

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖKÜMHANELERDEN KAYNAKLANAN ATIKLARIN
UYGUN GERİ KAZANIM/TEKRAR KULLANIM
VE BERTARAF YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Hatice Merve BAŞAR

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖKÜMHANELERDEN KAYNAKLANAN ATIKLARIN
UYGUN GERİ KAZANIM/TEKRAR KULLANIM
VE BERTARAF YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Hatice Merve BAŞAR
(506062005)**

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nuran DEVECİ AKSOY

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506062005 numaralı Doktora Öğrencisi **Hatice Merve BAŞAR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**DÖKÜMHANELERDEN KAYNAKLANAN ATIKLARIN UYGUN GERİ KAZANIM/TEKRAR KULLANIM VE BERTARAF YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Nuran DEVECİ AKSOY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yüksel GÜVENİLİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Esen BOLAT
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kadir ALP
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nilüfer HİLMİOĞLU
Kocaeli Üniversitesi

Teslim Tarihi : **11 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **21 Haziran 2012**

Rahmetli Ağabeyim Mustafa Emre BAŞAR'ın anısına,

ÖNSÖZ

Marmara Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir dökümhane tesisinde demir döküm işlemi sırasında yüksek miktarlarda ortaya çıkan ve halen düzenli depolama yoluyla bertaraf edilen atık döküm kumunun uygun geri kazanım/tekrar kullanım ve bertaraf yöntemlerinin belirlenmesi ve çalışma sonuçlarının "üniversite-sanayi işbirliği" çerçevesinde sanayide uygulamaya aktarılabilirliğinin araştırılması amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma sırasında değerli katkılarını esirgemeyen Sevgili Hocam Sn. Prof.Dr. Nuran DEVECİ AKSOY'a şükranlarımı sunarım. Tez İzleme süresince vermiş oldukları destekten ötürü Sn. Prof.Dr. Yüksel AVCIBAŞI GÜVENİLİR'e, Sn. Prof.Dr. Esen BOLAT'a, İTÜ Kimya Mühendisliği öğretim üyelerine ve eğitimimde katkısı olan tüm hocalarıma çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımın devam etmesinde TÜBİTAK MAM altyapısını kullanmama olanak sağlayan Çevre Enstitüsü Eski Müdür V. Sn. Doç.Dr. Mustafa TIRIS ve Enstitü Müdür V. Sn. Dr. Ahmet BABAN'a ve başta H. Rahmi YILMAZ, Gülcan ENGİNSOY, İlker BAKIR, Coşkun DUMAN, Turgay AKYOL, Kenan SAPMAZ, Özcan İNAL, Deniz ÇALIŞKAN, Sedat ÇELİK, Baki KALAY, Recep KARADEMİR, Şenol SEVEN, Osman BİLİM, Cem BERK ve Emre KARABEYOĞLU olmak üzere TÜBİTAK MAM Çevre ve Malzeme Enstitüleri laboratuvar personeline ayrı ayrı şükranlarımı sunarım.

İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş. altyapı imkanlarından faydalanmamı sağlayan Sn. Giray ASLAN, Sn. Filiz ÇETİNKAYA ve Sn. Rıza YEŞİL'e; Türkiye Hazır Beton Birliği Yapı Malzemeleri Laboratuvar Müdürü Sn. Eyüp EREN'e teşekkür ederim.

Çalışma arkadaşlarım Dr. Özgür DOĞAN, Volkan PELİTLİ ve Dr. Burcu UYUŞUR'a vermiş oldukları destekten ötürü çok teşekkür ederim.

Dostluklarını benden esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Berrin BAY ENGİN, Hande GÜRSOY HAKSEVENLER, Dr. Ömer Faruk GÜL ve Dr. Behiye YÜKSEL'e sonsuz teşekkürler.

Her zaman yanımda olan ve daima destek veren çok Değerli Aileme; annem Hülya BAŞAR'a, babam Bilal BAŞAR'a, canım kızkardeşim Melek Selcen BAŞAR'a, dayım İbrahim YÜKSEL'e ve dedem Şükrü YÜKSEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2012

Hatice Merve Başar
(Kimyager)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
SEMBOL LİSTESİ	xxiii
ÖZET.....	xxv
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Anlam Ve Önemi	1
1.2 Çalışmanın Amacı Ve Kapsamı	4
2. TEHLİKELİ ATIKLAR	5
2.1 Tehlikeli Atık Nedir?	5
2.2 Tehlikeli Kabul Edilen Atıkların Özellikleri.....	5
2.3 Tehlikeli Atık Yönetimi	7
2.4 Tehlikeli Atık Bertaraf Yöntemleri	9
2.5 Düzenli Depolama Öncesi Tehlikeli Atıklara Uygulanan Ön İşlemler.....	11
3. DÖKÜM ENDÜSTRİSİ.....	17
3.1 Döküm Endüstrisinin Tanımı	17
3.2 Döküm Yöntemleri.....	18
3.3 Döküm Prosesi Temel Adımları.....	20
3.3.1 Kum hazırlama	20
3.3.2 Model yapımı	20
3.3.3 Maça yapımı.....	21
3.3.4 Kalıp hazırlama ve kalıplama	21
3.3.5 Metal ergitme	21
3.3.6 Döküm ve parça alma	22
3.3.7 Temizleme.....	22
3.3.8 Taşlama	23
3.4 Döküm Kumları.....	23
3.4.1 Döküm kumunun özellikleri	23
3.4.2 Döküm kumunun sınıflandırılması	24
3.4.3 Döküm kumunun bileşenleri	26
3.4.4 Dökümhanelerden kaynaklanan atıklar	27
3.4.5 Döküm kumunun yeniden kullanımı ve geri kazanımı	30
3.4.6 Atık döküm kumunun dökümhane tesislerinde tekrar kullanılamama sebepleri	32
3.4.6.1 Tane boyutu dağılımı	32
3.4.6.2 Tane şekli	33
3.4.6.3 Oolitleşme	33
3.4.6.4 Permeabilite.....	34

3.4.6.5 Kohezyon	35
3.4.6.6 Refrakterlik.....	36
3.4.7 Atık döküm kumunun diğer alanlarda değerlendirilme imkanları	36
4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	41
4.1 İmalat Ürünü Uygulamaları.....	41
4.2 Geoteknik Uygulamalar.....	45
4.3 Karayolu İnşaatı Uygulamaları.....	46
4.4 Tarımsal Uygulamalar	47
4.5 Diğer Genel Uygulamalar.....	48
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
5.1 Hammadde Ve Atık Döküm Kumu Karakterizasyonu.....	51
5.1.1 Materyal	51
5.1.2 Yöntem	51
5.2 Atık Döküm Kumunun Geri Dönüşümü/Tekrar Kullanımı	57
5.2.1 Materyal ve yöntem.....	57
5.3 Atık Döküm Kumunun Düzenli Depolanmasına Yönelik Ön İşlemler.....	58
5.3.1 Materyal	58
5.3.2 Yöntem	58
5.3.2.1 Yakma yolu ile kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması.....	59
5.3.2.2 Yıkama yolu ile kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması	60
5.3.2.3 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) yolu ile kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması.....	63
5.4 Atık Döküm Kumundan Geri Kazanım İle Faydalı Ürün Elde Edilmesi.....	66
5.4.1 Materyal	66
5.4.2 Yöntem.....	67
5.4.2.1 Atık döküm kumunun agrega özelliklerinin incelenmesi	67
5.4.2.2 Beton karışımlarının hazırlanması	67
5.4.2.3 Taze betonun özelliklerinin belirlenmesi	69
5.4.2.4 Kalıpların doldurulması.....	72
5.4.2.5 Beton numunelerinin kür edilmesi	73
5.4.2.6 Sertleşmiş betonun özelliklerinin belirlenmesi	74
5.4.2.7 Beton ürünlerin çevreye olabilecek etkilerinin belirlenmesi.....	80
6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA.....	83
6.1 Hammadde Ve Atık Döküm Kumu Karakterizasyon Sonuçları	83
6.1.1 Kısa ve elementel analiz sonuçları	83
6.1.2 Isıl değer analiz sonuçları.....	84
6.1.3 Fiziksel özellikleri belirleme analiz sonuçları.....	84
6.1.4 Kimyasal bileşimi belirleme analiz sonuçları	86
6.1.5 TS EN 12457-4:2004-Sızma (liç) testi sonuçları	91
6.2 Atık Döküm Kumunun Geri Dönüşümü/Tekrar Kullanılmasına Yönelik Yapılan Çalışmalarda Elde Edilen Sonuçlar	96
6.2.1 Atık döküm kumunun dökümhane tesislerinde tekrar kullanılamama sebepleri	96
6.2.1.1 Tane boyutu dağılımı	97
6.2.1.2 Tane şekli	97
6.3 Atık Döküm Kumunun Düzenli Depolanmasına Yönelik Yapılan Ön İşlem Çalışmalarında Elde Edilen Sonuçlar	98
6.3.1 Yakma yolu ile kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması.....	98
6.3.1.1 Atık döküm kumunun ısıl bozunma davranışının TGA ile incelenmesi	98

6.3.1.2 Kül fırınında yakma	98
6.3.2 Yıkama yolu ile kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması	103
6.3.2.1 Atık döküm kumu yıkama suyu deşarj numunesinin "SKKY Tablo 15: Metal Sanayi Atıksularının Alıcı Ortama Deşarj" standardına göre değerlendirilmesi	106
6.3.3 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) yolu ile kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması	106
6.3.3.1 Bağlayıcıların karakterizasyonu	107
6.3.3.2 Atık döküm kumu için laboratuvar ölçekli S/S çalışması	108
6.3.3.3 Portland kalkerli çimento ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S çalışması	109
6.3.3.4 Kalker kireci ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S çalışması	112
6.3.3.5 Portland kalkerli çimento ve kalker kireci ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S çalışması	114
6.4 Atık Döküm Kumundan Geri Kazanım İle Faydalı Ürün Elde Edilmesine Yönelik Yapılan Çalışmalarda Elde Edilen Sonuçlar	117
6.4.1 Atık döküm kumunun "TS 706 EN 12620+A1:2009-Beton Agregaları" standardına göre ince agrega olarak uygunluğunun değerlendirilmesi ..	120
6.4.1.1 Geometrik özellikler	120
6.4.1.2 Fiziksel özellikler	122
6.4.1.3 Kimyasal özellikler	124
6.4.1.4 Genel değerlendirme	127
6.4.2 Taze beton özelliklerine ilişkin sonuçlar	128
6.4.2.1 Çökme (slamp) testi sonuçları	128
6.4.2.2 Birim ağırlık testi sonuçları	129
6.4.2.3 Sıcaklık testi sonuçları	131
6.4.3 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) işlemi tamamlanmış ürünün performans testi sonuçları	131
6.4.3.1 Priz alma ve sonlanma sürelerinin tespit edilmesi	131
6.4.3.2 Basınç dayanım testi sonuçları	132
6.4.3.3 Yarmada çekme dayanım testi sonuçları	134
6.4.3.4 Elastisite testi sonuçları	136
6.4.3.5 Su emme oranı testi sonuçları	137
6.4.3.6 Yoğunluk testi sonuçları	140
6.4.4 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) işlemi tamamlanmış ürünün çevresel etkilerinin belirlenmesi çalışmasında elde edilen sonuçlar	142
6.4.4.1 Sızma (liç) testi sonuçları	142
6.4.4.1.1 pH değeri 5,5 olan su ile yapılan sızma (liç) testi sonuçları ...	142
6.4.4.1.2 pH değeri 4 olan su ile yapılan sızma (liç) testi sonuçları	143
6.4.4.1.3 pH değeri 9 olan su ile yapılan sızma (liç) testi sonuçları	144
6.4.4.2 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) işlemi tamamlanmış ürünün mikro-yapısal özelliklerinin incelenmesi çalışmasında elde edilen sonuçlar	145
6.4.4.2.1 X-ışını difraksiyon spektrometresi (XRD) ile yapı belirleme çalışmasının sonuçları	145
6.4.4.2.2 X-ışını floresans spektrofotometre (XRF) ile yapı belirleme çalışmasının sonuçları	148
6.4.4.2.3 Taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile yapı belirleme çalışmasının sonuçları	149
7. EKONOMİK ANALİZ	153

7.1 Atık Döküm Kumunun Mevcut Durumdaki Taşıma-Bertaraf Maliyeti	153
7.2 Atık Döküm Kumunun Ön İşlem Olarak Yakma Prosesine Tabii Tutulması Durumundaki Taşıma-Bertaraf Maliyeti	154
7.3 Atık Döküm Kumunun Ön İşlem Olarak Yıkama Prosesine Tabii Tutulması Durumundaki Taşıma-Bertaraf Maliyeti	157
7.4 Atık Döküm Kumunun Ön İşlem Olarak S/S Prosesine Tabii Tutulması Durumundaki Taşıma-Bertaraf Maliyeti	159
7.5 Atık Döküm Kumunun Hazır Beton Üretiminde Kullanılması Durumunda Hazır Beton Üretim Maliyeti	160
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	165
8.1 Sonuçlar	165
8.1.1 Atık döküm kumunun karakterizasyon sonuçlarının değerlendirilmesi .	165
8.1.2 Atık döküm kumunun geri dönüşümü/tekrar kullanılmasına yönelik yapılan çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi	166
8.1.3 Atık döküm kumunun düzenli depolanmasına yönelik yapılan ön işlem sonuçlarının değerlendirilmesi	166
8.1.4 Atık döküm kumundan geri kazanım ile faydalı ürün elde edilmesine yönelik yapılan çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi	169
8.1.5 Ekonomik analiz çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi	171
8.2 Öneriler	175
KAYNAKLAR.....	177
EKLER.....	189
ÖZGEÇMİŞ.....	219

KISALTMALAR

AAS	: Atomik Absorbsiyon Spektrofotometresi
AB	: Avrupa Birliği
ADK	: Atık Döküm Kumu
AFS	: Amerikan Dökümcüler Derneği
AKM	: Askıda Katı Madde
Ar-Ge	: Araştırma-Geliştirme
ASE	: Hızlandırılmış Solvent Ekstraktörü
ASTM	: The American Society for Testing and Materials
AYGEİY	: Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik
BTEX	: Benzen, Toluen, Etilbenzen, Ksilen
CL	: Kalker Kireci
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
ÇE	: Çevre Enstitüsü
ÇOK	: Çözünmüş Organik Karbon
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
DTG	: Türevsel Termogravimetri
EC	: Avrupa Komisyonu
EDS	: Enerji Dispersif X-Işını Spektroskopisi
EI	: Elektron Etki
EN	: Avrupa Normu
ERMCO	: Avrupa Hazır Beton Birliği
EU	: Avrupa Birliği
GC	: Gaz Kromatografisi
GC-ECD	: Gaz Kromatografisi-Elektron Yakalayıcı Dedektörlü
GC-FID	: Gaz Kromatografisi-Alev İyonizasyon Dedektörlü
GC-MS	: Gaz Kromatografisi-Kütle Spektroskopisi
HC	: Hidrokarbon
HPLC	: Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografi
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
İSTON	: İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları San. Tic. A.Ş.
IZAYDAŞ	: İzmit Atık ve Artıkları Arıtma, Yakma ve Değerlendirme A.Ş.
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrumu
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MAM	: Marmara Araştırma Merkezi
MB	: Metilen Mavisi
PAH	: Poliaromatik Hidrokarbonlar
PCB	: Poliklorlubifenil
PCDD/F	: Dioksin/Furanlar
PDF	: Toz Difraksiyon Kart Numarası
PLC	: Portland Kalker Kireci
SE	: Kum Eşdeğeri
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

SM	: Standart Yöntem
S/S	: Solidifikasyon/Stabilizasyon
TAKY	: Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
TCLP	: Toksikite Karakteristiği Sızma Prosedürü
TÇKM	: Toplam Çözünen Katı Madde
TGA	: Termogravimetrik Analiz
THBB	: Türkiye Hazır Beton Birliği
TOK	: Toplam Organik Karbon
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜDOKSAD	: Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği
US EPA	: Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı
UV/Vis	: Ultraviyole/Görünür Bölge Spektrumu
XRD	: X-Işını Difraktometre
XRF	: X-Işını Floresan Spektrofotometre
WFS	: Waste Foundry Sand

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Tehlikeli kabul edilen atıkların özellikleri	6
Çizelge 2.2 : Tehlikeli atık arıtma yöntemleri	10
Çizelge 3.1 : Türk döküm sektörü kuruluş sayısı	18
Çizelge 3.2 : Türk döküm sektörü verileri	18
Çizelge 3.3 : 2009-Avrupa döküm üretimi	18
Çizelge 3.4 : Metal alaşımları	19
Çizelge 3.5 : "AYGEİY-EK IV Atık Listesi" - Isıl işlemlerden kaynaklanan atıklar	29
Çizelge 3.6 : ADK'nın endüstriyel uygulamaları	38
Çizelge 5.1 : Karakterizasyon çalışmasında kullanılan kimyasal maddeler	51
Çizelge 5.2 : Karakterizasyon çalışmada kullanılan cihazlar	52
Çizelge 5.3 : Fiziksel karakterizasyon parametreleri ve analiz yöntemleri	54
Çizelge 5.4 : Kimyasal karakterizasyon parametreleri ve analiz yöntemleri	56
Çizelge 5.5 : TS EN 12457-4: 2004 Sızma (liç) potansiyeli parametreleri ve analiz yöntemleri	57
Çizelge 5.6 : Düzenli depolama ön işlem çalışmasında kullanılan kimyasal maddeler	58
Çizelge 5.7 : Düzenli depolama ön işlem çalışmasında kullanılan cihazlar	59
Çizelge 5.8 : Yıkama işleminde kullanılan çözeltilere ilişkin bilgiler	61
Çizelge 5.9 : ADK yıkama suyu deşarj numunesi analiz parametreleri ve yöntemleri	63
Çizelge 5.10 : ADK geri kazanımı çalışmasında kullanılan kimyasal madde ve malzemeler	66
Çizelge 5.11 : ADK geri kazanımı çalışmasında kullanılan cihazlar	66
Çizelge 5.12 : TS 706 EN 12620+A1:2009 beton agregası parametreleri ve analiz yöntemleri	68
Çizelge 5.13 : S/S amaçlı uygulanan ikame oranları ve bileşen miktarları	70
Çizelge 5.14 : Taze beton için çökme ile ifade edilen kıvam sınıfları	71
Çizelge 5.15 : Normal ve ağır beton için basınç dayanım sınıfları	76
Çizelge 5.16 : Beton sınıfları ve yoğunlukları	80
Çizelge 5.17 : Özütleme testi koşulları	81
Çizelge 6.1 : ADK'nın kısa ve elementel analiz sonuçları	83
Çizelge 6.2 : Bazı katı fosil yakıtlar ve atık çamurlara ilişkin ısı değerleri	84
Çizelge 6.3 : Hammadde (silika kumu) ve ADK'nın fiziksel özelliklerini belirleme	85
Çizelge 6.4 : Hammadde (silika kumu) ve ADK'nın kimyasal bileşimini belirleme	86
Çizelge 6.5 : Hammaddenin (silika kumu) AYGEİY-EK 3B'ye göre irdelenmesi ...	87
Çizelge 6.6 : ADK'nın AYGEİY-EK 3B'ye göre irdelenmesi	88
Çizelge 6.7 : Hammadde (silika kumu) ve ADK numuneleri yarı-kantitatif elementel analiz sonuçları	90
Çizelge 6.8 : Hammadde (silika kumu) ve ADK eluatı, orijinal kum numuneleri analiz sonuçları ve ADDDY-EK 2 limit değerleri	94

