

**KARO FABRİKASI ATIĞININ ÇİMENTO ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİ**

Fatih KOCAKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2016

Fatih KOCAKAYA tarafından hazırlanan “KARO FABRİKASI ATIĞININ ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Gazi Üniversitesi Yapı Eğitimi Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman:Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

İnşaat Mühendisliği (Teknoloji) Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Başkan:Prof. Dr. İlhami DEMİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Yrd. Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ

İnşaat Mühendisliği (Teknoloji) Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Savunma Tarihi : ... / ... / 2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Metin GÜRÜ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih KOCAKAYA

19/02/2016

KARO FABRİKASI ATIĞININ ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih KOCAKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2016

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, karo fabrikası atığının çimento üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, numune hazırlanmasında malzeme olarak CEM I (PÇ 42.5R) çimentosu, standart kum, karo fabrikası atığı ve Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Atık malzeme, Ankara'da üretim yapan bir karo fabrikasından hamur kıvamında alınmış ve deneylerde kullanılmadan önce laboratuvarında öğütülmüştür. Atık malzeme, çimento ile ağırlıkça % 0, % 5, % 10, % 15, % 20, % 25, % 30, % 35, % 40, % 45 ve % 50 oranlarında ikame edilerek toplam 11 farklı çimento numunesi elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan çimento hamuru ve çimento harçları, bu çimentolar kullanılarak ilgili standartlara göre üretilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, atık katkılı çimentoların normal kıvam su ihtiyacı, priz başı ve priz sonu süreleri ile özgül yüzey değerleri, çimento karışımındaki atık miktarı arttıkça artış göstermektedir. Diğer taraftan atık katkılı çimentoların yoğunluk ve basınç dayanımı değerleri ise çimento karışımındaki atık oranı arttıkça azalmaktadır. Sonuç olarak, karo fabrikası atığının çimento karışımında % 20 oranına kadar ikame malzemesi olarak kullanılabilmesi söylenebilir.

Bilim Kodu : 91131
Anahtar Kelime : Portland çimentosu, Karo fabrikası atığı, İkame malzemesi
Sayfa Adedi : 72
Danışman : Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

THE USABILITY OF TILE FACTORY WASTE IN CEMENT PRODUCTION

(M.Sc. Thesis)

Fatih KOCAKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2016

ABSTRACT

In this experimental study, the usability of tile factory waste in cement production was investigated. For this purpose, in sample preparation Portland cement type CEM I 42.5 R, standard sand, tile factory waste and Ankara tap water were used as material. Tile waste material was taken as paste from a tile factory in Ankara and ground in laboratory before they are used in the tests. Tile waste material was partially replaced (0-50 % by weight) with CEM I 42.5 R and 11 different cement samples were obtained. Cement pastes and cement mortars used in the tests were produced using this cement according to related standards. Experimental test results have shown that as the values of water demand for normal consistency, initial setting time and final setting time durations and specific surface of tile waste added cement increased, tile factory waste content in cement mix increased. On the other hand, while the values of density and compressive strength of tile waste added cement decreased, tile factory waste content in cement mix increased. As a result, tile factory waste can be used up to 20% as a replacement of cement in cement mixture.

Science Code : 91131
Key Words : Portland cement, Tile factory waste, Replacement material
Page Number : 72
Supervisor : Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ'a, yüksek lisansa başlamamda en büyük payı ve desteği veren lâkin bu süreçte Hakk'ın rahmetine ulaşan rahmetli babam A. Yaşar KOCAKAYA'ya, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok kıymetliannem Mediha KOCAKAYA'ya, biricik kardeşim Figen KOCAKAYA'ya, değerli eşim Ayşe Tuğba KOCAKAYA'ya ve evlatlarım Emir Yusuf KOCAKAYA ile Eren Yaşar KOCAKAYA'yateşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Çimento	3
2.2. Çimentonun Tanımı	3
2.3. Çimentonun Tarihçesi	5
2.4. Türkiye’de Çimento Sektörü	7
2.5. Dünya’da Çimento Sektörü	8
2.6. Çimentonun Üretimi ve Üretim Aşamaları	9
2.6.1. Çimentonun üretimi	9
2.6.2. Çimentoüretim yöntemleri	10
2.7. Çimento Çeşitleri	10
2.7.1. Portland çimentosu (PÇ)	13
2.7.2. Portland kompoze çimento	14
2.7.3. Yüksek fırın cürüflü çimentolar	15
2.7.4. Portland puzolanlı çimento	16

Sayfa

2.7.5. Portland silis dumanı çimento	17
2.7.6. Portland kalkerli çimento	17
2.7.7. Portland düşük ısıli çimento	18
2.7.8. Uçucu kül çimentoları	18
2.7.9. Traslı çimento	18
2.7.10. Alüminli çimentolar	19
2.7.11. Beyaz çimento	19
2.7.12. Renkli çimentolar	20
2.7.13. Sülfata dayanıklı çimentolar	20
2.7.14. Erken dayanımı yüksek çimentolar	21
2.7.15. Ultra erken dayanımı yüksek çimento	21
2.7.16. Hidrofob çimentolar	21
2.7.17. Antibakteriyel çimento	22
2.7.18. Oil-Well çimentosu	22
2.7.19. Katkılı çimento	22
2.7.20. Harç çimentosu	23
2.8. Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler	23
2.8.1. Çimentonun hammaddeleri	24
2.8.2. Çimento sanayinde kullanılan katkı maddeleri	30
2.9. Çimentoların Mekanik Dayanımları Ve Fiziksel Özellikleri	35
2.10. Çimentonun Özelliklerine Anabileşenlerin Etkileri	36
2.11. Çimentolarda Minör Bileşenler Ve Bunların Etkileri	36
2.12. Geri Dönüşümün Tanımı Ve Önemi	37
2.13. Atık Maddelerin Geri Dönüşümü İle İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar	38

	Sayfa
3. MATERYAL VE METOT	43
3.1. Materyal	43
3.1.1. Portland çimentosu	43
3.1.2. Standard kum	44
3.1.3. Su	44
3.1.4. Atık malzeme	45
3.2. Metot	46
3.2.1. Deneylerde kullanılan çimentoların üretilmesi	46
3.2.2. Deneylerde kullanılan çimentoların kimyasal analizleri	47
3.2.3. Üretilen çimentoların fiziksel ve kimyasal deneyleri	47
3.2.4. Deneylerde kullanılan çimentoların basınç dayanım deneyi	50
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	53
4.1. Çimentoların Kimyasal Kompozisyonuna Atığın Etkisi	53
4.2. Üretilen Çimentoların Standart (Normal) Kıvamına Atığın Etkisi	55
4.3. Üretilen Çimentoların Priz Başı Süresine Atığın Etkisi	56
4.4. Üretilen Çimentoların Priz Sonu Süresine Atığın Etkisi	57
4.5. Üretilen Çimentoların İnceliğine Atığın Etkisi	57
4.6. Üretilen Çimentoların Yoğunluğuna Atığın Etkisi	58
4.7. Üretilen Çimentoların Özgül Yüzeyine (Blaine) Atığın Etkisi	59
4.8. Çimentoların Basınç Dayanımına Atığın Etkisi	60
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
5.1. Sonuçlar	63
5.2. Öneriler	63
KAYNAKLAR	65

	Sayfa
EKLER	69
Ek-1. Resimler	70
ÖZGEÇMİŞ	72



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yeni çimento tipleri	12
Çizelge 2.2. Yürürlükten kalkacak olan çimentoların TS EN197-1'deki benzerleri	13
Çizelge 2.3. Çimentoların mekanik dayanımları ve fiziksel özellikleri	35
Çizelge 3.1. CEM I çimentosunun kimyasal analizi	43
Çizelge 3.2. CEM I çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri	44
Çizelge 3.3. Karo fabrikası atığının kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri	45
Çizelge 3.4. Laboratuarda üretilen çimentoların karışım oranları	46
Çizelge 4.1. Kontrol çimentosu ile üretilen AKÇ'lerin kimyasal analiz sonuçları	53
Çizelge 4.2. Kontrol çimentosu ile üretilen AKÇ'lerin fiziksel özellikleri	55
Çizelge 4.3. Üretilen çimentoların basınç dayanımları	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. AKÇ'lerin standart kıvam suyu – atık oranı ilişkisi	55
Şekil 4.2. AKÇ'lerin priz başı - atık oranı ilişkisi	56
Şekil 4.3. AKÇ'lerin priz sonu-atık oranı ilişkisi	57
Şekil 4.4. AKÇ'lerde incelik-atık oranı ilişkisi	58
Şekil 4.5. AKÇ'lerin yoğunluk-atık oranı ilişkisi	59
Şekil 4.6. AKÇ'lerin Özgül yüzey (Blaine)-atık oranı ilişkisi	60
Şekil 4.7. AKÇ'lerin basınç dayanımı–atık ikame oranı ilişkisi	62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Çimento	4
Resim 2.2. Klinker	5
Resim 2.3. Çimento üretim şeması	9



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
d	Yoğunluk (g/cm ³)
m	Çimentonun Ağırlığı (g)
V₁	İlk Okunan Hacim (cm ³)
V₂	Son Okunan Hacim (cm ³)

Kısaltmalar	Açıklama
AKÇ	Atık Katkılı Çimento
Al₂O₃	Alüminyum Oksit
C₃S	Trikalsiyum Silikat
C₃A	Trikalsiyum Alüminat
CaO	Kalsiyum Oksit
Fe₂O₃	Demir Oksit
K₂O	Potasyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
Na₂O	Sodyum Oksit
SiO₂	Silisyumdioksit
SO₃	Kükürtrioksit
SCaO	Serbest Kalsiyum Oksit
SD	Silis Dumanı
PÇ	Portland Çimentosu
UK	Uçucu Kül

Kısaltmalar	Açıklama
TS EN	Türk Standardı-Avrupa Normu
YFC	Yüksek Fırın Cürufu



1. GİRİŞ

Doğal kaynaklarımız, dünya nüfusunun artması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi nedeni ile her geçen gün azalmaktadır. Günümüzde doğal kaynakların korunması konusu giderek önem kazanmaktadır. Dikkatlice kullanılmadığı takdirde bir gün bu kaynakların tükeneceği bilinen bir gerçektir. Kaynakların sınırlı olduğu, tüketimin hızla arttığı dünyamızda son yıllarda üzerine ehemmiyet verilen konulardan birisi de geri dönüşümdür. Çok çeşitli atık malzemelerinde geri dönüşümü yapılmakta, atıklar bir hammadde gibi kullanılarak yeni bir maddeye dönüştürülmekte ve bu işleme "geri dönüşüm" denilmektedir [1].

Kaynak israfını önlemenin yanında, hayat standartlarını yükseltme çabaları ve ortaya çıkan enerji krizi vb. gibi gerçekleri gören gelişmiş ülkeler atıkların geri kazanılması ve tekrar kullanılması için çeşitli yöntemler aramış ve geliştirmişlerdir. Ne yazık ki ülkemizde, diğer gelişmiş ülkelere nazaran inşaat endüstrisinde geri dönüşüm miktarı yok denecek kadar azdır. Diğer ülkelerde asfalt, beton, agrega, ahşap vb. yapı malzemeleri geri kazanılarak yeniden hammaddeye dönüştürülmekte hem ekonomiye, hem de çevreye olan zararlı etkileri en aza indirilmektedir [1].

Endüstriyel ya da endüstriyel olmayan, atık ya da atıl malzemelerin depolanması ya da uzaklaştırılması Türkiye ve Dünyada geleceğin en büyük problemlerinden biri olarak görülmektedir. Bu problemin en mantıksal çözümlerinden biri atık malzemelerin yeniden kullanılabilirliğinin sağlanabilmesidir. Son yıllarda atıkların geri kazanımı konusunda inşaat sektöründe çok ciddi ve kayda değer çalışmalar yapılmaktadır [2].

Katı atıklarının önemli bir bölümünü oluşturan yapısal inşaat atıklarının geri dönüşümü, çevreye verilen zararları azaltacağı gibi büyük şehirlerde doğal agrega kaynaklarının şehir merkezlerinden çok uzak olmasından dolayı nakliye masraflarının yanında, nakliye sırasında harcanan iş ve zaman kaybını da azaltacağı düşünülmektedir [3].

Atıkların kullanılması ile çevre sorunları azalmakta, enerji tasarrufu ile ekonomi sağlanmakta ve doğal malzemelerin tüketimi de azalmaktadır. Ayrıca bazı atık ürünler, kendilerine özgü özellikleri nedeni ile kullanıldıkları alanda teknik yönden de iyileştirmelere ve daha kaliteli ürünler elde etmeye yaramaktadır [4].

Atıkların değerlendirilmesi, enerji tasarrufu ve betonda ekonomi sağlanması, beton özelliğinin iyileştirilmesi, yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılması konusunda puzolanların rolü üzerinde araştırmalar halen devam etmektedir [4].

Dünyada en yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden birisi de Portland çimentosu (PÇ)'dur. Özellikle son otuz yıldan beri PÇ'nin yanı sıra alternatif bağlayıcı maddeler veya ikame malzemeleri arayışı bilimsel ve endüstriyel düzeyde devam etmektedir. Gerek ekonomik ve gerekse teknolojik açılardan ele alındığında çimento ikame malzemeleri, yapı sektörünün geleceğinde önemli roller alacaktır [5].

Ülkemizde çimento esaslı çeşitli ürünler üreten fabrikalar bulunmaktadır. Bu fabrikalarda üretilen ürünler karo ile sınırlı kalmayıp, cephe kaplama, döşeme kaplama, beton direk, bordür taşı, yağmur oluğu, şev taşı, çim taşı ve çiçeklik gibi kullanışlı elemanlar da üretilmektedir. Üretimin bu derece geniş yelpazede olması dayanım maliyet değerini gündeme getirmektedir. Betonda maliyetlerin düşürülmesi için son zamanlarda, endüstriyel atıkların betonda kullanılması çalışmalarının yaygınlaştığı görülmektedir.

Ülkemizde olduğu kadar tüm dünyada da problem teşkil eden, merdiven, karo, mermer, doğal taş ve granit gibi malzemelerin atıkları maalesef yaygın olarak çöpe yani doğaya atılmaktadır. Karo fabrikası atığının organik özelliği olmadığı için tabiatta atıl vaziyette beklemektedir. Bununla alakalı çözümlere geçmeden önce, Ankara'da faaliyet gösteren bir karo fabrikasından sözlü alınan bilgilere göre, yıllık merdiven üretimi yaklaşık olarak 200 000 00 metretüldür. Karo üretimi ise, yıllık yaklaşık olarak 600 000 00 m²'dir. Bu sonuçlar aylara göre farklılık arz edebilir. Zira kışın inşaat malzeme talebinin azalması nedeniyle üretimde azalma seyrine girilmektedir. Atık miktarı yaklaşık yazın 30 ton/gün, kışın ise 20 ton/gün olmaktadır. Bunu ortalama 25 ton/gün alırsak yılda 300 ton atık açığa çıkmaktadır. Verilen bu değerler sadece bir firmaya ait olan verilerdir. Türkiye'de silim hattıyla çalışan karo, granit, mermer, doğal taş vb. üreten firmaların da atıklarını da ekleyince ortaya çıkan rakam önemli sonuçlara ulaşmaktadır. Bu çalışmada; karo fabrikasında üretim sırasında açığa çıkan atık malzemenin, çimento üretiminde ikame maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu atık malzemenin çimento üretiminde kullanılması ile hem çimentonun en pahalı bileşeni olan klinkerin azaltılması ile daha ucuz çimento üretiminin yapılması, hem de doğal malzeme kullanımının azaltılması ile çevre kirliliğinin önlenmesi ve böylece atık malzemenin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Çimento

Çimentolu harç ve beton gibi çimentolu ürünler, insanoğlunun geçmişte en fazla kullandığı ve gelecekte de en fazla kullanacağı yapı malzemesi olmakla beraber aynı zamanda en fazla küçümsenen ve özellikleri en az bilinen malzemelerdir. Belki de bunun nedeni ilk bakıştaki basit görünümleri ve kolay sanılan üretimleri olabilir [6].

Su ile tepkimesinde sertleşerek etrafındaki maddeleri birbirine yapıştırma özelliğine sahip malzemelere "Hidrolik Bağlayıcı" adı verilmektedir.

2.2. Çimentonun Tanımı

Çimento; hava ile suda sertleşen ve sertleştikten sonrada suda çözünmeyen hidrolik bağlayıcı bir maddedir [7].

Çimento kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince "caementum" sözcüğünden türemiş, sonraları "bağlayıcı" anlamında kullanılmaya başlamıştır. Esas olarak, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta pişirildikten sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Bağlayıcı madde olarak kullanılan ilk madde kireçtir [6].

Çimento, Latince'deki coemetum'dan, Fransızca'ya "cement", Almanca'ya "zement", Türkçe'ye ise İtalyanca'daki "Cemento"dan geçmiştir [7].

Çimento sektörü; başlıca Silisyum (Si), Alüminyum (Al), Kalsiyum (Ca) ve Demir oksitleri (Fe_2O_3) içeren hammaddelerin, teknolojik yöntemlerle sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen yarı mamul madde klinkerin tek veya daha fazla katkı maddesi ile öğütülmesi yoluyla üretilen hidrolik bağlayıcıları içeren bir sektördür [7].

Diğer bağlayıcı maddeler gibi çimentolar da CaO , MgO gibi alkalın ögeler ve SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi hidrolik ögelerden oluşur. Çimento bağlayıcılık görevini su ile tepkimeye

girdikten sonra kazandığı için hidrolik bağlayıcı olarak adlandırılır. Alkalin ve hidrolik öğelerin oranları bağlayıcı maddenin niteliğini belirler [6].

Genel anlamda çimento; havada ve suda sertleşebilen ve sertleştikten sonra su ve havanın etkisiyle çözülmeyen hidrolik bir bağlayıcı olarak tanımlanır. Silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitler ihtiva eden hammaddelerin sinterleşme derecesine kadar pişirilmesiyle elde edilen bir yarı mamul olan klinkerin bir veya daha fazla katkı maddeleriyle öğütülmesi sonucunda meydana gelmektedir. Klinker, % 76 – 78 CaCO_3 ve geri kalan kısmı kilden meydana gelen bir karışımın 1400 °C ile 1500 °C'de pişirilmesi ile meydana gelir. Çimentonun ilkel hammaddesi olan kalker taşı çimentonun % 65'ini teşkil eden CaO 'yu, kil ise diğer bileşenleri olan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 'ün meydana gelmesini sağlar. Özellikle 1.000 °C'ye kadar kireçtaşı CO_2 'yi verir ve geriye kalan CaO yani sönmemiş kireçtir. Meydana gelen bu kireç, diğer maddeler ile reaksiyona girer, böylece kalsiyum silikatlar ve kalsiyum alüminatlar teşekkül eder, bu esnada maddenin rengi sararır, artık bağlayıcı özellikler kazanmaya başlar [8].

Kirecin diğer maddelerle birleştirilmesi hammaddedeki Fe_2O_3 miktarı ne kadar çok olursa o kadar iyi olur. Bu sebeple gerekirse hammaddeye demir cevheri ilave edilebilir ve genellikle pişirme sıcaklığı da 1500 °C'den yüksek olmaz. Sıcaklık 1200 °C'nin üstüne çıktığı zaman renk grileşir, 1350 °C'de sinterleşme ve yüzeysel ergime başlar. Bu şekilde madde topaklanır ve sertleşir. 1400 °C ile 1500 °C'de kuvvetlenen bu durum sonucu meydana gelen kalsiyuma alüminoferitlerde takviye edilir. Bu şekilde klinker meydana gelir. Sonradan bu klinker içerisine %4-5 oranında alçı taşı eklenerek un kıvamında öğütülür ve böylece meydana gelen Portland çimentosu paketlenerek piyasaya arz edilir [8].



Resim 2.1. Çimento

Çimentolar, daneli malzemenin boşluğunda yer alan ve su ile birleştiğinde evvela bir hamur meydana getiren, sonra da sertleşerek dayanım kazanan ve böylece bir kütle meydana gelmesini sağlayan ve genel bileşenleri itibariyle, kil ve kireç bünyeli bağlayıcımalzeme olarak da tanımlanabilir [9].



Resim 2.2. Klinker

Döner fırından çıktığında fındık büyüklüğünde olan ve klinker adı verilen bu maddeye % 3-5 kadar alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) veya daha az oranlarda yüksek fırın cürufu, kil ve benzeri maddeler eklenerek ince toz halinde öğütülürse çimento elde edilir [6].

2.3. Çimentonun Tarihçesi

Çimentonun kullanımı M.Ö. 2000'li yıllara kadar uzanmaktadır. Eski Mısırlılar'ın kalsine edilmiş killi jipsten oluşan bir tür çimento kullandıkları, Anadolu'daki Hattuşuş ve Boğazkale gibi antik Hitit kentlerinde de kireç ile doğal puzolanik toprakların karıştırılarak harç yapıldığı bilinmektedir. Avrupa'da ise ilk kez İtalya'da, Büyük Roma İmparatorluğu'nun Sezar döneminde (MÖ 12-14 yy.) Caliquila Whart yapılarında çimentoyu kullanmıştır. 1756 yılında John Smeaton, İngiltere'nin Cornwall sahilindeki Eddystone deniz fenerinin yeniden yapımında yumuşak kalker ve kilden üretilen bir çimento kullanmıştır. İlk olarak 1824 yılında İngiltere'de üretilen çimentoyapı malzemeleri arasında en önemli yeri tutmaktadır. Amerika'daki ilk Portland çimentosu üretimi ise 1871 yılında David O. Saylor tarafından gerçekleştirilmiştir [7].

