

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KALSİNE KIRMIZI ÇAMURUN PUZOLANİK AKTİVİTE VE BETONUN
RENKLENDİRME, MİNERALOJİ VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YASEMİN KILIÇ

**DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÜRETİM PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF.DR. MÜZEYYEN MARŞOĞLU**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KALSİNE KIRMIZI ÇAMURUN PUZOLANİK AKTİVİTE VE BETONUN
RENKLENDİRME, MİNERALOJİ VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Yasemin KILIÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 17 / 07 / 2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Dr. Esin GÜNAY
TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fevziye AKÖZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cemalettin YAMAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Abdülkadir Okan ADDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Onuralp Yücel
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamın bütün aşamalarını titizlikle takip edip beni yönlendiren, emek veren, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmalarım sırasında sonuçların yorumlanması ve değerlendirilmesi sırasında maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan çok değerli danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU'na ve Dr. Esin GÜNAY'a teşekkür eder, sonsuz şükranlarımı sunarım. Tez izleme süresince, önerileri ile tezimin gelişimine destek olan çok değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Fevziye AKÖZ'e ve Sayın Prof. Dr. Abdülkadir Okan ADDEMİR'e çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımın laboratuvar sürecindeki her aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli mesai arkadaşlarım TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü çalışanlarına çok teşekkür ederim. Tez çalışmamın her aşamasında maddi destek sağlayan TÜBİTAK TEYDEB'e çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını ve laboratuvar olanaklarını esirgemeyen Sayın E. Giray ARSLAN'a, Sayın Naci YILMAZ'a, Sayın Filiz ÇETİNKAYA'ya, İSTON A.Ş Ar&Ge ve Kalite Laboratuvarı çalışanlarına çok teşekkür ederim. Tez çalışmalarım sırasında her konuda bilgi ve deneyimini benimle paylaşan, yol gösterici olan Sayın Prof. Dr. Volkan GÜNAY'a çok teşekkür ederim.

İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı imkânlarından yararlanmamı sağlayan Sayın Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e çok teşekkür ederim. Harç numunelerinde alkali-silika deneylerimin yapılmasında maddi desteklerini esirgemeyen Hazır Beton Birliği'ne çok teşekkür ederim. Atık kırmızı çamurun temininde desteklerini esirgemeyen Sayın Akif TOYDEMİR ve Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş - Cengiz Grup'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen mesai arkadaşlarım Yusuf ÖZTÜRK'e, Meryem SARIGÜZEL'e, Ömer GÜNEŞ'e, Emre KARABEYOĞLU'na ve Bilal ALCAN'a çok teşekkür ederim. Doktora çalışmalarım sırasında ve öncesinde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bana her zaman güvenen ve her konuda büyük moral kaynağım olan sevgili babam Bahattin DEMİRCİ'ye, sevgili annem Sevim DEMİRCİ'ye, sevgili kardeşim Çiğdem DEMİRCİ'ye ve sevgili eşim Baran KILIÇ'a çok teşekkür ederim.

Temmuz, 2013

Yasemin KILIÇ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
GENEL BİLGİLER.....	4
2.1 Boksit ve Boksit Karakterizasyonu	4
2.1.1 Boksitlerin Sınıflandırılması	5
2.1.1.1 Mineralojik Yapılarına Göre Boksitler	5
2.1.1.2 Oluşum Tarzlarına Göre Boksitler	6
2.1.1.3 Endüstriyel Olarak Sınıflandırmalar	6
2.1.2 Boksit Çeşitleri ve Özellikleri.....	8
2.1.3 Boksitte Bulunan Başlıca Safsızlıklar ve Etkileri	8
2.1.3.1 Silisyum	9
2.1.3.2 Demir.....	9
2.1.3.3 Titanyum	10
2.1.3.4 Kalsiyum	10
2.1.3.5 Kükürt.....	10
2.1.4 Dünya’da Boksit Üretimi.....	11
2.1.4.1 Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.-Cengiz Holding Tesisleri	12
2.2 Bayer Prosesi.....	14

2.3	Kırmızı Çamurun Karakteristik Özellikleri	18
2.4	Kırmızı Çamurun Depolanması.....	21
2.5	Kırmızı Çamurun Kullanım Alanları	21
2.5.1	Çimento ve Beton Üretiminde Kullanımı.....	21
2.5.2	Yol İnşaatında ve Hafif Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılması ..	27
2.5.3	Seramik Üretiminde Kullanılması	28
2.5.4	Kimya Sektöründe Kullanılması	29
2.5.5	Kırmızı Çamurun ve Boksit Cevherlerinin Asidik Ortamda Çözünürlük Çalışmaları	29
2.6	Çimento.....	31
2.6.1	Portland Çimentosu	35
2.6.2	Çimento Sanayinde Kullanılan Katkı Maddeleri	35
2.6.2.1	Puzolanik Maddeler	35
2.6.3	Çimentonun Ana Karma Bileşenleri.....	36
2.6.4	Çimentoların Prizi	37
2.6.5	Portland Çimentonun Hidratasyonu.....	38
2.6.5.1	Portland Çimento Bileşiklerinin Hidratasyon Karakteristikleri .	38
2.6.6	Dünya’da ve Türkiye’de Çimento Üretimi	42
2.7	Beton.....	43
2.7.1	Betonu Oluşturan Hammaddeler	44
2.7.1.1	Çimento	44
2.7.1.2	Agrega	44
2.7.1.3	Karışım Suyu	45
2.7.1.4	Katkı Maddeleri	46
2.7.2	Beton Çeşitleri	46
2.7.3	Beton Kalitesi	48
2.7.3.1	Beton Dökümü	48
2.7.3.2	Sıkıştırma	49
2.7.4	Dünya’da ve Türkiye’de Beton Üretimi	50
2.7.5	Beton Ürün Grupları	51
2.7.5.1	Parke Taşı	51
2.7.5.2	Bordür Taşı	51
2.7.5.3	Kent Mobilyaları	51
BÖLÜM 3		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		54
3.1	Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	57
3.2	Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar	57
3.3	Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Karakterizasyonu	58
3.3.1	Ham Kırmızı Çamurun Kurutulması	58
3.3.2	Ham Kırmızı Çamurun Pulverize Edilmesi.....	59
3.3.3	Ham Kırmızı Çamurun Kalsinasyon İşlemi	59
3.3.4	Kırmızı Çamurların Kimyasal Özellikleri	59
3.3.4.1	Kırmızı Çamurlarda Elementel (XRF) Analiz	59
3.3.4.2	Kırmızı Çamurlarda Mineralojik (XRD) Analiz	60
3.3.4.3	Kırmızı Çamurların Mikroyapı Karakterizasyonu (SEM) Analizi .	62

3.3.4.4	Kırmızı Çamurun DTA/TG Cihazı İle Termal Davranışının İncelenmesi	64
3.3.4.5	Kırmızı Çamurun FTIR Analizi	65
3.3.5	Kırmızı Çamurların Fiziksel Özellikleri.....	66
3.3.5.1	Kırmızı Çamurların Elek Analizleri	66
3.3.5.2	Kırmızı Çamurların BET Yüzey Alanı, Tane Boyut ve Özgül Ağırlıkları	67
3.3.5.3	Kırmızı Çamurların Renk Ölçümü	67
3.3.5.4	Kırmızı Çamurun Radyoaktivite Ölçümü	68
3.3.6	Kırmızı Çamurun Puzolanik Aktivitesinin Araştırılması.....	69
3.3.7	Kırmızı Çamurun Alkali-Silika Reaksiyonu Yönünden Değerlendirilmesi.....	69
3.3.8	Kırmızı Çamurun Çevreye Uyumunun Araştırılması	70
3.3.9	Ticari Bayer 130 G Pigmenti Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	77
3.3.10	RILEM Chembureau Standart Kumunun Kimyasal Özellikleri	78
3.3.11	CEM I 42.5 R Portland Çimento Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	79
3.4	Harç Numuneleri Üretimi.....	81
3.4.1	Harç Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	82
3.4.1.1	Eğme Dayanımı	82
3.4.1.2	Basma Dayanımı.....	84
3.4.2	Harç Numunelerinin Renk Özelliklerinin Belirlenmesi	86
3.4.3	Harç Numunelerinin Mineralojik Özelliklerinin Belirlenmesi	88
3.4.4	Sertleşmiş Harçlarda Mikroyapı Analizleri.....	90
3.4.5	Kırmızı Çamur İkameli Harç Numunelerinin Termal Analiz Değerlendirmesi.....	91
3.5	Pigment ve Kırmızı Çamur İkameli Parke Taşı ve Bordür Taşı Üretimi	93
3.5.1	Pigment ve Kırmızı Çamur İkameli Parke Taşları ve Bordür Taşlarının Renk Özelliklerinin İncelenmesi	95
3.5.2	Pigment ve Kırmızı Çamur İkameli Parke Taşları ve Bordür Taşlarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	96
3.6	Renkli Agregası ve Kırmızı Çamur İkameli Şehir Mobilyaları Üretimi.....	99
3.6.1	Renkli Agregası ve Kırmızı Çamur İkameli Şehir Mobilyalarının Renk Özelliklerinin İncelenmesi.....	101
3.6.2	Renkli agregası ve Kırmızı Çamur İkameli Şehir Mobilyalarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	101
3.7	Renkli Pigment ve Kırmızı Çamur İkameli Prototip Beton Numunelerinin Renk Ömür Performanslarının Araştırılması	102
3.8	Kırmızı Çamur İkameli Harç Numuneleri ve Prototip Beton Numunelerinin Çevreye Uyum Testleri	104
BÖLÜM 4		
DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ.....		107
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		112

KAYNAKLAR.....	116
EK-A.....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	130

SİMGE LİSTESİ

A	Yükün Uygulandığı Alan
Å	Angstrom
b	Harç Numunesi Kare Kesitinin Kenar Uzunluğu
°C	Sıcaklık
d	Düzlemlerarası Mesafe
F	Kırılma Kuvveti
F _c	Kırılmadaki En Büyük Yük
F _f	Harç Numunesinin Kırıldığı Anda Uygulanan Kuvvet
g	Gram
I	Şiddet
kN	Kilonewton
l	Mesnet Silindirleri Arasındaki Uzaklık
λ	Dalga Boyu
MPa	Megapaskal
µm	Mikrometre
N	Newton
Pa	Paskal
R _c	Basma Dayanımı
R _f	Eğme Dayanımı
T	Yarmada Çekme Dayanımı

KISALTMA LİSTESİ

a*	Kırmızı-Yeşil Renk
ADDDY	Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
AYGEİY	Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik
b*	Sarı-Mavi Renk
ÇNAEM	Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Infared Spektroskopisi
ICDD	Uluslararası Difraksiyon Veri Merkezi
L*	Açıklık/Koyuluk
PÇ	Portland Çimento
PDF	Toz Difraksiyon Kartları
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TG/DTA	Termal Gravimetri/ Diferansiyel Termal Analiz
TS	Türk Standartları
WDXRF	Dalga Boyu Dağılımlı X-Işını Floresans Spektrometresi
XRD	X-Işını Difraktometresi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.'ye ait üretim akış şeması	13
Şekil 2. 2	Bayer prosesi akış şeması-1	15
Şekil 2. 3	Bayer prosesi akış şeması-2	16
Şekil 2. 4	Kırmızı çamur karakteristikleri	20
Şekil 2. 5	Çimento kodlamasının açıklanması	34
Şekil 2. 6	Agrega-çimento ara yüzeyi	40
Şekil 2. 7	Hidrate olmuş çimento harcı (Su/Beton oranı: 0.55) A = CH (Kalsiyum hidroksit kristalleri), B = C-S-H (tobermorit) ve C = Etrenjit iğnemsî yapıları	41
Şekil 2. 8	Etrenjit kristalleri görüntüsü	41
Şekil 2. 9	2010 yılı Dünya çimento üretimi.....	42
Şekil 2. 10	2010-2011 yılı Türkiye çimento üretimi.....	43
Şekil 2. 11	Betonun yapısı.....	43
Şekil 2. 12	Beton çeşitleri	47
Şekil 2. 13	2010 yılı Dünya beton üretimi (milyon m ³).....	50
Şekil 2. 14	1988-2010 Türkiye beton üretim grafiği.....	51
Şekil 3. 1	Ham kırmızı çamurun DTA/TG eğrisi.....	64
Şekil 3. 2	Ham kırmızı çamurun TG ve dTG/dT eğrisi	65
Şekil 3. 3	Ham kırmızı çamurun FTIR spektrumu.....	65
Şekil 3. 4	Kırmızı çamurların granülometri eğrileri.....	66
Şekil 3. 5	Kırmızı çamurların CIE L*a*b* renk özelliklerinin koordinat ekseninde gösterimi.....	68
Şekil 3. 6	Eğme dayanım deney düzeneği	83
Şekil 3. 7	Kırmızı çamur ikameli harç numuneleri 2, 7, 28 ve 90. gün eğme dayanım değişimleri	84
Şekil 3. 8	Basma dayanım deney düzeneği	85
Şekil 3. 9	Kırmızı çamur ikameli harç numuneleri 2, 7, 28 ve 90. gün basma dayanım değişimleri	86
Şekil 3. 10	Kontrol harç numuneleri 2.,7., 28. ve 90. günde DTA/TG eğrileri	92
Şekil 3. 11	Yarmada çekme dayanım deney düzeneği	97
Şekil A. 1	Kırmızı çamurun depolanma şekilleri.....	121
Şekil A. 1a	Kırmızı çamurun farklı yöntemlerle depolanma şekilleri.....	121
Şekil A. 1b	Fransa'da kırmızı çamurun depolanma şekilleri	121
Şekil A. 2	Doğal ve yapay agregaların görünümü	122

Şekil A. 2a	Çakıl (sol) kırma taş (sağ) doğal agregalar	122
Şekil A. 2b	Genleştirilmiş kil (sol), cüruf (sağ) yapay agregalar	122
Şekil A. 3	Parke taşı görünümü	122
Şekil A. 4	Bordür taşı görünümü	123
Şekil A. 5	Ham kırmızı çamurun kurutma prosesi öncesi ve sonrası görüntüleri	123
Şekil A. 6	SEM mikroyapı görüntüleri (a) H, (b) P, (c) K6, (d) K7, (e) K8	124
Şekil A. 7	Harç karışımlarının karıştırıldığı karıştırıcı	125
Şekil A. 8	Harç numunelerinin hazırlandığı kalıp düzeneği	125
Şekil A. 9	Eğme dayanım cihazı	126
Şekil A. 10	Basma dayanım cihazı	126
Şekil A. 11	Üretim sonrası parke taşları görünümü (a) BCP-1, (b) BH-2, (c) BH-3, (d) BH-4, (e) BH-5, (f) Parke taşlarının shrink ile kaplanması	127
Şekil A. 12	Üretim sonrası bordür taşı görünümü (a) BCP-1, (b) BH-2, (c) BH-3, (d) BH-4, (e) BH-5	128
Şekil A. 13	Şehir mobilyaları üretim görüntüsü	129
Şekil A. 14	Parke taşlarının iklimlendirme kabinine yerleştirilmesi	129

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1	Boksit içerisinde bulunan başlıca mineraller	5
Çizelge 2. 2	Modül değerlerine göre boksit sınıfları	7
Çizelge 2. 3	BEV değerlerine göre boksit sınıfları	8
Çizelge 2. 4	Boksit çeşitleri ve özellikleri	8
Çizelge 2. 5	Dünya'da boksit üretimi (bin ton)	11
Çizelge 2. 6	Türkiye'deki bazı boksit yataklarının analizi.....	12
Çizelge 2. 7	Dünya'daki farklı bölgelere ait kırmızı çamur bileşimi	19
Çizelge 2. 8	Genel çimento özellikleri.....	33
Çizelge 2. 9	Çimento standart basma dayanımları.....	35
Çizelge 2. 10	Trasın kimyasal özellikleri.....	36
Çizelge 2. 11	Ana bileşenlerin özellikleri	37
Çizelge 2. 12	C ₂ S bileşiği hidratasyon karakteristikleri	39
Çizelge 2. 13	C ₃ S bileşiği hidratasyon karakteristikleri	39
Çizelge 2. 14	C ₃ A bileşiği hidratasyon karakteristikleri	40
Çizelge 2. 15	C ₄ AF bileşiği hidratasyon karakteristikleri.....	42
Çizelge 2. 16	Betonun dayanımını etkileyen faktörler	48
Çizelge 3. 1	Kırmızı çamur ve harç numune karışımlarının kodlanması	54
Çizelge 3. 2	Parke taşı ve bordür taşı beton karışımlarının kodlanması.....	55
Çizelge 3. 3	Şehir mobilyaları için beton karışımlarının kodlanması	56
Çizelge 3. 4	Kurutma işleminden sonra ham, pulverize ve kalsine kırmızı çamurlara yapılan deneyler.....	56
Çizelge 3. 5	Harç numunelerinde yapılan deneyler.....	57
Çizelge 3. 6	Kırmızı çamurların kimyasal bileşimi	60
Çizelge 3. 7	Kırmızı çamurlar içerisinde yer alan bileşiklerin yaklaşık ağırlıkça miktarları (%)	62
Çizelge 3. 8	Kırmızı çamurların EDX analiz sonuçları (20000X büyütme)	63
Çizelge 3. 9	FTIR spektrumunda gözlenen bandlar ve yorumları	66
Çizelge 3. 10	Kırmızı çamurların BET yüzey alanı, tane boyut ve özgül ağırlık değerleri	67
Çizelge 3. 11	Kırmızı çamurların CIE L*a*b* verileri.....	68
Çizelge 3. 12	14. günde harç numunelerinin boy değişimi için sınır değerler.....	69
Çizelge 3. 13	Harç numunelerinin 3., 7. ve 14. günde ortalama boy değişim değerleri	70
Çizelge 3. 14	Ham kırmızı çamur içerisinde yer alan mineralojik fazların AYGEİY EK-IIIB yönetmeliğine göre eşik konsantrasyonları	74

Çizelge 3. 15	Ham kırmızı çamur içerisinde yer alan elementlerin AYGEİY EK-IIIB yönetmeliğine göre eşik konsantrasyonları	75
Çizelge 3. 16	Ham kırmızı çamurun yaş kimyasal analizi.....	77
Çizelge 3. 17	Bayer 130 G pigmentine ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	78
Çizelge 3. 18	RILEM Chembureau standart kumunun kimyasal bileşimi	79
Çizelge 3. 19	CEM I 42.5 R Portland çimentosunun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	80
Çizelge 3. 20	CEM I 42.5 R Portland çimentosunun kimyasal bileşimi.....	81
Çizelge 3. 21	Harç numunelerinde kullanılan malzeme miktarları.....	82
Çizelge 3. 22	Harç numunelerinin eğme ve basma dayanım değerleri.....	85
Çizelge 3. 23	Harç numunelerinin CIE L*a*b* verileri.....	87
Çizelge 3. 24	Harç numunelerinde yer alan bileşikler	89
Çizelge 3. 25	Sertleşmiş harçlarda EDX analiz sonuçları (5000X büyütme).....	90
Çizelge 3. 26	Harç numunelerinin zamana bağlı Ca(OH) ₂ değişimi	93
Çizelge 3. 27	1 m ³ için parke taşı ve bordür taşı üst tabaka beton karışımı.....	94
Çizelge 3. 28	Parke taşları ve bordür taşlarının CIE L*a* b* renk özelliklerinin kırmızı çamur ve Bayer 130G pigment karışım oranlarına göre değişimi	96
Çizelge 3. 29	Parke taşları ve bordür taşlarının yarmada çekme ve eğme dayanımı deney sonuçları	98
Çizelge 3. 30	1 m ³ için küre sınır elemanı ve çöp kovası beton karışımı	100
Çizelge 3. 31	Küre sınır elemanı ve çöp kovası CIE L*a*b* verileri	101
Çizelge 3. 32	Küre sınır elemanı ve çöp kovası basma dayanım değerleri	102
Çizelge 3. 33	Parke taşlarının +40°C’de (ilkbahar-yaz mevsimi koşullarında) renk ömür performans testi öncesi ve sonrası renk ölçüm sonuçları.....	103
Çizelge 3. 34	Parke taşlarının -10°C’de (sonbahar-kış mevsimi koşullarında) renk ömür performans testi öncesi ve sonrası renk ölçüm sonuçları.....	104
Çizelge 3. 35	Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik gereğince (ADDDY- EK 2) kabul edilen limit değerleri	106

**KALSİNE KIRMIZI ÇAMURUN PUZOLANİK AKTİVİTE VE BETONUN
RENKLENDİRME, MİNERALOJİ VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Yasemin KILIÇ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU

Eş Danışman: Dr. Esin GÜNAY

Kırmızı çamur, Bayer prosesi ile boksit cevherinden alüminyum üretimi sırasında ortaya çıkan endüstriyel bir atıktır. Dünyada, alüminyum üretimine bağlı olarak büyük miktarda kırmızı çamur birikmekte, çevre ve insan sağlığı açısından sorun haline gelmektedir. Genel olarak, üretilen 1 ton alümina veya 0.5 ton alüminyum metali üretimine karşılık yaklaşık 1 ton kırmızı çamur atığı oluşmaktadır.

Bu tezin amacı; Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş'den temin edilen atık kırmızı çamurun beton sektöründe renklendirici pigment, filler ve puzolan malzeme olarak değerlendirilmesidir. Tezin kapsamında öncelikle; atık kırmızı çamurun mineralojik, elementel, mikroyapı, tane boyut, yüzey alanı, yoğunluk, termal, renk, radyoaktivite, alkali-silika reaksiyon ve çevre uyum özellikleri belirlenmiştir. Tezin ikinci aşamasında; kırmızı çamurun çimento yerine ağırlıkça %10 ikame edilmesi sonrası üretilen standart harç numunelerinin 2., 7., 28. ve 90. günde mekanik, mineralojik, mikroyapı ve termal özellikleri belirlenmiştir. Tezin son aşamasında atık kırmızı çamur; parke taşı, bordür taşı prototip ürünlerinde renklendirici pigment; şehir mobilyaları prototip ürünlerinde ise agrega olarak kullanılmıştır. Geliştirilmiş betonların renklendirme ve mekanik

özellikleri, geleneksel pigment ve agrega ile üretilmiş beton ürünler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca; kırmızı çamur ikameli renkli beton ve harç numune örneklerinin çevreye uyum performans deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

Kırmızı çamurun farklı sektörlerde kullanım olanaklarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen araştırma geliştirme çalışmaları ülkemizde genellikle seramik ve tuğla üretimi üzerine yoğunlaşmıştır. Kırmızı çamurun puzolanik pigment veya agrega olarak renkli beton üretiminde kullanılması, renklendirme özelliklerinin incelenmesi, parke taşı, bordür taşı ve şehir mobilyaları olarak prototiplerin geliştirilmesi çalışmaları, endüstriyel bir atığın ticari bir ürüne dönüştürülmesi yolunda ülkemizde önemli öncü çalışmalardan olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kırmızı çamur, pigment, filler, kalsinasyon, renkli beton, mekanik özellik, renk özelliği, puzolanik özellik

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF CALCINED RED MUD EFFECTS ON POZZOLANIC ACTIVITY AND COLOURING, MINERALOGICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF CONCRETE

Yasemin KILIÇ

Department of Metallurgical and Material Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU

Co-Adviser: Dr. Esin GÜNAY

Red mud is an industrial waste of the Bayer process which is used for the production of alumina from bauxite ore. In the world, a large amount of red mud accumulates depending on the production of aluminium, becoming a problem for environment and human health. Generally, the production of 1 ton alumina or 0.5 ton aluminium metal generates approximately 1 ton red mud waste.

The aim of this thesis is to utilize red mud from Eti Aluminium Company as a colourant pigment, filler or pozzolanic material in construction industry. Primarily within the scope of the thesis; mineralogical, microstructural, grain size, surface area, density, thermal, colouring, radioactivity, alkali-silica reaction and environmental compliance properties of waste red mud were determined. In the second stage of the thesis; mechanical, mineralogical, microstructural and thermal properties of 2., 7., 28. and 90. days standard mortar specimens that prepared with red mud replaced cement in the amount of 10 wt%. In the final stage of the thesis; red mud was used as colourant pigment in paving stone, curb stone and as aggregate in city furniture prototypes. Colouring and mechanical properties of produced concretes were compared with traditional pigment and aggregate containing concrete products. Besides, environmental compliance tests of red mud containing colourant products and mortar specimens were performed.

Research and development studies of utilization of red mud in different industries are focused on ceramic and tile productions in our country. The utilization of red mud as a pozzolanic pigment or aggregate in coloured concrete production, investigation of colouring properties, development of paving stone, curb stone and city furniture prototypes has been an important pilot study for recycling an industrial waste to commercial product in our country.

Keywords: Red mud, pigment, filler, calcination, coloured concrete, mechanical property, colour property, pozzolanic property

1.1 Literatür Özeti

Çeşitli endüstriyel ürünlerin elde edilmesi esnasında üretim amacının dışında yan ürün olarak birçok atık malzeme açığa çıkmaktadır. Bu malzemelerin bir kısmı tekrar geri kazanılmakta, önemli bir kısmı ise çeşitli şekillerde bulunduğu ortamdaki uzaklaştırılmaktadır. Yan ürün veya atık olarak elde edilen ve büyük miktarlara ulaşan bu malzemeler içerdikleri zararlı maddelerden dolayı, önemli ölçüde çevresel problemlere sebep olmaktadır. Gerek insan sağlığını gerekse doğanın ekolojik dengesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Bunlardan kırmızı çamur, Bayer prosesi ile boksitten alümina üretimi sırasında ortaya çıkan endüstriyel bir atıktır. Alüminyum üretimi için kullanılan boksit cevherinin yaklaşık %40'ı kırmızı çamur olarak açığa çıkmaktadır. Bir başka deyişle, üretilen 1 ton alümina veya 0.5 ton alüminyum metaline karşılık kuru bazda yaklaşık olarak 1 ton kırmızı çamur meydana gelmektedir. Son 10 yıldır, Dünya'da yaklaşık olarak 90 milyon ton, Seydişehir Alüminyum Tesis'lerinde de 3 milyon ton kırmızı çamur birikmektedir. Giderek artan alüminyum metali üretiminde kırmızı çamur, bu endüstrinin en önemli atık problemi haline gelmiştir.

Bazı üretici kuruluşlar kırmızı çamuru olduğu gibi denize pompalarken bazıları da bunu yerleşim birimlerinden uzakta inşa edilen barajlara pompalamaktadırlar. Kırmızı çamur, gerek kostik soda ve zararlı maddeleri içermesinden, gerekse depolanması nedeniyle önemli bir çevre sorunu oluşturmaktadır. Ayrıca, yazın kuruyan kırmızı çamurun

rüzgârla havayı kirletmesi nedeniyle çevre ve insan sağlığı bakımından endişe yaratmaktadır.

Kırmızı çamurun çevresel ve diğer zararlı etkilerini giderebilmek ve kullanılabilir hale getirebilmek için birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, kırmızı çamurun içerdiği bileşiklerden birini veya tamamını kazanma, kırmızı çamurun metalurji, inşaat ve kimya sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması, kırmızı çamurun susuzlaştırılması ve çevreye olan etkilerinin azaltılması konularında olmuştur. Bu çalışmalar sonucunda, kırmızı çamurun ekonomik olarak kullanılabileceği en uygun sektörün inşaat sektörü olduğu belirlenmiştir. Kırmızı çamur, yer ve cephe kaplaması ve tuğla, kiremit üretiminde kullanılabileceği gibi, betonu renklendirici bir katkı olarak da kullanılabilmektedir. Ayrıca ince bir malzeme olduğundan çimentonun bir bölümüyle yer değiştirebildiğinde boşlukları doldurma malzemesi (filler malzeme) olarak düşünülebilmektedir. Talep ve tüketim açısından bakıldığında, yıllık birikim miktarı oldukça fazla olan kırmızı çamur atığını pigment veya agrega olarak özellikle beton üretiminde değerlendirilmesinin hammadde ve maliyet açısından önemli miktarda tasarruf sağlayacağı öngörülebilmektedir. Böylece, endüstriyel bir atığın değerlendirilmesi ile bu atığın çevreye verdiği/vereceği zararların önlenmesinin yanında, sözkonusu atıkların taşınması, depolanması ve oluşacak verim kaybının önlenmesi gibi ekonomik getiriler de sağlanmış olacaktır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı; Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş'den temin edilen atık kırmızı çamurun renkli beton üretiminde pigment veya filler olarak kullanımının araştırılmasıdır. Tezde bu amaç ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda pigment veya filler olarak kırmızı çamur kullanımıyla üretilen betonların renk ve mekanik özellikleri, ticari pigment veya ticari filler ile üretilmiş geleneksel betonların özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca; kırmızı çamur ikameli renkli betonların çevreye uyum ve ömür performansları da araştırılmıştır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş'den temin edilen kırmızı çamur atığının ince tane boyutu ve renk özellikleri nedeniyle renkli beton üretiminde pigment veya filler (boşlukları doldurucu) olarak kullanılabileceğini ve elde edilecek ürünlerin renk, mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştireceği, çalışma sonucunda endüstriyel bir atığın ticari bir ürün olarak değerlendirilebilmesi ile hem ekolojik hem de ekonomik olarak ülkemiz açısından katkı sağlayacağı öngörülmüştür. Bu çerçevede, ağırlıkça farklı oranlarda kırmızı çamurun, renkli beton üretiminde ticari pigment veya agrega ile birlikte veya tek başına kullanımı sonrası üretilen ürünlerin renk, mekanik ve fiziksel özelliklerinde meydana getireceği değişimler irdelenmelidir.

GENEL BİLGİLER

2.1 Boksit ve Boksit Karakterizasyonu

Boksit, mohs sertliği 1-3, yoğunluğu $2.5\text{--}3.5\text{ g/cm}^3$ arasında değişen başlıca alüminyum hidroksit minerallerinin (gibsit/hidrarjilit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ trihidrat, diaspor $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ve böhmit $\text{AlO}(\text{OH})$ monohidratları) heterojen bir karışımıdır. Boksitin temel bileşeni alüminyum oksittir. Boksitler, %10-30 arasında Fe içeriğine sahip, demir oksit ve hidroksit mineralleri ile birlikte bulunurlar. Bu mineraller manyetit, hematit, limonit ve götitdir. Boksit, içerdiği demir oksitlerden dolayı renklidir. Hematit boksite kırmızı, limonit ise sarı rengini vermektedir. Boksit içerisindeki demir içeriği az ise, mineral açık-beyaz renklidir.

Boksit içerisinde bulunan bir diğer mineral kildir (kaolen). Kil, boksit yataklarının ve özellikle silikat boksitlerinin tabanında bulunmaktadır. Boksit içerisinde bulunan başlıca mineraller Çizelge 2. 1'de verilmiştir. Dünyada, metal alüminyum üretiminin %90'ı boksit cevherinden sağlandığından boksit cevheri dünya ticaretinde önemli bir yer tutmaktadır.

Çizelge 2. 1 Boksit içerisinde bulunan başlıca mineraller

Element	Mineral	Formül
Al	Gibsit	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Böhmit	$\gamma\text{-AlOOH}$
	Diaspor	$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Fe	Götite	$\alpha\text{-FeOOH}$
	Hematit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
	Magnetit	Fe_3O_4
	İlmenit	$\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$
Si	Kaolinit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Kuvars	SiO_2
	Sillimanit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Halloysit	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Ti	Anataz	TiO_2
	Rutil	TiO_2

2.1.1 Boksitlerin Sınıflandırılması

Boksitler, mineralojik yapılarına, oluşum tarzlarına ve endüstriyel kullanımına göre olmak üzere 3 grupta incelenmektedir.

2.1.1.1 Mineralojik Yapılarına Göre Boksitler

Mineralojik yapılarına göre gibsitik, böhmitik ve diasporitik olmak üzere 3'e ayrılmaktadır.

1-Gibsitik boksitler (trihidratik): Hidrarjilit olarak adlandırılan gibsit, yer kabuğunda doğal olarak bulunan alüminyum trihidrattan oluşmaktadır. Diğer alüminyum hidrat tiplerinden ayırmak için, γ -alüminyum trihidrat olarak sınıflandırılır.

2-Böhmitik boksitler (monohidratik): Akdeniz çevrelerinde en yaygın bulunan boksit cinsidir. Boksitin böhmit içerip içermediği, X-ışınları veya diferansiyel termal analizlerle anlaşılabilir. Böhmit, termal analiz sırasında 450-600°C sıcaklık aralığında endotermik bir reaksiyon vermesi ile belirlenmektedir [1].

3-Diasporitik boksitler (monohidratik): Diaspor yataklarının, paleozoik çağlarda yüksek basınç ve sıcaklıkta oluştuğu sanılmaktadır. Laboratuvarlarda yapılan deneyler, diaspor oluşumunun 140 atm basınç altında ve 275°C'den daha yüksek sıcaklıklarda olabileceği fikrini kuvvetlendirmektedir. X-Işınları veya diferansiyel termal analizlerle belirlenmektedir [1].

2.1.1.2 Oluşum Tarzlarına Göre Boksitler

Oluşum tarzlarına göre lateritik ve karstik olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır.

1-Lateritik (silikat) boksitler: Alüminyum bakımından zengin silikat kayaçlarının aşınması ve yıkanması sonucu oluşurlar. Bunun için yağışlı ve ılık, tropikal iklimler, geçirgenliği ve tektonik stabilitesi olan kayaçlar en uygun ortamlardır. Diğer elementlerin yüzey akıntılarıyla yıkanması alüminyumca zenginleşmeyi sağlar.

2-Karstik boksitler: Kireçtaşı ve dolomitlerin karstik boşluklarında oluşurlar. Alüminyumu başka ortamlarda çözmüş olan asidik karakterli yüzey suları, kireçtaşları içinde nötürleşerek ortamın alüminyumca zenginleşmesine neden olurlar [2].

2.1.1.3 Endüstriyel Olarak Sınıflandırmalar

Kullanım amaçlarına göre 3'e ayrılmaktadır.

1-Al₂O₃/SiO₂ oranı ve Fe₂O₃ tenörüne göre sınıflandırma:

- Al₂O₃/SiO₂ > 20 (Yüksek alüminalı cevher)
- Al₂O₃/SiO₂ = 10-20 (Alüminalı cevher)
- Al₂O₃/SiO₂ = 4-10 (Silisli cevher)
- Al₂O₃/SiO₂ < 4 (Yüksek silisli cevher)
- %Fe₂O₃ >25 (Yüksek demirli cevher)
- %Fe₂O₃ = 10-25 (Demirli cevher)
- %Fe₂O₃ <10 (Az demirli cevher)

2- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (modül) oranına göre sınıflandırma:

Endüstriyel, alüminyum hammadde ve alüminyumlu kil olmak üzere 3 sınıfa ayrılmaktadır (Çizelge 2. 2).

Çizelge 2. 2 Modül değerlerine göre boksit sınıfları

Karakteristik Bileşenler (%)		Endüstriyel Boksit			Alüminyum Hammadde Boksit			Alüminyumlu Kil
Al_2O_3	En az	-	-	-	-	-	-	26
	En çok	46	46	40	40	35	26	-
SiO_2	En çok	1.6	6.5	10	15.4	30.7	30.6	30.6
Fe_2O_3	En çok	26	26	26	26	-	-	-
TiO_2	En çok	5	5	5	5	-	-	-
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ Modülü		10	7	4	2.6	1.14	0.85	-
CaO	En çok	0.5	0.5	0.5	0.5	-	-	-
MgO	En çok	0.2	0.2	0.2	0.2	-	-	-
P_2O_5	En çok	0.2	0.2	0.2	0.2	-	-	-
SO_3	En çok	1.5	1.5	1.5	1.5	-	-	-
C	En çok	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	-
S	En çok	0.6	0.6	0.6	0.6	-	-	-

3-BEV değerlerine göre sınıflandırma:

Macaristan'da geliştirilmiş olan sınıflandırmaya göre Al_2O_3 ile SiO_2 yüzdesi farkı kullanılmakta, ortaya çıkan gruplar Çizelge 2. 3'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. 3 BEV değerlerine göre boksit sınıfları

Karakteristik Bileşenler (%)		Endüstriyel Boksit Sınıfı	Alüminyumlu Hammadde	Alüminyumlu Kil
Al ₂ O ₃	En az	-	-	-
	En çok	40	26	20-25
SiO ₂	En çok	15	30.6	-
Fe ₂ O ₃	En çok	26	-	-
TiO ₂	En az	-	-	-
BEV (Al ₂ O ₃ -SiO ₂)		30-10	10	-
CaO	En çok	0.8	0.8	-
MgO	En çok	0.5	0.5	-
P ₂ O ₅	En çok	0.8	0.8	-
S	En çok	0.6	0.6	-
SO ₃	En çok	0.15	0.15	-
C	En çok	0.1	0.1	-

2.1.2 Boksit Çeşitleri ve Özellikleri

Başlıca boksit çeşitleri ve özellikleri Çizelge 2. 4’de verilmektedir.

Çizelge 2. 4 Boksit çeşitleri ve özellikleri

	Kimyasal Formül	Kristal Yapı	Özgül Ağırlık	Sertlik (Mohs)
Gibsit	Al ₂ O ₃ . 3H ₂ O	Monoklinik	2.3-2.4	2.5-3.5
Böhmit	AlO(OH)	Ortorombik	3.01-3.06	3.5-6.5
Diaspor	Al ₂ O ₃ . H ₂ O	Ortorombik	3.3-3.5	6.5-7

2.1.3 Boksitte Bulunan Başlıca Safsızlıklar ve Etkileri

Boksitler çeşitli minerallerle karışık olarak bulunurlar. Boksitlerde en çok rastlanan mineraller; silisyum, demir, titanyum, kalsiyum ve kükürttür.

2.1.3.1 Silisyum

Boksit içindeki, işletme güçlükleri ve hammadde kayıpları bakımından, en önemli safsızlık silis bileşikleridir. Aktifliğine göre başlıca 2 kısma ayrılmaktadır:

1-Serbest SiO_2 olarak çeşitli mineraller halinde: Boksitin, üretim sahasına nakliyesi sırasında fazladan taşınan serbest SiO_2 mineralleri (kuvars ve kalsedon gibi), normal proses şartlarında hiçbir değişikliğe uğramadan kırmızı çamur ile birlikte atılırlar.

2-Aktif SiO_2 olarak çeşitli mineraller halinde: Boksit içindeki aktif SiO_2 , genellikle alüminyum oksit ve diğer bileşiklerle beraber hidratlar halindedir. Böhmitin otoklavlarda çok yüksek basınç ve sıcaklığa tabi tutulmasıyla, bütün SiO_2 aktif hale geçer.

Başlıca aktif SiO_2 mineralleri şunlardır: Killi mineraller; kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), halloysit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Aktif SiO_2 , soda ve alümina ile birleşerek sodyum-alüminyum silikat kompleksleri ($2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) halinde çökerek, bu bileşiklerin kırmızı çamur ile birlikte atılmasına sebep olur. Ortalama olarak kayıp şu şekildedir:

Alümina kaybı: $1.0 \times (\text{aktif } \text{SiO}_2)$

Sudkostik kaybı: $0.9 \times (\text{aktif } \text{SiO}_2)$

2.1.3.2 Demir

Demir, kırmızı çamur miktarını ve dolayısıyla yıkama işlemlerinde kullanılan su ve iş gücünü arttırmaktan başka bir güçlük çıkarmaz. %25-30 Fe_2O_3 içeren boksitler Bayer prosesi ile rahatlıkla işlenebilmektedir. Boksit içinde başlıca şu şekillerde bulunabilir:

- Hidroksitler halinde; götit ($\text{FeO} \cdot \text{OH}$) ve limonit ($\text{FeO} \cdot \text{OH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Oksitler halinde; hematit (Fe_2O_3)
- İki değerlikli demir bileşikler halinde; siderit (FeCO_3)
- Kompleks mineraller halinde; ilmenit ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$) ve nontronit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- Nadiren sülfidler halinde bulunur.