Çizelge 6.9 : Ülkemizdeki ADK'lara ilişkin ADDDY-EK 2 analiz sonuçlarının karşılaştırılması	95
Çizelge 6.10 : ADK'nın farklı sıcaklıklarda 4 sa. süre ile yakılması	100
Çizelge 6.11 : ADK'nın farklı sıcaklıklarda 2 sa. süre ile yakılması	100
Çizelge 6.12 : ADK'nın farklı sıcaklıklarda 1 sa. süre ile yakılması	101
Çizelge 6.13 : ADK'nın farklı sıcaklıklarda 30 dk. süre ile yakılması	101
Çizelge 6.14 : ÇOK ve TOK parametreleri için ADDDY-EK 2 limit değerleri	102
Çizelge 6.15 : ADK'nın farklı sıcaklıklardaki kızdırma kaybı değerleri	102
Çizelge 6.16 : ADK'nın farklı çözelti ve konsantrasyonlardaki yıkama deneyi sonuçları	104
Çizelge 6.17 : ADK yıkama suyu deşarj numunesi analiz sonuçları ve SKKY/Tablo 15.17 Alıcı ortam deşarj limit değerleri	106
Çizelge 6.18 : Kullanılan bağlayıcıların kimyasal bileşimi	107
Çizelge 6.19 : Kullanılan bağlayıcıların kimyasal ve fiziksel özellikleri	108
Çizelge 6.20 : ADK/çimento oranlarına göre eluattaki kirletici konsantrasyon ve eluat pH değerleri	111
Çizelge 6.21 : ADK/kireç oranlarına göre eluattaki kirletici konsantrasyon ve eluat pH değerleri	113
Çizelge 6.22 : ADK/çimento-kireç oranlarına göre eluattaki kirletici konsantrasyon ve eluat pH değerleri	116
Çizelge 6.23 : Çeşitli ülkelerin hazır beton sektörüne başlangıç yılları	117
Çizelge 6.24 : ERMCO' ya üye ülkelerde 2010 yılı hazır beton üretim miktarları	118
Çizelge 6.25 : Yıllara göre ülkemizdeki toplam hazır beton üretimi	118
Çizelge 6.26 : Tane büyüklüğü dağılımı için genel özellikler	120
Çizelge 6.27 : Silika kumu ve ADK için elek analizi sonuçları	120
Çizelge 6.28 : Çok ince malzeme içeriğinin en yüksek değerlerine göre belirlenmiş kategoriler	121
Çizelge 6.29 : Silika kumu ve ADK'ya ait çok ince malzeme içeriğine göre kategoriler	122
Çizelge 6.30 : Silika kumu ve ADK için çok ince malzeme kalitesi	122
Çizelge 6.31 : TS EN 1097-6:2002 Agregası sınıfları ve tane yoğunlukları	123
Çizelge 6.32 : Silika kumu ve ADK için tane yoğunluğu ve su emme oranı değerleri	123
Çizelge 6.33 : Silika kumu ve ADK gevşek yığın yoğunluk değerleri	123
Çizelge 6.34 : Silika kumu ve ADK için kuruma büzülmesi değerleri	124
Çizelge 6.35 : Silika kumu ve ADK için alkali-silika reaktivitesi	124
Çizelge 6.36 : Silika kumu ve ADK için suda çözünebilen klorür iyonu içerikleri	125
Çizelge 6.37 : Asitte çözünebilen en yüksek sülfat içeriği değerleri için kategoriler	125
Çizelge 6.38 : Silika kumu ve ADK için asitte çözünebilen sülfat içeriği	125
Çizelge 6.39 : Silika kumu ve ADK için toplam kükürt içerikleri	126
Çizelge 6.40 : Silika kumu ve ADK için asitte çözünebilen sülfid içeriği	126
Çizelge 6.41 : Betonun priz alma ve sertleşme hızını değiştiren bileşenler	126
Çizelge 6.42 : Agregası özelliklerinin TS 706 EN 12620+A1:2009 standardına göre karşılaştırılması	127
Çizelge 6.43 : Agregaların tane boyutları ve bazı fiziksel özellikleri	128
Çizelge 6.44 : Farklı ikame oranlarına göre taze beton çökme deneyi sonuçları	128
Çizelge 6.45 : Farklı ikame oranlarına göre taze beton birim ağırlık deney sonuçları	130
Çizelge 6.46 : Farklı ikame oranlarına göre priz başlama ve sonlanma süreleri	131

Çizelge 6.47 : Farklı ikame oranlarına göre basınç dayanım testi sonuçları	133
Çizelge 6.48 : Farklı ikame oranlarına göre yarmada çekme dayanım testi sonuçları	135
Çizelge 6.49 : Farklı ikame oranlarına göre elastisite testi sonuçları	137
Çizelge 6.50 : Farklı ikame oranlarına göre su emme oranı testi sonuçları	138
Çizelge 6.51 : Farklı ikame oranlarına göre yoğunluk testi sonuçları	140
Çizelge 6.52 : Atıkların düzenli depolanmasına dair sınır değerler	142
Çizelge 6.53 : pH değeri 5,50 olan su ile yapılan sızma testine ait analiz sonuçları	143
Çizelge 6.54 : pH değeri 4,00 olan su ile yapılan sızma testine ait analiz sonuçları	144
Çizelge 6.55 : pH değeri 9,00 olan su ile yapılan sızma testine ait analiz sonuçları	145
Çizelge 6.56 : Hazır beton numuneleri kimyasal analiz sonuçları	146
Çizelge 6.57 : Hazır beton numuneleri yarı-kantitatif elementel analiz sonuçları ..	149
Çizelge 7.1 : Üç düzenli depolama bertaraf yöntemi ve atık taşımanın ekonomik açıdan karşılaştırılması	153
Çizelge 7.2 : ADK'nın mevcut durumda taşıma-bertaraf maliyeti	154
Çizelge 7.3 : Kül fırınında ADK'nın yakılması sırasında tüketilen enerji ve elektrik maliyeti	155
Çizelge 7.4 : Yakma sonrası iki düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik olarak karşılaştırılması	157
Çizelge 7.5 : Yıkama sonrası iki düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik olarak karşılaştırılması	158
Çizelge 7.6 : S/S sonrası iki düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik olarak karşılaştırılması	160
Çizelge 7.7 : 1 m ³ hazır beton üretimi için bileşen miktarları ve birim maliyetleri ..	161
Çizelge 7.8 : 100.000 m ³ hazır beton üretimi için bileşen miktarları ve maliyetler ..	161
Çizelge 7.9 : %20 ikame oranında ADK kullanılması durumunda 100.000 m ³ hazır beton üretimi için bileşen miktarları ve maliyetler.	162
Çizelge 7.10 : ADK'nın hazır beton üretiminde kullanılması durumunda dökümhane tesisine sağlayacağı kar ve yüzdesi	163
Çizelge 8.1 : Ön işlem prosesleri sonrası düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik olarak karşılaştırılması	174

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Tehlikeli atık yönetimi	8
Şekil 2.2 : Atık yönetim hiyerarşisi (piramidi)	8
Şekil 2.3 : Tehlikeli atık bertaraf yöntemleri	9
Şekil 3.1 : Döküm prosesi genel akım şeması	20
Şekil 3.2 : Kum hazırlama ünitesi akım şeması	21
Şekil 3.3 : Elde ediliş durumuna göre döküm kumlarının sınıflandırılması	26
Şekil 3.4 : Kullanışına göre döküm kumlarının sınıflandırılması	26
Şekil 3.5 : Döküm sektörünün temel girdi ve çıktıları	28
Şekil 3.6 : Dökümcülük işlemleri kütle dengesi	31
Şekil 3.7 : Çeşitli kum taneleri	33
Şekil 3.8 : Kum taneleri arasında kil: (a) İyi karışmış kum. (b) Kötü karışmış kum. 33	
Şekil 3.9 : Gazların kum taneleri arasından geçişi	34
Şekil 5.1 : Yıkama deneyleri	62
Şekil 5.2 : S/S prosesi genel kategorileri	63
Şekil 5.3 : Laboratuvar ölçekli S/S deneyleri	65
Şekil 5.4 : Çökme (slamp) testi	71
Şekil 5.5 : Birim ağırlık testi	72
Şekil 5.6 : Karışımların kalıplara dökülmesi	73
Şekil 5.7 : Kür havuzu ve kalıptan çıkarılan numunelerin kür edilmesi	73
Şekil 5.8 : Çalışmada elde edilen hazır beton ürünleri	74
Şekil 5.9 : Basınç dayanım testi cihazı	75
Şekil 5.10 : Yarmada çekme deneyi uygulama düzeni	77
Şekil 5.11 : Yarmada çekme dayanım testi cihazı	78
Şekil 5.12 : Özütleme işleminin gerçekleştiği çalkalayıcılar	82
Şekil 6.1 : Tane boyutu dağılımı: (a) Silika kumu. (b) ADK	85
Şekil 6.2 : ADK FTIR spektrumu	87
Şekil 6.3 : Silika kumu numunesi SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme	91
Şekil 6.4 : ADK numunesi SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme	91
Şekil 6.5 : Hammadde (silika kumu) numunesine ait EDS'de yapılan yarı-kantitatif analizin sonucu	91
Şekil 6.6 : ADK numunesine ait EDS'de yapılan yarı-kantitatif analizlerin sonuçları	92
Şekil 6.7 : ADK numunesine ait TG ve DTG eğrileri	99
Şekil 6.8 : ADK'nın farklı sıcaklıklardaki kızdırma kaybı değerleri	103
Şekil 6.9 : Portland kalkerli çimento SEM görüntüleri:(a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme	109
Şekil 6.10 : Kalker kireci SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme	109

Şekil 6.11 : Portland kalkerli çimento S/S ürünü SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X. (d) 1000X. (e) 3000X büyütme	110
Şekil 6.12 : Kalker kireci S/S ürünü SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X. (d) 1000X. (e) 3000X büyütme	114
Şekil 6.13 : Portland kalkerli çimento ve kalker kireci S/S ürünü SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X. (d) 1000X. (e) 3000X büyütme	115
Şekil 6.14 : Silika kumu ve ADK için tane büyüklüğü dağılımı eğrisi	121
Şekil 6.15 : Farklı ikame oranlarına göre su/çimento oranları (%)	129
Şekil 6.16 : Farklı ikame oranlarına göre birim ağırlık değerleri	130
Şekil 6.17 : Farklı ikame oranlarında basınç dayanım testi sonuçları	134
Şekil 6.18 : Farklı ikame oranlarında yarmada çekme dayanımı testi sonuçları	136
Şekil 6.19 : Farklı ikame oranlarında elastisite testi sonuçları	138
Şekil 6.20 : Farklı ikame oranlarında su emme oranı testi sonuçları	139
Şekil 6.21 : Farklı ikame oranlarına göre yoğunluk değerleri	141
Şekil 6.22 : a) Şahit hazır beton numunesi, b) %20 ikame oranındaki hazır beton numunesi	141
Şekil 6.23 : Şahit hazır beton ve %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerine ait XRD grafiği	146
Şekil 6.24 : Şahit hazır beton numunesine ait X-ışınımı difraksiyonu	147
Şekil 6.25 : %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesine ait X-ışınımı difraksiyonu	148
Şekil 6.26 : Şahit hazır beton numunesi SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme	150
Şekil 6.27 : %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesi SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme	150
Şekil 6.28 : Şahit hazır beton numunesine ait EDS'de yapılan yarı-kantitatif analizin sonucu ve EDS spektrumu	151
Şekil 6.29 : %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesine ait EDS'de yapılan yarı-kantitatif analizin sonucu ve EDS spektrumu	152
Şekil 7.1 : Farklı miktarlardaki ADK'nın kül fırınında 500°C'de 30 dk. yakılmasına ilişkin enerji tüketimi	156
Şekil A.1 : ADK'nın 200-900°C'de 4 sa. yakılması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.	190
Şekil A.2 : ADK'nın 200-900°C'de 2 sa. yakılması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları	190
Şekil A.3 : ADK'nın 200-900°C'de 1 sa. yakılması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları	191
Şekil A.4 : ADK'nın 200-900°C'de 30 dk. yakılması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.	191
Şekil A.5 : ADK'nın 200-900°C'de 4 sa. yakılması ile elde edilen TOK konsantrasyonları	192
Şekil A.6 : ADK'nın 200-900°C'de 2 sa. yakılması ile elde edilen TOK konsantrasyonları	192
Şekil A.7 : ADK'nın 200-900°C'de 1 sa. yakılması ile elde edilen TOK konsantrasyonları	193
Şekil A.8 : ADK'nın 200-900°C'de 30 dk. yakılması ile elde edilen TOK konsantrasyonları	193
Şekil A.9 : ADK'nın 200-900°C'de 4 sa. yakılması ile elde edilen eluat pH konsantrasyonları	194

Şekil A.10 : ADK'nın 200-900°C'de 2 sa. yakılması ile elde edilen eluat pH konsantrasyonları	194
Şekil A.11 : ADK'nın 200-900°C'de 1 sa. yakılması ile elde edilen eluat pH konsantrasyonları	195
Şekil A.12 : ADK'nın 200-900°C'de 30 dk. yakılması ile elde edilen eluat pH konsantrasyonları	195
Şekil B.1 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	196
Şekil B.2 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	196
Şekil B.3 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	197
Şekil B.4 : ADK'nın üç farklı sürede şebeke suyuyla yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	197
Şekil B.5 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H ₂ SO ₄ çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	198
Şekil B.6 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H ₂ SO ₄ çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	198
Şekil B.7 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H ₂ SO ₄ çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	199
Şekil B.8 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO ₃ çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	199
Şekil B.9 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO ₃ çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	200
Şekil B.10 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO ₃ çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	200
Şekil B.11 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda NaOH çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.....	201
Şekil B.12 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	201
Şekil B.13 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	202
Şekil B.14 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	202
Şekil B.15 : ADK'nın üç farklı sürede şebeke suyuyla yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları	203
Şekil B.16 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H ₂ SO ₄ çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	203
Şekil B.17 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H ₂ SO ₄ çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	204
Şekil B.18 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H ₂ SO ₄ çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	204
Şekil B.19 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO ₃ çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	205
Şekil B.20 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO ₃ çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	205
Şekil B.21 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO ₃ çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	206
Şekil B.22 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda NaOH çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.....	206

Şekil C.1 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre ÇOK eluat konsantrasyonları	207
Şekil C.2 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre TOK konsantrasyonları	207
Şekil C.3 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre Ni eluat konsantrasyonları	208
Şekil C.4 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre Zn eluat konsantrasyonları	208
Şekil C.5 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre toplam Cr eluat konsantrasyonları	209
Şekil C.6 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre TÇKM eluat konsantrasyonları	209
Şekil C.7 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre F ⁻ eluat konsantrasyonları	210
Şekil C.8 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre eluat pH değerleri	210
Şekil C.9 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre ÇOK eluat konsantrasyonları	211
Şekil C.10 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre TOK konsantrasyonları	211
Şekil C.11 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre Ni eluat konsantrasyonları	212
Şekil C.12 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre Zn eluat konsantrasyonları	212
Şekil C.13 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre toplam Cr eluat konsantrasyonları	213
Şekil C.14 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre TÇKM eluat konsantrasyonları	213
Şekil C.15 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre F ⁻ eluat konsantrasyonları	214
Şekil C.16 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre eluat pH değerleri	214
Şekil C.17 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre ÇOK eluat konsantrasyonları	215
Şekil C.18 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre TOK konsantrasyonları	215
Şekil C.19 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre Ni eluat konsantrasyonları	216
Şekil C.20 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre Zn eluat konsantrasyonları	216
Şekil C.21 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre toplam Cr eluat konsantrasyonları	217
Şekil C.22 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre TÇKM eluat konsantrasyonları	217
Şekil C.23 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre F ⁻ eluat konsantrasyonları	218
Şekil C.24 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre eluat pH değerleri	218

SEMBOL LİSTESİ

m_i	: Başlangıç kütlesi (mg)
m_t	: T sıcaklığındaki kütle (mg)
m_1	: Ağırlıkça su emme oranı (%)
f_c	: Basınç dayanımı (MPa)
f_{ct}	: Yarmada çekme dayanımı (MPa)
f_{ckj}	: j günlük beton karakteristik basınç dayanımı (MPa)
$f_{ck,sil}$	: Çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan silindir şekilli numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı (MPa)
$f_{ck,küp}$	: Kenar uzunluğu 150 mm olan küp şekilli numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı (MPa)
F	: Betonun kırılması anında ulaşılan en büyük yük (N)
A_c	: Beton numunesinin, üzerine basınç yükünün uygulandığı alan (mm ²)
$E_{c,j}$	: j günlük betonun elastisite modülü (MPa)
P	: Permeabilite sayısı
V	: Hava hacmi (cm ³)
H	: Numune yüksekliği (cm)
p	: Sabit basınç (g/cm ²)
A_k	: Kum numunesinin kesit alanı (cm ²)
t	: Havanın geçmesi için gerekli zaman süresi (dk)
A	: Kuru betonun ağırlığı (g)
L	: Beton numunesinin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu (mm)
d	: Beton numunesinin seçilen enine kesit ölçüsü (mm)
B	: Sabit basınçta (g/cm ²) suya doymuş betonun ağırlığı (g)

DÖKÜMHANELERDEN KAYNAKLANAN ATIKLARIN UYGUN GERİ KAZANIM/TEKRAR KULLANIM VE BERTARAF YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Türkiye'de halen imalat sanayiinde öncelik; üretim, ürün kalitesi ve maliyete verilmiş olduğundan, geri kazanım uygulamaları ikinci planda kalmıştır. Halbuki, değerlendirilebilir nitelikli atıkları geri dönüştürerek ve malzeme tüketimini azaltarak doğal kaynakların verimli bir şekilde kullanımı oldukça önemli bir konudur.

1993 sonrasında daha etkili olarak gelişen çevre koruma bilinci, yasal yaptırımlar, atık bertarafında karşılaşılan güçlükler ve uluslararası ticarete üretim sırasındaki çevre koruma önlemlerinin önem kazanması, temiz teknolojilerin kullanılmasını ve atık geri kazanımını ön plana çıkarmıştır. Özellikle 1999 yılından bugüne devam eden AB Müktesebatına uyum çalışmaları gözönüne alındığında, ülkemizin yakın zamanda birtakım yaptırımlarla karşı karşıya kalması olasıdır. Doğal kaynakların hızla tüketilmesinin önlenmesi ve atıkların çevre ve insan sağlığı için bir tehdit olmaktan çıkarılarak ekonomi için bir girdiye dönüştürülmesi, enerji amaçlı veya değerli kimyasal hammadde olarak uygulamalar bulması tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de giderek öncelikli bir politika hedefi olarak benimsenen "sürdürülebilir çevre" ve "sürdürülebilir kalkınma" açısından bir gerekliliktir.

