanmamış karbondur. İyi yanma sonucu oluşan uçucu kül diğerine göre daha açık renktedir. Uçucu külün inceliği öncelikle kazana verilen kömürün öğütölme derecesine bağlıdır, inceliğe etki eden ikinci faktör, küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına mani olunarak tutulmasıdır. Bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar. Boyutları genellikle 0.5 ile 200 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Spesifik yüzeyleri $1800-5000 \text{ cm}^2 / \text{gr}$ arasında değişmekle birlikte, ortalama $2800-3800 \text{ cm}^2 / \text{gr}$ dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu $2.2-2.7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır (EtE, 1979 ve 1982). Kimyasal kompozisyon olarak incelendiklerinde, uçucu küllerin, SiO_2 , Fe_2O_3 ve MgO 'in yer aldığı bileşiklerden oluştuğu görülmektedir. İçerisinde bulunabilen karbon miktarı kömür tipine ve yakma işlemine göre değişiklikler göstermektedir. Ayrıca, kullanılan kömür tipine bağlı olarak bazılarında önemli miktarda CaO bulunabilmektedir. Türkiye'de bu tür bir sınıflandırma mevcut olmamakla birlikte, bazı ülkelerin standartlarında, %10'dan daha fazla miktarda CaO bulunduran küller "yüksek kireçli uçucu kül" olarak tanımlanmaktadır {Kefelioğlu, 1998}. Mineralojik ve kimyasal özellikler açısından uçucu küller, içi boşlukta ve boşluksuz, camsal kürecikler süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden oluşurlar. Kimyasal yapılarında temel element olarak Si, AL, Ca ve S bulunur. Uçucu küllerin matrisi esas olarak alümina silikatlardan ve bunlarla birlikte bulunabilen Fe, Mg, Na, K, Ca, Ti ve nadir toprak elementlerinden oluşur. Uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler matrise girme eğilimi göstermezler. Bu elementler değişimleri tane boyutu ile ters orantılı olarak uçucu küllerin yüzeylerinde toplanırlar[17].

2.3.3 Termik santrallarda atık uçucu küllerin toplanması

Termik santraller ile elektrik üretiminde yanma işlemi sonucunda oluşan atık küller; kömür cinsine, kül oranına, kimyasal yapısına, kazanlara yükleme programına ve kül temizleme işlemleriyle kazan tipine bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir. Termik santrallerde, toz ve parça kömürler takılmaktadır. Toz kömür yakan termik santrallerde 0.09 mm tane boyutunda öğütülmüş kömürler kullanılır. Parça kömürler ızgaralı kazanlarda yakılmakta olup, oluşan küllerin %1-5'i uçucu küllerdir. Toz Kömürlerin kullanılmasında ise bu oran %80'lere ulaşmaktadır [2].

Uçucu küllerin toplanmasında elektro filtreler, siklonlar, nemlendirme, ultrasonik çöktürme, filtreler, kontrol prosesleri gibi yöntemler kullanılmaktadır. Termik santrallerde en çok kullanılan kül tutma yöntemleri, elektro filtre ve siklonlardır. Uçucu küllerin tane boyutunun büyük olduğu durumlarda siklon gibi mekanik tutucular, küçük olduğu durumlarda ise elektro filtreler kullanılır. Nemlendirme yönteminde su ile ıslatılarak çöktürülmesi esasına dayanır. Ancak yöntemin çok su tüketmesi ve toplanan küllerin değerlendirilememesi ve yüksek maliyeti nedeniyle pek kullanılmamaktadır.

Filtreler, ultrasonik çöktürme ve kontrol prosesleri ile 1µm tane boyutuna kadar uçucu küller yakalanabilmektedir. Bacadan kaçan kül miktarı azaldığı için çevre kirliliğini azaltan bu yöntemlerin yatırımı ve işletme maliyeti çok yüksektir[18].

2.3.4 Uçucu küllerin sınıflandırılması.

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları bazı alınmaktadır [1,2,3].

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

- a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.
- b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

Tablo 2.6 Uçucu küllerin sınıfları ve kimyasal kompozisyonlarının sınırları[19].

Bileşik	Class F		Class C	
	Düşük F li	Yüksek F li	Yüksek C li	Düşük C li
SiO_2	46-57	42-54	25-42	40-59
Al_2O_3	18-29	16.5-29	15,21	14-22
Fe_2O_3	6-16	16-24	5-10	5-13
CaO	1.8-5.5	1.3-3.8	17-32	8-16
MgO	0.7-2.1	0.3-1.2	4-12.5	3.2-4.9
K_2O	1.9-2.8	2.1-2.7	0.3-1.6	0.6-1.1
N_2O	0.2-1.1	0.2-0.9	0.8-6	1.3-4.2
SO_3	0.4-2.9	0.5-1.8	0.4-4.5	0.4-2.5
Li_2O	0.6-4.8	1-2.5	0.1-1	0.1-2.3
TiO_2	1-2	1-1.5	< 1	< 1

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar:

- a) V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksidin (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir.
- b) W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan, geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir[18].

2.3.5 Uçucu küllerin puzolanik özelliği

Puzolanlar, kendileri hidrolik bağlayıcı olmamalarına karşın ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı Özellikte bileşikler oluşturan doğal veya yapay malzemelerdir. Puzolanlar, gerek çimento yapımı sırasında klinkerle birlikte öğütülerek, gerekse şantiyede çimentoya yapının özelliğine göre değişik oranlarda katılarak beton yapımında kullanılmaktadır. Puzolanların kullanılması ekonomi dışında çimento ve betona pek çok iyi özellikler kazandırmaktadır. Diğer bir deyimle puzolanlı çimentolar, hataları düzeltilmiş Portland çimentoları denebilir. Uçucu küller de puzolanik özellikleri nedeni ile Puzolan olarak kullanılabilen malzemelerdir. Ancak, çimento veya klinkere katılacak Puzolanların belirli bir özellikte olması gerekmektedir. Klinker, beton ve uçucu küllerinin sahip olması gereken özellikler "Türk Standartlarında" TS - 639 ve TS - 640'da verilmiştir. Gerek çimento fabrikasında klinkere, gerekse şantiyede çimento içerisine katılacak uçucu külün mutlaka puzolanik özelliğinin tespit edilmesine ihtiyaç vardır, istenen düzeyde puzolanik aktivitesi olmayan uçucu kül bu iki amaç için kullanılamaz. Gerekli puzolanik aktiviteye ek olarak, uçucu külün kimyasal özelliklerinin ($\text{SiO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, SO_3 kızdırma kaybı, nem, alkaliler) ve fiziksel Özelliklerinin (incelik basınç dayanımı, büzülme, su alma kapasitesi, çimento alkalini esi ile şişme) de bilinmesi gerekmektedir. Farklı ülkelerin standartlarında bu sayılan fiziksel ve kimyasal özelliklerin bazıları veya tümü istenmektedir. Yukarıda belirtildiği

gibi, uçucu küllerle ilgili olarak Türk Standartları Enstitüsü'nce hazırlanmış olan iki standart bulunmaktadır.

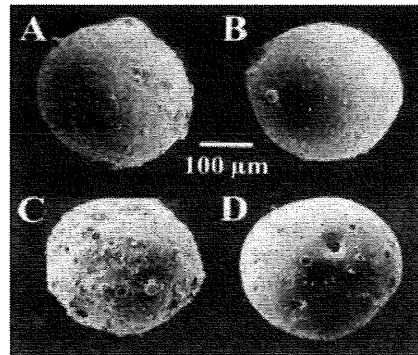
- TS 639 "Uçucu Kül": Uçucu küllerin tanımı, sınıflandırılması, özellikleri, deney yöntemleri ve kalite kontrolü ile ilgilidir. Uçucu küllerin kimyasal özellikleriyle ilgili olarak getirilen sınırlandırmalar aşağıda Tablo 2.7 verilmiştir[6].

Tablo 2.7 TS EN 639 da Belirtilen Uçucu küllün kimyasal özellikleri

Özellikler	Standart Sınırlar
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	En az % 70
MgO	En çok % 5
SO	En çok fr 5
Rutubet	En çok %3
Kızdırma Kaybı	En çok % 10

- TS 640 "Uçucu Kullu Çimento" Bu standart, uçucu kullu çimentoların tarifine, fiziksel ve kimyasal özelliklerine muayene ve deneylerine piyasaya arz şekilleri ile denetleme esaslarına aittir [6].

Şekil 2.5 Uçucu küllün tane şekilleri



- A - Yüzeyinde birikintiler ve sıvı damlaları olan küresel tanecik
- B - Camsı küresel tanecik
- C - Yüzeyi düzensiz boşluklar içeren tanecik
- D - Boşluklu küresel tanecik

2.4.1 Geopolimer

Geopolimer malzemelerin son zamanlarda kullanımı artmış ve özelliklerini geliştirmeye yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Geopolimerler, uçucu kül, cüruf ve metakaolin gibi inorganik malzemelerin sodyum silikat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit çözeltilerinin karışımından elde edilen düşük sıcaklık malzemeleridir. Geopolimer harçlara agrega mineral ilavesi ile malzemelerin özelliklerinde önemli gelişmeler gözlemlenmiştir. Özellikle kalsiyum içeren mineralleri kullanımı ile Geopolimer malzemelerin özellikleri yüksek oranda artış göstermiştir{20}. Ayrıca Geopolimer malzemelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalması neticesinde, fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler görülmektedir. Malzemelerde yoğunluk artışı ve yeni fazların oluşmasına da sebep olmaktadır[21].

2.4.2 Geopolimerin Tarihçesi

1970 yıllarda Fransa Şehirlerindeki özellikle ahşap ve çelik yapı binalarda yangınların artması yeni kaplama malzemelerinin keşfini gerektirmiştir. Kapı ve pencerelerde kullanılan Poli-Vinil-Klorür yalıtım da kullanılan Poli Üreten gibi organik kimya ürünü termoset polimerlerin yanmazlık özelliği göstermesi mümkün değildir. Çünkü organik polimerlerin ana yapısında bulunan petrol türevi karbon içeren monomerler yanıcıdır (Davidovits, 2008) [22].

Yanmazlık özelliği ancak minerallerde bulunur. Silisyum (Si), organik kimyanın ana elementlerinden olan karbon (C) elementi ile periyodik tabloda atom özellikleri itibarı ile aynı grupta bulunmakla beraber bir alt periyotdadır. Bu durum ametal olan karbondan farklı olarak silisyum elementinin metaloit özellikleri olduğunu gösterir. Metaloidler kimyasal olarak ametal gibi davranmakla birlikte yarı iletkenlikleri yönüyle metal özellikte gösterirler (Brandy ve Holum, 1996)[22].

Geopolimer ismi 1978 yılında Fransız malzeme bilimcisi Joseph Davidovits tarafından inorganik moleküllerin oluşturduğu yapılara verildi. Geopolimer çimento genellikle uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerden oluşmaktadır. Geopolimer kaynakların içinde genellikle ısıyla aktive edilmiş ve oluşturulmuş doğal malzemeler olan silikon ve alüminyum bulunmaktadır.

Bu malzemeler alkalın kullanılarak aktive edilerek moleküler arası bağları güçlendirilerek polimerleştirilmektedir. Bu yolla elde edilen çimentolara genellikle alkali aktivasyonlu veya inorganik polimer çimento adı verilmiştir. Geopolimer göstermiş olduğu mükemmel fiziksel ve kimyasal özellikleriyle; prefabrik yapı endüstrisi, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, heykeltçilik ve süsleme sanatları, beton esaslı yol kaplamaları, zemin iyileştirme, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, refraktör seramik malzeme üretimi, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, güçlendirme, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, uçak ve yarış arabası endüstrisi ve nükleer santrallerde kullanılabilir. Kullanılan teknolojinin gelişmişlik düzeyine, seçilen kimyasal oranlara göre ve toprak esaslı hammadde de yapılan fiziksel iyileştirmelerle Geopolimer pek çok seramik malzeme de olduğu gibi istenilen fizik özellikler kazandırılabilir (Davidovits, 2000, Pinto ve Eduardo, 2005)[22]. Örneğin, kaplama refraktör malzemesi olarak da kullanılan Geopolimerin çelik adhezyonu, kil taneciklerinin daha ince öğütülmesi ile sağlanır (Latella ve Perera, 2006)[24]. Ayrıca Geopolimer kimyası ile ilgili bilgiler bugün Mısır Piramitlerinin gizemini, Roma ve Horasan harçlarının kimyasal yapısını da aydınlatmaktadır (Davidovits, 2000)[22]. Doğada aglomerasyon sonucunda oluşan jeolojik kayaçların laboratuarda jeolojik bir bağlayıcı kullanılarak yapay re-aglomerasyon ile sentezlenebileceği fikri feldispatitler gibi 3000 yıllık kayaçların oluşum mekanizmasını ve arkeolojik kazılar sonucunda ortaya çıkan seramiklerin üretim metodunu, kalıntı örneklerine uygulanan, X ışını difraksiyon deneyleri ve NMRFTIR deneylerinin sağladığı mineral kompozisyon ile ilgili veriler Geopolimer kimyası ile açıklanabilir (Davidovits, 2008)[23].