İki değerlikli demir bileşiklerinin miktarı çok yüksek olursa, bunlar koloidal demir hidroksit oluşumuna sebep olabilir ve kolloid normal metotlarla süzülemediği için sodyum alüminatın bozulması ile meydana gelen trihidrat alümina kristallerinin üstünü kaplayarak, zehirlenmesine sebep olur ki neticede ancak mikrokristaller elde edilebilir. Demir bileşiklerini ortamdan uzaklaştırmak için çökeltme ve durultma havuzları kullanılır.

2.1.3.3 Titanyum

Yüksek kostik konsantrasyonlarına kadar (400 g/l kostik) çözünmediği için demir bileşikleriyle beraber atılır ve boksit içinde aşağıdaki bileşikler şeklinde bulunur:

- Rutil (TiO_2)
- Anataz ve Brokit (TiO_2)
- İlmenit ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$)
- İlmeno-Rutil ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$)
- Titano-Manyetit ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{TiO}_2$)
- Sfen ve Leucozene ($\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$)
- Perovskit ($\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$)

2.1.3.4 Kalsiyum

Kalsiyum, genellikle %1-2 oranına kadar dolomit ve apatit ($\text{CaF}_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) şeklinde bulunur.

2.1.3.5 Kükürt

Boksitler, genellikle kükürt içermezler. Nadiren de olsa, cevher içinde pirit, markasit (FeS_2) veya alünit ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 4\text{Al}(\text{OH})_3$) halinde bulunabilir. Kükürdün bir kısmı alüminat çözeltisine kadar geçebilir ve noselit ($5\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{SO}_3$) halinde soda ve alümina kaybına sebep olur. Kurutma sırasında kükürt, kullanılan yakıttan da karışabilmektedir.

2.1.4 Dünya’da Boksit Üretimi

Dünya boksit üretim kapasitesinin %40’ı, aşağıda isimleri verilmiş olan altı firma ve yan kuruluşlarına aittir. Bu kuruluşlar; boksitten, işlenmiş alüminyuma kadar entegrasyon tesislere sahip şirketlerdir.

1-RIO TINTO ALCAN Aluminium Ltd. (Kanada, Kuzey Amerika)

2-ALCOA Aluminium Inc. (New York, Amerika)

3-REYNOLDS Metals Company (Virjinya, Amerika)

4-KAISER Aluminium Corporation (Washington, Kuzey Amerika)

5-PECHINEY SA Company (Paris, Fransa)

6-ALUSUISSE-SWISS Aluminium Ltd. (İsviçre)

Dünya’daki metalurjik boksit üretimi 2010 verileri Çizelge 2. 5’de verilmiştir.

Çizelge 2. 5 Dünya'da boksit üretimi (bin ton)

Ülke	2010 yılı	Ülke	2010 yılı
Avustralya	68.414	Guyana	1.760
Çin	44.000	Sierra Leone	1.089
Brezilya	28.100	Bosna Hersek	650
Hindistan	18.000	Karadağ	650
Gine	17.400	İran	500
Jamaika	8.540	Dominik	500
Rusya	5.475	Macaristan	350
Kazakistan	5.310	Türkiye	350
Surinam	4.000	Gana	170
Venezuela	2.500	Endonezya	105
Yunanistan	2.100	Tanzanya	130

Türkiye’de boksit cevheri sektöründe üretim yapan kuruluşlar arasında sadece Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. ve Cengiz Grup’a ait Mortaş Boksit işletmesidir. Bu işletmenin kapasitesi 400.000 ton/yıl mertebesinde. Boksit yataklarının %88’i diasporitik, demirli diasporitik ve lateritik tip boksitlerden oluşmakta, genellikle batı-

orta Toroslar'da bulunmaktadır. Türkiye'deki bazı boksit yataklarının kimyasal kompozisyonu Çizelge 2. 6'da verilmiştir [3].

Çizelge 2. 6 Türkiye'deki bazı boksit yataklarının analizi

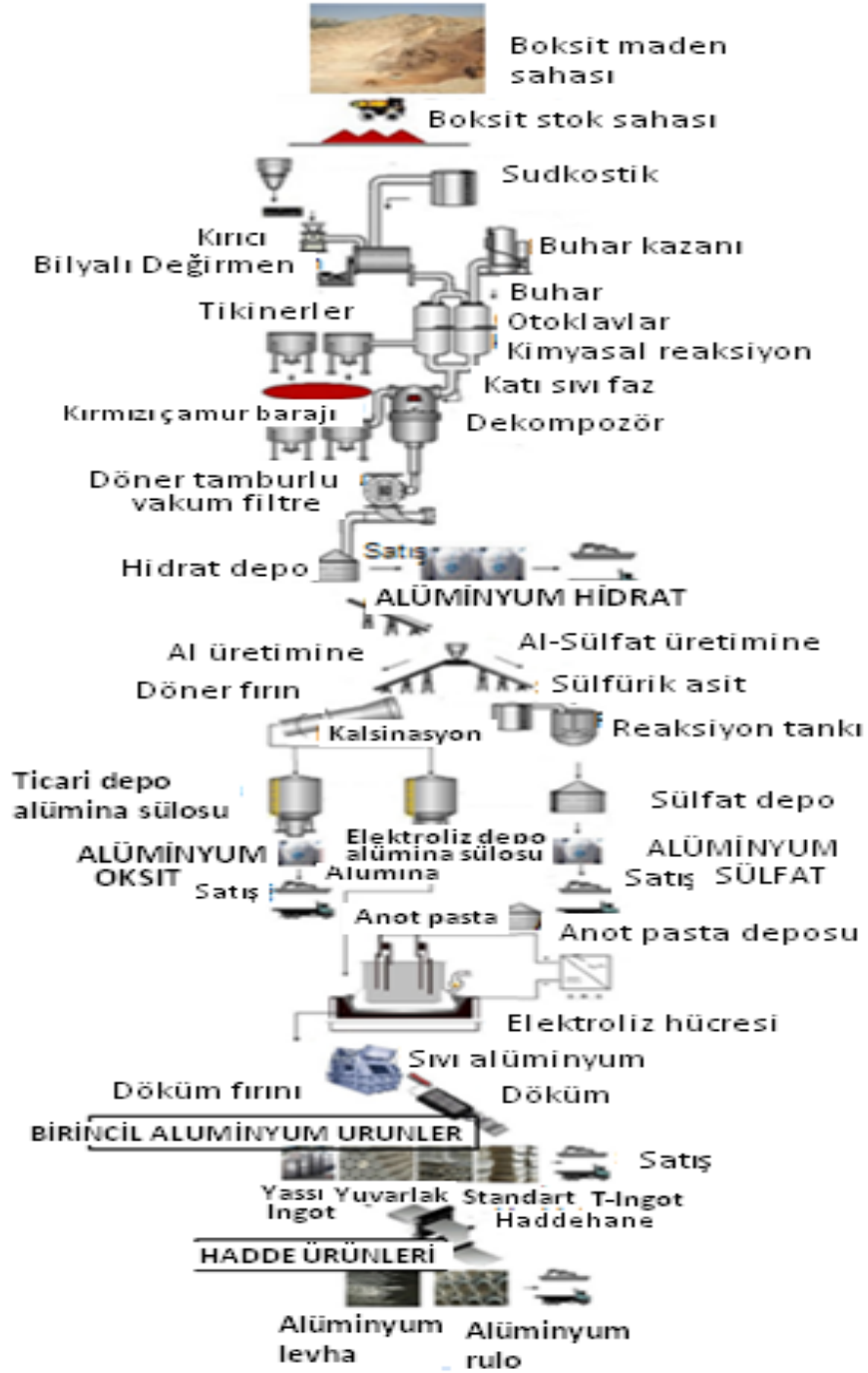
Yatak	Bölge	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	MnO
Kızıltaş	Gidengelmez-Yıldızdağ	62.0	13.5	2.7	2.6	-
Kekliktaş		60.0	18.0	1.5	3.0	0.40
Kayakrası		64.0	19.0	1.5	2.7	0.04
Seyrandağ	Seyrandağ	65.8	17.0	2.9	2.0	-
Belbaşı		58.5	20.8	2.0	2.9	0.02
Toprakkapı		62.5	18.5	3.0	2.7	0.03
Karahanlı	Anamos-Karacadağ	53.5	19.2	12.9	1.8	-
Kızılbayır		60.5	20.1	6.5	2.3	-
Ahmet Ağa		59.6	13.8	9.3	2.3	-
Morçukur	Küpe-Tınazdağ	50.0	16.3	6.40	2.3	-
Mortaş		59.0	17.8	8.40	2.3	-
Doğankuzu		58.4	18.4	7.0	2.2	-

2.1.4.1 Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.-Cengiz Holding Tesisleri

Maden Tetkik Arama Enstitüsü 1962 yılında Seydişehir ve Akseki yörelerinde alüminyum üretimine uygun nitelikte boksit rezervi tespit etmiş ve bu rezervi 1965 yılında Etibank' a devretmiştir. 13 Ekim 1969 tarihinde montaj çalışmalarına başlanmış, Mart 1973 yılında alümina fabrikası devreye alınmış ve arkasından Ağustos 1974'te 1.elektrolizhane, Ekim 1975'te 2.elektrolizhane, Ağustos 1976'da 3.elektrolizhane, Ocak 1977'de 4.elektrolizhane işletmeye alınmış, sıvı alüminyum üretiminde %100 kapasiteye ulaşılmıştır.

Tesisin boksit üretim kapasitesi 461.400 ton/yıl, alüminyum hidroksit 340.000 ton/yıl, alüminyum sülfat 35.000 ton/yıl, kalsine alüminyum oksit 200.000 ton/yıl, birincil alüminyum 60.000 ton/yıl ve ortaya çıkan kırmızı çamur 230.000 ton/yıldır. Yıkama işleminden sonra kırmızı çamur, pompalarla tesisin depolama konumlarına gönderilmektedir.

Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. 13.08.2003 tarih ve 2003/49 sayılı Özelleştirme Yüksek Kurulu kararı ile özelleştirme kapsam ve programına alınmış, 28.07.2005 tarihinde özelleştirmesi tamamlanan ve üretim akış şeması Şekil 2. 1’de verilen Eti Alüminyum A.Ş. Cengiz Şirketler Grubu bünyesinde üretim faaliyetlerine ara vermeden devam etmektedir.



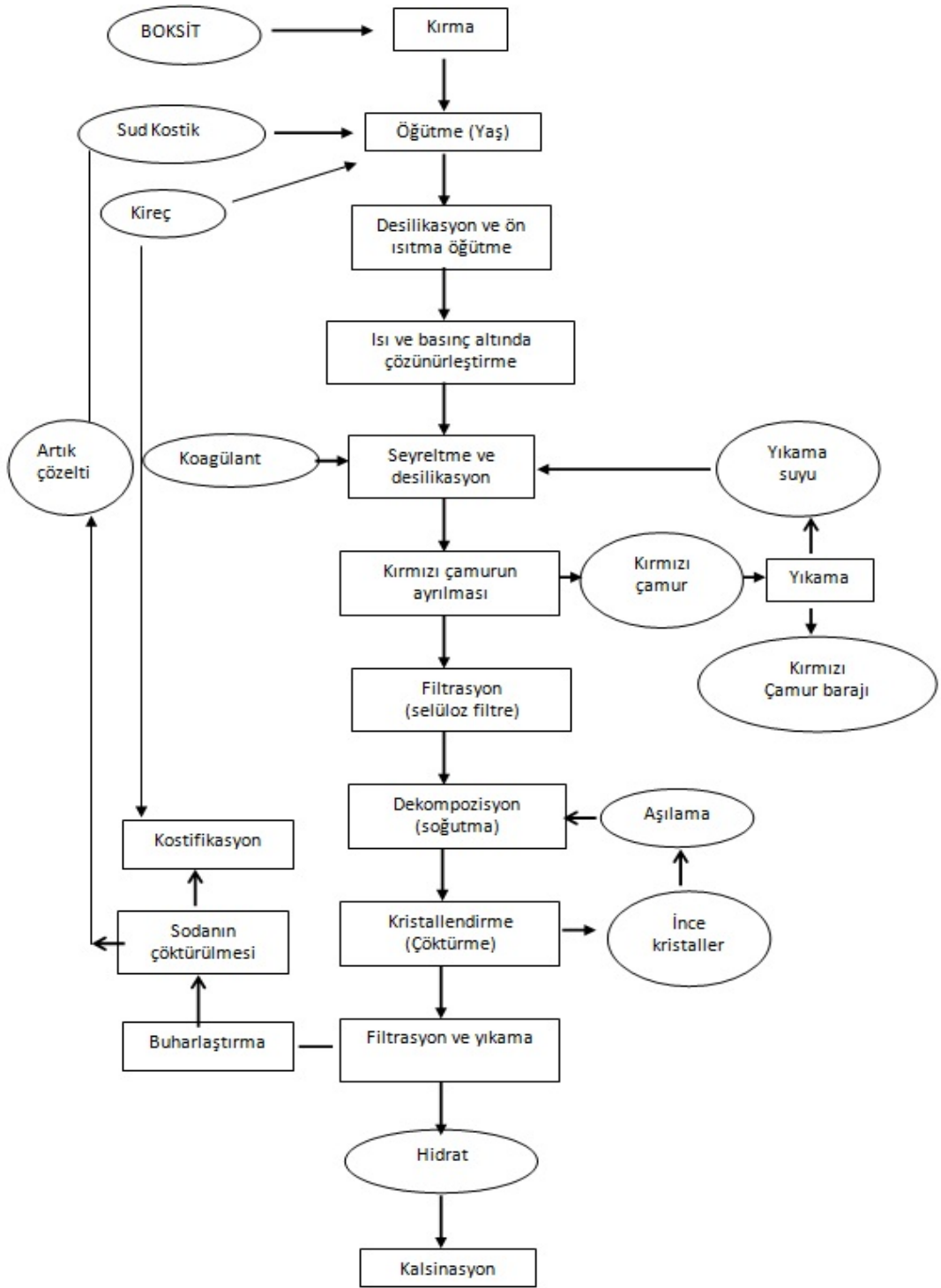
Şekil 2. 1 Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.’ye ait üretim akış şeması

2.2 Bayer Prosesi

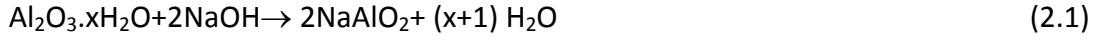
Laboratuvar ölçeğinde alümina üretimi için birçok yöntem geliştirilmiş olmasına rağmen, ticari alümina üretiminde en çok kullanılan Bayer prosesidir. Bayer prosesi; (a) boksit hazırlama, (b) çözünürleştirme, (c) kırmızı çamurun ayrılması, (d) alümina eldesi olmak üzere 4 basamaktan oluşmaktadır. Akış şeması Şekil 2. 2 ve Şekil 2. 3’de verilmektedir [4].

1888 yılında Karl Bayer tarafından patenti alınmış olan Bayer prosesi, yüksek basınç ve sıcaklıkta boksitin kostik soda ile liçing işlemini içermektedir. Bu reaksiyonun ürünleri sodyum alüminat ve filtrasyon ile ayrılabilen ve çözünemeyen “kırmızı çamur atığı”dır. Ana boksitin bazı karakteristik özellikleri kalsa bile, kırmızı çamurun özelliği kimyasal ve fiziksel uygulamalardan dolayı farklılık göstermektedir.

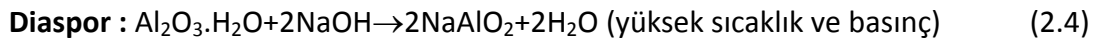
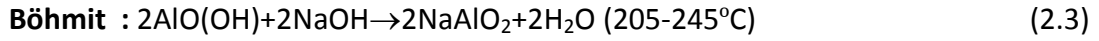
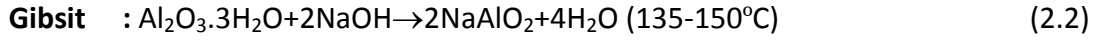
Genellikle, cevherin kalitesine bağlı olarak, 1 ton alümina üretimi için yaklaşık olarak 1.9-3.6 ton boksit kullanılmaktadır. 1 ton alümina veya 0.5 ton alüminyum metaline karşılık kuru olarak yaklaşık 1 ton kırmızı çamur ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2. 2 Bayer prosesi akış şeması-1



Reaksiyon öncesi cevherin ince tane boyutuna getirilmesi ile proses daha verimli olmaktadır. Buna rağmen, parçalama koşulları boksitin doğasından özellikle de alümina fazlarının mineralojik formlarından etkilenmektedir. Kostik soda içerisinde parçalanma kolaylığı aşağıdaki sırada azalmaktadır.



Otoklav pulpunun basıncı çok kademeli bir flaş sistemiyle (seperatörler) atmosferik basınca düşürülür. Çıkan buharlar pulpun ön ısıtmasında ve proses çözeltisinin bir kısmının ısıtılmasında kullanılır.

Seyreltme karıştırıcılarında ise çözeltinin konsantrasyonu, çökmeyi kolaylaştıracak değere ayarlanır ve çözelti kırmızı çamur çöktürme tanklarına gönderilir. Alümina çözeltiye alındıktan sonra geri kalan katı faza “kırmızı çamur” denir ve karmaşık bir sodyum alüminyum silikat ile demir oksitten oluşur.

c) Kırmızı çamurun ayrılması

Flaş edilen pulp, kristalizasyon için gereken Na_2O konsantrasyonuna seyreltilir, sonra kırmızı çamurun alüminat çözeltisinden çöktürme ile ayrıldığı çöktürücülere beslenir. Çöktürücü alt akımı olarak 200-500 g/l katı içeren kırmızı çamur pulpu elde edilir. Çöktürmeye yardımcı olmak ve ince kırmızı çamur tanelerinin sıklığını temin etmek için çeşitli doğal veya sentetik flokulantlar kullanılır. Çöktürme işleminden sonra ayrılan kırmızı çamur, ters akımlı yıkama sistemi ile yıkandıktan sonra atık barajına pompalanır.

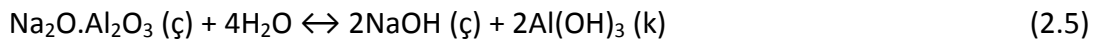
Kırmızı çamur pulpun sıvı fazından, kostik ve alüminanın geri kazanılması sonraki işlemlerin ana hedefidir. Ancak bu işlemler kırmızı çamur için seçilen depolama ve değerlendirme metotlarına göre uygun biçimde gerçekleştirilir.

Kırmızı çamur depolanmasının ve işleminin ekonomisi tüm tesisin, ekonomisi içinde önemli bir faktördür ve fizikokimyasal özelliklerinin önemli ölçüde etkisi altındadır.

d) Alümina eldesi

Bu bölümde işleme hazır hale getirilen alüminat çözeltisi aşılama hidratıyla $(Al(OH)_3)$ karıştırılıp dekompozörlere (soğutma) gönderilir. Burada oluşan hidroliz olayı sonucu alüminyum hidroksit kristalleri elde edilir. Bu ürün çöktürülüp zayıf çözeltiden ayrılır, yıkanır ve filtre edilir. Filtre edildikten sonra 1000-1200°C’de döner fırınlarda kalsine edilir.

Dekompozörlerdeki hidroliz prosesi sonucu $Al(OH)_3$ kristalizasyonu, (2.5) numaralı denklemde verilen tersinir reaksiyona göre gerçekleşmektedir.



Buharlaştırma bölümünde devreye zorunlu olarak giren suların çözeltiden ayrılması veya kostik çözeltinin rejenerasyonu ve soda ayırımı (devrede varsa) işlemi yapılır. Ayrıca buharlaştırma işlemi sırasında ortaya çıkan sıcak sular kazan dairesinde ve çeşitli kademelerde kullanılmak üzere ilgili bölümlere gönderilir.

Elde edilen hidrat 50-150 m uzunluğunda, 2-5 m çapında ve %1-2 eğime sahip döner fırınlarda 1000-1200°C arasında kalsine edilerek fiziksel nemi ve kristal suyu uçurularak alüminyum metalinin temel üretim maddesi olan alümina elde edilir.

Saf alüminyum ise elektroliz metodu ile elde edilir. Elektroliz hücresi karbon ile astarlanmış çelik kaptan ibarettir. Anot karbondur. Elektroliz sırasında katotta erimiş alüminyum üretilirken, anotlar okside olarak CO_2 meydana getirirler. Hücrenin kendisi katot görevi görür.



2.3 Kırmızı Çamurun Karakteristik Özellikleri

Kırmızı çamurun kimyasal kompozisyonu boksit kalitesine ve proses aşamalarına bağlı olarak değişmektedir. Farklı coğrafik bölgelere ait kırmızı çamurun kimyasal kompozisyonları Çizelge 2. 7’de verilmektedir [5].

Çizelge 2. 7 Dünya'daki farklı bölgelere ait kırmızı çamur bileşimi

Ülke	Bölge	Ana Bileşen (%Ağırlıkça)				
Hindistan	Al. Corp.	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Na ₂ O
	Malco	20.26	19.60	28.00	6.74	8.09
	Hindalco	45.17	27.00	5.12	5.70	3.64
	Balco	33.80	15.58	22.50	6.84	5.20
	Nalco	52.39	14.73	3.30	8.44	4.00
Macaristan	-	38.45	15.20	4.60	10.15	8.12
Jamaika	-	50.90	14.20	6.87	3.40	3.18
Surinam	-	24.81	19.00	12.15	11.90	9.29
Amerika	Alcoa Mobile	30.40	16.20	10.11	11.14	2.00
	Arkansas	55.60	12.15	4.50	4.50	1.50-5.00
	Sherwon	50.54	11.13	Eser miktarda	2.56	9.00
Tayvan	-	41.30	20.21	2.90	17.93	3.80
Avustralya	-	40.50	27.70	3.50	19.90	1.00-2.00
Türkiye	Doğankuzu	18.40	58.40	2.20	7.00	-
	Mortaş	17.80	59.00	2.30	8.40	-

Kırmızı çamurun mineralojik analizi, boksit kaynağı ve üretim prosesine bağlı olarak değişmektedir. Çamur, boksit kaynağından gelen (anataz, böhmit, kalsit, gipsit, götit, hematit, kalsiyum ferit ve kaolin) ve proses sırasında oluşan bileşiklerden oluşmaktadır. Boksitte yer almayan tipik kırmızı çamur fazları 3 grupta yer almaktadır.

1- "NAS" fazları: $3(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) \cdot \text{Na}_2\text{X}$ ($\text{X} = \text{CO}_3^{2-}, 2\text{OH}^-, \text{SO}_4^{2-}, 2\text{Cl}^-$)

2- "CAS-CFS" fazları: $3\text{CaO} \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_x \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x} \cdot k\text{SiO}_2 \cdot (6-2k) \text{H}_2\text{O}$

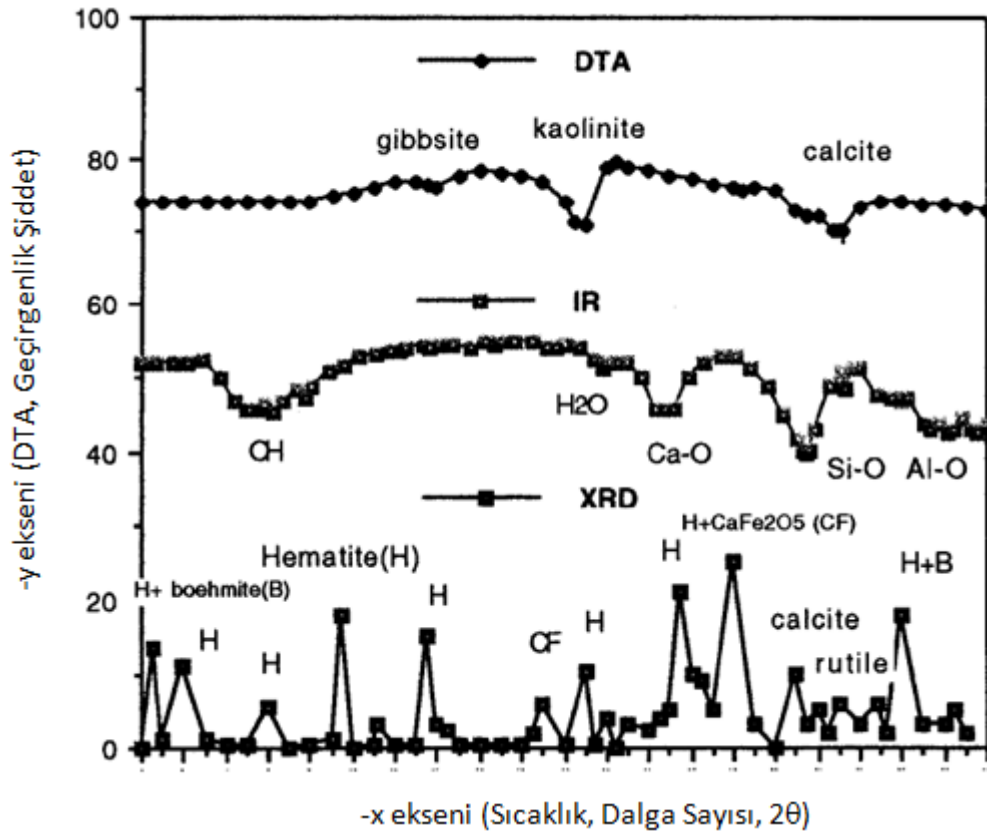
3- "NT-CT" fazları: $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, kassit perovskit, portlandit

Kırmızı çamurun karakterize edilmesinde kullanılan 3 yöntem: diferansiyel termal analiz (DTA), infared spektroskopisi (IR) ve X-Işını difraksiyonudur (XRD). XRD yöntemi ile kırmızı çamurun kalitatif ve kantitatif özellikleri belirlenmektedir. Şekil 2. 4, bu yöntemlerle analiz yapılan kırmızı çamura ait tipik eğrileri göstermektedir. X-ekseni;

DTA eğrisi için sıcaklık, IR için cm^{-1} ve X-Işını difraktogramı için 2θ açısını ifade etmektedir. Y-ekseni ise; dönüşüm şiddetini, absorpsiyon veya yansımayı ifade etmektedir.

Şekil 2. 4’de verilen IR analizi eğrisinde, $3617/3524/3446/3390/3092 \text{ cm}^{-1}$ gibsitteki hidroksil bağlarını ve $3690/3638/3612 \text{ cm}^{-1}$ kaolendeki hidroksil bağlarını göstermektedir. $1641/1631 \text{ cm}^{-1}$ serbest su ve 1425 cm^{-1} kalsit içerisindeki CaO ’yu ifade etmektedir. $1035/1110/1000/978 \text{ cm}^{-1}$ kaolin içerisindeki Si-O ve $1021/921/914/875/801/744/662 \text{ cm}^{-1}$ Al-O bağı göstermektedir. $659/623/560 \text{ cm}^{-1}$ silikat yapısındaki MgO ve $680/556/538/471 \text{ cm}^{-1}$ ise Fe-O olarak belirlenmiştir.

Diferansiyel termal analizi sonucunda, 3 endotermik pik belirlenmiştir. Bu pikler sırasıyla, 314°C ’de gibsit, 538°C ’de kaolin ve 891°C ’de karbonat fazlarına aittir.



Şekil 2. 4 Kırmızı çamur karakteristikleri

Yukarıda verilen sonuçlar farklı kırmızı çamurların ortalamasını ifade etmektedir. Kırmızı çamurun yaklaşık kompozisyonu boksit kaynağına göre değişmektedir. Buna göre; bazı kırmızı çamurlar büyük miktarlarda kaolin içerirken, bazıları ise TiO_2 bakımından zengindir.

2.4 Kırmızı Çamurun Depolanması

Kırmızı çamur birçok alanda kullanılmasına rağmen, önemli bir kısmı atık durumundadır. Kullanılmayan kırmızı çamurun depolanması, yüksek pH'ın (kostik soda) sebep olduğu toksiklik ve atığın hacminin fazla olması nedeni ile çevresel açıdan problem haline gelmektedir. Kırmızı çamur, derin göletler, barajlar ve kanallarda depolanmaktadır. Kırmızı çamurun depolanmasının çevresel etkisi, alkali çözeltisinin yeraltına sızmasından kaynaklanmaktadır. Kırmızı çamurun, doğal sızdırmaz alanlarda depolanması durumunda, yeraltı kuyuları kontrol amaçlı yılda belirli dönemlerde numuneler alınarak kontrol edilmektedir. Depolardan sızıntının olup olmadığı, pH, sodyum, kalsiyum ve klorit içeriklerine bakılarak araştırılmaktadır.

Kırmızı çamur genellikle, tesisin kendi depolama konumlarına pompalanmakta ve kalan herhangi bir miktardaki kostik soda, tekrar üretim prosesine gönderilmektedir (Örneğin, Almanya). Kırmızı çamurun farklı depolanma yöntemleri Şekil A. 1a-Şekil A. 1b'de verilmiştir.

2.5 Kırmızı Çamurun Kullanım Alanları

2.5.1 Çimento ve Beton Üretiminde Kullanımı

Literatürde; kırmızı çamurun çimento ve betonda katkı olarak kullanımına yönelik yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir:

-Budnikov ve Guzev (1936); istenilen özellikte çimento üretimi için kırmızı çamur kullanımını önermişlerdir. Yapılan çalışmada, kırmızı çamur içeriği, sertleşme süresi ve hidrasyon sıcaklığının kontrolü ile çimentonun mekanik dayanımı ve diğer özellikleri geliştirilmiştir [6].

-Santt (1969) çalışmasında; kırmızı çamuru, kum, kireç ve sodyum karbonat ile 50:25:20:5 oranlarında karıştırarak, beton için camsı gözenekli katkı geliştirmiştir. %1 Fe_2O_3 içeren karışım eritilmiş ve Fe_2O_3 'ün, FeO 'ya indirgenerek gözenekli yapı oluşturması için $895^{\circ}C$ 'de bekletilmiştir. Ergiyik aşamalı olarak döner tamburda soğutulmuş ve istenilen tane boyutuna kadar öğütülmüştür [7].

-Horishima ve Fujii (1973); kırmızı çamur, jips ve alüminanın fazla miktarda su ile karıştırılması ve yaklaşık olarak 1 hafta bekletilmesi sonucu refrakter beton üretmişlerdir [8].

-Siegfried (1973); beton yapılarda kullanılan yüzey kaplama malzemesi için düşük demir içerikli emülsiyel kırmızı çamur kullanmışlardır [9].

-Youh (1974) yaptığı çalışmada; kırmızı çamur içerisindeki sodyumun uzaklaştırılmasını ve geriye kalan kısmın çimento endüstrisi için demir kaynağı olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu amaçla, kırmızı çamur ilk olarak doygun Ca(OH)_2 çözeltisi ve daha sonra %3'lük H_2SO_4 ile muamele edilmiştir [10].

-Pera (1992) yaptığı çalışmada; 3 farklı kimyasal ve mineral kompozisyona sahip kırmızı çamur kullanmıştır. Kırmızı çamurun, 5 saat süresince 600-800°C sıcaklık aralığında kalsine edilmesi sonucu puzolanik özellik kazandığı belirlenmiştir. Kalsine kırmızı çamur-normal Portland çimento (OPC) karışımlarının puzolanik özellikleri; basma dayanımları ve DTA analizi ile kireç tüketiminin tespiti ile açıklanmıştır. Çalışmada ayrıca, sertleşme süresince oluşan hidratlar belirlenmiştir. Kırmızı çamurun mineralojik bileşimi, puzolanik özelliğini etkilememiştir. Ağırlıkça %30 kırmızı çamur içeren harç numunelerinde, en yüksek mukavemet değeri (~80 MPa) elde edilmiştir [11].

-Singh vd. (1996); kırmızı çamur kullanımı ile özel çimentolar üretmişlerdir. Kırmızı çamurun (HINDALCO, Hindistan) belirgin miktarda alümina, demir oksit ve silika içerdiği belirlenmiştir. Bu bileşenlerin varlığının, özel çimentoların hazırlanması için uygun girdiler olduğu belirtilmiştir. Bu amaçla, 3 farklı çimento hazırlanmıştır (a) kireç+kırmızı çamur+uçucu kül kullanılarak, alüminaferrit (C_4AF)-belit ($\beta\text{-C}_2\text{S}$); (b) kireç+kırmızı çamur+boksit kullanılarak, alüminaferrit-ferrit (C_2F)-alüminatlar (C_3A and C_{12}A_7) ve (c) kireç+kırmızı çamur+boksit +jips kullanılarak, sulfoalüminat ($\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$)-alüminaferrit-ferrit. Bileşim (kireç, kırmızı çamur, uçucu kül, boksit ve jips oranı), pişirme sıcaklığı ve bekleme süresinin, üretilen çimentoya etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre, kireç+kırmızı çamur+boksit (~500 kg/cm^2) veya kireç+jips+kırmızı çamur+boksit (~350 kg/cm^2) karışımlarından, özellikle 1300°C gibi yüksek sıcaklıklarda pişirim sonrası üretilen çimento örnekleri ile normal Portland çimentoya (OPC) göre daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Diğer taraftan, kireç+kırmızı çamur+uçucu kül karışımının dayanıma etkisi olmadığı belirlenmiştir. Dayanım artışının kireç+kırmızı

çamur+boksit çimentosunda oluşan C_4AF , C_3A ve $C_{12}A_7$ fazlarına, kireç+jips+kırmızı çamur+boksit çimentosunda ise oluşan C_4AF , C_4A_3S ve C_3A fazlarına bağlı olduğu belirtilmiştir [12].

-Pera vd. (1997) yaptıkları çalışmada; kırmızı çamur atığının, yüksek oranda demir içermesinden dolayı renkli beton üretiminde pigment olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Kırmızı çamurun renklendirici özelliğini artırmak amacıyla 600-800°C kalsinasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalsinasyon işlemi ile aynı zamanda, kırmızı çamur içerisinde bulunan alüminyum hidroksit ve kil mineralleri, çimento hidratasyonu ile üretilen kalsiyum hidroksiti tüketebilecek puzolanik katkı özelliği kazanmıştır. Kırmızı çamurun puzolanik özelliği, farklı oranlarda hazırlanmış normal Portland çimento (OPC) ve kırmızı çamur karışımlarının, kireç tüketiminin belirlenmesi ile incelenmiştir. Hidratasyon süresince oluşan başlıca hidratasyon ürünleri, C-S-H, etrenjit, portlandit ve C_4ACH_{11} olarak belirlenmiştir. Kalsine kırmızı çamur içeren harç numunelerinin kontrol harç numunesine göre (%100 OPC içeren) daha düşük basma dayanımlarına sahip olduğu belirlenmiştir. Kırmızı çamurun 750°C veya 800°C’de kalsine edilmesiyle üretilen ağırlıkça %20 kalsine kırmızı çamur içeren harç numunelerinin basma dayanımlarında belirgin bir düşüş görülmüştür. Bunun sebebinin, kalsitin parçalanması sonucu oluşan CaO’ten kaynaklandığı ileri sürülmüştür. En yüksek basma dayanımı ağırlıkça %10 700°C’de kalsine edilmiş kırmızı çamur içeren harç numunelerinde elde edilmiştir (63 MPa, 90.gün) [13].

-Tsakiridis vd. (2004) yaptıkları çalışmada; Portland çimento klinkeri üretiminde Bayer prosesi atığı olan kırmızı çamur ilavesinin etkisi incelenmiştir. Çalışmada referans (kırmızı çamur içermeyen) ve ağırlıkça %3.5 kırmızı çamur içeren karışım olmak üzere 2 tür örnek hazırlanmıştır. Örneklerin reaktifliği, 1350°C, 1400°C, 1450°C’lerde pişirilen ürünlerde tepkimeye girmemiş kirecin hesaplanması ile belirlenmiştir. Mineralojik ve kimyasal analiz sonuçlarına göre, kırmızı çamur ilavesinin Portland çimento klinkerini etkilemediği belirlenmiştir. Ayrıca, tüm klinkerler; öğütülebilirlik, priz süresi, basma mukavemeti ve genişleyebilirlik bakımından test edilmiştir. Hidratasyon ürünlerinin 2, 7, 28. ve 90. günde XRD analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, kırmızı çamur ilavesinin üretilen çimento üzerinde olumsuz etkisi görülmemiştir [14].

-Lin ve Liu (2006); boksit cevherinden alümina üretiminde açığa çıkan kırmızı çamur atığının fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin mineral kaynağına ve arıtma prosesine bağlı olarak farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışma için farklı yaşlarda kırmızı çamur toplanmıştır. Kırmızı çamur örnekleri; pH, elektrik iletkenliği, su, ekstrakte edilebilir tuzlar ve değişebilen bazik katyonlar belirlenmiş, XRF, XRD, SEM ve TGA analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak; taze, 5 ve 10 yaşlarındaki kırmızı çamurun pH değerleri sırasıyla 11.58, 10.56 ve 9.61 olarak belirlenmiştir. Çözünabilir katyonlar arasında sodyum baskın olup, çözünabilir sodyum derişiminin artan depolama süresi ile liç işlemine bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. Katyon değişebilme kapasitesi, değişebilir katyonların toplamından belirlenmiş, depolama süresi arttıkça, pH'ın azalmasına bağlı olarak azalmıştır. Taze kırmızı çamur içerisindeki kalsiyum, baskın değişebilir katyon olup, zaman ilerledikçe Na iyonunun baskın olmasına bağlı olarak kalsiyum belirgin şekilde azalmıştır. Bu çalışmada incelenen kırmızı çamur ayrıca, yüksek miktarlarda radyoaktif toryum (Th), seryum (Ce) ve rubidyum (Rb) elementlerini içermektedir. XRD analiz sonuçlarına göre, kırmızı çamur içerisinde bulunan başlıca fazlar kalsit, perovskit, illit, hematit ve magnetit olarak belirlenmiştir. Depolama süresi arttıkça magnetit fazının, hematit fazına dönüşümü ile hematit faz miktarı artmıştır. TGA sonuçlarına göre, ağırlık kaybı taze çamur için 681.9°C, 5 yaş için 722.9°C ve 10 yaş kırmızı çamur için ise 734.7°C'lere kadar görülmüştür. Çalışma sonucuna göre, kırmızı çamurun depolanma süresi arttıkça, kalsiyum karbonat miktarı artmıştır. Kırmızı çamur örneklerin, standardize asit çözeltileri ile 2 yıl yavaş titrasyonu sonunda taze kırmızı çamurun asit nötralleştirme kapasitesi (ANC) yaklaşık olarak 10 mol/kg, daha eski örnekler için ise 9 mol/kg olarak belirlenmiştir. Çalışmada genel olarak, taze kırmızı çamur içerisinde, yaşlandırılmış örneklere göre daha fazla ağır metaller bulunmuştur [15].