Atık döküm kumlarının (ADK) atık olarak bertaraf edilmesi yerine çevre dostu yöntemlerle ekonomik değeri olan faydalı ürünlere dönüştürülmesi, gelişmiş ülkelerde üzerinde sıkça çalışılan bir konu olmasına rağmen ülkemizde bu konu ile ilgili çalışmalar henüz yetersizdir. Dökümhanelerden kaynaklanan ve döküm işlemi sırasında yüksek miktarlarda ortaya çıkan ADK'lar düzenli depolama tesislerinde depolanmak suretiyle bertaraf edilmektedir. Oysaki atıkların bertarafı yerine geri kazanılması; hem üretim maliyetlerinde, hem de miktarının azaltılmasıyla atık bertaraf maliyetlerinde önemli bir tasarruf sağlayacaktır. Geri kazanılan atıkların üretim girdilerindeki oranının artmasıyla ekonomik faaliyetlerin doğal kaynaklar üzerindeki ve atıkların da çevre üzerindeki baskısı azalacaktır. Ülkemizde üretilen atıkların yarısından fazlası geri kazanılabilir özelliklere sahip olup çevresel bir problem olmaktan çıkarılarak, ekonomik bir değere dönüştürülebilecek niteliktedir.

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir dökümhane tesisinde, demir döküm işlemi sırasında yüksek miktarlarda ortaya çıkan ve halen düzenli depolama tesislerinde depolanarak bertaraf edilen ADK'nın uygun geri kazanım/tekrar kullanım ve bertaraf yöntemlerinin belirlenmiş, çalışma sonuçlarının "üniversite-sanayi işbirliği" çerçevesinde sanayide uygulanabilirliği araştırılmış olup her bir uygulamada elde edilen son ürünler için ekonomik analiz yapılmıştır.

Kalıp kumu hammaddesinin (silika kumu) ve dökümhanelerden kaynaklanan ADK'nın karakterizasyonu kapsamında fiziksel, kimyasal ve morfolojik özellikler ile sızma (liç) potansiyeli ortaya konulmuş, analiz sonuçları "Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik-EK 3B" ve "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik-EK 2" limit değerleriyle karşılaştırılmıştır. ADK bileşiminin %91,28

inorganik madde, %6,55 organik madde ve %2,17 nemden oluştuğu belirlenmiştir. İnorganik kısımdaki yüksek silika içeriğinin mineralojik kaynaklı olmasından ötürü, ADK tehlikesiz atık olarak değerlendirilmiştir. Ancak, ADK'nın çözünmüş organik karbon (ÇOK) değeri sebebiyle, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu tespit edilmiştir.

ADK'nın demir döküm tesisinde hammadde olarak değerlendirilmesi ve kalıp kumu yapımında tekrar kullanılmasına yönelik yürütülen saha ve laboratuvar çalışmalarında, ADK özellikleri kalıp kumu özellikleri ile karşılaştırılmış ve ADK'nın döküm tesisinde geri dönüşüm/tekrar hammadde olarak kullanıma uygunluğu irdelenmiştir. Değerlendirme sonucunda; döküm kumlarının belli bir çevrim kullanıldıktan sonra döküm kalıplarında daha fazla kullanılamayacak hale geldiği ve "ADK" olarak dökümhaneden uzaklaştırılması gerektiği tespit edilmiştir. Bunun nedenleri; döküm kumunun fiziksel ve kimyasal olarak bozulması, tane boyutu ve şeklinin değişmesi, kumun döküm işlemi sırasında yüksek sıcaklıktaki (1500°C) ergimiş metale maruz kalması, kum taneleri arasındaki gaz geçirgenliğinin azalması, kum içerisindeki bentonitin bağlayıcılık özelliğini kaybetmesi, kumun refrakterlik özelliğinin azalması, kum tanelerinin birbirine tutunamaması ve kalıbın mukavemetinin azalmasıdır.

Olası organik (çözünmüş organik karbon, toplam organik karbon) ve inorganik (Ni, Zn, toplam Cr, toplam çözünen katı madde, F) kirleticilerin çeşitli ön işlem prosesleri (yakma, yıkama, solidifikasyon/stabilizasyon (S/S)) ile ADK'dan kısmen veya tamamen uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında yapılan laboratuvar ölçekli çalışmalar teknik, çevresel ve ekonomik açıdan incelenmiştir.

ADK'daki kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması için yakma ve yıkama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yakma prosesi kapsamında uygun yakma sıcaklığı (200-900°C) ve süresi (4 sa., 2 sa., 1 sa., 30 dk.), yıkama prosesi kapsamında ise uygun yıkama sıvısı (şebeke suyu, HCl, H₂SO₄, HNO₃, NaOH), çözelti konsantrasyonu (1 M, 3 M, 6 M) ve yıkama süresi (24 sa., 15 sa., 6 sa.) belirlenmiştir. 1 ton ADK'nın mevcut durumda I. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyeti 275 TL iken, ön işlem olarak 500°C'de 30 dk. yakma prosesine tabii tutulduktan sonra II. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyetinin, yakma ön işlem giderleri (elektrik maliyeti) dahil ve ilk yatırım ile işçilik maliyeti hariç, ~295,7 TL olacağı hesaplanmıştır. 1 ton ADK'nın ön işlem olarak 6 sa. şebeke suyu ile yıkama prosesine tabii tutulduktan sonra II. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyetinin yıkama ön işlem giderleri (çözelti, su, elektrik maliyeti) de dahil edildiğinde ilk yatırım ve işçilik maliyeti hariç 253 TL olacağı belirlenmiştir. Ön işlem olarak yakma prosesi ve asit çözeltileri ile yıkama prosesinin ekonomik açıdan uygun olmadığı, su ile yıkama prosesinin ise bertaraf maliyeti açısından dökümhane tesisine yıllık %8'lik bir kar getireceği saptanmıştır.

ADK'daki kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması için S/S deneyleri gerçekleştirilmiş; S/S prosesi kapsamında kullanılan bağlayıcıların fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu, en uygun bağlayıcının seçimi (Portland kalkerli çimento, kalker kireci, Portland kalkerli çimento-kalker kireci (1:1)), uygun atık-bağlayıcı karışım oranlarının belirlenmesi (%0, %10, %20, %40, %100, %200, %300, %900) ve katılaştırılmış ürünlerin çevresel etkiler açısından değerlendirilmesi çalışmaları yürütülmüştür. 1 ton ADK'nın ön işlem olarak kireç ile %300 atık/bağlayıcı oranında S/S prosesine tabii tutulduktan sonra III. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-

bertaraf maliyetinin, S/S ön işlem giderleri (elektrik, su, çimento, kireç maliyeti) de dahil edildiğinde ilk yatırım ve işçilik maliyeti hariç, ~226 TL olacağı hesaplanmıştır. Ön işlem olarak kireç-esaslı S/S prosesinin ekonomik açıdan uygun olduğu ve bertaraf maliyeti açısından dökümhane tesisine yıllık %20'lik bir kar getireceği saptanmıştır.

ADK'dan geri kazanım yoluyla yapı endüstrisine yönelik ekonomik değeri olan faydalı ürün eldesi kapsamında, ADK'nın "hazır beton" imalatında agrega ile birlikte kullanılabilirliğini belirlemek ve çalışma sonuçlarının "üniversite-sanayi işbirliği" çerçevesinde sanayide uygulamaya aktarılabilirliğini araştırmak amacıyla yapılan pilot ölçekli S/S çalışması İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş. (İSTON A.Ş., Tuzla/İstanbul) alt yapı imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak ADK'nın "TS 706 EN 12620+A1:2009-Beton Agregaları" standardına göre ince agrega olarak uygunluğu değerlendirilmiş, belli ikame oranında silika kumu ile karıştırılarak betonda agrega olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmüştür.

Pilot ölçekli S/S çalışması ile C25/30 sınıfı hazır beton imalatında iki şahit ve yedi farklı ikame oranında (%10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100) ADK kullanılarak hazırlanan ve dört farklı kür süresi (7, 28, 56 ve 90 gün) uygulanan taze ve sertleşmiş betonların performanslarını belirlemek üzere çökme (slamp), birim ağırlık, sıcaklık, priz alma-sonlanma süresi, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite, su emme oranı ve yoğunluk gibi mekanik özellikleri incelenmiş, en uygun ikame oranının %20 olduğu sonucuna varılmıştır. S/S işlemi tamamlanmış beton numuneleri, farklı doğa koşullarında gösterdikleri davranışlarının incelenmesi ve içerisinde bulunması olası kirleticilerin sızıntı suyuna (eluat) geçme özelliğinin belirlenebilmesi amacıyla, farklı pH'larda (pH 5,5, pH 9 ve pH 4) özütleme testine tabii tutulmuştur ve çevreyi kirletici özelliğinin bulunmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton ürünü ile şahit hazır beton arasında mikro-yapısal ve morfolojik olarak herhangi bir farklılık gözlenmemiştir. Hazır beton üretiminde silika kumu ile birlikte %20 ikame oranında ADK kullanımının, İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'ye yıllık %2,3'lük, dökümhane tesisine ise yıllık %32'lik bir kar getireceği belirlenmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki aşamasında, ADK'nın kimyası nedeniyle betonarme yapılarıdaki metal donatı korozyonuna herhangi bir etkisinin olup olmadığı araştırılabilir veya endüstriyel ölçekli deneyler yapılabilir; ayrıca ADK'nın parke taşı ve reaktif pudra beton (beton rögar kapakları, yağmur suyu ızgaraları) üretiminde kullanılabilirliği denenebilir. Ancak, ADK özelliklerinin genellikle dökümhaneden dökümhaneye değişiklik gösterdiği unutulmamalıdır. Farklı kaynaklardan temin edilen ADK'lar aynı kalitede olmalıdır. ADK'nın hazır beton üretim sektöründe kullanımını geliştirmek ve hazır beton agrega ihtiyacını karşılamak üzere dökümhanelerden sürekli olarak tedarik edilebilmelidir.

INVESTIGATION OF APPROPRIATE RECOVERY/REUSE AND DISPOSAL METHODS OF WASTES GENERATED FROM FOUNDRIES

SUMMARY

Giving priority in the manufacturing industry to the production, product quality and costs as a present situation in Turkey, led recovery applications to be postponed to a second stage. However, utilization of natural resources efficiently by recovering qualified wastes and thus minimizing the consumption of materials is a very substantial topic to be considered.

Increasingly developing environmental protection consciousness after 1993, legal sanctions, difficulties encountered in waste disposal, and environmental protection precautions taken during production gaining more and more importance in international trade, featured the usage of clean technologies and waste recovery. Especially, considering the ongoing adaptation policies to EU Acquis Communautaire since 1999, it is expected that our country will face some sanctions in the near future. Preventing rapid consumption of natural resources, conversion of wastes to an input for economy instead of being a threat against environment and human health, and finding them a place for energy purposes and as valuable chemical raw materials, are necessities according to the concept of "sustainable environment" and "sustainable development", which is embraced as preferential policy target in the world and as in our country.

The management of hazardous wastes that has already been generated is one of the burning problems which require immediate attention. The principal objective of any hazardous waste management plan is to ensure safe, efficient and economical collection, transportation, treatment and disposal of wastes. It should further ensure that the system operates satisfactorily for current as well as for foreseeable future scenario. A typical hazardous waste management system consists of components for the collection, transportation, treatment and disposal of wastes.

Conversion of the waste foundry sands (WFS) to the economically valuable beneficial products with environmentally friendly methods instead of disposal as waste is one of the hot topics of developed countries working on it. However, studies on this issue in our country is inadequate yet; WFS generated from foundries and arising in high amounts in casting process are disposed at landfills at present situation. It is known that recovery of wastes instead of disposal will provide important savings both in production costs and disposal costs via minimization of waste amounts. The increase in the ratio of production input of recovered wastes leads to a reduction in the pressure of economical activities on natural resources, and also in the pressure of wastes on the environment. More than half of the wastes produced in our country owe recoverable properties, and can be converted to economic value rather than being a threat to the environment.

In this study, the appropriate recovery/reuse and disposal methods to be applied to WFS arising at high amounts during casting processes and then disposed at landfills in a foundry facility operating in Marmara Region were determined, the

transferability of the study results in the framework of "university-industry collaboration" into Turkish industrial applications were investigated, and the cost analyses were done for all final products obtained for each application.

WFS used in this study was green sand obtained from a ferrous foundry located in the Marmara Region of Turkey, producing metal components for the automotive industry. The physical, chemical and morphological properties and leaching potential of silica sand and WFS were investigated for characterization, and the analysis results were compared with the limit values stated in "The Regulation on the Landfilling of Waste-App.2: The acceptance criteria of the landfilling of waste" and "The Regulation on the General Principles of Waste Management-App.3B: Hazardous waste threshold limits". It was observed that WFS was composed of 91.28% inorganic matter, 6.55% organic matter and 2.17% water, and it was classified as nonhazardous waste due to mineralogical origin of its high silica content. According to the EU and National regulations, the foundry industry disposes WFS as non-hazardous waste. The chemical analyses (including leaching tests) confirm the non-hazardous nature of the discarded sand. The leachabilities of silica sand and WFS were investigated according to the TS EN 12457-4 leaching test to determine the landfill class where WFS could be accepted. It was found that WFS has a DOC content of 89.4 mg/L in the leachate, which is above the EU hazardous landfilling acceptance limits. Besides, the concentrations of Cr (119.44 µg/L), Ni (138.74 µg/L), Zn (593 µg/L), F⁻ (1.89 mg/L), TDS (4,731 mg/L) leached and TOC (45,601 mg/kg) in WFS also did not fit the EU landfill inert waste acceptance criteria (Class III).

Foundry sand is a high-quality silica sand that is a by-product of metal casting industries, where it has been utilized for many years as a mould mainly due to its thermal conductivity. Ferrous and non-ferrous foundries use silica sand in order to create metal casting molds and cores. During the casting process, molds can be exposed to high temperatures (~1,500°C) depending upon the metal being poured. In the scope of field- and laboratory-scale studies performed for reuse of WFS as a raw material in the preparation of molding sand in the foundry facility, the properties of molding sand and WFS were compared. It was observed that the molding sands can be reused for several times (about 8-10 times) until losing its molding characteristics before the repeated exposure to molten metal and mechanical abrasion. Finally, when the recycled sand degrades to the point at which it can no longer be reused in the metal casting process, it is removed from the foundry, and named as WFS. The reasons for the no longer reusability and removal of WFS from the foundry can be explained by physical and chemical decomposition of WFS, variation in the particle size and shape, exposure to high temperatures during casting process, reduction in gas permeability between sand particles, loss of the binding property of the bentonite and thus, reduction in the strength of mold, wearing down of sand grains by mechanical abrasion, and reduction of refractory property of sand.

The laboratory-scale experiments carried out for the partial or total removal of potential organic (dissolved organic carbon, total organic carbon) and inorganic (Ni, Zn, total Cr, total dissolved solids, F⁻) contaminants in the WFS with various pre-treatment processes (combustion, washing, solidification/stabilization (S/S)), and thus for the reduction of disposal costs were investigated technically, environmentally and economically.

The laboratory-scale combustion and washing experiments were carried out for the partial removal of contaminants in the WFS; appropriate combustion temperature (200-900°C) and combustion time (4 h, 2 h, 1 h, 30 min) were determined in the scope of combustion process whereas proper washing solution (distilled water, HCl, H₂SO₄, HNO₃, NaOH), solution concentration (1 M, 3 M, 6 M) and washing time (24 h, 15 h, 6h) were determined in the scope of washing process. While hazardous landfilling (Class I) of WFS costs 275 TL per ton of waste, non-hazardous landfilling (Class II) of WFS after combustion process at 500°C for 30 min costs ~295,7 TL per ton of waste, including combustion pre-treatment costs (electricity cost) while excluding investment and labor cost. Non-hazardous landfilling (Class II) of WFS after 6 h water washing process costs 253 TL per ton of waste, including washing pre-treatment costs (solution, water, electricity cost) while excluding investment and labor cost. It was observed that combustion process and washing with acidic solutions as pre-treatment techniques are not economic while washing with water pre-treatment method brings some economical advantages such as 8% profit per year over landfilling for the foundry.

The laboratory-scale S/S experiments were carried out for the total removal of contaminants in the WFS, physical and chemical characterization of binders used, selection of proper binder type (Portland limestone cement, calcium lime, Portland limestone cement-calcium lime (1:1)), determination of appropriate waste/binder ratio (0%, 10%, 20%, 40%, 100%, 200%, 300%, 900%), and the environmental assessment of solidified products studies were performed in the scope of S/S process. S/S is one of the most commonly utilized pre-landfill waste treatment technologies. This process involves mixing wastes into a binder system to reduce the contaminants in the leachate and converting hazardous wastes into eco-friendly wastes disposed in landfills or used in construction industry. Cement is usually one of the most widely used binders whereas fly ash, lime, gypsum, activated carbon and polymeric materials can also be utilized as binding agent. Inert waste (Class III) landfilling of WFS after S/S process with 300% waste/lime ratio costs ~226 TL per one ton of waste including S/S pre-treatment costs (electricity, water, cement, lime cost) while excluding investment and labor cost. It is observed that lime-based S/S pre-treatment method brings economical advantages as 20% profit per year over landfilling for the foundry.

As WFS is basically a fine aggregate, it is reasonable to anticipate that it can be used in many applications where natural sands are used. Several researchers investigated the use of WFS in various highway applications (road bases and sub-bases, hot mix asphalt, traction material on snow and ice), manufactured products (Portland cement, mortar, asphalt concrete, concrete and concrete related products bricks, blocks and paving stones), geotechnical field applications (structural and flowable fill, embankments, hydraulic barrier or liner, landfill cover), agricultural products (amendments, compost, manufactured soil, top dressing), fibre glass and rock wool manufacturing, hazardous material vitrification.

However, reuse applications of WFS are very insufficient in Turkey where WFS is mainly used as landfill cover, and only a small amount is reused for engineering purposes (i.e., Portland cement manufacturing due to high silica content, paving stone and bordures production, concrete parking garden seating groups manufacturing). It is thought that this situation arose from lack of information and research on the potential fields of WFS. Furthermore, it has been considered that legislations related to the reuse of industrial wastes in different engineering fields of

Turkey, bureaucratic regulations and insufficient environmental incentive mechanisms slow down the assessment potential of WFS.

When the previous studies on the production of concrete-like products by using WFS as partial replacement of regular sand are taken into consideration, it's seen that the partially replaced products are qualified mostly according to the mechanical properties rather than environmental leaching properties, whereas testing of WFS, which is classified as an industrial waste, at different application areas for environmental leaching properties poses great importance by taking into consideration that environmental protection is one of the EU's major priorities.

Concrete is the most widely used man-made material in the world. Aggregate owes to highest proportion in the concrete contents, and its natural resources are in the limit of extinction. Thus, the usage of secondary materials such as industrial wastes together with aggregates in ready-mixed concrete (RMC) production will be helpful in overcoming problems related to possible aggregate demand in the upcoming years.