2.4.3 Uçucu Kül esaslı Geopolimer.

Uçucu küllün Portland çimentolu beton için deki kullanım amacı sadece puzolanik özelliğine sahip olduğu için değil ama aynı zamanda alkali agreganın reaksiyon hızını azaltmak için kullanılır.

Alümin, silikat ve uçucu kül arasındaki benzerlik (SiO_2 ve AL_2O_3 uçucu kül de varlığı olarak) bu geopolymerization teknolojisini uygun olduğunu için yeni çimento çeşitleri elde edilmiştir, aynı zamanda bu yukarıdaki üç malzemenin uçucu kül esaslı Geopolimer beton kullanımına büyük bir yol açmıştır[25].

2.5 Önceki çalışmalar

2.5.1 Uçucu Küllerle ilgili Önceki Çalışmalar

ATİŞ ve KARAHAN, [25], bu çalışmada yapılan araştırmada çimento yerine uçucu kül kullanılması açısından bağlayıcı olarak aynı zamanda mineral beton katkısı olarak bir çalışma yapılmıştır. Sertleşen betonda basınç, eğilme, yarıma ve çekme dayanımları, elastisite modülü, boşluk oranı, su emme oranı, kapiler su emme katsayısı, kuruma rötresi ve donma çözülme özellikleri deneylerinin sonuçlanmıştır. Bağlayıcı olarak çimento ve Uçucu kül kullanılmıştır ve su / bağlayıcı oranı 0.35, hiper akışkanlaştırıcı ve bağlayıcı de %1 de sabit kullanılmıştır F sınıfı Uçucu Kül çimento ile yer değiştirerek %0, %10, %15, %20, %25, %30 ve %45 oranlarda kullanılmıştır . Laboratuvar çalışmasından elde edilen sonuçlara göre %30 kadar uçucu kül kullanılması tavsiye edilmiştir. Uçucu külün mineral katkı olarak %45 e kadar çimento ile ikame edilebileceği kanaati ekonomik ve ekolojik açıdan oluşmuştur.

Berrymana, Zhua,ve d [26], genel olarak Uçucu kül çeşitli uygulamalarda beton içindeki çimento yerine bir ikame olarak kullanılmaktadır. hazır Beton fabrikaları uçucu kül ikamesini en az %25 ağırlık olarak limitinde sabitlemişler. çok sayıda ve farklı oranda C sınıf (25 - 65 %)ve F sınıf (25-75 %)uçucu kül ve su azaltıcı beton katkısı kullanılmıştır, fabrika şantiye ortam kürü dürümünde kür edilmiştir . sonuç olarak 7 günlük basınç dayanım değerlerine göre en yüksek dayanım verdiği numune yaklaşık C sınıfında %35 ve F sınıfında %25 olan oranlar olmuştur. ancak ikame oranları uçucu külün C sınıfı ve F sınıfı için sırasıyla %65 ve %40 olarak tavsiye edilmiştir.

Uçucu kül ile ilgili olarak yukarıda verilen kaynaklara ilaveten çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

2.5.2 Alkali ile Aktifleştirilmiş harçlarla ilgili Önceki Çalışmaları

LUGA, ATİŞ [27], bu çalışmada uç farklı parametre kullanılmıştır, su bağlayıcı oranı sabit 0.5 tutulmuştur ve öğütülmüş yüksek fırın cüruf / uçucu kül ikame oranları 0/100, 20/80, 60/40, 80/20, 100/0, kullanılmıştır. Ayrıca sodyum hidroksit ve silika fume alkali aktivatör olarak kullanılmıştır, birinci karışımda sadece sodyum hidroksit kullanılmışlar ve iki diğer karışımlarda sodyum hidroksit ve silika fume kullanmışlar. Sonuç olarak uçucu kül dozajını artıkaçça numunelerin basınç dayanımında düşüş göstermişler, ekonomi yoluyla sodyum meta silikat yerine silikat kullanılabilirler ve sodyum hidroksit ve silikat içeren aktivatöre daha etkili olmuştur.

Sakaia,*,Miyaharab, [28], cam içerdiği ve cam bazlık fazının Uçucu kül ve çimento hidratasyonu etkileyen uzun süre hidratasyon ve uzun süre kür ile muamele edilen numuneler için etkisi belirlenmiştir . iki farklı oranlı cam içeriği olan 38.2% ve 76.6% olan uçucu kül kullanılmıştır , Uçucu kül içinde olan cam konsantrasyonu artıkaçça hidratasyon oranının artışı, 270 gün kür yapılan numunelerde gösterilmiştir .

Elde edilen sonuçlarda dayanım sonuçlarına göre ederek kullanılan aktivasyonlarda sodyum hidroksit ve silis dumanı kullanımı sodyum silikattan daha uygun dayanım kazanmıştır.

Palomo, Grutzeck, vd [29],.bu çalışmada Uçucu küllün ve yüksek olan alkalin oranı çözeltilerinin aktivasyon mekanizesi tarif edilmiştir, Bu çözeltiler NaOH ve KOH ten oluşmuştur . reaksiyon ürünleri öncelerine benzer yapıya sahip olan bir amorf alümine silikat jel gibidir . Çalışmada numunenin kür sıcaklığı ve kür süresi ikisi bir arada ve Çözeltiler / Uçucu kül oranı farklı olduğu durumda çalışılmıştır .

çalışmada bu değişkenlerin etkileri belirlenmiştir. Sonuç olarak alkali ile aktifleştirilen uçucu küllü numunelerin ilk 5 saatte 85 derecelik kür ile 60Mpa dayanım kazandığını açıklamışlar.

Fernández-Jiménez, Palomob, [30], bu çalışmada amaç ortak olan bir dizi faktörlerin etkilerini ortaya çıkarmak ve belirlemek olmuştur. Bu faktörler ise cürufun spesifik yüzeyi, kür sıcaklığı, aktivasyon konsantrasyonu ve alkali aktivasyonların doğası, alkali aktifleştirilmiş cüruf çimento harcın mekanik dayanımlarıdır. En yüksek mekanik dayanım veren $\text{Na}_2\text{OH} \cdot \text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$ kullanılan aktivatör olmuştur. diğer önemli faktör ise aktivasyon konsantrasyonudur, sonra kür sıcaklığıdır ve en son olarak

curufün spesifik yüzey faktörün etkisine göre ve diğer faktörlerle bir matamatiksel denge oluşturmuşlardır.

TOPÇU ,TOPRAK [31], çalışmada Termik Santral taban külünün (TK) alkalilerle aktive edilerek hafif harç üretiminde kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla öğütülmüş TK sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) alkali çözeltileri kullanılarak 40x40x160 mm boyutlarında çimentosuz harç karışımları üretilmiştir. Numunelere 20 saat 75 °C’de etüvde veya laboratuarda 20 °C’de havada kür olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. 1, 7 ve 28. günlerde numunelerin birim ağırlık, ultra ses geçiş hızı ve basınç dayanımları belirlenmiştir. En uygun numunenin birim ağırlığı 1.59 kg/dm³ ve basınç dayanımı 18.51 MPa, 80 donma-çözülme çevrimi sonucu dayanım kaybı % 11.5 olarak bulunmuş ve numune 400 °C’ye kadar termal stabilitesini korumuştur Uçucu kül ve çimento içeren karışımların fiziksel özelliklerinde büyük bir değişik görülmüştür. Bu çalışmada F sınıfı uçucu kül , kireç (Ca/Si = 2), kütlece uçucu külle azaltılmış Portland çimento ve C₄AH₁₃ (sıvı şeklinde) karlanmıştır. Sonuç olarak bu çalışmanın amacı uçucu kül/kireç karışımında farklı kür süresinde hidrasyonun gelişmesini X ışın ile ekran de belirlenmiştir.

Türkel,Alabaş,[33] Bu çalışma, PÇ 42.5 çimentosu ile son yıllarda kullanımı giderek artan PKÇ/A 42.5 çimentosunun, buhar kürü uygulamaları açısından kullanılabilirliğini kapsamıştır. Bu amaçla, su/çimento oranı 0.44 olan 15 cm ayrıtlı küp örnekler (4, 8, 16, 24 ve 36) saat buhar küründe tutulmuştur. Tüm örnekler için kür sıcaklığı 65°C ve çimento dozajı sabit (400kg/m³) seçilmiştir. Farklı koşullarda kür edilen örneklerin basınç dayanımı değerlerinin değişimi şahit örneklerle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir ve sonuç olarak,

1- 65°C’de buhar kürü uygulanan örneklerin basınç dayanımlarının, PÇ 42,5 çimentosu ile üretilmiş betonlarda, PKÇ/A 42,5 ile üretilmiş betonlara kıyasla 24 saatlik kür süresine kadar ortalama %20 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. PÇ 42,5 ile üretilmiş örneklerin 24 saatlik kür süresi dahil basınç dayanım değeri zamanla artarken, 36 saatlik kür sonrası dayanımda %8 oranında azalma görülmüştür. Bu durumun, çimentonun C₃S (tri kalsiyum silikat) karmaşık bileşeni miktarının (bu çalışmada %61.41), buhar kürü uygulanacak çimentolar için tavsiye edilen %55-60 sınırının biraz üzerinde olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

2) PKÇ/A 42,5 çimentosu ile üretilmiş beton örnekler, buhar kürü uygulama süresinin artmasına bağlı olarak basınç dayanımlarında 36 saatlik süre dahil olmak üzere sürekli

artış göstermektedir. Bu durum, PKÇ/A 42,5 çimentosu içerisindeki mineral katkının (uçucu kül) sıcaklığın artışıyla, çimentonun hidratasyon hızı ve açığa çıkan serbest kireç miktarının ($\text{Ca(OH}_2\text{)}$) artması sonucu daha fazla puzolanın serbest kireçle birleşerek güçlü iç bağlar oluşturmaya bağlanabilir.

3) Isıl işlem görmüş beton örneklerinin ısıtılma süresine bağlı basınç dayanımları, su içinde kür yapılan örneklerin basınç dayanımları ile kıyaslandığında;

- En yüksek dayanım kazanma, PÇ 42.5 çimentosu için 24 saat buhar kürü-3 gün su kürü ilişkisinde %122 olarak, PKÇ/A 42.5 çimentosu için 36 saat buhar kürü 3 gün su kürü ilişkisinde %117 olarak elde edilmiştir.
- PÇ 42.5 çimentosu ile üretilen betonların 24 saatlik ısıtılma sonunda normal kür gören 28 günlük betonların basınç dayanımının %94'ünü,
- PKÇ/A 42.5 çimentosu ile üretilen betonların 36 saatlik ısıtılma sonunda normal kür gören 28 günlük betonların basınç dayanımının %87'sini sağladığı görülmektedir. Kullanılan malzemeler ve belirlenen beton karışım oranları için, PÇ 42.5 çimentosu ile üretilen betonlara 24 saat, PKÇ/A 42.5 çimentosu ile üretilen betonlara 36 saat, 65°C buhar kürü uygulanması sonucunda hemen hemen 28 gün su içinde kür edilen beton basınç dayanımlarına yaklaşmıştır.

4) Deney verileri, normal kür koşullarında PÇ 42.5 çimentosunun, PKÇ/A 42.5 çimentosuna kıyasla erken yaşlardaki dayanım kazanma eğiliminin, buhar kürü yöntemindeki ısıtılma uygulama süreleri için de benzer olduğunu göstermektedir.