Çimento yapımına elverişli maddelerin, çimentonun geçmişi ile betonun öyküsü antik çağlara kadar dayanır. Çimentodan önce kullanılan en önemli yapı malzemesi kireç taşı ve alçıydı. Bugün dünyada bağlayıcı yapı malzemesinin en önemlisi kabul edilen çimento ilk kez İngilizler tarafından imal edilmiştir. 1786 yılında İngiliz mühendis John Smeaton yaptığı deneyler sonucunda en iyi kirecin yumuşakkalkerden elde edildiğini tespit etmiş ve hidrolik kirecin yalnızca killi kalkerden elde edileceğini bulmuştur [8].

Sontwick İngiltere’de 1810 yılında Edgar Dobs kireçtaşı ile kilden bir çimento imal etmiştir. 1874 yılında Joseph Aspdin tarafından İngiltere’de Portland adasındaki tabii kireç taşına benzemesi nedeniyle Portland ismini verdiği bu taşın suni olarak elde edilebileceği anlaşılmış ve 1845 yılında I.C. Johnson tarafından “Portland Çimentosu” (PÇ) ismi ile piyasaya çıkarılmıştır. İlk PÇtipki sönmemiş kireç yapımında olduğu gibi dik fırınlarda yapılmıştır. 1883 yılında yüksek fırın cürufu klinker üretiminde hammadde olarak kullanılmıştır. 1892 yılında bugünkü anlamda ilk cürufu çimento fabrikası işletmeye alınmıştır. 1909 yılında demirli Portland’da belirli normlar verilmiştir [8].

Günümüzde kullandığımız çimentonun üretimine ilişkin bilinen ilk uygulamalar, 1756 yılında J. Smeaton’un bir deniz feneri inşa ederken pişirerek elde ettiği su kireci hakkında “en iyi Portland taşına denk” (İngiltere’ye bağlı portland adasındaki tabii bir taş) ifadesini kullanması ve 1796 yılında J. Parker’ın bir killi kalker taşını pişirerek elde ettiği bağlayıcıdan çok iyi sonuç alması ve buna da Romalıların kullandığı su kirecine izafeten Romen Çimentosu adını vermesi ile çimento üretiminde ilk adımlar atılmıştır [10].

1824’te Joseph Aspdin’in bulmuş olduğu çimento, kalker ve kilin kalsinasyonu sonucu elde edilmiştir. Daha sonra 1838de İsaac Johnson tarafından pişirme sıcaklığı yükseltilerek ve öğütmeye önem verilerek üretilen çimento, daha yavaş sertleşmekteydi ve daha üstün niteliklere sahipti. Modern çimento üretim yöntemlerine en yakın yöntemler ise 1850’lerin sonlarında uygulandı [10].

Türkiye’de ilk çimento fabrikası 20 000 ton/yıl kapasite ile 1911 yılında Kocaeli Darıca’da kurulmuştur. Daha sonra bu fabrika 1923 yılında genişletilerek kapasitesi 40 000 ton/yıl’a yükseltilmiştir [7].

2.4. Türkiye’de Çimento Sektörü

Dünyada çimento üretimi ve satışı 1878 yılında başlamış olmasına rağmen Türkiye’nin çimento sektörü ile tanışması 1911 yılında özel sektör girişimi ile olmuştur. Fabrika Kocaeli’nde 20 000 ton/yıl kapasiteli olarak Darıca’da kurulmuştur. (Aslan Çimento). 1913 yılında Eskişehir Çimento Fabrikası 20 000 ton/yıl, 1926 yılında Bakırköy Çimento Fabrikası (Kent Çimento) 14 000 ton/yıl, 1928 yılında Ankara Çimento ve 1929 yılında Zeytinburnu Çimento 40 000 ton/yıl kapasiteyle kurulmuştur [8].

İlk çimento fabrikaları 100-150 ton/gün ve 60-70 ton/gün kapasiteli inşa edilmiştir. Ülkenin az bir çimento ihtiyacını karşılayan bu fabrikalar, büyük miktarlarda ithalatın yapıldığı 1920 yılına kadar yıpratıcı bir iç piyasa rekabetine girmişlerdir. Bu devrede milli bir sanayi kolu mahiyeti taşıyan çimento sanayisine Devlet müdahalesi mevzu bahis olmamış ve çimento fiyatları düşmüştür [11].

Çimento üretimi Ankara ve Sivas’ta kurulan fabrikalarla 1950 yılında 515 000 tona ulaşmıştır. 1950 yılında kişi başına çimento tüketimi 25 kg olmuştur. 1953 yılında Türkiye Çimento ve Toprak Sanayi T.A.Ş. bir Kamu İktisadi Teşebbüsü olarak 50 milyon TL sermaye ile Türkiye’nin değişik bölgelerinde artan yüksek talebi yerinde ve minimum taşıma maliyetiyle karşılayacak şekilde çimento üretimine başlamak üzere kurulmuştur. Bu şirketin planladığı faaliyetler arka arkaya üretime geçmiştir [8].

1950 ve 1960 yılları arasında çimento sanayi sektörü önemli gelişmeler göstermiştir. Yıllık 515 000 ton olan üretim kapasitesi 10 yılda 2,10 milyon tona çıkarken fabrika adedi de 5’ten 13’e yükselmiştir. Diğer taraftan mevcut fabrikalar da önemli ölçülerde büyümüş ve gelişmiştir. 1960 yılında toplam kapasite 2,10 milyon ton iken, bu değer 1965 yılında 3,85 milyon tona, 1967 yılında 4,50 milyon tona, 1972 yılında 7,30 milyon tona ve 1977 yılında 12,90 milyon tona ulaşmıştır. Beş yıllık kalkınma planı geçiş dönemi sayılan 1978 yılında çimentoya olan talep maksimum değerine ulaşarak 14,20 milyon ton olmuştur. 1978 yılından sonra Türkiye’nin içine girmiş olduğu ekonomik bunalım çimento sektörünü de etkilemiş ve çimentoya olan talep azalarak 11,60 milyon tona kadar inmiştir. 1984 yılında çimentoya olan talep artış göstererek tüketim 13,80 milyon tona ulaşmıştır. 1987 yılında ise üretim 22,00 milyon tona yükselmiş, tüketim ise 23,40 milyon tona kadar ulaşmıştır. Bu durum Türkiye’nin çimento ithal eden bir ülke görünümüne girdiğini ifade etmektedir.

1988 yılında çimento üretimindeki artış % 3,2 olup 22,70 milyon tona ulaşmıştır. 1989 yılında üretim % 5 artarak 23,80 milyon ton olmasına rağmen tüketim % 1,6 azalışla 23,40 milyon ton olmuştur. Kişi başına tüketim ise 421 kg'dır. 1991 yılında çimento üretimi bir önceki yıla göre % 7,5 artarak 26,30 milyon ton olmuş, tüketim ise 24,30 milyon ton olmuştur. 1992 yılında Türkiye'de çimento üretimi 28,60 milyon tona ulaşarak bir önceki yıla göre % 8,9 artış göstermiştir. Çimento tüketimindeki artış ise % 6,7 olmuş, kişi başına çimento tüketimi 440 kg olmuştur. 2001 yılında Türkiye'de çimento üretimi 30 milyon tonken, 2005 yılında 42 milyon ton, 2008 yılında 57 milyon ton olup 2009 yılı sonu itibariyle 60 milyon tona ulaşmıştır [8].

Dünya çapında ilk 10 içinde yer alan Türk çimento sektörü, 2007 yılında 42 milyon tonklinker, 52,5 milyon tonçimento kapasitesiyle üretim açısından Avrupa'da üçüncü sırada yer alıyor. İhracatta dünya ikincisi olan sektör, Avrupa'da ise birinci konumdadır [12].

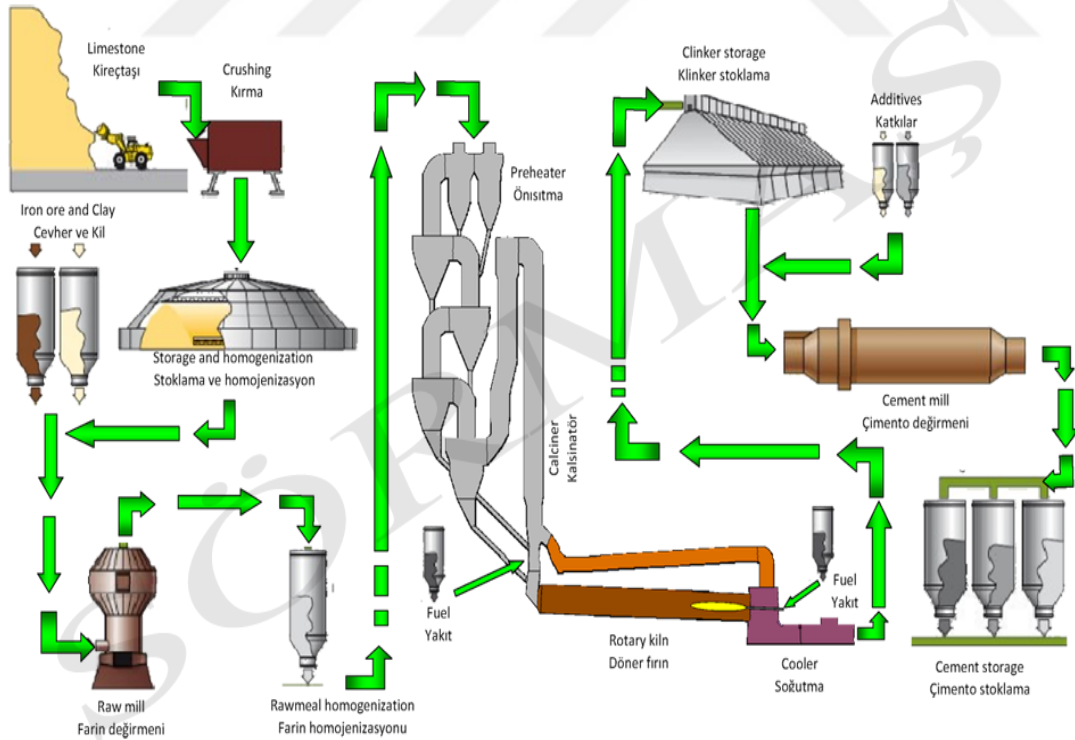
2.5. Dünya'da Çimento Sektörü

Dünyada, çimentonun endüstriyel üretime geçişi olarak bilinen ilk patent 1824 yılında Joseph Aspdin tarafından alınmıştır. 1850 yılında İngiltere'de 4 adet çimento fabrikası kurulmuştur. Bu tarihten sonra Almanya ve Fransa'da ilk çimento fabrikaları üretime başlamıştır. 1870'den itibaren ABD' de çimento endüstriyel çapta üretilmeye başlanmıştır. Döner fırınlar 1877 yılında İngiltere'de kullanılmaya başlanmış ancak bu yöntem fazla beğeni kazanmamıştır. Endüstriyel olarak 1893 yılında Avrupa'da döner fırınlar kullanılmaya başlanmış ve 1903 yılında İngiltere, ABD'den ilk döner fırın ithali yapmıştır. Fransa'da 1830 yılında A. Pavin de Lafarge ve J. Bied tarafından ilk büyük Portland çimento fabrikası kurulmuştur. Dünyada çimento üretimi 2000 yılı sonu itibariyle 1,23 milyar ton civarında olup, Çin yıllık üretim miktarı ile birinci sırada yer almaktadır. Türkiye'nin dünya üretimindeki payı % 2-3 civarındadır [8].

2.6. Çimento Üretimi ve Üretim Aşamaları

2.6.1. Çimentonun üretimi

Çimento üretiminde, belirli oranlarda kalker, kil karışımının içine ergimeyi kolaylaştırmak için demir filizi içeren toprak katılır. Karışım, döner fırında 1400°C 'ye kadar pişirilir. Pişirilen maddenin ani soğutulması sonucu meydana gelen fındık büyüklüğündeki granüle malzemeye klinker denir. Klinkerin dört ana bileşeni olan karma oksitler, dikalsiyum silikat ($\text{C}_2\text{S}=2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), trikalsiyum silikat ($\text{C}_3\text{S}=3\text{CaO}.\text{SiO}_2$), trikalsiyum alüminat ($\text{C}_3\text{A}=3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) ve tetra kalsiyum alümino ferrit ($\text{C}_4\text{AF}=4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$)'dir. Klinkerin çimentoya dönüşmesi yani bağlayıcı özellik kazanması için, alçı taşı katılıp çok ince öğütülmesi gerekir. Alçı taşının görevi priz süresini ayarlamaktır. Karma oksitler suyla karıştırıldıklarında derhal hidrate olmaya ve kristal yapıya dönmeye hazırdırlar, hidrate ürünler ve hidratasyon hızları her karma oksitte farklıdır. Çimentoların hidratlaşması ekzotermik bir olaydır [13].



Resim 2.3. Çimento üretim şeması

2.6.2. Çimentoüretim yöntemleri

Çimento hammaddeleri olan kil ve kalker belirlili oranlarda homojen bir şekilde karıştırmak için iki yöntem kullanılır. Bunlar yaş ve kuru yöntemdir. Günümüzde hammadde hazırlanmasında teknolojik gelişmelerden dolayı hammadde durumu ne olursa olsun, doğrudan doğruya kuru yöntemin uygulanması daha doğru bulunmuştur. Bugün bütün modern çimento fabrikaları, daha az yakıt sarfiyatından dolayı kuru yöntemi kullanmaktadır. Dünya çimento üretiminin % 90'ı kuru yöntemle sağlanmaktadır [8].

Yaş yöntem

İlkel malzemenin yumuşak ve nem oranının % 20'den fazla olması halinde bu yöntem uygulanır. Bileşim kontrolü daha kolay sağlanmakta ancak kuru yönteme göre daha fazla enerji ve yakıt sarfiyatı olmaktadır. Yakıt sarfiyatının artması nedeniyle bugün dünyadaki çimento üretiminin ancak % 10'u yaş yöntemle yapılmaktadır. Kuru yöntemden farklı olarak şöyle uygulanmaktadır; analizler sonucunda birbirine karıştırılacak miktarları tespit edilmiş olan ilkel maddelerden kil önce büyük havuzlara gönderilip su içinde dağılması sağlanır. Daha sonra kalkerle birlikte yaş olarak değirmende öğütülmekte ve buradan tekrar havuzlara gönderilmektedir. Bu havuzlarda karışım homojen hale getirilmektedir. Bundan sonraki işlemler kuru yöntemdeki gibidir [8].

Kuru yöntem

Bu yöntem Almanların geliştirdikleri Waermeaustauscher sistemine göre uygulanmaktadır. Waermeaustauscher yönteminde, Kalsinasyon işlemi siklonlarda olmakta ve bunun için dört adet siklon kullanılmaktadır. Titrasyonun istenilen orana getirilmiş farin bu siklonlardan yukarıdan aşağı inerken, aşağıdan ve ters istikametten gelen sıcak gazla karışır ve H₂O CO₂ kaybederek fırına gelir [8].

2.7. Çimento Çeşitleri

Çimentolarla ilgili yeni Türk standardı TS EN 197-1 "Genel çimentolar standardı" aşağıda verilen 5 ana başlıkta gruplandırılmıştır;

CEM I	: Portland çimentosu
CEM II	: Portland-kompoze çimento
CEM III	: Yüksek fırın cürüflü çimento
CEM IV	: Puzolanlı çimento
CEM V	: Kompoze çimento

Bu ana tipler Çizelge 2.1’de gösterilen toplam 27 çimento tipini kapsamaktadır.

Çimentoların çizelgedeki bileşimleri ana bileşenler ile minör ilave bileşenlerden oluşmaktadır.

TS EN 197-1 standardında çimentoların tanımı

Ana çimento tipi,

Portland çimentosu klinkeri oranı,

İkinci ana bileşen,

Standart dayanım sınıfı (28 günlük) ve erken dayanım kazanma hızı dikkate alınarak yapılmıştır.

TS EN 197-1’deki değişik çimento tiplerine göre çimentonun bileşen malzemeleri şu şekildedir;

Ana bileşen, (Örnek, Portland çimentosu klinkeri);

İkinci ana bileşen, (Örnek, UK, YFC, kalker, SD); (majör katkılar)

Minör ilave bileşen, (Örnek, UK, YFC, kalker, doğal puzolan)

Priz ayarlayıcı, (Örnek, kalsiyum sülfat, alçıtaşı)

Kimyasal katkılar, (Örnek, pigmentler, hava sürükleyici katkılar).

Çizelge 2.1. Yeni çimento tipleri

Ana Tipler	Çimento Tipleri ve İşaretleri		Bileşim (kütlece % olarak)										Minör İlave Bileşen	
			Ana Bileşenler											
			Klinker	Yüksek Fırın Curufu	Sütlü dumanı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker			
Doğal	Doğal Kalsine Edilmiş	Silissi				Kalkersi	L	LL						
			K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
CEM II	Portland - Curufu	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
	Portland - Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
	Portland - Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/A-Q	80 - 94	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-Q	65 - 79	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	Portland - Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-V	65 - 79	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/A-W	80 - 94	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-W	65 - 79	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	0 - 5
	Portland - Pişmiş Şistli	CEM II/A-T	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	0 - 5
		CEM II/B-T	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	0 - 5
	Portland - Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	0 - 5
		CEM II/B-L	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	0 - 5
		CEM II/A-LL	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B-LL	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	0 - 5
	Portland - Kompoze	CEM II/A-M	80 - 94	←-----					6 - 20	-----→				
CEM II/B-M		65 - 79	←-----					21 - 35	-----→					0 - 5
CEM III	Yüksek Fırın Curufu Çimento	CEM III/A	35 - 64	36 - 65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM III/B	20 - 34	66 - 80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM III/C	5 - 19	81 - 95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
CEM IV	Puzolanlı Çimento	CEM IV/A	65 - 89	-	←-----		11 - 35	-----→		-	-	-	0 - 5	
		CEM IV/B	45 - 64	-	←-----		36 - 55	-----→		-	-	-	0 - 5	
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40 - 64	18 - 30	-	←-----		18 - 30	-----→		-	-	-	0 - 5
		CEM V/B	20 - 38	31 - 50	-	←-----		31 - 50	-----→		-	-	-	0 - 5

İptal edilen çimento standartlarındaki genel çimento tiplerinin yerlerini Çizelge 2.2’de gösterildiği şekilde TS EN 197-1’deki benzerleri almaktadır. Tablodaki eşleştirmeler klinker dışındaki ana bileşenlerin, yani ana bileşen katkıların yüzde miktarları dikkate alınarak yapılmıştır. Benzer dayanım sınıfları itibara alınacaktır. Doğal olarak 1997’den sonra yürürlüğe girmiş standartlardaki (TS 12139 –12144) çimentolar ile TS EN 197-1’deki benzerleri arasında sadece isim veya notasyon farkı söz konusudur [6].

Çizelge 2.2. Yürürlükten kalkacak olan çimentoların TS EN197-1'deki benzerleri

<i>Yürürlükten Kalkacak Olanlar</i>			<i>TS EN197-1'deki Benzerleri</i>		
Standard No ve isim	Notasyon	Anabileşen Katkı, %	İsim	Notasyon	Anabileşen Katkı, %
TS 19 Portland Çimento	PÇ	0	Portland Çimento	CEM I	0 - 5
TS 20 Cürüflü Çimento	CÇ	20 - 80	Portland Cürüflü Çimento	CEM II/B-S	21 - 35
			Yüksek Fırın Cürüflü Çimento	CEM III/A	36 - 65
				CEM III/B	66 - 80
TS 26 Traslı Çimento	TÇ	20 - 40	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/B-P	21 - 35
TS 640 Uçucu Küllü Çimento	UKÇ	10 - 30	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	6 - 20
				CEM II/B-V	21 - 35
TS 809 Süper Sülfat Çimentosu	SSÇ	> 65	Yüksek Fırın Cürüflü Çimento	CEM III/B	66 - 80
				CEM III/C	81 - 95
TS 3646 Erken Dayanımı Yüksek Çimento	EYÇ	0	Portland Çimento	CEM I/52.5R	0
TS 10156 Katkılı Çimento	KÇ	<19	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	6 - 20
TS 12139 Portland Cürüflü Çimento	PCC/A	6 - 20	Portland Cürüflü Çimento	CEM II/A-S	6 - 20
	PCC/B	21 - 35		CEM II/B-S	21 - 35
TS 12140 Portland Kalkerli Çimento	PLÇ/A	6 - 20	Portland Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	6 - 20
	PLÇ/B	21 - 35		CEM II/B-L	21 - 35
TS 12141 Portland Silika Füme	PSFÇ	6 - 10	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	6 - 10
TS 12142 Kompoze Çimento	KZÇ/A	(18-30)+(18-30)	Kompoze Çimento	CEM V/A	(18-30)+(18-30)
	KZÇ/B	(31-50)+(31-50)		CEM V/B	(31-50)+(31-50)
TS 12143 Portland Kompoze Çimento	PÇK/A	6 - 20	Portland Kompoze Çimento	CEM II/A-M	6 - 20
	PÇK/B	21 - 35		CEM II/B-M	21 - 35
TS 12144 Puzolanik Çimento	PZÇ/A	11 - 35	Puzolanik Çimento	CEM IV/A-M	11 - 35
	PZÇ/B	36 - 55		CEM IV/B-M	36 - 55

2.7.1. Portland çimentosu (PÇ)

Betonarme yapılarda kullanımı en yaygın çimento türüdür. PÇ belirli oranda kalker taşı (CaCO_3) ve kilin (SiO_2 ve Al_2O_3) karıştırılıp döner fırında pişirilmesinden sonra biyeli değirmende öğütülmesiyle elde edilir. Çimentonun sertleşmesini geciktirmek üzere klinkere bir miktar alçı taşı da eklenir [6].