-Cablic (2007) yaptığı çalışmada; kırmızı çamur karakteristiğini incelemiştir. Kırmızı çamurun, inşaat malzeme endüstrisinde pigment olarak kullanımı için öncelikle kalsine edilmiştir. Birac alümina tesisinden temin edilen kırmızı çamurun, kimyasal analiz sonucuna göre bileşiminde: Fe_2O_3 (%48.50), SiO_2 (%11.53) ve Al_2O_3 (%14.14) belirlenmiştir. İleri gelen bileşenler TiO_2 (%5.42) ve V_2O_5 'dir (%0.116'a kadar). Kırmızı çamurun ortalama yoğunluğu 3.05 g/cm³, kızdırma kaybı 900°C için %4.93 ve 950°C

için ise %5 olarak hesaplanmıştır. Kırmızı çamurun karakteristik kırmızı rengi, kalsinasyon ile oksitlere dönüşümü ve karbonatların parçalanması sonrası pigment olarak kullanılabilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan kırmızı çamur, inşaat endüstrisi için standart beton karışımlarında pigment olarak kullanılabilecek çok ince tanelere (elek boyutu %4'e kadar 0.147 mm, %25'e kadar 0.058 mm ve genellikle 10 µm boyutundadır) ve karakteristik kırmızı renge sahiptir. Çalışmada, kırmızı çamur standart beton test bloklarında (kireçtaşı-3.3+0 mm, çimento ve su) değişik şekillerde (kurutulmuş, kurutulmamış ve kalsine edilmiş) kullanılmıştır. Test bloklarının rengi, karışıma ilave edilen kırmızı çamur miktarına bağlı olarak değişmiştir. Test bloklarının oda sıcaklığı için (18-23°C) 7, 14 ve 28. günlerdeki basma dayanımları belirlenmiştir. Ağırlıkça %1 ile %32 arasında kırmızı çamur içeren test bloklarının basma dayanımlarının 14.83 MPa ile 27.77 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Başlangıç testlerine göre kırmızı çamurun yüksek dayanım, karakteristik kırmızı rengi ve atmosferik etkilere karşı yüksek dirence sahip olmasından dolayı inşaat malzemesinde (yol kaplama malzemesi, bina blok ve tuğla üretimi) katkı malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [16].

-Vangelatos vd. (2009); normal Portland çimentosu (OPC) üretim prosesinde kırmızı çamur kullanımını araştırmışlardır. Kırmızı çamurun suyu filtre pres ile giderilmiştir. Filtre edilen kırmızı çamurun su içeriği ağırlıkça %28-32 arasında, ferroalümina (FA) olarak adlandırılmıştır. Normal Portland çimentosunda (OPC), hammadde olarak kullanımı için, kireçtaşı+kumtaşı ve sırasıyla ağırlıkça %1, %3 ve %5 FA içeren karışımlar hazırlanmıştır. Karışımların tasarımı, çimento bileşim indeksleri olan kireç doygunluk faktörü (LSF), alümina modülü (AM) ve silika modülüne bağlıdır. XRD ve optik mikroskop analiz sonuçlarına göre çimento üretim prosesinde, FA ilavesinin, üretilen klinkerdeki mineralojik fazı etkilemediği belirlenmiştir. Yüzey alanı, su gereksinimi ve priz süresi farklılıkları ihmal edilebilir derecededir. Üretilen Portland çimentosunun 28. gün kürlenme sonrası elde edilen basma dayanım değerleri 55 MPa ile 63 MPa arasında değişmekte, CEM I 42.5 N kategorisine girmiştir. Daha da ötesinde, FA katkılı çimentoların bağlı yüksek 2. gün dayanımı (>20 MPa) ile CEM I 52.5 N kategorisine girmiştir. FA katkısının artışı, karışımdaki suda çözünebilir kromun, toplam krom oranını arttırmıştır. Bununla birlikte, toplam Cr'un, Cr⁺⁶'ya dönüşümü sabit, ağırlıkça %32-35

arasında olduğu belirlenmiştir. Sonuçlara göre, OPC üretiminde ağırlıkça %5'e kadar FA kullanımının, kullanılan diğer malzemelerin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak mümkün olduğu belirtilmiştir [17].

-Zhihua vd. (2009) yaptıkları çalışmada; kırmızı çamurun 400°C ile 700°C arasında kalsine edildikten sonra, Portland çimentosu üretiminde mineral katkı olarak kullanımını incelemişlerdir. Kırmızı çamur aktivasyonu için en uygun sıcaklığın 600°C olduğu belirtilmiştir. Sertleşmiş çimento harcının kimyasal analizlerine göre, 600°C'de termal aktive olmuş kırmızı çamur ile hidrasyonun erken yaşlarında daha fazla kalsiyum iyonu belirlenirken, daha sonraki yaşlarda çimento-su süspansiyon sisteminin sıvı fazında, daha çok bağlanmış su ve daha az kalsiyum iyonu belirlenmiştir. 600°C'de kalsine edilmiş kırmızı çamur içeren sertleşmiş çimento harcının SEM analizlerinde, orijinal kırmızı çamur içeren çimento harçlarına göre benzer toplam poroziteye ve daha az oranda büyük porlara sahip olduğu görülmüştür [18].

-Ribeiroa vd. (2011); daha az enerji, zaman ve maliyet sağlaması açısından, çalışmalarında kalsine olmamış kırmızı çamur kullanmışlardır. Ağırlıkça %30 çimento yerine, kırmızı çamur kullanılan harç numunelerinde yüksek mukavemetler elde edilmiştir. Pozolanik aktivite indeksi, fiziksel, mekanik parametreler (Brezilya NBR 5751 ve 5752 standartları) ve kimyasal analizlere (TS EN 196-5) bağlı olarak hesaplanmıştır. Referans karışım (kırmızı çamur içermeyen) ile karşılaştırma yapıldığında, kalsine olmamış kırmızı çamurun, çimentoda pozolanik katkı olarak kullanım potansiyeli olduğu belirlenmiştir. Priz süresinin (MERCOSUL NM 65 standart) artma eğiliminde olduğu, fakat çalışabilirliğin aynı kaldığı belirlenmiştir [19].

-Senff vd. (2011) yaptıkları çalışmada; kırmızı çamurun harç numunelerinde kullanımını incelemişlerdir. Hazırlanan karışımların reometre ve akış tablo ölçümleri için Portland çimento yerine ağırlıkça %50 kırmızı çamur kullanılmıştır. Çalışmada hidrasyon sıcaklığı, basma dayanımı ve su absorpsiyonu belirlenmiştir. Sonuç olarak, kırmızı çamur ilavesi ile harç numunelerinde çalışılabilirlik azalırken, tork artışına sebep olmuştur. Kırmızı çamur hidrasyon prosesini değiştirmemiş, fakat %20'nin üzerinde kırmızı çamur kullanımı ile harç numunelerinde açığa çıkan sıcaklık azalmıştır. Basma dayanım değerlerinin sabit olmadığı, ilave edilen su miktarına bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir [20].

-Liu ve arkadaşları (2011) yaptıkları çalışmada; boksit prosesinden gelen kırmızı çamur atığının çimentodaki davranışını incelemişlerdir. Kırmızı çamurun puzolanik özelliğini artırmak amacıyla 400-900°C sıcaklık aralığında kalsine edilmiş ve XRD, FTIR ve ²⁹Si MAS-NMR ile analiz edilmiştir. Kalsine kırmızı çamurun çimentodaki aktivitesi, çimento numunelerinin basma mukavemetlerinin ölçülmesi ile belirlenmiştir. Sonuçlara göre, 600°C’de kırmızı çamur kalsinasyonu ile az miktarda kristalize olmuş Ca₂SiO₄ oluşumuna bağlı olarak yüksek çimento aktivitesi elde edilmiştir. Az kristalize Ca₂SiO₄ yarı kararlı faz, kalsinasyon sıcaklığının 700°C’den 900°C’ye artışı ile yüksek kristalize Ca₂SiO₄’ye dönüşmüştür. Çimento aktivitesinin, bu yarı kararlı faz tarafından sağlandığı belirtilmiştir [21].

2.5.2 Yol İnşaatında ve Hafif Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılması

İnşaat endüstrisinde gün geçtikçe artan talebe bağlı olarak yüksek miktarlarda toprak, kireç ve çimento kullanılmaktadır. İyi bir yapı karakteristiğine sahip ucuz yapı malzemesi (hafif ağırlık, öğütülebilirlik, bağlanma, çimentolaşma gibi) her zaman tercih edilmektedir. Bu bakış açısıyla, atıkların yapı malzemesi üretiminde kullanımı için çözümler aranmaktadır.

-Tauber vd. (1971) yaptıkları çalışmada; kırmızı çamur ile killi şisti karıştırıp, pişirmek suretiyle yüksek kalitede tuğla üretmişlerdir [22].

-Gözmen vd. (1983); kırmızı çamurun %40-45 C₂S içeriği nedeni ile yapıştırıcı özelliğine sahip olduğu, ayrıca yüksek sıkıştırılabilirlik, düşük geçirgenlik ve yüksek çimentolaşma özellikleri ile uzun süre bekletme sonucunda bile özelliklerinin değişmediği belirlendiğinden, şehirlerarası yol inşaatı için tavsiye edilmiştir [23].

-Kara vd. (1995) yaptıkları çalışmada; Seydişehir alüminyum tesislerinden elde edilen kırmızı çamur atığı ile aynı yöreden alınan serpantin ve tuğla hammaddeleri karıştırılmış, sonuç olarak yüksek dayanımlı ve kaliteli yapı malzemesi üretilmiştir. Çalışmada; yıkanmış ve yıkanmamış kırmızı çamur kullanılarak, değişik presleme basıncı ve pişirme sıcaklığında yapı malzemeleri üretilmiştir. Ayrıca, kırmızı çamura belirli oranlarda marn kili karıştırılarak, dekoratif amaçlı yapı malzemeleri üretilmiştir. Her 3 deney sonucunda da, yüksek basma dayanımı ve düşük su emme oranına sahip yapı malzemeleri üretilmiştir [24].

-Kara vd. (1996); kırmızı çamurun tane boyutu ve içeriğindeki bileşikler dikkate alınarak; bu atığın yapı malzemesi olarak kullanılabileceğinden yola çıkılarak yaptıkları çalışmalarda, kırmızı çamurun tek başına veya katkı malzemeleriyle birlikte tuğla, kiremit ve seramik malzeme üretimine uygunluğunu araştırmışlardır [25].

-Kolesnikova vd. yapıları çalışmada (1998); OAO BAZ Tuğla Fabrika'sında üretilen tuğlaya, alümina ve demir oksit pigment atıklarının ilavesinin, tuğlanın rengine ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, ağırlıkça %5 kırmızı çamur ve %8 demir oksit ilavesine kadar, yüksek dayanıma ve düşük su absorpsiyonuna sahip renkli tuğla üretimleri gerçekleştirilmiştir [26].

-Yang vd. (2008) yaptıkları çalışmada; kırmızı çamur (Shandong Alüminyum Tesisi) kullanımı ile sinterlenmemiş tuğla üretilmiş ve ortam koşullarında kürlenmiştir. Kırmızı çamur tuğlaların ağırlıkça optimum oranları: %25-40 kırmızı çamur, %18-28 uçucu kül, %30-35 kum, %8-10 kireç, %1-3 jips ve yaklaşık olarak %1 Portland çimentosudur. Kırmızı çamur tuğla örnekleri Çin tuğla standart boyutlarında hazırlanmıştır. Sonuçlara göre, üretilen tuğlalar, Çin standartlarına göre 1.sınıftır. Kırmızı çamurun mikroyapı karakterizasyonu XRD, SEM ile incelenmiştir. C-S-H jel ve etrenjitin başlıca hidrate ürünler olduğu ve tuğla dayanımına katkı sağladığı belirlenmiştir [27].

2.5.3 Seramik Üretiminde Kullanılması

Kırmızı çamur yapısında, sinterleme sonrası camsı faz oluşturan SiO_2 , CaO , Na_2O gibi oksitleri içermektedir. Bu özellik kırmızı çamur ile sağlam yapılı seramik üretilebileceğini göstermektedir.

-Kara vd. (1994); kırmızı çamurun seramik üretiminde değerlendirilmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, kurutulmuş kırmızı çamur değişik oranlarda serpantin numunesiyle karıştırılmış ve 5mm x 10mm x 60mm boyutlarında kalıp kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Numuneler hidrolik preste 32 kg/cm² basınç ve oda sıcaklığında preslenmiştir. Bu şekilde hazırlanan ve etüvde 105°C'de bir gece bekletilen numuneler, elektrik ısıtılı fırına konulmuştur. Fırının çıkış hızı 300°C/saat olarak ayarlanmıştır. Pişirme sıcaklığı 950-1150°C arasında 50°C'lik aralıklarla değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, numunelerin basma mukavemetlerinin 1050°C'ye kadar

değişmediği fakat bu sıcaklıktan sonra mukavemetin hızla artarak 90-135 MN/m² arasına yükseldiği belirlenmiştir [28].

2.5.4 Kimya Sektöründe Kullanılması

Kırmızı çamurun kimya sektöründe; gaz ve sıvıdan S, SO₂, H₂S giderilmesi işlemlerinde gaz temizleme maddesi olarak, sudan; arsenik giderilmesinde, kauçuk endüstrisinde; dolgu maddesi ve altın cevherlerinin hazırlanmasında kullanımına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

-Bir Alman firması, kırmızı çamur kullanarak su temizleme işlemi için flokülant üretimi üzerinde çalışmıştır. “Ferriflac” olarak bilinen bileşik, demir ve alüminyum sülfatlardan oluşmaktadır. Pozitif yüklü yüksek moleküllü metal hidroksit kompleks bileşikler, katkılarının negatif yüklü moleküllerini yakalayarak sudan ayırmaktadır. Yüksek titanyum içeren kırmızı çamurun işlenmesiyle pigment üretilebilmektedir [29].

2.5.5 Kırmızı Çamurun ve Boksit Cevherlerinin Asidik Ortamdaki Çözünürlük Çalışmaları

-Shimano ve Kohno (1943); derişik H₂SO₄ kullanılarak yaklaşık 100°C sıcaklığında yapılan çözünürlük işlemlerinde alüminli şist, kil, alüm taşı ve boksit kullanılarak, cevher içindeki mevcut alüminyum oksidin %95 oranında ekstrakte edilebildiği belirlenmiştir [30].

-Boksit cevherlerinin asidik çözeltiler içindeki çözündürme çalışmaları, düşük tenörlü ve yüksek silisli boksit cevherlerinin değerlendirilmesi amacıyla yapılmaktadır. Bazik proseslerdeki silisyum bileşeninin, çözünme sonrasında tekrar çöken Na₂O.Al₂O₃.2SiO₂’den ileri gelen probleminin, asidik proseslerde olmaması dikkate değer bulunmuştur. Böylece yüksek silisli ve düşük tenörlü boksit cevherlerinin ve diğer alüminyum cevherlerinin kullanılmasına imkân veren asidik prosesler araştırma konusu olmuştur. Asidik çözündürme sonrasında farklı alüminyum bileşiklerinin (AlCl₃ ve Al₂(SO₄)₃ gibi) ve demir bileşiklerinin (FeCl₃ ve Fe₂(SO₄)₃ gibi) elde edilebilmesi, ayrıca alüminyum bileşikler kalsinasyonunun Al₂O₃ üretimine imkân vermesi açısından bu çalışmalar önem kazanmıştır. Çeşitli alüminyum kaynaklarından alümina üretimi amacıyla yüksek sıcaklıkta kalsine edilen cevherler %30’luk H₂SO₄ çözeltisiyle muamele

edilmiştir. Elde edilen çözelti kuruyana kadar buharlaştırılıp, kalsinasyonu ile tekrar çözündürülmesi sonucu saf alümina üretilmiştir [30].

-Az miktarda diasporit içeren böhmitik boksitlerden alümina üretimi için yapılan bir çalışmada; cevher önce %15'lik sülfürik asit çözeltisiyle atmosferik basınçta ve kaynama noktasına yakın sıcaklıkta 2 saat süre ile çözündürülerek, demir oksitler liç edilmiştir. Cevherdeki alüminanın büyük bir kısmı %30'luk H_2SO_4 çözeltisiyle, basınç altında daha yüksek bir sıcaklıkta ikinci bir işlemle çözündürme yapılmıştır. %99.75 saflıktaki Al_2O_3 , %85 verimle elde edilmiştir [31].

-Cohen ve Adjemian tarafından 1979 yılında yapılmış olan çalışmada; alüminyum cevherine HCl ve H_2SO_4 çözeltileri karışımı kullanılarak, çözündürme yapılmıştır. Elde edilen çözeltide HCl gazı doyurularak, soğutma sonrasında $AlSO_4Cl.6H_2O$ kristalleri ayrılmış ve maksimum 600°C sıcaklığındaki kalsinasyon ile Al_2O_3 üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışma şartlarında %40-60 konsantrasyonundaki H_2SO_4 çözeltisi ile atmosferik basınçta ve 5 saatlik sürede kaynatılarak çözündürme yapılmıştır [32].

-Sutyrin tarafından yapılmış olan bir çalışmada (1981); düşük tenörlü kaolinli, gibsitik boksitler 550°C'de kalsine edilmiş, 150 g/l konsantrasyonundaki HNO_3 çözeltisi ile basınçlı ortamda ve 160-200°C sıcaklıkta liç edilmiştir. %85 civarında bir verimle elde edilen $Al(NO_3)_3$ çözeltisinden hidrolitik çökeltme ile alüminyum ayrılmıştır [33].

-Yang ve Ready tarafından alınmış olan US patentinde (1982); 75-78 g Al_2O_3 , 8-16 g Fe_2O_3 , 7-9 g silika, 4 g TiO_2 içeren 200 g boksit cevheri, 20 g H_2SO_4 içeren derişik asit ile karıştırılarak, paslanmaz çelikte önce buharlaştırma ve daha sonra 550°C'de kalsinasyon yapılmıştır. Elde edilen ürün kolonlara doldurularak, $AlCl_3$ varlığında, alkil benzenlerin adsorpsiyonu incelenmiştir [34].

-Rand tarafından aşındırıcı alümina üretimi amacıyla yapılmış bir çalışmada (1986); boksit cevherleri H_2SO_4 ile muamele edilmiş ve ele geçen çözeltiden $Al_2(SO_4)_3$ ayrılarak, SO_3 ve alümina elde etmek üzere 1010°C sıcaklıkta ve daha sonra alümina elde etmek üzere 1350-1550°C sıcaklıkta kalsine edilmiştir. Kullanılan %35 H_2SO_4 çözeltisi ile 105°C sıcaklıkta çözündürme yapılmıştır [35].

-Vachon ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada (1994); sülfürik asit, sitrik ve okzalik asit karışımları kullanılarak, kırmızı çamurun kimyasal liç işlemiyle, alüminyumun %96'sının geri kazanılabildiği görülmüştür [36].

-Kasliwal tarafından liç ortamında yapılan bir çalışmada (1999); kırmızı çamurdaki alüminanın %çözünürlüğü üzerine, kavurma zamanı ve sıcaklığın etkisi araştırılmıştır [37].

-E. Sayan ve M. Bayramoğlu tarafından yapılan bir çalışmada (2000); H_2SO_4 ile kırmızı çamurda bulunan titanyum liç edilmiştir. TiO_2 'nin elde edilmesinde; sıcaklığın, liç süresinin, asit konsantrasyonunun, katı-sıvı oranının ve karıştırma zamanının etkili olduğu görülmüştür [38].

-Kırmızı çamur numunesi üzerinde yapılmış bir çalışmada (2001); kırmızı çamurun hidroklorik asit çözeltisindeki çözünürlüğü incelenmiştir. Buna göre; uygun asit konsantrasyonun 6M, gerekli kalsinasyon sıcaklığının $900^\circ C$, optimum çözündürme süresinin 3 saat olduğu tespit edilirken, demir bileşeninde %97 ve alüminyum bileşeninde %52.2 civarında çözünme olduğu görülmüştür [39].

Çalışmaların devamında (2004), titanyumun sülfürik asit liçinde ultrasound gücünün etkisi araştırılmıştır. TiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'ün eldesinde ultrasound gücü, sıcaklık, liç süresi, asit konsantrasyonu ve katı-sıvı oranı etkileyici parametrelerdir. Ancak asit konsantrasyonu ve sıcaklığın, TiO_2 'nin liç edilmesinde en önemli faktör olduğu belirlenmiştir. Ultrasonik karıştırma kullanıldığında, TiO_2 'nin kazanılmasında %20 artış gözlenmiştir [40].

2.6 Çimento

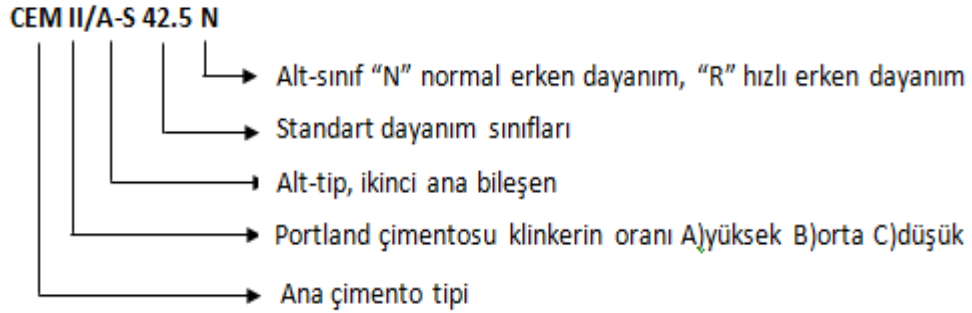
Portland çimentosu; kalker ve kilin döner fırınlarda yaklaşık $1500^\circ C$ 'de pişirilmesi ve ani olarak soğutulması ile elde edilen klinkerin %2~5 oranında jips katılarak 60 μm tane boyutuna öğütülmesinden elde edilen hidrolik bağlayıcıdır. Dayanımı bileşenlerinin oranına ve inceliğine bağlı olarak değişir. Günümüzde farklı oranlarda puzolanlar katılarak farklı özelliklerde çimentolar üretilmektedir. Çizelge 2. 8'de görüldüğü gibi TS EN 197-1 (2012) "Genel Çimentolar" standardı kapsamındaki 27 farklı genel çimento, aşağıda verilen 5 ana tipte gruplandırılmıştır (Çizelge 2. 8).

- 1-CEM I Portland çimentosu
- 2-CEM II Portland-kompoze çimento
- 3-CEM III Yüksek fırın cürüflu çimento
- 4-CEM IV Puzolanlı çimento
- 5-CEM V Kompoze çimento [41].

Çizelge 2. 8 Genel çimento özellikleri

Ana Tipler	27 ürüne ait işaret (Genel Çimento Tipleri)		Bileşim (kütlece) % olarak										
			Ana Bileşenler										Minör ilave Bileşen
			Klinker K	Yüksek fırın cürufu Ş	Silis dumanı D	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist T	Kalker		
						Doğal P	Doğal Kalsine edilmiş Q	Silissi V	Kalkersi W		L	LL	
CEM I	Portland Çimento	CEM I	50-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland Curufllu Çimento	CEM II/A-S	90-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM Iı/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 Çimento	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 Çimento	CEM II/A-M	80-94	←----- 6-20 -----→									0-5
		CEM II/B-M	65-79	←----- 21-35 -----→									0-5
CEM III	Yüksek Fırın Cürufllu 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	Puzolanik 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

TS EN 197-1 (2012) standardına göre çimentoların tanımı Şekil 2. 5’de verildiği gibi ana çimento tipi; Portland çimentosu klinkeri oranı, ikinci ana bileşen; N/mm² cinsinden 28. günde küp basma dayanım sınıfı ve erken dayanım kazanma hızı dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 2. 5 Çimento kodlamasının açıklanması

S EN 197-1 (2012)’deki değişik çimento tiplerine göre çimentonun bileşen malzemeleri şu şekildedir:

- Ana bileşen (örneğin; Portland çimentosu klinkeri)
- İkinci ana bileşen (örneğin; uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalker, silis dumanı); (majör katkılar)
- Minör ilave bileşen (örneğin; uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalker, doğal puzolan)
- Priz ayarlayıcı (örneğin; kalsiyum sülfat; alçıtaşı)
- Kimyasal katkılar (örneğin; pigmentler, hava sürükleyici katkılar)

İkinci ana bileşeni belirten harfler ise şöyledir:

- S, Granüle yüksek fırın cürufu
- D, Silis dumanı
- P, Doğal puzolan
- Q, Doğal kalsine puzolan
- V, Silissi uçucu kül
- W, Kalkersi uçucu kül

- T, Pişmiş şist
- M, Yukarıdakilerden ikisi veya daha fazlası
- L, Kalker

TS EN 197-1 (2012)'e göre, en son şekliyle 32.5, 42.5 ve 52.5 MPa olmak üzere üç standart dayanım sınıfı bulunmaktadır. Ayrıca, her dayanım sınıfı için iki erken dayanım sınıfı tanımlanmıştır (Çizelge 2. 9).

Çizelge 2. 9 Çimento standart basma dayanımları

Dayanım Sınıfı	Basma Dayanım (MPa)				Priz Başlama Süresi (dk)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standart Dayanım			
	2. gün	7. gün	28. gün			
32.5 N	-	≥16	≥32.5	≤52.5	≥75	≤10
32.5 R	≥10	-				
42.5 N	≥10	-	≥42.5	≤62.5	≥60	
42.5 R	≥20	-				
52.5 N	≥20	-	≥52.5	-	≥45	
52.5 R	≥30	-				

2.6.1 Portland Çimentosu

TS EN 197-1 (2012)'e göre ülkemizde üretilen Portland çimentoları 3 çeşittir.

1-CEM I 32.5 (Normal Portland Çimento)

2-CEM I 42.5 (Yüksek Dayanımlı Çimento)

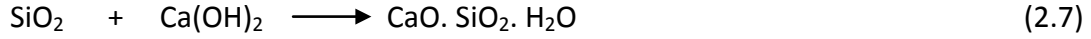
3-CEM I 52.5 (Yüksek Dayanımlı Çimento)

2.6.2 Çimento Sanayinde Kullanılan Katkı Maddeleri

2.6.2.1 Puzolanik Maddeler

Puzolanik maddeler, silisli ve alümino-silisli minerallerin karışımından meydana gelen bir bileşimde olup, kendi başlarına bulunduğu zaman hidrolik özelliğe sahip olmadıkları

halde çok ince öğütüldükleri zaman normal sıcaklık ve sulu ortamda Ca(OH)_2 ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik özellik gösteren maddeler olarak tanımlanmaktadır [42]. Bir puzolana Portland çimentosu karıştırıldığı zaman çimentonun hidratasyonu sonunda meydana gelen Ca(OH)_2 ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasında gerçekleşen reaksiyon sonunda puzolan yine bağlayıcılık özelliğine sahip olabilir.



(Puzolan) (Sönmüş kireç) (Kalsiyum silikat-Hidrate Yapı)

Puzolan maddelerde Al_2O_3 fazla miktarda bulunmalı, CaO az miktarda yer almalıdır. ASTM C 618-72 standardına göre bir puzolanda; $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 0.70$ koşulu gerçekleşmelidir. Diğer taraftan CaO miktarı da %4'ü geçmemelidir. Puzolanlar, doğal ve yapay olmak üzere 2 gruba ayrılırlar. Türkiye'de Kayseri civarında geniş puzolan yataklarının bulunduğu tahmin edilmektedir. Doğal puzolanlarda aranılan kimyasal özellikler TS 25'e göre Çizelge 2. 10'da gösterilmiştir [43].

Çizelge 2. 10 Trasın kimyasal özellikleri

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	En az %70
MgO	En çok %5
SO_3	En çok %3
Nem	En çok %10

Puzolanik Aktivite:

"Puzolanik aktivite" kavramı bir puzolanın içerisindeki aktif silisin bağlayabileceği en fazla Ca(OH)_2 miktarını ve bağlanma işleminin hızını ifade etmektedir.

2.6.3 Çimentonun Ana Karma Bileşenleri

Çimentoda 4 ana bileşen vardır. Bunlar karma oksitlerdir (Çizelge 2. 11).

1-C₂S: $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (dikalsiyum silikat, Belit)-Hızlı dayanım

2-C₃S: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (trikalsiyum silikat, Alit)-Yavaş ve sürekli dayanım

3-C₃A: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (trikalsiyum alüminat)-Kimyasal etkilere (sülfata) dayanıksızlık

4-C₄AF: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (tetrakalsiyum alüminaferrit, Ferrit)-Priz sıcaklığını düşürme

Genel olarak, Portland çimento klinkeri içerisinde %80 oranında, boyutları 25 µm ile 65 µm arasında değişen C_3S pseudo-hekzagonal kristalleri ile birlikte daha az sıklıkta bulunan ve boyutları 10 µm ile 40 µm arasında değişen C_2S yuvarlak kristalleri yer almaktadır.

Portland çimento klinkeri içerisinde %10 oranında, C_2S ve C_3S kristalleri arasında C_3A fazı oluşmaktadır. C_3A fazı, kısa dikdörtgen biçiminde ve uzun prizmatik kristaller şeklinde bulunmaktadır. Diğer bir ara bileşen ise, kalsiyum alüminaferrittir (C_4AF , ferrit). C_4AF , küçük prizmatik veya dendritik kristaller veya lifli malzemeler görünümündedir [44].

Bunların dışında alçıtaşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ve minör oksitler olarak birleşmemiş CaO , MgO , bazı durumlarda Na_2O , K_2O ve erimeyen maddelerde (çoğunlukla SiO_2) bulunur. Çimento ile su bir araya geldiği zaman, her ana bileşen su ile reaksiyona girmekte ve her ana bileşenin reaksiyon hızı, reaksiyon sırasında açığa çıkan ısı ve reaksiyon sonucunda oluşan ürünün çimento hamurunun bağlayıcı özelliğine etkisi farklı olmaktadır.

Çizelge 2. 11 Ana bileşenlerin özellikleri

Özellik	C_2S	C_3S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı	Orta	Düşük	Yüksek	Orta
Dayanıma Katkısı				
İlk Günlerde	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Sonunda	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

2.6.4 Çimentoların Prizi

Priz, bağlayıcı maddelerin katılaşması veya plastik deformasyon yapma kabiliyetini kaybetmesi demektir. Priz bakımından bilinmesi gerekli 2 önemli özellik bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, priz başlama süresi, ikincisi ise priz sona erme süresidir. Bir bağlayıcı madde, hamuruna, başlangıçta kolaylıkla şekil verilirken, bir süre geçtikten sonra hamurda meydana gelen değişme ile hamur şekil vermeye karşı bir direnç gösterir. Bu olay prizin başladığını ortaya koymaktadır. Diğer bir deyişle, priz başlaması

bu olayın normal gelişmesinde ani bir değişiklikle kendini belli etmektedir. Buna karşılık, prizın sona ermesinde böyle bir durum yoktur.

Belirli bir çimento için priz süreleri aşağıdaki faktörlerin etkisi altında bulunmaktadır:

1-Sıcaklık: Sıcaklığın artması, kimyasal bir reaksiyon olan hidrasyon olayının hızlanmasına sebep olduğundan priz süresini kısaltmaktadır.

2-Yoğurma suyu miktarı: Bağlayıcı madde hamurunda fazla miktarda su kullanmak, priz sürelerinin artmasına sebep olmaktadır.

3-Çimentonun kullanılmadan uzun süre bekletilmesi: Prizin geç başlamasına sebep olmaktadır.

Çimentonun priz süresinin geciktirilmesi veya çabuklaştırmak gerektiği durumlarda bazı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Portland tipi çimentonlarının priz sürelerini değiştirmek amacıyla kullanılmakta olan katkı maddeleri alçıtaşı, alçı, CaCl_2 , NaCl , Na_2CO_3 , ZnO , NaOH , KOH , NH_3 , kireç ve şekerdir.

Katkı maddeleri içinde yapı işlerinde en çok kullanılan CaCl_2 'nin çimento ağırlığının %2'si oranında veya suya karıştırılarak kullanılması önerilir. CaCl_2 , prizi çabuklaştırmakla beraber betonun ilk günlerdeki mukavemetini artırır.

2.6.5 Portland Çimentonun Hidratasyonu

2.6.5.1 Portland Çimento Bileşiklerinin Hidratasyon Karakteristikleri

Çimentonun 4 ana bileşeni tek başlarına su ile değişik şekilde reaksiyona girerler.

1-β-dikalsiyum silikat (C_2S): Çok daha yavaş oluşur ve betonun 28. günde ve daha sonraki son dayanımını kazandıran bir reaksiyondur. Kaba taneli hidrate olmamış C_3S ile birlikte etki yapmaktadır (Çizelge 2. 12).



Çizelge 2. 12 C₂S bileşiği hidratasyon karakteristikleri

Reaksiyon Hızı	Yavaş
Hidratasyon Hızı	Az (62 kal/g)
Bağlayıcılık Değerleri	
-İlk Zamanlar	Düşük
-Sonunda	Yüksek

2-Trikalsiyum silikat (C₃S): Orta derecede bir reaksiyon ısısı vererek hidrate olur. Reaksiyon ısısı her hidrate olmuş C₃S partikülünün üstünde meydana gelen, kalsiyum silikat hidrat tabakasının özelliğine bağlı olarak kontrol altına alınır. Başlangıçta bu reaksiyon hızı hidrat tabakası kalınlaştıkça giderek yavaşlar (Çizelge 2. 13). Bu reaksiyon, betonun 7. ve 28. günde mukavemetlerini kazandıran bir reaksiyondur.



C-S-H (CaO.SiO₂.H₂O = Tobermorit)

Çizelge 2. 13 C₃S bileşiği hidratasyon karakteristikleri

Reaksiyon Hızı	Orta
Hidratasyon Hızı	Orta (120 kal/g)
Bağlayıcılık Değerleri	
-İlk Zamanlar	Yüksek
-Sonunda	Yüksek

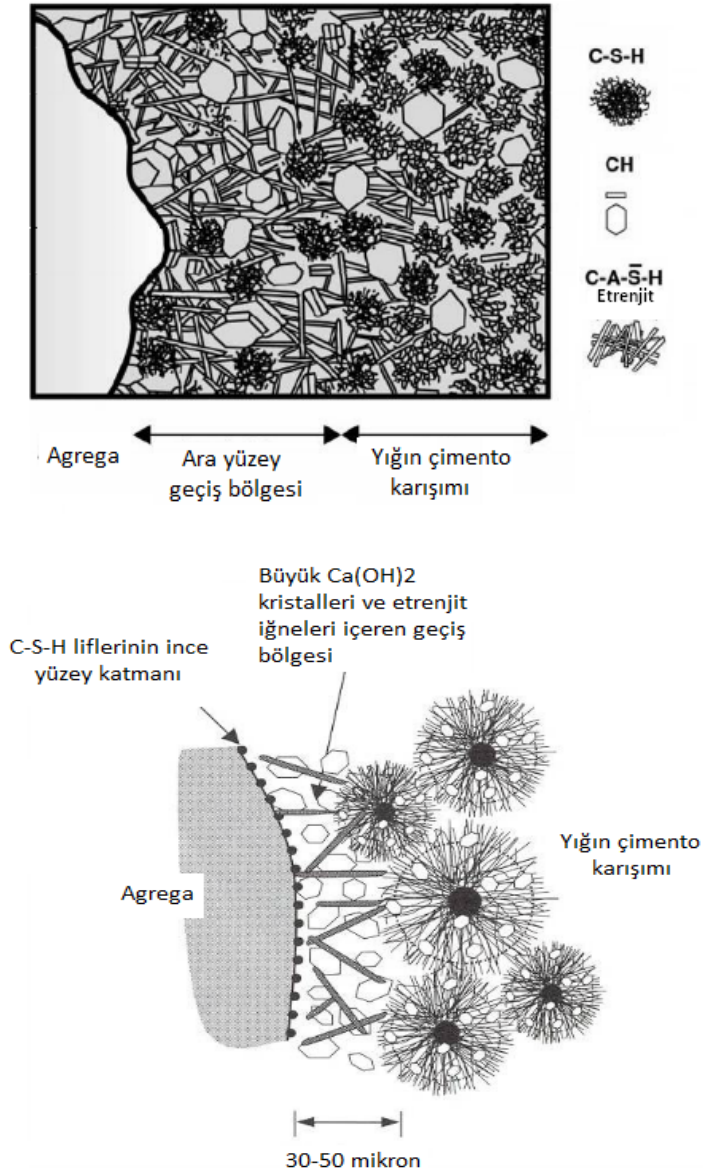
3-Trikalsiyum alüminat (C₃A): Kendi başına suyla çok çabuk hidratasyona uğrar. Uygun miktarda alçı taşı kullanıldığında, alüminatların yüzeyinde ince iğneler şeklinde etrenjit kristalleri meydana gelir. Bu kristaller o kadar incedir ki hidratasyonun ilk zamanlarında rijit bir yapı meydana getirmediğinden dolayı priz olayı gerçekleşmez (Çizelge 2. 14).



Çizelge 2. 14 C_3A bileşiği hidratasyon karakteristikleri

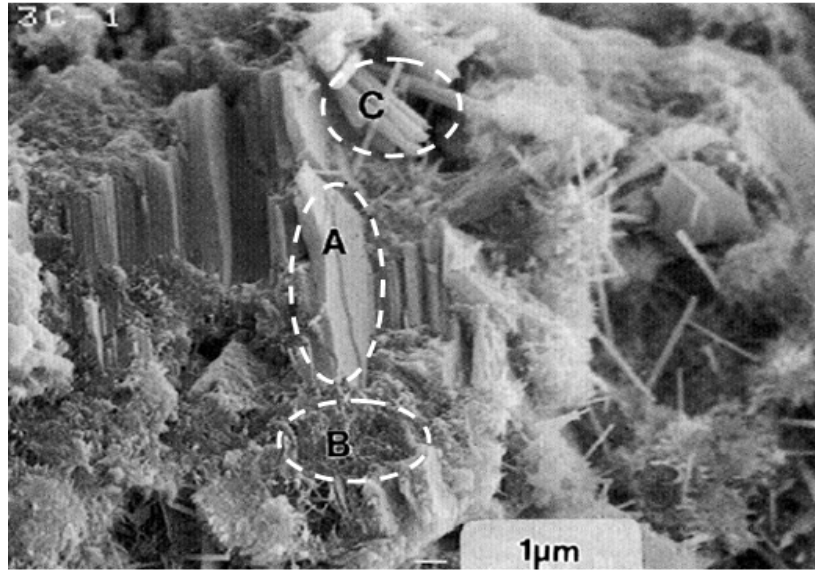
Reaksiyon Hızı	Hızlı
Hidratasyon Hızı	Çok (207 kal/g)
Bağlayıcılık Değerleri	
-İlk Zamanlar	Düşük
-Sonunda	Yüksek

Etrenjit ve diğer hidratasyon bileşenlerinin agrega-çimento ara yüzeyinde görünüşleri Şekil 2. 6'da gösterilmiştir.