Bilim,ATİŞ,{34}, Bu çalışmanın amacı alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cüruf çimento ile birlikte kütlece farklı ikame oranında, sıvı sodyum silikatın uç farklı sodyum dozaj içeren aktivasyon olarak harç karışımlarında kullanılmıştır. Sonuç olarak hazırlanan harcın 40×40×160 mm prizma şeklinde numuneler kür edildikten sonra, karbonatlaşma direnci, basınç eğilme dayanımı deneyleri numuneler üzerine uygulanmıştır. Sonuç olarak numunelerde aktivasyon dozajı arttıkça karbonatlaşma derinliği azalmasını sergilenmiştir, aynı zamanda basınç ve eğilme dayanımı artmasını göstermiştir. Diğer bir açıdan çimento/cüruf kütlece yer değişim oranında sıvı sodyum silikat ile aktive edilen harçların, sadece cüruf olduğu durumda daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı vermiştir.

2.5.3 Geopolimerle ilgili Önceki Çalışmalar

Hardjito, Wallah, vd,[35], çevreni korumak için ve çevreden CO₂ nın etkisini azaltmak amacıyla, çevre dostu ve aynı zamanda ekonomy açısından çimento yerine bir alternatif bağlayıcı yapı malzeme bulmak kaynağından bu çalışma yapılmıştır. Yüksek alkali ile aktifleştirilmiş F sınıflı uçucu kül ince ve iri agriga, aynı zamanda reaksiyona girmeyen malzemenin arasında bir bağlayıcı Geopolimer hamurun bulunmasını çalışmada araştırılmıştır.

- 1- Molar ölçüde yüksek sodyum hidroksit dozajlı numuneler yüksek basınç dayanım göstermiştir.
- 2- Kütlece yüksek oranlı sodyum silikat /sodyum hidroksit içeren numunelerin karışımlarında, Geopolimer beton yüksek basınç dayanımı göstermiştir.
- 3- Kür sıcaklığı artıkça 30 ve 90 C arasında , numunelerin basınç dayanımında yükseklik sergilenmiştir
- 4- Üzun süreli kür edilen Geopolimer beton numunelerin, yüksek performans ve dayanım kazanmıştır
- 5- Yüksek Su azalaştırıcı beton katkısı, uçucu küllün kütlece %2 oranında su azalaştırıcı karışım içinde kullanırken, taze Geopolimer beton karışımının işlenilabilirliğinde çok iyi bir performans göstermiştir.

Rovnanit ,[36], bu çalışma kapsamında metakaolin esaslı Geopolimer harcı numunelerin üzerine farklı kür sıcaklığının 10, 20, 40, 60, ve 80 °C derecelerde kür edilen numunelerin basınç ve eğilme dayanıma etkisini sergilenmiştir. Aynı zamanda numunenin içindeki boşlukların dağılımı ve mikro yapısına etki eden alkali aktivasyonların gelişimini gösterilmiştir.

- 1- Metakaolin esaslı Geopolimer harçlar etkisi karışım sona ermekten sonra ilk saatlerde sertleşme süresi ve kıvam alma süresinde etkisi çok iyi göstermiştir, ama a 28 gün sonra negatife bir etki vermiştir.
- 2- Numuneler yaşlandıkça boşluk oranları azalmış göstermiştir.

ATİŞ ,Görür ,KARAHAN vd [37], bu laboratuar çalışmada uçucu kül esaslı Geopolimer hazırlanan harç numunelerin, sodyum hidroksitle aktif edilmiş olan çok yüksek basınç ve eğilme dayanımı vermiştir. Uç farklı faktör değişerek harç numunelerin basınç ve eğilme dayımı üzerine aktarılmıştır, farklı kür sıcaklığı, farklı

kür süresi ve farklı sodyum dozaj aktivasyon içeren kullanarak sonuçlar sergilenilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda F sınıf ile uçucu kül esaslı Geopolimer sonuçları,

- 1- Bu çalışmada uçucu esaslı Geopolimer harç karışımlarından yüksek basınç ve eğilme dayanım gelişimini sergilenmiştir
- 2- Geopolimer harç karışımlarında alkali aktivasyonun dozajı artıkça basınç ve eğilme dayanımı artmış sergilemiştir. Aynı zamanda kür sıcaklığının büyük bir etkisi olarak gösterilmiştir.
- 3- Geopolimer harcını kür süresi artıkça dayanımlar artmıştır.

Davidovits, Izquierdo, vd [38], bu çalışmada avrupa da 17 farklı kaynaklı kömür yanına yerinden üretilen uçucu kül ile harç hazırlanmıştır ve hazırlanan harcın kalıplara döküldükten sonra ve kür süresi bittikten sonra deney yapılmıştır. Kütlece %60 - %80 uçucu kül karışım ağırlığında kullanılmıştır, farklı aktivasyon kullanarak (Ca,K) polysialate - siloxo içeren çimento ve oda sıcaklığında kür edilmesi sonucunda çok farklı çeşitler uçucu kül esaslı Geopolimer harç elde edilmiştir. Çok yüksek basınç dayanım değeri bulunmuştur (28 gün dayanım 90-95MPa).

Sumajouw, Hardjito, ve d [39], geçmiş çalışmalardan öğrendim iz Geopolimer harcının farklı olumlu özelliklere sahip olduğunu sergilenilmiştir, yüksek basınç dayanımı, düşük kürü rötre ve sulfata karşı çok yüksek direnç sahip olduğunu göstermişler. Bu çalışmada analitik ve deneysel olarak Geopolimer betonarme kolum ve kirişin performansını göstermiştir. Sonuç olarak Portland çimento ile uygulanan betonarmenin verdiği performans ve uçucu kül esaslı Geopolimer betonarmenin gösterdiği performans aynıdır. Buna göre uçucu kül esaslı Geopolimer Betonarmenin aynı Portland çimentolu kod ile betonarme tasarıma girebilir.

Hardjito, Wallah, vd [40], son yılların çalışma raporlarına göre uçucu kül esaslı Geopolimer betonu Portland çimentolu beton yerine alternatif çok uygun ve çevre dostu bir madde bulunmuştur. Bu çalışmada incelenen laboratuvar işine göre uçucu kül esaslı Geopolimer harç karışımların, karma süresi ve dilenme süresini artıkça (4dk ve 16dk arasında) dayanım artmıştır. Sonuç olarak laboratuvar çalışmanın sonunda en deneysel çalışmaların sonucu,

- 1- Uçucu kül esaslı Geopolimer harcının karma süresini artıkça numunelerin basınç dayanımı ve yoğunluğu artmıştır.

2- Alınan süre numunelerin kalplara döküldükten sonra ve kür yöntemi uygulanana kadar dilenme süresi denir, bu süre artıkça numunelerin basınç dayanımı artmıştır.

Hardito, Wallah, ve d (ACI MATERIALS JOURNAL){46}, bu çalışma kapsamında uçucu kül esaslı Geopolimer harcını gelişimini ve içeren bileşimlerin etkisini ve davranışlarını belitlenmiştir. Uçucu kül esaslı Geopolimer içeren F sınıfı, zengin silikatlı ve alüminalı düşük kalsiyumlu uçucu kül, yüksek sıvı şeklinde alkali aktivasyon (sodyum silikat ve sodyum hidroksit) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki özellikleri sunmuştur.

1- Yüksek sodyum hidroksit, sodyum silikat dozajlı ve yüksek sodyum silikat/sodyum hidroksit oranlı, yüksek basınç dayanımlı numuneler sergilemiştir.

2- Kür sıcaklığı ve kür süresi artıkça dayanım artmıştır.

3- harç karışımlarında beton katkısı kullanılarak yüksek işlenililbilirlik değeri elde edilmiştir ve çok az bir miktarda basınç dayanımına olumsuz etkisi olmuştur.

Sumajouw, Hardjito, vd [41], bu çalışmada deneysel test olan 12 uçucu kül esaslı Geopolimer betonarme kiriş numuneler üzerine eksenel yük uygulanmasından oranı, betonarme basınç dayanım testi, sonuç olarak betonarme kirişin gerilme çizelgisi elde edilmiştir ve optimal kırılma noktasını göstermiştir. Sonuç olarak uçucu külle üretilen betonarme kirişlerin çekme mukavemet ile basınç mukavemeti arasında bir ilişki bulmuşlar. Uçucu kül esaslı Geopolimer betonarmenin çekme mukavemeti artıkça basınç mukavemeti artmaktadır.

BÖLÜM 3

YÖNTEMLER

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kalıplara dökülen harç'ın karışımlarında kullanılan malzemelerin miktarları, hazırlanan numunelerin boyutları ve çalışıldığı deneylerin yöntemi üzerine bilgiler sunulmaktadır.

3.1. Malzemeler

3.1.1. Çimento

Kahramanmaraş çimento fabrikasında üretilen TS EN 197-1 [21] ile uyumlu CEM I 42.5R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun kimyasal özellikler Tablo 3.1.'de verilmiştir.

3.1.2. Uçucu Kül

Çalışmada, Adana'nın yumurtalık ilçesinin Sugözü köyünde bulunan termik santraliden, çıkan, F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Sugözü uçucu külünün kimyasal ve fiziksel analizi isken-kimya laboratuvarı tarafından yapılmıştır. Su gözü uçucu külünün kimyasal özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir. Su gözü uçucu külü, (EN 450-1, 2005) standart sınırlarına uyan ve (ASTM C 618- 94 a, 1998) standardına göre $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin %70'nin üzerinde olması ve CaO miktarının %10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Çimento ve uçucu küllün kimyasal kompozisyonu

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Çimento	18.87	5.62	2.54	62.78	2.63	2.82	0.4	0.9
Uçucu kül	61.81	19.54	7.01	1.77		0.31	2.43	

Çimentonun fiziksel özelliği :**Tablo 3.2 Çimentonun fiziksel özelliği**

1	Özgöl ağırlığı (g/cm ³)	3.12
2	Priz başlangıcı (dk)	190
3	Priz sonrası (dk)	225
4	Hacim gelişmesi (mm)	1.0
5	Baline özgöl yüzey (cm ² /g)	3200
6	2 Günlük basınç dayanımı (MPa)	27.2
7	7 Günlük basınç dayanımı (MPa)	41
8	28 Günlük basınç dayanımı (MPa)	51.2

Uçucu küllün fiziksel özelliği :**Tablo 3.3 Uçucu küllün fiziksel özelliği**

1	Tanecik yoğunluğu (Kg/m ³)	2390
2	Dayanım aktivite indeksi - 7 gün (%)	78.2
3	Dayanım aktivite indeksi - 28 gün (%)	93.80

3.1.3 Su

Harç karışımında kullanılan su, şehir şebekesinden alınan musluk suyu kullanılmıştır (içilebilir su), (TS EN 1008, 2003) belirtilmiş olan, su içilebiliyor ise, beton yapımında karma suyu olarak kullanılmaya daha uygundur.

3.1.4. Standart Kum

Set çimento sanayi ve ticaret A.Ş. Trakya çimento fabrikası tarafından üretilen, TS EN 196-1'e uygun maksimum agrega boyutu 2 mm olan Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır. Deneyde kullandığımız standart kumun elek analizi sonucunda belirlediğimiz tane büyüklüğü dağılımı ve TS EN 196-1'deki [22] sınır değerleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. İnce agreganın granulometresi ve standart sınır değerleri

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0.08	0.16	0.5	1.0	1.6	2.0
Kalan (%)	99	83	62	38	10	0
Sınır (%)	99 ± 1	87 ± 5	67 ± 5	33 ± 5	7 ± 5	0



Şekil 3.1 TS EN 196 - 1 Kullanılan standart kum

3.1.5. Aktivatörler

Bu çalışmada uçucu küllü aktive etmek için, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum meta silikat (Na_2SiO_3) harç karışımlarında kullanılmıştır.

3.1.6. Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit İngiltere’de 1807 yılında Humphrey Day tarafından keşfedilmiştir. Bu keşif için kullanılan bir olay veya deney bilinmemektedir. Sodyum hidroksit doğal olarak meydana gelmez ve üretimi kolay bir kimyasaldır. Genellikle sodyum klorür’ün elektrolizi sonucu %50’lik çözelti şeklinde üretilir. Bu reaksiyonun anında klor gazı oluşur, çözeltideki su buharlaştığında ise katı haldeki sodyum hidroksit elde edilir.

Dünyada üretilen sodyum hidroksitin çoğunluğu kuzey Amerika, Asya ve Avrupa ülkelerinde yoğunlaşmaktadır.