PÇ uygun oranlarda birleştirilen kalkerli ve killi hammadde karışımının döner fırın denilen fırınlarda yaklaşık 1451 °C'ye kadar pişirilmesi ile elde edilen ve klinker denilen ürünün soğuduktan sonra, %3-6 oranında alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilmektedir [8].

TS EN 197-1'e göre ülkemizde üretilen PÇ, en son şekliyle aşağıda görüldüğü gibi üç tiptir;

CEM I 32,5 (Normal Portland Çimentosu)

CEM I 42,5 (Yüksek Dayanımlı Çimento)

CEM I 52,5 (Yüksek Dayanımlı Çimento)

PÇ, 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 birçoğunun birleşimlerinde yer almaktadır [11].

Yüksek dayanımlı çimentolar (CEM I 42,5 ve CEM I 52,5), Normal Portland Çimentosuna (CEM I 32,5) göre; daha fazla kalker içerirler ve daha ince öğütülmüşlerdir. Bileşiminde C3S daha fazla olduğundan dayanımları daha fazladır. Bu nedenle PÇ 32,5'a kıyasla daha fazla Ca(OH)_2 oluşur. Bu yüzden kimyasal dayanıklılıkları daha azdır. Bu çimentolar yüksek yapılar için arzu edilen özelliklere sahiptirler. Ancak barajlar, deniz yapıları, sülfatlı zeminlerde yapılacak inşaatlar için uygun değildirler. En çok kullanılan çimento türüdür. Portland Çimentosu (CEM I), zemininde veya yer altı suyunda sülfat buldurmeyen normal betonarme yapılar için uygundur [6].

2.7.2. Portland kompoze çimento

Portland kompoze çimento (PKÇ) klinkerle puzolanik veya hidrolik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesiyle elde edilen çimentodur. PKÇ ihtiva ettikleri katkı maddelerine göre 7 çeşit olarak üretilirler.

Bunlar sırasıyla;

1. Portland Cürufli Çimento,
2. Portland Silis Dumanlı Çimento,
3. Portland Puzolanlı Çimento,

4. Portland Uçucu Küllü Çimento,
5. Portland Pişmiş Şistli Çimento,
6. Portland Kalkerli Çimento,
7. Portland Kompoze Çimento olarak isimlendirilmiştir.

Portland kompoze çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre; PKÇ 32,5 N, PKÇ 35,5R, PKÇ 42,5 N, PKÇ 42,5R, PKÇ 52,5 N, PKÇ 52,5 R olmak üzere 6 tiptir. Genel amaçlı her bina ve normal inşaatlarda ve düşük hidrasyon ısısı istenen betonlarda kullanılır [8].

2.7.3. Yüksek fırın cürufu çimentolar

YFC (ham demir üretimi artığı) aniden soğutulduğunda, amorf ve camsı yapıdadır. YFC Portland klinkeri ile karıştırılıp, alçı taşı eklenmesinden sonra birlikte öğütülerek veya ayrı ayrı öğütüldükten sonra karıştırılması ile çimento haline getirilir. YFC'nin klinkere oranla daha zor öğütülebilir olması, birlikte öğütme koşullarında klinkerin ince, cürufun ise daha kaba kalmasına neden olur. Bu nedenle ayrı ayrı öğütme koşullarında elde edilen cürufu çimento ile yapılan betonlarda işlenebilirlik ve dayanım bakımından daha iyi sonuçlar alınmaktadır [6].

Demir elde edebilmek için, demir cevherlerinin “yüksek fırın” olarak adlandırılan fırınlarda çok yüksek sıcaklıklara kadar (yaklaşık 1600 °C sıcaklığa kadar) pişirilerek, oksitli bileşiklerden ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekmektedir. Kok kömürünün (karbon'un) yakıt olarak kullanıldığı bu fırınlarda ayrıca, arıtma işlemine yardımcı olabilmesi için kalkertaşı da cevherlerle birlikte ısıtılmaktadır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle, kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit gazları oluşturarak fırını terk etmektedir. Geride, eriyik durumda demir ve eriyik durumda olan CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi yabancı maddeler kalmaktadır. Demirin yoğunluğu, yabancı maddelerden daha yüksek olduğu için, eriyik durumdaki demir, fırının en alt bölümünde ve eriyik durumdaki diğer malzemeler ise, demirin hemen üzerinde yer almaktadır. Demir ve diğer malzeme topluluğu ayrı ayrı çıkışlardan dışarı çıkarılmaktadır. Elde edilen yabancı maddeler YFC olarak adlandırılmaktadır [14].

Cüruflu çimentoların hidrasyonu daha yavaş geliştiğinden, daha uzun süre kür gerektirir. Bu nedenle kurak iklimli bölgelerde kullanılması doğru değildir. Sülfatlı sular, deniz suları, klorlu sular, karbonatlı sular, termal sular, buz çözücü maddeler vb. ile yapılan uzun süreli deneyler sonucunda cüruflu çimentoların zararlı kimyasal etkiler altında performanslarının yüksek olduğu belirlenmiştir [6].

Cüruflu çimento klinkerle kütlece % 20-80 arasında cürufun az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesiyle elde edilen çimentodur. Cüruflu çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre; (CÇ 32,5), (CÇ 42,5) olmak üzere iki tiptir. Çok etkili korozyonların olmadığı yerlerde kullanılır [8].

Portland cüruflu çimentolar 28 günlük basınç dayanımlarına göre PCC 32,5, PCC 32,5R, PCC 42,5, PCC 42,5R, PCC 52,5, PCC 52,5 R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa standartlarında alınan bir çimento çeşididir. Çok etkili korozyonların söz konusu olmadığı durumlarda kullanılır [8].

2.7.4. Portland puzolanlı çimento

Ülkemiz için en önemli çimento türü, doğal puzolan kullanılarak üretilen Portland puzolanlı çimentolardır (CEM II/AB-PQ). Bu tip çimentolar önceki yıllarda Traslı ve Katkılı çimentolar olarak tanımlanmaktaydı. Portland puzolanlı çimentolarda TS EN 197-1'e göre, doğal ve doğal kalsine edilmiş puzolan miktarı % 6-35 arasındadır. Portland puzolanlı çimento üretimi, klinker, puzolanik madde ve bir miktar alçı taşı karışımının birlikte öğütülmeleri ile yapılmaktadır. Fırına girmeyen malzeme miktarının fazlalığı, bu tip çimentonun üretiminin ekonomik olmasını sağlar. Puzolanlı çimentoların olumlu ve olumsuz yönleri aşağıda verilmiştir [6].

Olumlu yönleri;

- Ülke ekonomisi açısından yararlıdır,
- Üretim sırasında daha az çevre kirliliği yaratır,
- Zararlı ortamlara dayanıklıdır,
- Hidrasyon ısısı düşüktür,
- İyi kohezyon özelliği vardır,

- Uzun süreli dayanım artışı gösterir.

Olumsuz yönleri;

- İlk dayanımların nispeten düşüktür,
- Daha iyi bakım gerektirir,
- Soğuk bölgelerde daha dikkatli kullanım gerektirir,
- Çok ince trasla öğütülmüş çimentolarda erken rötre olayı fazladır.

Puzolanik çimento, ihtiva ettikleri toplam katkı maddeleri miktarına göre iki sınıfa ayrılırlar;

- Kütlece % 11- 35 arasında puzolanik madde ihtiva edenler A sınıfı,
- Kütlece % 36-55 arasında puzolanik madde ihtiva edenler B sınıfıdır.

Puzolanik çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre PZÇ 35,5, PZÇ 32,5 R, PZÇ 42,5, PZÇ 42,5R, PZÇ 52,5 R olmak üzere 6 tiptir. Normal inşaatlarda ve düşük hidratasyon ısısı istenen inşaatlarda kullanılır [8].

2.7.5. Portland silis dumanı çimento

Portland silis dumanı çimento klinkerle kütlece en az % 10 oranında SD ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesiyle elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı vardır. Bu çimento 28 günlük basınç dayanımına göre KÇ 32,5 olmak üzere tek tiptir. Genel amaçlı her türlü bina ve normal inşaatlarda kullanılır [8].

2.7.6. Portland kalkerli çimento

Portland kalkerli çimento, klinkerle kalkerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesiyle elde edilen çimentodur. İhtiva ettikleri kalker miktarına göre iki sınıfa ayrılırlar;

- Kütlece % 6-20 arasında kalker ihtiva edenler, A sınıfı
- Kütlece % 21-35 arasında kalker ihtiva edenler, B sınıfı

Portland kalkerli çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre; PLÇ 32,5, PLÇ 32,5 R, PLÇ 42,4, PLÇ 42,5 R olmak üzere 6 tiptir. Genel amaçlı her türlü bina ve normal inşaatlarda kullanılır [8].

2.7.7. Portland düşük ısılı çimento

Büyük hacimli kütle betonlarında, çimento hidrasyonunun gelişimiyle sıcaklığın yükselmesi betonda ciddi çatlaklara yol açabildiğinden, bu tip yapılarda kullanılacak çimentonun hidrasyon ısısının düşük olması zorunludur [6].

Düşük ısılı Portland çimentosunun C_3S ve C_3A gibi hızlı hidrate olan bileşenlerinin oldukça az olması, dayanımının normal Portland çimentosundan daha yavaş gelişmesine neden olur. Ancak son dayanım değerleri aynıdır [6].

2.7.8. Uçucu kül çimentoları

Uçucu küller çimentoya hammadde olarak, klinker ve alçıtaşı ile birlikte öğütülerek veya mamul çimentoya doğrudan olmak üzere üç şekilde katılabilir. Uçucu küllü çimentoların, istenen mekanik özellikleri sağlayabildikleri takdirde, sülfata dayanıklılık, geçirimsizlik, düşük hidrasyon ısısı gibi olumlu yönleri vardır [6].

UK kömüre dayalı termik santrallerinde toz kömürün yanması sonucu oluşan atık bir üründür. Uçucu küllü çimento klinkerle kütlece % 10-30 arasında uçucun külün az miktarda alçı taşıyla öğütülmesi sonucunda elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. Bu çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre (UKÇ 32,5) olmak üzere tek tiptir. Çok etkili korozyonların olmadığı yerlerde kullanılır [8].

2.7.9. Traslı çimento

Klinker, alçı taşı ile birlikte doğal ve yapay puzolanlar (tras) belli oranlarda katılarak katkılı çimento veya ülkemiz standartlarından traslı çimento diye adlandırılan çimento elde edilir. Bu çimentonun tek sınıfı mevcuttur. Traslı çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre; PÇ 32, 5 olarak tek tiptir [8].

Volkanlardan çıkan lavlar, tüfler yüksek sıcaklığa sahip oldukları ve yeryüzüne çıkınca ani olarak soğudukları için içlerinde bulunan silis ve alüminyum aktif bir hale geçer, camlaşır ve amorf bir yapı kazanır. (Aktif Hal: Kireçle birleşebilir özellik). Düşük hidratasyon ısısı istenen kütle betonlarda kullanılır [8].

2.7.10. Alüminli çimentolar

Bu çimentolar, boksit ile kalkerin, bir döner fırında eritilinceye (1700 °C) kadar pişirilmesi ile elde edilir. Bu çimentolarda alümin miktarı % 30'dan fazladır. Alüminli çimentonun esas karma bileşenleri kalsiyum alüminat (CA) ve dikalsiyum silikat (C₂S)'dir. Bu çimento asit karakterli olduğundan asitlerden zarar görmez. Bu çimentoların mekanik dayanımları hızlı bir şekilde gelişir. Aynı koşullarda 1 günlük dayanımı, Portland çimentosunun 8 aylık dayanımına eşdeğerdir. Bu çimentoların prizi ve sertleşmesi sırasında önemli derecede ısı açığa çıkar. Alüminli çimentolarla üretilen betonlarda Ca(OH)₂ oluşmaz. Bu nedenle kimyasal etkilere çok dayanıklıdır. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır [6].

Alüminli çimentolar, hammaddesi boksit (Al₂O₃+nH₂O) olan farklı bir çimento türüdür. Portland çimentolarının aksine asit ortamlara ve sülfatlara dayanıklılık sağlar ve bir iki gün içinde son mukavemetlerine ulaşırlar, ancak ilk günlerdeki hidratasyon ısısı portland çimentolarının 3-4 katıdır. Bu nedenle, büyük kütleler halinde dökülmezler ve üretim sırasında sıcaklık yükselmesi denetim altında tutulur [13].

2.7.11. Beyaz çimento

Hammaddesi beyaz kil (kaolen), kalker, mermer tozu olan bir Portland çimentosudur. Demir oksit (Fe₂O₃) (% 0,3 den az) ve manganın çok az olması nedeniyle, hafif yeşil-beyaz renkte olan bu çimento mimari amaçla ile yapılarda kullanılır. Beyaz çimentonun üretiminde kullanılan hammaddeler farklı olduğu gibi üretim yöntemleri de Portland çimentosundan farklıdır. Bu nedenle maliyetleri normal Portland çimentosunun 3 katı kadardır [6].

Beyaz Portland çimentosubeyaz olan kil ve miktar kireç taşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilir. Dekoratif amaçlı ve katkısız çimentodur. Betonda beyaz renk istenen yerlerde ve dekorasyonda kullanılır. Beyazlık derecesine göre BPC 70 ve BPC 85 olmak üzere iki

sınıftır. Beyaz çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre; BPC 32,5 ve BPC 42,5 olmak üzere iki sınıftır [8].

2.7.12. Renkli çimentolar

Bu tip çimentolar, beyaz çimento içine inceliği çimento ile aynı olan toz halindeki (% 1-5 arasında) metal oksitlerinden oluşan pigmentlerin eklenmesi ile elde edilir. Örneğin, sarı renk için; hidrate demir oksit, kırmızı renk için; demir oksit, yeşil renk için; krom oksit, mavi renk için; Lazurite, siyah renk için; magnetik demir oksit, beyaz renk için; titan oksit kullanılır [6].

2.7.13. Sülfata dayanıklı çimentolar

Sülfata dayanıklı çimentolar, içinde en fazla % 5 oranında C_3A içeren klinkerin bir miktar alçı taşı ile öğütülmesi sonucu üretilir. Bu tip çimentolar deniz suyu ve sülfatlı su içeren zeminler ve diğer sülfatlı ortamlar için en dayanıklı çimentolardır [6].

Süper sülfatlı çimento, kütlece en az % 65 oranında YFC ile kalsiyum sülfat ve az miktarda Portland çimento klinkeri veya Portland çimentosunun birlikte öğütülmesiyle elde edilen çimentodur. Bu çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre; (SSÇ 32,5) olmak üzere tek tiptir. Etkili korozyonlarda, deniz suyu ile temasta olan inşaatlarda kullanılır [8].

Jips ya da jips-anhidrit karışımını içeren değişik oranlardaki sülfat mineralleri son öğütme prosesinde PÇ klinkerine katılabilmektedir. Sülfat üyelerinin eklenmesiyle çimentonun priz süresinin kontrolü daha kolay sağlanabilmektedir. Bu gibi materyaller çimentonun öğütülmesi sırasında %3-5 oranında katılabilmektedir. Jips ve anhidrit evaporit mineralleri olup, jipsin kimyasal formülü $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ anhidritin ise $CaSO_4$ 'tür [7].

Sülfatlara dayanıklı çimento C_3A miktarı en fazla % 5 olan ve $C_4AF + 2C_3A$ miktarı en fazla % 25 olan klinkerle az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesiyle elde edilen çimentodur. Bu çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre;SDÇ 32,5 olmak üzere tek tiptir. Etkili korozyonlarda ve deniz suyu ile temasta olan inşaatlarda kullanılır [8].

2.7.14. Erken dayanımı yüksek çimentolar

Bu tip çimentolar ince öğütülmüş (en az 3500 cm²/g Blaine) bağlayıcılar olup, hızlı dayanım gerektiren yerlerde kullanılır. Bu çimentoların 2 ve 7 günlük dayanımları (30 MPa ve 40 MPa) aynı tip Normal Portland çimentolarına kıyasla yüksektir (10 MPa ve 21 MPa) [6].

Erken dayanımı yüksek çimento özel olarak üretilmiş klinker ile az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesiyle elde edilen erken dayanımı yüksek olan bir çimentodur. Erken dayanımı yüksek çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre EYÇ 52,5 olmak üzere tek tiptir. Yüksek ve erken dayanım gerektiren inşaatlarda kullanılır [8].

2.7.15. Ultra erken dayanımı yüksek çimento

Bu tip çimentolar, hızlı dayanım gelişimi sağlaması bakımından çok ince öğütülmüştür ve inceliklerin fazla olması nedeniyle hızlı hidrasyon yapar. Çok ince ve hidrasyon hızının yüksek olması nedeni ile erken yaşlardaki dayanım gelişimleri de yüksektir. Örneğin 16 saatte hızlı dayanım kazanan Portland çimentosunun 3 günlük dayanım değerine; 24 saatte ise 7 günlük dayanım değerine erişir. Bunların priz başlangıç süresi 70 dakika, bitiş süresi ise 95 dakika civarında olmaktadır. Bu nedenle söz konusu çimentoların işlenebilirlik süresi daha azdır. Ultra erken dayanımı yüksek çimento, erken dayanım istenen ve hemen hizmete girmesi gereken birçok yapıda başarıyla kullanılabilir [6].

2.7.16. Hidrofob çimentolar

Bu tip çimentolar, rutubete karşı dayanıklı olması amacıyla, klinkere hidrofob bir eleman (% 0,1-0,4 oranında stearik asit, oleik asit) eklenip öğütülmesi ile elde edilir. Hidrofob çimento görünüş olarak normal Portland çimentosuna benzer. Fakat küf kokusu gibi bir karakteristik özelliğe sahiptir. Hidrofob çimentolar suyla kolay ıslanmadıklarından bu tip çimentolar kullanılarak üretilen harç ve betonları daha uzun süre karıştırmak gerekir [6].

2.7.17. Antibakteriyel çimento

Bu çimento mikrobiyolojik fermantasyonu önlemek için anti bakteriyel maddeler kullanılarak üretilen bir Portland çimentosudur. Bakteriyel etkiye, gıda maddesi üreten tesislerin yer betonlarında rastlanılmaktadır. Bu gibi yerlerde, çimento üzerinde oluşan bakterilerle birlikte nemin varlığı fermantasyona yol açmaktadır. Anti bakteriyel çimento su depoları, yüzme havuzlarında ve bakteri, mantar bulunan benzer yerlerde kullanılmaktadır [6].

2.7.18. Oil-Well çimentosu

Çok üstün özelliklere sahip bir çimentodur. Grout veya slurry olarak yerkabuğundaki çatlaklardan binlerce metre derinliğe kadar pompalanabilecek işlerde kullanılır. Araştırma için açılan sondaj kuyularında derinlik, 10 000 m civarında olduğundan bu tip çimento ile doldurulmaları uygun olmaktadır [6].

2.7.19. Katkılı çimento

Katkılı çimento, klinkerle en fazla % 19 oranında puzolanik maddenin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesiyle elde edilen çimentodur. Tek sınıfı mevcuttur. Katkılı çimento 28 günlük dayanımlarına göre; KÇ 32,5 olmak üzere tek tiptir. Genel amaçlı her türlü bina ve normal inşaatlarda kullanılır [8].

Çimento harcına veya betona bazı özellikler kazandırmak ve bazı özelliklerini değiştirmek için karışıma eklenen maddelere “katkı maddeleri” denir. Bunlar organik veya inorganik kimyasal maddelerdir. Katkı maddeleri su, agrega ve çimento dışında betona belirli miktarlarda çimento ağırlığının % 5’i cinsinden üretim sırasında katılır [13].

Normal Portland çimentosuna üretimin öğütme aşamasında puzolan katılması ile katkıli portland çimentosu elde edilmektedir. Puzolanlar, Portland çimentosunun hidrasyonu sırasında açığa çıkan Ca(OH)_2 ile birleşerek mukavemeti ve özellikle kimyasal dayanıklılığı arttırlar [15].

2.7.20. Harç çimentosu

Harç çimentosu en az % 40 PÇ klinkeri ile % 60 oranında UK gibi puzolanik madde içeren çimentodur. Bu çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre; HÇ 16 olmak üzere tek tip olup sıva harcı için kullanılır [8].