For the manufacture of economically viable and construction industry orientated RMC by the recovery of WFS, pilot-scale S/S experiments were carried out for the assessment of reusability of WFS in the production of RMC with other aggregates by using the İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul) laboratory infrastructure, for introducing the reuse field of WFS in the framework of "university-industry collaboration" in RMC industry which is one of the most substantial subdivision of construction industry found in crucial position in Turkey. The final product properties were checked with the related Environmental Regulations and Turkish Standards criteria, and the way for limited reuse applications of industrial wastes in Turkey was tried to open up. Firstly, WFS as fine aggregate in accordance with the "TS 706 EN 12620+A1:2009-Concrete Aggregates" was assessed, and it was observed that it can be used as aggregate in the production of concrete via partial replacement with silica sand. Then, two control and seven concrete specimens were prepared using 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75% and 100% WFS by weight as replacement of regular sand (fine aggregate) for the production of C25/30 class RMC (normal concrete) via pilot-scale S/S process. The ingredients were mixed in a rotating mixer, cast into cubic test molds (15x15x15 cm) and stored at room temperature for 24 hours. After 24 hours, they were demolded and put into a water-curing tank operating at 20°C. In order to determine the performance of fresh concrete, slump, unit weight and temperature were examined, and cubic concrete specimens (15x15x15 cm) were tested for mechanical properties, i.e., initial and final setting times, compressive strength, tensile splitting strength and modulus of elasticity. Tests were performed at 7, 28, 56 and 90 days of curing period. Water absorption ratios and densities of the specimens were also determined.

It was observed that the unit weight of mixtures does not remark any considerable differences with and without WFS; however, there is only a slight decrease due to low density of WFS. It was also observed that the existence of WFS increases the w/c ratio of fresh concrete when added as regular sand replacement (at the same slump values). This is probably due to the presence of finer particles (clay-type fine materials, impurities etc.) in WFS, which are effective in decreasing the fluidity of the fresh concrete and increasing the water demand. Furthermore, a delay on initial and final setting times was observed, because very fine carbon particles existed in WFS and/or there was a loose of the link between aggregate and cement paste,

causing a delay on cement hydration. Nevertheless, setting times of fresh specimens showed almost parallel results to that of the control one.

It was found that partial replacement of regular sand with WFS decreases the strength performance (compressive strength, tensile splitting strength and modulus of elasticity) of concrete at all ages, and the addition of WFS to concrete mixtures also affects the physical properties that led to increase in water absorption and decrease in density. It was concluded that WFS can be used as a replacement of 20% of regular sand without compromising the mechanical and physical properties.

TS EN 12457-4:2004 leaching test was applied to the entire solidified concrete specimens to determine their leachability characteristics at different pH conditions representing variant natural cases, such as a pH value of 5.5 for distilled water, a pH value of 9 for surface run-off with rain water, and a pH value of 4 obtained by the addition of acetic acid. According to the TS EN 12457-4:2004 leaching test results of the solidified specimens, it was determined that elution concentrations of Ni, Zn, Cr, F⁻, TDS, DOC and TOC performed using water with pH values of 4, 5.5 and 9 were under the limits defined for EU landfill inert waste acceptance criteria (Class III). Ni, Zn, Cr, F⁻, TDS, DOC and TOC components of WFS can be immobilized in the matrices by using the S/S method, and there will be no release into the environment at different pH conditions. Furthermore, micro-structural properties and morphological characterization of both control mix and concrete mix having 20% WFS are almost the same. Results of this investigation suggest that WFS can be effectively utilized in making good quality RMC as a partial replacement of fine aggregates with no adverse mechanical, environmental and micro-structural impacts. The partial replacement should not exceed 20%. It is observed that using 20% WFS as replacement of regular sand (fine aggregate) in the production of RMC brings some economical savings such as 2.3% profit per year for ISTON A.Ş. and 32% profit per year for the foundry facility.

Further investigation will be needed to observe the potential effects related to corrosion of metal reinforcement due to the WFS chemistry. Industrial-scale tests will also be required to find out whether WFS affects the production process of RMC, since these are beyond the content of the present research. The useability of WFS in the production of paving stone and manhole cover can also be experienced. But, it should not be forgotten that the properties of WFS usually vary from foundry to foundry. WFS obtained from different sources should have consistent quality, and it should be supplied continuously by foundries to improve its usage in RMC sector in order to meet the demand of RMC's aggregates.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Anlam Ve Önemi

Teknolojik gelişmeler ve sanayileşmeye paralel olarak yaşanan hızlı kentleşme ve nüfus artışı, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de insan faaliyetlerinin çevre üzerindeki baskısını hızla artırmaktadır. Bu süreçte üretim faaliyetlerindeki genişleme, doğal kaynakların daha yoğun kullanımını kaçınılmaz kılarken, sürekli artan tüketim eğilimi ile birlikte oluşan atıklar da, hem miktar hem de zararlı içerikleri nedeniyle çevre ve insan sağlığını tehdit eder boyutlara ulaşmıştır.

Doğal kaynakların hızla tüketilmesinin önüne geçmek ve üretilen atıkları çevre ve insan sağlığı için "tehdit" olmaktan çıkartarak "ekonomik girdiye dönüştürmek" için atık yönetim stratejilerinin etkin politikalarla hayata geçirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de giderek öncelikli bir politika hedefi olarak benimsenen sürdürülebilir çevre ve sürdürülebilir kalkınmanın temelini oluşturmaktadır. Bu sebeplerle, Türkiye için önemli bir potansiyele sahip olan "atık döküm kumları (ADK)'nın çeşitli çevre dostu yöntemlerle geri kazanılması ve/veya tekrar kullanılarak döküm endüstrisi veya farklı bir endüstri için katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi ve bunun sanayide uygulamaya aktarılmasının; doğal kaynaklarımızın korunması, hammadde tasarrufunun sağlanması, ekonomiye katkı sağlanması, çevrenin korunması, atık miktarının azaltılması ve gelecek için yatırım olmasından ötürü, ülkemiz açısından büyük bir fırsat olacağı ön görülmektedir. Ayrıca, çeşitli ön işlem prosesleriyle ADK'dan olası kirleticilerin uzaklaştırılması, düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi bakımından döküm endüstrisine büyük bir kazanç sağlayacaktır. Çalışma sonuçlarının özellikle "üniversite-sanayi işbirliği" çerçevesinde sanayi kuruluşlarınca kullanılabilecek olması ve üniversitelerde elde edilen teorik ve teknolojik bilgilerin uygulamaya dönüştürülmesi, ülkemizi ayrıca bu alanda anahtar ülkelerden biri haline getirecektir.

Aralık 1999'da gerçekleşen AB Helsinki Zirvesi'nde, Türkiye'ye resmi olarak aday ülke statüsü verilmesi ile birlikte AB müktesebatının uyum süreci başlamıştır. 3

Ekim 2005 itibariyle de AB'ye katılım müzakereleri başlatılmış ve AB'nin genişleme sürecinde önemli bir adım atılmıştır (Büyükbektaş ve Varınca, 2008). Müzakereler Müktesebat olarak bilinen AB yasaları bütünü'nün benimsenmesi ve uygulanmasıyla ilgilidir. Müktesebat 35 başlık altında gruplanmış yaklaşık 130.000 sayfadan oluşmakta ve AB'ye üye ülkelerin uyması gereken kuralları ortaya koymaktadır. Bir aday ülke olarak Türkiye'nin, mevzuatının önemli bir kısmını AB yasalarına uygun hale getirmesi gerekmektedir. Bu da, çevreden yargı sistemine, ulaştırmadan tarıma ülkedeki neredeyse tüm sektörleri ve halkın tüm kesimlerini etkileyecek temel toplumsal değişikliklerin yapılması ve AB standartlarına yükseltilmesi anlamına gelmektedir.

Türkiye, AB üyesi olabilmek için 35 konu başlığı üzerinden uyum çalışmalarını sürdürmektedir. AB'ye üyelik müzakerelerinde *en zorlu* alanların başında *çevre* yer almaktadır ve çevrenin korunması AB'nin temel öncelikleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Yaklaşık 300 kadar direktif ve tüzükle düzenlenen çevre, AB Müktesebatının en kapsamlı alanlarından birisini oluşturmaktadır. AB'ye aday ülkelerin üye olmadan önce ulusal mevzuatlarını Topluluk Müktesebatı ile uyumlaştırmaları beklenmekte, bu çerçevede ülkemizin de özellikle doğa koruma, enerji ve atık yönetimi gibi konularda AB mevzuatını benimsemesi gerekmektedir. Ülkemiz de AB aday ülkesi olması sebebiyle halen çevre konusundaki müzakerelerini devam ettirmekte olup AB çevre mevzuatını önemli ölçüde ulusal müktesebata kazandırmıştır.

AB çevre politikalarının sanayi kesimini ilgilendiren düzenlemeleri döküm sektörünü de yakından ilgilendirmektedir. Sanayiden kaynaklanan kirliliğin kaynağında önlenmesi ve kontrolüne farklı bir yaklaşım getiren "Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Direktifi (EKÖK-IPPC) (2008/01/EC)" kapsamında, çevre kirliliğini önleme konusunda işletmelere ciddi sorumluluklar yüklenmektedir. EKÖK (IPPC) Direktifi'nde yer alan "entegre" kavramı, sanayi tesislerinin havaya, suya ve toprağa yönelik emisyonlarından atık oluşumuna, hammadde kullanımı ve enerji verimliliğinden gürültü ve kazaların önlenmesine ve risk yönetimine kadar tüm çevresel boyutları kapsamaktadır. Kapsamı ve neden olacağı maliyetler açısından bakıldığında, 2007'de Topluluk dâhilinde yürürlüğe giren EKÖK Direktifi, Türkiye'nin Topluluğa katılımı sürecinde döküm sanayinin çevre yatırımlarını en fazla etkileyecek direktif olarak görülmektedir. EKÖK Direktifi'nin Türkiye'de

uygulanmasının desteklenmesi amacıyla Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nca Ocak 2011'de bir proje başlatılmış olup sözkonusu projenin 24 ay sürmesi planlanmaktadır. Endüstriyel kirliliğin entegre yönetimi ve önlenmesine yönelik bugüne kadar yürütülen çalışmalar ve ülkemiz koşulları dikkate alınarak ilgili direktifin uyumlaştırılması için 2012 yılı, entegre izne geçiş için 2015 yılı ve tam uygulanması için 2018 yılı öngörülmektedir. 2015 yılında ülkemizde yürürlüğe girmesi beklenen diğer bir direktif ise 19.11.2008 tarihli ve 2008/98/EC sayılı Yeni Atık Çerçeve Direktifi'dir. Bu direktifte "atığın yaşam döngüsü" denilen yeni bir kavram ortaya atılmıştır. Buna göre atığın "atık" değil de "yan ürün" olarak değerlendirilerek, bir başka sanayi tesisine hammadde olması sağlanacaktır. Görüldüğü üzere, Çevre Mevzuatı kapsamında, "sürdürülebilir çevre" ve "sürdürülebilir kalkınma" ilkeleri doğrultusunda özellikle endüstriyel kirliliğin önlenmesi, çevrenin korunması ve sanayi kuruluşlarının çevresel sorumluluklarını yerine getirmesi için, tüm sanayici ve işletmelerin çevre duyarlılığını arttırmaya yönelik yasal çalışmalar yaygınlaştırılarak devam etmektedir (EC, 2008a; Aslan, 2011).

Bu çalışma, 10 Mart 2005 tarihli TÜBİTAK 11. Bilim Teknoloji Yüksek Kurulu (BTYK) toplantısında alınan karar gerekçesinde, Cumhuriyetin 100. yılı için Vizyon 2023 Teknoloji Öngörüsü Projesi kapsamında, Öncelikli Teknolojik Faaliyet Konuları (TFK) EK 1, 13. Çevre Teknolojilerinde Yetkinlik Kazanma konu başlığı, 13.4. Katı Atıkların Geri Kazanımına ve Tehlikeli Atıkların Giderilmesine Yönelik Teknolojilerin Geliştirilerek Yaygınlaştırılması alt başlığı kapsamında *ulusal öncelikli* olarak yer almaktadır. Bu TFK; atıkların çevreye zararlarını ortadan kaldıracak ve yeniden kullanılmalarını mümkün kılacak geri-dönüşüm ve yeniden kullanım teknolojilerinin geliştirilmesini hedeflemektedir.

Çalışma, aynı zamanda yine 10 Mart 2005 tarihli TÜBİTAK 11. BTYK toplantısında alınan karar gerekçesinde, Öncelikli Teknoloji Alanları (TA) EK 2, 8. Enerji ve Çevre Teknolojileri konu başlığı, 8.7. Atık Değerlendirme Teknolojileri alt başlığı kapsamında da ulusal öncelikli olarak yer almaktadır. Çalışmanın konusu ayrıca toplantı kararları çerçevesinde düzenlenen Ulusal Araştırma Programları Çalıştayı kapsamında ele alınan "Çevre ve Enerji Teknolojileri" ana program kategorisindeki "Yenilikçi Çevre Koruma ve İzleme Teknolojileri Programı"na da uymaktadır (BTYK, 2005).

1.2 Çalışmanın Amacı Ve Kapsamı

Bu çalışmanın ana amaçları; Marmara Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir dökümhane tesisinde, demir döküm işlemi sırasında yüksek miktarlarda ortaya çıkan ve halen düzenli depolama tesislerinde depolanarak bertaraf edilen ADK'nın 1) Dökümhane tesisi içerisinde hammadde olarak geri dönüşümü ve proseste kum kalıp hazırlanmasında tekrar kullanımının incelenmesi, 2) Çeşitli ön işlem prosesleriyle (yakma, yıkama, solidifikasyon/stabilizasyon (S/S)) düzenli depolama kriterlerine uygun hale getirilebilirliğinin teknik, çevresel ve ekonomik açıdan araştırılması, 3) Geri kazanım prosesiyle faydalı ve ekonomik bir ürüne dönüştürülmesine yönelik pilot ölçekli çalışmaların gerçekleştirilmesi, 4) Herbir uygulamada elde edilen farklı son ürünler için ekonomik analizin yapılması ve 5) Çalışma sonuçlarının sanayide uygulamaya aktarılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu çalışmayla, hem atık bertaraf probleminin çözümüne yardımcı olunması hem de döküm endüstrisi kökenli ADK'ların uygun geri kazanım/tekrar kullanım ve bertaraf yöntemleriyle değerlendirilebilirliğinin araştırılması ve döküm endüstrisi ve/veya farklı bir endüstri için katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülerek "üniversite-sanayi işbirliği" çerçevesinde sanayide uygulamaya aktarılabilirliğinin ortaya konulması planlanmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda yapılan çalışmalar şöyle özetlenebilir:

2. kısımda, tehlikeli atıkların tanımı, tehlikeli atık yönetimi, tehlikeli atık bertaraf yöntemleri, ısıtma yöntemleri ve solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) hakkında genel bilgi verilmiştir.
3. kısımda, döküm endüstrisinin tanımı, döküm yöntemleri, döküm prosesi temel adımları, döküm kumunun özellikleri, döküm kumunun sınıflandırılması, yeşil kumun bileşenleri, dökümhanelerden kaynaklanan atıklar, döküm kumunun yeniden kullanımı ve geri kazanımı, ADK'nın diğer alanlarda değerlendirilme imkanları hakkında genel bilgi verilmiştir.
4. kısımda, konuyla ilgili literatür çalışmaları hakkında genel bilgi verilmiştir.
5. kısımda deneysel çalışmalar, 6. kısımda sonuçların değerlendirilmesi ve tartışma, 7. kısımda ise ekonomik analize ilişkin bilgiler verilmiştir.
8. kısımda ise sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

2. TEHLİKELİ ATIKLAR

2.1 Tehlikeli Atık Nedir?

Tehlikeli atık; katı, sıvı ve gaz formda olan; düşük dozlarda bile insanlar ve diğer canlılar için öldürücü, toksik, kanserojen, mutajen ve teratojen etkiye sahip, düşük sıcaklıkta alevlenebilme özelliği olan, patlayıcı, korozif ve reaktif maddedir (Çınar, 2008). Birleşik Devletler'de insan sağlığı ve çevreyi atıkların olası tehlikelerinden korumak amacıyla 1976 yılında yürürlüğe giren Kaynak Koruma ve Geri Kazanım Yasası (Resources Conservation and Recovery Act-RCRA)'na göre ise *tehlikeli atık*; miktarı, derişimi, fiziksel, kimyasal veya enfekte özellikleri sebebiyle ölümlere veya kalıcı hastalıklara sebep olabilen, uygun koşullarda arıtma, depolama, taşıma, bertaraf veya yönetimi gerçekleştirmediği takdirde insan ve çevre sağlığı için tehlike arz edebilen katı atıktır (Rosenfeld ve Feng, 2011).

2.2 Tehlikeli Kabul Edilen Atıkların Özellikleri

22.11.2008 tarihli ve 2008/98/EC sayılı "Yeni Atık Çerçeve Direktifi-EK 3"te belirtilen tehlikeli atık özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

US EPA (Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı)'ya göre tehlikeli atıklar; 1) karakteristik tehlikeli atıklar ve 2) listelenmiş tehlikeli atıklar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Dolayısıyla bir atığın tehlikeli olup olmadığına karar vermede iki yöntem mevcuttur. Bunlardan ilki, yapılacak laboratuvar testleri ile atığın bir veya birden fazla tehlikeli özellik içerip içermediğinin belirlenmesidir. US EPA kaynaklı "tehlikeli atık" ifadesinin evrensel bir tanımı olmamasına rağmen RCRA'ya göre bir atığın tehlikeli olarak nitelendirilebilmesi dört temel özelliğe dayanmaktadır. Bunlar; parlayıcılık (atık kodu D001), korozivite (atık kodu D002), reaktivite (atık kodu D003) ve toksisite (atık kodu D004-D043)'dir (Chaaban, 2001; CDPHE, 2008).

- **Parlayıcılık (Tutuşabilirlik):** Tutuşabilir atıklar, taşıma, depolama veya bertaraf esnasında alev alabilen ve yangına sebep olabilen atıklardır. Atık yağlar, çözücüler, nitrik asit, metanol, boyalar vb. yanıcı atık örnekleridir. Bu

tür atıklar, parlama noktası 50°C'den az olan, sürtünme, kendiliğinden kimyasal değişimlere uğrama ya da nemi absorblama yollarıyla alev alabilen maddelerdir (Çınar, 2008; CDPHE, 2008).

Çizelge 2.1 : Tehlikeli kabul edilen atıkların özellikleri, EC (2008b)'den uyarlanmıştır.

Atık kodu	Sınıfı	Atık kodu	Sınıfı
H1	Patlayıcı	H8	Korozif
H2	Oksitleyici	H9	Enfeksiyon yapıcı
H3A	Yüksek oranda tutuşabilenler	H10	Üreme yetisini azaltıcı
H3B	Tutuşabilen	H11	Mutajenik
H4	Tahriş edici	H12	Hava, su veya asitle temasında zehirli gazlar salan madde veya preparatlar
H5	Zararlı	H13	Atıkların bertarafı esnasında ortaya çıkan madde ve preparatlar
H6	Toksik	H14	Ekotoksik
H7	Kanserojen	H15	Diğer

- **Korozivite (Aşındırıcılık):** Korozif atıklar; asitler (pH<2) veya alkalilerdir (pH>12,5). Bunlar vücut dokularını veya metal vb. maddeleri korozyona uğratırlar. Bu atıklar diğer atıklarla reaksiyona girebilir veya bazı atıklardaki toksik maddelerin serbest kalmasına neden olabilirler (US EPA, 1996). Metal temizleme proseslerinden kaynaklanan asitler (örneğin FeCl₃), çelik imalatından kaynaklanan alkollü sıvılar, formik asit, HCl, NaOH vb. korozif atıklara örnektir (Çınar, 2008).
- **Reaktivite:** Reaktif maddeler patlamaya veya şiddetli reaksiyona girmeye hazır maddelerdir. Atık cephaneler ve patlayıcılar reaktif atıklara örnektir (Kocasoy ve diğ, 2005; Wentz, 1989). Bu atıklar; suyla ani ve hızlı reaksiyon vererek patlayıcı madde oluşumuna sebep olmakla birlikte çevre ve insan sağlığına zararlı toksik gaz, buhar ve duman üretirler. CN ve S içeren atıklardır (CDPHE, 2008).
- **Toksisite (Zehirlilik):** Toksik atıklar düşük dozlarda dahi insan için öldürücü olan veya kalıcı hastalıklara sebep olan atıklardır. Sindirimi veya deriyle teması halinde tehlikelidir. Toksik atık bileşenlerinin topraktan yeraltı suyuna

sızması, toplumun endüstriyel atıklardaki kimyasallara maruz kalmasının en yaygın yollarından biridir. Kimyasal atıklar, ağır metaller (Cd, Cr, Hg vb.) ve fenoller, toksik maddelere örnektir (Çınar, 2008).