Sodyum hidroksit, diğer adıyla KOSTİK beyaz renkte nem çekici bir maddedir. Suda kolaylıkla çözünür ve yumuşak kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. Herhangi bir kokusu yoktur, sıvı veya katı halde bulunur. Katı olarak payet, boncuk gibi şekillerde olur. Sıvı formda ise genelde sulu çözelti halinde bulunur. İnsan dokusunda kaşıntıverici bir etkisi vardır. Endüstride birçok kimyasal maddenin yapımında, yapay ipek, sabun, kağıt, boya, deterjan endüstrisinde ve petrol rafinelerinde kullanılır. Su ile tepkimeye girdiğinde, yaklaşık 5 dakika içinde sıcaklığı 50 °C’ye çıkar ve yaklaşık 15 dakika sıcak kalır. Çalışmada uçucu küllü aktive etmek için katı formda sodyum hidroksit suda eritilerek kullanılmıştır.

Tablo 3.5. Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu

Oksit	Asidi metrik	Na_2CO_3	Cl	SO_4	Pb	Al	Fe
%	≥ 97	≤ 1	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002

3.1.7 Sodyum Meta silikat

Silmaco silikatlarından elde edilen sodyum meta silikatın modülü (ağırlıkça SiO_2 : (Na_2O) (Ms) = 1.00 olan katı granül formu kullanılmıştır. Sodyum meta silikatın kimyasal özellikleri Tablo 3.6.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Sodyum meta silikatın kimyasal kompozisyonu

Özellik	Molar Oranı	Ağırlık Oranı	SiO_2	Na_2O
Değerler	0.94	0.91	44.94	49.38
Sınır	0.91-1.01	0.88-0.98	44.30-46.30	47.90-49.90

3.2. Deneysel Çalışmalar

3.2.1. Karışım Oranları

Bu çalışmada üretilen harç karışımların kum/bağlayıcı oranı 3 olup, su/bağlayıcı oranı sodyum hidroksitli karışımlar için 0.33, ve sodyum silikatlı karışımlar için 0.47 seçilmiştir. Harç karışımlarındaki sodyum konsantrasyonu oranları, bu çalışmada kullanılan tüm aktivatörler için ağırlıkça bağlayıcı miktarına göre, %10 olarak seçilmiştir.

Harç karışımlarında uçucu kül ve çimento 0 dan başlayıp, %25 artarak ikame edilmiştir. Bu karışımlar alkali ile aktiveleştirilmiştir.

Harç karışımlarının hazırlanmasında, sodyum hidroksit önce karışım suyu içerisinde eritilmiş ve onu en az 12 saat soğuduktan sonra harç karışımına ilave edilmiştir.

Hazırlanan karışımlardan elde edilen harç numuneler, sıcaklığı 20 ± 2 °C ve nem oranı 60 ± 5 olan iki farklı kür yönteminde kür edilmiştir, deney yapılacak kür süresine kadar laboratuarda bekletilmiştir. Harç karışım oranı detayları Tablo 3.7a,b.' de sunulmuştur.

Tablo 3.7.a. Sodyum hidroksitli Harç karışım oranları

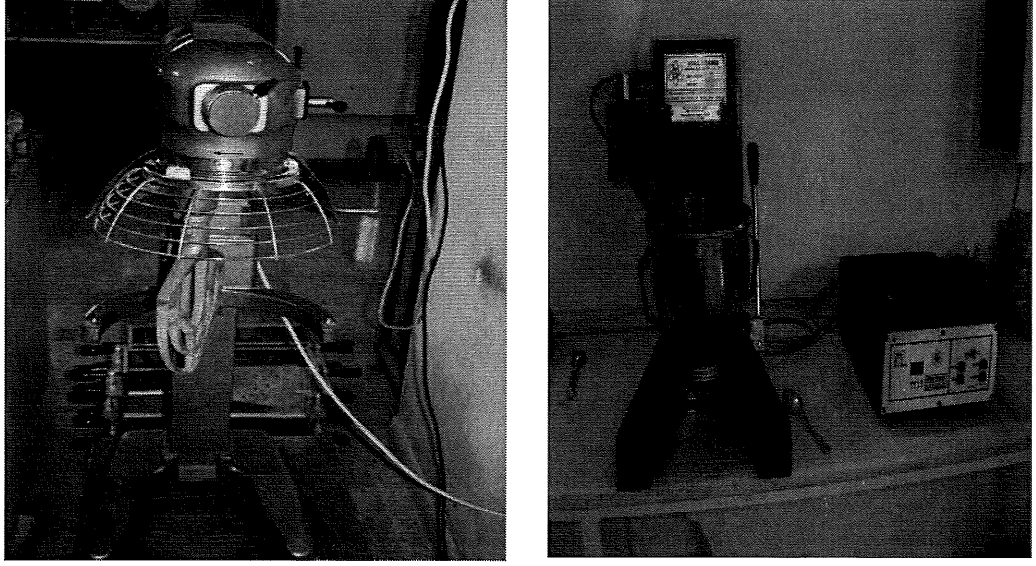
Karışım No	Çimento (g)	Uçucu kül (g)	Kum (g)	Su (g)	Sodyum Hidroksit (g)
PH-0	450	0	1350	150	78
PH-25	337.5	112.5	1350	150	78
PH-50	225	225	1350	150	78
PH-75	112.5	337.5	1350	150	78
PH-100	0	450	1350	150	78

Tablo 3.7.b. Sodyum Meta silikatlı Harç karışım oranları

Karışım No	Çimento (g)	Uçucu kül (g)	Kum (g)	Su (g)	Sodyum Meta silikat (g)
PS-0	450	0	1350	210	120
PS-25	337.5	112.5	1350	210	120
PS-50	225	225	1350	210	120
PS-75	112.5	337.5	1350	210	120
PS-100	0	450	1350	210	120

3.2.2. Numunelerin Hazırlanması

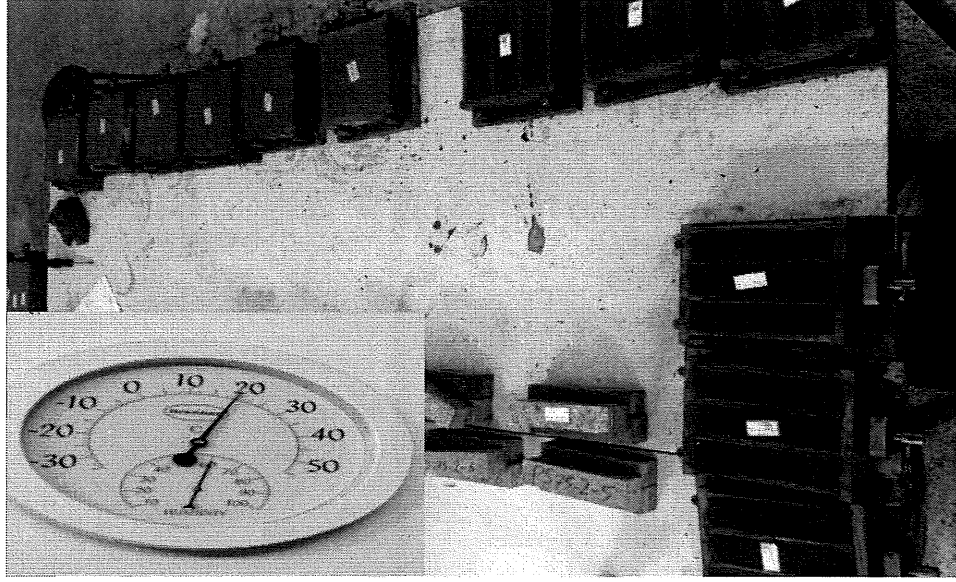
Harç numuneleri Tablo 3.7, a, b.'de verilen karışım oranlarına göre sırasıyla Hobart mikserinde karıştırılarak hazırlanmıştır ve sonucunda boyutları 40x40x160 mm olan prizmatik numuneler dökülmüştür. Harç karıştırma işleminde ilk olarak, aktivatör karışım suyunun içine eklenmiştir. Su aktifatör karışımına uçucu kül ve çimento farklı oranlarda katıldıktan sonra karışım Hobart mikserine yerleştirilmiştir. Hobart mikseri TS EN-196-1 [22] standardına uygun 80 kg ağırlığında ve 140 ve 285 dev/dakika ile çalışmaktadır. Elektronik program vasıtasıyla tam otomatik çalışma imkânı sağlamaktadır. Standardın gereği olan çift program ile çalışabilmektedir. Opsiyon el olarak otomatik kum boşaltma aparatı bulunmaktadır. Hobart mikserinin görünümü Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Hobart mikserinin görünümü

TS EN 196-1'e [22] göre Hobart mikseri otomatik ayarda çalıştırılmıştır; yavaş ayarda 30 saniye karıştırılan harç ikinci aşamada 30. saniyeden sonra mikser karıştırmaya devam ederken deney kumu yavaşça karışıma boşaltılır ve 30 saniye yine yavaş olarak mikser karmaya devam eder. Sonra üçüncü aşamada mikser birden hızlanır ve 30 saniye hızlı olarak harcı karıştırır. Dördüncü adımda mikser hızlı olarak 30 saniye karıştırdıktan sonra durur ve 15 saniye karışım dinlenir. Daha sonra mikser 60 saniye hızlı ayarda harcı karıştırır.

Mikser durduktan hemen sonra taze harç mikserden alınmış ve numune kalıplarına yedirerek vibratörle yerleştirilmiştir. Uygun bir kaşıkla karıştırma kabından doğrudan bir veya bir kaç defada, iki tabakada her kalıp üç bölümdür ve her bölümüne doldurulmuştur ve vibratörle 1 dakika içinde 60 kez düşürülmek şekilde tam sıkıştırma yapılmış ve üzerleri düzeltilmiştir. Kalıba dökülen harç numuneler tanımlamak amacıyla etiketlenmiştir.



Şekil 3.3. Kür havuzundaki harç numunelerin görünümü

3.2.3 Kür yöntemi

Hazırlanan harç numuneleri iki farklı yöntemle uygulanılmıştır, numunelerin bir kısmı 24 saat 75 °C de etüvde kür edildikten sonra kalıplardan çıkartılıp, laboratuvar ortamında kür edilmeye bırakılmıştır. Kür süresi olarak 1, 3, 7, 28, 90 ve 180 gün seçilmiş ve bu zamanlarda deneyler yapılmıştır.

Numunelerin bir kısmı da 24 saat laboratuvar ortamında kür edildikten sonra kalıplardan çıkartılıp, kür süreleri tamamlanıncaya kadar laboratuvar ortamında tutulmuştur, daha sonra deneyler yapılmıştır. Laboratuvar ortamının sıcaklığı 20 ± 2 °C olup, bağıl nemi ise $\%60 \pm 5$ dir.



Şekil 3.4 kullanılan kalıp, kalıp yağı ve numunelerin görünümü.

3.3. Deneyler

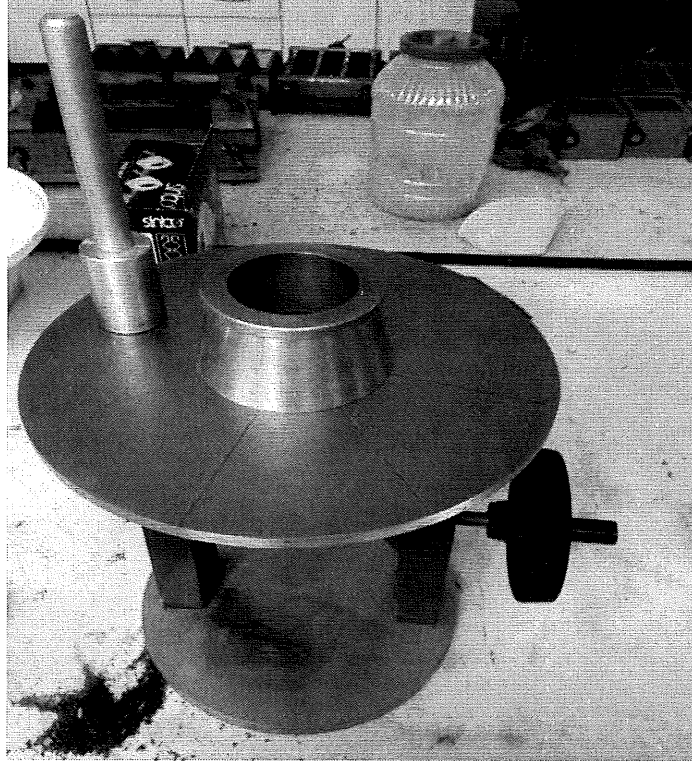
3.3.1. İşlenebilirlik Tayini

Harç karışımlarının işlenebilirliği yayılma tablası deneyi vasıtasıyla TS EN 1015-3 (2000)'e [23] göre yayılma tablası ile yapılmıştır. Bu işlem cihazı, dairesel levha ve kesik koni şekilli paslanmaz çelik veya prinçten, 60 mm $\pm$ 0.5 mm yükseklikte, alt yüz (taban) iç çapı 100 mm $\pm$ 0.5 mm, duvar kalınlığı en az 2 mm olan kalıbın iç ve dış yüzü ve kenarları temiz ve nemli bir bezle silinip kurulandıktan sonra yağla yağlanmıştır.