2.8. Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Jeolojik araştırmaların konusunu oluşturan ve çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler; kireçtaşı, kil ve marndır. Bunlar jeolojide sedimenter kayalar olarak bilinirler ve herhangi bir jeolojik yaşta olabilirler. Kireçtaşları yaygın olarak sedimenter kayaç şeklinde oluşur ve büyük formasyonlar oluştururlar. Avrupa'da Devoniyen (408-367 Ma) yaşlı kireçtaşları, Jura (207-146 Ma) ve Triyas (245 – 207 Ma) yaşlı kireçtaşları ile Kretase (145-65 Ma) yaşlı kireçtaşları önem kazanmıştır. Kretase yaşlı kireçtaşları fosil içerikli olabilir ve metamorfizma etkisinde kalabilirler. (mermer ve silisli kireçtaşları gibi). Bazıları da hem fosilli ve hem de kil-kalker karışımı şeklinde olabilir. Bunlar da kireçtaşı-kil oranına göre kireçli marn, killi marn ya da marn adını alırlar. Bu kireçtaşları içerdikleri CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ miktarlarıyla doğal çimento olarak yorumlanabilmektedir. Daha genç olan kireçtaşları mercan içerikli olabilir ve bunlar pekişmemi kayalarla, pekişmiş kayalar arasındaki bir pozisyonda değerlendirilebilirler. Çimento klinkeri üretiminde kullanılabilen shell depozitleri bu gruba girmektedir [7].

Çimento üretimi için kullanılan kil mineralleri genellikle yumuşak ve gevşek yapıli materyallerdir. Bu materyaller tane boylarına göre sınıflandırılmaktadır. (kil, silt, kum gibi). Kayaç tipindeki killi materyaller killi şist, şeyl ve kristalin şistler şeklinde oluşabilirler. Granit, gnays, bazalt ve bazaltik tüflerle puzolanlar kil minerallerinin oluşumunda etkili olabilirler. Klinker üretimi için gerekli katkı maddeleri ise ham karışımın kimyasal bileşimini düzeltici yönde etkiye sahip, Fe, SiO₂ ya da Al₂O₃ içerikli materyallerdir. Bunlara örnek olarak fırınlanmış pirit, düşük yüzdeli demir cevheri, laterit, kuvarslı kum ya da metamorfik kayaların bozunmasıyla oluşan kuvarslı materyaller ve boksitler verilebilir. Çimento üretiminde kullanılacak olan hammaddelerin uygunluk dereceleri onların kimyasal bileşimleriyle orantılıdır. Kireçtaşı bileşeni için kireç standardı bir ölçüt olarak kullanılmaktadır. Bu değer SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ gibi bileşenler hakkında bilgi vermekle birlikte CaO içeriği konusunda da aydınlatıcıdır. Kil minerali olarak

kullanılacak kayaçlarda silikat ve alümina oranı dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Ham karışımda bulunan MgO, kloritler, sülfatlar ve alkalilerin oranı da çimento üretimi için önemli birer etkiye sahiptir. Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler, yardımcı maddeler ve puzolanik maddeler aşağıda genel olarak açıklanmıştır [7].

2.8.1. Çimentonun hammaddeleri

Kireçtaşı (Kalker)

Kalker, saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluşur. Kalsit ve aragonit kalsiyum karbonatın iki ayrı kristal şekli olup, teorik olarak % 56 CaO ve % 44 CO₂ içerir. Ancak doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmaz [7].

Kimyasal bileşiminde en az % 90 CaCO₃ bulunan kayaçlara kalker ya da kireçtaşı adı verilir. Ayrıca kireçtaşı terimi, kimyasal bileşiminde % 90'a kadar CaCO₃, mineralojik bileşiminde ise % 90'a kadar kalsit içeren kayaçlar için de yer bilimciler tarafından kullanılmaktadır. Kalkerin mineralojik incelemesinde saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluştuğu görülür. Kalsit ve aragonit; kalsiyum karbonatın iki ayrı kristal şekli olup, teorik olarak % 56 CaO ve % 44 CO₂ içerir. Ancak doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmaz. İkincil derecede değişik madde ve bileşiklerin içinde yer alması nedeniyle orijinal halde sarı renkli olup, kahverengi ve siyah renklerde de görülebilmektedir [8].

Kalkerin sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2,5-2,7 g/cm³ arasındadır. Yeraltı sularında travertenler şeklinde, deniz ya da tatlı sularda ise kimyasal organik veya mekanik çökeltme sonucu kalker yatakları oluşur. Oluşum süreçlerinden de anlaşılacağı üzere kalker üç ana grup altında toplanabilmektedir [7].

Organik kireçtaşları

Pek çok bitki ve hayvanın içerdikleri CaCO₃; organizmalar öldükten sonra kireçtaşını oluşturmak üzere çökebilmektedir.

Bu organik kireçtaşlarının en önemlileri;

Resifal kireçtaşları

Biyohermal Kireçtaşları

(Kabuk) Konkoidal Kireçtaşları

Mercan Kireçtaşları

Biostromal Kireçtaşları

Algli Kireçtaşları

Krinoidal Kireçtaşları

Foraminifer Kireçtaşları

Bazısı biyostromal,

Bazısı pelajik Kireçtaşları

Pelajik kireçtaşları ile az çok eşanlı olan tebeşir şist, Kretase'nin beyaz renkli ve ince taneli kireçtaşlarını temsil etmektedir. Tebeşire diğer jeolojik yalarda da (Tersiyer) rastlanabilmektedir [7].

Kimyasal kireçtaşları

Kimyasal kireçtaşlarının üç ana tipi vardır;

- Bir evaporit aralanmasına bağlı kireçtaşları (genelde Dolomitler),
- Oolitik ve pisolitik kireçtaşları,
- Kalk tüfler.

Klastik kireçtaşları

Mekanik olarak çökelen karbonat kayaçları daha önce oluşan kireçtaşları ya da organik kireçtaşlarının parçalarının oluşturduğu depolanmalardır. Bazı araştırmacılar oolitik kireçtaşlarını da bu gruba almaktadırlar. Bunların sınıflandırılması sedimenter kayaçlar için kullanılan tane boyu ölçğine bağlıdır;

- Kalsirudit 2 mm ve yukarısı,
- Kalkarenit 1/16 mm - 2 mm,
- Kalsilutit 1/16 mm den küçük.

Çimento üretiminde kullanılan kalker yataklarının kimyasal özelliklerinin yanı sıra fabrikaya yakınlığı, sökülebilirliği, kırılabilirliği, öğütülebilirliği ve pişebilir niteliklerde

olması, düşük nem içermeleri ve homojen olmaları üretim maliyetini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu nedenle bu faktörlerin saptanması üretim açısından çok önemlidir [7].

Kalkerler hangi yolla oluşurlarsa oluşsunlar, doğada buldukları durumları ile bileşimlerinde kalsiyum karbonatın yanı sıra; magnezyum karbonat, kil mineralleri, demir silikat oksit ve sülfürleri, silikat asidi (SiO_2) gibi bileşikler içerirler. Bu bileşiklerin bir kısmı kalker oluşumu esnasında ve oluşum ortamının koşullarına bağlı olarak meydana gelebildiği gibi bir kısmı da diyajenez esnasında da meydana gelebilir. Bu durumda kökene bağlı olarak içerdikleri primer safsızlıkları oluştururlar [8].

Kil

Kil teriminin geniş bir anlamı vardır. Kil, hem bir kayaç terimi, hem de tane boyu terimi olarak kullanılmaktadır. Kayaç olarak bozunma ürünleri ya da hidrotermal olaylarla oluşmuş çökeller için kullanılan bir terimdir. Killerin kimyasal analizleri; silisyum, alüminyum ve sudan oluştuklarını göstermektedir. Demir, alkaliler ve alkali topraklarda değişik miktarlarda yer almaktadır. Kil terimi; kayaç olarak doğal, topraklı, ince taneli ve su ile karışıtlarında plastik özellikleri gelişen materyalleri içine almaktadır [7].

Kayaç oluşturan kil mineralleri değişik oranlarda bir kayaç içerisinde bulunabilirler. Bunlar killi kayaçların temel bileşenleridir. Genellikle kristalin formda ve küçük partiküller halinde oluşmaktadırlar. Mineralojik bileşiminde % 90'a kadar kil minerali bulunduran kayaçlara kil denilmektedir. Killerin özellikleri en azından 5 temel faktör tarafından kontrol edilmektedir.

Bunlar;

- Kil minerallerinin ve kil minerali olmayan bileşenlerin bileşimi,
- Organik materyaller,
- Eriyebilir tuzlar,
- Değişebilen iyonlar,
- Yapı-doku'dur.

Bunlar içerisinde en önemlisi, kil minerallerinin bileşimidir. Bir kil mineralinin ekonomik olarak kullanımı kil mineral bileşimi ile ortaya çıkarılmaktadır. Örneğin; seramik endüstrisinde yüksek sıcaklıklara dayanıklı olan bileşimler, petrol endüstrisinde ise sondaj çamurlarının hazırlanması için bentonit tipi bileşimler istenmektedir [7].

Kil minerallerinin kesin bir sınıflandırılması yapılmamakla beraber aşağıda yapılan sınıflama, uygulamalarda geçerli olan bir sınıflamadır;

- I- Amorf; Allofan grubu,
- II- Kristalin; A - İki Tabakalı,
- A.1- Kaolinit grubu (Kaolinit, nakrit, dikit),
- A.2- Halloysit grubu,
- B - Üç Tabakalı,
- B.1.a- Montmorillonit grubu,
- Montmorillonit, sausonit ve vermikülit,
- B.1.b- Nontronit, saponit, hektorit,
- B.2- İllit grubu,
- C - Düzenli karışık Tabakalı,
- Klorit grubu,
- D - Zincir yapılı
- Atapuljit,
- Sepiyolit,
- Paligorskit.

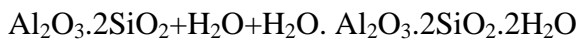
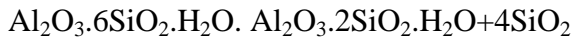
Kil minerallerinin çoğu laboratuvar koşullarında sentez edilmiştir. Bu deneylerden, minerallerin oluşum ortamları ve çevresel koşullarla ilgili pek çok sonuç ortaya çıkarılmıştır. Düşük sıcaklıklarda asidik ortamlarda kaolinit, alkali ortamda montmorillonit oluşabilmektedir. Pek çok kil minerali hidrotermal kökenlidir. Bazı hidrotermal kökenli yataklar monominerali olmasına karşın çoğu kil minerallerinin karışımından oluşmaktadır. Farklı tipteki kayaçların bozunmasında kil minerallerinin oluşumunda etkilidir. Kil minerallerinin oluşum şekilleri bir kaç tane faktör etkisindedir. Bunlar ana kayaç tipi, iklim, topografya, bitki örtüsü ve zamandır. Çimento sektöründe hammadde olarak kullanılan killer ise alterasyon ürünü metal oksitlerin taşınıp depolanma havzasında yığılmasından veya yerinde alterasyon örtüsü halinde Neojen, Pliyo-Kuvaterner yaşlı

alüvyonlarda, Neojen havzalarının üst düzeylerindeki karasal koşullarda oluşmuş çoğu killi ve kireçli topraklardır. Çimento sektöründe en çok tercih edilen kil minerali kaolindir [7].

Killer, silikat minerali olup, özelliklerine göre çeşitli sınıflara ayrılırlar. Bu özelliklerin başında kristal yapıları gelmektedir. Saf olmayan alüminyum, kalsiyum ve demir silikattır, saf şekline Kaolen denir. Killer içinde kuvars, mika, su gibi yabancı maddeler de bulunabilir. Kil partikülleri sadece mikroskop altında incelenebilir, çıplak gözle görünmez. Killerin boyları 0,00001 mm'den daha az, ergime noktası 1150 °C-1875 °C arasındadır [8].

Beyaz killer

Kaolin hammaddesini oluşturan en önemli mineral Kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) olup alüminyum hidra silikat bileşimli bir kil mineralidir. Kaolin terimi altında çeşitli jenetik modellerle oluşmuş kaolin türleri ve kaolinitik killer yer almaktadır. Killer yapılarına göre yapılan kil sınıflandırmalarında, eş boyutlu ve bir yönde uzanmış olanlar Kaolinit Grubu olarak diğerlerinden ayrılmaktadır. Oluşum itibariyle, feldspat içeren granitik veya volkanik kayaların feldspatlarının altere olarak kaolinit mineraline dönüşmesi sonucu kaolinler oluşmaktadır [8].



Bu oluşum modeline göre altere olan ana kayacın taşınmadan yerinde kalması sonucu kaolinit yatakları oluşur. Ana kayaların bozunma öncesi taşınıp, taşındıktan sonra depolanması veya bozunma sonucu taşınıp sedimanter yataklarda depolanması sonucu kaolinit bileşimli kil yatakları oluşur. Bu birliktelik literatürde kavram kargaşası yaratmakta olup, bunu verilen sınıflamalarda görmek mümkündür. Kaolinde kaliteyi belirleyen unsurlar; ana kayaç olan tüfler veya granitler içinde kaolinleşmeyi sağlayan sular, ana kayaç parçacıkları ile birlikte silikat bünyesinde olan SiO_2 , K^+ , Na^+ , Fe_2O_3 , S, CaO, MgO kısmen orijinal bünyeden uzaklaştırılmakta ya da suların tesiri sonucu çeşitli bileşenlere dönüşmektedir. SiO_2 silika, orijinal kayaç bünyesinde belirli kısmı Al_2O_3 ile birleşerek kaoliniti meydana getirmekte, fazlası ise dışarıya atılmaktadır. Kaolinleşmeyi sağlayan suların dışarıya atılması sırasında silisin belirli bir kısmı cevherleşme yüzeyinde

demirli-silisli şapka şeklinde kabuk halinde kalmaktadır. Dışarıya atılmayanlar ise cevherleşme içinde serbest silis taneleri şeklinde veya kaolinleşme içinde opal (silis) bantları şeklinde kalmaktadır [8].

Kaliteyi belirleyen en önemli unsurlardan olan silislerin bünyeden yoğun olarak atılması halinde kaliteli kaolin cevheri meydana gelmektedir. İçinde serbest silis tanesi olarak kalan kaolinler ise, daha kolay ayrıştırılabildiğinden süzülebilir kaolin niteliği kazanmaktadır. Fe_2O_3 orijinal kayaç bünyesinde yer alan demirin kaolin içinde olmaması istenilen en önemli kriterden biridir. Ancak kimyasal işlem sırasında demirin belirli bir kısmı kaolinleşme sırasında uzaklaştırılmadan kalmaktadır. Alkaliler ve Al_2O_3 ; K_2O+Na_2O , kaolin oluşunda belirtilen feldspatların bozunması sonucu kaolinleşme olmaktadır. Feldspat $K_2O.Al_2O_3.6SiO_2$ (Potasyum), $Na_2O. Al_2O_3.6SiO_2$ (Albit) ne kadar bozunursa, ortamdaki o kadar fazla K_2O ve Na_2O atılmaktadır. Bunların atılması (ortamdan uzaklaştırılması) ne kadar fazla olursa, kaolinleşmeyi belirleyen Al_2O_3 oranı o kadar artacaktır. İdeal Kaolin bileşimi; $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$ olup kaolinitte; SiO_2 (Silika) % 46,54, Al_2O_3 (Alüminyum Oksit) % 39,50 ve H_2O (Su) % 13,96 oranında bulunur. Kaolin içindeki Al_2O_3 haricindeki diğer bileşenlerin yüksek olması demek, Al_2O_3 oranının idealden (% 39,50'den) az olması demektir. Bu da kalitesinin daha düşük olduğu anlamına gelir. SO_3 (Kükürt) ve Alunit; kaolinleşmeyi sağlayan kimyasal işlem sırasında ortamda elementel S varsa H_2SO_4 (Sülfürik Asit) oluşacaktır. Kaolinleşme işleminin olabilmesi için ortamdaki uzaklaştırılabilecek madde alkalilerden K_2O olup, bunun çözünmesi sırasında bazen tamamı uzaklaştırılamamakta ve ortamda bir miktar K kalmaktadır [8].

Marn

Çimento klinkeri ortalama % 70 kalker ve % 30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğu için ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay üretilmekte, kırma-öğütme sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır [8].

Kalker ve kilin doğada % 50-70 oranında kalker ve % 30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaca marn denilmektedir. Oluşum bakımından tamamı ile sedimentler olup,

diyajenez geçirmiş genellikle düzenli tabakalı olarak bulunur. Marn oluşumu için, daha çok tektonik ve orojenik hareketlerin durulduğu, sakin ortamlar daha uygundur [7].

2.8.2. Çimento sanayinde kullanılan katkı maddeleri

Puzolanik maddeler

Kendi başlarına hidrolik bağlayıcı olmayan ancak ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan doğal veya yapay maddelerdir. Çoğu puzolanik maddeler volkanik kökenli olup, en çok bilineni tüflerdir. Puzolan terimi, Napoli Körfezindeki Vezüv Dağı yakınındaki Pozzuoli'den kaynaklanmaktadır [7].

Almanya'da Rhenish trası ve Bavarian trası olarak bilinen benzer türdeki materyal çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Fırınlanmış yağlı arduaz, daha az olarak kullanılan diğer bir puzolanik materyaldir. Diğer ülkelerde volkanik kayalar yanında, değişik silisli sedimenter yataklar, özellikle kizelgur içeren oluşumlar bu materyaller kapsamındadır. Puzolanik maddelerin özelliği yüksek miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içermeleridir. Bu nedenle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile tepkimeleri kolaydır. Bu yüzden bağlayıcı özellik gösterirler. Ülkemizde çimento sanayinde doğal puzolanik katkı maddesi olarak, tras ve bazik nitelikli volkanik işlevlerin bir ürünü olarak oluşan doğal cürufklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yapay olarak elde edilen YFC ve UK katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Çimento maliyetlerinin düşürülmesi açısından katkı maddelerinin yüksek oranda katılabilir kalitede olmaları önemlidir. Puzolanik aktivite değerleri ile çözülmüş kalıntı oranları, katılabilirlik oranını belirleyen faktörler olup, katılım oranı genelde % 10-30 arasında değişmektedir [7].

Puzolanlar, çimento üzerinde aşağıdaki etkileri meydana getirirler;

1. Çimentonun hidrasyon ısını düşürürler.
2. Betondaki gözeneklilik derecesini artırır.
3. Çimentonun hidrasyonu sırasında ortaya çıkan serbest kirece bağlanırlar.
4. Alkalilerin aksi etkisini azaltırlar.
5. İçerisinde puzolan bulunan betonlar genleşmezler.
6. Ekonomiktirler [8].

Tras

Tras kendi başına bağlama özelliğine sahip olmasa da normal sıcaklıklarda, sulu ortamda kireçle birleşerek bağlama özelliğine sahip suda çözülmeyen, kararlı bileşikler oluşturan, bileşikler içeren bir maddedir. PÇ veya kireçle karıştırıldığında hidrolik bağlayıcı özelliği gösteren volkanik tüfe, tras veya tras tufü denir. Tras, silisli ve alümina silisli volkanik bir tüftür. Doğal ve suni olmak üzere iki çeşidi vardır. Doğal tras az ya da çok değişikliğe uğramış volkanik kaynaklı tortul kayalardan oluşmuştur. Suni traslar bu gibi doğal maddelerin (kil ya da şist olarak) ısıtılmasıyla elde edilebilir. Tras yalnız başına pek az katılabilir reaksiyona yatkın değildir. Trasın iyi olan etkisi, gözenekleri tıkayıcı olmasıdır. Tras ancak beton iyileştirmesi amacıyla katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [8].

Çimento imalatında kullanılan doğal veya suni trasın aşağıdaki özellikleri içermesi gerekir;

1. Aktif olmalıdır. Puzolanlar önce % 10'luk NaOH ve sonra % 20'lik HCL ile muamele edilmelidir. Bıraktığı artık madde en düşük olan en aktif olanıdır.
2. Puzolanlarda $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ oranı yüksek buna karşılık $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ oranı düşük olmalıdır.
3. Trasın içindeki kristal suyu yüksek olduğu için klinkerle birlikte öğütülmeden pişirilmelidir.

Trasın aktivitesi ateş kaybı oranı azaldıkça artmaktadır. Ateş kaybı oranının yüksek olması aynı zamanda kristal suyunun da yüksek olduğunu gösterir. Bu yüzden su miktarını belli bir seviyenin altına düşürebilmek için trası önceden bir ön ısıtmaya tabi tutmak gerekir [8].

Pomza

Pomza veya Ponza adı İtalyanca'dan gelir. Değişik dillerde farklı adlandırılır. Fransızca'da Ponce, İngilizce'de orta taneli olanlara Pumice denir. Doğal olarak ince taneli olanlara Pumicite adı verilir. Almanca'da ise iri taneli olanlara Bimsstein, küçük taneli olanlara Bims adı verilmektedir. Türkçe'de ise süngertaşı, nasır taşı, topuk taşı gibi adlarla bilinmektedir [8].

Pomza volkanik bir kayaç türü olup asidik ve bazik karakterli volkanik faaliyetlerle oluşmuştur. Volkanik bir cam yapısındadır. Yeryüzünde en yaygın olarak bulunan ve kullanılan türü olan asidik pomza, beyaz kirli renkte olanıdır. Bazik pomza ise yabancıların

Scoria dedikleri Türkçe'deki bazaltik pomza olarak bilinen kahverengimsi siyahımsı renkteki pomza türüdür. Her iki türde, oluşum esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi hızlı terk etmesi sonucunda, gözeneklidir. Gözenekler birbirleriyle bağlantılı değildir. Asidik magmanın yoğunluğu bazik olanlara göre daha az olup $0,5-1 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Bazik pomzanın yoğunluğu ise daha fazladır ve $1-2 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Pomzanın fazla gözenekli olmasından dolayı ısı ve ses geçirgenliği oldukça düşük olup sertliği Mohs skalasına göre 5-6'dır. Bünyesinde kristal suyu yoktur. Kimyasal olarak % 75'e varan silis muhtevasına sahiptir. Pomzanın bileşiminde % 60-75 SiO_2 , % 13-17 Al_2O_3 , % 1-3 Fe_2O_3 , % 1-2 CaO , % 7-8 $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ ve ayrıca eser miktarda TiO_2 ve SO_3 bulunmaktadır [8].