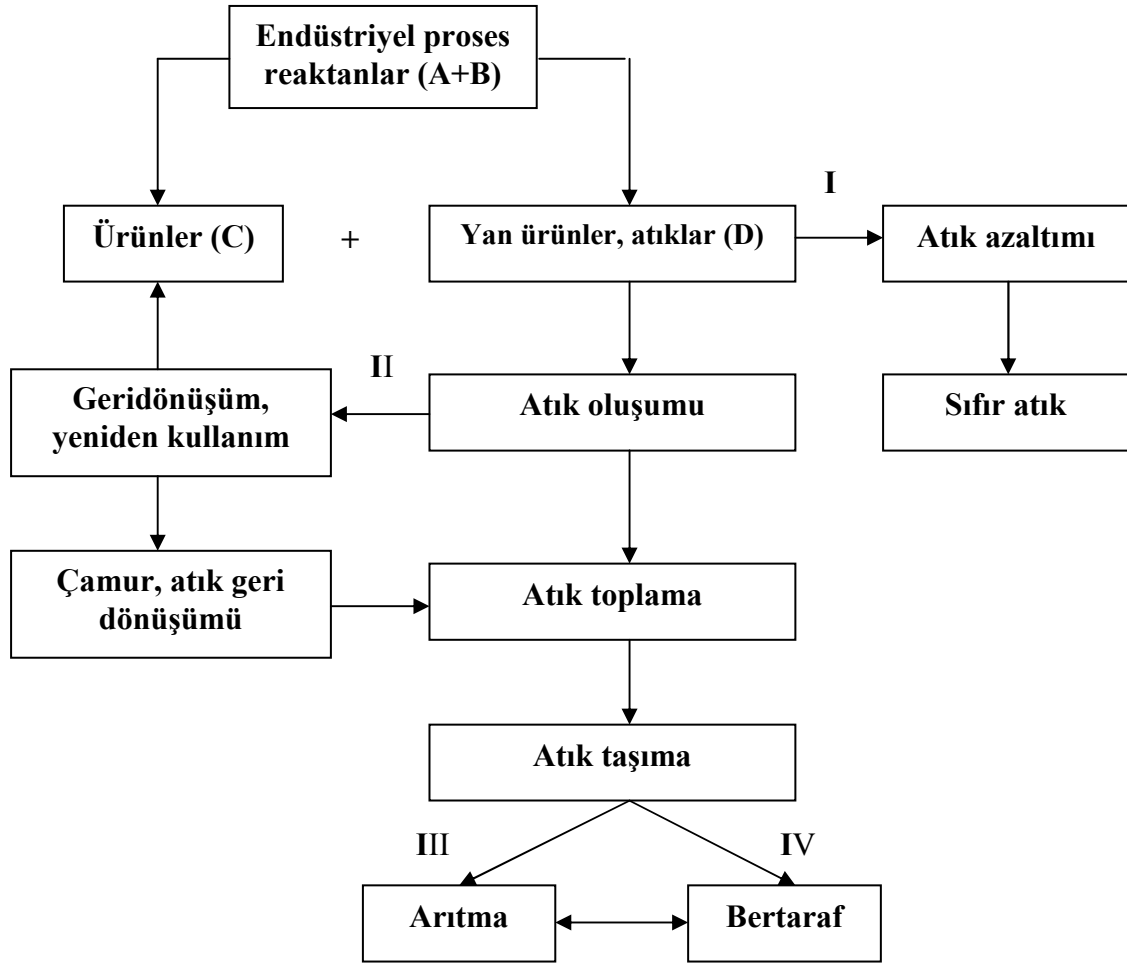
Bir atığın tehlikeli olup olmadığına karar vermede diğer yöntem ise çeşitli kuruluşlarca yapılan "listeler"dir. Örneğin ABD'de tehlikeli atık listelerini RCRA hazırlamakta ve US EPA kontrol etmektedir. Bu listeler de tutuşabilirlik, korozyonluk, reaktivite ve zehirlilik özelliklerine bakılarak hazırlanmıştır (Karpuzcu, 2006). ABD'deki tehlikeli atık listesi; kaynağı belli olmayan atıklar (F listesi), kaynağı belli olan atıklar (K listesi), akut zararlı kimyasal ürünler (P listesi) ve toksik kimyasal ürünler (U listesi) olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır (RCRA, 1989; CDPHE, 2008). "Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (AYGEİY)-EK IV"te verilen Tehlikeli Atık Listesi'nde ise;

- (*) ile işaretlenmiş atık tehlikeli atıktır. Tehlikeli atıklar, "AYGEİY-EK 3A"da listelenen özelliklerden bir veya daha fazlasına sahip atıklardır.
- (A) işaretli atıklar, "AYGEİY-EK 3B"de yer alan tehlikeli atık konsantrasyonuna bakılmaksızın tehlikeli atık sınıfına girerler.
- (M) işaretli atıkların tehlikelilik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılacak çalışmalarda, "AYGEİY-EK 3A"da listelenen özelliklerden H3-H8 ile H10 ve H11 ile ilgili değerlendirmeler, "AYGEİY-EK 3B"de yer alan eşik konsantrasyon değerleri esas alınarak yapılır (Anonim, 2008a).

2.3 Tehlikeli Atık Yönetimi

Tehlikeli atık yönetim sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar bundan 40 yıl öncesine, 1970'lerin başlarına dayanmaktadır. Tehlikeli atıkların kaynağında özelliğine göre ayrılması, toplanması, geçici depolanması, geri kazanılması, taşınması, bertarafı ve bertaraf sonrası kontrolü vb. işlemlerin tümü "tehlikeli atık yönetimi" olarak adlandırılmaktadır (Kocasoy ve diğ., 2005). Tehlikeli atık yönetiminde temel amaç; güvenli, etkin ve ekonomik yollarla atıkların toplanması, taşınması, arıtımı ve bertarafının sağlanmasıdır (Cutter, 1983). Şekil 2.1'de tehlikeli atık yönetim planı şematik olarak verilmiştir:

Tehlikeli atık yönetiminde "Atık Yönetim Hiyerarşisi"nde belirtilen adımlar takip edilmelidir. Bu kavram, atık yönetimi uygulamalarında tercih edilen öncelik sırasını



Şekil 2.1 : Tehlikeli atık yönetimi, Cutter (1983)'ten uyarlanmıştır.

ortaya koymaktadır (Kocasoy ve diğ, 2005; Anonim, 2006). Hiyerarşi ilk defa 75/442/EEC sayılı "Atık Çerçeve Direktifi" ile tanıtılmış, 2008/98/EC sayılı "Yeni Atık Çerçeve Direktifi" ile revize edilmiştir. Atık yönetimindeki öncelik sırası Şekil 2.2'deki gibidir:

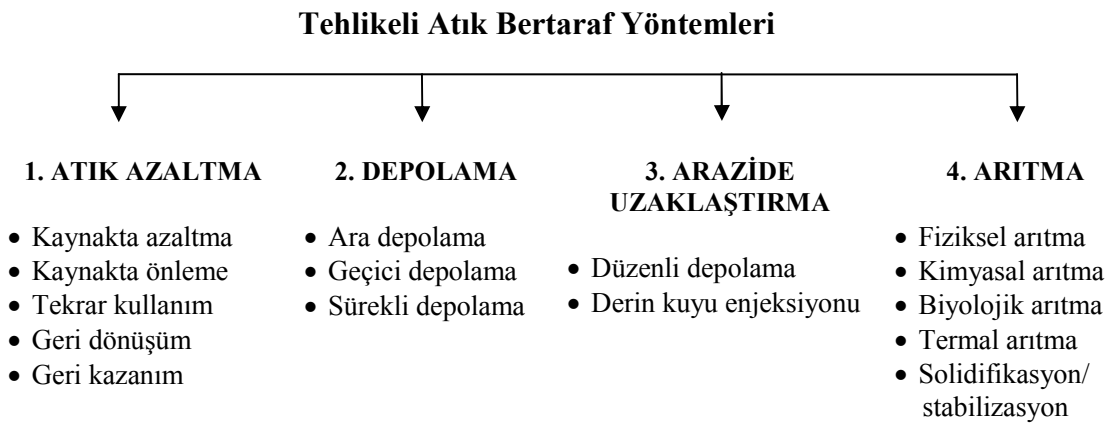


Şekil 2.2 : Atık yönetim hiyerarşisi (piramidi), Kocasoy ve diğ, (2005)'ten uyarlanmıştır.

Bu öncelik sıralamasında, en tercih edilen seçenek atık üretimini kaynağında önleme, bertaraf ise son tercih edilen yöntemlerdir. Atık üretiminin engellenemediği durumlarda, atığın miktarı ve tehlike derecesi kaynağında minimize edilmelidir. Hali hazırda üretilmiş olan tehlikeli atıklar için tercih edilen alternatif, atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve (enerji) geri kazanımının sağlanmasıdır. Üretimi zorunlu ve geri dönüşümü mümkün olmayan atıklar için ise, tehlikenin giderilmesi (yakma, nötralizasyon, vb.), atık hacminin azaltılması ve sızma potansiyelinin yavaşlatılması (arıtma, solidifikasyon, vb.) gereklidir. Ancak tüm bu seçenekler incelendikten sonra, geri kalan artık maddelerin sağlıklı ve çevre uyumlu yöntemlerle düzenli depolama tesislerinde bertarafı düşünülebilir (Kocasoy ve diğ, 2005).

2.4 Tehlikeli Atık Bertaraf Yöntemleri

Atıkların geri kazanımı ve tekrar kullanımı esastır. Geri kazanım ve tekrar kullanımın mümkün olmadığı durumlarda atıklar, çevre ve insan sağlığına zarar vermeden bertaraf edilirler. Bertaraf yöntemleri, tehlikeli atıkların özelliklerine ve uygun teknolojilere göre seçilir (Anonim, 2005a). Seçim esnasında en önemli nokta; atığın kendisi, özellikle de; kimyasal bileşimi ve arıtılacak miktarıdır (Kocasoy ve diğ, 2005). "AYGEİY-EK 2A"da belirtilen bertaraf yöntemleri Şekil 2.3'te verilmiştir:



Şekil 2.3 : Tehlikeli atık bertaraf yöntemleri.

Atıklar, tekrar değerlendirme, düzenli depolama veya çevresel zararlarını en aza indirme amacıyla çeşitli fiziksel, kimyasal, biyolojik veya ısı işlemlere tabii tutulurlar. Arıtımın temel amacı, atığın fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerini değiştirerek güvenli bertarafını sağlamaktır. Tehlikeli atıklar nihai bertaraf öncesinde

arıtma teknolojileri ile tehlikesiz, daha az tehlikeli, daha az toksik hale getirilebilir ya da atık miktarı azaltılabilir (Blackman, 1996). Tehlikeli atığın bu işlemler sonucunda inert hale getirildiğinin, "AYGEİY-EK 3A"da verilen tehlikeli atık özelliklerini taşımadığının veya "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY)-EK 2"ye göre tehlikesiz atık olarak depolanabilirliğinin belgelenmesi zorunludur. Bu işlemler sonucunda bakiye atık oluşuyorsa, Yönetmelik hükümlerine uygun şekilde bertarafı sağlanmalıdır (Anonim, 2005a). Arıtma teknolojileri, belirli atık türlerini arıtmadaki etkinliğine, bakiye atık oluşturma faktörüne, maliyet ve risklerine göre Çizelge 2.2'deki gibi sınıflandırılırlar (Misra ve Pandey, 2005).

Çizelge 2.2. Tehlikeli atık arıtma yöntemleri,
Misra ve Pandey (2005)'ten uyarlanmıştır.

Fiziksel arıtma yöntemleri			Kimyasal arıtma yöntemleri	Biyolojik arıtma yöntemleri
Gaz temizleme	Sıvı-katı ayırma	Bileşenlerin uzaklaştırılması		
Mekanik toplama	Santrifüj	Adsorpsiyon	Adsorpsiyon	Aerobik lagünler
Elektrostatik çökelme	Koagülasyon	Kristalizasyon	Kimyasal oksidasyon	Anaerobik lagünler
Bez filtre	Flokülasyon	Diyaliz, Elektrodiyaliz	Kimyasal çöktürme	Stabilizasyon havuzları
Sulu yıkama	Filtrasyon	Distilasyon	Piroliz	Sprey sulama
Aktif karbon adsorpsiyonu	Sedimentasyon	Liç (sızma)	İyon değişimi	Damlatmalı filtre
Adsorpsiyon	Yüzdürme	Evaporasyon	Nötralizasyon	Aktif çamur
	Durultma tankı	Özütleme		Kimyasal indirgeme
	Yoğunlaştırma	Ters ozmoz		
		Sıyırma		

Atıkların nihai bertarafı için kullanılan yöntemlerden ikisi yakma ve düzenli depolamadır.

a) Yakma: Katı ve tehlikeli atıkların ısı işlemlerle uzaklaştırılması için gerek endüstride uygulanan gerekse geliştirme aşamasında olan pekçok teknoloji mevcuttur. Bu teknolojiler; 1) Tek başına yakma (mono-incineration), 2) Birlikte yakma (co-combustion) ve 3) Yeni ve alternatif ısı işlemlerdir (Toraman ve Topal, 2003).

Yakma, atıkların ve arıtımın kolay bir şekilde kontrol edilebileceği bir işlemdir. Atıkların 400-1200°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması, yanabilen katının atmosfere salınan zararsız gazlara oksidatif dönüşümü ve sonuçta büyük moleküllerin küçük parçalara indirgenmesi esasına dayanır (Kocasoy ve diğ, 2005; Rabel ve diğ, 1998). Yakma prosesinde temel ürünler CO₂, su ve kül iken, temel sorun oluşturan ürünler çevresel etkilerinden dolayı kükürt, azot ve halojen içeren bileşiklerdir (Rabel ve diğ, 1998). Gerekli tedbirlerin alınmaması, yakma prosesinde istenmeyen bileşiklerin atmosfere salınımına neden olur. Bu çerçevede, yakma sonrası filtrasyon, gaz temizleme gibi ikincil bir arıtma teknolojisine ihtiyaç duyulur (Misra ve Pandey, 2005).

b) Düzenli depolama: Düzenli depolama, sızdırmazlığı sağlanmış ve gaz kontrolü yapılmış alanlarda atıkların çok büyük olmayan bloklar halinde belli bir eğimle kademeli olarak depolanmasıdır. Depolama işlemi sırasında alınan önlemlerin yeterli olduğunun veya çevrenin olumsuz yönde etkilenmeyeceğinin ispat edilmesi halinde, atıklar depolanabilir veya bu amaçla depo tesisi kurulmasına izin verilebilir. 24.03.2010 tarihli ve R.G. 27531 sayılı "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY)"te düzenli depolama tesisleri; atıkların olduğu tesis içinde geri kazanım/ön işlem/bertaraf öncesi geçici depolandığı birimler, atığın geri kazanım/ön işlem öncesi üç yıldan daha kısa süreli ara depolandığı tesisler ve atığın bertaraf öncesi bir yılı geçmeyecek şekilde ara depolandığı tesisler hariç olmak üzere atıkların yeraltı veya yer üstünde belirli teknik standartlara göre bertaraf edildiği sahalar olarak tanımlanmış olup aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır:

- I. sınıf düzenli depolama tesisleri: Tehlikeli atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesisler,
- II. sınıf düzenli depolama tesisleri: Belediye atıkları ile tehlikesiz atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesisler,
- III. sınıf düzenli depolama tesisleri: İnert atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesisler.

2.5 Düzenli Depolama Öncesi Tehlikeli Atıklara Uygulanan Ön İşlemler

16.07.1999 tarihli ve 1999/31/EC sayılı Düzenli Depolama Konsey Direktifi'ne göre; düzenli depolama öncesi tehlikeli atıklara uygulanan ön işlemler; ayırma işlemi de

dahil olmak üzere atıkların hacmini veya tehlikelilik özelliklerini azaltmak, potansiyel çevre ve sağlık etkilerini en aza indirmek, yönetimini kolaylaştırmak veya geri kazanımını artırmak amacıyla atıklara uygulanan fiziksel, ısı, kimyasal veya biyolojik işlemlerdir (EC, 1999).

Olası tehlikeli reaksiyonlar nedeniyle atıklar depolanmadan önce ayrıştırılmalı ve bertaraf sahasında kayıtları tutulmalıdır. Ayrıca, atık türünün ve içerisindeki bileşenlerin çeşitliliği nedeniyle, oluşan sızıntı sularının arıtımı kompleks bir hal alabilir. Uçuculuk veya diğer sebeplerden ötürü tehlikeli atıkların üzerinin hemen kapatılması da gerekebilir. Bu sebeplerden ötürü, tehlikeli atıkların düzenli depolanması, depo sahalarının tasarımı-işletimi ve düzenli depolama öncesi ön işleme tabii tutulması özel ilgi gerektiren bir konudur (Misra ve Pandey, 2005). Ön işlem uygulanmasının temel amacı, çevresel etkileri belli seviyelerde tutarak, depo sahanın etrafındaki hava, su ve toprak kalitesinin etkilenmesini önlemektir (Cossu ve diğ., 2007; Baccini, 1989; Belevi ve Baccini, 1989).

Düzenli depolama öncesi tehlikeli atıklara uygulanan ön işlemlerden bazıları; kimyasal stabilizasyon (fiksasyon, solidifikasyon/stabilizasyon, enkapsülasyon), hacim azaltma, atık ayrıştırma, detoksifikasyon ve atık yıkamadır (Misra ve Pandey, 2005).

a) Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S): Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) prosesi, düzenli depolama öncesi ön işlem olarak kullanılan en genel atık arıtma prosesisidir (Conner, 1990). Bu proses, kirleticilerin zararlı etkilerinin azaltılması için atıkların bağlayıcı sistemlerle karıştırılması ve bu sayede çevre dostu atıklara dönüştürülerek düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilmesini veya inşaat sektöründe kullanılmasını içermektedir (Shi ve Spence, 2004). S/S genellikle inorganik kirletici içeren atıklara (tehlikeli metaller içeren çamurlar, cüruflar ve küller) uygulanmış olmasına rağmen, son zamanlarda yüksek TOK içerikli atıklar, düşük parlama noktalı solvent atıkları veya organik kirleticilerle kontamine olmuş inorganik atıklar gibi bazı organik kökenli atıklarda da başarıyla uygulanmıştır (Al-Tabaa ve Pereda, 2006; Batchellor, 2006; Fleri and Whetstone, 2007; Karamalidis and Voudrias, 2007; Pereira ve diğ., 2001). S/S prosesi günümüzde ise metal, organik, çözünür tuzlar vb. kirleticiler içeren çok çeşitli atıkların arıtımında kullanılmaktadır (Conner and Hoeffner, 1998; US EPA, 2001).