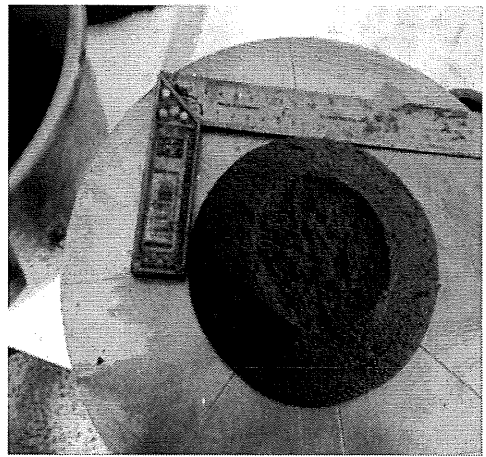
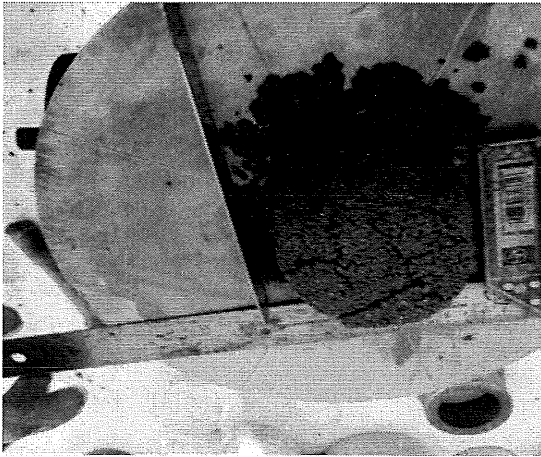
Kalıp, ayak, sert tabla kaidesi ve dairesel levha, yatay mil, kaldırma dirseği ve kaldırma kolundan teşkil edilmiş yayılma tablasının dairesel levhası üzerine merkezlenerek yerleştirilmiştir. Harç, kalıp içerisine iki tabaka halinde her harç tabakasına, daire kesitli sert, su emmez, yaklaşık 40 mm çaplı, ve yaklaşık 200 mm uzunlukta çubuktan oluşan tokmak ile, harç yüzeyine düzgün şekilde dağılan en az 10 kısa vuruş yapılarak sıkıştırılmak suretiyle doldurulmuştur.

Doldurma esnasında kalıp, diğer elle yayılma tablasının levhasına doğru bastırılmaktadır. Kalıp üst yüzünden taşan fazla harç tesviye bıçağı ile sıyrılarak alınmıştır ve dairesel levhanın boş kısmı silinerek temizlenip kurulanmıştır. Yaklaşık 15 saniye sonra, kalıp düşey olarak yukarıya doğru yavaşça çekilerek alınmakta ve dairesel levha üzerinde kalan harç kütlesi, yayılma tablası yaklaşık olarak saniyede bir defa olmak üzere, sabit sıklıkta 15 defa düşürülerek levhaya yayılması sağlanmıştır. Yayılan harç kütlesinin çapı, birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu ortalama değerler sonucunda her bir harç numunesinin kıvamı tayin edilmiştir. Şekil 3.5.'te yayılma tablası şekli verilmiştir. Bu durumda, deney sonucundaki çapı (D_s) ve deneye başlamadan önceki çapı ise (D_i) ile gösterildiğinde taze harca ait kıvam değeri aşağıdaki formülle hesap edilir,

$$\text{İşlenebilirlik} = \frac{(D_s - D_i)}{D_i} \times 100 \quad (3.1)$$

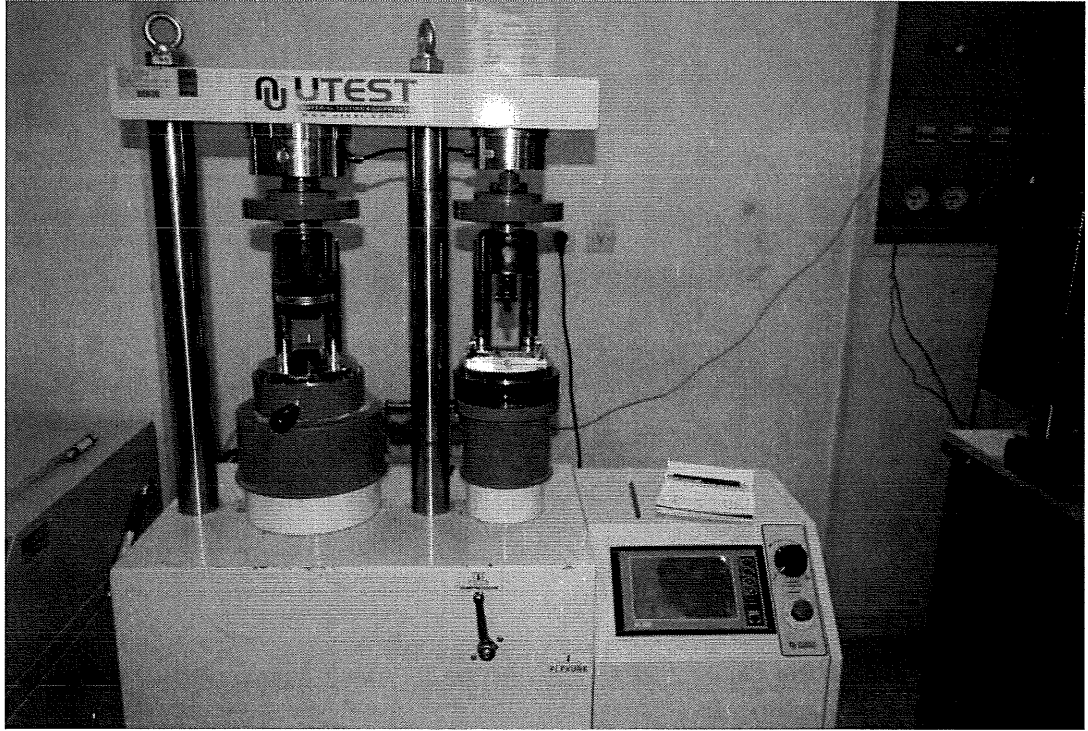


Şekil 3.5. Yayılma tablasında taze harcın kıvam tayini



3.3.2. Dayanım Tayini

Uçucu kül, çimento ve alkali ile aktive edilen harç numuneler çimento presinde eğilme ve basınç deneylerine tabi tutularak eğilme ve basınç dayanımlarını U- test marka adlı cihaz yardım ile dayanımları bulunmuştur. Çimento presinin TS EN 196-1'e [22] uygun tam otomatik, dijital kontrollü hız ayarı bulunmaktadır. Kırma hızı 0.2 KN/sn cinsinden dijital olarak girilmesi mümkündür. Bilgisayar program ile kontrol sistemi bulunmaktadır. Bilgisayar dışında kendi kontrol ünitesinden çalıştırılabilmektedir. Dayanımlar MPa (N/mm^2) değeri otomatik olarak hesaplanır ve bilgisayardan rapor alabilme imkânı sunar. Maksimum Pres kuvveti 200 kN' dur.



Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan çimento presi

3.3.2.1 Eğilme dayanımının tayini

Çalışma kapsamında hazırlanan numunelerin kür edilen (1, 3, 7, 28, 90 ve 180) günlük numunelerin eğilme dayanımı tayini için (TS EN 1015-11, 2000)'e uygun olarak çimento presinde eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Üretilen harçların eğilme dayanımının tespit edilebilmesi için 40x40x160 mm boyutlarında, her bir deney noktası için üçer adet hazırlanan deney numunelerine, Kür edilen numunelerin ilgili günde otomatik test cihazında tek noktadan yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Deney Tabii tutulacak her numune yükleme tablası üzerindeki mesnetlere uygun olarak yerleştirilmiştir. Numunenin kalıp içinde iken üste gelen yüzünün, deney sırasında uygulanacak yüklemenin yönüne paralel olarak konmasına dikkat edilmiştir. Yükleme esnasında, cihazın yükleme başlığı numunenin orta noktasına etki ederken, mesnetler arası açıklık 10 cm olarak sabit tutulmuştur. Bu deney yöntemi ile çekme dayanımı, aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır. (3.1)

$$\text{Eğilme çekme dayanımı } \sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.1)$$

σ : Eğilme çekme dayanımı, (Newton/mm²)

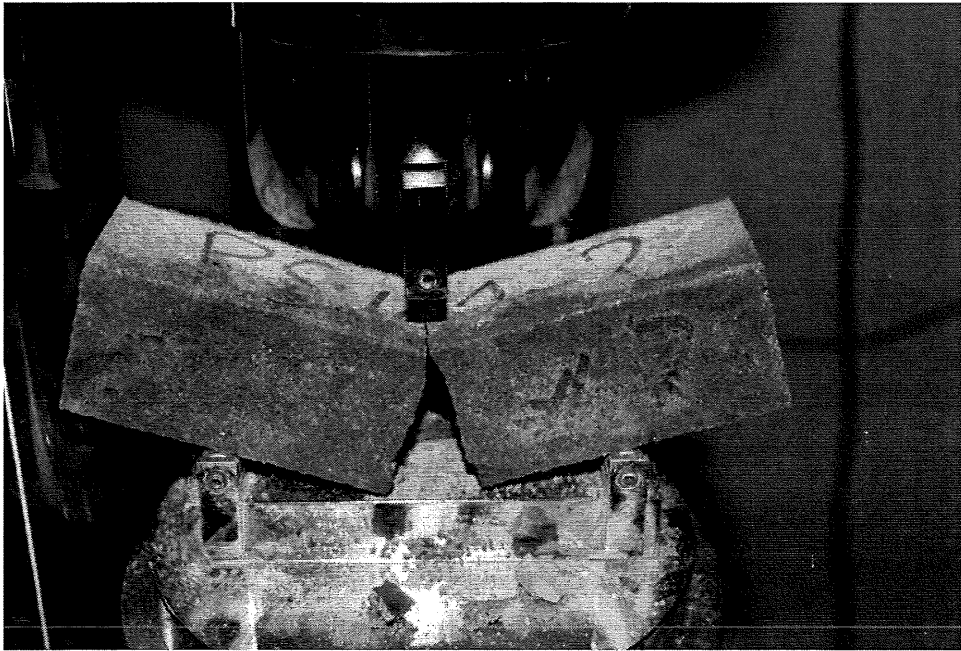
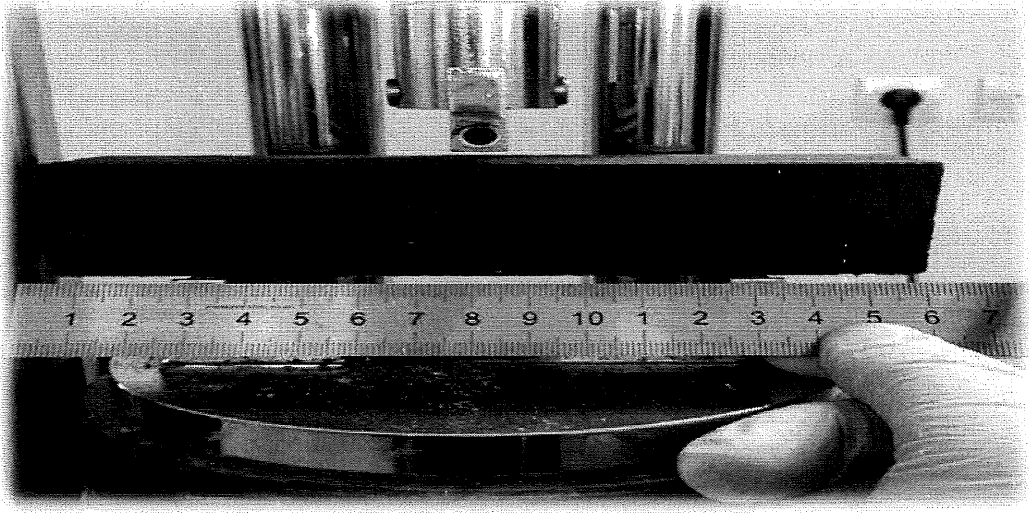
b: Prizma kesitinin eni (mm),

d: Prizma kesitinin yüksekliği (mm),

P: Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

L: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)'dir.