Uçucu küller (UK)

Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık % 75-80'i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir. Bu küllere "uçucu kül" (UK) denilmektedir [14].

UK ya da pulverize yakıt külleri, özellikle elektrik üretim tesislerinin pulverize kömür ile işleyen fırınlarının toz tutma ünitelerinden sağlanan materyallerdir. Küresel biçimde olup $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$ ve Fe_2O_3 içerirler. Puzolanik maddeler gibi Ca(OH)_2 ile tepkimelerinde hidrolik bağlayıcı nitelik kazanırlar. Diğer taraftan yanmış karbon kalıntılarını da içermesi olasıdır. Bu da çimentonun düşük direncine ve betonun dayanıklılığına olumsuz yönde etki yapar. Uçucu küllerin spesifik yüzeyi ne kadar büyükse reaktivitesi de o kadar yüksektir. Pek çok UK için bu değer $1000-4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında değişmektedir. Kül partiküllerinin tane boyu ise 0,5-200 mikron arasındadır. İri taneli UK'lerden istenen çimentoyu üretmek için jips ve PÇ klinkeri ile öğütme yoluyla inceltmesi olasıdır. Külün kalitesine ve özelliklerine bağlı olarak çimentonun yapısında bir katkı maddesi olarak %30 oranında UK bulunabilmektedir [7].

Elektrik enerjisi üretimi için, termik santrallerin çoğunda yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Kömür, % 80'inin $75\mu\text{m}$ elekten geçebilecek inceliğe sahip olacak tarzda öğütülmekte ve havayla birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir [14].

Pulverize kömürün yanmasıyla büyük bir miktarı çok ince olan, bir miktarı da nispeten biraz daha iri boyutlara sahip kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Çok ince tanelere sahip olan küller, yakıt gazlarıyla beraber “uçarak” bacadan dışarı çıkmak üzere hareket etmektedir. Nispeten ağır olan iri kül tanecikleri taban külü olarak ocağın tabanına düşmektedir [14].

Cüruf

Cüruflar çeşitli metalürji tesislerinden elde edilen artık madde gruplarından biridir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Örneğin yüksek fırın cüruflarının kendi başına bağlayıcı özelliği olmasına karşın nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzolanik özellikleri vardır. Cürufların çimento ve beton sektöründe çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. Konvansiyonel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar kristal yapıya sahip kütleler olarak ortaya çıkar. Bu tür cüruflar ya hiç kullanılmaz ve atılırlar ya da yol malzemesi veya beton agregası olarak kullanılırlar. Buna karşılık modern teknolojiyle çelik üretimi yapabilen tesislerde camsı yapıya ve bir miktar hidrolik özelliklere sahip olan cüruflar elde edilir ve böylece çimento sektöründe kullanmak mümkün olur [8].

Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanım alanına sahip olan cüruflar, YFC'lerdir. Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen YFC yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filizi gangi, kok ve kireçtaşının yanma sonrası artıkları YFC'yi meydana getirirler. YFC'nin oluşum sıcaklığı 1400-1600 °C'dir [11].

Silis dumanı (SD)

Silis metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulmasıyla yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve % 85-98'e kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “silis dumanı” (SD) adı verilmektedir. SD amorf yapıya sahip olduğundan, çok ince taneli malzeme olduğundan ve yüksek miktarda SiO₂ içerdiğinden, mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi, kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirildiği takdirde hidrolik bağlayıcılık göstermektedir [14].

Ülkemizde SD, Etibank Elektrometalürji Sanayi İşletmesinin Antalya'daki tesislerinde elde edilmektedir. Fabrikanın ferrosilisyum (FeSi), silikoferrokrom (SiFeCr) fırınlarının baca tozları özel filtreli toz tutucularda tutulmaktadır. Bunlardan SiO₂ oranı % 94-95 olan ferrosilisyum ve % 85-90 olan silikoferrokrom fırınları baca tozu, silis dumanı olarak kullanılabilir [16].

Demir cevheri

İmalat sırasında fırında pişme bölgesinde arzu edilen öteklik noktayı elde edici yani eritici bir maddeye ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer pişirilen farinde demir yüzdesi çok düşük ise hammadde içine demir cevheri ilave edilmesi gerekir. Tabiatta mevcut demir cevheri manyezit, hematit, limonit ve siderittir. Çimento sanayinde hammadde içerisine hematit ve limonit ilave edilir. Siderit ve manyezit kullanılmaz [8].

Doğal alçı (jips)

Doğada jips (CaSO₄.2H₂O) ve anhidrit (CaSO₄) olmak üzere iki türü bulunan ve ticarete alçı elde edilmesine yarayan endüstriyel hammaddedir. Anhidrit (kristal susuz) bazı ülkelerde sülfürik asit üretiminde kullanılır; bunun dışında kullanım alanı pek yaygın olmamakla beraber, son yıllarda kimya endüstrisinde önem kazanmıştır. Jips (kristal sulu), düşük derecede ısıtılınca kristal suyunun yarısından fazlasını kaybeder ve alçıya dönüşür. Beyaz toz halinde olan alçı, yeniden su emdiğinde sert bir kütle haline gelir ve bu özelliğinden dolayı, bazı katkı maddeleriyle beraber geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Klinker ile % 3-5 oranında alçı taşı ile birlikte öğütülerek PÇ elde edilir. Ticari değeri olan jips % 85-95 saflıkta olup, % 5-15'lik kısmı kireçtaşı, dolomit, kil mineralleri ve diğer evaporik çökellerden ibarettir [8].

Ham jips, beyaz boya ve dolgu maddesi olarak kâğıt ve pamuklu tekstil maddelerine katılır. Çimento sanayinde prizlenmeyi geciktirmek, kömür tozlarında kül oranını arttırmak, nikel izabesinde eritmeyi kolaylaştırma ve bira sanayinde mayalandırma için kullanılır. Alçı, sıcak ve soğuk yalıtım malzemesi olarak da tercih edilir. Ayrıca yangını geciktirme, nemi dengeleyici özellikleri ile de kullanım yerleri bulmuştur. Ayrıca kimya sanayinde de alçıdan yararlanır [8].

Suni alçı (FGD alçısı ya da baca alçısı)

Kömür yakılarak (Linyit) elektrik enerjisi üretilen Termik Santrallerde yüksek orandaki kükürt oksitler hava kirlenmesindeki en önemli kirleticilerden biridir. Baca gazından kükürt oksitlerini gidermeye yönelik 200'ün üzerinde proses söz konusudur. Bu proseslerin bir kısmı ekonomik ve teknik zorluklar nedeniyle uygulanamamış, bir kısmı endüstriyel ölçekte uygulanmakta, bir kısmı ise henüz uygulamaya geçmemiş olup araştırma ve geliştirme safhasındadır. Bu tesislerde uygulanabilen proseslerin sayısı oldukça fazla olmasına karşın, ticari boyutta uygulama bulmuş proseslerin sayısı sınırlıdır. Bugün çeşitli ülkelerde kurulmuş bulunan Baca Gazı Kükürt Arıtma Tesislerinde % 90 oranında uygulama bulmuş olan proses, baca gazının kireçtaşı (veya kireç) çözültüsü ile yıkandığı ıslak kireçtaşı prosesidir. Bu yöntem gerek ilk yatırımın düşük olması ve gerekse kükürt dioksitten oluşan hava kirliliği sorunlarına çözüm bulmuş olması nedeni ile çok yüksek bir uygulama oranına sahiptir [8].

2.9. Çimentoların Mekanik Dayanımları Ve Fiziksel Özellikleri

Çimentoların genel olarak dayanımları 3 sınıfta toplanmıştır. Bu çimento sınıfları dayanım kazanma sürelerine göre Normal dayanımlı (N), Yüksek erken dayanımlı olanlar (R) gruplandırılmıştır. Çimentolar bu sınıflara göre yaşlarına bağlı olarak göstermesi gereken en az dayanımlar ve priz süresi–hacim genişmesi Çizelge 2.3'de verilmiştir [11].

Çizelge 2.3. Çimentoların mekanik dayanımları ve fiziksel özellikleri

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)				Priz Başlama Süresi (dk)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanımı		Standart Dayanım			
	2 gün	7 gün	28 gün			
32,5 N		$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	≥ 75	≤ 10
32,5 R	$\geq 10,0$					
42,5 N	$\geq 10,0$		$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	≥ 60	
42,5 R	$\geq 20,0$					
52,5 N	$\geq 20,0$		$\geq 52,5$		≥ 45	
52,5 R	$\geq 30,0$					

2.10. Çimentonun Özelliklerine Anabileşenlerin Etkileri

C_2S ve C_3S yani kısaca silikatlar, sertleşmiş çimentonun taşıyıcı iskeletini meydana getirirler. C_3S daha hızlı sertleşir ve dayanım kazanır, yüksek dayanımlı çimentolarda özellikle ilk dayanımı yüksek çimentolarda miktarı fazladır. Sertleşme sırasında daha çok ısı çıkarır, bu kusurdur. C_2S ve C_3S 'in hidratasyonu sırasında kireç ($Ca(OH)_2$) açığa çıkar. Bu sönmüş kireç miktarı C_3S 'de daha fazla olur. Bu kireç, çelik donatının paslanmasının geciktirir, yararlıdır. Ancak zamanla yıkanır, yeri boş kalır ve beton geçirimli olur [11].

C_3A , yani kalsiyum alüminat (trikalsiyum alüminat) çimentonun kimyasal dayanıklılığında en önemli rolü oynar. Sertleştikten sonra bu bileşen en düşük dayanıma sahiptir. Hidratasyon sırasında büyük ısı çıkarır ve asıl önemlisi kalsiyum sülfatla, yani alçı veya alçıtaşı ile birleşerek çok büyük hacimli bir tuz (Etrenjit veya Candlot tuzu) oluşturur. Bu tuz kristalleşmiş, yani hidrate olmuş C_3A durumunda da oluşur ve asıl kötüsü de budur. Zira bu yüksek dereceli genişleme, betonu patlatır ve tahrip eder. Sülfatlı ortamda kalacak çimentolarda C_3A miktarı düşük çimento seçmek zorunludur [17].

2.11. Çimentolarda Minör Bileşenler Ve Bunların Etkileri

Minör bileşenlerden CaO ve MgO zamanla su alıp hidroksit haline geçerler. Bu dönüşüm hacim artması ile olur ve zararlıdır. Na_2O ve K_2O ise, beton agregalarının opal, kalseduvan, tiyplit gibi aktif silis içermeleri durumunda hacim artışına yol açabilirler. Beton teknolojisinde çok önemli sayılan bu olaya alkali-agrega reaktivitesi adı verilir. Uzun yıllar sonra dahi ortaya çıkan bu genişleme önemli hasarların sebebidir. CEM IV ve CEM V çimentolarında, PÇ klinkeri ve alçıtaşında puzolan veya tras adını verdiğimiz doğal aktif silis içeren maddeler vardır. Bunlar çimento döner fırında pişirilmeden katıldığından çimento üretiminde büyük ekonomi sağlarlar. Türkiye doğal puzolan yönünden zengin bir ülkedir. Bu maddeler, silikatların hidratasyon ürünü olan sönmüş kireçle birleşerek sertleşir ve dayanım kazanır. Bu özellikleri betonun geçirimliliği üzerinde yararlıdır. Etrenjit oluşumunda da sülfat iyonu dışında gerekli olan kireç bileşimini azalttıklarından yararlı bir etki meydana getirirler. Doğal olarak puzolanlar çok farklı kökenli (bazaltik ve riyolitik vb.) olabilirler. Bu farklılık tüm CEM IV ve CEM V çimentolarının aynı dayanıklılığa sahip olmayacaklarını, en azından farklı zararlı ortamlarda farklı davranış gösterebileceklerini açıklar [17].

2.12. Geri Dönüşümün Tanımı Ve Önemi

Atıkların hammadde gibi kullanılarak yeni bir maddeye dönüştürülmesine geri dönüşüm denir. Geri kazanım ise atıkların yeniden kullanılarak, enerji elde etmek (yakma vb.) veya fiziksel ya da kimyasal işlemlerden geçirilerek yeni bir ürün elde etmek amacı ile toplanmasıdır [1].

Doğal ve kentsel çevreyle uyumlu üretim ve işletme süreci olarak bilinen çevre yönetimi üç temel ilkeyle anlamlandırılmakta olup, bunlar sırasıyla geri kazanım, yeniden kullanım ve geri dönüşümdür.

Ekonomik zorluklarla karşı karşıya bulunan ve kalkınmakta olan ülkelerin de tabii kaynaklarından uzun vadede ve maksimum bir şekilde faydalanabilmeleri için atık israfına son vermeleri, ekonomik değeri olan maddeleri geri kazanma ve tekrar kullanma yöntemlerini araştırmaları gerekmektedir. Ülkemizde de nüfus artışına paralel olarak atık miktarı ve ambalajlı ürün kullanımı artmış, geri kazanımı ekonomik bir değer haline getirmiştir [1].

Geri dönüşüm terim olarak, kullanım dışı kalan geri dönüştürülebilir atık malzemelerin çeşitli geri dönüşüm yöntemleri ile hammadde olarak tekrar imalat süreçlerine kazandırılmasıdır. Tüketilen maddelerin yeniden geri dönüşüm halkası içine katılabilmesi ile öncelikle hammadde ihtiyacı azalır. Böylece insan nüfusunun artışına paralel olarak artan tüketimin doğal dengeyi bozması ve doğaya verilen zarar engellenmiş olur. Bununla birlikte yeniden dönüştürülebilen maddelerin tekrar hammadde olarak kullanılması büyük miktarda enerji tasarrufunu mümkün kılar [18].

Geri dönüşüm ile ülkelerin doğal kaynakları korunmaktadır. Dünya'da doğal kaynaklar, nüfusun artması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi nedeni ile her geçen gün azalmaktadır. Bu nedenle malzeme tüketimini azaltmak, değerlendirilebilir nitelikli atıkları geri dönüştürmek sureti ile doğal kaynaklarımızı kullanmak zorundayız. Bu nedenle geri dönüşüm, doğal kaynakların korunması ve verimli kullanılması için son derece önemli bir kavramdır.

Geri dönüşüm malzeme üretiminde endüstriyel işlem sayısını azaltmak suretiyle enerji tasarrufu sağlar. Örneğin; metal içecek kutularının geri dönüşümü işleminde bu metaller direkt olarak ergitilerek yeni ürün haline dönüştürüldüğünde bu metallerin üretimi için kullanılan maden cevheri ve bu cevherin saflaştırılma işlemlerine gerek olmadan üretim gerçekleştirilebilmektedir. Bu şekilde bir alüminyum kutunun geri dönüşümünden % 96 oranında enerji tasarrufu sağlanabilir. Benzer şekilde katı atıklarda ayrılan kâğıdın yeniden işleme sokulması için gerekli olan enerji normal işlemler için gerekli olanının % 50'si kadardır. Aynı şekilde cam ve plastik atıkların da geri dönüşümünden önemli oranda enerji tasarrufu sağlanabilir. Geri dönüşüm uygulaması ile çöplere giden atık miktarında azalma sağlanarak bu atıkların taşınması ve depolanması işlemleri için daha az miktarda alan ve daha az enerji kullanılmış olur. Geri dönüşüm geleceğe ve ekonomiye yatırım yapmak demektir. Geri dönüşüm uzun vadede verimli bir ekonomik yatırımdır. Hammaddenin azalması ve doğal kaynakların hızla tüketilmesi sonucunda ekonomik problemler ortaya çıkabilecek ve işte bu noktada geri dönüşüm ekonomi üzerinde olumlu bir etki yapacak ve gelecek kuşaklara doğal kaynaklardan yararlanma olanağı sağlayacaktır [19].

Son yıllarda, sanayiden ve madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan atıkları kullanarak yeni inşaat malzemeleri geliştirmek araştırmacıların ilgi alanı olmuştur. Bu atıklar, sanayileşme ile yüksek miktarlara çıkmakta ve bir dizi ekonomik ve çevresel problemlere neden olmaktadır. Sanayi atıklarını ve yan ürünlerini azaltacak veya onları yararlı bir ürüne dönüştürecek yeni teknolojilerin geliştirilmesine ve uygulanmasına ihtiyaç vardır. Günümüzde sanayi atıkları, maden atıklarının depolanması ve atılması büyük sorunlar haline gelmiştir. Depolanan atıklar, çevreyi büyük ölçüde kirletmekte ve bunların depolanması işletmelere ekonomik anlamda büyük yükler getirmektedir. Ayrıca doğal kaynaklar tükenmez boyutlarda değildir. Bunların yararlı şekilde ve uzun süre kullanılması önemlidir. Dolayısıyla sanayi ve maden atığı katkılı çimentoların üretimi ve kullanımı atık değerlendirilebilmesi, enerji ve doğal kaynakların korunması, doğanın daha az kirlenmesi gibi oldukça önemli yararlar sağlayacaktır [20].

2.13. Atık Maddelerin Geri Dönüşümü İle İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar

Atık maddelerin geri dönüşümü ile ilgili yapılmış olan birçok makale ve çalışma bulunmakta olup, bunlardan bazıları aşağıda sunulmaktadır.

Boncukođlu ve arkadaşları, Etibank Bandırma Borik Asit tesislerinde temin edilen borojips ve reaktör atıklarının çimento üretiminde kullanılabilirliği üzerinde çalışmışlardır. Klinkere çeşitli oranlarda borojips ve boraks atığı katılarak elde edilen çimentonun birim ağırlık, basınç dayanımı ve eğilme dayanım değerlerini bulmuş ve bu değerleri standart değerler ile karşılaştırmışlardır. Borojipsin çimento üretiminde klinkere normal jips yerine katılabileceği sonucuna varmışlardır [20].

Kaynak israfını önlemenin yanında, hayat standartlarını yükseltme çabaları ve ortaya çıkan enerji krizi ile bu gerçeği gören gelişmiş ülkeler, atıkların geri kazanılması ve tekrar kullanılması için yöntemler aramış ve geliştirmişlerdir [21].

Lyons ve Tonkin, kalkınma çabasında olan ve ekonomik zorluklarla karşı karşıya bulunan gelişmekte olan ülkelerde, tabii kaynaklarımızın vadede ve maksimum bir şekilde faydalanabilmesi için atık israfına son verilmesi, ekonomik değeri olan maddeleri geri kazanma ve tekrar kullanma yöntemlerini araştırmışlardır [22].

Yalçın ve Sevinç, Seydişehir alüminyum fabrikası endüstriyel atığı olan kırmızı çamuru, seramik endüstrisindeki seramik sırlarının yapımında kullanılması için incelemişlerdir. Yapılan mineralojik ve kimyasal incelemelerde kırmızı çamurda ana element olarak hematit (Fe_2O_3) ve sodyum alüminyum silikat hidrat bulunmuştur. Porselen ürünü olan camsı ve elektro porselen sırları kırmızı çamur yapımında kullanılmıştır. Yapılan testlerde bazı oksitlerin kırmızı çamur sinterleşmesinden sonra camsı yüzey oluşturabilmektedir. Bu çalışmayla seramik sırları üretimi için kırmızı çamur kullanılabilirliği gösterilmektedir [23].

Nik ve Oikonomou tarafından yapılan çalışmada, geri kazanılmış beton agregasının kullanım alanları ve uygunluk kriterleri incelenmiştir. Doğal afetler ve ömrü dolan binaların yıkımı ile elde edilen atıkların yeniden kullanılma yolları irdelenmiştir. Yıkım atıklarının ortalama, % 40'ının beton, % 30'unun seramik, % 5'inin metal, % 5'inin plastik, % 10'unun ahşap ve geri kalan % 10'unun çeşitli malzemelerden oluştuğu belirtilmiştir. Geri dönüşüm agregalarının kullanılmasının çevresel katkılarının olacağı sonucuna varmıştır [24].

Rakshvir ve Barai tarafından yapılan çalışmada, geri dönüşüm agregalarının çeşitli mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Geri dönüşüm agregaların doğal agregalardan farklı davrandığı ve geri dönüşüm agregalarından yapılan betonların da kendine özgü davranışlar sergilediği gözlenmiştir. Bu çalışmada beton karışımında kullanılan geri dönüşüm agregalarının oranı arttırdıkça betonun basınç mukavemetinin % 10'a kadar azaldığı gözlenmiştir. Geri dönüşüm agregalarının su emmelerinin doğal agregalardan fazla olduğu belirlenmiştir [25].

Tu, Chen ve Hwang yaptıkları çalışmada, geri dönüşüm agregasını kullanarak yüksek mukavemetli beton elde etmek için 10 grup deney yapmışlardır. Deneyler sonucunda birim ağırlığı, su emme kapasitesi, elek analizi, kuru birim ağırlığı ve aşınmasının genel olarak doğal agregadan daha kötü olduğu görülmüştür. Bunlara rağmen iyi bir tasarım hesabı yapıldığında geri dönüşüm agregalarını da kullanarak yüksek mukavemetli beton üretildiği görülmüştür [26].