S/S prosesi, kirletici atıkların fiziksel ve/veya kimyasal stabilizasyon yöntemleri kullanılarak daha az toksik madde içeren kararlı ya da daha iyi işlenebilir formlara dönüştürülmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu uygulama ile atık bünyesindeki kirletici bileşenlerin sızması minimuma indirilerek atığın toksisitesi azaltılmakta ve doğa için tehlike potansiyeli giderilmektedir. Serbest sıvı akışını önlemek için atıklar uçucu kül, çimento, kireç, kil gibi bağlayıcı malzemelerle karıştırılır. S/S prosesi sayesinde dayanım ve sızmazlık artar, permeabilite ise düşer. Solidifikasyon, ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirerek düzenli depolama için ön hazırlık sağlamış olur ve oluşan katılaştırılmış malzeme belli bir dayanıma ulaşmış olur. Sızıntı testleri ile final ürünün tehlikeli olmadığı ortaya konursa bu ürünün yapı malzemesi olarak tekrar kullanılabilirliği mümkün hale gelir. Elde edilen malzeme düzenli depolama sahalarında örtü materyali ve yol inşaatlarında dolgu materyali olarak uygulamalarda, tuğla-briket yapımında, park-bahçe taşı üretiminde ve rekreasyon alanı eşyalarının yapımında kullanılabilir (Uçaroğlu, 2002; Bayar, 2005).

Çimento-bazlı S/S, göreceli basit ve ucuz doğası, kolay kullanımı ve düşük ilk yatırım maliyeti nedeniyle en fazla tercih edilen tekniklerden biridir. Portland çimentosu en çok kullanılan bağlayıcı malzeme olup çimentonun alkalinitesi asidik atıkları nötralize etmeye yardımcı olur. Atık malzemeler çimento ile karıştırıldıktan sonra hidratasyon için su ilave edilir. Hidratasyon reaksiyonları sonucu atığın fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişim gözlenir (Chan ve diğ, 2000). Solidifikasyon (katılaştırma), atıktaki kirleticilerin dayanıklı katı matriks içerisinde hapsedilmesi gibi, yapıdaki fiziksel değişiklikler ile ilgilidir (Leonard ve Stegemann, 2010) ve sıvı atıkları, yarı-katı çamur halde veya toz atıkları granül halde malzemelere dönüştürerek, bunların depo sahasına taşınmalarında kolaylık sağlar (Chen ve diğ, 2009). Stabilizasyon (kararlılaştırma) ise, atık bünyesindeki tehlikeli bileşenlerin bağlayıcı özelliğe sahip katkı malzemelerle etkileşimleri (=immobilizasyon, enkapsülasyon, fiksasyon) sonucu oluşan (Chen ve diğ, 2009) ve bunların daha az çözünür, daha az sızabilir, daha az toksik veya kimyasal olarak daha kararlı formlara dönüşmesini sağlayan kimyasal değişikliklerle ilgilidir (Leonard ve Stegemann, 2010). atık ve bağlayıcı malzeme arasındaki kimyasal etkileşimleri içermektedir (Chen ve diğ, 2009). S/S yöntemiyle atık içerisindeki tehlikeli bileşenlerin sızma (liç) potansiyeli düşürüldüğünden, işlem sonrası atık tehlikesiz atık olarak bertaraf edilebilir (Bayar, 2005).

S/S ürünlerinin çevresel açıdan uygunluğu sızma (liç) testleri ile ortaya konulmaktadır. Bu sızma (liç) testleri içerisinde en yaygın olarak kullanılanlar EN 12457-4: Granül Haldeki Atıkların Özütleme uygunluk testi ve Toksikite Karakteristiği Sızma Prosedürü (TCLP) uygunluk testidir (Coz ve diğ, 2009).

S/S teknolojisinin ana amaçları;

- Sıvı, katı, çamur formdaki zararlı atıktan katı bir ürün elde etmek ve zararlı atığın çevreye olan zararını önlemek,
- Tehlikeli atık bileşenlerini izin verilebilir değer sınırlarında tutmak,
- Atığın fiziksel karakteristiklerini değiştirerek kirliliklerin çözünürlüğünü sınırlandırmak,
- Toksik atıkları toksik olmayan formlara dönüştürmek,
- Biyolojik/kimyasal bozunmaya karşı, katılaştırılmış maddeleri dayanıklı hale getirmek,
- Yapı malzemesi olarak tekrar kullanımını sağlamak,
- Akışkanlar ile temas ettiği zaman kirletici çözünürlüğünü azaltmaktır (Uçaroğlu, 2002).

S/S prosesi uygulanarak, zararlı atık, kirleticiler açısından standart değerleri sağlayan konvansiyonel atığa dönüştürülür (Çelik ve Sivri, 2005).

b) Hacim azaltma: Yakma, en çok kullanılan tehlikeli atık hacim azaltma tekniğidir. Tehlikeli atıkların nicelik olarak yarısından fazlası organik içeriklidir ve yakma yolu ile zararsız hale getirilebilir niteliktedir. Pekçok atık yakılarak tamamen bozunabilir, diğer bir kısmı ise geride tehlikeli veya tehlikesiz bakiye artık bırakabilir (Misra ve Pandey, 2005).

c) Atık ayrıştırma: Düzenli depolama sahasında istenmeyen reaksiyonların önlenmesi için atıklar düzenli depolama öncesi tür ve kimyasal özelliklerine göre ayrıştırılmaktadır. Atıkların birbiriyle karışması sonucu pekçok tehlikeli durum ortaya çıkabilir. Örneğin; asidik atıkların siyanürlü atıklarla karışması, son derece toksik HCN gazının çıkışına sebep olur (Misra ve Pandey, 2005).

d) Detoksifikasyon: Düzenli depolama öncesi detoksifikasyon; ısı, kimyasal veya biyolojik yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemlere örnek olarak iyon-değişim

nötralizasyonu, yükseltgeme-indirgeme, aktif çamur, havalandırmalı lagünler, atık stabilizasyon havuzları ve damlatmalı filtreler verilebilir (Misra ve Pandey, 2005).

e) Atık yıkama: Depolama sahalarında görülen en önemli uzun dönem etki, sızıntı suyu kalitesidir; yani depolanan atıkların yağmur suyuna maruz kalması nedeniyle yapılarındaki kirleticilerin sızıntı suyuna geçmesi, toprak ve yeraltı sularını kirletme potansiyelinin ortaya çıkmasıdır. Bu kapsamda, atıkların kontrollü yıkanması ve sözkonusu kirleticilerden sızma potansiyeline sahip fraksiyonun kontrol altına alınması, düzenli depolama öncesi ön işlem olarak ortaya çıkmaktadır. Atık yıkamada kolon ve kesikli sistemler kullanılmaktadır (Cossu ve diğ, baskıda; Cossu ve Lai, baskıda).

3. DÖKÜM ENDÜSTRİSİ

3.1 Döküm Endüstrisinin Tanımı

Ergimiş metalin içerisinde boşluk bulunan bir kalıba dökülüp katılaştırılmasıyla istenilen şeklin elde edilmesi yöntemine döküm denir (Sylvia, 1972). Döküm sanayi; çeşitli pik demir, çelik hurda ve ferro alaşımların endüksiyon, ark veya kupol ocaklarında ergitilerek kum, seramik veya metal kalıplarda şekillendirilmesiyle, sanayinin ihtiyacı olan pik, çelik, sfero ve temper döküm ürünlerinin ham veya işlenmiş olarak üretildiği sanayi sektörüdür (Kepez, 2007). 4D sektörü (dirty, difficult, dangerous, dusty) olarak da anılan kirli, zor, tehlikeli ve tozlu bir sektördür. Ancak, gerek sağladığı istihdam, gerekse ülke sanayisine katkısı nedeniyle tüm dünyada vazgeçilemez sektörlerden biridir (Gönüllü, 2007).

Döküm sanayi üretmekte olduğu pik, çelik, sfero ve temper döküm ürünleri ile inşaat ve hafriyat makineleri sanayii, otomotiv ve tarım makineleri sanayii, dayanıklı tüketim malları sanayii, genel makina imalat sanayii, demir-çelik sanayii, ulaşım sanayii, çimento ve toprak sanayii, maden ve cevher hazırlama sanayii, kimya ve petro-kimya sanayii ve savunma sanayiine hizmet vermektedir (DPT, 2000).

2011 yılı döküm sektörü verilerine göre, Türkiye'de yer alan 1040 kuruluştan 1024'ü özel sektör, 16'sı ise kamu ve askeri kuruluştur. 2011 yılında demir-çelik döküm sektöründe 665 kuruluş, demir dışı döküm sektöründe ise 375 kuruluş faaliyetini sürdürmüştür. Türk döküm sektörünün gerek Avrupa'da, gerekse dünyada önemli bir yeri vardır. Türk döküm sektöründeki 2011 yılı kuruluş sayıları Çizelge 3.1'de, Türkiye'de döküm sektöründe faaliyet gösteren işletmeler ve üretim miktarlarının yıllara göre değişimi ise Çizelge 3.2'de verilmiştir (TÜDOKSAD, 2012).

Türk döküm sektörü, 2010 yılı üretim rakamları itibari ile Almanya, Fransa ve İtalya'yı takiben Avrupa'da 4. sıraya yerleşmiş olmakla birlikte, Dünya sıralamasında 13. sırada yer almıştır. Dünya döküm üretiminin %1,4'ü Türkiye'de yapılmaktadır. 2010 yılı Avrupa döküm üretim miktarları Çizelge 3.3'te verilmiştir:

Çizelge 3.1 : Türk döküm sektörü kuruluş sayısı, TÜDOKSAD (2012)'den uyarlanmıştır.

Üretim cinsi	Kuruluş sayısı (2011 yılı)			Kamu&askeri tesisler	Toplam
	Büyük	KOBİ	Mikro		
Pik ve Sfero Döküm	18	212	356	8	594
Temper Döküm	1	2	-	-	3
Çelik Döküm	13	35	17	3	68
Alüminyum	19	42	113	2	176
Zamak	4	23	149	1	177
Bakır Alaşımları	2	7	11	2	22
TOPLAM	57	321	646	16	1040

Çizelge 3.2 : Türk döküm sektörü verileri, TÜDOKSAD (2012)'den uyarlanmıştır.

Sektörel göstergeler	İşletme sayısı	Üretim (ton)
2004	1256	982.000
2005	1299	1.121.200
2006	1285	1.209.500
2007	1216	1.316.500
2008	1189	1.265.000
2009	1097	1.030.000
2010	1071	1.291.700
2011	1040	1.433.050

Çizelge 3.3 : 2010-Avrupa döküm üretimi, TÜDOKSAD (2012)'den uyarlanmıştır.

Sıra	Ülke	Üretim (ton)	Sıra	Ülke	Üretim (ton)
1	Almanya	4.794.179	6	Ukrayna	1.000.000
2	Fransa	1.956.966	7	Polonya	928.150
3	İtalya	1.970.666	8	İngiltere	501.400
4	Türkiye	1.291.700	9	Çek Cumh.	344.377
5	İspanya	1.143.038	10	Avusturya	305.857

3.2 Döküm Yöntemleri

Metallere şekil vermenin farklı yolları vardır. Makine ile işleme, dövme, kaynak, presleme gibi şekil verme yöntemlerinin yanında diğer bir yöntem de döküm

yapmaktır. Metal döküm, istenilen bir şekli elde etmek için, seçilen metal veya alaşımın ergitilmesi, istenilen şeklin negatifi olan kalıp boşluğuna dökülmesi ve katılaşmasını bekleme işlemi olarak tanımlanabilir. Metal alaşımları fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından farklılık göstermekte olup üç ana grup halinde Çizelge 3.4'te verilmiştir (HAWAMAN, 2009):

Çizelge 3.4 : Metal alaşımları, HAWAMAN (2009)'dan uyarlanmıştır.

Demir döküm	Çelik döküm	Demir dışı döküm
Lamel grafitli dökme demir	Karbon çelikleri ve az alaşımlı çelikler	Al esaslı alaşımlar
Küresel grafitli dökme demir	Yüksek alaşımlı çelikler (paslanmaz, ısıya dayanıklı)	Cu esaslı alaşımlar (pirinç ve bronz)
Temper dökme demir		Mg esaslı alaşımlar
		Zn esaslı alaşımlar
		Ni esaslı alaşımlar
		Diğer alaşımlar (Pb, Sn ve Co esaslı)

Döküme biçim veren kalıbın tekrar kullanılıp kullanılmayacağı esasına göre, döküm yöntemleri ikiye ayrılır (HAWAMAN, 2009):

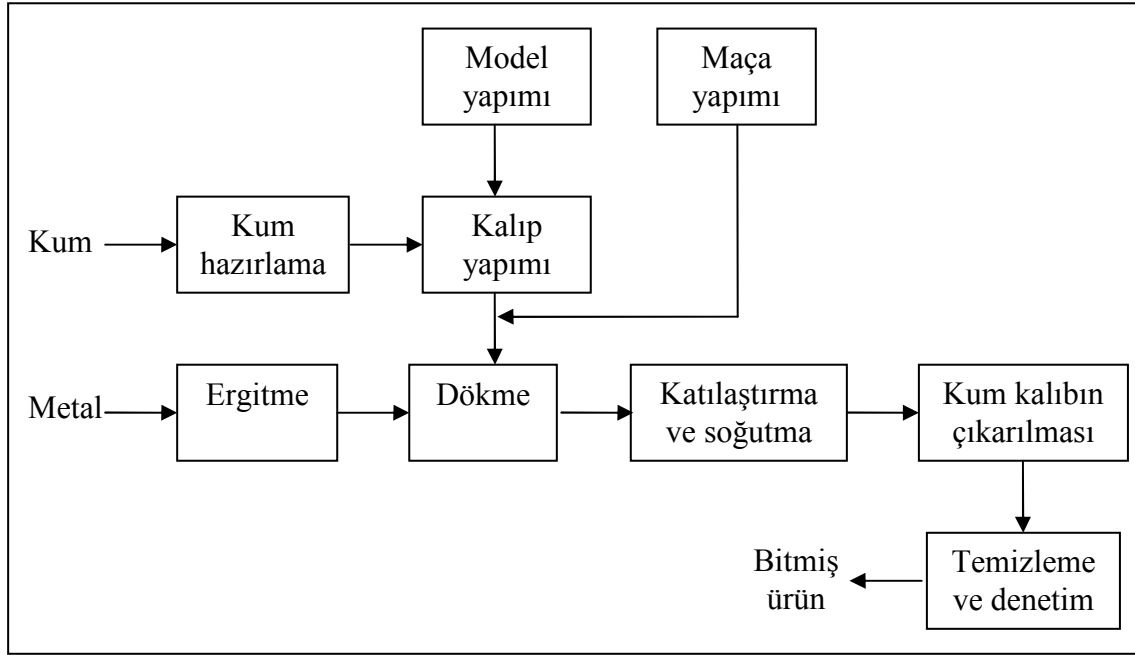
Harcanan Kalıp Kullanan Döküm Yöntemleri	Kalıcı Kalıp Kullanan Döküm Yöntemleri
Kum kalıba döküm	Metal kalıba döküm
Kabuk kalıba döküm	Basınçlı döküm (Sıcak/soğuk hazneli)
Seramik kalıba döküm	Savurma döküm
Alçı kalıba döküm	Sürekli döküm
Hassas döküm	

Kum Kalıba Döküm:

Dökümlerin büyük bir kısmı kum kalıplar kullanılarak yapılır ve yaygın olarak kullanılan kalıplama malzemesi kumdur. Genellikle 1 ton döküm için 4-5 ton kum gereklidir. Bu miktar dökülen metalin cinsine, parça büyüklüğüne ve kalıplama tekniğine göre değişir (Zanetti ve Fiore, 2002). Kum kalıba döküm yöntemi, kullanılan kalıbın cinsine göre değişik gruplara ayrılabilir. Bunların başlıcaları; yaş ve kuru kum kalıplara, maça kalıplara, kabuk kalıplara, gaz sertleştiricili silikat yöntemi ile hazırlanan kalıplara ve air-set kalıplara döküm yöntemleridir (HAWAMAN, 2009).

3.3 Döküm Prosesi Temel Adımları

Döküm işleminde altı temel adım takip edilir: 1) model yapımı; 2) maça yapımı; 3) kum hazırlama; 4) kalıp hazırlama ve kalıplama işlemi; 5) metal ergitme ve dökme ve 6) temizleme (Zanetti ve Fiore, 2002). Döküm sektörüne ilişkin genel proses akım şeması Şekil 3.1'de verilmiştir:



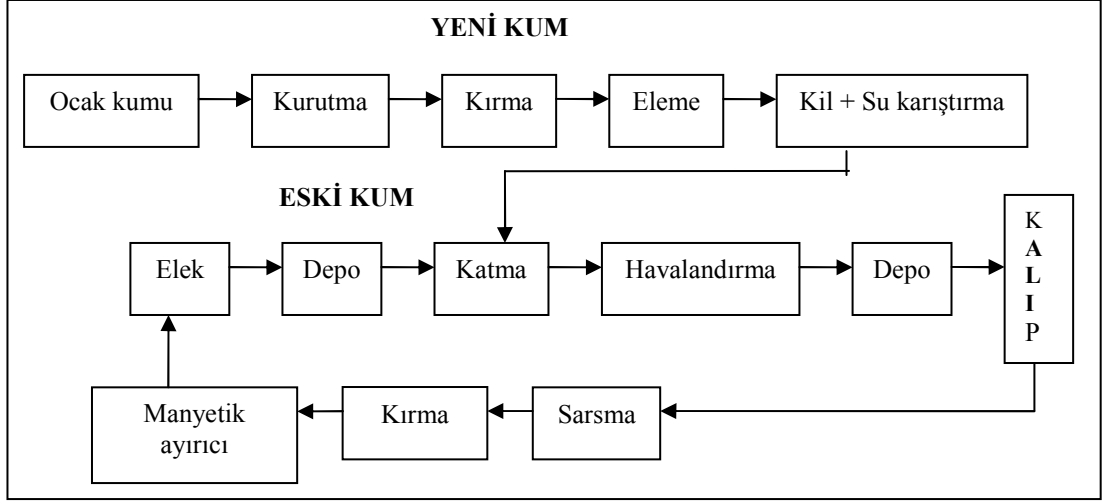
Şekil 3.1 : Döküm prosesi genel akım şeması.

3.3.1 Kum hazırlama

Kum hazırlamak ve kalıp yapmak için; ocak, deniz kıyısı veya gölden çıkartılan yeni kum ile sıcak metalin çeşitli zorlamalarıyla şeklini değiştirmiş ve topaklanmış eski kalıp kumu birlikte kullanılır. Bu nedenle kum hazırlama, yeni kumun ve eski kumun hazırlanması olarak iki kısma ayrılabilir. Kum hazırlama akım şeması Şekil 3.2'deki gibidir (Ersümer ve Uzunova, 1967).

3.3.2 Model yapımı

Dökülecek malzemenin katılaşma prensibine göre çekme ve işleme payları düşünülerek modeller yapılır. Model, kum içerisine yerleştirildikten ve kuma yeterli şekil alma kabiliyeti verildikten sonra dışarı alınır. Metal, tahta, alçı, plastik ve balmumu başlıca model malzemeleridir (Ersümer ve Uzunova, 1967; HAWAMAN, 2009).