Her deney noktasına göre farklı Kür ve farklı gün için hazırlanan prizmatik harç numuneler eğilmede çekme deneyine tabi tutularak eğilmede çekme mukavemeti değerleri Şekil 3.7'de görüldüğü gibi bulunmuştur.



Şekil 3.7. Prizma numunelerin eğilme deneyi

3.3.2.2 Basınç Dayanımının Tayini

Üretilen numunelerin tespit edilen kür süresine göre (1, 3, 7, 28, 90 ve 180) günlere göre Basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır, eğilme deneyi sonucunda numunenin ikiye ayrılması sonucundan yarım prizma numuneler üzerinde 40x40 mm 'lik numuneler TS EN 196-1'e [22] uygun olarak çimento presinde basınç dayanımı deneyine tabi tutularak yapılmıştır. Yarım prizmalar, cihazın plâkaları arasına $\pm 0,5$ mm.den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek ve prizmanın arka yüzü plâkadan veya yardımcı plâkalardan 10 mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirilmiştir. Yük 2,4 KN/s hızda olmak üzere düzgün şekilde, prizma kırılana kadar otomatik olarak uygulanmıştır. Cihazın programına göre otomatik olarak iki basınç değerini verilmiştir yük (KN) olarak ve basınç gerilmesini (MPa) olarak veriyor.

Basınç dayanımı R_c , aşağıdaki denkleme göre hesaplanır:

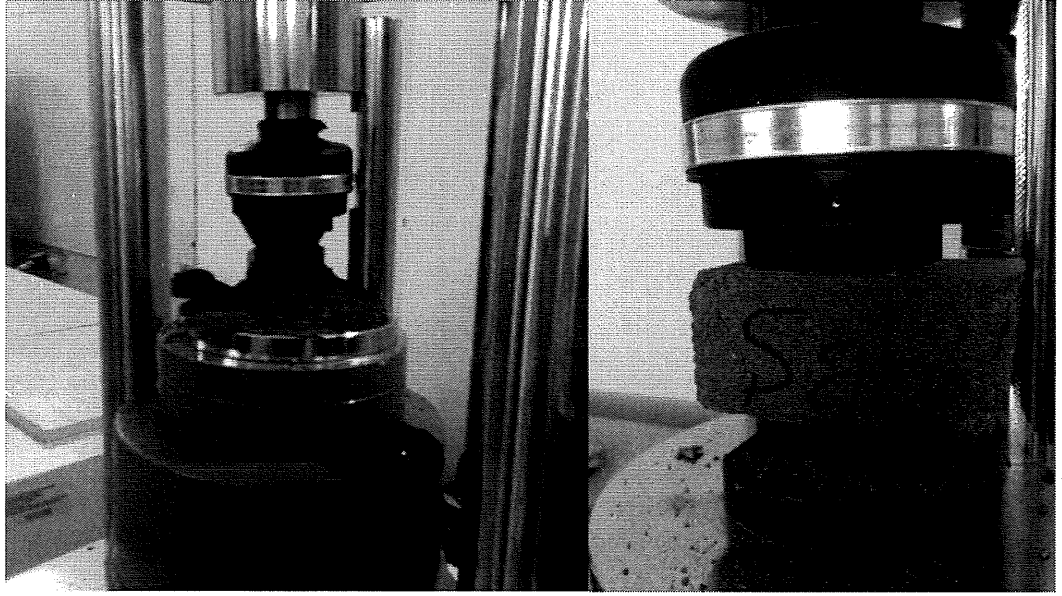
$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.5)$$

Burada,

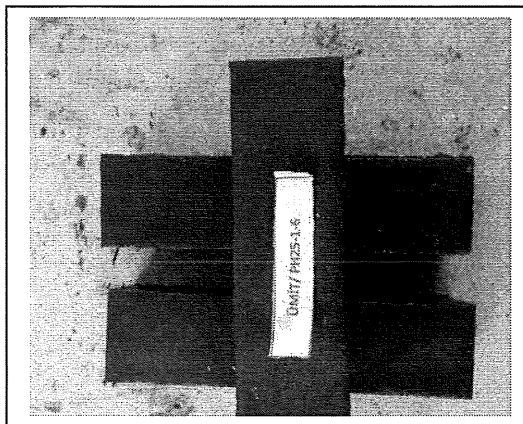
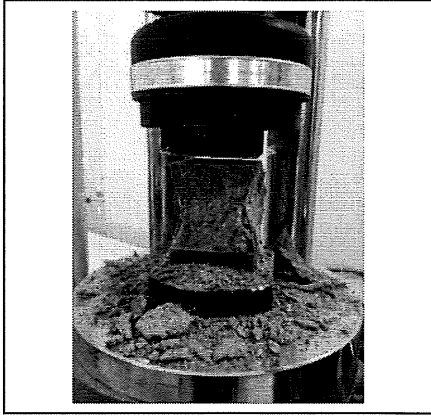
R_c : Basınç dayanımı (N/mm²),

F_c : Kırılmadaki en büyük yük (N),

1600 : Plâkaların veya yardımcı plâkaların 40 × 40 mm alanı (1600mm²)'dir [22].



Şekil 3.8. Prizma numunelerin basınç deneyi



BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, araştırma kapsamında yer alan alkali ile aktifleştirilmiş harç karışımlar üzerinde yürütülen deneylere ait sonuçlar, tablolar değerlendirmek suretiyle birbirleriyle ve Portland çimentolu kontrol harçla kıyaslamalı olarak sunulmuştur.

4.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında üretilen farklı uçucu kül ve çimento oranına sahip harçların işlenebilirlikleri aşağıda tablo 4.1.a ve 4.1.b da sunulmaktadır. Sodyum hidroksit ile hazırlanan karışımların işlenebilirlik sonuçları Tablo 4.1.a da sunulmakta olup, sodyum meta silikat ile hazırlanan karışımların işlenebilirlikleri tablo 4.1.b da sunulmuştur.

Tablo 4.1.a ve 4.1.b dan görüldüğü üzere, sadece uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışımların işlenebilirlikleri hem sodyum hidroksit hem de sodyum meta silikatlı karışımlarda en yüksek olmuştur. İlaveten, sadece çimento ile hazırlanan karışımlarda işlenebilirlik en az olmuştur. Uçucu kül ile çimento ikame oranı arttıkça, karışımda uçucu kül azaltılıp, çimento çoğaltıldığında işlenebilirlik azalmıştır. Diğer bir deyişle karışımda uçucu kül oranı artırılıp, çimento azaltıldığında işlenebilirlik artmıştır. Bu beklenen bir durumdur, çünkü uçucu kül camsı iç yapısı nedeniyle karışım suyunu emmez. Ayrıca, uçucu külün yuvarlak küresel şekli işlenebilirliği iyileştirmektedir. Uçucu külün çimento ile ağırlıkça ikame edilmesi sonucunda uçucu külün arttığı karışımlarda bağlayıcı hamur miktarı da, çimento ve uçucu külün yoğunlukları farkından kaynaklı artmaktadır (Atis, 1997)

Tablo 4.1.a Sodyum hidroksit içeren karışımların işlenilebilirlik sonuçları.

PH100 mm	PH75 Mm	PH50 mm	PH25 mm	PH0 mm
140	120	110	110	100

Tablo 4.1.b Sodyum meta silikat içeren karışımların işlenilebilirlik sonuçları.

PS100 mm	PS75 Mm	PS50 mm	PS25 mm	PS0 mm
220	200	160	110	110

Benzer şekilde, çalışma kapsamında hazırlanan ve sodyum hidroksit içeren harç karışımları kalıplanmayı takiben 24 saat 75 °C sıcaklıkta kür edildikten sonra laboratuvar ortamında deney gününe kadar sadece laboratuvar ortamında 180 güne kadar kür edilen numunelere ait basınç dayanım sonuçları Tablo 4.3 da verilmiştir.

Tablo 4.3 dan görüleceği üzere, kür durumu kendi içinde aynı olarak, karşılaştırıldığında; %75 uçucu kül ve %25 çimento içeren karışımlarda dayanımlar kür süresinin başlangıcından sonuna kadar en yüksek dayanımı geliştirmiştir. dayanım değerinin mertebesi ise 70MPa olup, oldukça yüksek dayanım anlamına gelmektedir. Sadece uçucu kül ile üretilen numuneler ise kür başlangıcından sonuna kadar %75 uçucu kül içeren numune hariç olmak üzere diğer karışımlardan daha yüksek dayanım (bakınız Tablo 4.3, 45 MPa) vermiştir. Sadece çimento içeren karışımlar ise kür başlangıcından sonuna kadar diğer karışımlara göre en kötü performansı sergilemiştir. Tablo 4.3 incelendiğinde, uçucu kül ve çimento ikamesi arasında yukarıda ki tartışmaya benzer olarak optimum bir harmanlama oranı olduğu anlaşılmaktadır. Bu harmanlama oranının ise %75 uçucu kül ve %25 çimento olduğu anlaşılmaktadır.

4.3 Sodyum hidroksit içeren 24 saat 75 °C sıcak kür edilen basınç dayanımının sonuçları

NaOH =78g & Su =150g

75 °C /24 saat etuv Kürü

Basınç Uçucu kül Çimento	Basınç Dayanım MPa				
	%100 / %0	%75 / %25	%50 / %50	%25 / %75	%0 / %100
1 Gün	32.4	51.8	23.4	27.3	12.5
3 Gün	36.5	50.1	25.3	28.2	13.1
7 Gün	35.1	54.6	26.6	27.6	16.3
28 Gün	41.4	57.4	27	29.1	16.6
90 Gün	42.4	66.4	27.5	28.1	20.2
180 Gün	45.5	72.4	28.4	30.4	25.5

4.2.2 Sodyum meta silikat içeren harçlar.

Çalışma kapsamında hazırlanan ve sodyum meta silikat içeren harç karışımları laboratuvar ortamında deney gününe kadar sadece laboratuvar ortamında 180 güne kadar kür edilen numunelere ait basınç dayanım sonuçları Tablo 4.4 da sunulmuştur. Tablo 4.4 dan görüleceği üzere kür durumu kendi içinde karşılaştırılmak üzere, en yüksek basınç dayanımı %50 uçucu kül ve %50 çimento içeren karışımlarda elde edilmiş olup, değeri 180 gün sonunda 44 MPa olmuştur. Elde edilen dayanım diğer yüksek dayanım ise 180 gün sonunda 36 MPa olan ve %25 uçucu kül ile %75 çimento içeren karışıma ait olmuştur. Sadece uçucu kül içeren karışımlar 90 gün sonunda 12 MPa dayanım geliştirmelerine rağmen, 180 gün sonunda dayanım verememişlerdir. Çimento uçucu kül harmanlanması oranının optimum değerinin %50 civarında olduğu düşünülmektedir. Sadece çimento içeren karışımlarda 180 gün sonunda 24 MPa dayanım geliştirmiş olup, çimentonun düşük dayanım vermesinin karışıma konulan sodyum meta silikatın sebep olduğu düşünülmektedir.

4.4 Sodyum meta silikat içeren oda sıcaklığında kür edilen basınç dayanımının sonuçları

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 120\text{g} \quad \& \quad \text{Su} = 210\text{ g}$$

Basınç		Ortam Kürü				
Uçucu kül	Çimento	Basınç Dayanımı MPa				
		%100 / %0	%75 / %25	%50 / %50	%25 / %75	%0 / %100
1 Gün		3.6	3.1	9.4	11.7	7.2
3 Gün		4.2	3.1	12.4	13.3	12.5
7 Gün		5.0	4	15.1	15.9	12.8
28 Gün		12.5	6	34.6	22.5	18.7
90 Gün		12.6	0	36.4	36.2	22.6
180 Gün		0	0	44.1	36.9	24.9

Benzer şekilde, çalışma kapsamında hazırlanan ve sodyum meta silikat içeren harç karışımları kalıplanmayı takiben 24 saat 75 °C sıcaklıkta kür edildikten sonra laboratuvar ortamında deney gününe kadar, sadece laboratuvar ortamında 180 güne kadar, kür edilen numunelere ait basınç dayanım sonuçları Tablo 4.5 da sunulmuştur.