Çamur külünün çimento yerine artan oranlarda kullanılmasıyla taze betonun işlenebilirliğinin azaldığı, sertleşmiş betonun ise su absorpsiyonu ve permeabilitesinin kontrol betonuna göre azaldığı görülmüştür. Çamur külü oranındaki artış betonun basınç mukavemetinin azalmasına neden olurken, çimentonun % 5'i yerine çamur külü kullanıldığında basınç mukavemeti kontrol betonun dayanımından daha yüksek elde edilmiştir [27].

Aruntaş ve arkadaşları, atık mermer tozunun kendiliğinden yerleşen betonda kullanımını araştırmışlardır. Bu amaçla çok sayıda beton üretilmiş ve yapılan bir dizi deney sonucunda kendiliğinden yerleşen beton üretiminde, atık mermer tozunun katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir [28].

Turanlı ve arkadaşları yaptıkları araştırmada, farklı oranlarda tuğla unu ikameli, çimento harçlarının basınç dayanımı ve alkali-silika reaksiyonuna etkisini araştırmışlardır. Bu araştırmada % 20 tuğla unu ikameli numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının da azalma saptanırken, alkali-silika reaksiyonu için hazırlanan % 10, 20 ve 30 ikameli harç çubuklarındaki hacim genişlemesinde TU oranına bağlı olarak azalma görülmüştür. Yani TU, 28 günlük basınç dayanımına olumsuz etki ederken, alkali silika reaksiyonunu azaltmaktadır [29].

Chich-Huang, Deng-Fong ve Pen-Chi tarafından yapılan araştırmada, endüstriyel atık su işlemlerinden toplanan çamurların (kurutulmuş) tuğla yapımında kullanılabileceğini göstermektedir. Tuğla kalitesi özellikle çamurun artmasıyla tuğlanın büzülmesi, su absorpsiyonu ve kompres gücü azalmıştır. Sonuçlar çamur içeriğinin pişirme prosesinde tuğlanın yanma ısısı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Tuğlanın toksit özelliklerinin tespiti amacıyla yapılan testlerde metal seviyesinin düşük olduğu görülmüştür. Biçimlendirilmiş karışımın 880-960 °C arasında pişirilmesiyle iyi kalitede tuğla elde edileceğini göstermiştir [30].

Yüceler ve Çelik tarafından çevreye zarar veren atık plastiklerin değerlendirilmesi ve polimer kaynağı olarak kullanılması konusunda yapılan çalışmada, Marshall deneyinde asfalt betonuna katkı malzemesi olarak granüller polimer ve atık sert plastikler kullanılmış ve çalışma sonucunda asfalt betonu ve polimer karışımı ile elde edilen malzemenin asfalt betonuna nazaran daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır [31].

Kula, Kütahya Emet Hisarcık yöresindeki kolemanit konsantratör atıkları ve Eskişehir Kırka yöresindeki tinkal konsantratör atıklarının Kütahya Seyitömer Termik Santrali atıkları (UK ve taban külü) ile birlikte değerlendirilmesini araştırmıştır. Bu çalışmada söz konusu atıklar çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Katkıların çimentonun priz süresi, hacim genleşmesi, basınç dayanımı, öğütme süresi gibi özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Çimento karışımlarının fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin TS'ye uygun olduğu görülmüştür. Böylece bu çalışmada kullanılan katkıların çimento üretiminde katkı maddesi olarak sonucuna varılmıştır [32].

Dayı ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, zeolit, UK ve atık camın Portland kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla bu malzemeler ile ikili ve üçlü çimento karışımları üretilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda zeolit, UK ve atık camın Portland kompoze çimento üretiminde kullanılabileceği tespit edilmiştir [33].



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Deneyleerde bağlayıcı olarak Portland imentosu (CEM I 42,5R), ince agrega olarak standart kum (Rilem Cembureau), atık madde olarak karo fabrikası atığı ve karışım suyu olarak da Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.1. Portland imentosu

Deneyleerde Ankara Limak imento Fabrikasından temin edilen CEM I (P 42,5R) kullanılmıştır. CEM I imentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri ile kimyasal analizi izelge 3.1 ve izelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I imentosunun kimyasal analizi

Kimyasal analiz (%)	Oksit
CaO	62,10
SiO ₂	18,63
Al ₂ O ₃	4,94
Fe ₂ O ₃	2,85
MgO	2,15
SO ₃	2,89
K ₂ O	0,75
Na ₂ O	1,04
SCaO	1,00
Kızdırma kaybı	4,07
C ₃ S	69,86
C ₃ A	8,27

Çizelge 3.2. CEM I çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel özellikler	
Yoğunluk (g/cm ³)	3,09
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3612
Normal kıvam suyu (%)	26,8
Priz başı (dk)	185
Priz sonu (dk)	250
Hacim genişmesi (mm)	1
Mekanik özellikler	
7 günlük basınç dayanımı (MPa)	40,4
28günlük basınç dayanımı (MPa)	52,2
90günlük basınç dayanımı (MPa)	61,1

Deneyleerde kullanılan çimentoların, mekanik özellikleri TS EN 196-1“Çimento Deney Metotları–Bölüm 1: Dayanım”[34] standardına göre yapılmış olup, kimyasal analizleri TS EN 196-2 “Çimento Deney Metotları–Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi” [35] standardına göre Ankara Limak Çimento Fabrikasında yapılmıştır. Çimentoların fiziksel özellikleri ise TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları–Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi Tayini” [36] ve TS EN 196-6, “Çimento Deney Metotları–İncelik Tayini” [37] standartlarına göre yapılmıştır.

3.1.2. Standard kum

Harç numunelerinin hazırlanmasında; Trakya Set Çimento Sanayi T.A.Ş. Çimento Fabrikası’ndan temin edilen ve Rilem-Cembureau Standard kumu kullanılmıştır.

3.1.3. Su

Deneyleerde kullanılan çimento hamuru ve çimento harcı karışımında Ankara şehir şebekesi suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Atık malzeme

Deneyleerde kullanılan atık malzeme Ankara’da üretim yapan bir karo fabrikasından temin edilmiştir. Kullanılan atık, fabrikada karo üretimi sırasında elde edilen hamur kıvamında çok ince bir malzeme olup, atık sahasından çuvallar içerisinde alınarak laboratuara getirilmiştir. Karo fabrikası atığının fiziksel ve mekanik özellikleri ile kimyasal analizi Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Karo fabrikası atığının kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri

Kimyasal analiz (%)	Oksit
CaO	45,74
SiO ₂	5,74
Al ₂ O ₃	1,07
Fe ₂ O ₃	0,23
MgO	6,14
SO ₃	0,46
K ₂ O	0,08
Na ₂ O	0,00
Kızdırma kaybı	39,31
Nem	27,7
Fiziksel özellikler	
Yoğunluk (g/cm ³)	2,61
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	10400
90µm elek üstü kalan (%)	7,60
200µm elek üstü kalan (%)	1,60
Puzolanik aktivite (MPa)	1,1

3.2. Metot

3.2.1. Deneyleerde kullanılan çimentoların üretilmesi

Atık malzeme, karo fabrikasından akıcı hamur kıvamında çuvallar içerisinde alınarak laboratuara getirilmiştir. Laboratuvarın deney süresince sıcaklığı $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve nispi nemi % 50-60 arasında olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan atık, çok ince bir malzeme olmasına rağmen kurutulduktan sonra topaklaştığı gözlemlendiğinden öğütülmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle atık malzeme, deneyleerde kullanılmadan önce ilk olarak etüvde $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 24 saat süre ile kurutulmuş ve ardından bilyalı değirmende 45 dk. süre ile öğütülmüştür. Toz haline getirilen atık, çimentoya ikame (yerine koyma) metodu kullanılarak katılmıştır. Çimentoya ağırlıkça % 0 (kontrol), % 5, % 10, % 15, % 20, % 25, % 30, % 35, % 40, % 45 ve % 50 oranlarında atık malzeme ikame edilerek toplamda kontrol numunesi dâhil 11 adet çimento üretilmiştir. Atık katkılı çimentoların (AKÇ) karışım oranları Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Laboratuvarda üretilen çimentoların karışım oranları

<i>Sıra no</i>	<i>Numune kodu</i>	<i>Atık ikame oranı (%)</i>	<i>CEM I (%)</i>
1	AKÇ0 CEM I (kontrol)	0	100
2	AKÇ5	5	95
3	AKÇ10	10	90
4	AKÇ15	15	85
5	AKÇ20	20	80
6	AKÇ25	25	75
7	AKÇ30	30	70
8	AKÇ35	35	65
9	AKÇ40	40	60
10	AKÇ45	45	55
11	AKÇ50	50	50

Üretilen AKÇ’lerin fiziksel ve mekanik deneyleri Ankara Limak Çimento Fabrikası Laboratuvarında yapılmıştır.

Elde edilen AKÇ numuneleri, ortamdaki bağıl nemden etkilenmemesi için naylon torbaya konularak üzerleri etiketlenmiştir.

3.2.2. Deneylerde kullanılan çimentoların kimyasal analizleri

AKÇ'lerin kimyasal analizleri, TS EN 196-2, "Çimento Deney Metotları–Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi" [35] standardına göre yapılmıştır. Çimentolara ait kimyasal analiz sonuçları, Bölüm 4 içerisinde Çizelge 4.1'de verilmiştir.

3.2.3. Üretilen çimentoların fiziksel ve kimyasal deneyleri

Standart (Normal) kıvam deneyi

Standart kıvam deneyi, TS EN 196-3, "Çimento Deney Metotları–Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi Tayini" [36] standardına göre yapılmıştır. Deneyde, otomatik Vicat aleti, sondası ve halkası, karıştırıcı ve 0,1 g duyarlılıkta elektronik terazi kullanılmıştır. Standart kıvam, Vicat aletinin sondasının serbest bırakıldığı andan itibaren 30 s'de çimento hamuru içerisine, cam levhaya 6 ± 1 mm uzaklıkta kalıncaya kadar batabilmesini sağlayan kıvamdır. Elde edilen çimento numunesinden, hassas terazide 300 g tartılarak alınmıştır. Çimento numunesi kütlelerinin % 25-30'u kadar su katılarak 3 dk süre ile karıştırılarak çimento hamuru elde edilmiştir. Bu hamur karıştırma işleminden hemen sonra 1 dk içerisinde Vicat halkası içerisine yerleştirilmiştir. Vicat halkası, 15x15 cm boyutlu cam bir levha üzerinde bulunmaktadır. Hamur, Vicat halkası içerisine yerleştirildikten sonra yüzeyi mala ile düzeltilmiştir. Bu işlemden sonra Vicat sondası temizlenmiş ve kurulanmış, çimento hamurunun yüzeyine temas edecek şekilde indirilerek hamurun içerisine serbest bırakılmıştır. Sondanın kendi ağırlığı ile yavaş yavaş hamurun içerisine girmesi gözlenmiş ve cam levhaya 6 ± 1 mm kaldığı an standart kıvam olarak tespit edilmiştir. Kontrol çimentosu ile AKÇ'lere ait standart kıvam deney sonuçları, Bölüm 4 Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Priz başı ve priz sonu deneyi

Priz başı ve priz sonu deneyi, TS EN 196-3, “Çimento Deney Metotları–Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi Tayini” [36] standardına göre yapılmıştır. Deneyde, otomatik Vicat aleti, iğnesi ve halkası, karıştırıcı ve 0,1 g duyarlılıkta elektronik terazi kullanılmıştır. Vicat aleti, üzerine takılı olan özel kâğıda çimento hamurunun priz başı ve priz sonunu kayıt etmektedir. Standart kıvam tayininde kullanılan çimento hamuru aynı zamanda priz sürelerinin tayininde de kullanılmıştır. İçine hamur konulan Vicat halkası, Vicat aletine konulmuş ve sonda yerine takılan iğne temizlenerek her 10 dk’da bir çimento hamuruna batacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra işlemin sağlıklı devam edebilmesi için, iğnenin her batışından sonra iğne bir bez yardımıyla temizlenmiştir. Burada çimento hamuruna batan iğnenin, cam levhaya 4 ± 1 mm uzaklıkta kaldığı an priz başı kabul edilmiştir. Çimento ile suyun karıştırıldığı andan iğnenin cam levhaya 4 ± 1 mm uzaklıkta kaldığı ana kadar geçen süre, priz başı süresini vermektedir. Priz başından sonra her 15 dk’da bir iğnenin hamura batması devam etmiş ve iğnenin en çok çimento hamuruna 0,05 mm battığı an, priz sona erme süresi olarak tespit edilmiştir. Vicat aletinde iğnenin her batışı, halkanın değişik yerlerine olmuş ve dıştan içe doğru çapı küçülen spiral bir şekilde batma işlemi devam etmiştir. Deneyler sonucunda tespit edilen priz başı ve sonu süreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Hacim genleşme deneyi

Hacim genleşmesi deneyi, TS EN 196-3, “Çimento Deney Metotları–Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi Tayini” [36] standardına göre yapılmıştır. Deneyde Le Chatelier aleti, rutubet dolabı ve kaynatma kabı kullanılmıştır. Çimentoda serbest halde CaO (sönmemiş kireç) ve MgO bulunabilir. Bu maddeler, su ile reaksiyona girerek hacim artışına sebep olabilir ve betonda çatlaklar meydana getirebilir. Bu nedenle çimentolarda genleşme deneyi yapılması gerekir. Deneyde, standart kıvamda kullanılan çimento hamurunun bir kısmı kullanılmıştır. Hamur, silindirik halkanın yarı kenarları birbirine tam bitişik olacak şekilde ve 5x5 cm boyutlu hafif yağlanmış cam bir levha üzerinde tutularak içine yerleştirilmiştir. Çimento hamuru, Le Chatelier aletinin içine yerleştirilirken, çubukların arasının açılmamasına özen gösterilmiştir. Hamur içinde boşluk kalmayacak şekilde alete yerleştirilip, üzeri düzeltildikten sonra üst kısmı yağlanmış 5x5

cm boyutlu cam levha ile kapatılmıştır. Alet üzerine cam levhaların kalkmaması için bir ağırlık konduktan sonra hemen rutubet dolabına konulmuştur. Bu dolapta, 20 ± 1 °C'de % 98'den az olmayan bağıl nemde $24 \pm 0,5$ saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda çubuk uçlarının açıklığı en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak kaydedilmiştir (a). Sonra alet, su dolu kaynatma kabının içerisine yerleştirilerek 30 ± 5 dk içerisinde kaynamaya başlayacak şekilde ısıtılmış ve su banyosu kaynama sıcaklığında 3 saat ± 5 dk bekletilmiştir. Sürenin sonunda alet kaynatma kabının içerisinden çıkarılmış ve çubuk uçlarının açıklığı en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak yeniden ölçülmüştür (b). Le Chatelier aleti, laboratuvar sıcaklığı olan 20 ± 2 °C'ye gelinceye dek soğutulmuş ve çubuk uçlarının açıklığı bir kez daha ölçülmüştür (c). Her numune için (c-a) farkı en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak hesaplanmış ve toplam hacim genişmesi bulunmuştur. Hacim genişmesi deneyi, kontrol çimentosu ile AKÇ'ler için ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Tane büyüklüğü (çimento inceliği) deneyi

Deneyde, hava basıncı ile otomatik emme sistemine sahip incelik ölçüm cihazı ile göz açıklığı 45 mikron ve 90 mikron olan elekler kullanılmıştır. Etüvde 105 ± 2 °C'de kurutulmuş çimento numuneleri, 0,1 g duyarlılıkta elektronik terazide 20 g tartılarak alınmıştır. Numuneler, makineye yerleştirilmiş olan eleklerle konularak emme işlemi yaptırılmış ve her seferinde elek üzerinde kalan miktar tartılarak kaydedilmiştir. Elek üzerinde kalan numune bir sonraki elek üzerine aktararak işleme devam edilmiş ve numunelerin tane büyüklükleri tespit edilmiştir. Deney, kontrol çimentosu ile AKÇ'ler için ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Yoğunluk deneyi

Yoğunluk deneyi, Le Chatelier balonu kullanılarak yapılmıştır. Le Chatelier balonunun iç kısmı, tamamen temizlenip etüvde kurutularak çıkartılmış ve balonun ölçülü yerine kadar gaz yağı kâğıt süzgeç yardımıyla doldurulmuştur. Balon, yaklaşık 20 ± 2 °C oda sıcaklığında bekletilerek hacmi okunmuştur (V_1). Sonra çimento numunesinden 64 g alınmış ve iç cidarına ve boğaz kısmına birikim yapmayacak şekilde balonun içine dikkatli bir şekilde boşaltılmıştır. Bu işlemi takiben, balon kendi ekseninde etrafında tabanı masa

üzerine temas edecek şekilde seri olarak döndürülmüş ve böylece içerisinde bulunan hava kabarcıklarının sıvı yüzeyine çıkması sağlanmıştır. Hava kabarcıkları tamamen bitene kadar döndürme işlemine devam edilmiş ve sonra balon laboratuvar sıcaklığı olan 20 ± 2 °C’de yaklaşık 1 saat bekletildikten sonra balon üzerindeki sıvı hacmi kaydedilmiştir (V_2). İlk okuma ile son okuma arasındaki fark, kullanılan çimento ile yer değiştiren sıvının hacmini vermiştir. Çimentonun yoğunluğu aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$d = m / (V_2 - V_1)$$

Bu formülde;

d = Yoğunluk (g/cm^3)

m = Çimentonun ağırlığı (g)

V_1 = İlk okunan hacim (cm^3)

V_2 = Son okunan hacim (cm^3)’i ifade etmektedir.

Deney, kontrol çimentosu ile AKÇ’ler için ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Özgül yüzey (Blaine) deneyi

Özgül yüzey deneyi, TS EN 196-6, “Çimento Deney Metotları-İncelik Tayini” [37] standardına göre yapılmıştır. Deneyde Blaine cihazı kullanılmıştır. Blaine cihazı, hava geçirgenliği prensibine dayanarak çimentoların özgül yüzeyini tayin etmek için kullanılan bir cihazdır. Deneyde kullanılacak numune miktarı, TS EN 196-6’da verilen formül ile hesaplanarak alınmıştır. Deney sonucunda elde edilen değerler kullanılarak hesaplamalar yapılmış olup kontrol çimentosu ile AKÇ’ler için ayrı ayrı belirlenen deney sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

3.2.4. Deneylerde kullanılan çimentoların basınç dayanım deneyi

Çimentoların dayanım deneyleri, TS EN 196-1, “Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım” [34] standardına göre yapılmıştır. Deneylerde 40x40x160 mm boyutlu prizmatik deney numuneleri kullanılmıştır. Bu deneyler için 1350 g standart kum, 450 g çimento ve

225 g su kullanılmıştır. Bu malzemeler, 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve % 50-65 nispi nemli ortamda 12 saat bekletilerek kullanılmıştır. Harç yapılırken; karıştırma kabına önce su konulmuş, sonra çimentonun tamamı kaba dökülerek karıştırıcı 30 s düşük hızda çalıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda karıştırma aynı hızla devam ederken 1350 g standart kumun tamamı 30 s içinde karışıma ilave edilmiştir. Toplam 1 dk sonunda kumun tamamı karışıma boşaltılmıştır. 1 dk sonunda karıştırıcı, yüksek hıza ayarlanıp 30 s daha çalıştırılmış ve toplam 1,5 dk sonunda durdurulmuştur. Kabın çeperleri ve tabanı, 30 s içinde kazınmış ve toplam 90 s süre ile beklenilmiştir. Daha sonra karıştırıcı yüksek hızda 60 s daha çalıştırılmış ve toplamda 4 dk sonunda hazırlanan harç, kalıplara dökülecek duruma getirilmiştir. Kalıplar, sarsma aletine yerleştirilmiş ve harç, kalıp başlığı takılan kalıplara boşaltılmıştır. Kalıplara harç doldurma işlemi, iki tabaka halinde gerçekleştirilmiştir. Harç birinci tabakada kalıbın yaklaşık yarısına kadar mümkün olduğunca eşit bir şekilde doldurulmuştur. Ardından sarsma cihazı çalıştırılmış ve 1 dk içinde 60 vuruş yaptırılarak harç sıkıştırılmıştır. Sonra ikinci tabakada, karıştırma kabının içinde kalan harcın tamamı kalıp içerisine boşaltılmış ve sarsma cihazı tekrar 1 dk içinde 60 vuruş yapacak şekilde çalıştırılmıştır. Bu süre sonunda kalıp, sarsma makinesinden alınarak üzeri düzeltilmiş ve numune kodları üzerine yazılarak sıcaklığı 20 ± 1 °C sıcaklıkta olan ve asgari % 90-95 nispi nemi olan kür dolabına düşey olarak konulmuştur. Kalıplar, kür dolabında 24 saat bekletildikten sonra sökülmüş ve yüzeylerine kodları ve deney tarihleri yazılarak sıcaklığı 20 ± 1 °C olan su dolu kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün boyunca bekletilmiştir. Numuneler, deneyden yaklaşık 15 dk önce kür havuzundan çıkarıldıktan sonra kurulanmış ve nemli bir bez içerisinde bekletilmiş ve ardından basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Her numune, basınç dayanımı deney cihazında 40x40 mm'lik kırma başlıkları arasına yan yüzlerinin üzerine gelecek şekilde yerleştirilerek kırılmıştır. Deney cihazının yükleme hızı 2,4 kN/s olarak ayarlanmış ve bütün deneyler buna göre yapılmıştır. Deneyde kullanılan cihaz, direkt olarak dayanım değerini vermektedir. Deney sonucunda elde edilen değerler kullanılarak hesaplamalar yapılmış olup kontrol çimentosu ile AKÇ'ler için ayrı ayrı belirlenen deney sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir.