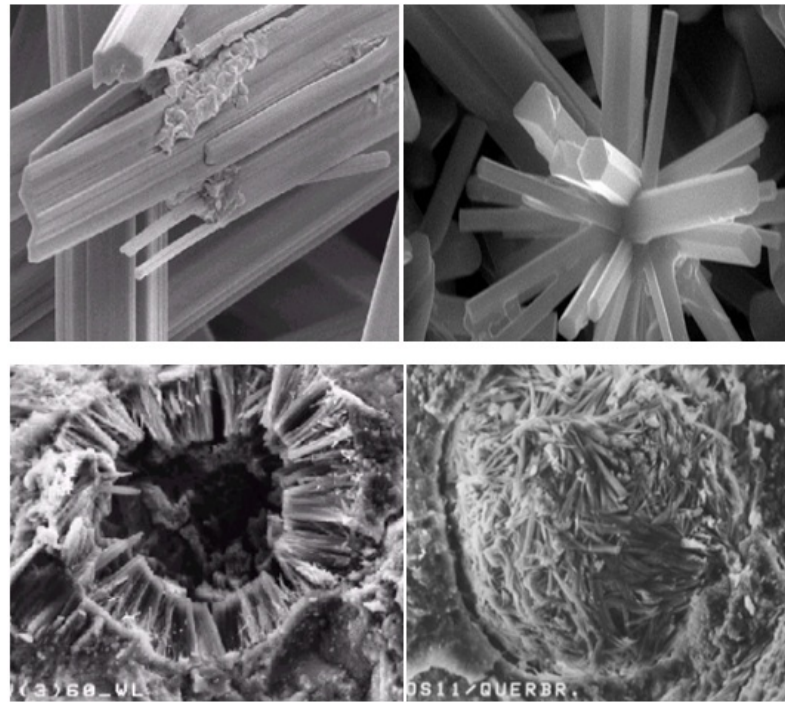


Şekil 2. 6 Agrega-çimento ara yüzeyi

Etrenjit hidratasyon bileşiminin SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 2. 7 ve Şekil 2. 8’de verilmiştir.



Şekil 2. 7 Hidrate olmuş çimento harcı (Su/Beton oranı: 0.55) A = CH (Kalsiyum hidroksit kristalleri), B = C-S-H (tobermorit) ve C = Etrenjit iğnemi yapıları



Şekil 2. 8 Etrenjit kristalleri görüntüsü

4-Tetrakalsiyum alüminaferrit (C_4AF): Alçı ve su ile reaksiyona girerek muhtemelen



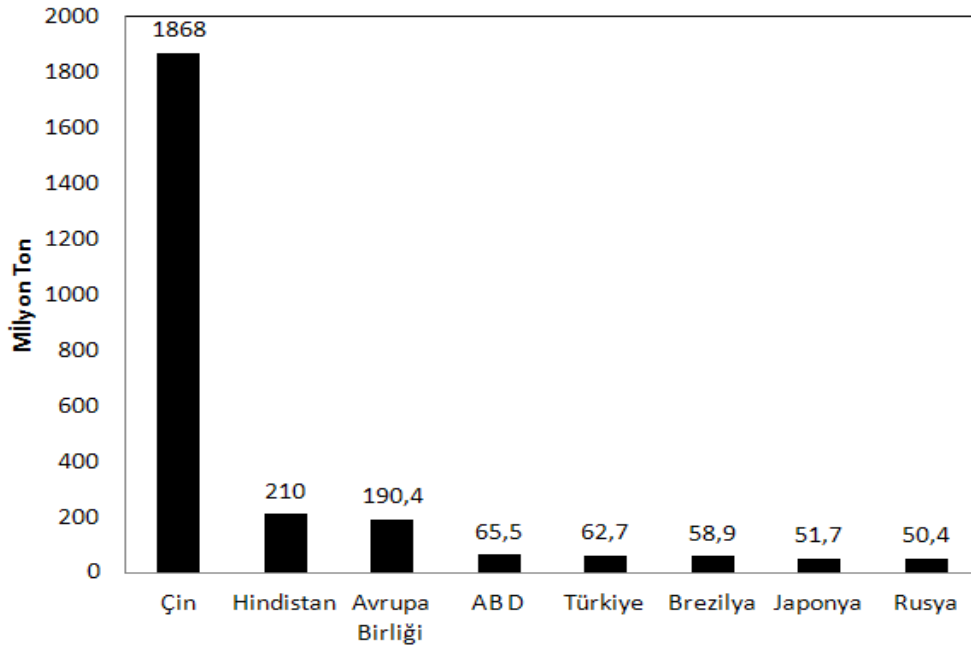
Çizelge 2. 15 C₄AF bileşiği hidratasyon karakteristikleri

Reaksiyon Hızı	Orta
Hidratasyon Hızı	Orta (100 kal/g)
Bağlayıcılık Değerleri	
-İlk Zamanlar	Düşük
-Sonunda	Düşük

oluşturmaktadır (Çizelge 2. 15). C₄AF'nin su ve alçı ile birleşmesi sonucunda elde edilen özellikler C₃A'nın sonuçlarına benzer, fakat daha az etkilidir. Ancak C₄AF'nin çimentodaki oranı çok düşük olduğundan sonuç üzerindeki rolü büyük değildir.

2.6.6 Dünya’da ve Türkiye’de Çimento Üretimi

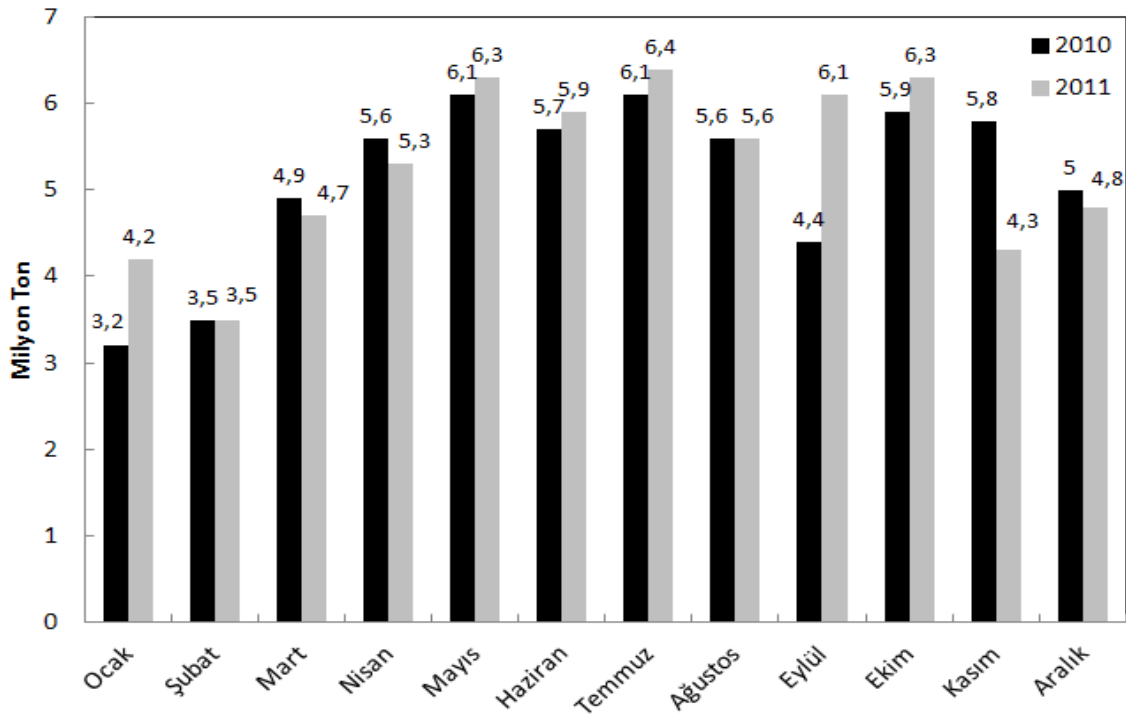
Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği 2010 yılı verilerine göre; Dünya’da çimento üretiminin yaklaşık olarak %89’unu Çin, Hindistan ve Avrupa Birliği ülkeleri gerçekleştirmektedir. Türkiye’nin, ABD’den sonra en çok büyüyen çimento endüstrisine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2. 9).



Şekil 2. 9 2010 yılı Dünya çimento üretimi [45]

Dünyada önemli bir yere sahip olan Türk çimento sektörü, Dünya çapında ilk 10 içerisinde yer almaktadır. 2009 yılında üretim kapasitesi arttırılarak 90 milyon tona

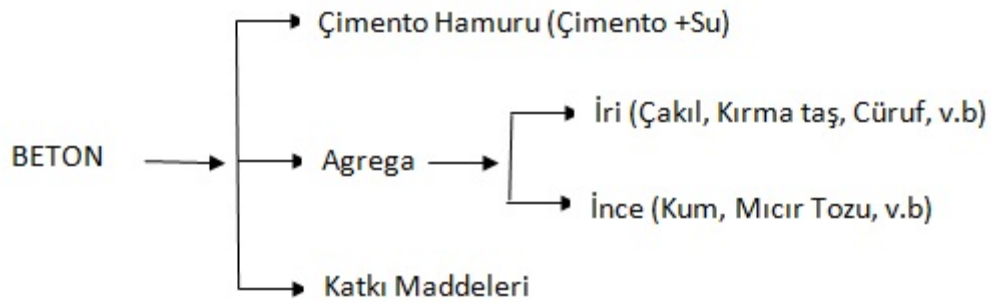
ulaşmış, üretim 58 milyon tonu bulmuştur. 2010 yılında üretim 62 milyon ton, 2011 yılı üretim toplamı ise; 63 milyon tondur (Şekil 2. 10).



Şekil 2. 10 2010-2011 yılı Türkiye çimento üretimi [45]

2.7 Beton

Beton; çimento, su, agrega ile kimyasal veya mineral katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda, şekil verilebilen, zamanla katılaşp sertleşerek, mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir (Şekil 2. 11).



Şekil 2. 11 Betonun yapısı

Çimento: Bağlayıcı

İri agrega: Yükleri taşıyıcı

İnce agrega: Boşlukları doldurucu

Su: Hidratasyon başlatmak + işlenebilirlik sağlamak

Katkı: İstenen özellikleri sağlamak

Betonu oluşturan hammaddeler; çimento, su, agrega (kum, çakıl, kırma taş), kimyasal katkılar ve mineral katkılarıdır. Kimyasal katkılarla (akışkanlaştırıcı, priz geciktirici, geçirimsizlik sağlayıcı, antifriz) mineral katkıları (taş unu, tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı) betonun performansını istenilen yönde iyileştiren çağdaş teknoloji unsurlarıdır. Çimento ile suyun karışımından oluşan çimento hamuru zamanla katılıp sertleşerek, agrega tanelerini (kum, çakıl, kırma taş) bağlar ve yapıştırır. Böylece betonun mukavemet kazanmasına olanak sağlamaktadır. İyi bir betonda tüm ince agrega tanelerinin çimento hamuruyla; tüm kaba tanelerini de harç ile bütünüyle kaplanmış olması gerekir. Dolayısıyla betonun mukavemeti,

- Çimento hamurunun mukavemetine
- Agrega tanelerinin mukavemetine
- Agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki yapışmanın gücüne (aderans) bağlıdır.

2.7.1 Beton Oluşturan Hammaddeler

2.7.1.1 Çimento

Çimento birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşendir; ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir. Beton üretiminde kullanılacak çimento TS EN 197-1 (2012) standardına uygun olmalıdır.

2.7.1.2 Agrega

Agrega beton hacminin yaklaşık %70-75'ini oluşturur. Doğal, yapay ve her iki cins yoğun mineral malzemenin çeşitli büyüklüklerdeki kırılmamış ve/veya kırılmış tanelerinin yığını olarak tanımlanır. Tane boyutu 4 mm'den küçük olanlara “ince agrega” veya “kum”, 4 mm'den büyük olanlara “iri agrega” veya “çakıl” denir. Agregalar; elde edilmiş şekillerine ve tane boyut dağılımlarına göre 2'ye ayrılmaktadır:

1-Agregalar elde ediliş şekline göre;

a-Doğal agregalar: Çakıl ve kum doğal agregalar, ocak ve dere malzemelerinin tipik birer örneğidir. Kum ve çakılın bir arada bulunduğu malzemeye “tüvenan agrega” adı verilir. Kırma taş, ana kayaçların veya büyük taşların, tüm agrega parçalarının kırılmış bir yüzeye sahip olacak şekilde kırılması sonucu oluşmaktadır. “Mıcır” adı verilen kırma taş agregalar, genelde kaba ($> 4 \text{ mm}$), ince ($4 \text{ mm} > x > 63 \text{ }\mu\text{m}$), mineraller filler ($< 63 \text{ }\mu\text{m}$) olarak 3 boyutta üretilir (Şekil A. 2a).

b-Yapay agregalar: Hafif ağırlıklı, genellikle hafif beton imalatında tercih edilmektedir. Yüksek fırın cürufu en yaygın olarak kullanılan yapay agregadır (Şekil A. 2b).

2-Agregalar tane boyut dağılımına göre;

a-İnce agregalar ($< 4 \text{ mm}$)

Kum

Kırma kum

Yapay kum

b-İri agregalar ($> 4 \text{ mm}$)

Çakıl

Kırma taş (mıcır)

Yapay taş

c-Taşunu (Filler) ($< 0.25 \text{ mm}$)

2.7.1.3 Karışım Suyu

Betonda kullanılan suyun 2 işlevi vardır.

1-Hidratasyon adı verilen kimyasal reaksiyonu başlatıp sürdürmek,

2-İşlenebilirliği sağlamak.

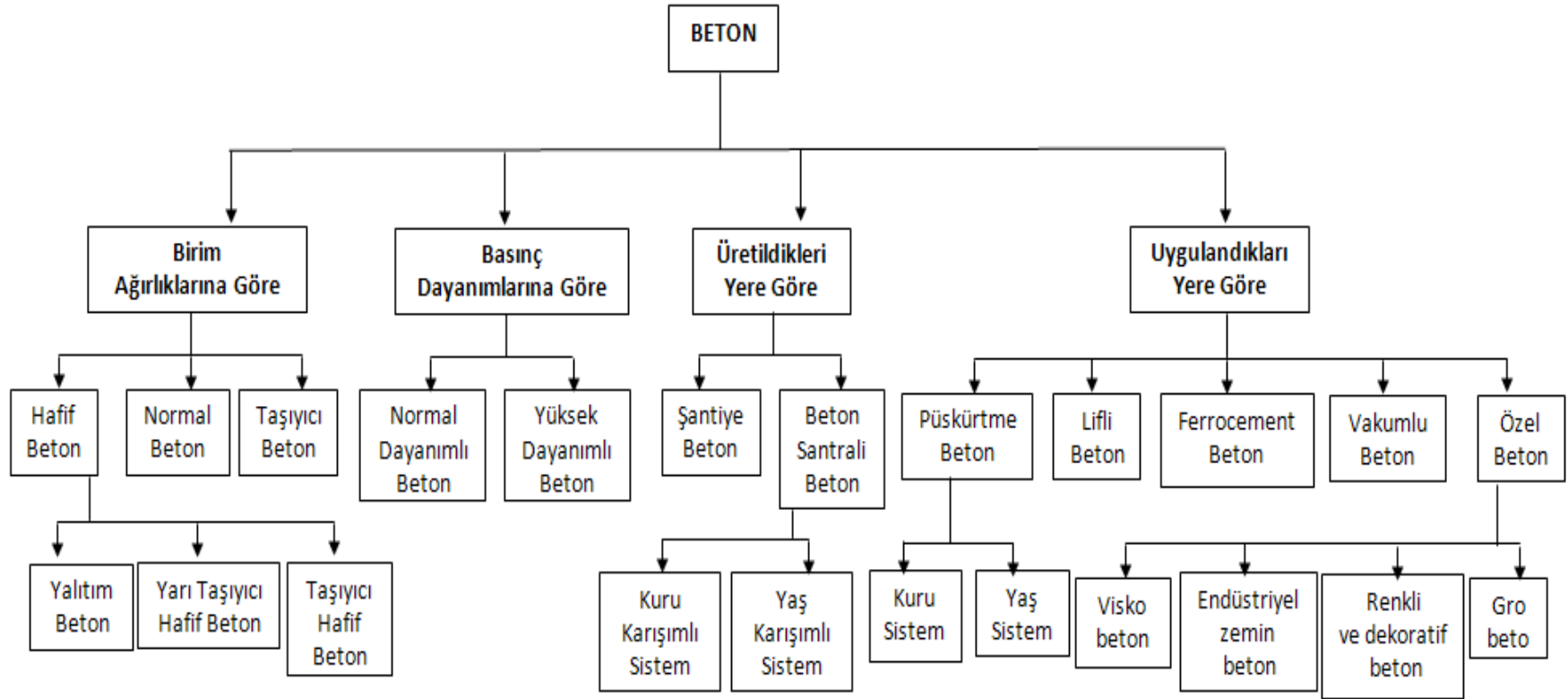
Temiz, içilebilir, berrak ve kokusuz her su beton üretiminde kullanılabilir. Beton karma suyu asit niteliğinde olmamalıdır. Sülfat, değişik tuz, vb. betona zarar verebilecek kimyasal maddeleri içermemelidir.

2.7.1.4 Katkı Maddeleri

Betonun birtakım özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton içerisindeki çimento miktarı temel alınarak, belli oranlarda katılan organik ve inorganik kökenli kimyasallar, katkı maddesi olarak sınıflandırılırlar. Katkı maddeleri çoğunlukla beton karışım suyuna katılır [46].

2.7.2 Beton Çeşitleri

Beton temel olarak 4 ana grupta incelenmektedir (Şekil 2. 12).



Şekil 2. 12 Beton çeşitleri

2.7.3 Beton Kalitesi

İnşaat sektöründe en çok kullanılan ve kompozit bir malzeme olan betonun kendisini oluşturan malzemelerin özellikleri ile karışım oranları, beton kalitesine etki etmektedir. Betonun dayanımını etkileyen parametreler Çizelge 2. 16’da özetlenmiştir.

Çizelge 2. 16 Betonun dayanımını etkileyen faktörler

Agrega	Çimento	Su
1. Tane dağılımı	1. İncelik	1. Su/Çimento oranı
2. Yüzey pürüzlülüğü	2. Depolama şartları	2. Suyun kalitesi ve uygunluğu
3. Tane şekli (Kübik)	3. Çimento türü	
4. Taş yapısı	4. Normal dayanımı	
5. Yabancı ve ince madde içeriği	5. Doz	
	6. Mineral katkıları	
Çevre şartları	Beton kompasitesi	Üretim, döküm; bakım şartları
1. Karbonatlaşma	1. İyi yerleştirme	1. Karışım malzemelerinin ölçümü
2. Tuz etkisi	2. Kil oranı, Su miktarı ve Agreg a şekli	2. Betoniyerde karıştırma
3. Sülfat etkisi	3. Akışkanlaştırıcı veya geçirimsizlik katkı ilavesi	3. Taşıma
		4. Kalıba yerleştirme ve sıkıştırma
		5. Bakım ve koruma

2.7.3.1 Beton Dökümü

Beton dökümü ve yerleştirilmesi sırasında dikkat edilecek hususlar aşağıdaki gibidir;

1-Betonun döküldüğü nokta, yerleştirileceği yer olmalıdır. Beton u bir bölgeye dökerek çekmek veya aktarmak yöntemiyle yerleştirileceği bölgeye taşımaktan mümkün olduğu kadar kaçınılmalıdır.

2-Beton mümkün olduğunca yatay tabakalar halinde dökülmelidir. Her bir tabakanın kalınlığı 15-30 cm arasında olmalıdır. Tabaka kalınlıkları her bölgede eşit ve homojen olmalıdır.

3-Beton serbest olarak en fazla 1.5 m yükseklikten dökülmelidir. Daha yüksekten dökmek gerektiğinde, önlem alınmalıdır.

4-Betonun dökülmesinde temel hedef ayrıştırmama ve homojenliğin korunması olmalıdır.

5-Beton daima kalıba düşey yönde, dik olarak dökülmelidir.

6-Beton dökümü kesintisiz ve sürekli olmalıdır. Soğuk derzlere olanak verilmemelidir.

7-Döküme ara vermek zorunluluğunda, iş derzleri bırakılmışsa dökümün devamında derz yüzeyi temizlenmeli ve suya doymuş kuru duruma getirilmelidir.

8-Döküm esnasında kalıp ve donatılara fiziksel darbelerden kaçınılmalıdır.

9-Yerleştirme sırasında sıkıştırma (vibrasyon) ve yüzey bitirme işlemleri belli bir uyum içinde ardışık olmalıdır.

2.7.3.2 Sıkıştırma

Sıkıştırma, beton dökümünün sonuca etki eden en önemli aşamasıdır. Sıkıştırmanın amacı;

1-Betondaki hava boşluklarını dışarı atarak, boşluksuz ve geçirimsiz bir yapı oluşturmak,

2-Beton-donatı arasındaki aderansı tam anlamıyla sağlamak,

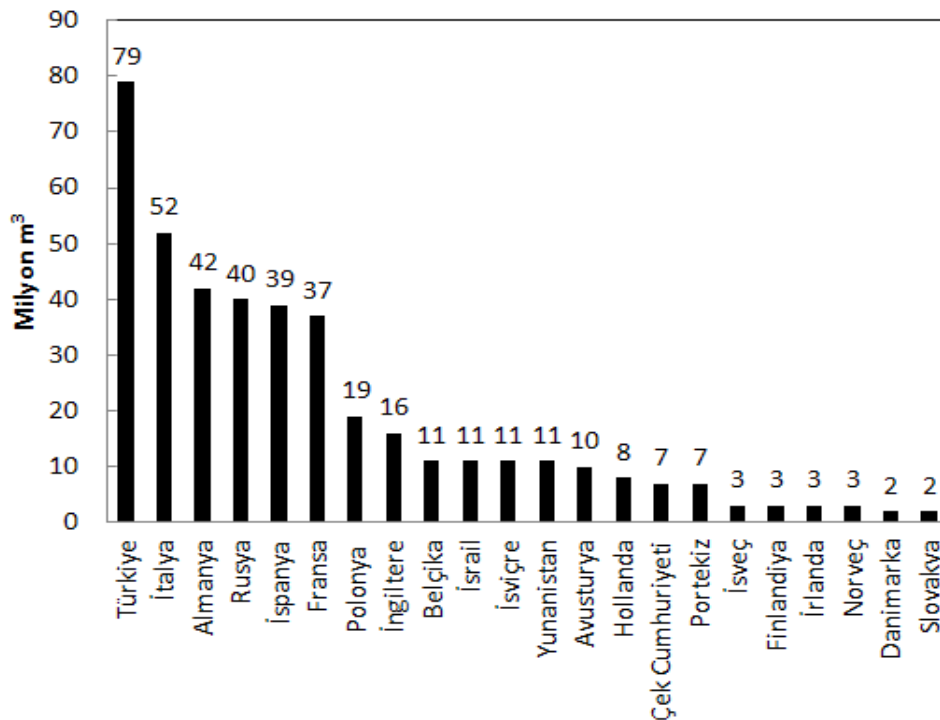
3-Betonu kalıbın her noktasına yaymaktır.

Erken yaşlarda betondaki buharlaşma sonucunda meydana gelen su kaybı, hidrasyonu olumsuz olarak etkilemekle kalmaz, rötre çatlaklarına da neden olabilir. Beton dökümü için anormal hava koşulu sayılan sıcak ve soğuk havalarda ilave bazı önlemlerin alınması şarttır. Önlem alınmadığı takdirde, her iki hava koşulları da betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini çok ciddi derecede olumsuz olarak etkiler. Beton dökümü sırasında, ortalama hava sıcaklığının 3 gün süre ile +5°C'nin altında olduğu durum, döküm için soğuk hava koşullarını oluşturur. Soğuk havalarda sıcaklığın azalmasıyla çimentonun hidrasyonu yavaşlar. Yavaşlayan hidrasyon, betonunu dayanım kazanma hızını da azaltır. Kalıp sökme süreleri uzar. Beton dökümü sırasında ortalama hava sıcaklığının, 3 gün süre ile +30°C'nin üstünde olduğu durum döküm için sıcak hava koşullarını oluşturur. Yüksek hava sıcaklığı, hidrasyonu hızlandırmasına, kıvam kaybının artmasına, karışım suyu ihtiyacının artmasına, dayanım ve dayanıklılığın

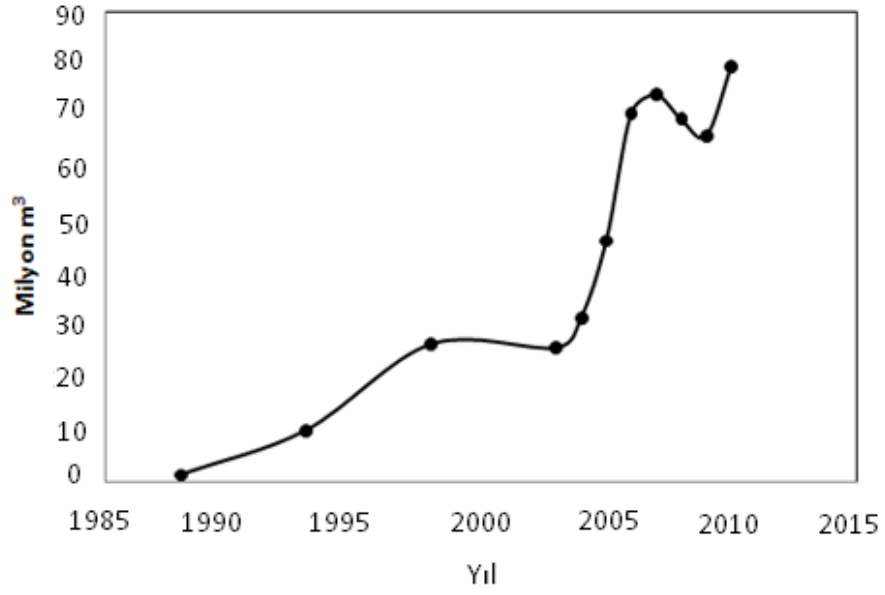
düşmesine ve buharlaşmanın artması ile büyük hacim değişikliklerine neden olduğundan, bu olayların olumsuz etkilerine karşı uygun önlemler alınmalıdır.

2.7.4 Dünya’da ve Türkiye’de Beton Üretimi

Türkiye Hazır Beton Birliği 2010 yılı verilerine göre; Dünya’da çimento üretiminin yaklaşık olarak %19’unu ilk sırada Türkiye temsil etmektedir. Avrupa ülkelerindeki beton üretimi ekonomik krizin yüksek oranda hissedilmesinden dolayı düşmüştür. 2009 ve 2010’da inşaat sektörü Avrupa’da yaklaşık olarak %10 oranında küçülmüş beton üretimi ise örneğin İspanya’da 2007 yılında 100 milyon m³’den, 40 milyon m³’ün altına inmiştir (Şekil 2. 13). Türkiye’de ise yıllara göre beton üretimi her yıl artmaktadır. 1988 yılında beton üretimi henüz 1.5 milyon m³ iken, günümüzde bu rakam 80 milyon m³’e ulaşmıştır (Şekil 2. 14). Türkiye ekonomisi 1988’den 2010’a yaklaşık 8 kat büyümüştür. Hazır beton sektörü ise yaklaşık olarak 60 kat büyümüştür. 2000 yılından bu yana Türkiye ekonomisi 3 kat büyümüş, beton üretimi de yaklaşık olarak 4 kat artmıştır. 2000’den bu yana yaşanan büyümenin başlıca sebebi ekonomideki ve elle karıştırılan betonun azalmasından kaynaklanan büyümedir. Kişi başı beton tüketimlerinde Türkiye, birçok Avrupa ülkesini geride bırakarak kişi başı 1 m³ civarını geçmiştir.



Şekil 2. 13 2010 yılı Dünya beton üretimi (milyon m³) [47]



Şekil 2. 14 1988-2010 Türkiye beton üretim grafiği [47]

2.7.5 Beton Ürün Grupları

2.7.5.1 Parke Taşı

Parke taşları çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılması ile beton parke makinesi ile vibrasyon ve pres uygulanarak üretilen yapı elemanlarıdır (Şekil A. 3). Beton parke elemanları farklı tip ve ebatlarda üretilmekte, son yıllarda hızla yaygınlaşan beton parke kaplamaların yapımında kullanılmaktadır. Kent içi yollarda (ağır taşıt trafiğinin yoğun olmadığı cadde ve sokaklarda) kaldırımlarda, yaya yollarında, site içi bağlantı yollarında vb. kullanılmaktadır.

2.7.5.2 Bordür Taşı

Kaldırım ve refüjleri yoldan ayırmak ve yol yüzeyine gelen suları, yağmur suyu sistemine yönlendirmek vb. amaçlarla, kaldırım ve refüj kenarlarına dizilen çeşitli boy ve kesitlerde betondan imal edilen yapı elemanlarıdır (Şekil A. 4).

2.7.5.3 Kent Mobilyaları

Kent mobilyaları, çok değişik fonksiyonları olan ve bunları bir arada barındıran bir elemanlar sistemidir. Kent mobilyaları, kent yaşamını daha zevkli ve anlamlı kılan,

kentsel konfor ve kentsel estetik yaratan elemanlar olarak, toplumsal yaşama olumlu katkılarda bulunmaktadır.

Kullanıcıların çeşitli gereksinimlerini karşılayan kent mobilyalarının sınıflandırılmasında farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. İşlevlerine göre kent mobilyaları;

- 1-Zemin kaplamaları (beton, taş, ahşap, asfalt, tuğla vb),
- 2-Oturma elemanları (banklar, sandalyeler, grup oturma elemanları),
- 3-Aydınlatma elemanları (yol aydınlatıcıları, alan aydınlatıcıları),
- 4-İşaret ve bilgi levhaları (yönlendiriciler, yer belirleyiciler, bilgi iletişim panoları),
- 5-Sınırlandırıcılar (yaya ve trafik bariyerleri vb),
- 6-Su ögesi (süs havuzları, çeşmeler, tulumbalar, kanallar, yangın musluğu vb),
- 7-Üst örtü öğeleri (duraklar, gölgelikler, pergolalar),
- 8-Satış birimleri (büfeler),
- 9-Sanatsal objeler (heykeller),
- 10-Diğer objeler (bayrak direkleri, çöp kutuları, posta kutuları, umumi tuvaletler, çiçeklikler, bilet otomatları, bisiklet park yerleri, saatler, parkmetreler, bitkisel öğeler)

Bir başka sınıflama, altyapı ilişkisi kurularak yapılmıştır. Burada kent mobilyaları altyapıya bağlı olup olmama durumlarına göre kategorize edilmiştir.

Altyapıya bağlı mobilyalar:

- 1-Aydınlatma elemanları,
- 2-Trafik lambaları,
- 3-Telefon kabinleri,
- 4-Meydan saatleri,
- 5-Otobüs durakları

Altyapıya bağlı olmayan mobilyalar:

- 1-Oturma elemanları,
- 2-Bilgi-reklam panoları,

3-Sınırlayıcılar,

4-Döşeme kaplamaları

Geçmişten günümüze kent mobilyalarının yapımında çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Beton, kent mobilyalarında da aranan bir malzemedir. Ayrıca, dünyada en yaygın olarak kullanılan taşıyıcı bir yapı malzeme olup, kent mobilyalarının üretiminde önem taşımaktadır [58].

Kent mobilyalarında kullanılan betonlarda yüksek dayanım ve iklim koşullarına bağlı olarak donma-çözölmeye karşı dayanıklılık gibi özellikler sağlanmalıdır. Şiddetli donma-çözölmeye maruz kalan kent mobilyalarının, donma-çözölmeye karşı direnci artıran bazı önemli faktörler şunlardır:

1-Havanın hacmi,

2-Hava boşluğu alanı,

3-Hava boşluğunun özgül yüzey alanıdır.

Beton sınıfı C50'den daha küçük olduğunda, betonun donmaya karşı dayanıklılığını artırmak için hava sürükleyici katkıların ilave edilmesi ve su-çimento oranının 0.40'dan daha az olması sağlanmalıdır. Donma-çözölmeye dayanıklılığı üzerinde puzolanların yardımı önemli değildir. Kent mobilyalarında kullanılacak beton kalitesinin C40 veya C50'den büyük olması karbonatlaşma ve korozyona karşı alınabilecek en uygun önlemdir.

Kent mobilyalarında, çimento içeriği arttıkça, betonun basma dayanımı da artmaktadır. Ancak, ince malzeme kullanımının artması betonda plastik rötrene neden olacağı için bir miktar çimento yerine silis dumanı veya uçucu kül gibi ince taneli malzemelerin kullanılması yararlıdır. Betonda yeteri kadar ince malzeme mevcut ve beton az boşluklu ise betonda terleyen suyun yukarı çıkması güçleşir. Yüzeyden buharlaşan suyun yerine terleme suyu gelemeyince, beton yüzeyi kurur ve çatlaklar oluşur. Böyle bir durumda başka etkilerinde göz önünde bulundurularak, gereğinden fazla ince malzeme ve çimento kullanılmasına sınırlama getirilmelidir. Kent mobilyalarında hava ve çevre kirliliğine bağlı olarak oluşabilecek renk bozulmalarına karşı kaliteli pigmentle renklendirilmiş betonlar kullanılmalıdır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR**3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Doktora tez çalışması kapsamında; Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş'den temin edilen atık kırmızı çamurun, betonun renklendirme, mineraloji, fiziksel, mekanik ve puzolanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numune kodları Çizelge 3. 1, Çizelge 3. 2 ve Çizelge 3. 3 'de, akış planları ise Çizelge 3. 4 ve Çizelge 3. 5'de verilmiştir.

Çizelge 3. 1 Kırmızı çamur ve harç numune karışımlarının kodlanması

	Kod		Açıklama
KIRMIZI ÇAMUR	H		Ham kırmızı çamur
	P		Pulverize kırmızı çamur
	K6		600°C'de kalsine kırmızı çamur
	K7		700°C'de kalsine kırmızı çamur
	K8		800°C'de kalsine kırmızı çamur
HARÇ NUMUNELERİ	C		Kontrol
	H-10	% 10 ikameli	Ağırlıkça %10 ham kırmızı çamur ikameli
	P-10		Ağırlıkça %10 pulverize kırmızı çamur ikameli
	K6-10		Ağırlıkça %10 600°C'de kalsine kırmızı çamur ikameli
	K7-10		Ağırlıkça %10 700°C'de kalsine kırmızı çamur ikameli
	K8-10		Ağırlıkça %10 800°C'de kalsine kırmızı çamur ikameli

Çizelge 3. 2 Parke taşı ve bordür taşı beton karışımlarının kodlanması

	Kod	Açıklama
1	BCP	Ağırlıkça %0.5 ticari pigment katkıli kontrol betonu
2	BH	Ağırlıkça %0.5 ham kırmızı çamur katkıli beton
	BP	Ağırlıkça %0.5 pulverize kırmızı çamur katkıli beton
	BK6	Ağırlıkça %0.5 600°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
	BK7	Ağırlıkça %0.5 700°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
	BK8	Ağırlıkça %0.5 800°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
3	BH	Ağırlıkça %0.25 ticari pigment + %0.25 ham kırmızı çamur katkıli beton
	BP	Ağırlıkça %0.25 ticari pigment + %0.25 pulverize kırmızı çamur katkıli beton
	BK6	Ağırlıkça %0.25 ticari pigment + %0.25 600°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
	BK7	Ağırlıkça %0.25 ticari pigment + %0.25 700°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
	BK8	Ağırlıkça %0.25 ticari pigment + %0.25 800°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
4	BH	Ağırlıkça %0.13 ticari pigment + %0.37 ham kırmızı çamur katkıli beton
	BP	Ağırlıkça %0.13 ticari pigment + %0.37 pulverize kırmızı çamur katkıli beton
	BK6	Ağırlıkça %0.13 ticari pigment + %0.37 600°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
	BK7	Ağırlıkça %0.13 ticari pigment + %0.37 700°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
	BK8	Ağırlıkça %0.13 ticari pigment + %0.37 800°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
5	BH	Ağırlıkça %0.27 ticari pigment + %0.54 ham kırmızı çamur katkıli beton
	BP	Ağırlıkça %0.27 ticari pigment + %0.54 pulverize kırmızı çamur katkıli beton
	BK6	Ağırlıkça %0.27 ticari pigment + %0.54 600°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
	BK7	Ağırlıkça %0.27 ticari pigment + %0.54 700°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton
	BK8	Ağırlıkça %0.27 ticari pigment + %0.54 800°C'de kalsine kırmızı çamur katkıli beton

Çizelge 3. 3 Şehir mobilyaları için beton karışımlarının kodlanması

	Kod	Açıklama
1	BCP	Ağırlıkça %8.3 ticari kuvars esaslı kırmızı agreg a katkı lı kontrol betonu
2	BP	Ağırlıkça %8.3 pulverize kırmızı ç amur katkı lı beton
3	BP	Ağırlıkça %6.2 ticari kuvars esaslı kırmızı agreg a + %2.1 pulverize kırmızı ç amur katkı lı beton
4	BP	Ağırlıkça %4.15 ticari kuvars esaslı kırmızı agreg a + %4.15 pulverize kırmızı ç amur katkı lı beton
5	BP	Ağırlıkça %2.1 ticari kuvars esaslı kırmızı agreg a + %6.2 pulverize kırmızı ç amur katkı lı beton

Çizelge 3. 4 Kurutma iş leminden sonra ham, pulverize ve kalsine kırmızı ç amurlarda yapılan deneyler

Deney adı	H	P	K6	K7	K8
Mineralojik analiz (XRD)	✓		✓	✓	✓
Elementel analiz (XRF)	✓		✓	✓	✓
SEM-EDX analizi	✓	✓	✓	✓	✓
Tane boyut analizi	✓	✓	✓	✓	✓
Elek analizi	✓	✓	✓	✓	✓
BET yüzey alanı	✓	✓	✓	✓	✓
Özgöl ağırlık	✓	✓	✓	✓	✓
DTA/TG analizi	✓				
FTIR analizi	✓				
Renk ölçümü	✓	✓	✓	✓	✓
Radyoaktivite analizi	✓				
Ç evre uyum testi	✓				
Alkali-silika reaksiyonu	✓				

Çizelge 3. 5 Harç numunelerinde yapılan deneyler

Deney adı	H-10	P-10	K6-10	K7-10	K8-10
Eğme deneyi	✓	✓	✓	✓	✓
Basma deneyi	✓	✓	✓	✓	✓
Mineralojik analiz (XRD)	✓	✓	✓	✓	✓
DTA/TG analizi	✓	✓	✓	✓	✓
SEM-EDX analizi	✓	✓	✓	✓	✓

3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

- Kırmızı çamur, nemli halde Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş'den temin edilmiştir.
- Kırmızı çamur renk performansının karşılaştırılmasında kullanılan ticari Bayer 130 G pigmenti Asil Kimya ve Boya Sanayi Ticaret A.Ş firmasından satın alınmıştır.
- Harç karışımlarının hazırlanmasında kullanılan RILEM Chembureau standart kumu Limak Trakya Çimento firmasından, CEM I 42.5 R Portland çimento ise Aslan Çimento firmasından temin edilmiştir.
- Kırmızı çamurun puzolanik aktivite özelliğinin belirlenmesinde kullanılan sönmüş kireç (Ca(OH)_2 , Merck, minimum>%96) Kimeks A.Ş firmasından satın alınmıştır.
- Renkli şehir mobilyaları üretiminde kullanılan kuvars esaslı agregalar Altınaylar Yapı Kimyasalları Ltd. şirketinden temin edilmiştir.