Tablo 4.5 dan görüleceği üzere, kür durumu kendi içinde karşılaştırıldığında; %100 uçucu kül içeren karışımlarda dayanımlar kür süresinin başlangıcından sonuna kadar en yüksek dayanımı geliştirmiştir: Dayanım değerinin mertebesi ise 60 MPa olup, oldukça yüksek dayanım anlamına gelmektedir. Sadece çimento içeren karışımlar ise kür başlangıcından sonuna kadar diğer karışımlara göre en kötü performansı sergilemiştir, 180 gün sonunda dayanım değeri ise 26 MPa olmuştur. Sodyum silikatlı karışımlar için çimento kullanılmasına gerek olmadığı düşünülmektedir.

4.5 Sodyum meta silikat içeren 24 saat 75 °C sıcak kür edilen basınç dayanımının sonuçları

$\text{Na}_2\text{SiO}_3=120\text{g}$ & $\text{Su}=210\text{ g}$

Basınç *75 °C /24 saat etuv Kürü*

Uçucu kül Çimento	Basınç Dayanımı MPa				
	%100 / %0	%75 / %25	%50 / %50	%25 / %75	%0 / %100
1 Gün	45.1	47.8	41.2	22.7	10.6
3 Gün	46.1	47.8	42.5	24.8	11.6
7 Gün	50.5	50.4	44.8	26.3	12.3
28 Gün	52.8	52.6	47.1	27.1	12.1
90 Gün	56.3	53.3	47.6	30	19.2
180 Gün	62.3	57.6	47	33.6	26.1

4.3 Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

4.3.1 Sodyum hidroksit içeren harçlar

Çalışma kapsamında hazırlanan ve sodyum hidroksit içeren harç karışımları laboratuvar ortamında deney gününe kadar, sadece laboratuvar ortamında 180 güne kadar, kür edilen numunelere ait eğilme dayanım sonuçları Tablo 4.6 da sunulmuştur. Tablo 4.6 dan görüleceği üzere kür durumu kendi içinde karşılaştırılmak üzere, en yüksek eğilme dayanımı %75 uçucu kül ve %25 çimento içeren karışımlarda 180 inci günde elde edilmiştir. Elde edilen dayanım değeri ise 13 MPa mertebesinde. Sadece uçucu kül ile hazırlanan karışımlar ilk 7 gün dayanım geliştirememiş olmakla birlikte, 180 gün sonunda 10 MPa mertebesinde dayanım geliştirmiştir. Tüm harç karışımları oldukça iyi eğilme dayanımı geliştirmiş olup, dayanım değerleri 10 MPa mertebesinde olmuştur.

Sadece uçucu kül içeren karışıma nazaran %25 çimento ve %75 uçucu kül içeren karışımın dayanım gelişimi 180 günde en yüksek olmuştur. Dayanım açısından bakılarak ve kür süresi 180 gün olma halinde uçucu kül ve çimento ikamesi oranı arasında optimum bir değer olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmaya göre bağlayıcının çimento ve uçucu kül ile harmanlanma oranının optimum değerinin %75 uçucu kül ve %25 çimento olduğu sonucuna varılmıştır.

4.6 Sodyum hidroksit içeren oda sıcaklığında kür edilen eğilme dayanımının sonuçları

Eğilme		NaOH =78g & Su =150g				
		Ortam Kürü				
Uçucu kül	Çimento	Eğilme Dayanımı MPa				
		%100 / %0	%75 / %25	%50 / %50	%25 / %75	%0 / %100
1 Gün		0	1	2.1	3.7	4.8
3 Gün		0	1.6	3.1	4.9	5.8
7 Gün		0	2.5	4.5	5.6	5.1
28 Gün		2.7	4.9	6.9	7.4	6.5
90 Gün		8.9	9.9	9.3	9.1	7.8
180 Gün		10.2	13.6	10.1	10.1	8.7

Benzer şekilde, çalışma kapsamında hazırlanan ve sodyum hidroksit içeren harç karışımları kalıplanmayı takiben 24 saat 75 °C sıcaklıkta kür edildikten sonra laboratuvar ortamında deney gününe kadar, sadece laboratuvar ortamında 180 güne kadar, kür edilen numunelere ait eğilme dayanım sonuçları Tablo 4.7 da sunulmaktadır.

Tablo 4.7 dan görüleceği üzere, kür durumu kendi içinde karşılaştırıldığında; %75 uçucu kül ve %25 çimento içeren karışımlarda eğilme dayanımları kür süresinin başlangıcından sonuna kadar en yüksek eğilme dayanımı geliştirmiştir. Dayanım değerinin mertebesi ise 10 MPa dan başlayıp, 18 MPa değerine yükselmiştir. Bu değer oldukça yüksek eğilme dayanım anlamına gelmektedir. Sadece uçucu kül ile üretilen numuneler ise kür başlangıcından sonuna kadar, %75 uçucu kül içeren numune hariç olmak üzere, diğer karışımlardan daha yüksek eğilme dayanım (bakınız Tablo 4.7, 13 MPa) vermiştir. Sadece çimento içeren karışımlar ise kür başlangıcından sonuna kadar diğer karışımlara göre en kötü performansı sergilemiştir. Tablo 4.7 incelendiğinde, uçucu kül ve çimento ikamesi arasında yukarıda ki tartışmaya benzer olarak optimum bir harmanlama oranı olduğu anlaşılmaktadır. Bu harmanlama oranının ise %75 uçucu kül ve %25 çimento olduğu anlaşılmaktadır.

4.7 Sodyum hidroksit içeren 24 saat 75 °C sıcaklığında kür edilen numunelerin eğilme dayanımının sonuçları

NaOH =78g & Su =150g
75 °C /24 saat etüv Kürü

Eğilme		Eğilme Dayanımı MPa				
Uçucu kül	Çimento	%100 / %0	%75 / %25	%50 / %50	%25 / %75	%0 / %100
1 Gün		9.2	11.1	7.9	6.9	6.5
3 Gün		12.6	12.7	8.9	8.6	6.6
7 Gün		9.9	12.4	8.4	9.4	6.5
28 Gün		12.7	14.1	8.9	10.3	7.1
90 Gün		15.1	18.1	11.4	11.6	8.9
180 Gün		13.3	18.5	12.2	11.9	9.7

4.3.2 Sodyum meta silikat içeren harçlar

Çalışma kapsamında hazırlanan ve sodyum meta silikat içeren harç karışımları laboratuvar ortamında deney gününe kadar, sadece laboratuvar ortamında 180 güne kadar, kür edilen numunelere ait eğilme dayanım sonuçları Tablo 4.8 da sunulmuştur. Tablo 4.8 dan görüleceği üzere kür durumu kendi içinde karşılaştırılmak üzere, en yüksek eğilme dayanımı çimento oranı %50 ve daha fazla olan karışımlarda olmuştur. Elde edilen eğilme dayanımın değeri ise 180 gün sonunda 8 MPa mertebesinde dir. Sadece uçucu kül ve %75 uçucu kül içeren karışım ise iyi bir performans göstermemiş ve düşük dayanımlar sergilemiştir.

4.8 Sodyum meta silikat içeren oda sıcaklığında kür edilen numunelerin eğilme dayanımının sonuçları

$\text{Na}_2\text{SiO}_3=120\text{g}$ & $\text{Su}=210\text{ g}$
Eğilme Ortam Kürü

Eğilme Uçucu kül Çimento	Eğilme Dayanımı MPa				
	%100 / %0	%75 / %25	%50 / %50	%25 / %75	%0 / %100
1 Gün	2.3	1.6	5.2	5.6	4.4
3 Gün	2	1.2	5.5	5.7	5.6
7 Gün	1.3	0	6.3	6.3	5.6
28 Gün	2.5	0	7.8	6.8	6.5
90 Gün	2.4	0	7.9	7.6	7.5
180 Gün	0	0	8.2	7.9	8.1

Benzer şekilde, çalışma kapsamında hazırlanan ve sodyum meta silikat içeren harç karışımları kalıplanmayı takiben 24 saat 75 °C sıcaklıkta kür edildikten sonra laboratuvar ortamında deney gününe kadar, sadece laboratuvar ortamında 180 güne kadar, kür edilen numunelere ait eğilme dayanım sonuçları Tablo 4.9 da görülmektedir.

Tablo 4.9 dan görüleceği üzere, kür durumu kendi içinde karşılaştırıldığında; %100 uçucu kül ve 75 uçucu kül içeren karışımlarda eğilme dayanımlar kür süresinin başlangıcından sonuna kadar en yüksek eğilme dayanımı geliştirmiştir. Dayanım değerinin 10MPa mertebesinde başlayıp 12MPa değerine ulaşmıştır. Bu değerler oldukça yüksek eğilme dayanım anlamına gelmektedir. Çimento miktarı karışımlarda arttığı zaman dayanım gelişmelerinde olumsuzluklar gözlenmiştir.

4.9 Sodyum meta silikat içeren 24 saat 75 C sıcaklığında kür edilen numunelerin eğilme dayanımının sonuçları

		Na ₂ SiO ₃ =120g & Su =210 g				
		75 °C /24 saat etuv Kürü				
Eğilme	Uçucu kül / Çimento	Eğilme Dayanımı MPa				
		%100 / %0	%75 / %25	%50 / %50	%25 / %75	%0 / %100
	1 Gün	10.4	8.6	7.8	5.1	4.2
	3 Gün	11.6	11.2	7.7	5.3	4.9
	7 Gün	12.2	12.1	8.5	5.6	5.3
	28 Gün	12.6	12.5	8.9	5.9	5.1
	90 Gün	13.4	11.1	8.9	6.9	7.00
	180 Gün	12.6	12.9	8.2	5.5	7.6

4.4 Kür durumları ve zamanının arasında karşılaştırma

Sadece ortam kürüne maruz bırakılan numunelerin basınç ve eğilme dayanımları karşılaştırıldığında, 24 saat sıcak kür uygulamasının oldukça yararlı olduğu görülmektedir. Sıcak kür uygulaması kür başlangıcından sonuna kadar iyi performans sağlamış ve yüksek eğilme ve basınç dayanımları gelişimine sebep olmuştur. Bunun nedeni ise geopolimerik reaksiyonların sıcakla birlikte daha fazla hızlanmasıdır. Sıcak kür her iki aktivatör içinde benzer sonuçlara sebep olmuştur. Kür süresinin artması ise hem ortam küründe hem de sıcak kür durumunda eğilme ve basınç dayanımlarında oldukça olumlu gelişmelere sebep olmuştur.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 SONUÇLAR

Tez kapsamında laboratuvar çalışmasından elde edilen sonuçlar değerlendirildikten sonra, aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Karışım içerisinde kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, işlenebilirliklerin her iki aktivatör içinde iyileştiği görülmüştür. Bu ise uçucu külün yapısı ve ikamesi ile açıklanmıştır.
2. Sodyum hidroksit ile aktifleştirilen karışımların ortam küründe 180 gün sonunda, %75 uçucu kül içeriği için iyi bir performans sergilediği ve 40 MPa mertebesinde basınç dayanım geliştirdiği görülmüştür. Aynı durum için, %100 uçucu kül içeren karışımlarında 27 MPa basınç dayanım geliştirdiği anlaşılmaktadır, ilk 7 gün sıfır dayanım sergileyen karışım için oldukça olumlu bir sonuçtur.
3. Sodyum hidroksit ile aktifleştirilen karışımların başlangıçta 24 saat 75 C sıcaklığında kür uygulaması sonucunda karışımlar ortam kürüne göre daha iyi performans sergilemiştir. Sadece uçucu kül içeren karışım ortam küründe 27 MPa basınç dayanımı verirken, sıcak kür uygulaması sonucunda 45 MPa dayanım vermiştir. Uçucu kül oranı %75 olan karışımlar ise ortam küründe en yüksek 42 MPa dayanım verirken, sıcak kür uygulaması sonucunda bu değerin 72 MPa olduğu görülmüştür.
4. Sodyum hidroksit içeren karışımlarda, uçucu kül ve çimento harmanlaması için bir optimum değerin olduğu anlaşılmış olup, bu değerin ise %75 uçucu kül ve %25 çimento olduğu kanısına varılmıştır. Bu optimum değerin her iki kür durumu içinde geçerli olduğu düşünülmektedir.
5. Sodyum hidroksit içeren uçucu kül ve çimento ile birlikte hazırlanan karışımların eğilme dayanımları içinde benzer sonuçlara varılmakla beraber, eğilme dayanımlarının gelişimi basınç dayanımlarından daha iyi olmuştur.