Şekil 3.2 : Kum hazırlama ünitesi akım şeması, Ersümer ve Uzunova (1967)'den uyarlanmıştır.

3.3.3 Maça yapımı

Dökümü yapılacak malzemelerin içleri genel olarak oyuktur. Maçalar, kalıp boşluklarına konulan ve kapladıkları kısımların döküm yapıldıktan sonra boş çıkmasını sağlayan şekillerdir. Maçalar döküm esnasında kalıp içerisinde sıvı metalle sarıldığı için aşınma, kırılma, termik şok ve metal sızmasına engel olacak özellikte olmalı, dökümden sonra da kolayca dağılmalıdır. En çok tercih edilen maçalar kum esaslı olup ana hammadde kum ve bağlayıcılarıdır. Hem organik hem de inorganik bağlayıcılar kullanılabilir (Ersümer ve Uzunova, 1967; DPT, 2000; HAWAMAN, 2009)

3.3.4 Kalıp hazırlama ve kalıplama

Kalıplama işlemi, kalıp kumu kullanılarak yapılır. Kalıpların, basınçla dağılmaması, çevrilebilmesi ve taşınabilmesi için "derece" denilen metalik çerçeveler kullanılır. Model, bu metalik kutulara konur. Bir kalıp için iki veya daha fazla dereceye ihtiyaç vardır (Ersümer, 1978). Kalıba belli bir plastikliğe sahip, özel olarak hazırlanmış kum yerleştirilir ve sıkıştırılır. Model dışarı alınır ve kumdaki kalıp boşluğunda gerekli yerlere maçalar yerleştirilir (Ersümer ve Uzunova, 1967; Zanetti ve Fiore, 2002).

3.3.5 Metal ergitme

Metalin kalıp boşluğunu doldurması için belirli bir akıcılığa sahip olması ve ergitilmesi gerekir (Ersümer ve Uzunova, 1967). Dökümhanelerde kullanılan ergitme

fırınları, metali istenen hız ve verimle ergiterek döküm sıcaklığına getirirler. Dökümhane ergitme fırınları yakıtlı ve elektrikli olmak üzere iki gruba ayrılır. "Kupol ve pota" fırınlarında sıvı, gaz, yağ, kömür, doğalgaz vb. yakıtlar kullanılırken, "ark ve endüksiyon ocakları" fırınlarında elektrik kullanılmaktadır. Endüksiyon ocaklarının artan önemi sadece çok iyi sıcaklık kontrolü sağlamalarından ötürü değil, elde edilen metalin temiz oluşundan da ileri gelmektedir. Bu ocaklarda iyi bir filtrasyon sistemi ile sıfır emisyon değerlerine yakın değerler elde edilir (HAWAMAN, 2009).

3.3.6 Döküm ve parça alma

Döküm yöntemlerine göre sıvı metalin kalıplara doldurulması, katılaşması ve kalıpların açılması farklılık göstermektedir. Kalıcı kalıp kullanan döküm yöntemlerinde bu işlemler daha kısa sürede gerçekleşirken, harcanan kalıp kullanan döküm yöntemlerinde sıvı metalin tamamen katılaşması daha uzun sürelerde gerçekleşir. Kalıcı kalıplardan döküm parça alındıktan sonra işlem devam eder. Ancak harcanan kalıplar her döküm sonrası bozularak içerisinden döküm parça alınır. Kum kalıba dökümlerde titreşimli sarsaklardan faydalanılarak kum ile döküm parçası ayrılır. Döküm parça temizlemeye gönderilir, kum ise kum hazırlama ünitesine geri döner. Bu kumlar yeniden kullanılmak üzere manyetik seperatörlerden, eleklerden ve soğutma sistemlerinden geçirilerek kum silolarında stoklanır. Bu proses esnasında filtrelerde toplanan tozlar, elek üstünde kalan kumlar ve stok fazlalıkları dökümhane atıklarını oluşturmaktadır. Bu kumlar kum yenileme (reklamasyon) işlemine tabii tutularak belli oranlarda tekrar kullanılabilir. Kum yenileme işlemleri; kuru yenileme, yağ yenileme, ısıl yenileme, yağ veya kuru işlem ile ısıl yenileme işleminin beraber uygulanması gibi başlıca dört grupta toplanmaktadır (HAWAMAN, 2009).

3.3.7 Temizleme

Sıvı metalin kalıp boşluğunda katılaşmasından sonra (özellikle kum kalıp yönteminde) katı döküm parçaları üzerinde bazı çapaklar görülür. Bunlar, sıvı metalin kalıp kumunu çatlatarak bu çatlaklarda donmasından meydana gelmiş, istenmeyen hatalardır (Ersümer ve Uzunova, 1967). Bu nedenle, döküm parçaları öncelikle çelik bilya püskürtülen ve kumlama adı verilen makinelerden geçirilerek üzerlerindeki yolluk, besleyici ve çıkıcılar temizlenir; daha sonra da boyama ve

işleme proseslerinden geçirilir. Parçaların kumlandığı makinelerin toz filtrelerinden toz atıklar, taşlama hatlarından ise ağırlıklı olarak demir olan toz atıklar alınır (DPT, 2000; HAWAMAN, 2009).

3.3.8 Taşlama

Döküm parçalarının üzerinde bulunan yolluk ve besleyicilerin kalıntıları klasik taşlama yöntemleriyle temizlenir (DPT, 2000).

3.4 Döküm Kumları

3.4.1 Döküm kumunun özellikleri

Dökümhanelerde kalıp yapımında kullanılan kumun esas görevi, sıvı metal dökülüp katılaşınca kadar boşluğu bozulmadan korumaktır. Dökümün hatasız yapılması ve istenilen nitelikte olması için döküm kumunun aşağıdaki özelliklere sahip olması istenir (Ay, 2008; Zanetti ve Fiore, 2002):

- 1. Mukavemet:** Döküm esnasında sıvı metalin basıncı nedeniyle kalıbın şeklinin bozulup bozulmadığını temsil eder.
- 2. Ateşe dayanıklılık (Refrakter özellik):** Kalıp kumları ateşe dayanıklı değilse, taneler birbirine yapışır ve topaklanır. Böyle bir durumda sıcak metal kalıbı parçalar ve dışarı çıkar. Döküm sıcaklığında kumların topaklanmasına ve kalıbın bozulmasına ateşe dayanıklılık denir. Kalıp döküm sıcaklığında çatlamamalı ve yumuşamamalıdır.
- 3. Gaz geçirme kabiliyeti (Permeabilite):** Kumun sıvı metal kalıba döküldüğünde kalıp içinde var olan veya döküm esnasında oluşan gazların geçmesine izin verme özelliğine, kumun gaz geçirgenliği denir. Gaz geçirgenliği yetersiz ise ürünün yüzeyi kabarcıklı ve gözenekli olur. Kum kalıpta kuvars tanecikleri arasında yer alan küçük kanallar, metal dökümü sırasında kalıp içerisinde açığa çıkan gazların geçişine izin verir.
- 4. Akıcılık:** Kumun kalıbın şeklini alabilmesi için kil ve rutubetle takviyeli şekilde belirli bir akıcılığa sahip olması gerekir.
- 5. Düzgün yüzey:** Döküm parçalarının yüzeylerinin düzgün olması, ancak, ince taneli kumların modelin kalıplanması esnasında yüzeye dökülmesiyle gerçekleşir.

6. Yeniden kullanma: Ergitilmiş metal kalıbın içine döküldüğünde ilk temas eden kum taneleri aşırı şekilde çatlamadan ve topaklanma olmadan kalabilmeli ve yeni kalıp hazırlanırken yeniden kullanılabilmelidir.

7. Süneklilik: Kalıp kumunun yüksek sıcaklıkta fazla sertleşmeden kalabilmesidir.

8. Plastiklik: Kalıp kumlarının kalıbın şeklini alabilmesi için plastik yapıda olması gerekir, bu da ancak kil ve rutubetin desteğiyle sağlanır.

9. Kohezyon (birarada bulunma): Bağlayıcı kullanımı ve uygun sıkıştırma yöntemiyle kalıbın şeklini korumasını sağlayan özelliktir (Ay, 2008).

10. Sabit partikül boyutu dağılımı: Kum tanelerinin boyutu ve dağılımı, hem döküm malzemesinin bitmiş yüzeyini etkiler, hem de kalıptaki su buharı ile kalıp gazlarının çıkışını kolaylaştırır (Cruz ve diğ, 2009).

Döküm kumunun fiziksel ve kimyasal özellikleri döküm prosesinin türüne ve kaynaklandığı sanayi sektörüne bağlıdır (Siddique ve diğ, 2009; 2010). Döküm kumu tipik olarak yarı-köşeli veya yuvarlak şekillidir (Kaur, 2006). Tane boyutu dağılımı uniformdur, %85-95'i 0,6 mm ile 0,15 mm arasındadır, %5-12'si ise 0,075 mm'den küçüktür (Javed ve Lovell, 1994). Döküm kumunun özgül ağırlığı 2,39 ile 2,55 arasındadır ve su emme kapasitesi düşüktür; ayrıca, non-plastiktir ve kimyasal bileşimi ergimiş metalin türüne, bağlayıcı çeşidi ve yakıta bağlıdır. ADK esas olarak, ince film halinde yanmış karbonla kaplı silika kumu, artık bağlayıcı (bentonit, kömür, reçine/kimyasal vb.) ve tozlardan oluşur. Silika kumu hidrofiliktir ve suyu yüzeyine çeker (Siddique ve diğ, 2010). Döküm kumunun kalitesi; dayanıklılığı ve kimyasal bileşimi ile belirlenir. Döküm kumunun dayanıklılığı, inşaat mühendisliği uygulamalarında uzun süreli performansı açısından önemlidir. Geoteknik uygulamalarda döküm kumu sıklıkla yüksek dayanım göstermektedir (Kaur, 2006).

3.4.2 Döküm kumunun sınıflandırılması

Döküm kumunu sınıflandırma yollarından biri, metal dökümü sırasında kullanılan bağlayıcılardır (Siddique ve diğ, 2009). Kum taneleri doğal yollarla birbirine bağlanamayacağından, kum tanelerinin birarada tutunmasını sağlamak, ergimiş metalin kalıba dökümü ve döküm parçasının soğuması sırasında kalıbın şeklini koruyabilmesi için kuma çeşitli bağlayıcılar ilave edilir (Kaur, 2006; Cruz ve diğ, 2009). Genellikle iki tür bağlayıcı sistemi kullanılmakta ve döküm kumlarının

sınıflandırılması buna dayanmaktadır (Siddique ve diğ, 2009; Cruz ve diğ, 2009): 1) Mekanik yolla (kille) bağlanmış kumlar (yeşil kum), 2) Kimyasal yolla bağlanmış kumlar (reçineler).

Her iki kum da farklı fiziksel ve çevresel özelliklere sahiptirler. Yeşil kum kalıplarıyla döküm malzemelerinin %90'ı üretilmektedir (Cruz ve diğ, 2009). Yeşil kumun bileşimi %85-95 yüksek kaliteli silika, bağlayıcı olarak bentonit kili (%4-10), karbon katkısı (%2-10) ve sudan (%2-5) oluşmakta, eser miktarda da MgO, K₂O ve TiO₂ gibi kimyasallar içermektedir (Gedik ve diğ, 2010). Yeşil kum (green sand), en yaygın kullanılan döküm kumudur ve karbon içeriğinden dolayı siyah renktedir (Siddique ve diğ, 2009; 2010).

Kimyasal yolla bağlanmış kumlar, hem ergimiş metalin sıcaklığına yüksek dayanım gereken maça yapımında, hem de kalıp yapımında kullanılmaktadır. Döküm işlemi sonunda kalıp parçalanarak döküm malzemesi kalıptan alınırken, maça kumları yeşil kuma karışmaktadır (Kaur, 2006). Bu tür kumlar genellikle açık renkli olup, %93-99 silika ve %1-3 kimyasal bağlayıcı içermektedirler (Siddique ve diğ, 2009; 2010).

Mekanik bağlayıcılar (bentonit) sadece kalıp yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Kimyasal bağlayıcılar ise inorganik (örneğin sodyum silikat) ve organik bazlı (örneğin furan reçine, üretan) olmak üzere ikiye ayrılmakta ve temelde maça yapmak için kullanılmaktadır (IPPC BREF EC, 2004; Cruz ve diğ, 2009). Döküm kumları elde edilişlerine göre iki türlü sınıflandırılmaktadır:

1. Doğal kum: Deniz, göl kenarları veya ocaklardan çıkartılan kumdur. İçerisindeki kil miktarı ocaktan çıktığı haliyle muhafaza edilir ve dökümhaneye getirildikten sonra gerekli su ilavesi yapılır. Bu kumun avantajı, ucuz olması ve kolay hazırlanmasıdır, dezavantajı ise özelliğini çabuk kaybetmesidir.

2. Sentetik kum: Doğal kuma silis tozu, demir oksit, odun talaşı, grafit gibi maddelerin katılmasıyla hazırlanan kumdur. Doğal kuma göre avantajı, daha düzgün tane boyutuna sahip olması, daha az su ve kil ihtiyacı göstermesidir. Doğal kumda %6-8, sentetik kumda %3 nem bulunmaktadır (Ay, 2008).

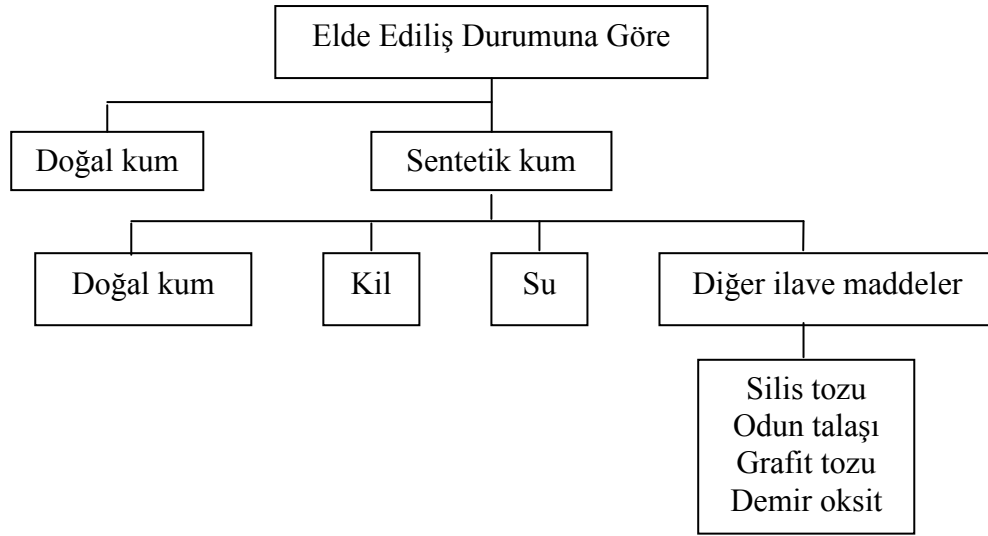
Döküm kumları kullanımına göre ise üç kısma ayrılmaktadır:

1. Yeni kum: Granit, bazalt, mika gibi volkanik taşların ve kum taşı, kireç taşı gibi çökelek taşların aşınmasıyla oluşmuştur. Şile bölgesinden çıkarılmaktadır.

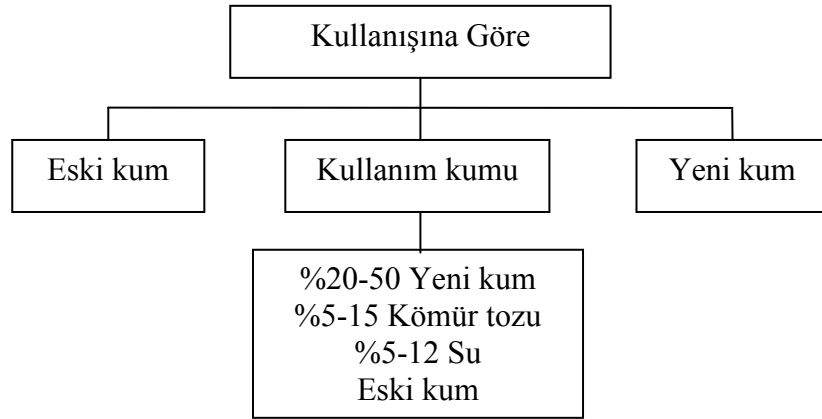
2. Eski kum: Dökümden sonra bozulan kalıplardan elde edilir. Döküm esnasında ani sıcaklık değişimi kum tanelerini çatlatır, kumun refrakterliği ve gaz geçirgenliği azalır, kuma plastiklik kazandıran kil yanarak bağlayıcılık özelliğini kaybeder.

3. Kullanım kumu: Eski kuma %20-50 yeni kum, %5-15 kömür tozu, %5-12 su karıştırılarak elde edilir (Ersümer, 1978).

Döküm kumlarının elde ediliş durumuna göre sınıflandırılması Şekil 3.3'te, kullanımına göre sınıflandırılması ise Şekil 3.4'te verilmiştir:



Şekil 3.3 : Elde ediliş durumuna göre döküm kumlarının sınıflandırılması, Ay (2008)'den uyarlanmıştır.



Şekil 3.4: Kullanışına göre döküm kumlarının sınıflandırılması, Ay (2008)'den uyarlanmıştır.

3.4.3 Döküm kumunun bileşenleri

Dökümhanelerde kalıp yapımında kullanılan yeşil kum; silis (kum), kil, nem ve yabancı maddelerden meydana gelir:

Silis (kum): Döküm kumunun esas bileşenidir (%85-95), refrakter bir malzemedir ve 1700°C'ye kadar ergimeden kalabilir. Oval, yuvarlak, düzgün yüzeyli veya pürüzlü olabilir.

Kil (bentonit): Yeşil kumda bağlayıcı olarak doğal kil olan bentonit kullanılır. Kil, hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda kum tanelerini birbirine bağlar (Cruz ve diğ, 2009). Kil, içinde su bulunan alüminyum silikattır ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Saf iken rengi beyazdır, ısıya karşı dayanımı yüksektir, su ile birleşince kuma plastiklik kazandırır ve kum tanelerini birbirine kenetler. Kalıp kumunun içinde istenen şartlara göre %4-10 oranında bulunur (Ay, 2008). Sodyum ve kalsiyum bentonit, metal döküm işlemlerinde çoğunlukla kullanılan iki doğal kil türüdür (Cruz ve diğ, 2009). Kalıp kumundaki kil 1000-1400°C arasında yanar ve bağlayıcılık özelliğini kaybeder (Ay, 2008).