4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çimentoların Kimyasal Kompozisyonuna Atığın Etkisi

Kontrol çimentosu ile laboratuarda üretilen katkı çimentoların kimyasal analizleri, TS EN 196-2, “Çimento Deneysel Metotları–Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi” [35] standardına göre yapılmıştır. Çimentolara ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1’de, atık malzemeye ait kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kontrol çimentosu ile üretilen AKÇ’lerin kimyasal analiz sonuçları

Numune kodu	Kızdırma Kaybı	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	C ₃ S	C ₃ A
AKÇ0 (Knt)	4,07	62,10	18,63	4,94	2,85	2,15	2,89	0,75	1,04	69,86	8,27
AKÇ5	6,05	61,69	18,08	4,79	2,70	2,51	2,68	0,71	0,98	73,55	8,14
AKÇ10	7,78	60,87	17,44	4,59	2,58	2,75	2,63	0,68	0,93	76,58	7,80
AKÇ15	9,58	60,17	16,68	4,37	2,44	3,05	2,53	0,66	0,90	81,16	7,45
AKÇ20	11,16	59,36	16,02	4,18	2,32	3,29	2,38	0,61	0,88	84,36	7,16
AKÇ25	12,97	58,88	15,40	3,98	2,21	3,58	2,31	0,58	0,87	88,57	6,81
AKÇ30	14,81	58,66	14,94	3,83	2,10	3,92	1,93	0,55	0,84	92,42	6,59
AKÇ35	16,45	57,37	14,13	3,60	1,98	4,10	2,07	0,51	0,82	94,99	6,20
AKÇ40	18,20	56,46	13,39	3,39	1,84	4,38	1,97	0,48	0,79	98,59	5,87
AKÇ45	19,97	55,50	12,64	3,16	1,70	4,63	1,87	0,45	0,76	102,10	5,49
AKÇ50	21,70	54,59	12,03	2,99	1,59	4,86	1,73	0,41	0,73	104,31	5,23

Çizelge 4.1 ve Çizelge 3.3’de verilen değerler karşılaştırıldığında.

Çimento karışımına giren atık miktarı arttıkça CaO değerleri giderek azalmaktadır. Bunun nedeni, atık malzemede bulunan CaO değerinin kontrol çimentosu olan AKÇ0’daki CaO değerinden düşük olmasıdır.

Çimento karışımına giren atık miktarı arttıkça SiO_2 değerlerinde de azalma görülmektedir. Buna neden olarak atık malzemede bulunan SiO_2 değerinin AKÇ0'daki SiO_2 değerinden düşük olması gösterilebilir.

Yine çimento karışımına giren atık miktarı arttıkça Al_2O_3 değerleri de giderek azalmaktadır. Bunun nedeni, atık malzemede bulunan Al_2O_3 değerinin AKÇ0'daki Al_2O_3 değerinden çok düşük olmasıdır.

Atık malzemede bulunan Fe_2O_3 değeri 0.23 gibi çok düşük miktardadır. Bu nedenle üretilen AKÇ'lerdeki Fe_2O_3 değeri karışıma giren atık miktarı arttıkça azalmaktadır.

Diğer taraftan MgO değerlerinde ise farklı bir durum görülmektedir. Çimento karışımına giren atık miktarı artışına paralel olarak MgO değerleri de artış göstermektedir. Bunun nedeni, atık malzemede bulunan MgO değerinin AKÇ0'daki MgO değerinden yüksek olmasıdır.

Çimento karışımına giren atık miktarı arttıkça SO_3 , K_2O ve Na_2O değerleri giderek azalmaktadır. Bunun nedeni, atık malzemede bulunan SO_3 , K_2O ve Na_2O değerlerinin AKÇ0'daki değerlerden düşük olmasıdır.

Çimentonun ana bileşenlerinden olan C_3S oranı, karışımdaki atık miktarı arttıkça giderek yükselmektedir. Bunun nedeni, atık malzemede bulunan C_3S değerinin AKÇ0'daki C_3S değerinden fazla olmasıdır.

Çimento karışımına giren atık miktarı arttıkça C_3A değerleri giderek azalmaktadır. Bunun nedeni, atık malzemede bulunan C_3A değerinin kontrol çimentosu olan AKÇ0'daki C_3A değerinden düşük olmasıdır.

Çimento karışımına giren atık miktarı arttıkça SiO_2 değerlerinde de azalma görülmektedir. Buna neden olarak atık malzemede bulunan SiO_2 değerinin AKÇ0'daki SiO_2 değerinden düşük olması gösterilebilir.

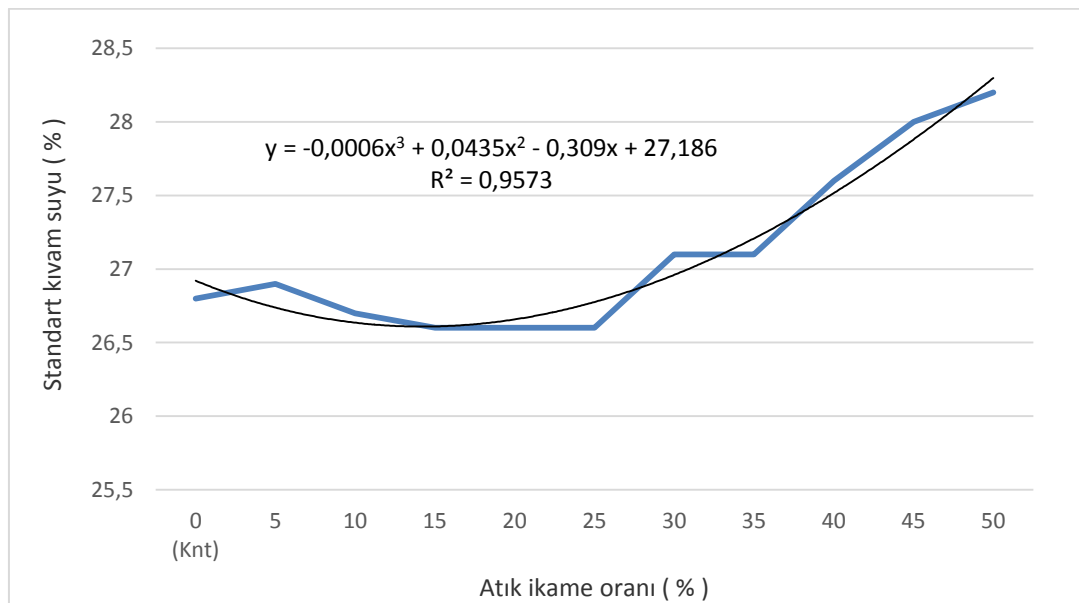
4.2. Üretilen Çimentoların Standart (Normal) Kıvamına Atığın Etkisi

Kontrol çimentosu ile laboratuarda üretilen AKÇ'lerin deneyler sonucunda bulunan fiziksel özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kontrol çimentosu ile üretilen AKÇ'lerin fiziksel özellikleri

Numune kodu	Atık ikame oranı (%)	45 μ Elek üstü (%)	90 μ Elek üstü (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Standart kıvam suyu (%)	Hacim genleşmesi (mm)	Priz başı (dk)	Priz sonu (dk)
AKÇ0 (Knt)	0 (Knt)	2,6	0,0	3,09	3612	26,8	1	185	250
AKÇ5	5	4,5	1,4	3,07	3711	26,9	1	185	260
AKÇ10	10	6,2	2,3	2,79	3505	26,7	1	180	235
AKÇ15	15	7,7	3,4	3,00	4090	26,6	1	155	225
AKÇ20	20	9,1	4,6	2,98	4405	26,6	2	145	215
AKÇ25	25	11,0	5,8	2,95	4693	26,6	1	145	200
AKÇ30	30	12,5	6,8	2,98	5078	27,1	0	140	210
AKÇ35	35	15,0	8,3	2,90	5211	27,1	1	140	210
AKÇ40	40	16,6	9,8	2,88	5481	27,6	1	140	215
AKÇ45	45	18,6	11,1	2,84	5682	28,0	0	135	205
AKÇ50	50	19,3	12,2	2,83	6059	28,2	1	130	210

Kontrol çimentosu AKÇ0 ile laboratuarda üretilen AKÇ'lerin standart kıvam suyu ihtiyacı değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. AKÇ'lerin standart kıvam suyu-atık oranı ilişkisi ise Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

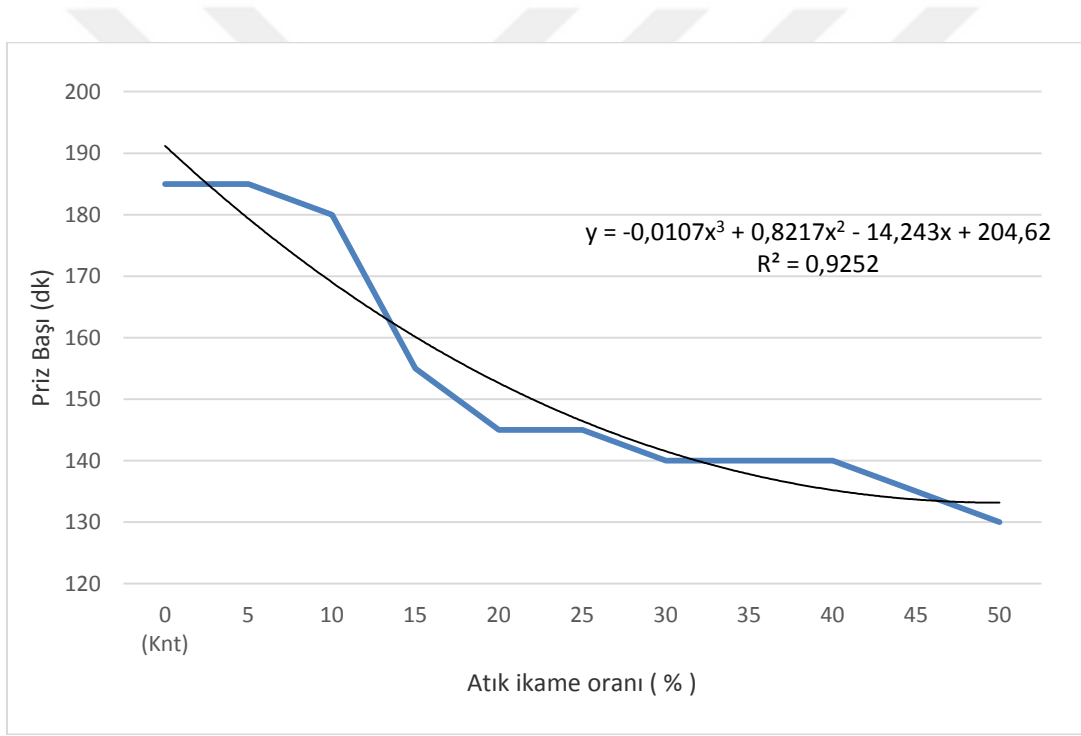


Şekil 4.1. AKÇ'lerin standart kıvam suyu – atık oranı ilişkisi

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, AKÇ’lerde karışımdaki atık miktarı arttıkça standart kıvam suyu ihtiyacı % 25 oranına kadar kayda değer bir değişiklik göstermemekte olup, bu orandan sonra düşük oranda artış göstermektedir. AKÇ’lerin su ihtiyacı değerlerinin % 26-29 arasında değiştiği görülmektedir. Elde edilen bu değerlerin literatürle uyumlu olduğu söylenebilir.

4.3. Üretilen Çimentoların Priz Başı Süresine Atığın Etkisi

Kontrol çimentosu AKÇ0 ile laboratuarda üretilen AKÇ’lerin priz başı değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. AKÇ’lerin priz başı – atık oranı ilişkisi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

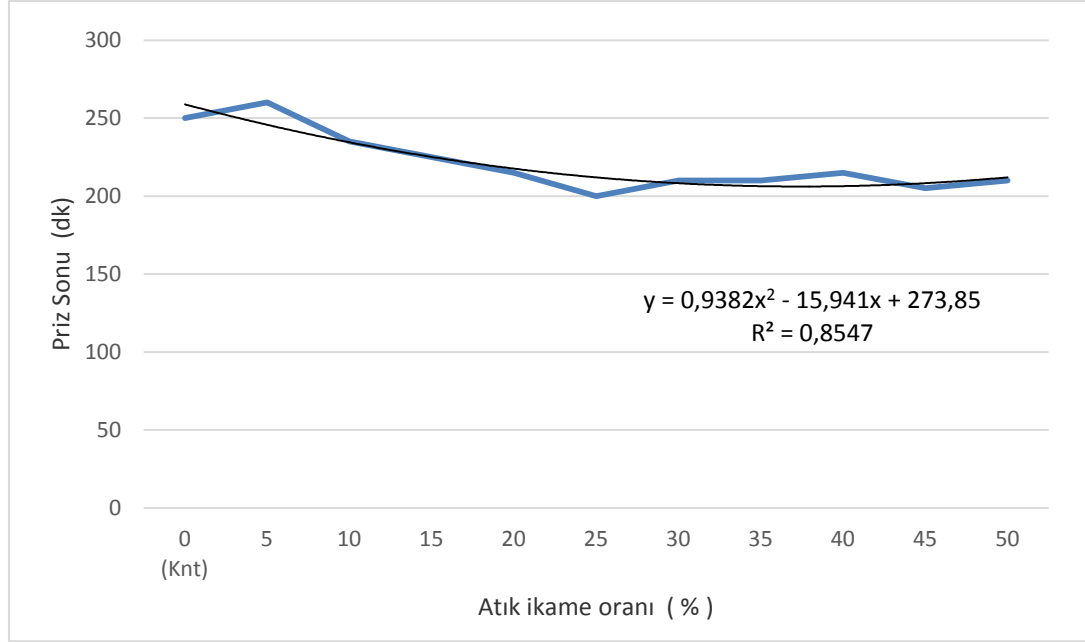


Şekil 4.2. AKÇ’lerin priz başı - atık oranı ilişkisi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, çimentoda atık miktarı arttıkça priz başı değerleri de genel olarak azalmaktadır. AKÇ’ler arasında en yüksek ve en düşük priz başı değerleri sırasıyla 185 dk ile AKÇ5’de ve 130 dk ile AKÇ50’de elde edilmiştir. AKÇ0 ile AKÇ50 arasında priz başı değerinde 55 dk’lık azalma meydana gelmiştir. Çizelge 3.3’de ve Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi, atık malzeme ve kontrol çimentosunun yüzey alanları sırasıyla 10400 cm²/g ve 3612 cm²/g’dir. Görüldüğü üzere çimento karışımındaki atık miktarı arttıkça yüzey alanı da arttığından priz başı değerleri azalmaktadır.

4.4. Üretilen Çimentoların Priz Sonu Süresine Atığın Etkisi

Kontrol çimentosu AKÇ0 ile laboratuarda üretilen AKÇ'lerin priz sonu değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. AKÇ'lerin priz sonu-atık oranı ilişkisi Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

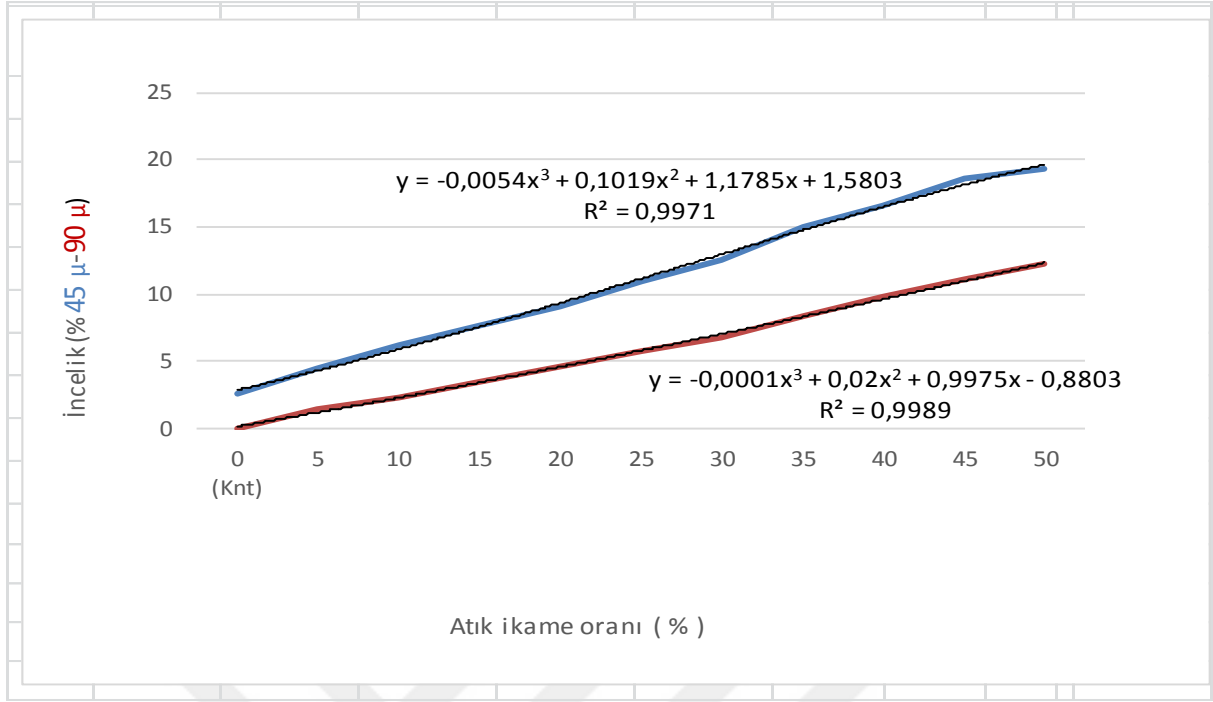


Şekil 4.3. AKÇ'lerin priz sonu-atık oranı ilişkisi

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, AKÇ0'a göre çimentoda atık miktarı arttıkça priz sonu değerleri de azalmaktadır. Bununla birlikte AKÇ'ler birbirleriyle kıyaslandığında AKÇ25'e kadar priz sonu değerleri azalmakta, bu orandan sonra ise priz sonu değerlerinde 5-15 dk arasında farklılıklar görülmektedir. AKÇ'ler arasında en yüksek ve en düşük priz sonu değerleri sırasıyla 260 dk ile AKÇ5'de ve 200 dk ile AKÇ25'de elde edilmiştir. AKÇ0 ile AKÇ50 arasında priz sonu değerinde 40 dk'lık azalma meydana gelmiştir. Görüldüğü üzere çimento karışımındaki atık miktarı arttıkça yüzey alanı da arttığından priz sonu değerleri azalmaktadır.

4.5. Üretilen Çimentoların İnceliğine Atığın Etkisi

Kontrol çimentosu AKÇ0 ile laboratuarda üretilen AKÇ'lerin çimento inceliği değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. AKÇ'lerin incelik-atık oranı ilişkisi Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

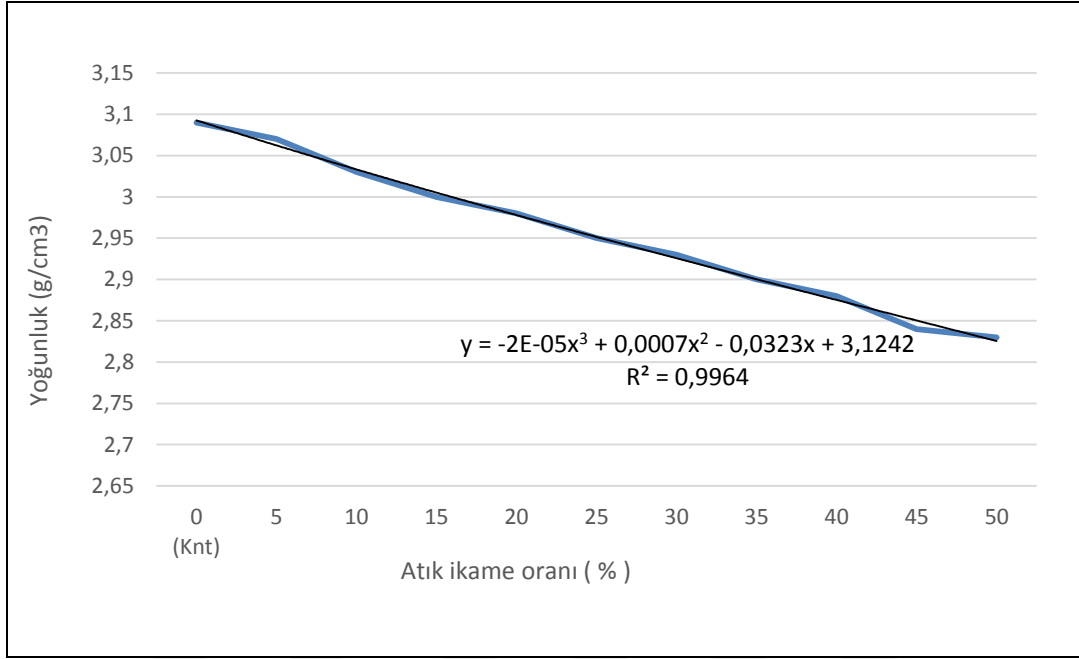


Şekil 4.4. AKÇ'lerde incelik-atık oranı ilişkisi

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, çimentoda atık miktarı arttıkça hem 45 µm hem de 90 µm elek üstü değerleri doğru orantılı olarak artmaktadır. 90 µm'lik elek üstünde AKÇ0'da hiç çimento kalmazken, karışımdaki atık miktarı artışı ile doğru orantılı olarak elek üstü değerleri de AKÇ50'ye kadar yükselmiştir. 45 µm'lik elek üstünde AKÇ0'da % 2,6 değeri elde edilirken, karışımdaki atık miktarı artışına paralel olarak elek üstü değerleri de AKÇ50'ye kadar artış göstermiştir. Hem 45 µm hem de 90 µm elek üstü değerlerinde AKÇ0 inceliğine en yakın değer AKÇ5'de elde edildiği görülmektedir.