6. Sodyum meta silikat ile hazırlanan karışımların ortam kürü dayanım gelişmeleri 40 MPa civarına varnakla birlikte, sadece uçucu kül içeren ve %75 uçucu kül içeren karışımlar olumsuz basınç dayanımı sergilemiştir.
- 7-Sodyum meta silikat içeren karışımlar üzerine sıcak kür uygulamasının çok olumlu sonuç verdiği görülmüştür. Bu kür durumunda çimento miktarı arttıkça basınç dayanımlarında düşüşler olmuştur.
- 8-Sodyum meta silikat içeren karışımlar için uçucu kül ve çimento harmanlaması için bir optimum değer oluşmamıştır. Bu karışımlarda çimento kullanılmasının faydalı olmadığı görülmüştür.
- 9-Sodyum meta silikat içeren karışımların eğilme dayanımları da basınç dayanımları gibi ortam ve sıcak kür uygulamasından benzer şekilde etkilenmiştir.
- 10-Her iki aktivatör içinde sıcak kür uygulamasının oldukça olumlu sonuç verdiği hem basınç hem de eğilme dayanımı sonuçlarında anlaşılmıştır.
- 11-Benzer şekilde kür süresinin de aynı davrandığı ve basınç ile eğilme dayanımlarında olumlu gelişmelere sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

5.2 ÖNERİLER.3

Tez kapsamında aşağıdaki öneriler yapılmıştır.Yukarıdaki sonuçlardan anlaşılaacağı üzere sodyum silikatlı karışımların içinde uçucu külle birlikte çimento kullanılmasına gerek yoktur. Sodyum hidroksit içeren karışımlarda ise sıcak kürde çok iyi sonuçlar alınmıştır. Ortam küründe ise kür süresinin uzun tutulmasıyla fena olmayan sonuçlara ulaşılmıştır. Bu nedenle daha uzun kür süreleri için ve ayrıca farklı dozajlarda aktivasyon ile yeni çalışmalar yapılabilir. Bu çalışmada sadece tek bir sıcaklık değeri çalışılmıştır, bu sıcaklığa ilave farklı sıcaklıklar göz önüne alınabilir. Bu çalışmada 75 C derece ve 24 saat süreyle sıcak kür uygulanmıştır, daha düşük sıcaklıklar ve 24 saatten kısa süreler de çalışma içine dahil edilebilir. Buna ilaveten karışımların dayanım geliştirmelerinin hangi sıcaklıkta sıfırlandığı da araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. F. Kapkaç, 2012, "**Çimento Çeşitleri, Özellikleri, Hammaddeleri ve Üretim Aşamaları**" maden teknik arama genel müdürlüğü maden etüt ve arama dairesi başkanlığı 223 - 232 Ankara.
2. A. Özodabaş, 2014, "**Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Harçların Performansının Geliştirilmesi**", Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 21-23.
3. H.Y. Aruntaş, 2006, "**Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Betonda Kullanım Potansiyeli**." Gazi Üniversitesi, Ankara, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1).
4. G. Güler, E.Güler, Ü. İpekoğlu, H. Mordoğan, 2005, "**Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları**" Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005, İzmir, Türkiye.
5. F. Özcan, C. Atiş, "**Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve hızlandırılmış Kür ile Dayanım Tahmini**", Doktora Tezi, Adana, 2005.
6. S. Yazıcıoğlu, E. Arıcı, T. Gönen, "**Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betondaki Karbonatlaşmaya Etkisi**", 5. Ulusal Beton Kongresi Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi , Ekim, 2003.
7. A. YEĞİNOBALI, 2003, "**Türkiye Çimento Mühendislik Birliği**", "Çimento yeni bir çağ malzemesi"Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EIE), 1982. "**Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri**." EIE Yayını. 82. 21-28.
8. O. ŞİMŞEK, Üçüncü Baskı 2009, "**Beton ve Beton Teknolojisi**" Teknik Bilimleri Dizisi:10 İSBN978-975-02-1012-9.
9. A. YEĞİNOBALI, 2003, "**Türkiye Çimento Mühendislik Birliği**", "Çimento yeni bir çağ malzemesi"
10. Turhan Y. ERDOĞAN, Birinci Baskı 2003, "**BETON**" İSBN:975-7064-67-X.
11. O. ŞİMŞEK, İkinci Baskı 2003 İstanbul, "**Yapı Malzemesi II**" Teknik Dizi :10, Yayın 1374, İSBN: 975-295-255-0.
12. M.A.TAŞDEMİR, "**ACE 2002 Sempozyumu / İ.T.Ü. İnşaat fakültesi**".

13. H. YALÇIN, M. GÜRÜ, 2006, "**Çimento ve Beton**"İSBN:9944-341-16-9.
14. M. A. TAŞDEMİR, "**ACE 2002 Sempozyumu / İ.T.Ü. İnşaat fakültesi**"YAYLACI E., 2010, "**Uçucu kül (Fly ash)**".
15. G. Güler, E. Güler, Ü. İpekoğlu, H. Mordoğan, 2005." **Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları**". Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005, İzmir, Türkiye.
16. J. DAVIDOVİTS, 2015, "**Presentation of Alkali Activated Materials are not Geopolymer**" Saint Quantin, France.
17. J. DAVIDOVİTS, 2008 "**Geopolimer Chemistry and Applications.**" Saint Quantin, France.
18. J. DAVİDOVİTS, 2008. "**They Built the Pyramids.**" Published by Institute Geopolimer, Saint Quentin, France.
19. B.A. Iatella, D.S. Pere, 2006, "**Adhesion of Glass to Steel Using Geopolymer**", Journal Matter 41:1261-1264.
20. J. DAVIDOVİTS, 4th edition, 2008, 2011, 2015, "**Geopolymer Chemistry & Application**"İSBN:9782951482098.
21. TS EN 197- 1, Çimento bölümü 1 Genel çimentolar "**Bileşimi, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri**". Türk standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
22. TS EN 196-1, "**Çimento Deney Metotları**" – Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 2002.
23. TS EN 1015-3, Kagit Harcı Deney Metotları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
24. F. Kılınçkale, 1995."Uçucu Küllü Çimento Üretiminde Uçucu Kül Öğütme Şekinin Çimento Özelliklerine Etkisi" Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiri Kitabı, ss 33-44, Ankara.
25. O. KARAHAN, C. ATİŞ, "**Su Gözü Uçucu Külün Beton Katkısı Olarak Kullanılabilirliği**" Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendislik Bölümü 38039/Kayseri, 405-416.
26. Charles Berryman, Jingyi Zhu, Wayne Jensen, Maher Tadros, 2004 "**High-**

Percentage Replacement of Cement with Fly ash for Reinforced Concrete Pipe"Cement and Concrete Research, 35, 1088-1091.

27. Erion LUGA, Cengiz Duran ATİŞ, 2015, "**Strength Properties of Slag/Fly ash Blends Activated with Sodium Metasilicate and Sodium Hydroxide + Silica Fume**"Online First (2016)paper 8270 DoI:10,3311/ppci.8270.

28. Etsuo Sakaia, Shigeyoshi Miyaharab, Shigenari Ohsawaa, Seung-Heun Lee, Masaki Daimon, Sep 2004 "**Hydration of Fly ash Cement**"Cement and Concrete Research, 35, 1135-1140.

29. A. Palomo, M.W.Grutzeck, M.T.Blanco, 1998 " **Alkali-Activated Fly ashes A Cement for the Future**" Cement and Concrete Research, 29, 1323-1329.

30. A.Fernández-Jiménez, J.G.Palomob, F.Puertasa, 1999 "**Alkali-Activated Slag Mortars Mechanical Strength Behaviour**" Cement and Concrete Research, 29, 1313–1321.

31. İlker Bekir TOPÇU1, Mehmet Uğur TOPRAK2, 2009,(**Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi**) Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University, Vol: XXII, No:2.

32. R.İ.Maleka, Z.H.Khalilb, S.S.Imbabyb, D.M.Roya, 2004, "**The Contribution of Class-F Fly ash to the Strength of Cementitious Mixtures**"Cement & Concrete Reasearch, 35, 1152-1154.

33. S.Türkel, V.Alabaş, 2002, " **İki Farklı Çimento İle Üretilen Betonların Basınç Dayanımına Değişik Buhar Kürü Uygulama Sürelerinin Etkileri**" ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, 14 Ekim 2002, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

34. C. Bilim, C. ATİŞ, 2011, "**Alkali Activation of Mortars Containing Different Replacement Levels of Ground Granulated Blast Furnace Slag**" **Duration**"Construction and Building Materials, 28, 708-712.

35. P. Rovnanit, 2010, "**Effect of Curing Temperature on the Development of Hard Structure of Metakaolin-Based Geopolymer**" **Duration**"Construction and Building Materials, 24, 1176-1183.

36. C.D.ATİŞ, E.B.Görür, O.KARAHAN, C. BİLİM, S.İLKENTAPAR, E.LUGA,

- 2015, **"Very High strength (120MPa) Class F Fly ash Geopolymer Mortar Activated at Different NaOH Amount, Heat Curing Temperature and Heat Curing Duration"**Construction and Building Materials, 96, 673-678.
37. Joseph Davidovits, Maria Izquierdo, Xavier Querol, Diano Antennuci, Henk Nugteren, Butselaar-Orthlieb, V., Constantino Fernández-Pereira, Yolanda Luna, 2014, **"The European Research Project GEOASH: Geopolymer Cement Based On European Coal Fly Ashes"**Geopolymer Institute Library, Technical Paper #22.
38. Dody M.J. Sumajouw, Djwantoro Hardjito, Steenie E., Wallah, and B Vijaya Rangan, 2005, **"Fly ash-Based Geopolymer Concrete: an Application for Structural Members"** Faculty of Engineering and Computing, Curtin University of Technology, Australia.
39. A.Fernández-Jiménez, J.G. Palomob, F. Puertasa, 1999 **"Alkali-Activated Slag Mortars Mechanical Strength Behaviour"**Cement and Concrete Research, 29, 1313- 1321.
40. Djwantoro Hardito, Steenie, E. Wallah, Dody M. J. Sumajouw, and B.Vijaya Rangan, 2005, **"On Development of Fly Ash- Based Geopolymer Concrete"**ACI Materials Journal, Title no.101-M.
41. Steenie E. Wallah, Djwantoro Hardjito, Dody M. J. Sumajouw, B. V. Rangan, 2005, **"Creep and Drying Shrinkage Behaviour of Fly ash-Based Geopolymer Concrete"** Faculty of Engineering and Computing, Curtin University of Technology Perth, Western, Australia, Australia.
42. Dody M. J. Sumajouw, Djwantoro Hardjito, Steenie, Wallah, B. Vijaya Rangan, 2005, **"Flexural Behaviour of Reinforced Fly ash-Based Geopolymer Concrete Beam"** Faculty of Engineering and Computing Curtin University of Technology GPO Box U1987, Perth 6845, Western, Australia.
43. İsmail KILIÇ, Abdullah KADAYIFÇI, Cengiz ÖZEL, 2007, **"Geri Dönüştürülmüş Atık Betonlarda Muğla-Yatağan Uçucu Külünün Etkileri"**Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11-2(2007), 187-193.
44. Muhterem KOÇ, M. Sadrettin ZEYBEK, 2014, **"Kalsit İlaveli Jeopolimer Malzemeleri Sinterlemenin Gözenekliliğe Etkileri"**,C.B.U.Journal of Science, 10.1, 25-31.

ÖZGEÇMİŞ

Yabancı Uyruklu, Öğrenci No: 4010531515, OMEED ALİ, 1977 yılında IRAK, BAĞDAT ta doğdu. İlkokulu, ortaokulu, Lise öğrenimini KERKÜK' te tamamlamıştır, TIKRİT Üniversitesi Mühendislik Fakültesinden İnşaat Mühendisi unvanıyla mezun olmuştur.1999, yılında bir yıl sonra Kerkük te elektrik bakanlığı, elektrik projelerinde işe başlamıştır, 2015 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans programına başladı.

İletişim Bilgileri :

Adres : Yeni Doğan Mah.,
TOKİ Küme evler,
C3-10, No:33,
TALAS/KAYSERİ

Telefon :0090 531 354 55 21

e-posta : omeedaga@gmail.com

Yabancı Dil : İngilizce, Arapça, Türkçe.