3.2 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar

Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar aşağıda belirtilmiştir:

- Kimyasal bileşimlerinin belirlenmesinde; Philips PW-2404 marka WDXRF cihazı kullanılmıştır.
- Mineralojik analizler; PANalytical X'Pert PRO MPD model XRD cihazı ile Cu $\text{K}\alpha$ X-ışını tüpü kullanılarak belirlenmiştir.

- Kırmızı çamurun kurutma ve kalsinasyon çalışmalarında, “Carbolite 1500 HTF3 ELP model” fırın; pulverizasyonunda, “Fritsch marka Pulverisette 14”; tane boyut dağılımında, “Malvern marka Mastersizer-2000”; elek analizinde, “AS200 basic model” elek sarsma; BET yüzey alanında, “Quantachrome Instruments Nova 4000E”; özgül ağırlık ölçümünde, “Quantachrome UPY-15 model” piknometre; FTIR analizleri için “Perkin Elmer Spectrum One” ve termal davranışı için ise “SEIKO marka ExStar 6300 TG/DTA” model cihazlar kullanılmıştır.
- Kırmızı çamur ve harç numunelerinin mikroyapı karakterizasyonu ve EDX analizleri için FEG-SEM JEOL JSM-6335 F model SEM cihazı kullanılmıştır.
- Kırmızı çamur, ticari Bayer 130 G pigmenti ve prototip beton ürünlerin renk ölçümleri, X-Rite SP64 portatif spektrometre cihazı kullanılarak belirlenmiştir.
- Harç karışımlarının hazırlanmasında, basma ve eğme dayanımlarının belirlenmesinde BAZ Makine Sanayi ve Dış Ticaret Ltd. Şirket’inden temin edilen çimento harç karıştırıcısı, beton basma ve eğme cihazları kullanılmıştır.
- Prototip renkli beton ürünlerinin mukavemet deneyleri Dinç Makine Laboratuvar Test Cihazları Sanayi ve Tic. Ltd Şirket’inden temin edilen yarmada çekme dayanım cihazı ve ömür performans testleri ise Atlas marka SC 600 MGH model solar iklimatik test kabini kullanılarak belirlenmiştir..

3.3 Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Karakterizasyonu

Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş’den nemli halde temin edilen atık ham kırmızı çamur; kurutma, pulverizasyon ve kalsinasyon ön işlemlerinden geçirilmiştir. Ham kırmızı çamur, pulverize kırmızı çamur, 600°C, 700°C ve 800°C’de kalsine edilen kırmızı çamur olmak üzere 5 çeşit kırmızı çamur hazırlanmış, karakterizasyon testleri yapılmıştır.

3.3.1 Ham Kırmızı Çamurun Kurutulması

Ham kırmızı çamur, 90°C’de 3 gün süre ile kurutulmuş ve etüv içinde soğumaya bırakılmıştır (Şekil A. 5). 24 saat, 48 saat ve 72 saat sonunda ağırlık kaybından nem içeriği sırası ile %5.59, %15.93 ve %21.53 olarak belirlenmiştir.

3.3.2 Ham Kırmızı Çamurun Pulverize Edilmesi

Ham kırmızı çamur, kurutma işlemi sonrası pulverizatörden geçirilerek aglomerasyonlar dağıtılmıştır.

3.3.3 Ham Kırmızı Çamurun Kalsinasyon İşlemi

Kalsinasyon sıcaklığının mineralojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisini incelemek amacı ile ham kırmızı çamurun bir kısmı; kurutma işleminden sonra 600°C, 700°C ve 800°C sıcaklıklarında kalsine edilmiştir. Kalsinasyon rejimi; 3 saatte hedeflenen sıcaklığa çıkış, ulaşılan sıcaklıkta 5 saat bekleme ve fırın içerisinde kendiliğinden soğuma olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

3.3.4 Kırmızı Çamurların Kimyasal Özellikleri

3.3.4.1 Kırmızı Çamurlarda Elementel (XRF) Analiz

Kırmızı çamurlarda yapılan elementel analiz sonuçları Çizelge 3. 6' de verilmiştir. Ham kırmızı çamur içerisindeki ana bileşenler %ağırlıkça; %30.37 Fe₂O₃, %21.08 Al₂O₃ ve %15.5 SiO₂, 950°C'deki kızdırma kaybı %17.75'dir. Kalsine kırmızı çamurların kimyasal bileşimlerinin benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 3. 6 Kırmızı çamurların kimyasal bileşimi

Element	%Ağırlıkça				Oksit	%Ağırlıkça			
	H	K6	K7	K8		H	K6	K7	K8
Al	11.157	14.719	14.825	14.789	Al ₂ O ₃	21.080	27.811	28.012	27.943
As	0.013	0.013	0.013	0.014	As ₂ O ₃	0.018	0.018	0.018	0.018
Ca	1.937	2.949	3.001	3.030	CaO	2.710	4.126	4.198	4.239
Cl	0.070	0.058	0.074	0.087	Cl	0.070	0.058	0.074	0.087
Cr	0.064	0.092	0.090	0.097	Cr ₂ O ₃	0.094	0.135	0.131	0.142
Fe	21.239	24.251	24.105	23.963	Fe ₂ O ₃	30.366	34.673	34.464	34.260
Ga	0.003	0.004	0.004	0.004	Ga ₂ O ₃	0.004	0.005	0.006	0.006
K	0.509	0.431	0.454	0.514	K ₂ O	0.613	0.519	0.546	0.619
Mg	0.158	0.212	0.204	0.226	MgO	0.262	0.352	0.338	0.374
Mn	0.016	0.015	0.015	0.017	MnO ₂	0.025	0.023	0.023	0.026
Na	4.291	5.415	5.342	5.465	Na ₂ O	5.785	7.299	7.201	7.367
Nb	0.008	0.008	0.008	0.009	Nb ₂ O ₅	0.011	0.011	0.012	0.012
Ni	0.049	0.057	0.050	0.058	NiO	0.062	0.073	0.064	0.073
O	39.096	39.438	39.470	39.415		-	-	-	-
P	0.016	0.027	0.027	0.020	P ₂ O ₅	0.036	0.062	0.062	0.046
Pb	0.127	0.014	0.017	0.013	PbO	0.137	0.015	0.019	0.014
Rb	0.003	0.002	0.002	0.002	Rb	0.003	0.002	0.002	0.002
S	0.225	0.215	0.224	0.196	SO ₃	0.561	0.538	0.559	0.489
Sc	0.010	-	-	-	Sc	0.010	-	-	-
Si	7.283	8.861	8.866	8.857	SiO ₂	15.580	18.956	18.967	18.949
Sr	0.004	0.005	0.004	0.004	SrO	0.005	0.006	0.005	0.005
Th	0.008	-	0.008	0.009	ThO ₂	0.009	-	0.009	0.010
Ti	2.767	3.090	3.073	3.091	TiO ₂	4.616	5.155	5.126	5.155
Y	0.013	0.018	0.017	0.017	Y ₂ O ₃	0.017	0.022	0.021	0.022
Zn	0.006	0.007	0.006	0.006	ZnO	0.007	0.008	0.007	0.008
Zr	0.088	0.100	0.099	0.099	ZrO ₂	0.119	0.135	0.134	0.134

3.3.4.2 Kırmızı Çamurlarda Mineralojik (XRD) Analiz

Ham kırmızı çamurun, mineralojik analizi sonucu; hematit (Fe₂O₃), sodalit (hidroksikankrinit) (Na₈Al₆Si₆O₂₄(OH)₂.2H₂O), kalsit (CaCO₃), gipsit (Al(OH)₃), ulvospinel (Fe₂TiO₄), rutil (TiO₂) ve kristobalit (SiO₂) bileşikler tespit edilmiştir.

600°C, 700°C ve 800°C sıcaklıklarında kalsine edilmiş kırmızı çamur içerisinde; hematit, sodalit, rutil, kalsit ve kristobalit fazları belirlenmiş, 800°C’de kalsit fazının parçalanması sonucu kalsiyum oksit fazı tespit edilmiştir.

Bileşiklerin yaklaşık oranları, Çizelge 3. 7’de verilmiş olan pik şiddetlerinden ve 3.1 numaralı eşitlikten yararlanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda ICDD (Uluslararası Difraksiyon Veri Merkezi) tarafından yayınlanan PDF (toz difraksiyon kart numarası) kartları kullanılmıştır. Örneğin; Hematit bileşiğine ait 33-664 numaralı PDF kartında 100’lük pikin şiddeti (I), 33.1806 yansıma açısında (2θ), atomlararası mesafe değeri (d) 2.700 Å’dur. Kırmızı çamura ait X-ışını difraksiyon paterninde aynı “d” değerindeki pik şiddeti kullanılarak 3.1 numaralı eşitliğe göre hesaplama yapılmıştır. Buna göre;

I_1 = Numunenin çekilen XRD paterninde, hematit fazının PDF kartına göre 100’lük pikinin yer aldığı düzlemlerarası mesafedeki pik şiddeti,

I_2 = Numunenin çekilen XRD paterninde, sodalit fazının PDF kartına göre 100’lük pikinin yer aldığı düzlemlerarası mesafedeki pik şiddeti,

I_3 = Numunenin çekilen XRD paterninde, kalsit fazının PDF kartına göre 100’lük pikinin yer aldığı düzlemlerarası mesafedeki pik şiddeti,

I_4 = Numunenin çekilen XRD paterninde, gibsit fazının PDF kartına göre 100’lük pikinin yer aldığı düzlemlerarası mesafedeki pik şiddeti,

I_5 = Numunenin çekilen XRD paterninde, ulvospinel fazının PDF kartına göre 100’lük pikinin yer aldığı düzlemlerarası mesafedeki pik şiddeti,

I_6 = Numunenin çekilen XRD paterninde, rutil fazının PDF kartına göre 100’lük pikinin yer aldığı düzlemlerarası mesafedeki pik şiddeti,

I_7 = Numunenin çekilen XRD paterninde, kristobalit fazının PDF kartına göre 100’lük pikinin yer aldığı düzlemlerarası mesafedeki pik şiddeti.

Çamura, kırmızı renk özelliğini veren hematit fazının yaklaşık ağırlıkça miktarı %55.87 olarak belirlenmiştir.

Örneğin;

Ham kırmızı çamur içerisinde yer alan 7 faz içerisinde, 1. faz olan hematit için;

$$\% \text{ Hematit} = \frac{I_1}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7} \times 100 \quad (3.1)$$

$$= \frac{100}{179} \times 100 = \%55.87$$

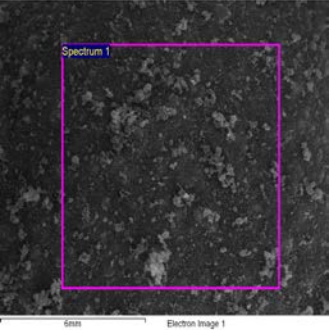
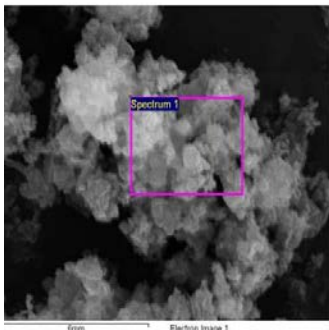
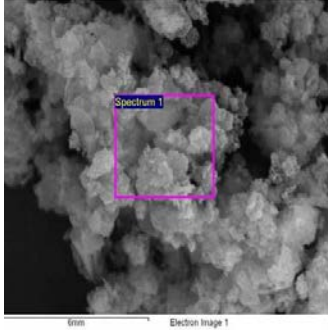
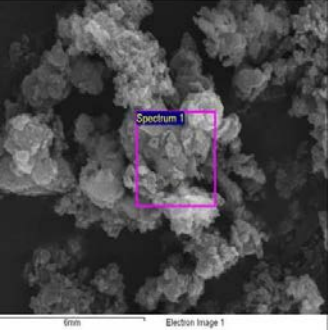
Çizelge 3. 7 Kırmızı çamurlar içerisinde yer alan bileşiklerin yaklaşık ağırlıkça miktarları (%)

Bileşikler	PDF No	d (Å)	Ağırlıkça (%)			
			H	K6	K7	K8
1. Hematit- Fe ₂ O ₃	33-664	2.700	55.87	48.08	49.26	53.19
2. Sodalit- Na ₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ (OH) ₂ .2H ₂ O	46-1457	3.260	9.50	34.13	33.00	29.26
3. Kalsit- CaCO ₃	5-586	3.035	7.82	11.06	12.32	-
4. Riversideite 9A- Ca ₅ H ₂ O ₁₈ Si ₆	29-329	3.014	-	-	-	10.64
5. Gibsit- Al(OH) ₃	33-18	4.848	6.70	-	-	-
6. Ulvospinel- Fe ₂ TiO ₄	34-177	2.573	11.17	-	-	-
7. Rutil- TiO ₂	21-1276	3.247	5.03	3.85	3.94	3.19
8. Kristobalit- SiO ₂	39-1425	4.039	3.91	2.88	1.48	1.60
9. Kalsiyum oksit- CaO	37-1497	2.405	-	-	-	2.12

3.3.4.3 Kırmızı Çamurların Mikroyapı Karakterizasyonu (SEM) Analizi

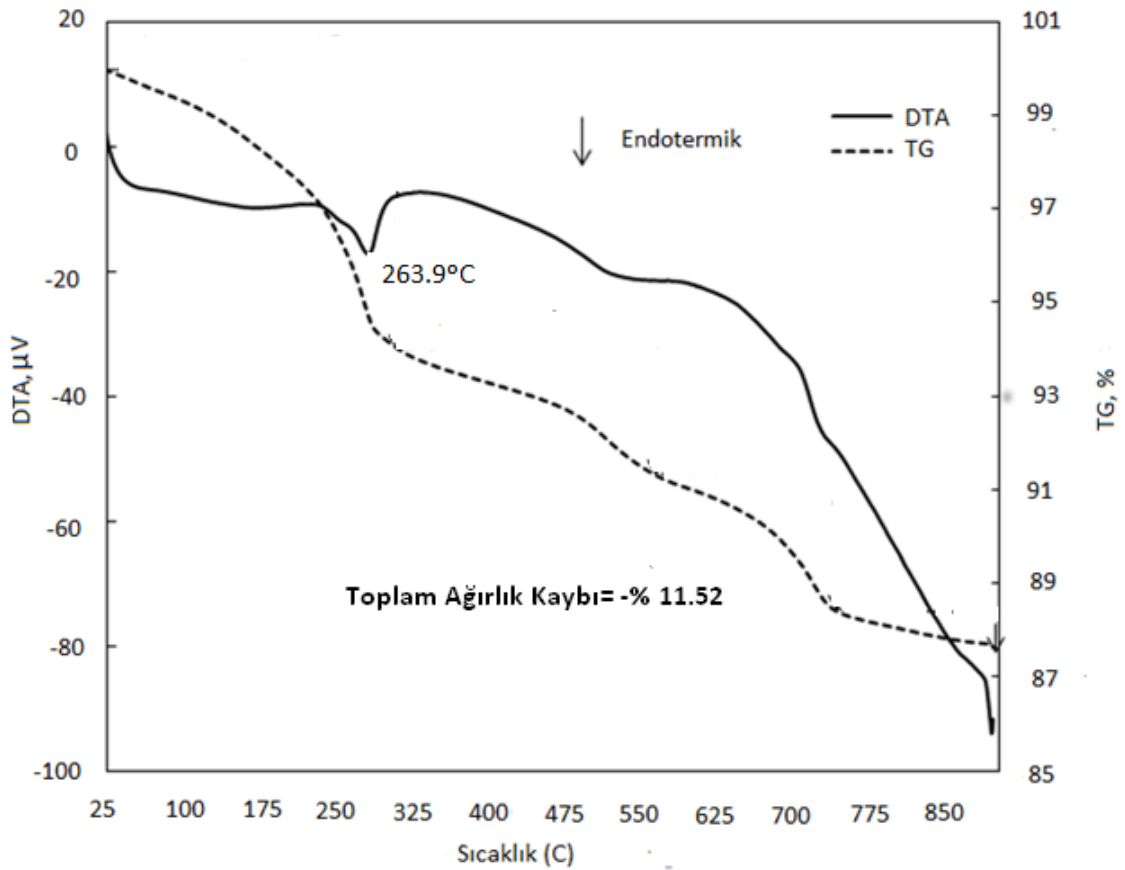
Kalsine kırmızı çamurların, 20000X büyütmedeki EDX analiz sonuçları Çizelge 3.8’de, SEM mikroyapı görüntüleri Şekil A. 6’da verilmiştir. Kırmızı çamurların mikroyapıdaki aglomerasyonlarının farklı tane boyutuna ve morfolojilere sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 3. 8 Kırmızı çamurların EDX analiz sonuçları (20000X büyütme)

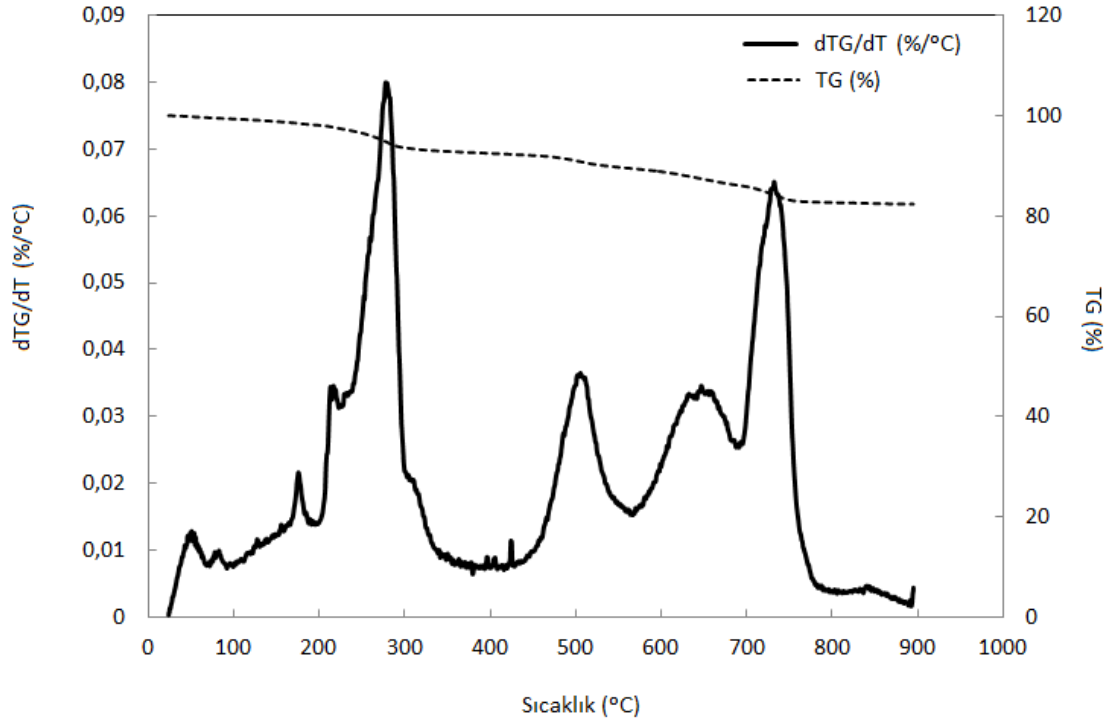
H		K6		K7		K8	
							
Element	%Ağırlıkça	Element	%Ağırlıkça	Element	%Ağırlıkça	Element	%Ağırlıkça
O	42.00	O	52.90	O	51.86	O	49.39
Na	8.33	Na	9.64	Na	11.26	Na	10.25
Al	10.18	Al	9.67	Al	10.58	Al	9.19
Si	9.05	Si	8.01	Si	9.53	Si	7.50
K	0.65	K	0.55	K	0.44	K	0.59
Ca	1.83	Ca	0.74	Ca	0.45	Ca	-
Ti	2.70	Ti	1.65	Ti	1.31	Ti	1.80
Fe	25.26	Fe	16.84	Fe	14.57	Fe	21.28
Toplam	100.00	Toplam	100.00	Toplam	100.00	Toplam	100.00

3.3.4.4 Kırmızı Çamurun DTA/TG Cihazı İle Termal Davranışının İncelenmesi

Ham kırmızı çamurun DTA/TG analizleri, 100 ml/dk akış debisine sahip kuru hava atmosferinde 10°C/dk ısıtma hızı, 25-900°C sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiştir. 25-900°C aralığında toplam ağırlık kaybı %11.52 olarak belirlenmiştir. Literatüre göre, 263.9°C'de belirlenmiş olan endotermik pikin gipsitin parçalanmasına ait olduğu düşünülmüş ve ağırlık kaybı %5.5 olarak belirlenmiştir (Şekil 3. 1) [48]. Ham kırmızı çamurun dTG/dT eğrisi incelendiğinde, en fazla ağırlık kaybı yaklaşık 200-300°C sıcaklık aralığında görülmektedir.



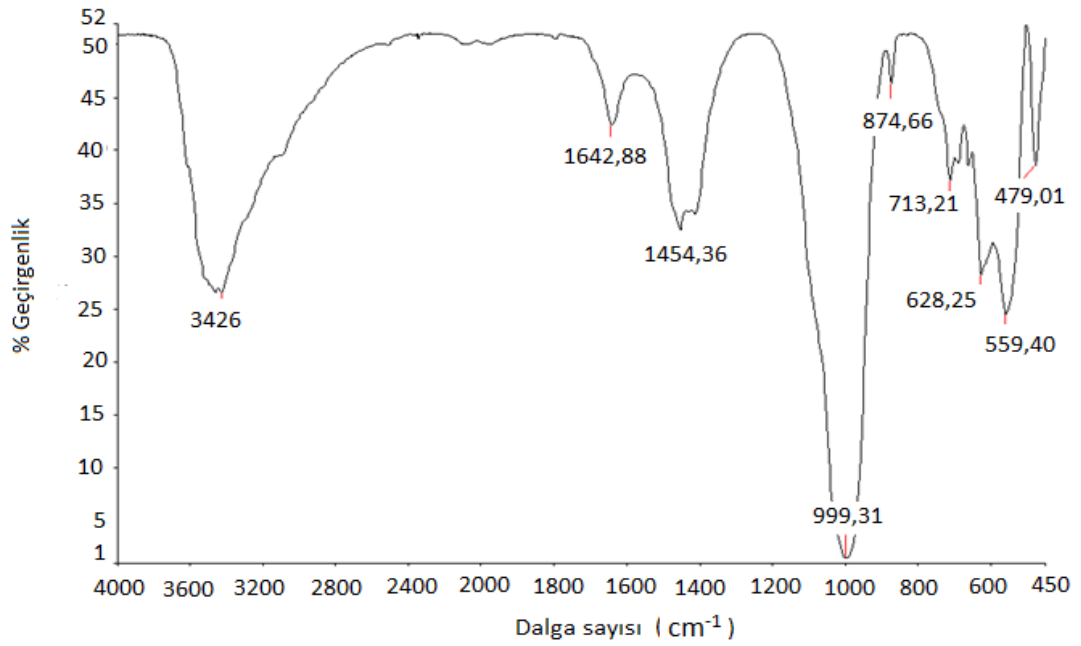
Şekil 3. 1 Ham kırmızı çamurun DTA/TG eğrisi



Şekil 3. 2 Ham kırmızı çamurun TG ve dTG/dT eğrisi

3.3.4.5 Kırmızı Çamurun FTIR Analizi

Ham kırmızı çamurun FTIR spektrumu Şekil 3. 3’de verilmiş, spektrumunda gözlenen bandlar literatürde yer alan bilgilerden yararlanılarak belirlenmiştir (Çizelge 3. 9) [49].



Şekil 3. 3 Ham kırmızı çamurun FTIR spektrumu

Çizelge 3. 9 FTIR spektrumunda gözlenen bandlar ve yorumları

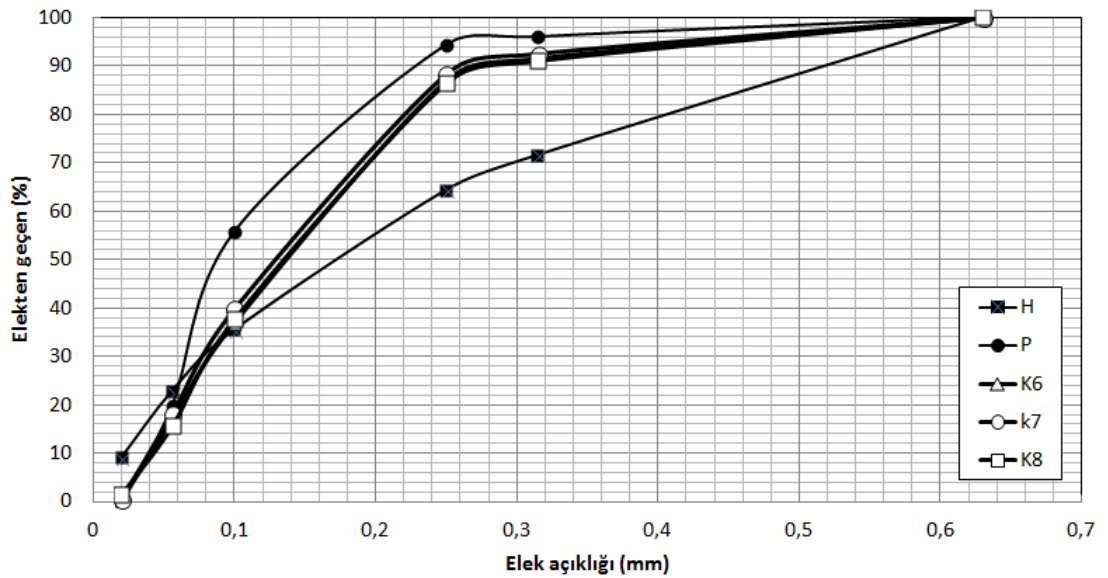
Frekans	Yorum
3426 cm^{-1}	Gibsite ait hidroksil bağları
1642.88 cm^{-1}	Serbest H_2O
1454.36 cm^{-1}	Kalsit içerisinde CaO bileşiği
999.31 cm^{-1}	Si-O
874.66 cm^{-1} ve 713.21 cm^{-1} , 628.25 cm^{-1}	$\text{Al}^{+3}-\text{O}^{-2}$
559.40 ve 479.01 cm^{-1}	$\text{Fe}^{+3}-\text{O}^{-2}$

Bu verilere göre; FTIR analizi sonucu belirlenmiş olan bağların, ham kırmızı çamurun mineralojik analizi sonucu belirlenmiş olan bileşikler ile örtüştüğü görülmüştür.

3.3.5 Kırmızı Çamurların Fiziksel Özellikleri

3.3.5.1 Kırmızı Çamurların Elek Analizleri

Kırmızı çamurların elek analizleri, 15 dakika sarsma süresi ve 80 amplitude koşullarında 20 μm , 56 μm , 100 μm , 250 μm , 315 μm ve 630 μm 'lik elekler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3. 4).



Şekil 3. 4 Kırmızı çamurların granülometri eğrileri

3.3.5.2 Kırmızı Çamurların BET Yüzey Alanı, Tane Boyut ve Özgöl Ağırlıkları

Kırmızı çamurların BET yüzey alanı, tane boyut ve özgöl ağırlıkları Çizelge 3. 10'da verilmiştir. Kalsinasyon sıcaklığı arttıkça, BET yüzey alanı değerlerinin azaldığı, ortalama tane boyut değerlerindeki artışa bağlı olarak özgöl ağırlık değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 3. 10 Kırmızı çamurların BET yüzey alanı, tane boyut ve özgöl ağırlık değerleri

Kırmızı Çamur	BET Yüzey Alanı (m ² /g)	Tane Boyut, d ₅₀ (μm)	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)
H	28.38	2.90	3.04
P	24.68	4.28	2.86
K6	35.01	2.67	3.10
K7	31.31	2.75	3.07
K8	24.62	3.46	2.84

Kırmızı çamurların fiziksel özellikleri, Şekil A. 6'daki SEM görüntülerini doğrulamakta; pulverizasyon işlem sonucunda kırmızı çamurda bir miktar topaklanma olduğu anlaşılmaktadır.

3.3.5.3 Kırmızı Çamurların Renk Ölçümü

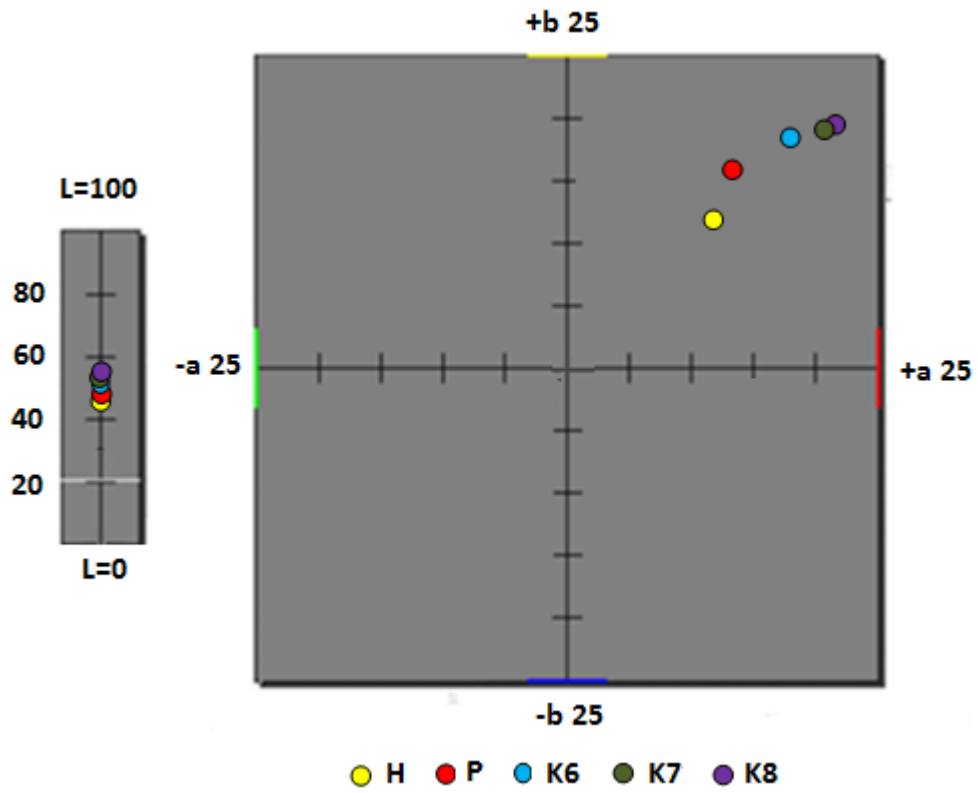
Kırmızı çamurların renk özelliklerinin belirlenmesinde çeşitli alanlar için standart olarak kabul edilmiş CIE L*a*b* renk uzay sistemi kullanılmıştır. CIE L*a*b* renk uzay sistemine göre; a* ve b* cismin rengini, L*, rengin açıklık/koyuluğunu ifade etmekte, her üçü de 0 ile 100 arasında değerler ile gösterilmektedir. L değeri 100 için beyaz, 0 için siyah rengi göstermektedir. a* değerinin; pozitif ekseninde olması kırmızı rengi, negatif ekseninde olması ise yeşil rengi ifade etmektedir. b* değerinin; pozitif ekseninde 0 olması sarı rengi, negatif ekseninde olması ise mavi rengi ifade etmektedir.

Kırmızı çamurların CIE L*a*b* verileri Çizelge 3. 11 ve koordinat ekseninde gösterimi ise Şekil 3. 5'de verilmiştir. Çizelge 3. 11'de yer alan değerlere göre, kırmızı çamurların a* ve b* değerleri pozitif olduğundan koordinat ekseninde kırmızı ve sarı renk bölgesinde, L* değerleri 0 ile 100 arasında ortada kaldığından orta koyulukta denebilir. Kalsine kırmızı çamurların a* ve b* değerlerine göre, ham ve pulverize kırmızı çamura

göre daha kırmızı ve sarı renge sahip olduğu, en belirgin kırmızı renge ise 700°C’de kalsinasyon sonrası ulaşılmıştır.

Çizelge 3. 11 Kırmızı çamurların CIE L*a*b* verileri

Çamur	L*	a*	b*	Renk Özelliği
H	46.06	11.97	12.17	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
P	47.78	13.57	15.41	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
K6	48.90	19.18	17.07	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
K7	49.88	20.67	18.24	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
K8	49.71	20.61	18.09	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta



Şekil 3. 5 Kırmızı çamurların CIE L*a*b* renk özelliklerinin koordinat ekseninde gösterimi

3.3.5.4 Kırmızı Çamurun Radyoaktivite Ölçümü

Ham kırmızı çamurun radyoaktif dozaj ve radyolojik kontrolleri, Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi’nde (ÇNAEM) gama spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Gama spektrometresi radyoaktivite ölçüm sonuçlarına göre **“Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş’den temin edilen ham kırmızı çamur içerisindeki radyoaktif element miktarı güvenli limitler içerisindedir”**.

3.3.6 Kırmızı Çamurun Pozolanik Aktivitesinin Araştırılması

Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda; pozolan özellik göstermesi beklenen bir malzemede ASTM C 618-72 standardına göre; $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ koşulu gerçekleşmeli, CaO miktarı da $\%4$ 'ü geçmemelidir. Ham kırmızı çamurun Çizelge 3. 6'da verilen elementel analiz sonuçlarına göre; CaO $\%2.71$ ile sınır değerini sağlamış, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı $\%67.03$ ile sınır değerini sağlamamıştır.

3.3.7 Kırmızı Çamurun Alkali-Silika Reaksiyonu Yönünden Değerlendirilmesi

Alkali-silika reaksiyonu (ASR); reaktif silika formları içeren agregaların çimentodan kaynaklanan alkali oksitlerle reaksiyon oluşturmaları ve bunun sonucunda genleşebilme yeteneğine sahip bir jelin meydana gelmesidir. Bu jel, su emdikçe hacmi daha çok artmakta ve betonda çatlamalara neden olmaktadır. Genleşmeye neden olan ASR'nin oluşabilmesi için agregada reaktif silika formları ile çimentoda alkali oksitleri ($\text{Na}_2\text{O} + 0.66 \text{K}_2\text{O} > \%0.6$) eşdeğerinin bulunması ve ortamın nemli olması gerekmektedir.

ASR basitçe 2 aşamada gösterilmektedir:

1-Alkali + reaktif silika → Alkali-silika jel ürünleri

2-Alkali silika jeli + nem → Genleşme

Ham kırmızı çamurun pozolanik olmadığı bu nedenle çimento yerine ikame olamayacağı ancak ince agrega yerine kullanılabileceği düşünülmüştür. Ham kırmızı çamurun ince agrega olarak kullanıldığında alkali-silika reaksiyonuna neden olup olamayacağı ASTM C 1260-07 standardına göre hızlandırılmış harç numune deneyleri ile belirlenmiştir [51].

Çizelge 3. 12 14. günde harç numunelerinin boy değişimi için sınır değerler

	Boy Değişimi (%)		
	< 0.1	0.1-0.2	> 0.2
ASR Olasılığı	Yok	Olabilir	Beklenir

CEM I 42.5 R Portland çimentosu yerine ikame edilerek üretilen numuneler saf su içerisine konularak $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ sabit ısıdaki kür tankında 24 saat bekletildikten sonra ilk boy ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra numuneler sabit sıcaklıktaki 1 N NaOH çözeltisi bulunan termostatlı çözelti tankına yerleştirilmiş ve deney boyunca ölçüm yapılacağı güne kadar tutulmuştur. Hızlandırılmış harç numune yöntemine göre numunelerin 3., 7. ve 14. günde boy değişim değerleri ölçülmüştür. Birim boy değişim yüzdelerinin belirlenmesinde 3.2 numaralı eşitlikten yararlanılmıştır. Bağintıda; %L, boy değişim yüzdesi, ΔL (mm), örneğin boy değişimi, L (mm), örneğin ilk uzunluğu'dur.

$$\%L = \left(\frac{\Delta L}{L} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Çizelge 3. 13 Harç numunelerinin 3., 7. ve 14. günde ortalama boy değişim değerleri

Numune Kodu	Boyca Uzama Yüzdesi (%)		
	3. gün	7. gün	14. gün
C	0.002	0.003	0.006
H-10	0.001	0.003	0.005

Harç numunelerinin 14. günde boyca uzama yüzdeleri, Çizelge 3. 12'de verilen sınır değerler ile kıyaslandığında, kırmızı çamurun alkali-silika reaksiyonuna neden olmayacağı belirlenmiştir.

3.3.8 Kırmızı Çamurun Çevreye Uyumunun Araştırılması

Literatürde kırmızı çamurun kostik içermesi nedeniyle tehlikeli olduğuna dair bilgiler mevcut olsa da diğer atıklarda olduğu gibi kırmızı çamurun, kullanıldığı ülkenin yönetmeliklerine göre değerlendirmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş olan Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş'den temin edilen kırmızı çamurun çevreye uyumu Türkiye'de atıkların değerlendirilmesinde 05/07/2008 tarih ve 26927 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan [50] "Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmeliği (AYGEİY)" çerçevesinde araştırılmıştır. Bu yönetmelikte; atıkların

oluşumlarından bertarafına kadar, çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetilmesi amaçlanmıştır.

Kırmızı çamur, AYGEİY EK-IV de verilen Atık Listesinde (01) kodlu “Madenlerin aranması, çıkarılması, işletilmesi, fiziki ve kimyasal işleme tabi tutulması sırasında ortaya çıkan atıklar” - (01 03) “Metalik minerallerin fiziki ve kimyasal olarak işlenmesinden kaynaklanan atıklar” grubuna dahil olup, bu tür atıklar “Atık Listesi” alt sınıflarında (01 03 09) “01 03 07 dışındaki alüminyum oksit üretiminden çıkan kırmızı çamur” olarak kodlanmıştır.

Ham kırmızı çamurun yarı kantitatif (XRF) analizi sonucu belirlenen ve Çizelge 3. 6’da verilen elementler AYGEİY EK-IIIA maddesine göre tehlikeli olarak nitelendirilmektedir. Ancak bu elementlerin tespit edilen miktarları, AYGEİY EK-IIIB maddesinde belirtilen eşik konsantrasyonların oldukça altındadır.

Çizelge 3. 15’ de “Alevlenebilir (F)” olarak nitelendirilen elementler için AYGEİY EK-IIIB’ de belirlenmiş bir eşik konsantrasyonu mevcut değildir. Ancak AYGEİY EK-IIIB’ de kolay alevlenebilir nitelikteki maddeler için “Parlama Noktası” sınır değeri tanımlanmış ve “Parlama Noktası” 55°C değerinden düşük maddeler tehlikeli atık olarak nitelendirilmektedir. Çizelge 3. 15’ de “Alevlenebilir (F)” olarak nitelendirilen ve AYGEİY EK-IIIB ‘de eşik konsantrasyonu belirlenmemiş Magnezyum (Mg), Mangan (Mn), Fosfor (P), Kükürt (S), Skandiyum (Sc), Yttrium (Y), Çinko (Zn) ve Zirkonyum (Zr) elementlerinin literatürden belirlenmiş parlama noktaları, AYGEİY EK-IIIB’de belirlenmiş parlama noktası sınır (Parlama noktası $\leq 55^{\circ}\text{C}$) değerinin çok üzerindedir.