4.6. Üretilen Çimentoların Yoğunluğuna Atığın Etkisi

Kontrol çimentosu AKÇ0 ile laboratuarda üretilen AKÇ'lerin yoğunluk değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. AKÇ'lerin yoğunluk-atık oranı ilişkisi Şekil 4.5'de gösterilmiştir.

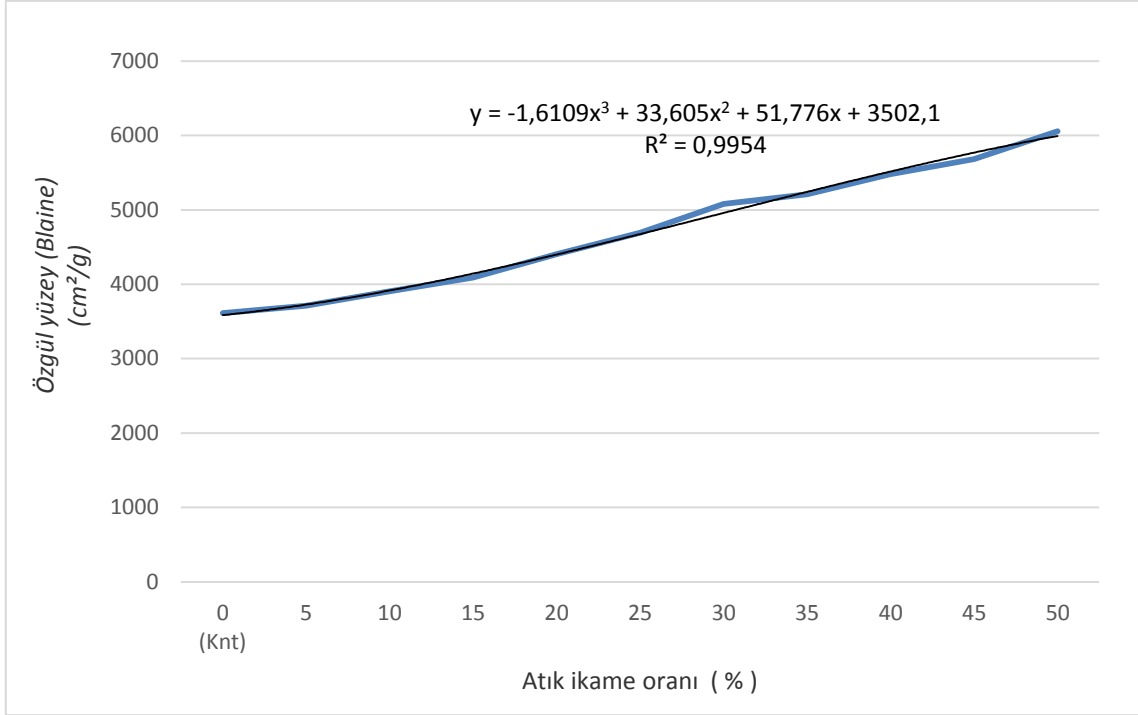


Şekil 4.5. AKÇ'lerin yoğunluk-atık oranı ilişkisi

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, en yüksek yoğunluk değeri kontrol çimentosu olan AKÇ0'da elde edilmiştir. Görüldüğü üzere yoğunluk değerleri ile karışımdaki atık oranı arasında ters bir bağıntı vardır. AKÇ'lerin yoğunluk değerleri çimento karışımındaki atık miktarı arttıkça giderek azalma göstermektedir. Bu durum, Çizelge 3.3'de görüldüğü gibi atık malzeme yoğunluğunun 2,61 g/cm³ olması ile açıklanabilir. Çizelge 3.2'de kontrol çimentosu AKÇ0 (CEM I)'in yoğunluğu 3,09 g/cm³ olarak verilmiştir. Buna göre atık malzeme yoğunluğu AKÇ0'dan düşük olduğundan karışıma giren atık miktarı arttıkça AKÇ'lerin yoğunluk değerleri de azalmaktadır.

4.7. Üretilen Çimentoların Özgül Yüzeyine (Blaine) Atığın Etkisi

Kontrol çimentosu AKÇ0 ile laboratuarda üretilen AKÇ'lerin özgül yüzey (Blaine) değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. AKÇ'lerin özgül yüzey (Blaine)-atık oranı ilişkisi ise Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. AKÇ'lerin Özgül yüzey (Blaine)-atık oranı ilişkisi

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, çimento karışımında atık miktarı arttıkça özgül yüzey (Blaine) değerleri de artmaktadır. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi, AKÇ'ler arasında en yüksek ve en düşük özgül yüzey değerleri sırasıyla 3612 cm²/g ile AKÇ0'da ve 6059 cm²/g ile AKÇ50'de elde edilmiştir. Bu durum, Çizelge 3.3'de görüldüğü gibi atık malzemenin özgül yüzey değerinin 10400 cm²/g gibi oldukça yüksek olması ile açıklanabilir. Çizelge 3.2'de kontrol çimentosu AKÇ0 (CEM I)'in özgül yüzey (Blaine) değeri 3612 cm²/g olarak verilmiştir. Buna göre atık malzemenin özgül yüzeyi, kontrol çimentosu olan AKÇ0'dan yaklaşık 3 kat daha büyük olduğundan, karışıma giren atık malzeme miktarı arttıkça AKÇ'lerin özgül yüzey değerleri de artmaktadır.

4.8. Çimentoların Basınç Dayanımına Atığın Etkisi

Kontrol çimentosu AKÇ0 ile laboratuarda üretilen AKÇ'lerin deneyler sonucunda bulunan 7,28 ve 90 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. AKÇ'lerin basınç dayanımı-atık oranı ilişkisi ise Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Üretilen çimentoların basınç dayanımları

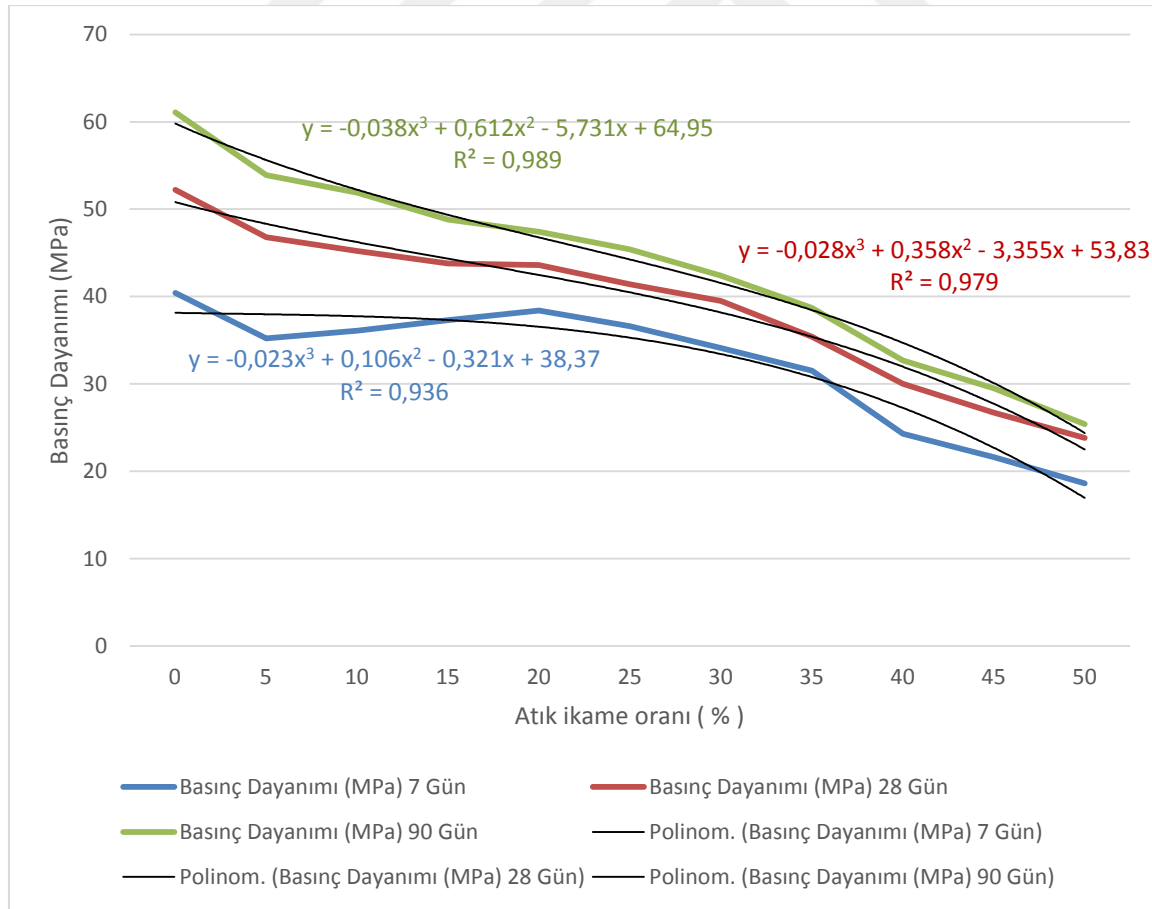
Numune kodu	Atık ikame oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)		
		7 gün	28 gün	90 gün
AKÇ0 (Knt)	0	40,4	52,2	61,1
AKÇ5	5	35,2	46,8	53,9
AKÇ10	10	36,1	45,2	51,9
AKÇ15	15	37,3	43,8	48,8
AKÇ20	20	38,4	43,6	47,4
AKÇ25	25	36,6	41,4	45,4
AKÇ30	30	34,1	39,5	42,4
AKÇ35	35	31,5	35,4	38,7
AKÇ40	40	24,3	30,0	32,7
AKÇ45	45	21,6	26,7	29,5
AKÇ50	50	18,6	23,8	25,4

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi; çimento karışımına giren atık miktarı arttıkça AKÇ’lerin basınç dayanım değerleri azalmaktadır. AKÇ’ler arasında bütün yaşlarda en yüksek ve en düşük basınç dayanımı değerleri beklendiği üzere sırasıyla kontrol çimentosu olan AKÇ0 (CEM I) ile AKÇ50’de elde edilmiştir. Bu sonuç, çimentolarda ikame malzemesi olarak kullanılan atığın puzolanik aktivitesinin çok düşük olması ile açıklanabilir.

Atık kullanılan çimentolar kendi içerisinde karşılaştırıldığında, 7 günlük basınç dayanımlarında en yüksek dayanım 38,4 MPa ile AKÇ20’de elde edilmiştir. 7 günlük dayanım değerleri AKÇ20’ye kadar artmakta, çimento karışımındaki atık miktarı arttıkça azalma göstermektedir. AKÇ0 kontrol çimentosuna göre dayanım değerleri AKÇ5, AKÇ10, AKÇ15, AKÇ20, AKÇ25, AKÇ30, AKÇ35, AKÇ40, AKÇ45 ve AKÇ50 için sırasıyla yaklaşık % 13, % 11, % 8, % 5, % 9, % 16, % 22, % 40, % 47 ve % 54 azalmıştır.

28 günlük basınç dayanımlarında ise en yüksek dayanım 46,8 MPa ile AKÇ5’de elde edilmiştir. Bu yaş grubunda 7 günlük dayanım değerlerinden farklı olarak AKÇ5’den itibaren dayanım değerleri, çimento karışımındaki atık miktarı arttıkça azalmaktadır. AKÇ0 kontrol çimentosuna göre dayanım değerleri AKÇ5, AKÇ10, AKÇ15, AKÇ20, AKÇ25, AKÇ30, AKÇ35, AKÇ40, AKÇ45 ve AKÇ50 için sırasıyla yaklaşık % 5, % 7, % 8, % 9, % 11, % 13, % 17, % 22, % 26 ve % 28 azalmıştır.

90 günlük basınç dayanımlarında da 28 günlük basınç dayanımlarına benzer şekilde en yüksek dayanım 53,9 MPa ile AKÇ5’de elde edilmiştir. Bu yaş grubunda yine 28 günlük dayanım değerlerinde olduğu gibi AKÇ5’den itibaren dayanım değerleri, çimento karışımındaki atık miktarı arttıkça azalma göstermektedir. AKÇ0 kontrol çimentosuna göre dayanım değerleri AKÇ5, AKÇ10, AKÇ15, AKÇ20, AKÇ25, AKÇ30, AKÇ35, AKÇ40, AKÇ45 ve AKÇ50 için sırasıyla yaklaşık % 7, % 9, % 12, % 14, % 16, % 19, % 22, % 29, % 32 ve % 36 azalmıştır.



Şekil 4.7. AKÇ’lerin basınç dayanımı–atık ikame oranı ilişkisi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Karo fabrikası atığının çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir;

- AKÇ'lerde normal kıvam su ihtiyacı, çimento karışımındaki atık oranı arttıkça artış göstermektedir.
- AKÇ'lerin hem priz başı hem de priz sonu süreleri, çimento karışımındaki atık oranı arttıkça artmaktadır.
- AKÇ'lerin hacim genleşme değerleri, çimento karışımındaki atık oranı artmasına karşılık farklı değerler almaktadır.
- AKÇ'lerin yoğunluk değerleri, çimento karışımındaki atık oranı arttıkça azaltmaktadır.
- AKÇ'lerin özgül yüzey değerleri, çimento karışımındaki atık oranı arttıkça artmaktadır.
- AKÇ'lerin basınç dayanımları, çimento karışımındaki atık oranı arttıkça giderek azalmaktadır.
- Deney sonuçları atık malzemenin çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

5.2. Öneriler

Atık malzeme, basınç dayanımında azalma olmasına karşılık % 20 oranına kadar çimento karışımında kullanılabilir;

- Atık malzeme, çimento ile birlikte öğütülmesi halinde nasıl etki yapacağı araştırılabilir.
- AKÇ'ler hızlı priz aldığı için erken priz alması istenen yapı elemanlarında kullanılabilir.



KAYNAKLAR

1. Gürer, C., Akbulut, H., Kürklü, G. (2004). *İnşaat endüstrisinde geri dönüşüm ve bir hammadde kaynağı olarak farklı yapı malzemelerinin yeniden değerlendirilmesi*. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Afyon.
2. Gönen, T., Onat, O., Cemalgil S., Yilmazer, B., Altuncu Y. T. (2012). Beton teknolojisi için yeni atık malzemeler üzerine bir inceleme. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 36-43.
3. Köken, A., Köroğlu, M. A. ve Yonar, F. (2008). Atık betonların beton agregası olarak kullanılabilirliği, *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergisi*, 7(1).
4. Çelik, M. H., Aruntaş, H.Y. ve Baran, Y.(2003). Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllerinin Portland çimentosu – uçucu kül (PÇ-UK) hamurunun priz başlama ve sonu sürelerine etkisi, *Politeknik Dergisi*, 6(1) 397-409.
5. Aruntaş, H.Y. (1996). *Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
6. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, (2012). Çimento Analizleri, *Kimya Teknolojisi Ders Kitabı*, Ankara.
7. Kırıkoğlu, S., Yavuz, F., *Endüstriyel hammaddeler, çimento hammaddeleri*, Teknik İstanbul Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
8. Kökipek, B. (2010). *Suni alçının çimento üretiminde kullanılabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
9. Özışık, G. (2000). *Beton*, İstanbul: Birsen Yayınevi.
10. Eriç, M. (1994). *Yapı Fiziği ve Malzemesi*. İstanbul: Literatür Yayınları.
11. Çavuş, B.Ç.(2008). *Çimento harcında yüksek fırın cürufunun basınç dayanımına etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
12. Şentürk, O. (2006). *Çimento Taş Gibi Yerlerde Çıkabilir*, *Ekonomist Dergisi*, İstanbul: Doğan Burda Dergi Yayıncılık, 44-48.
13. Akman, S. (1990). *Yapı Malzemeleri*, İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi
14. Erdoğan, T.Y. (2003). *Beton*, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık, 10-11.
15. Akman, M.S. (1992). *Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi*, İstanbul: İTÜ Matbaası.
16. Yeğinobalı, A. (1993). *Silis dumanının beton katkı maddesi olarak değerlendirilmesi*, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumunda sunuldu, Ankara.

17. Akman, M. (1994). *Beton Teknolojisine Giriş*, İstanbul: İTÜ Matbaası, 21-29
18. İnternet: Geri dönüşüm,(2007).http://tr.wikipedia.org/wiki/Geri_d%C3%B6nüşüm, Son Erişim Tarihi: 17.03.2014.
19. İnternet: Akman, C. (2007). *Geri Dönüşüm*,<http://st.fatih.edu.tr/~cenkakman/Geridonusum.html>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2014.
20. Kıral, Ş. (2003). *Atıkların inşaat malzemesi olarak değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
21. İnternet: Curi, K., Kocasoy, G. (2005). (Aralık 1982) Geri Dönüşüm. Nisan, <http://st.fatih.edu.tr/~cenkakman/Geridonusum.html>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2014.
22. İnternet: Lyons ve Tonkin, (2005). (Aralık 1975) *Geri Dönüşüm*. <http://st.fatih.edu.tr/~cenkakman/Geridonusum.html>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2014.
23. Yalçın N., Sevinç V. (2000). Utilization of bauxite waste in ceramic glazes, *Ceramics International*, 26, 485 – 493.
24. Nik., D., Oikonomou, (2005). Recycled concrete aggregates, *Cementand Concrete Composites*, 27(2), 315–318.
25. Rakshvir, M., Barai, V.S. (2006). Studies on recycled aggregates-based concrete, *Waste Management & Research Research*, 24, 225–233.
26. Tu, Y.T. Chen, Y.Y. Hwang, L.C. (2006). Properties of HPC with Recycled Aggregates, *Cementand Concrete Research*, 36, 943–950.
27. Onat, B., Uğurlu, A., Atık su Arıtım Çamuru Külünün Beton Malzemesi Olarak Kullanılması, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 3 *Bildiriler Kitabı*, 1-2, Ekim, Eskişehir, (1997).
28. Aruntaş, H.Y., Dayı, M., Tekin, İ., Birgül, R., Şimşek, O., “Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Atık Mermer Tozunun Etkisi”, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara, 173-180, 2007.
29. Turanlı, L., Bektaş, F., Monteriro, P.I.M. (2003). Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silicic reaction. *Cementand Concrete Research*, 33, 1539-1542.
30. Chich-Huang W, Deng-Fong L, Pen-Chi, C, (2002). Utilization of sludge as brick materials, *Advances in Environmental Research*, Taiwan.
31. İnternet: Yüceler, A., Çelik O. N. (2016). *Polimerlerin asfalt betonunda kullanılması ve atık plastiklerin değerlendirilmesi*, <http://www.imo.org.tr/Yayinlar/td/Gsayilar/Cilt2.htm>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2014.
32. Kula, İ. (2000). *Bor endüstri atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

33. Dayı, M., Aruntaş, H.Y., Çavuş, M., Şimşek, O. (2013). Zeolit, Uçucu Kül ve Atık Cam Malzemelerin Portland Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi. Dergisi,491-499.
34. TS EN 196-1. (2002). Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
35. TS EN 196-2. (2002). *Çimento Deney Metotları – Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
36. TS EN 196-3. (2002).*Çimento Deney Metotları – Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi Tayini*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
37. TS EN 196-6. (2002). *Çimento Deney Metotları - İncelik Tayini*,Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 1-3.







EKLER

Ek-1. Resimler

Resim 1. Bilyalı Deęirmen.



Resim 2. Otomatik Vicat Aleti.



Ek-1. (devam) Resimler

Resim 3. Blaine Cihazı.



Resim 4. Basınç Dayanımı Deney Cihazı.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KOCAKAYA, Fatih
 Uyuđu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 19/12/1983 Çerkeş-Çankırı
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 565 22 26
 Faks : 0 (312) 266 77 19
 e-posta : fkocakaya@msn.com



Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet yılı
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Yapı Eğitimi Bölümü	Devam Ediyor
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü	2005
Lise	50. Yıl Lisesi	2000

İş Deneyimi, Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2012-Devam Ediyor	Toplu Konut İdaresi Başkanlığı	Uzman/Mühendis
2007-2012, 5 Yıl	Yüksel Proje A.Ş.	Kontrol Mühendisi
2005-2007, 2 Yıl	Yüksel İnşaat A.Ş.	Mühendis

Yabancı Dili

İngilizce

Hobiler

Futbol oynamak, kitap okumak, seyahat etmek.