“Kırmızı çamur” olarak kodlanan atık numunesinde varlığı belirlenen Krom (Cr) elementi için literatürden tespit edilen risk faktörü kombinasyonuna göre (R40) AYGEİY EK-IIIB maddesinde belirtilen sınır konsantrasyon ibaresi “ R40’a göre kalıtsal değişikliklere yol açıcı olarak sınıflandırılan Kategori 3 maddesindeki konsantrasyonun $\geq 1\%$ de olması” olarak verilmiştir. Söz konusu atık içindeki Krom (Cr) konsantrasyonu ağırlıkça %0.075 olarak belirlenmiştir ve AYGEİY EK-IIIB maddesinde belirtilen sınır konsantrasyonu (%1) değerinden düşüktür.

“Kırmızı çamur” olarak tanımlanmış atık numunesinin inorganik faz içeriğinde XRD Spektrometresi ile varlığı belirlenen Hematit (Fe_2O_3), Sodalit ($\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,

Kalsit (CaCO_3), Gibsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Ulvospinel (Fe_2TiO_4), Rutil (TiO_2), Kristobalit (SiO_2) için literatürden tespit edilen risk faktörleri ve kombinasyonlarına göre (R37, R37/38, R36/37/38) AYGEİY EK-IIIB maddesinde belirtilen sınır konsantrasyon ibaresi “R36, R37 ve R38’e göre tahriş edici olarak sınıflandırılan bir veya daha fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %20 olması” olarak verilmiştir. Söz konusu atık numunesi içindeki Hematit (Fe_2O_3), Sodalit ($\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Kalsit (CaCO_3), Gibsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Ulvospinel (Fe_2TiO_4), Rutil (TiO_2), Kristobalit (SiO_2) toplam ağırlıkça %94.5’dur ve AYGEİY EK-IIIB maddesinde belirtilen sınır konsantrasyon (%20) değerinden (%20) yüksektir.

Söz konusu örneğin 105°C sıcaklıkta kurutulması sonucu elde edilen katı maddesinde soxlet ekstraksiyonu ile gerçekleştirilen işlemler sonucunda; ağırlıkça %0.1 ekstrakt içerdiği tespit edilmiştir. Elde edilen ekstraktın, Fourier Transform Infrared (FTIR) Spektrofotometre ile gerçekleştirilen spektroskopik inceleme sonucunda, parafinik mineral yağ esaslı olduğu tespit edilmiştir.

Parafinik mineral yağın risk faktörleri ve kombinasyonları ile ilgili olarak yapılan literatür araştırmasında herhangi bir bilgiye ulaşılamamış, bu nedenle söz konusu atığın organik fazını oluşturan parafinik mineral yağ için mineral yağ esaslı olan Nujol için literatürde verilen risk faktörleri ve kombinasyonları kullanılmıştır. Nujol için literatürde verilen risk faktörleri ve kombinasyonlarına göre (R:36 R:37 R:38) 05/07/2008 tarih ve 26927 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan “Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik” EK-IIIB’de belirtilen sınır konsantrasyon ibaresi “R36, R37 ve R38’e göre tahriş edici olarak sınıflandırılan bir veya daha fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %20 olması” olarak verilmiştir. Söz konusu atık numunesi içindeki parafinik mineral yağ (%0.1) AYGEİY EK-IIIB maddesinde belirtilen sınır konsantrasyon değerinden (%20) düşüktür.

“Kırmızı Çamur” olarak tanımlanmış atık numunesinde risk faktörü ve kombinasyonları R36, R37, R38 olan element ve bileşiklerin toplam miktarı (ağırlıkça %96.3) AYGEİY EK-IIIB maddesinde belirtilen sınır konsantrasyonu değerinden (%20) yüksektir. Söz konusu numune, ağırlıkça %3.7 su içermektedir. Bu çalışmada kullanılan ve Seydişehir Eti alüminyum A.Ş.’den temin edilen ham kırmızı çamurun AYGEİY kriterlerine göre Çizelge 3. 15 ve Çizelge 3. 16’da verilen özellikleri incelenmiş, kırmızı çamurun

içerisindeki inorganik faz miktarının limit değeri aşmasından dolayı, kırmızı çamur **“tehlikeli atık”** olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3. 14 Ham kırmızı çamur içerisinde yer alan mineralojik fazların AYGEİY EK-IIIB yönetmeliğine göre eşik konsantrasyonları

Bileşik	Tehlike İşareti	Risk Faktörü	Risk Faktörü İle İlgili Açıklama	AYGEİY EK-IIIB'de Belirtilen Eşik Konsantrasyonu	Yöntem
Hematit-Fe ₂ O ₃	Xi: Tahriş edici madde	R33-36/37/38	R33: Toplam etkilerin tehlikesi. R36/37/38: Gözleri, solunum sistemini ve cildi tahriş edicidir.	Zararlı olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun ≥ %25 olması, R36, R37, R38'e göre tahriş edici olarak sınıflandırılan bir veya daha fazla maddedeki toplam konsantrasyonun ≥%20 olması	XRD
Sodalit- Na ₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ (OH) ₂ .2H ₂ O	Xi: Tahriş edici madde	Aluminyum silikat: R20, R36/37/38 Sodyum silikat: R22, R34, R37	R20: Solunması halinde sağlığa zararlıdır R36/37/38: Gözleri, solunum sistemini ve cildi tahriş edicidir. R22: Yutulması halinde sağlığa zararlıdır. R34: Yanıklara neden olur. R37: Solunum sistemini tahriş eder.		
Kalsit-CaCO ₃	Xi: Tahriş edici madde	R37/38-41	R37/38: Solunum sistemini ve cildi tahriş edicidir. R41: Ciddi göz hasarları tehlikesi		
Aluminyum hidroksit- Al(OH) ₃	Xi: Tahriş edici madde	R36/37/38	R36/37/38: Gözleri, solunum sistemini ve cildi tahriş edicidir.		
Ulvospinel ⁺ - Fe ₂ TiO ₄	F: Alevlenebilir Xn: Zararlı madde Xi: Tahriş edici madde	Demir (II) oksit R11 Titanyum dioksit R40, R20, R36/37/38	R11: Kolay alevlenebilir. R40: Kanserojen etki şüphesi-Yetersiz veri R20: Solunması halinde sağlığa zararlıdır. R36/37/38: Gözleri, solunum sistemini ve cildi tahriş edicidir.		
Titanyum dioksit- TiO ₂	Xn: Zararlı madde Xi: Tahriş edici madde	R40 R20 R36/37/38	R40: Kanserojen etki şüphesi-Yetersiz veri R20: Solunması halinde sağlığa zararlıdır. R36/37/38: Gözleri, solunum sistemini ve cildi tahriş edicidir.		
Silisyum Dioksit-SiO ₂	Xi: Tahriş edici madde Xn: Zararlı madde	R48/20 R20 R 37	R48/20: Zararlı- Uzun süreli solunması halinde sağlığa ciddi hasar tehlikesi R20: Solunması halinde sağlığa zararlıdır R37: Solunum sistemini tahriş eder.		

+: Sodalit (Na₈Al₆Si₆O₂₄(OH)₂.2H₂O) için gerçekleştirilen literatür taramaları sonucu, risk faktörleri ve kombinasyonları ile ilgili bir bilgiye ulaşılamamıştır. Bu nedenle, zeolit yapısında olan Sodalit için AYGEİY EK-IIIB irdelemesinde, sodyum silikat ve aluminyum silikat için literatürden tespit edilen risk faktörleri kullanılmıştır. Ulvospinel (Fe₂TiO₄) için gerçekleştirilen literatür taramaları sonucu, risk faktörleri ve kombinasyonları ile ilgili bir bilgiye ulaşılamamıştır. Bu nedenle, konu ile ilgili AYGEİY EK-IIIB irdelemesinde, demir (II) oksit (FeO) ve titanyum dioksit (TiO₂) için literatürden tespit edilen risk faktörleri kullanılmıştır.

Çizelge 3. 15 Ham kırmızı çamur içerisinde yer alan elementlerin AYGEİY EK-IIIIB yönetmeliğine göre eşik konsantrasyonları

Element	Miktar (%Ağ.)	Tehlike İşareti	Risk Faktörü	Risk Faktörü ile İlgili Açıklama	AYGEİY EK-IIIIB Eşik Konsantrasyonu	Yöntem
Arsenik (As)	0.013	T: Zehirli madde	R23/25-50/53	R23/25: Solunduğunda ve yutulduğunda toksiktir. R50/53: Sudaki organizmalar için çok toksik, su ortamında uzun süreli olumsuz etkilere neden olabilir.	Zehirli olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun ≥ 3 olması R40'a göre kalıtsal değişikliklere yol açıcı olarak sınıflandırılan Kategori 3 maddesindeki konsantrasyonun ≥ 1 de olması, R34'e göre aşındırıcı olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun ≥ 5 olması, R10/11/15/16/17/50: Eşik konsantrasyonu belirtilmemiştir.	XRF
Klor (Cl)	0.070	T: Zehirli madde	R45	R45: Kansere yapabilir		
Krom (Cr)	0.064	F: Alevlenebilir Xi: Tahriş edici	R11-40	R11: Kolay alevlenebilir. R40: Kanserojen etki şüphesi-Yetersiz veri		
Galyum (Ga)	0.003	C: Korrozif	R34	R34: Yanıklara neden olur.		
Potasyum (K)	0.509	F: Alevlenebilir C: Korrozif	R14/15-34	R14/15: Su ile kolay alevlenebilir gaz oluşumuna yol açan şiddetli reaksiyon. R34: Yanıklara neden olur.		
Magnezyum (Mg)	0.158	F: Alevlenebilir	R11-15	R11: Kolay alevlenebilir R15: Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır.		
Mangan (Mn)	0.016	F: Alevlenebilir	R11	R11: Kolay alevlenebilir.		
Niyobyum (Nb)	0.008	Xi: Tahriş edici	R36/37/38	R36/37/38: Gözleri, solunum sistemini ve cildi tahriş edicidir.		
Nikel (Ni)	0.049	Xn: Zararlı madde	R40-43	R40: Kanserojen etki şüphesi-Yetersiz veri R43: Cilt ile temasında alerji yapabilir.		
Fosfor (P)	0.016	F: Alevlenebilir N: Çevre için zararlı madde	R11-16-50	R11: Kolay alevlenebilir R16: Oksitleyicilerle karşılaştığında patlayabilir. R50: Sudaki organizmalar için çok toksiktir.		
Rubidyum (Rb)	0.003	F: Alevlenebilir C: Korrozif	R: 14/15-34	R14/15: Su ile kolay alevlenebilir gaz oluşumuna yol açan şiddetli reaksiyon. R34: Yanıklara neden olur.		

Çizelge 3. 15 Ham kırmızı çamur içerisinde yer alan elementlerin AYGEİY EK-IIIB yönetmeliğine göre eşik konsantrasyonları (devam)

Element	Miktar (%ağ.)	Tehlike işareti	Risk faktörü	Risk faktörü ile ilgili açıklama	AYGEİY EK-IIIB eşik konsantrasyonu	Yöntem
Kurşun (Pb)	0.127	T: Toksik, N: Çevre için tehlikeli	R61-20/22-33-50/53-62	R61: Anne karnındaki çocuğa zarar verebilir. R20/22: Solunduğunda ve yutulduğunda sağlığa zararlıdır. R33: Toplam etkilerin tehlikesi R50/53: Sudaki organizmalar için çok toksik, su ortamında uzun süreli olumsuz etkilere neden olabilir. R62: Üremeyi bozucu risk olasılığı	Zehirli olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun ≥ 3 olması R40'a göre kalıtsal değişikliklere yol açıcı olarak sınıflandırılan Kategori 3 maddesindeki konsantrasyonun ≥ 1 de olması, R34'e göre aşındırıcı olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun ≥ 5 olması, R10/11/15/16/17/50: Eşik konsantrasyonu belirtilmemiştir.	XRF
Kükürt (S)	0.225	F: Alevlenebilir Xi: Tahriş edici	R 11	R11: Kolay alevlenebilir.		
Skandiyum (Sc)	0.010	F: Alevlenebilir	R11	R11: Kolay alevlenebilir.		
Stronsiyum (Sr)	0.004	F: Alevlenebilir	R11-14-38	R11: Kolay alevlenebilir. R14: Su ile şiddetli reaksiyon verir R38: Cildi tahriş eder		
Toryum (Th)	0.008	C: Korrozif	R35	R35: Ciddi yanıklara neden olur.		
Yttrium (Y)	0.013	F: Alevlenebilir	R11	R11: Kolay alevlenebilir.		
Çinko (Zn)	0.006	F: Alevlenebilir	R10-15	R10: Alevlenebilir. R15: Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır.		
Zirkonyum (Zr)	0.088	F: Alevlenebilir	R15-17	R15: Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır. R17: Havada kendiliğinden alevlenir.		

Çizelge 3. 16 Ham kırmızı çamurun yağ kimyasal analizi

Analiz	Sonuç	Yöntem	Eşik Değeri
Katı madde miktarı	%96.3	ASTM D 1259	≥ %20
İnorganik madde miktarı	%96.2	ASTM D 1063	≥ %20
İnorganik madde cinsi	1) Hematit- Fe_2O_3	Mineralojik analiz	≥ %20
	2) Sodalit- $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		
	3) Kalsit- CaCO_3		
	4) Gipsit- $\text{Al}(\text{OH})_3$		
	5) Ulvospinel- Fe_2TiO_4		
	6) Rutil- TiO_2		
	7) Kristobalit- SiO_2		
Organik madde miktarı	%0.1	ASTM D 1259	≥ %20
Organik madde cinsi	Mineral yağ	FTIR Spektrofotometre	
Su miktarı	%3.7	ASTM D 95	

3.3.9 Ticari Bayer 130 G Pigmenti Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Ticari Bayer 130 G pigmentinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3. 17’de, verilmiştir. Bayer 130 G ticari pigmentinin a^* kırmızı renk özelliğinin ($a^*=16.92$) ham ($a^*_H=11.97$) ve pulverize kırmızı çamura ($a^*_P=13.57$) göre daha yüksek, kalsine kırmızı çamura göre ($a^*_{K6}=19.18$, $a^*_{K7}=20.67$, $a^*_{K8}=20.61$) ise daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3. 17 Bayer 130 G pigmentine ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Fiziksel Özellikler	Nem		%0.5
	Tane Şekli		Küresel
	Tane Boyut (d_{90})		0.17 μm
	Yoğunluk		5.0
	Elek Altı Kalan (0.045 mm)		%0.06
	Suda Çözünürlük		%0.4
	CIE L*a*b*	L*	43.81
	Renk	a*	16.92
	Özellikleri	b*	10.02
Kimyasal Özellikler	Fe ₂ O ₃		%95-97
	SiO ₂ +Al ₂ O ₃		%4
	Kızdırma Kaybı, 1000°C		%0.6

3.3.10 RILEM Chembureau Standart Kumunun Kimyasal Özellikleri

Harç numuneleri hazırlanmasında kullanılan RILEM Chembureau standart kumuna ait kimyasal özellikleri Çizelge 3. 18’de verilmiştir.

Çizelge 3. 18 RILEM Chembureau standart kumunun kimyasal bileşimi

Element	%Ağırlıkça	Oksit	%Ağırlıkça
Al	3.724	Al₂O₃	7.036
Ba	0.119	BaO	0.133
Ca	0.244	CaO	0.342
Cr	0.011	Cr ₂ O ₃	0.016
Cu	0.004	CuO	0.006
Fe	0.344	Fe ₂ O ₃	0.492
K	2.258	K₂O	2.720
Mg	0.091	MgO	0.152
Mn	0.013	MnO ₂	0.020
Na	0.687	Na ₂ O	0.926
Ni	0.005	NiO	0.006
O	51.152	-	-
P	0.018	P ₂ O ₅	0.041
Rb	0.007	Rb	0.007
S	0.077	SO ₃	0.191
Si	40.858	SiO₂	87.410
Sr	0.012	SrO	0.014
Ti	0.053	TiO ₂	0.088
W	0.020	WO ₂	0.023
Y	0.001	Y ₂ O ₃	0.001
Zn	0.296	ZnO	0.369
Zr	0.006	ZrO ₂	0.008

3.3.11 CEM I 42.5 R Portland Çimentosunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

CEM I 42.5 R Portland çimentosuna ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Çizelge 3. 19 ve Çizelge 3. 20’de verilmiştir.

Çizelge 3. 19 CEM I 42.5 R Portland çimentosunun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler	Özgöl ağırlık (g/cm ³)		3.12
	Blaine incelik (cm ² /g)		3690
	Priz başlangıcı (dakika)		207.5
	Priz sonu (dakika)		262.5
	Su/çimento (%)		30.5
	Genleşme (mm)		0.5
	Tane boyutu (µm)	d ₁₀	1.817
		d ₅₀	15.461
		d ₉₀	48.54
Kimyasal Özellikler	Serbest CaO (%)		1.24
	SO ₃ (%)		3.22
	MgO (%)		1.37
	Çözünmeyen kalıntı (%)		0.73
	Klorür (%)		0.03
	K ₂ O (%)		0.54
	Na ₂ O (%)		0.14
	Kızdırma kaybı (%)		3.19
	C ₃ S (%)		53.95
	C ₂ S (%)		16.80
	C ₃ A (%)		8.47
	Silika modülü		2.27
	Alümina modülü		1.42
Mekanik Özellikler	Basma Dayanımı (2.gün) (MPa)		26.87
	Basma Dayanımı (7.gün) (MPa)		44
	Basma Dayanımı (28.gün) (MPa)		58

Çizelge 3. 20 CEM I 42.5 R Portland çimentosunun kimyasal bileşimi

Element	%Ağırlıkça	Oksit	%Ağırlıkça
Al	2.338	Al₂O₃	4.417
Ba	0.054	BaO	0.060
Ca	47.506	CaO	66.469
Cl	0.056	Cl	0.056
Cr	0.048	Cr ₂ O ₃	0.070
Cu	0.011	CuO	0.014
Fe	2.180	Fe₂O₃	3.116
K	0.616	K ₂ O	0.742
Mg	1.155	MgO	1.916
Mn	0.071	MnO ₂	0.112
Na	0.065	Na ₂ O	0.088
Ni	0.011	NiO	0.014
O	35.432	-	-
P	0.075	P ₂ O ₅	0.171
Rb	0.003	Rb	0.003
S	2.084	SO₃	5.205
Si	7.999	SiO₂	17.113
Sr	0.092	SrO	0.109
Ti	0.161	TiO ₂	0.268
Y	0.002	Y ₂ O ₃	0.002
Zn	0.020	ZnO	0.025
Zr	0.023	ZrO ₂	0.031

3.4 Harç Numuneleri Üretimi

Kırmızı çamurun tane büyüklüğünün, CEM I 42.5 R çimento göre yaklaşık olarak 100 kat daha ince olduğu dikkate alınarak puzolan özelliği olmamasına rağmen ince boşlukları doldurma özelliğinden yararlanmak amacı ile harç numunelerinde çimento yerine ağırlıkça %10 filler olarak ikame edilmesi öngörüldü. Kırmızı çamur içermeyen kontrol harç numunesi ve çimento yerine ağırlıkça %10 ham, pulverize, 600°C, 700°C ve 800°C’lerde kalsine kırmızı çamur içeren harç numuneleri TS EN 196-1 (2009) standardına göre her birinden 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında 3’er adet

numune hazırlanmıştır (Şekil A. 7, Şekil A. 8). Kontrol harç karışımında kullanılan miktarlar Çizelge 3. 21’de verilmiştir. Harç karışımları için su/çimento oranı 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Numuneler, 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, $20\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki su içinde kür edilmiştir.

Çizelge 3. 21 Harç numunelerinde kullanılan malzeme miktarları

Malzemeler	C	H-10	P-10	K6-10	K7-10	K8-10
Çimento	450 g	405 g	405 g	405 g	405 g	405 g
RILEM Chembureau standart kumu	1350 g	1350 g	1350 g	1350 g	1350 g	1350 g
H	-	45 g	-	-	-	-
P	-	-	45 g	-	-	-
K6	-	-	-	45 g	-	-
K7	-	-	-	-	45 g	-
K8	-	-	-	-	-	45 g
Su	225 g	225 g	225 g	225 g	225 g	225 g
Su/çimento	0.5					

3.4.1 Harç Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Hazırlanan harç numuneleri 2., 7., 28. ve 90. günlerde sudan çıkarılarak, TS EN 196-1 (2009) standardına göre eğme ve basma deneyleri yapılmıştır. Eğme ve basma deneyi sonucu elde edilen değerler Çizelge 3. 22’de verilmiştir.

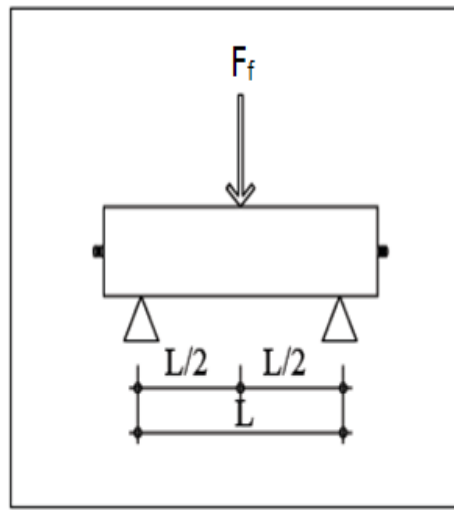
3.4.1.1 Eğme Dayanımı

Eğme dayanımı deneyinde, 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarındaki harç numuneleri Şekil 3. 6’da görülen yan yüzeylerinden biri mesnet silindirleri üzerine gelecek şekilde, boyuna eksenine ise mesnet silindirlerine dik olarak yerleştirilmiştir (Şekil A. 9). Yük, yükleme silindirleri yardımıyla numunenin mesnetlere oturan yüzünün karşıt yüzüne düşey olarak uygulanmış ve 50 ± 10 N/s sabit hızla numune kırılincaya kadar kırma yükü (F_f, N) belirlenmiştir. Eğme dayanımı 3.3 numaralı eşitlikten yararlanılarak hesaplanmış,

ortalama değerler izelge 3. 22’de, eğme dayanımının zamanla değişimi şekil 3. 7’de verilmiştir.

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (3.3)$$

Bağintıda; R_f (N/mm²), eğme dayanımı, F_f (N), harç numuneleri kırıldığı anda uygulanan kuvvet, l (mm), mesnet silindirleri arasındaki uzaklık, b (mm), harç numunesi kare kesitinin kenar uzunluğudur.

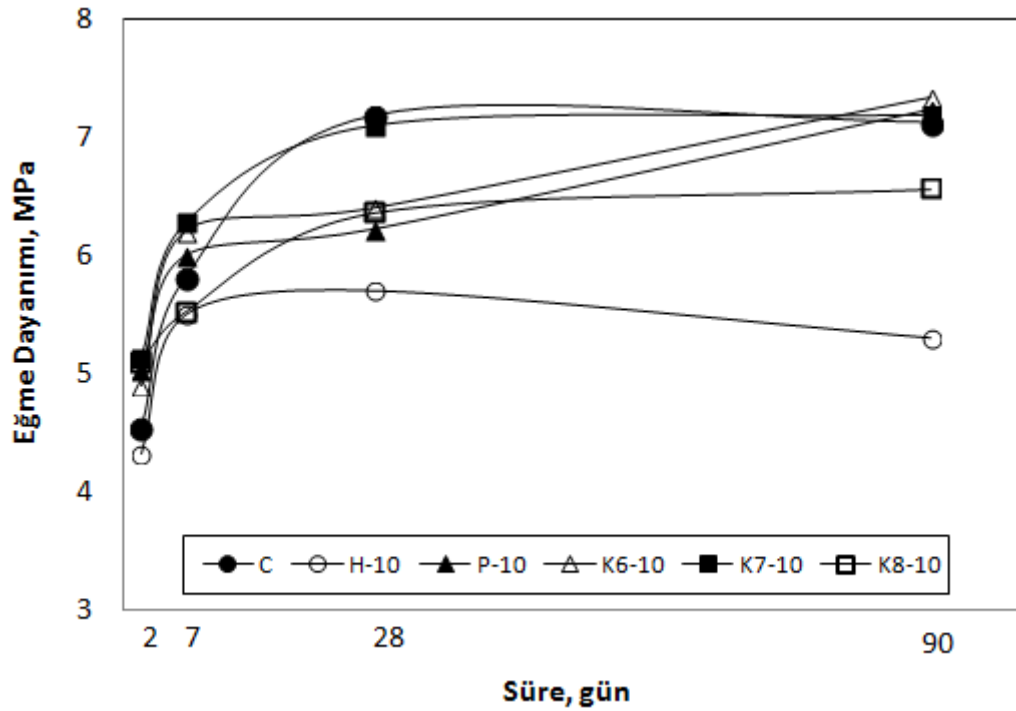


şekil 3. 6 Eğme dayanım deney düzeneği

şekil 3. 7 incelendiğinde, genel olarak imento yerine ağırlıkça %10 kırmızı çamur ikameli harç numuneleri eğme dayanımları hidratasyon süresine bağlı olarak artmıştır. Bunun sebebinin, kırmızı çamurun ince tane yapısının imento içindeki mikro ve jel boşlukları doldurmasından kaynaklandığı söylenebilir. 28. günde harç numuneleri içerisinde en yüksek eğme dayanım değeri (7.11 MPa) 700°C’de kalsine kırmızı çamur içeren harç numunelerinde, en düşük eğme dayanım değeri (5.7 MPa) ise ham kırmızı çamur içeren harç numunelerinde elde edilmiştir.

90. günde harç numuneleri içerisinde en yüksek eğme dayanım değeri (7.34 MPa) 600°C’de kalsine kırmızı çamur içeren harç numunelerinde, en düşük eğme dayanım değeri (5.3 MPa) ise ham kırmızı çamur içeren harç numunelerinde elde edilmiştir.

Kalsinasyon sıcaklığının artışının, mukavemet değerlerinde artışa sebep olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 3. 7 Kırmızı çamur ikameli harç numuneleri 2., 7., 28. ve 90. gün eğme dayanım değişimleri

3.4.1.2 Basma Dayanımı

Eğme deneyinde iki parçaya ayrılmış olan her bir numune için Şekil 3. 8’de görüldüğü gibi basma dayanımları belirlenmiştir. Deneyde, numune kırılıncaya kadar $2400 \pm 200 \text{ N/s}$ sabit hızla yük uygulanmış, kırma yükü belirlenmiş ve yükün kuvvet uygulanan yüzeye oranlanması ile basma dayanımı belirlenmiştir (Şekil A. 10). Basma dayanımı 3.4 numaralı eşitlikten yararlanılarak hesaplanmış, ortalama değerler Çizelge 3. 22’de, basma dayanımının zamanla değişimi Şekil 3. 9’da verilmiştir.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (3.4)$$

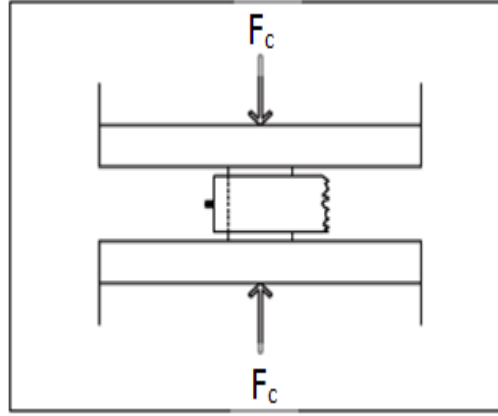
R_c (MPa), basma dayanımı

F_c (N), kırılmadaki en büyük yük

A (mm^2), yük uygulanan alan

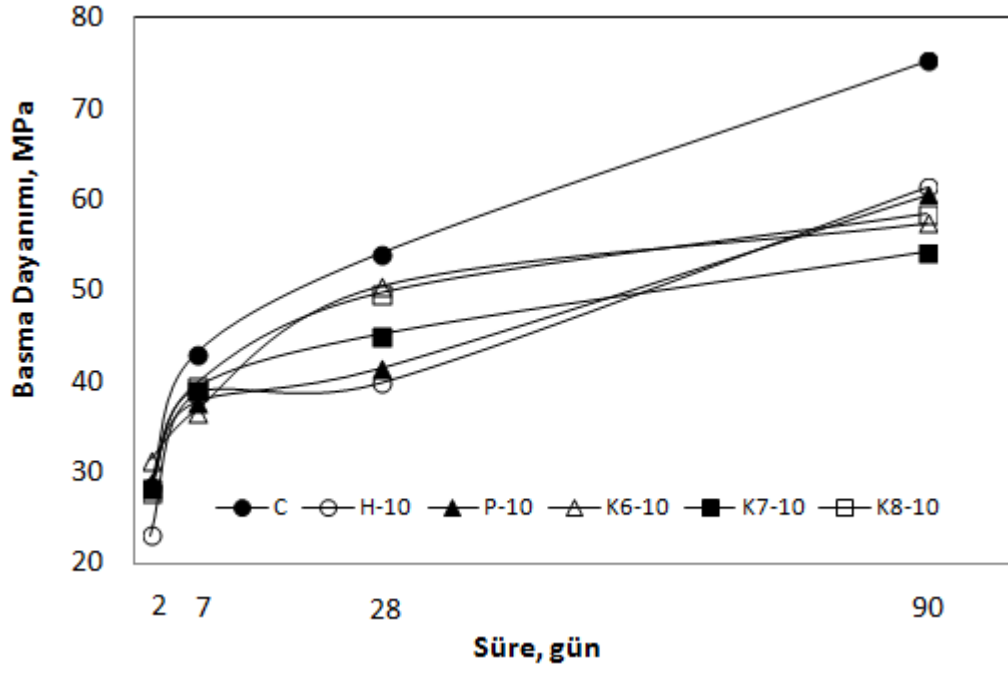
Çizelge 3. 22 Harç numunelerinin eğme ve basma dayanım değerleri

Numune Kodu	Eğme Dayanımı (MPa)				Basma Dayanımı (MPa)			
	2. gün	7. gün	28. gün	90. gün	2. gün	7. gün	28. gün	90. gün
C	4.55	5.83	7.19	7.13	28.50	42.90	54.10	75.30
H-10	4.32	5.50	5.70	5.30	23.10	38.60	39.90	61.40
P-10	5.04	6.01	6.23	7.24	29.00	37.70	41.50	60.60
K6-10	4.91	6.22	6.41	7.34	31.30	36.70	50.50	57.50
K7-10	5.14	6.29	7.11	7.20	28.20	39.20	45.20	54.20
K8-10	5.10	5.53	6.37	6.57	27.80	39.60	49.70	58.40



Şekil 3. 8 Basma dayanım deney düzeneği

Şekil 3. 9 incelendiğinde, genel olarak harç numuneleri basma dayanımları, eğme dayanımları ile benzer davranış göstermiştir. Basma dayanımları hidratasyon süresine bağlı olarak artmıştır. 28. günde harç numuneleri içerisinde en yüksek basma dayanım değeri (50.5 MPa) 600°C’de kalsine kırmızı çamur içeren harç numunelerinde, en düşük basma dayanım değeri (39.9 MPa) ise ham kırmızı çamur içeren harç numunelerinde elde edilmiştir. 90. günde harç numuneleri içerisinde en yüksek basma dayanım değeri (61.4 MPa) ham kırmızı çamur içeren harç numunelerinde, en düşük basma dayanım değeri (54.2 MPa) ise 700°C’de kalsine kırmızı çamur içeren harç numunelerinde elde edilmiştir.



Şekil 3. 9 Kırmızı çamur ikameli harç numuneleri 2., 7., 28. ve 90. gün basma dayanım değişimleri

3.4.2 Harç Numunelerinin Renk Özelliklerinin Belirlenmesi

Harç numunelerinin 2., 7., 28. ve 90. günlerdeki CIE $L^*a^*b^*$ renk özellikleri Çizelge 3.23'de verilmiştir. Kırmızı çamur içermeyen kontrol harç numunelerinin kırmızı renginin beklenildiği gibi çok düşük olduğu tespit edilmiştir. Kırmızı çamur ikameli harç numunelerinde en belirgin kırmızı renge, kırmızı çamurlar içerisinde en belirgin kırmızı renk özelliğinin elde edildiği 700°C'de kalsine kırmızı çamur ikameli harçlarda ulaşılmıştır.

Çizelge 3. 23 Harç numunelerinin CIE L*a*b* verileri

Numune Kodu	Gün	L*	a*	b*	Renk Özelliği
C	2.	71.5	0.1	2.0	Kırmızı-sarı/Açık koyulukta
	7.	72.5	0.1	2.1	Kırmızı-sarı/Açık koyulukta
	28.	67.9	0.1	5.6	Kırmızı-sarı/Açık koyulukta
	90.	83.1	0.6	5.5	Kırmızı-sarı/Açık koyulukta
H-10	2.	35.3	11.2	13.2	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	7.	50.2	12.3	21.4	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	28.	37.6	6.2	14.2	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	90.	58.9	11.4	13.3	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
P-10	2.	38.3	15.2	13.4	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	7.	43.2	16.0	14.6	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	28.	50.6	8.4	16.5	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	90.	58.7	13.7	16.5	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
K6-10	2.	41.3	16.5	17.4	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	7.	52.7	17.1	18.9	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	28.	49.6	14.7	17.0	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	90.	55.6	16.2	13.8	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
K7-10	2.	48.3	17.8	18.9	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	7.	52.9	18.7	20.2	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	28.	56.6	17.7	19.6	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	90.	60.5	20.3	16.0	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
K8-10	2.	60.4	17.7	17.3	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	7.	62.2	18.4	15.0	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	28.	60.3	14.8	16.8	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	90.	56.1	17.1	21.5	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta

3.4.3 Harç Numunelerinin Mineralojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Harç numunelerinin 2., 7., 28. ve 90. gün hidratasyon sürelerinde eğme ve basma deneylerinden sonra aynı gün içerisinde mineralojik analizleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar Çizelge 3. 24’de verilmiştir. Harç numunelerinde kuvars, potasyum feldispat, kalsit, portlandit, larnit, anhidrit, illit, hematit, etrenjit ve kalsiyum sülfat hidrat, sodalit, gibsit, rutil ve ulvospinel fazları belirlenmiştir.

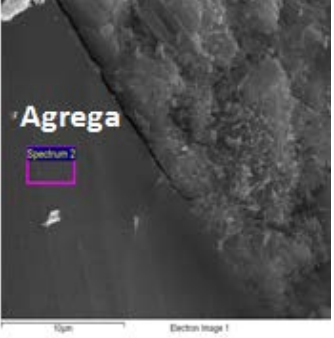
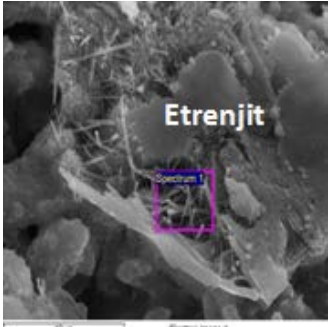
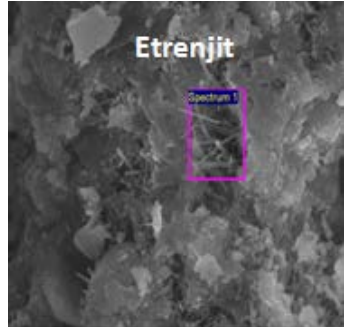
Çizelge 3. 24 Harç numunelerinde yer alan bileşikler

Bileşikler	Formül	PDF No	Çamur				Harç Numuneleri					
			H	K6	K7	K8	C	H-10	P-10	K6-10	K7-10	K8-10
Kuvars	SiO ₂	46-1045					✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kristobalit	SiO ₂	39-1425	✓	✓	✓	✓						
Potasyum feldispat	-	19-926					✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kalsit	CaCO ₃	5-586	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Portlandit	Ca(OH) ₂	4-733					✓	✓	✓	✓	✓	✓
Larnit	Ca ₂ SiO ₄	33-302					✓	✓	✓	✓	✓	✓
Anhidrit	CaSO ₄	37-1496					✓	✓	✓	✓	✓	✓
İllit	K ₁ H ₃ OAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	26-911					✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hematit	Fe ₂ O ₃	33-664	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Etrenjit	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ . 26H ₂ O	41-1451					✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kalsiyum sülfat hidrat	CaSO ₄ .2H ₂ O	33-311					✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kalsiyum alüminyum oksit karbonat hidroksit hidrat	3CaO.Al ₂ O ₃ . 0.5Ca(OH) ₂ .0.5CaCO ₃ . 11.5H ₂ O	41-221						✓	✓	✓	✓	✓
Sodalit	Na ₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ (OH) ₂ .2H ₂	46-1457/41-09	✓	/✓	/✓	/✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gibsit	Al(OH) ₃	33-18	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rutil	TiO ₂	21-1276	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ulvospinel	Fe ₂ TiO ₄	34-177	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓
Riversideite 9A	Ca ₅ H ₂ O ₁₈ Si ₆	23-329				✓						✓
Kalsiyum oksit	CaO	37-1497				✓						✓

3.4.4 Sertleşmiş Harçlarda Mikroyapı Analizleri

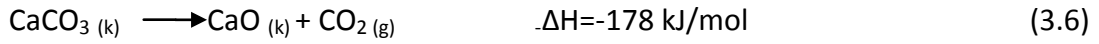
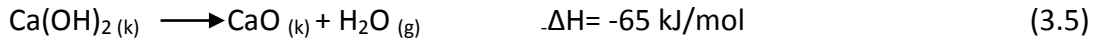
Sertleşmiş harçlarda mikroyapı SEM ve EDX analizleri ile araştırılmıştır. Bu amaçla, 2., 7., 28. ve 90. günlerdeki kontrol harç numunelerinin farklı büyütmelere ait mikroyapı görüntüleri Çizelge Ek 2- Ek 6'da, EDX analiz sonuçları Çizelge 3. 25'de verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri ve EDX analiz sonuçları değerlendirildiğinde, kuvars fazı (SiO_2) tane şeklinin, hidratasyon fazlarından farklı bir morfolojiye sahip olduğu belirlenmiştir. Yüksek büyütmelerde; iğnemsî çubuk görünümüne sahip etrenjit fazı ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) belirgin olarak tüm hidratasyon sürelerinde görülmüştür. Mikroyapıda görülen etrenjit fazı, mukavemetlerde dayanım artışına sebep olmuştur.

Çizelge 3. 25 Sertleşmiş harçlarda EDX analiz sonuçları (5000X büyütme)

28. gün (C)		7. gün (C)		7. gün (K8-10)	
					
Element	%Ağırlıkça	Element	%Ağırlıkça	Element	%Ağırlıkça
O	51.35	O	50.46	O	43.40
Si	48.65	Si	8.14	Si	6.97
Mg	-	Mg	0.48	Mg	-
Al	-	Al	2.23	Al	1.38
S	-	S	2.35	S	1.83
Ca	-	Ca	34.84	Ca	44.14
Fe	-	Fe	1.50	Fe	2.29
Toplam	100.00	Toplam	100.00	Toplam	100.00

3.4.5 Kırmızı Çamur İkameli Harç Numunelerinin Termal Analiz Değerlendirmesi

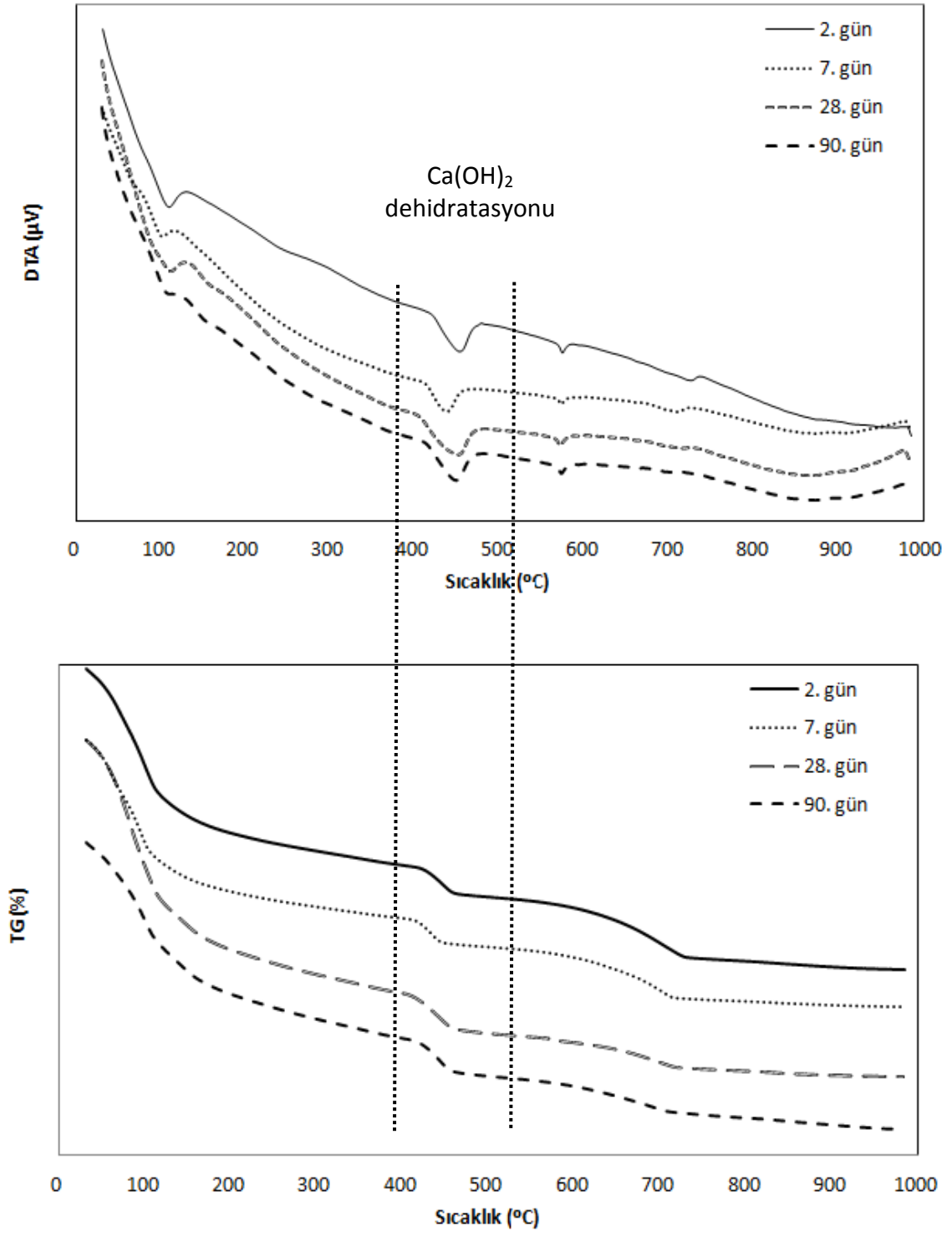
Harç numunelerinin tümünde 2., 7., 28. ve 90. günlerde hidratasyon ürünleri kantitatif olarak DTA/TG analizleri ile araştırılmıştır. Örnek Şekil 3. 10'da verilmiş olan DTA/TG analizinde görülen endotermik piklerin; 60-120°C sıcaklık aralığındaki ağırlık kaybı fiziksel su kaybını, 200-300°C sıcaklık aralığındaki endotermik pikin kalsiyum silikat hidrat, etrenjit ve kalsiyum alümina hidrat dehidratasyonunu ve 400-500°C sıcaklık aralığındaki ağırlık kaybı portlanditin (Ca(OH)_2) dehidratasyonunu (3.5 numaralı denklem), 650-800°C sıcaklık aralığındaki ağırlık kaybı kalsiyum karbonatın (CaCO_3) parçalanmasını (3.6 numaralı denklem) göstermektedir [52].



k= katı, g=gaz

Bu sebeple, 430-600°C sıcaklık aralığında TG eğrilerinde görülen ağırlık kaybı verileri kullanılarak 3.5 numaralı denkleme göre tepkimeye girmeyen serbest Ca(OH)_2 miktarları hesaplanmıştır.

Kırmızı çamur ikameli harç numunelerinde çok belirgin ve sistematik olmasada Ca(OH)_2 'in bir miktar azaldığı görülmüştür. Ancak bu azalmanın kırmızı çamurun serbest kireci bağlamasından mı yoksa karışım içindeki çimento oranının %10 azaltılmış olmasından mı kaynaklandığını ifade etmek zordur. Çünkü kırmızı çamur içerisindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ koşulunu sağlamamasına rağmen sınır değere çok yakındır (%67.03) ve bir miktar Ca(OH)_2 bağlamış olabilir.



Şekil 3. 10 Kontrol harç numunelerinin 2., 7., 28. ve 90. günde DTA/TG eğrileri

Çizelge 3. 26 Harç numunelerinin zamana bağlı Ca(OH)_2 değişimi

	2. gün	7. gün	28. gün	90. gün
C	3.24	2.75	4.35	3.86
H-10	3.29	2.14	2.22	3.00
P-10	2.59	2.38	2.63	2.71
K6-10	2.59	2.46	3.20	2.50
K7-10	2.47	2.92	2.67	2.75
K8-10	2.63	3.99	2.67	3.58

3.5 Pigment ve Kırmızı Çamur İkameli Parke Taşı ve Bordür Taşı Üretimi

Bu çalışmada Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.'den temin edilen ham, pulverize ve farklı sıcaklıklarda kalsine edilen 5 farklı kırmızı çamur İSTON A.Ş.'de parke taşı ve bordür taşı üst tabaka üretim deneylerinde renklendirici pigment olarak kullanılmıştır.

Üst tabaka renkli parke taşı ve bordür taşı üretimlerinde kullanılmak üzere Çizelge 3. 27'de belirtilen malzemeler ile beton üretilmiştir. Çalışmada, 1 m³ karışım için 14 kg ticari Bayer 130 G renklendirici pigment ve bunun yerine 5 farklı kırmızı çamur kullanılmıştır. Beton numunelerde renk ve mekanik özellikler araştırılmıştır.

Çizelge 3. 27 1 m³ için parke taşı ve bordür taşı üst tabaka beton karışımı

Numune Kodu		Çimento (CEM I 42.5)	Kum (0-3 mm)	Bayer 130 G Pigmenti	Kırmızı çamur					Su	Su/ çimento
					H	P	K6	K7	K8		
1	BCP	500 kg	1872 kg	14 kg	-	-	-	-	-	175 kg	0.35
2	BH	500 kg	1872 kg	-	14 kg	-	-	-	-	175 kg	0.35
	BP	500 kg	1872 kg	-	-	14 kg	-	-	-	175 kg	0.35
	BK6	500 kg	1872 kg	-	-	-	14 kg	-	-	175 kg	0.35
	BK7	500 kg	1872 kg	-	-	-	-	14 kg	-	175 kg	0.35
	BK8	500 kg	1872 kg	-	-	-	-	-	14 kg	175 kg	0.35
3	BH	500 kg	1872 kg	7 kg	7 kg	-	-	-	-	175 kg	0.35
	BP	500 kg	1872 kg	7 kg	-	7 kg	-	-	-	175 kg	0.35
	BK6	500 kg	1872 kg	7 kg	-	-	7 kg	-	-	175 kg	0.35
	BK7	500 kg	1872 kg	7 kg	-	-	-	7 kg	-	175 kg	0.35
	BK8	500 kg	1872 kg	7 kg	-	-	-	-	7 kg	175 kg	0.35
4	BH	500 kg	1872 kg	3.5 kg	10.5 kg	-	-	-	-	175 kg	0.35
	BP	500 kg	1872 kg	3.5 kg	-	10.5 kg	-	-	-	175 kg	0.35
	BK6	500 kg	1872 kg	3.5 kg	-	-	10.5 kg	-	-	175 kg	0.35
	BK7	500 kg	1872 kg	3.5 kg	-	-	-	10.5 kg	-	175 kg	0.35
	BK8	500 kg	1872 kg	3.5 kg	-	-	-	-	10.5 kg	175 kg	0.35
5	BH	500 kg	1872 kg	7 kg	14 kg	-	-	-	-	175 kg	0.35
	BP	500 kg	1872 kg	7 kg	-	14 kg	-	-	-	175 kg	0.35
	BK6	500 kg	1872 kg	7 kg	-	-	14 kg	-	-	175 kg	0.35
	BK7	500 kg	1872 kg	7 kg	-	-	-	14 kg	-	175 kg	0.35
	BK8	500 kg	1872 kg	7 kg	-	-	-	-	14 kg	175 kg	0.35

Gometrik biçimi Şekil A. 11 ve Şekil A. 12’de görülen parke taşı ve bordür taşları üretim sonrası parke taşları, shrink adı verilen şeffaf poşetler ile kaplanarak doğal kürlleme, bordür taşları için ise 90 dk (yaz ayları için 75 dk) 60-65°C’deki buhar kürü uygulanmıştır.

3.5.1 Pigment ve Kırmızı Çamur İkameli Parke Taşları ve Bordür Taşlarının Renk Özelliklerinin İncelenmesi

Parke taşları ve bordür taşları üretimi sonrası, kırmızı çamurun pigment olarak kullanımının ürünlerin renk özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Kırmızı çamur ikameli parke taşları ve bordür taşlarının renk ölçüm sonuçları, BC-1 numunesi ile CIE L*a*b* renk skalası kullanılarak karşılaştırılmıştır. Buna göre, parke taşı ve bordür taşı deneylerinde kırmızı rengi ifade eden a* verileri karşılaştırıldığında; renklendirici pigment olarak yalnızca kırmızı çamurun kullanıldığı deneylerin kırmızı renk özelliklerinin, ticari pigmente göre daha düşük olduğu ancak kalsine kırmızı çamurun ticari pigment ile birlikte kullanıldığı deney çalışmalarında ise kırmızı renk özelliğinin ticari pigmente yakın veya daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Parke taşları üretim deneylerinde, CB-1’e göre en belirgin kırmızı renk performansına BK6-4 ile ulaşılmıştır. Sırasıyla L* ve b* verileri karşılaştırıldığında; CB-1 numunesine göre tüm numunelerin daha koyu renk tonuna ve daha sarı renge sahip olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3. 28).

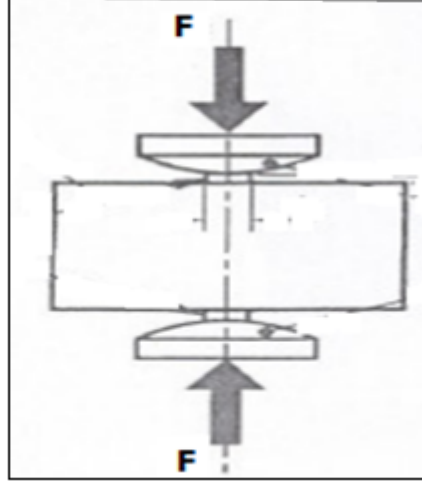
Çizelge 3. 28 Parke taşları ve bordür taşlarının CIE L*a* b* renk özelliklerinin kırmızı çamur ve Bayer 130G pigment karışım oranlarına göre değişimi

Numune Kodu		Parke Taşları Renk Özellikleri			Bordür Taşları Renk Özellikleri			Renk Özelliği
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	
1	BCP	55.83	8.31	5.13	53.40	8.93	8.77	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
2	BH	52.00	4.52	6.86	49.45	6.09	6.40	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BP	50.34	3.46	7.73	45.83	5.84	6.35	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK6	49.05	5.66	10.7	49.95	8.86	7.71	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK7	50.21	5.15	8.88	49.82	8.25	7.85	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK8	52.21	6.63	9.29	49.89	8.33	10.9	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
3	BH	50.22	5.73	6.56	42.28	8.79	8.44	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BP	50.86	7.09	8.65	49.75	9.02	8.76	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK6	43.78	9.36	9.55	53.01	10.9	10.5	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK7	48.73	8.05	9.10	42.99	10.7	11.3	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK8	52.28	6.22	7.48	49.49	9.63	9.97	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
4	BH	48.18	6.16	6.79	48.46	8.84	7.78	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BP	47.94	7.21	8.07	49.85	9.07	7.86	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK6	44.00	10.9	11.2	52.58	12.5	13.0	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK7	48.27	9.84	10.0	42.17	11.0	11.6	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK8	47.37	10.1	8.67	47.48	11.3	9.85	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
5	BH	50.48	4.51	7.00	45.84	6.12	6.84	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BP	51.46	6.45	7.22	45.58	6.25	7.05	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK6	47.91	8.74	10.0	43.27	10.8	11.2	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK7	50.30	8.16	8.66	43.11	10.8	11.2	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	BK8	46.93	8.14	8.35	43.97	10.7	10.4	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta

3.5.2 Pigment ve Kırmızı Çamur İkameli Parke Taşları ve Bordür Taşlarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Parke taşı üretim deneylerinde, kırmızı çamurun pigment olarak kullanımının ürünlerin mekanik özelliklerine etkisi yarmada çekme dayanımı deneyleri ile belirlenmiştir. Tüm deneylerde beklenildiği üzere beton karışımlarının 28. gündeki dayanımı 7. gündeki dayanımlarından fazla çıkmıştır. Parke taşları hakkında deney ve kabul kriterlerini belirleyen “TS 2824 EN 1338 Nisan 2005 Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları” ‘na göre parke taşı ürünlerinde ürünün çalışma

şartlarındaki performansını belirtmesi açısından beton basma dayanımı yerine ürün yarmada çekme dayanımı esas alınmıştır [53]. Yarmada çekme dayanımı 3. 13 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. 11 Yarmada çekme dayanım deney düzeneği

$$T = 0.637 F / A \quad (3.13)$$

T (N/mm²), yarmada çekme dayanımı

F (N), kırılma kuvveti

A (mm²), yarılan kesit alanı

Kırmızı çamurun pigment olarak parke taşı üretiminde kullanımının yarmada çekme dayanımı özelliklerine olumsuz etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir (Çizelge 3. 29).

Bordür taşı üretim deneylerinde, kırmızı çamurun pigment olarak kullanımının ürünlerin mekanik özelliklerine etkisi TS 436 EN 1340 standardına göre eğme dayanım deneyleri ile belirlenmiştir [54]. Tüm deneylerde beklendiği üzere beton karışımlarının 28. gündeki dayanımı 7. gündeki dayanımlarından fazla çıkmıştır (Çizelge 3. 29). Kırmızı çamurun pigment olarak bordür taşı üretiminde kullanımının eğme dayanım özelliklerine olumsuz etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 3. 29 Parke taşları ve bordür taşlarının yarmada çekme ve eğme dayanımı deney sonuçları

Numune Kodu		Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)		Eğme Dayanımı (MPa)	
		7. gün	28. gün	7. gün	28. gün
1	BCP	4.1	4.6	7.2	6.7
2	BH	4.8	4.9	4.9	6.9
	BP	3.9	3.1	5.8	4.7
	BK6	4.6	5.1	7.7	7.9
	BK7	4.2	4.1	7.6	8.4
	BK8	3.6	5.1	8.8	7.8
3	BH	4.0	3.9	5.5	7.3
	BP	4.6	4.5	6.4	4.6
	BK6	4.0	4.2	7.0	8.4
	BK7	4.1	4.8	7.2	7.5
	BK8	4.0	3.8	8.5	7.7
4	BH	4.3	4.5	5.9	7.1
	BP	4.4	4.8	5.7	3.9
	BK6	4.6	4.8	7.0	8.5
	BK7	2.9	3.4	7.8	8.5
	BK8	4.0	4.3	7.9	8.4
5	BH	3.7	4.3	4.9	6.4
	BP	4.1	4.6	6.6	4.8
	BK6	4.8	4.9	7.5	8.1
	BK7	3.9	3.1	7.5	8.8
	BK8	4.6	5.1	7.5	7.4

3.6 Renkli Agregada ve Kırmızı Çamur İkameli Şehir Mobilyaları Üretimi

Bu çalışmada Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.'den temin edilen pulverize kırmızı çamur İSTON A.Ş.'de şehir mobilyaları üretim deneylerinde renkli agregada olarak kullanılmıştır.

Atık kırmızı çamurun ön iyileştirme işlemi sonrası elde edilen pulverize kırmızı çamur, çöp kovası ve yaya alanlarına park yapılmasını önlemek amacıyla tasarlanmış küre sınır elemanı gibi şehir mobilyaları üretiminde, ticari kuvars esaslı kırmızı renkli agregada yerine (0-0.5 mm) kullanılmıştır. Kırmızı çamurun renklendirme performansının en iyi olduğu optimum kırmızı çamur miktarının belirlenebilmesi amacıyla; çöp kovası için 2 farklı karışım, küre sınır elemanı için ise 5 farklı karışım hazırlanmıştır (Çizelge 3. 30). Şehir mobilyaları üretimine ait görüntüler Şekil A. 13'de verilmiştir.

Çizelge 3. 30 1 m³ için küre sınır elemanı ve çöp kovası beton karışımı

Beton Türü	Numune Kodu		Portland Çimento (32.5) (kg)	Kuars Esaslı Agrega			Pulverize Kırmızı Çamur	Su (kg)
				(4-6 mm) (kg)	(2-4 mm) (kg)	(0-0.5 mm) (kg)	P (kg)	
Küre Sınır Elemanı	1	BCA	620.69	189.66	1224.14	198.27	-	155.17
	2	BP	620.69	189.66	1224.14	-	198.27	155.17
	3	BP	620.69	189.66	1224.14	148.70	49.57	155.17
	4	BP	620.69	189.66	1224.14	99.14	99.14	155.17
	5	BP	620.69	189.66	1224.14	49.57	148.70	155.17
Çöp Kovası	1	BCA	620.69	189.66	1224.14	198.27	-	155.17
	2	BP	620.69	189.66	1224.14	-	198.27	155.17

3.6.1 Renkli Agreg a ve Kırmızı amur İkameli Şehir Mobilyalarının Renk Özelliklerinin İncelenmesi

Kırmızı amurun küre sınır elemanı ve çöp kovası üretiminde kullanımı sonrası renk performans ölçüm sonuçları Çizelge 3. 31’de verilmiştir. Şehir mobilyaları üretim deneyleri a^* verilerine göre; pulverize kırmızı çamur tek başına veya ticari kuvars esaslı kırmızı agreg a (0-0.5 mm) ile birlikte kullanıldığında, kırmızı renk performansının, BCA’ya göre daha belirgin olduğu belirlenmiştir. En belirgin kırmızı renk performansına, BP-4 ve BP-2 numuneleri ile ulaşılmıştır.

Çizelge 3. 31 Küre sınır elemanı ve çöp kovası CIE $L^*a^*b^*$ verileri

Beton Türü	Numune Kodu		L^*	a^*	b^*	Renk Özelliği
Küre Sınır Elemanı	1	BCA	47.59	13.53	14.29	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	2	BP	42.16	16.25	18.23	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	3	BP	40.15	18.69	21.52	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	4	BP	39.59	20.16	22.82	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	5	BP	39.14	19.81	21.76	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
öp Kovası	1	BCA	42.98	12.96	14.31	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta
	2	BP	43.95	17.30	19.80	Kırmızı-sarı/Orta koyulukta

3.6.2 Renkli Agreg a ve Kırmızı amur İkameli Şehir Mobilyalarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Şehir mobilyaları üretim deneylerinde, ticari kırmızı renkli agreg a yerine kırmızı çamur kullanılmasının mekanik özelliklere etkisi incelenmesi için, şehir mobilyaları numunelerinin 7. ve 28. gün kürlleme sonrası basma dayanımları belirlenmiştir. Çizelge 3. 32’de görüldüğü gibi, BP-2-3-4-5 numuneleri için, 7. ve 28. günde basma dayanım değerleri 44.8-56.6 MPa arasındadır ve kontrol deneyine göre daha yüksektir (38.8-46.5 MPa). Elde edilen veriler değerlendirildiğinde, kırmızı çamurun şehir mobilyaları üretiminde agreg a olarak kullanılması ile ticari kuvars esaslı kırmızı renkli agreg aya (0-0.5 mm) göre daha iyi kırmızı renk ve daha yüksek basma dayanımı elde edilebileceği görülmüştür.

Çizelge 3. 32 Küre sınır elemanı ve çöp kovası basma dayanım değerleri

Beton Türü	Numune Kodu		Basma Dayanımı (MPa)	
			7. gün	28. gün
Küre Sınır Elemanı	1	BCA	38.8	46.5
	2	BP	47.4	56.6
	3	BP	44.8	51.5
	4	BP	46.5	53.8
	5	BP	44.9	48.8
Çöp Kovası	1	BCA	52.3	47.2
	2	BP	49.1	50.0

3.7 Renkli Pigment ve Kırmızı Çamur İkameli Prototip Beton Numunelerinin Renk Ömür Performanslarının Araştırılması

Kırmızı çamur ikameli parke taşları renk özelliklerinin güneş ışığı ve/veya iklim koşullarına bağlı olarak etkilene derecesi TS 5358 EN 12608 (2004) standardına göre ömür performans testleri ile belirlenmiştir [55]. Ömür performans testleri için, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün, Marmara Bölgesi için verdiği istatistiklerden, 1975-2011 yılları arasındaki kış koşullarında, hava sıcaklık verileri ortalaması -10°C, yaz koşulları için hava sıcaklık verileri ortalaması ise +40°C hesaplanmıştır [56]. Yaz ve kış sıcaklıkları dikkate alınarak, 1 yıllık süreye karşılık gelen 37 çevrim için program oluşturulmuş, geliştirilen ürünler Atlas marka SC 600 MGH model solar iklimatik test kabini içinde bekletilmiştir (Şekil A. 14).

Ömür performans testi öncesi ve sonrası renk özellikleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 3. 33-Çizelge 3. 34). Renkli beton ürünlerinin ömür performans testi öncesi ve sonrası aynı bölgeden alınan 5 ölçümün ortalama renk ölçüm sonuçlarına göre, kırmızı çamur ikameli renkli beton ürünlerin a* verileri ile gösterilmiş olan kırmızı renk özelliklerinin, kış koşullarında değişmediği, yaz koşullarında ise güneş ışığından az miktarda etkilendiği belirlenmiştir.

Çizelge 3. 33 Parke taşlarının +40°C’de (ilkbahar-yaz mevsimi koşullarında) renk ömür performans testi öncesi ve sonrası renk ölçüm sonuçları

Numune Kodu		+40°C İklimlendirme Öncesi			+40°C İklimlendirme Sonrası			Renk Özelliği
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	
1	BCP	55.83	8.31	5.13	56.80	8.79	4.78	Kırmızı-sarı/ Orta koyulukta
2	BH	52.00	4.52	6.86	56.63	3.89	4.78	
	BP	50.34	3.46	7.73	53.53	3.76	7.47	
	BK6	49.05	5.66	10.7	49.45	5.91	10.67	
	BK7	50.21	5.15	8.88	56.02	4.50	7.12	
	BK8	52.21	6.63	9.29	55.21	5.35	6.98	
3	BH	50.22	5.73	6.56	52.71	6.03	5.66	
	BP	50.86	7.09	8.65	54.66	7.12	6.72	
	BK6	43.78	9.36	9.55	49.00	9.69	8.67	
	BK7	48.73	8.05	9.10	51.72	7.42	6.90	
	BK8	52.28	6.22	7.48	55.09	8.16	7.37	
4	BH	48.18	6.16	6.79	59.91	5.97	5.34	
	BP	47.94	7.21	8.07	51.17	6.65	5.60	
	BK6	44.00	10.91	11.23	46.65	11.03	10.06	
	BK7	48.27	9.84	10.07	50.94	9.65	8.21	
	BK8	47.37	10.18	8.67	48.95	10.59	8.03	
5	BH	50.48	4.51	7.00	52.96	4.61	5.38	
	BP	51.46	6.45	7.22	52.87	7.76	6.11	
	BK6	47.91	8.74	10.04	46.46	9.01	10.02	
	BK7	50.30	8.16	8.66	56.08	7.19	5.85	
	BK8	46.93	8.14	8.35	52.78	6.65	6.78	

Çizelge 3. 34 Parke taşlarının -10°C’de (sonbahar-kış mevsimi koşullarında) renk ömür performans testi öncesi ve sonrası renk ölçüm sonuçları

Numune Kodu		-10°C İklimlendirme Öncesi			-10°C İklimlendirme Sonrası			Renk Özelliği
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	
1	BCP	50.36	8.20	4.34	50.69	7.81	1.64	Kırmızı-sarı/ Orta koyulukta
2	BH	53.34	3.52	5.47	53.48	3.55	5.51	
	BP	50.04	3.77	8.33	50.10	3.63	7.79	
	BK6	48.78	5.24	9.92	48.78	5.43	10.19	
	BK7	52.79	4.98	9.16	51.92	5.17	8.85	
	BK8	53.81	6.15	8.76	53.44	6.26	8.70	
3	BH	53.02	5.29	6.25	53.64	5.33	6.32	
	BP	52.60	8.06	9.01	52.16	8.03	8.62	
	BK6	48.33	9.23	8.99	47.89	8.96	8.57	
	BK7	44.31	9.63	9.35	45.43	9.47	9.07	
	BK8	52.77	8.04	8.16	53.26	7.88	8.09	
4	BH	53.25	6.37	6.53	53.85	6.74	6.67	
	BP	48.99	7.32	7.08	49.31	7.21	7.20	
	BK6	47.72	8.79	8.97	46.34	8.92	8.91	
	BK7	50.83	8.43	8.60	48.98	9.12	9.15	
	BK8	51.31	8.64	7.74	47.57	8.24	5.79	
5	BH	50.83	4.42	6.24	50.73	4.59	6.05	
	BP	50.76	7.19	7.32	51.21	7.68	7.36	
	BK6	46.95	8.51	10.04	47.00	8.26	9.26	
	BK7	52.57	7.55	7.56	52.26	7.94	7.79	
	BK8	50.06	6.21	7.74	50.67	6.29	7.63	

3.8 Kırmızı Çamur İkameli Harç Numuneleri ve Prototip Beton Numunelerinin Çevreye Uyum Testleri

Seydişehir Eti Alüminyum Tesis’lerinden temin edilen ham kırmızı çamurun, çevreye uyumluluk deneyleri atık ve geliştirilen ürünlere olmak üzere ayrı ayrı uygulanmıştır. Buna göre, Bölüm 3.3.8’de verildiği üzere Atık Yönetimi Genel Esaslarına ilişkin

Yönetmelik (AYGEİY) EK-IIIB kriterlerine göre ham kırmızı çamurun **“Tehlikeli atık”** olduğu sonucu belirlenmiştir. Başlangıçta tehlikeli bir atık olan ham kırmızı çamurun harç numunelerinde filler olarak çimento yerine ağırlıkça %10 ikame, parke taşı ve bordür taşı üretimlerinde ticari Bayer 130 G pigmenti yerine (BH-2), şehir mobilyaları üretimlerinde ise ticari kırmızı kuvars esaslı agrega (0-0.5 mm) yerine ağırlıkça %100 ikame kullanılması sonucu geliştirilen ürünlerin (BH-2) hangi sınıfa göre depolanacağı 26/03/2010 tarih ve 27533 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan **“Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğe (ADDDY)”** göre belirlenmiştir [57].

ADDDY yönetmeliğinin amaçlarından bazıları; atıkların düzenli depolama yöntemi ile bertarafı sürecinde oluşabilecek sızıntı sularının ve depo gazlarının toprak, hava, yeraltı suları ve yüzeysel suların üzerindeki olumsuz etkilerinin en düşük düzeye indirilerek çevre kirliliğinin önlenmesi için gereken genel kuralları belirlemektir.

Yönetmelikte yer alan inert atık, tehlikeli atık ve tehlikesiz atıkların depolanabilme parametreleri sınır değerleri ile ham kırmızı çamur ikameli harç numune, parke taşı, bordür taşı ve şehir mobilyaları numunelerinin (Çizelge 3. 35) parametre değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre; harç numune, parke taşı, bordür taşı ve şehir mobilyaları numunelerinin toplam çözünen katı madde parametresi değerinin **“Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY)” Ek-2 Atıkların Düzenli Depolanabilmesi için kabul kriterleri-Tehlikesiz Atıkların Depolanabilme Kriterlerine göre II. Sınıf depolama tesisleri için sınır değerlerine göre; uygun olduğu** tespit edilmiştir.

Çevreye uyumluluk deneyleri sonucunda kırmızı çamurun başlangıçta tehlikeli bir atık olduğu, ancak bu çamur kullanılarak geliştirilen harç numune, parke taşı, bordür taşı ve şehir mobilyaları ürünlerinin tehlikeli olmaktan çıkarak, kullanım sırasında farklı iklim koşullarında (yağmur sularının ürüne ve oradan toprağa sızması gibi) çevreye zarar vermeyeceği ve tehlikesiz atıkların depolanabilme kriterlerine göre kullanılarak, depolanabileceği belirlenmiştir.

Çizelge 3. 35 Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik gereğince (ADDDY- EK 2) kabul edilen limit değerleri

Analiz Yöntemleri	Parametre (mg/l)	Harç Numune (H-10)	Parke Taşı (BH-2)	Bordür Taşı (BH-2)	Şehir Mobilyası (BH-2)	ADDDY/ Ek-2 Limit Değerler	YORUM
						Tehlikesiz Atıkların Depolanabilme Kriterleri II. Sınıf Depolama Tesisleri İçin Sınır Değerler	
EPA 6020 A (ICP – MS)	Arsenik	< 0.0005	0.002	0.002	0.002	0.2	Tehlikesiz depo.
	Baryum	0.0434	0.105	0.086	0.045	10	Tehlikesiz depo.
	Kadmiyum	0.00011	< 0.00004	< 0.00004	< 0.00004	0.1	Tehlikesiz depo.
	Krom	0.357	0.076	0.108	0.002	1	Tehlikesiz depo.
	Bakır	0.00032	0.014	0.018	0.014	5	Tehlikesiz depo.
TS 2537 EN 1483	Civa	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	0.02	Tehlikesiz depo.
EPA 6020 A (ICP – MS)	Molibden	0.0053	0.0014	0.0014	0.006	1	Tehlikesiz depo.
	Nikel	0.00096	< 0.0003	< 0.0003	< 0.0003	1	Tehlikesiz depo.
	Kurşun	< 0.0002	0.0064	0.0008	0.0013	1	Tehlikesiz depo.
	Antimon	0.00043	0.0004	0.0003	0.0005	0.07	Tehlikesiz depo.
	Selenyum	0.00125	< 0.0006	< 0.0006	< 0.0006	0.05	Tehlikesiz depo.
	Çinko	< 0.005	0.025	0.033	0.012	5	Tehlikesiz depo.
İyon Kromatografi	Klorür	0.64	0.97	2.24	0.27	1500	Tehlikesiz depo.
İyon Seçici Elektrot	Florür	0.21	0.2	0.22	0.3	15	Tehlikesiz depo.
İyon Kromatografi	Sülfat	18.68	5.8	7.5	4.9	2000	Tehlikesiz depo.
Yüksek sıcaklıkta yakma	Çözülmüş Organik Karbon	22.2	1.38	1.26	4.01	80	Tehlikesiz depo.
Gravimetrik	Toplam Çözünen Katı Madde	494	568	600	878	6000	Tehlikesiz depo.
Fotometrik	Fenoller	< 0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07	-	Tehlikesiz depo.

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.'den temin edilen atık kırmızı çamurun kurutma, pulverizasyon, 600°C, 700°C ve 800°C sıcaklıklarında kalsinasyon işlemlerinden geçirilmiştir. Bu işlemler sonrası kırmızı çamur harç numunelerinde filler olarak kullanılmıştır. Parke taşı ve bordür taşı üretimlerinde pigment olarak ve şehir mobilyaları üretimlerinde agrega olarak kullanımının fiziksel ve mekanik özelliklerine olan etkisi irdelenmiştir.

-Atık kırmızı çamurun kurutma işlemi sonrası gerçekleştirilen XRF ve XRD analizlerinde belirlenen faz ve elementlerin, FTIR ve DTA/TG analiz sonuçları ile örtüştüğü tespit edilmiştir.

-Atık kırmızı çamurun DTA/TG analizi sonucunda, XRD analizleri ile de varlığı saptanmış olan gipsit fazının 263.9°C'de parçalanmasına bağlı olarak en yüksek ağırlık kaybı meydana gelmiştir.

-Atık kırmızı çamur, kurutma işlemi sonrası pulverizatörden geçirilerek aglomerasyonlar dağıtılmıştır. Ancak, SEM görüntülerinden de anlaşılaacağı üzere, pulverizasyon işlemi sonrası kırmızı çamurun ince tane yapısından dolayı bir miktar topaklanma görülmüştür.

-Kırmızı renk özelliğini artırmak amacıyla atık kırmızı çamur 600°C, 700°C ve 800°C sıcaklıklarında kalsine edilmiştir. Kalsine edilmiş kırmızı çamurların kırmızı renk özelliklerinin beklenildiği gibi ham ve pulverize kırmızı çamura göre daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Kalsine kırmızı çamurların a* ve b* değerlerine göre en belirgin kırmızı renge 700°C'de kalsine edilen grupta ulaşılmış, 800°C'de kalsinasyon sonrasında

ise kırmızı renk tonunda azalma tespit edilmiştir. Bu durum; 800°C’de kalsit fazının parçalanması sonucu oluşan kalsiyum oksit bileşiğinden kaynaklanmaktadır. Literatürde yer alan bilgilere göre; Pera vd. (1997) yapmış oldukları çalışmada, benzer sebeple atık kırmızı çamuru 600-800°C sıcaklık aralığında kalsinasyon işlemine tabi tutmuşlar ve en iyi kırmızı renk performansını 700°C’de kalsinasyon sonrası elde edildiğini belirtmişlerdir. Özbek vd. (2001) tarafından yapılmış olan çalışmada da belirtildiği gibi kalsiyum oksit bileşiğinin varlığı tuğla numunelerinin kırmızı renginin açılmasına neden olmuştur [58].

-Atık kırmızı çamurun çevreye olan etkisinin araştırılması amacıyla gerçekleştirilen radyoaktivite ölçüm sonuçlarına göre Eti Aüminyum A.Ş’den temin edilen atık kırmızı çamurun radyoaktif olmadığı belirlenmiştir.

-Atık kırmızı çamur, kostik içermesinden dolayı fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlendikten sonra “Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmeliği (AYGEİY)” limit değerlerine göre değerlendirilmiştir. Buna göre, kırmızı çamur içerisinde yer alan elementlerin; zehirli, alevlenebilir, tahriş edici, zararlı ve koroziv özellikte oldukları görülmüştür. Ancak, bu elementlerin miktarının AYGEİY EK-III B maddesinde belirtilen eşik değerlerinin altında olduğu saptanmıştır. Kırmızı çamur içerisindeki inorganik fazların ise tahriş edici, alevlenebilir ve zararlı özellikte olduğu ve AYGEİY EK-III B yönetmeliğinin limit değerini aştığı belirlenmiştir. Bu durum dikkate alınarak kırmızı çamur **“tehlikeli atık”** olarak tanımlanmıştır.

-Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda; puzolan özellik göstermesi beklenen bir malzemede; amorf SiO₂ yapısının ve ASTM C 618-72 standardına göre; SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplamının %70’den fazla olma koşulunu sağlamalı aynı zamanda CaO miktarı da %4’ü geçmemelidir. Ham kırmızı çamurun elementel analiz sonuçlarına göre; CaO %2.71 ile sınır değerini sağlamış ancak SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarı %67.03 ile sınır değerini sağlamadığı ve ayrıca, XRD analizi sonucu amorf SiO₂ yapısının görülmemesinden dolayı puzolanik özelliğe sahip olmadığı belirlenmiştir.

-Literatürden elde edilen bilgilere göre; genleşmeye neden olan alkali-silika reaksiyonunun oluşabilmesi için agregada reaktif silika formları ile çimentoda alkali oksitleri (Na₂O + 0.66 K₂O > %0.6) eşdeğerinin bulunması gerekmektedir. Kırmızı çamur içerisinde yer alan Na₂O ve K₂O elementlerin miktarları göz önüne alındığında Na₂O +

0.66 K₂O toplamı (%0.06), %0.6'dan çok düşüktür. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda; kırmızı çamurun çimento yerine değil de ince agrega olarak kullanımında alkali-silika reaksiyonuna neden olmayacağı belirlenmiştir.

-Kırmızı çamurların renk özellikleri, ticari pigmentin renk özellikleri ile karşılaştırıldığında, kalsine kırmızı çamurların kırmızı renk özelliklerinin ticari pigmente göre daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, kırmızı çamurun beton ürünlerinde ticari pigment yerine kullanılabilmesi için kalsinasyon işleminin gerekli olduğu anlaşılmıştır.

-Harç numunelerinde en belirgin kırmızı rengi, en iyi kırmızı renk özelliğine sahip 700°C'de kalsine kırmızı çamur içeren harçlarda belirlenmiştir. Kırmızı çamur içeren harç numunelerinin renk özellikleri orta koyulukta, kontrol harç numunelerinin renk özellikleri ise açık koyuluktur.

-Kırmızı çamurun, CEM I 42.5 R çimentoya göre yaklaşık 100 kat daha ince olduğu dikkate alınarak, puzolan özelliği olmamasına rağmen ince boşlukları doldurma özelliğinden yararlanmak amacı ile harç numunelerinde çimento yerine ağırlıkça %10 filler olarak ikame edilmesi öngörülmüştür. Eğme ve basma deneyleri sonucunda, kırmızı çamurun ince tane yapısından dolayı harç numunelerinde filler olarak kullanımının erken yaşlarda düşüşe neden olsa da uzun süreli dayanımlarda düşüşe neden olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, kırmızı çamurun kalsinasyon sıcaklığı artışının, harç numuneleri mukavemet değerlerinde yükselme sağlamadığı tespit edilmiştir.

-Harç numunelerinin 2., 7., 28. ve 90. günlerdeki mineralojik analiz sonuçları değerlendirildiğinde, kırmızı çamurların yapısında yer alan fazlar tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra RILEM kumundan kaynaklanan SiO₂ fazı ve çimentonun hidratasyon reaksiyonundan kaynaklanan portlandit, etrenjit, illit, kalsiyum sülfat hidrat, kalsiyum alüminyum oksit karbonat hidroksit hidrat bileşikler belirlenmiştir.

-Sertleşmiş harçlarda 2., 7., 28. ve 90. günlerdeki mikroyapı görüntüleri ve EDX analizleri incelendiğinde; kuvars fazı (SiO₂) tane şeklinin, hidratasyon fazlarından farklı bir morfolojiye sahip olduğu görülmüştür. Yüksek büyütmelede; iğnemsî çubuk görünümüne sahip etrenjit fazı (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂.26H₂O) belirgin olarak tüm hidratasyon sürelerinde belirlenmiştir.

-Kırmızı çamur ikameli harç numunelerinde çok belirgin ve sistematik olmasa da Ca(OH)_2 'in bir miktar azaldığı görülmüştür. Ancak bu azalmanın kırmızı çamurun serbest kireci bağlamasından mı yoksa karışım içindeki çimento oranının %10 azaltılmış olmasından mı kaynaklandığını ifade etmek zordur. Çünkü kırmızı çamur içerisindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ koşulunu sağlamamasına rağmen sınır değere çok yakındır (%67.03) ve bir miktar Ca(OH)_2 bağlamış olabilir.

-Parke taşı ve bordür taşı üretimlerinde, kırmızı çamurun pigment olarak tek başına veya ticari pigment ile birlikte kullanımının ürünlerin mekanik özelliklerine olumsuz bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Parke taşları ve bordür taşları üretimi sonrası, kırmızı çamurun pigment olarak kullanımının ürünlerin renk özelliklerine olan etkisi incelendiğinde; renklendirici pigment olarak yalnızca kırmızı çamurun kullanıldığı numunelerin kırmızı renk özelliklerinin, ticari pigmente göre daha az belirgin olduğu belirlenmiştir. Ancak kalsine kırmızı çamurun ticari pigment ile birlikte kullanıldığı üretimlerde, kırmızı renk özelliğinin ticari pigmente yakın veya daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Parke taşları üretim deneylerinde kontrole göre en iyi kırmızı renk performansı, ağırlıkça %0.37 600°C'de kalsine kırmızı çamur ve ağırlıkça %0.13 ticari pigment içeren beton karışımında elde edilmiştir.

-Kırmızı çamurun küre sınır elemanı ve çöp kovası üretiminde agrega olarak kullanımının renk özelliklerine olan etkisi değerlendirildiğinde; pulverize kırmızı çamurun tek başına veya ticari kuvars esaslı kırmızı agrega (0-0.5 mm) ile kullanımı sonrası kontrole göre daha yüksek kırmızı renk performansı elde edilmiştir. Örneğin; küre sınır elemanı üretimlerinde en iyi kırmızı renk performansına ağırlıkça %8.3 pulverize kırmızı çamur katkılı beton ile ulaşılmıştır. Çöp kovası üretiminde ise ağırlıkça %4.15 pulverize kırmızı çamur ile ağırlıkça %4.15 ticari kuvars esaslı kırmızı agreganın kullanıldığı beton karışımında en iyi kırmızı renk elde edilmiştir. Kırmızı çamurun agrega olarak kullanımının ürünlerin mekanik özelliklerine olumsuz bir etkisi olmadığı saptanmıştır.

--Kırmızı çamur içeren parke taşlarının renk performanslarının 1 yıllık süre içerisinde güneş ışığı ve/veya iklim koşullarına bağlı olarak -10°C ve +40°C sıcaklıklarında dayanıklılığı araştırılmış, yapılan renk ölçümlerinden kırmızı çamur ikameli renkli beton ürünlerin kırmızı renk özelliklerinin, kış koşullarında değişmediği, yaz koşullarında ise

güneş ışığından az miktarda etkilendiği belirlenmiştir. Ancak, parke taşlarının kırmızı renk özelliklerinin değişik nem koşullarında ve UV etkisine maruz bırakılması durumunda etkilenme derecesi araştırılmalıdır.

-Bu çalışmada; başlangıçta tehlikeli bir atık olan Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş ham kırmızı çamurunun harç numune, parke taşı, bordür taşı, çöp kovası ve küre sınır elemanı üretiminde kullanılmasının çevreye olan etkisi de araştırılmış, bu ürünlerdeki toplam çözünen katı madde miktarının **“Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY)” Ek-2 Atıkların Düzenli Depolanabilmesi için kabul kriterleri- Tehlikesiz Atıkların Depolanabilme Kriterlerine göre II. Sınıf depolama tesisleri için sınır değerlerine göre;** uygun olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak; Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş’den temin edilen kırmızı çamurun başlangıçta tehlikeli bir atık olduğu, ancak beton üretiminde kullanıldığında tehlikeli olmaktan çıktığı, farklı iklim koşullarında (yağmur sularının ürüne ve oradan toprağa sızması gibi) kullanılması durumunda çevreye zarar vermeyeceği ve tehlikesiz atıkların depolanabilme kriterlerine göre depolanmış olacağı tespit edilmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş'den temin edilen ve alüminyum endüstrisinin atığı durumunda olan kırmızı çamurun beton üretiminde renklendirici pigment ve filler olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla; Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş'den %21.53 nemli olarak temin edilen atık ham kırmızı çamur; kurutma, pulverizasyon ve kalsinasyon ön işlemlerinden geçirilmiştir. Ham kırmızı çamur, pulverize kırmızı çamur, 600°C, 700°C ve 800°C'de kalsine kırmızı çamur olmak üzere 5 çeşit kırmızı çamurun karakterizasyon testleri yapılmıştır.

-Ham kırmızı çamurun yarı-kantitatif element analizi (XRF) sonucunda elde edilen ana bileşenler %30.37 Fe_2O_3 , %21.08 Al_2O_3 ve %15.58 SiO_2 , 950°C'deki kızdırma kaybı %17.75 olarak belirlenmiştir.

-Ham kırmızı çamurun mineralojik analizinde (XRD) hematit (Fe_2O_3), sodalit (hidrosikankrinit) ($\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), kalsit (CaCO_3), gipsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), ulvospinel (Fe_2TiO_4), rutil (TiO_2) ve kristobalit (SiO_2) bileşikleri tespit edilmiştir.

-600°C, 700°C ve 800°C sıcaklıklarında kalsine edilmiş kırmızı çamur içerisinde; hematit, sodalit, rutil, kalsit ve kristobalit fazları belirlenmiş, 800°C'de kalsit fazının parçalanması sonucu kalsiyum oksit fazı tespit edilmiştir.

-Ham ve pulverize kırmızı çamurların sırasıyla özgül ağırlığı 3.04 g/cm³, 2.86 g/cm³, BET yüzey alanları 28.38 m²/g, 24.68 m²/g, tane boyutları ise 2.90 µm (d₅₀) ve 4.28 µm (d₅₀) olarak belirlenmiştir. 600°C, 700°C ve 800°C sıcaklıklarında kalsine edilmiş kırmızı çamurların sırasıyla özgül ağırlıkları 3.10 g/cm³, 3.07 g/cm³, 2.84 g/cm³, BET yüzey alanları 35.01 m²/g, 31.31 m²/g, 24.62 m²/g, tane boyutları ise 2.67 µm (d₅₀), 2.75 (d₅₀) ve 3.46 µm (d₅₀) olarak belirlenmiştir. Çamurun pulverize edilmesinin ve kalsinasyon işleminin tane büyüklüğünü artırdığı tespit edilmiştir.

-Ham kırmızı çamurun, 100 ml/dk akış debisine sahip kuru hava atmosferinde 10°C/dk ısıtma hızı, 25°C-900°C sıcaklık koşullarında gerçekleştirilen DTA/TG analizinde toplam ağırlık kaybının %11.52 olduğu tespit edilmiştir.

-Ham kırmızı çamurun FTIR analiz sonucu, gipsit fazına ait hidroksil bağları, serbest H₂O, kalsit fazı içerisindeki CaO bileşiği, Si-O, Al⁺³-O⁻², Fe⁺³-O⁻² bandları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların XRD, XRF ve DTA/TG sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür.

-Kırmızı çamurların CIE L*a*b* verileri değerlendirildiğinde; a* ve b* değerleri pozitif olduğundan koordinat ekseninde kırmızı ve sarı renk bölgesinde, L* değerleri 0 ile 100 arasında ortada kaldığından orta koyulukta denebilir. Kalsine kırmızı çamurların a* ve b* değerlerine göre, ham ve pulverize kırmızı çamura göre daha kırmızı ve sarı renge sahip olduğu görülmüş, en iyi kırmızı renge 700°C'de kalsinasyon sonrası ulaşılmıştır.

-Ham kırmızı çamurun ÇNAEM'de gerçekleştirilen radyoaktivite ölçüm sonuçlarına göre; **radyoaktif** olmadığı görülmüştür.

-Atık ham kırmızı çamur, kostik içermesinden dolayı "Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmeliği (AYGEİY)" limit değerlerine göre değerlendirilmiş ve bu çalışmada kullanılan kırmızı çamur içerisindeki inorganik faz miktarının limit değerini aşmasından dolayı "**tehlikeli atık**" olduğu belirlenmiştir.

-Ham kırmızı çamurun elementel analiz sonuçlarına göre; ASTM 618-072 standardına göre SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > %70 koşulunu sağlamadığından puzolan bir malzeme olmadığı belirlenmiştir.

-Kırmızı çamurun puzolanik aktivite özelliğinin yetersiz, ancak tane büyüklüğünün çimentoya göre 100 kat daha ince olması nedeniyle harç numuneleri üretiminde filler malzeme olarak çimento yerine ağırlıkça %10 ikame edilmesine karar verilmiştir. Üretilen harç numunelerinin eğme ve basma dayanımlarının zamanla arttığı tespit edilmiştir. Buna göre; harç numunelerinde 28. günde en yüksek eğme dayanımı 7.11 MPa (K7-10, çimento yerine ağırlıkça %10 700°C'de kalsine kırmızı çamur ikameli) iken 90. günde en yüksek eğme dayanımı 7.34 MPa (K6-10, çimento yerine ağırlıkça %10 600°C'de kalsine kırmızı çamur ikameli); 28. Günde en yüksek basma dayanımı ise 50.50 MPa (K6-10) iken 90. günde en yüksek basma dayanımı 61.40 MPa (H-10, çimento yerien ağırlıkça %10 ham kırmızı çamur ikameli) olarak belirlenmiştir. Bunun

sebebi; çimentoya 100 kat daha ince olan kırmızı çamurun filler etkisi göstermesinden kaynaklanmıştır.

-Ham, pulverize ve farklı sıcaklıklarda kalsine edilen 5 farklı kırmızı çamurun ticari pigment ile birlikte kullanıldığı parke taşı ve bordür taşı deneylerinde en belirgin kırmızı renk performansına BK6-4 (ağırlıkça %0.13 ticari pigment + %0.37 600°C'de kalsine kırmızı çamur katkılı beton) numunesi ile ulaşılmıştır.

-Ham, pulverize ve farklı sıcaklıklarda kalsine edilen 5 farklı kırmızı çamurun parke taşı ve bordür taşı üretim deneylerinde pigment olarak tek başına veya ticari pigment ile birlikte kullanımının, ürünlerin mekanik özelliklerine olumsuz bir etkisi bulunmadığı belirlenmiştir.

-Pulverize kırmızı çamurun ticari agrega ile birlikte kullanıldığı şehir mobilyaları beton ürün gruplarından küre sınır elemanı üretim deneylerinde en belirgin kırmızı renk performansına BP-4 (ağırlıkça %4.15 ticari kuvars esaslı kırmızı agrega + %4.15 pulverize kırmızı çamur katkılı beton) numunesi ile ulaşılmıştır.

-Pulverize kırmızı çamurun şehir mobilyaları üretim deneylerinde agrega olarak kullanımının ürünlerin mekanik özelliklerine olumsuz bir etkisi bulunmadığı belirlenmiştir.

-Başlangıçta tehlikeli bir atık olan kırmızı çamurun; harç numunelerinde filler olarak çimento yerine ağırlıkça %10 ikame, parke taşı, bordür ve şehir mobilyaları üretiminde, ticari Bayer 130G pigmenti ve kuvars esaslı agrega yerine kullanılması sonucu geliştirilen ürünler "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğine (ADDDY)" göre değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmede, kırmızı çamurun başlangıçta tehlikeli bir atık olmasına rağmen, harç numune, parke taşı, bordür ve şehir mobilyaları ürünleri bileşimleri içerisinde kullanıldığında, geliştirilen ürünün kullanım sırasında farklı iklim koşullarında (yağmur sularının ürüne ve oradan toprağa sızması gibi) **çevreye zarar vermeyeceği, tehlikesiz atıkların depolanabilme kriterlerine göre kullanılarak, depolanabileceği ve tehlikesiz olduğu belirlenmiştir.**

-Kırmızı çamur içeren parke taşlarının renk performansları güneş ışığı ve/veya iklim koşullarına bağlı olarak etkilenme derecesi +40°C ve -10°C sıcaklıklar için 1 yıllık süreye karşılık gelen 37 çevrimden oluşan program ile iklimlendirme kabininde simüle edilerek

kontrol edilmiştir. Ürünlerin renkleri, ömür performans testi öncesi ve sonrası ölçülerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; kırmızı çamur ikameli renkli beton ürünlerin, ülkemiz mevsim sıcaklıklarında 1 yıl süre ile kullanımlarında kırmızı renk özelliklerinin, kış koşullarında değişmediği, yaz koşullarında ise güneş ışığından az miktarda etkilendiği belirlenmiştir. Ancak, parke taşlarının değişik nem koşullarında ve UV etkisine maruz bırakılması sonucu kırmızı renk özelliklerinin etkilenme derecesi belirlenmelidir.

-İSTON A.Ş’de her yıl yaklaşık olarak 15000 kg ticari pigment parke taşı, bordür ve kent mobilyalarında renklendirici olarak kullanılmak üzere temin edilmektedir. Söz konusu kırmızı granül boyanın temin yeri yurtdışı yaklaşık temin maliyeti ise kilogramı için 2 Eurodur. Özellikle renkli parke taşı ve bordürde kullanılan kırmızı pigment için her yıl yaklaşık 700000 TL yurtdışına çıkmaktadır. Kırmızı çamurun sadece renklendirme malzemesi olarak kullanılması durumunda bile her yıl 700000 TL tasarruf edilmiş olacak ve endüstriyel atık bir malzemenin çevreye vereceği olumsuz etkiler engellenmiş olacaktır.

-2013 yılı verilerine göre; Dünya’da yılda 44 milyon ton alüminyum metali üretimine karşılık 88 milyon ton kırmızı çamur atığı açığa çıkmaktadır. Kırmızı çamur tehlikeli atık sınıfına girmektedir. Bu araştırmada; Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş’den temin edilen atık kırmızı çamur çeşitli yapı malzeme üretiminde kullanılarak, tehlikeli atık olma özelliğini kaybetmiştir. Böylece, büyük çevre sorunu haline gelen Seydişehir kırmızı çamur endüstriyel atığının inşaat endüstrisinde alternatif pigment ve agrega olarak kullanım potansiyeli belirlenmiş, çalışma sonunda ticari ürüne göre benzer özelliklerde atık kırmızı çamur ikameli renkli şehir mobilyaları, parke taşı, bordür taşı gibi şehir mobilyaları üretimleri gerçekleştirilmiştir. Alüminyum üretimindeki artışa paralel olarak her geçen gün artan oranlarda ortaya çıkan Seydişehir kırmızı çamur atığının, renkli beton üretiminde kullanımı ile ekonomik ve ekolojik olarak değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Gerçekleştirilen çalışma ile doğada depolanan atık bir malzemenin önemli kısmı bertaraf edilmiş, çevresel dengenin korunmasına yardımcı olunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Etibank, (1992). Alüminyum Endüstrisi, Etibank Yayınları, 1–15, Seydişehir.
- [2] DPT, (2001). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyon Raporu Metal Madenler Alt Komisyonu Boksit Çalışma Grubu Raporu, 2625- ÖİK:636, 3–5, Ankara.
- [3] Mohapatra, B. K., Rao, M. B. S., Bhima R. R. ve Paul, A. K., (2000). "Characteristics of Red Mud Generated at NALCO Refinery", Light Metals: 161-165.
- [4] Liu, S., Reimers, R. S. ve Yang, Y., (1996). "Results of the Analysis on Samples From Boring Holes Drilled in Red Mud Lake 1", Tulane University to Kaiser Aluminium & Chemical Corporation, February 5.
- [5] ABARE-Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, (1995). Quarterly Mineral Statistics, 2.
- [6] Budnikov, P. P. ve Guzev, V. K., (1936). "Chem Abstract", 30, 6526.
- [7] Santt, R., (1968). "Chem Abstract", 70, 117835u.
- [8] Horishima, T. ve Fujii, M., (1973). "Chem Abstract", 79, 69806r.
- [9] Siegfried, W., (1973). "Chem Abstract", 80, 51836m.
- [10] Youh, C. C., (1974). "Chem Abstract", 80, 6475g.
- [11] Pera, J., (1992). "Conversion of Red Muds Into Pozzolans", Materials Research Society Symposium Proceedings, 245: 55-61.
- [12] Singh, M., Upadhayay, S. N. ve Prasad, P. M., (1996). "Preparation of Special Cements from Red Mud", Waste Management, 16 (8) : 665-670.
- [13] Pera, J., Boumaza, R. ve Ambroise, J., (1997). "Development of a Pozzolanic Pigment from Red Mud", Cement and Concrete Research, 27 (10) : 1513-1522.

- [14] Tsakiridis, P.E., Leonardou, S.A. ve Oustadakis, P., (2004). "Red Mud Addition in the Raw Meal for the Production of Portland Cement Clinker", *Journal of Hazardous Material*, 116 (1-2) : 103–110.
- [15] Chuxia, L. ve Yonggui, L., (2006). "Characterization of Red Mud Derived from a Combined Bayer Process and Calcining Method for Alumina Refining", *Chinese Journal of Geochemistr*, 25.
- [16] Cablik, V., (2007). "Characterization and Applications of Red Mud from Bauxite Processing", *Gospodarkasurowcami Mineralnymi*, 23, 4.
- [17] Vangelatos, G., Angelopoulos, N. ve Boufounos, D., (2009). "Utilization of Ferroalumina as Raw Material in the Production of Ordinary Portland Cement", *Journal of Hazardous Materials*, 168 : 473–478.
- [18] Zhihua, P., Yanna, Z. ve Zhongzi, X., (2009). "Strength Development and Microstructure of Hardened Cement Paste Blended with Red Mud", *Journal of Wuhan University of Technology*, 24 (1) : 161-165.
- [19] Daniel, V.R., João, A.L. ve Marcio, R.M., (2011). "Potential Use of Natural Red Mud as Pozzolan for Portland Cement", *Materials Research*. 14 (1) : 60-66.
- [20] Senff, L., Hotza, D. ve Labrincha, J.A., (2011). "Effect of Red Mud Addition on the Rheological Behaviour and on Hardened State Characteristics of Cement Mortars", *Construction and Building Materials*, 25 : 163–170.
- [21] Xiaoming, L., Na Z., Henghu, S., Jixiu, Z. ve Longtu, Li., (2011). "Structural Investigation Relating to the Cementitious Activity of Bauxite Residue-Red Mud", *Cement and Concrete Research*, 41 : 847–853.
- [22] Tauber, E., Hill, R. K., Crook, D. N. ve Murray, M. J., (1971). Red Mud Residues from Alumina Production as a Raw Material for Heavy Clay Products, *J. Aust Ceram Soc.*, 7 (1) : 12-17.
- [23] Gözmen, T., Yüzer, H., Kalafatoglu, E. ve Balkas, T., (1983). "Kırmızı Çamurun Değerlendirilmesi", *TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü Kimya Araştırma Bölümü*, Gebze.
- [24] Kara, M., Ekerim, A. ve Emrulloğlu, Ö.F., (1995). "Kil İlaveli Kırmızı Çamurun İnşaat Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması", *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, TMO, 29-30 Kasım 1995, Ankara, 161-169.
- [25] Kara, M., Emrulloğlu, Ö. F., Göktaş, A. A., Baykara T., Günay, V. ve Özkan, T., (1996). "Çevreye Zararlı Atıkların Malzeme Olarak Değerlendirilmesi", *Metal Dünyası Dergisi*, 35 : 33-39.

- [26] Kolesnikova, M.P., Saigofarov, S.S., Nikonenko, E.A., Kalinichenko, I.I., Kochneva, T. P. ve Surkova, N. A. (1998). "The Use of Red Mud for Brick Coloring", Glass and Ceramics, 55 : 3–4.
- [27] Yang, J. ve Xia, B. (2008). "Development of Unsintered Construction Materials from Red Mud Wastes Produced in the Sintering Alumina Process", Construction and Building Materials 22 : 2299–2307.
- [28] Kara, M. ve Emrullahoğlu, Ö. F., (1994). "Seydişehir Kırmızı Çamurunun Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi", II. Uluslararası Seramik Kongresi Bildiri Kitabı, 181-189, İstanbul.
- [29] Haff, R. C., (1951). "Recovery of Alumina from Alumina Bearing Ores", US. Patent, 2, 551, 944, May.
- [30] Shimano, S. ve Kohno, T., (1943). "Sulfuric Acid Method for Obtaining Pure Alumina Form Its Ores", J. Electrochem. Assoc, 37, 3231.
- [31] Plygunov, A. S., Zapolsky, A. K., Saf E.K. ve Bolkvskaya, A.I., (1976). "Study of the Mineralogical Composition of Bauxites From the Vysokopolku Deposits and Their Slimes After Sulfuric Acid Leaching", Ukr. Khim. Zh., 42 (5) : 488-493.
- [32] Cohen, J. ve Adjeman, A., (1979). "Method of Obtained Pure Alumina by Acid Attack on Aluminous Minerals Containing Other Elements", US. Patent, 4, 177, 242, December.
- [33] Sutyrin, Y. E., (1981). "Recovery of Alumina from Low-quality Ores", 256 (4) : 920-922.
- [34] Yang, K., ve Ready, J. D., (1982). "Color Precursor Removal from Detergent Alkyl-Benzenes", US. Patent, 4.468.476, June.
- [35] Rand, D., (1986). "Aluminous Abrasives Manufacturing", European Patent, 195.491, September.
- [36] Vachon, P., Tyagi, R., D., Auclair, J. C. ve Wilkinson, K. J., (1994). "Chemical and Biological Leaching of Aluminium from Red Mud", Environmental Science and Technology, 28 (1) : 26-30.
- [37] Kasliwal, P. ve Sai Pst, (1999). "Enrichment of Titanium Dioxide in Red Mud: A Kinetic Study", Hydrometallurgy 53 (1) : 73-87.
- [38] Sayan, E. ve Bayramoğlu, M., (2000). "Statistical Modeling of Sulfuric Acid Leaching of TiO₂ from Red Mud", Hydrometallurgy 57 : 181-186.
- [39] Aksu, S., (2001). Kırmızı Çamur Bileşenlerinin Hidroklorik Asit Çözeltisindeki Çözünürlükleri, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- [40] Sayan, E. ve Bayramoğlu, M., (2004). "Statistical Modeling and Optimization of Ultrasound-Assisted Sulfuric Acid Leaching of TiO_2 from Red Mud", Hydrometallurgy 71 : 397-401.
- [41] TS EN 197-1, (2012). Genel Çimentolar: Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- [42] Taşkın, C., (1996). Türkiye Çimento Hammadde Kaynakları, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, İstanbul.
- [43] Postacıoğlu, B., (1975). Yapı Malzemesi Dersleri, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, İ.T.Ü Matbaası, Gümüşsuyu.
- [44] Leckebush, R., (1984). "Türkiye'deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı Üzerine İncelemeler", Teknik Rapor, TürkiyeÇimento Müstahsilleri Birliği Yayını, Ankara.
- [45] John, D.A., Poole A.B. ve Sims I., (1998). Concrete Petrography, A Handbook of Investigative Techniques, New York, Toronto.
- [46] Küçük, B., (2000). "Betonun Dayanım ve Durabilitesini Sağlayan Parametreler", Pamukkale University Engineering College Journal of Engineering Sciences, 6 (1) : 79- 85.
- [47] Akakın, T., Zengin, H. ve Öztürk, A. (2011). Hazır Beton Sektörü ve Beton Sektöründeki Kullanımdaki Gelişmeler, Hazır Beton Kongresi, 20-22 Ekim 2011, İstanbul.
- [48] Atasoy, A., (2007). "The Comparison of the Bayer Process Wastes on The Base of Chemical and Physical Properties", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 90 (1) : 153–158.
- [49] Chandra, S. (1997). Waste Materials Used in Concrete Manufacturing, William Andrew Publishing/Noyes.
- [50] T.C. Resmi Gazete, Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (26927), 05.07.2008.
- [51] ASTM C 1260-07, (2007). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [52] Ramachandran, V.S., Paroli, R.M., Beaudoin, J. J. ve Delgado, A.H., (2002). Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials, National Research Council Canada, Ottawa, Canada.

- [53] TS 2824 EN 1338, (2005). Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları-Gerekli Şartlar ve Deney Metotları, TSE, Ankara.
- [54] TS 436 EN 1340, (2005). Zemin Döşemesi İçin Beton Bordür Taşları – Gerekli Şartlar ve Deney Metotları, TSE, Ankara.
- [55] TS 5358 EN 12608, (2004). Sert Polivinilklorür (PVC-U) Profiller – Pencere ve Kapıların Fabrikasyon Olarak İmalâtında Kullanılan – Sınıflandırma, Özellikler ve Deney Yöntemleri, TSE, Ankara.
- [56] <http://www.meteoroloji.gov.tr>, 23.01.2013.
- [57] T.C. Resmi Gazete, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (27533), 26.03.2010.
- [58] Özbek, K., Çakı, M. ve Ay, N., (2001). “Pişmiş Toprak Bünyelerde CaO ve Fe₂O₃’ün Etkileri Yapı Tuğlalarında Renk Oluşumu”, I.Uluslararası Pişmiş Toprak Sempozyumu, 145-151, Eskişehir.



(a) Kırmızı çamurun farklı yöntemlerle depolanma şekilleri



(b) Fransa'da kırmızı çamurun depolanma şekilleri

Şekil A. 1 Kırmızı çamurun depolanma şekilleri

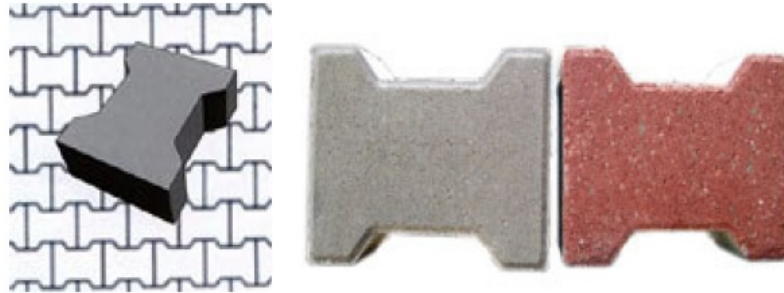


(a) Çakıl (sol) kırma taş (sağ) doğal agregalar



(b) Genleştirilmiş kil (sol), cüruf (sağ) yapay agregalar

Şekil A. 2 Doğal ve yapay agregaların görünümü



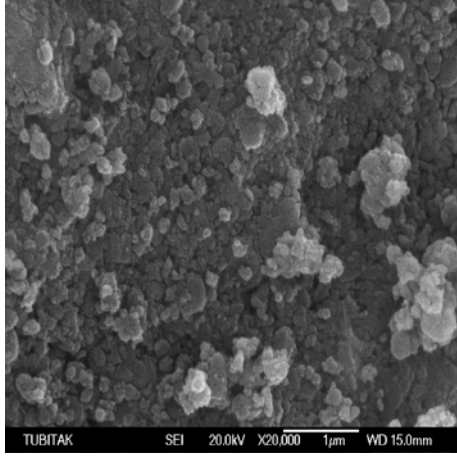
Şekil A. 3 Parke taşı görünümü



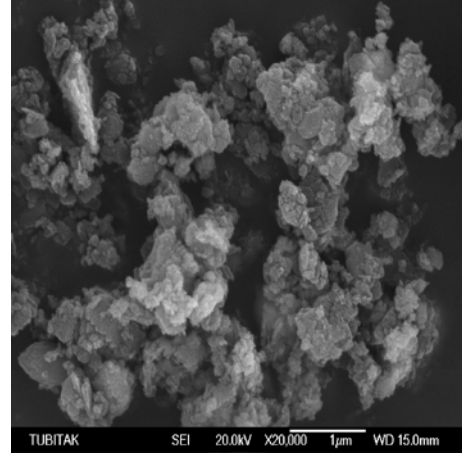
Şekil A. 4 Bordür taşı görünümü



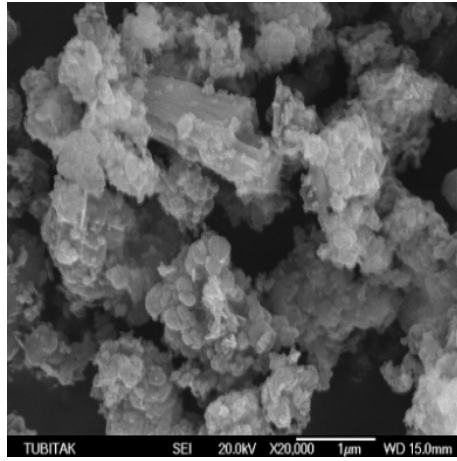
Şekil A. 5 Ham kırmızı çamurun kurutma prosesi öncesi ve sonrası görüntüleri



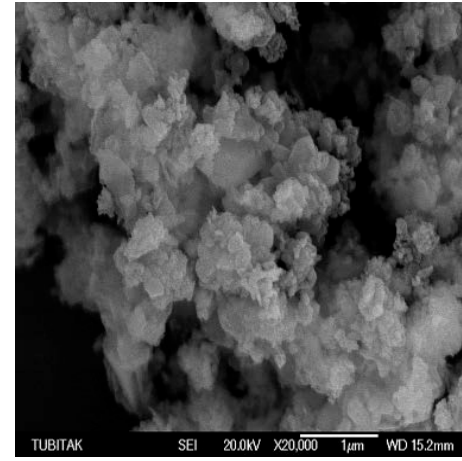
(a)



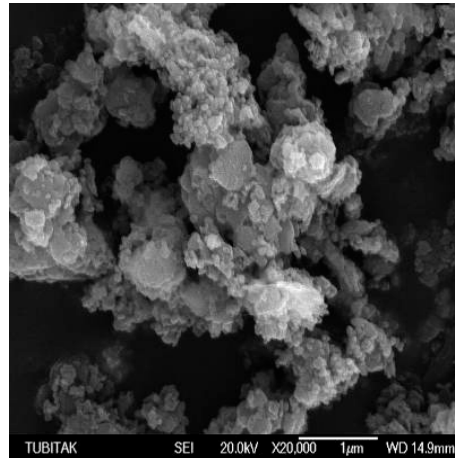
(b)



(d)



(e)



(f)

Şekil A. 6 SEM mikroyapı görüntüleri (a) H, (b) P, (c) K6, (d) K7, (e) K8

RILEM kumu ilave
edilen kısım



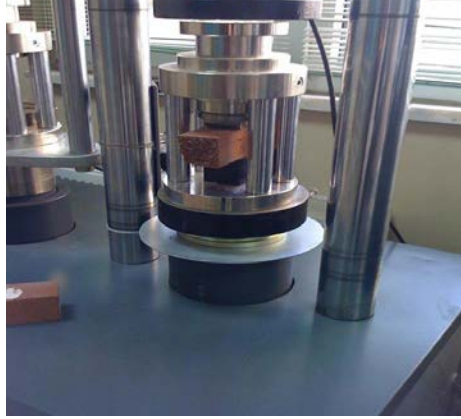
Şekil A. 7 Harç karışımlarının karıştırıldığı karıştırıcı



Şekil A. 8 Harç numunelerinin hazırlandığı kalıp düzeneği



Şekil A. 9 Eğme dayanım cihazı



Şekil A. 10 Basma dayanım cihazı



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil A. 11 Üretim sonrası parke taşları görünümü (a) BCP-1, (b) BH-2, (c) BH-3, (d) BH-4, (e) BH-5, (f) Parke taşlarının shrink ile kaplanması



Şekil A. 12 Üretim sonrası bordür taşı görünümü (a) BCP-1, (b) BH-2, (c) BH-3, (d) BH-4, (e) BH-5



Şekil A. 13 Şehir mobilyaları üretim görüntüsü



Şekil A. 14 Parke taşlarının iklimlendirme kabineye yerleştirilmesi

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Yasemin KILIÇ
Doğum Tarihi ve Yeri :21/04/1981, Rize
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :yasemin.demirci@tubitak.gov.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Kimya Mühendisliği	Ankara Üniversitesi	2006
Lisans	Kimya Mühendisliği	Ankara Üniversitesi	2003
Lise	Fen-Matematik	Gebze Anadolu Lisesi	1999

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2008	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü	Araştırmacı

YAYINLARI

Makale

1. Y.Demirci, H. Bağlama, V. Günay,” Kısmen Stabilize-ZrO₂ (PSZ) Seramikleri”, Metal Dünyası Dergisi, Sayı 208, Yıl 18, 99-102,(2010).

2. Y.Demirci, E.Günay, "Crystallization Behaviour and Properties of Cordierite Glass-Ceramics With Added Boron Oxide", Journal of Ceramic Processing Research, 12(3), 352-356 (2011). SCI
3. E. Günay, E. G. Arslan, Y.Kılıç, N. Yılmaz, M. Kara, M.Marşoğlu, "The utilization of waste red mud for colouring of city furnitures", International Journal of Advances In Engineering Science and Technology, Vol 2, Number 1, 29-34, (2013).
4. Y. Kılıç, E. Günay, M. Marşoğlu, "Atık Kırmızı Çamur Kullanılarak Üretilen Renkli Beton Ürünlerin Çevreye Uyumluluk Performansının İncelenmesi", Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 3, (2013).

Bildiri

- 1.Y.Demirci, T. Baykara, H. Bağlama, V. Günay, "MgO-ZrO₂ Döküm Yolluklarının Üretim Parametrelerinin İncelenmesi", IMMC'15 – 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 2185-2192, İstanbul, (2010).
2. Y. Demirci, V. Günay, "Sır Oluşumu ve Gelişiminin Isıl Mikroskop İle İncelenmesi", IMMC'15 – 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 2147-2152, İstanbul, (2010).
- 3.Y. Öztürk, Y. Demirci, M. Sarıgüzel, E. Günay, "X-Işını Difraksiyonu ile Haddelenmiş Bakır Numunesine Ait Tekstür Ölçümü", IMMC'15 – 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 538-550, İstanbul, (2010).
4. Y. Demirci, Ö. Gülsoy, Ü. Yurdakul, M. Sert, V. Günay, "Si₃N₄ İle Bağlanan SiC (SN-SiC) Üretim Parametreleri ve Özellikleri", IMMC'15 – 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 2291-2300, İstanbul, (2010).
5. E. Günay, M. Sarıgüzel, Y. Demirci, Y. Öztürk, "Rietveld Metoduyla Böhmit Faz Geçişlerinin Kantitatif Olarak Belirlenmesi", IMMC'15 – 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 509-518, İstanbul, (2010).
6. Y.Demirci, Y. Öztürk, M. Sarıgüzel, E. Günay, "Cam Yüzeyindeki Krom İnce Filminin X-Işını Difraksiyonu ile Reflektivite Analizi", IMMC'15 – 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 519-528, İstanbul, (2010).
7. M.Sarıgüzel, Y. Öztürk, Y.Demirci, E. Günay, " X-Işını Difraksiyonu ile Tungsten Malzemede Kalıntı Gerilmesi Ölçümü", IMMC'15 – 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 529-537, İstanbul, (2010).
8. Y. Kılıç, E.G. Arslan, M. Kara, N. Yılmaz, M. Marşoğlu, E. Günay, " Utilization of Red Mud as a Pigment In The Production of Paving Stone, Curb Stone And Street Furniture", SERES'11- II. International Ceramic, Glass, Porcelain, Enamel, Glaze and Pigment Congress, Eskişehir, (2011).
9. Y. Kılıç, E. Günay, H. Bağlama, V. Günay, " Production Of Mg-PSZ Foundry Nozzles By Injection Moulding", SERES'11- II. International Ceramic, Glass, Porcelain, Enamel, Glaze and Pigment Congress, Eskişehir, (2011).
10. Y.Kılıç, M.Sarıgüzel, Y.Öztürk, E.Günay, "Sintering Behaviour of Sepiolite by Optical Dilatometer", IMMC'16. – 16. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, (2012).

11. Y.Kılıç, E.Günay, H.Bağlama, V.Günay, "The effect of MgO Additions on the Sintering Behaviour of Dry-pressed Mg-PSZ", IMMC'16. – 16. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, (2012).
12. Y. Kılıç, H. Bağlama, V. Günay, "Characterization of High Alumina Castable Refractory Materials", IMMC'16. – 16. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, (2012).
13. Y. Kılıç, Y. Öztürk, M. Sarıgüzel, V. Günay, "Investigation of Microstructure-Property Relations in HP-SiC Armour ceramic", IMMC'16. – 16. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, (2012).
14. Y.Demirci, G.M. Lüle, H. Bağlama, V. Günay,"Mg-PSZ Döküm Yolluklarının Özellikleri", 3. Endüstriyel Fırınlar ve Refrakter Sempozyumu, Sakarya, 176-174, (2010).
15. Y.Kılıç, E.Günay, M.Kara, E.G.Arslan, N.Yılmaz, M.Marşoğlu, "Kırmızı Çamurun Renkli Beton Üretiminde Pigment Olarak Kullanımı", Beton 2011 Hazır Beton Kongresi, 449-458, İstanbul, (2011).

Rapor

1. V. Günay, Y. Öztürk, E. Günay, Y. Kılıç, "5095506- ZrO₂ Esaslı Döküm Yolluklarının (Nozül) Üretim Parametrelerinin Araştırılması," Proje Sonuç Raporu, Aralık, (2010).
2. V. Günay, H.İ. Bakan, E. Günay, Y. Demirci, Y. Öztürk, "5085510-SiC Esaslı Seramik Fırını Araba Malzemelerinin Geliştirilmesi", Proje Sonuç Raporu, Ağustos, (2010).
3. E. Günay, M Kara, Y. Kılıç, B.K. Vatansever, "5095516 -Endüstriyel Atıklardan Ticari Ürünlere" Projesi Sonuç Raporu, Mayıs (2011).
4. E. Günay, M. Kara, Y. Kılıç, B.K. Vatansever, Y. Öztürk, "5105513- Asfalt Kaplamalar İçin Koruma Amaçlı ve Çatlak ve Ek Yeri Onarım Malzemesi Geliştirilmesi Konusunda Destek ve Danışmanlık Hizmeti Verilmesi", Proje Sonuç Raporu, Şubat, (2012).

Proje

1. 1- Malzeme Enstitüsü Teknolojik Destekler Projesi, Destekleyici: Kamu, Özel sektör, Şahıslar, 2010-...., Araştırmacı.
2. SiC Esaslı Seramik Fırını Araba Malzemelerinin Geliştirilmesi, 2008-2010, Araştırmacı.
3. DPT-Kompozit İlave Add On Zırh ve Koruma Sistemleri Teknolojisi: Geliştirme ve Uygulamalar, Destekleyicisi: DPT, 2008-2010, Araştırmacı.
4. ZrO₂ Esaslı döküm Yolluklarının Üretim Parametrelerinin Araştırılması, 2009-2010, Araştırmacı.
5. Endüstriyel Ürünlerden Ticari Atıklara, EUREKA no. E!3824 acronym: INWASCOMP- From Waste Materials to Commercial Products projesiyle bağlantı olarak TEYDEB, Destekleyicisi: İSTON A.Ş, 2009-2011, Araştırmacı.

6. Asfalt Kaplamalar için Koruma Amaçlı Çatlak ve Ek Yeri Onarım Malzemesi Geliştirilmesi Konusunda Destek ve Danışmanlık Hizmeti Verilmesi, Destekleyicisi: İSFALT A.Ş., 2010-2012, Araştırmacı.

ÖDÜLLERİ

1. 2005-2006: TÜBİTAK Bilim Adamı Yetiştirme Grubu Yüksek Lisans Bursu (BAYG)
2. 2003: Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölüm Birincisi