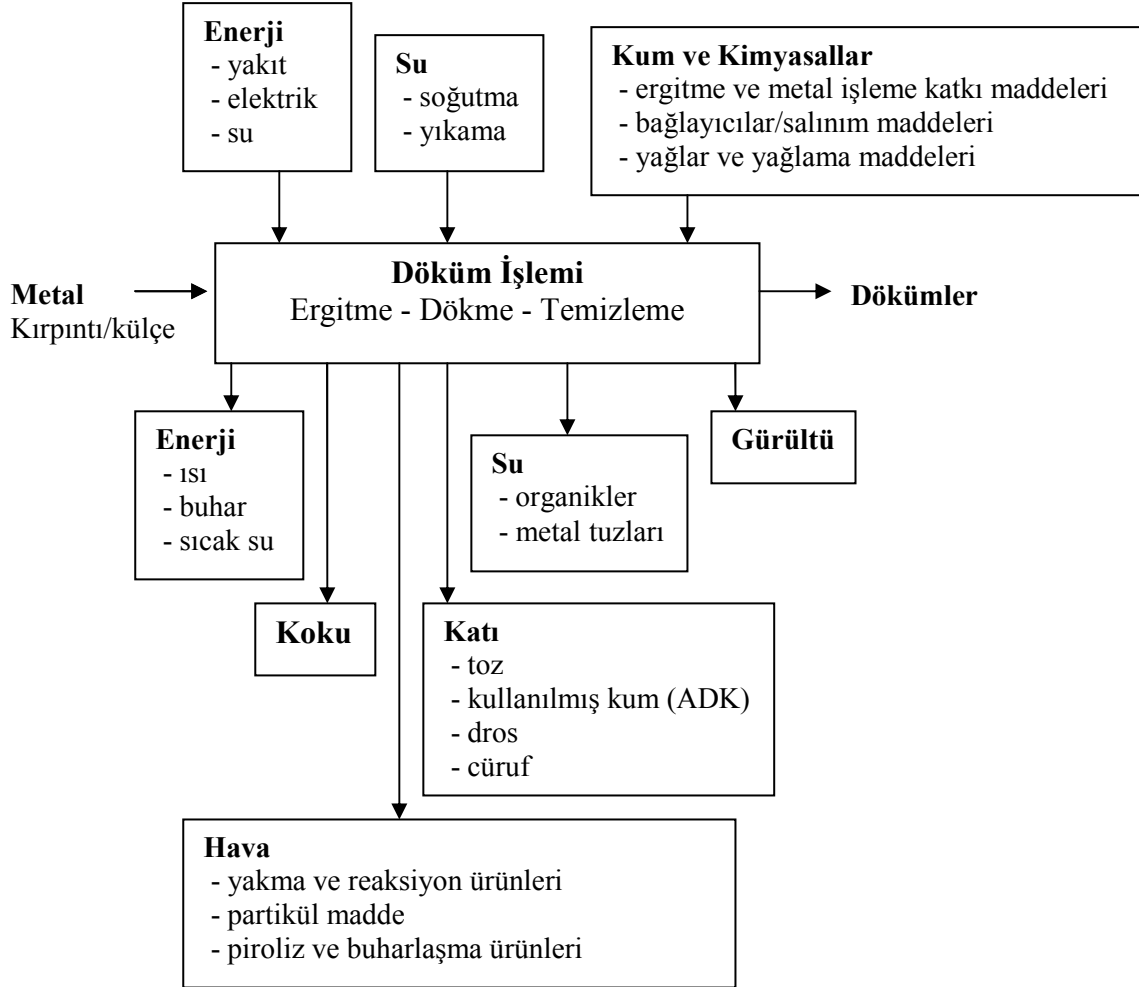
Su (nem): Kalıp kumlarının içinde %2-8 nem bulunur. Görevi, kili aktif hale getirerek kuma plastiklik ve mukavemet kazandırmak, kum tanelerinin birbirine yapışmasını sağlamaktır (Siddique ve diğ, 2009). Ancak, fazla su, kalıp mukavemetini azaltır. "Yeşil" kelimesi, kalıp kumundaki nemi ifade eder (Zanetti ve Fiore, 2002).

Yabancı maddeler: Kalıp kumunun özelliklerini iyileştirmek amacıyla içerisine çeşitli oksitler ve organik maddeler de katılabilir (kömür tozu, talaş, silis tozu, demir oksit vb.); ancak, iyi bir kalıp kumunda yabancı madde oranı %8'i geçmemelidir (Ay, 2008; HAWAMAN, 2009). Demir dökümlerde kalıp kumu içerisine kömür tozu eklenmesinin nedeni; sıvı metalin kalıba doldurulması esnasında kalıp içerisindeki kömür tozunun yanarak kalıp ile döküm malzemesi arasında bir gaz tabakası (CO_2) oluşturmastır (Zanetti ve Fiore, 2002). Bu gaz tabakası hem kum tanelerinin sıcaklığın etkisi ile birbirlerine kaynamasını önler, hem de kumun döküm yüzeyine yapışmasını önleyerek döküm parça yüzeyinin temiz çıkmasını sağlar (HAWAMAN, 2009; Siddique ve diğ, 2009). Kömür tozu aynı zamanda kumun refrakter özelliğini artırır (Cruz ve diğ, 2009). Ancak, aşırı gaz oluşumunu engellemek amacıyla kömür tozu miktarı sınırlı olmalıdır (Zanetti ve Fiore, 2002).

3.4.4 Dökümhanelerden kaynaklanan atıklar

Metal dökümcülüğü, geri dönüşümü en fazla olan endüstri dallarından biri olmasına rağmen, yine de katı, sıvı ve gaz atıklar üretmektedir. Girdisi büyük miktarlarda kum

olan dökümhane atıklarının, içerdikleri kirlilikler açısından genellikle inorganik karakterli olduklarına inanılmaktadır (Yerlikaya, 2001). Döküm sektörünün temel girdi ve çıktıları Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 : Döküm sektörünün temel girdi ve çıktıları, IPPC BREF EC (2004)'ten uyarlanmıştır.

Bir ton döküm malzeme üretiminde ~0,6-0,8 ton arası atık ortaya çıkmakta, 0,4-0,6 tonunu kullanılmış kum oluşturmaktadır. Örneğin, Türkiye'de 2007 yılı üretim rakamlarına göre, 1.316.500 ton döküm üretimi yapılmış, buna karşılık proseslerden tahmini 450.000 ton atık oluşmuştur. Bu miktarın yaklaşık %65'i ADK, %10'u cüruf, %15'i toz-çamur ve %10'u refrakter, yağ, taş, boya, varil gibi atıklar olmuştur (HAWAMAN, 2009). Ülkemizde 2011 yılı ADK miktarının ise 322.500 ton olduğu tahmin edilmektedir. Dökümhanelerden kaynaklanan atıklar 05.07.2008 tarihli ve 26927 sayılı "Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (AYGEİY)-EK IV:Atık Listesi"ne göre iki grupta sınıflandırılmaktadır; bunlar, demir döküm işleminden kaynaklanan atıklar ile demir dışı döküm atıklarıdır (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 : "AYGEİY-EK IV Atık Listesi" - Isıl işlemlerden kaynaklanan atıklar.

10	ISIL İŞLEMLERDEN KAYNAKLANAN ATIKLAR	
10 09	Demir döküm işleminden kaynaklanan atıklar	
10 09 03	Ocak cürufları	
10 09 05*	Henüz döküm yapılamamış, tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları	M
10 09 06	10 09 05 dışında henüz döküm yapılamamış maça ve kum döküm kalıpları	
10 09 07*	Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları	M
10 09 08	10 09 07 dışındaki döküm yapılmış maça ve kum döküm kalıpları	
10 09 09*	Tehlikeli maddeler içeren baca gazı tozu	M
10 09 10	10 09 09 dışındaki baca gazı tozu	
10 09 11*	Tehlikeli maddeler içeren diğer partiküller	M
10 09 12	10 09 11 dışındaki diğer partiküller	
10 09 13*	Tehlikeli maddeler içeren atık bağlayıcılar	M
10 09 14	10 09 13 dışındaki atık bağlayıcılar	
10 09 15*	Tehlikeli madde içeren çatlak belirleme kimyasalları atığı	M
10 09 16	10 09 15 dışındaki çatlak belirleme kimyasalları atığı	
10 09 99	Başka bir şekilde tanımlanmamış atıklar	
10 10	Demir dışı döküm atıkları	
10 10 03	Ocak cürufları	
10 10 05*	Henüz döküm yapılamamış, tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları	M
10 10 06	10 10 05 dışındaki henüz döküm yapılamamış maça ve kum döküm kalıpları	
10 10 07*	Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları	M
10 10 08	10 10 07 dışındaki döküm yapılmış maça ve kum döküm kalıpları	
10 10 09*	Tehlikeli maddeler içeren baca gazı tozu	M
10 10 10	10 10 09 dışındaki baca gazı tozu	
10 10 11*	Tehlikeli maddeler içeren diğer partiküller	M
10 10 12	10 10 11 dışındaki diğer partiküller	
10 10 13*	Tehlikeli maddeler içeren bağlayıcı atıkları	M
10 10 14	10 10 13 dışındaki bağlayıcı atıkları	
10 10 15*	Tehlikeli madde içeren çatlak belirleme kimyasalları atığı	M
10 10 16	10 10 15 dışındaki çatlak belirleme kimyasalları atığı	
10 10 99	Başka bir şekilde tanımlanmamış atıklar	

3.4.5 Döküm kumunun yeniden kullanımı ve geri kazanımı

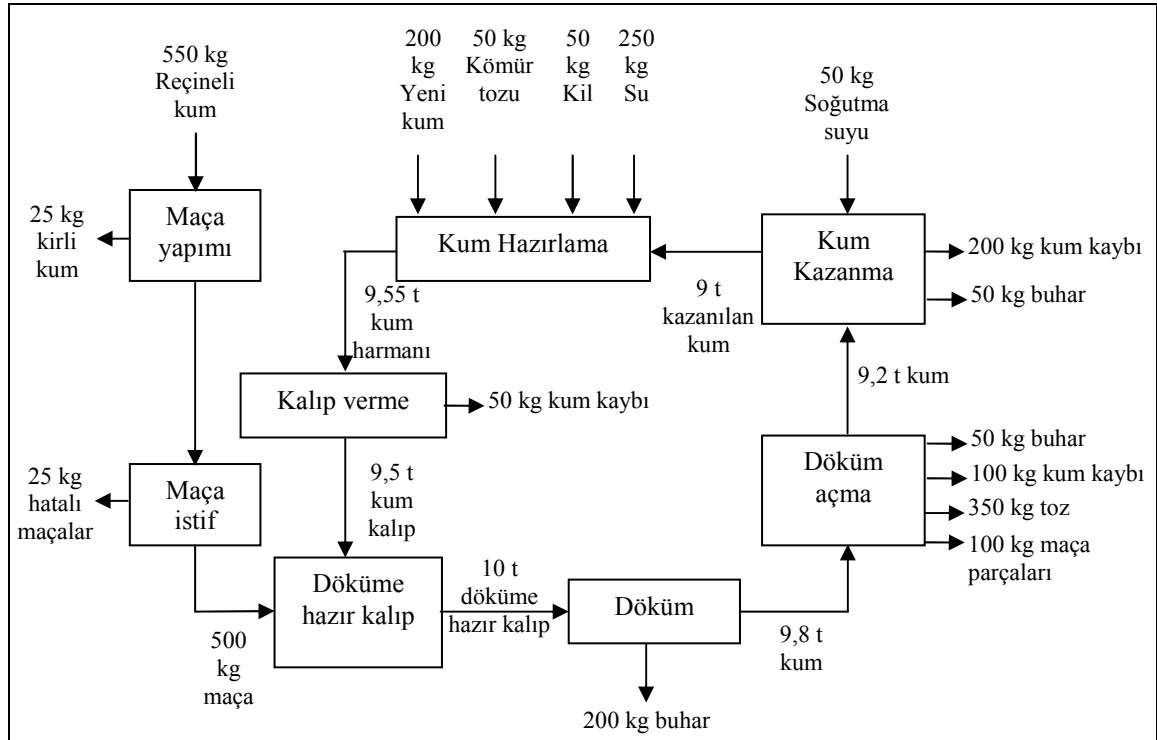
Katı atık yönetimi, küresel çevre konularından biri haline gelmiştir. Endüstriyel yan ürünler ve atık miktarlarında sürekli bir artış gözlenmektedir. Düzenli depolama sahalarının yetersizliği ve yüksek bertaraf maliyetleri nedeniyle atık malzemelerin ve yan ürünlerin yeniden kullanımı, bertarafa alternatif bir yöntem haline gelmiştir. ADK da çeşitli uygulamalarda değerlendirilebilecek endüstriyel yan ürünlerden biridir. Bu nedenle ADK'nın tekrar kullanımı ile hem hammadde maliyetleri azaltılmış, hem de bertaraf problemi çözülmüş olur (Siddique ve diğ, 2010).

Döküm kumu, kararlı fiziksel özelliklere sahip yüksek kaliteli silika kumudur. Demir (demir-çelik) ve demir dışı (bakır, alüminyum, pirinç, bronz) metal döküm endüstrisinin, kısacası metalürji sektörünün yan ürünüdür; yıllarca değişmeyen termal iletkenliği, ergimiş metalin ısı ve basıncına karşı dirençli ve aynı zamanda ekonomik olması dolayısıyla döküm kalıplarında kullanılmış olan silika esaslı bir malzemedir (Siddique ve diğ, 2009; Gedik ve diğ, 2010; Beeley, 2001).

Metal parçaların üretildiği döküm tesislerinde, başta otomotiv sektörü olmak üzere dünyada her yıl yaklaşık 80 milyon ton döküm ürünü elde edilmektedir (Yaylalı, 2007). Buna karşılık, örneğin sadece ABD'de üretimde yılda yaklaşık 100 milyon ton kum kullanılmakta ve bunun 6-10 milyon tonu bertaraf edilmekte veya diğer endüstrilerde kullanılmaktadır (Siddique ve diğ, 2009). Otomotiv endüstrisi ve yan kolları, döküm kumunun esas üreticileri konumundadır (Siddique ve diğ, 2010). Dökümhaneler kalıp ve döküm işlemlerinde yüksek kaliteli silika kumu kullanmaktadırlar (Kaur, 2006). Silika kumları her ülkede farklı fiyatlardan satılmaktadır: İtalya'da 0,04 Euro/kg iken, Belçika ve Hollanda'da 0,01 Euro/kg'dır. Bu fiyat farkları ve yüksek bertaraf maliyetleri, Avrupa ülkelerini döküm kumu geri kazanımı ve yeniden kullanımı konusunda alternatif yollar tercih etmeye sevk etmiştir: İtalya'da geri kazanım, İsveç'te düzenli depo saha örtüsü ve beton üretiminde kullanım, Belçika'da yol malzemesi olarak değerlendirme (Zanetti ve Fiore, 2002). Sadece 2000 yılında Amerika'da yaklaşık 9 milyon ton ADK'nın düzenli depolama yolu ile bertaraf edildiği belirtilmiştir (Winkler ve Bol'shakov, 2000). Düzenli depolama sahası bertaraf maliyetinin (depolama, taşıma ve işçilik maliyetleri dahil) ton başına ortalama 15-75 \$ olduğu düşünüldüğünde, yıllık bertaraf maliyeti 135-675 milyon \$ olmaktadır (Deng ve Tikalsky, 2008). İngiltere'de ise bertaraf edilen yıllık ADK miktarının 1 milyon tondan fazla olduğu tahmin

edilmekte, yeni kum alımı ve sonrasında bertarafı için yıllık 32 milyon pound harcandığı belirtilmektedir (Lawrence ve Mavroulidou, 2009). Yüksek bertaraf maliyetleri, dökümcüleri düzenli depolama ile bertaraf yönteminden uzak durmaya sevk etmiştir. Ayrıca, ADK'nın düzenli depolanması, dökümcüleri gelecekteki çevresel maliyetlere, iyileştirme (remediasyon) problemlerine ve yönetmelik şartlarına karşı da sorumlu kılacaktır. Bu durum, ADK'nın yeniden kullanımını gündeme getirmiştir (Siddique ve diğ, 2010).

Dökümhanelerde kum kalıplar her döküm işleminden sonra açılarak kumdaki büyük parçalar elenerek uzaklaştırılmakta, azalan kum kadar sisteme yeni kum eklenerek tesiste çevrim devam etmektedir (Zanetti ve Fiore, 2002; Siddique ve diğ, 2009). Ancak döküm kumu belli bir çevrimden sonra döküm kalıplarında daha fazla kullanılamayacak hale gelir ve ADK olarak dökümhaneden uzaklaştırılır (Clegg, 1991; Siddique ve diğ, 2010; Güney ve diğ, 2010). Bunun sebepleri; kumun fiziko-kimyasal olarak bozulması, döküm sırasında $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 'deki ergimiş metale maruz kalması (Dungan ve diğ, 2009), kum içerisindeki bentonitin bağlayıcılık özelliğini kaybetmesi ve mekanik aşınmayla kum taneleri direncinin kırılmasıdır (Dayton ve diğ, 2010). Şekil 3.6'da 10 ton kalıp kumu için geri kazanımın yapıldığı dökümcülük işlemlerindeki yaklaşık kütle dengesi verilmiştir (Gönüllü, 2007):



Şekil 3.6 : Dökümcülük işlemleri kütle dengesi, Gönüllü (2007)'den uyarlanmıştır.

Döküm prosesi sırasında yüksek miktarlarda ADK oluşur ve bu kumları kum yenileme (reklamasyon) prosesi ile geri kazanmak mümkündür (Cruz ve diğ, 2009).

ADK'ların rejenerasyonunda önemli olan bazı etkenler şunlardır:

- Bağlayıcı ve katalizör tipi,
- Kızdırma (yanma) kaybı: Eksilen kum kadar yeni kum ilavesi gerekir.
- Kimyasal yapı: Bazı bağlayıcılarda bulunan N, P, Na ve S gibi elementlerin geri kazanılmış kumda yer alması, döküm kalitesini olumsuz etkiler.
- Kum taneciklerinin şekli ve granülasyon durumu: Yuvarlak ve pürüzsüz kum taneleri rejenerasyon sırasında üzerindeki bağlayıcıları daha rahat atmaktadır.
- Yanma: Bir kısım bağlayıcı döküm sırasında yanarak, kumun rejenerasyonu kendiliğinden meydana gelmiş olur (Gönüllü, 2007).

Rejenere edilmiş kumun kalite kontrolü için yapılan testler şu şekilde sıralanabilir: 1) mekanik analizler/elek analizi; 2) nem içeriği; 3) kızdırma kaybı (LOI); 4) kum sıcaklığı; 5) pH ve 6) döküme özel kimyasal analizler (Gönüllü, 2007).

3.4.6 Atık döküm kumunun dökümhane tesislerinde tekrar kullanılamama sebepleri

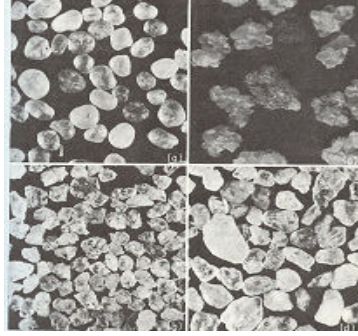
3.4.6.1 Tane boyutu dağılımı

Tane boyutu düzensiz olan kum, modelin şeklini alma ve tutuculuk bakımından faydalıdır, ancak taneler arasındaki boşluklar küçüleceğinden gaz geçirgenliği azalır. Küçük taneler modelin şekil almasını, büyük taneler gaz geçirgenliğini artırır (Fidaner ve diğ, 1978).

Tane boyutu dağılımı iyi olan kumun termal genleşmesi nispeten azdır. İnce taneli kumlar ise oldukça fazla genleşir (Ersümer ve Uzunova, 1971). Kalıp kumunun termal genleşme katsayısının düşük olması istenir. Sıcaklığın yükselmesi ile katı hacimde meydana gelen termal genleşme poroziteyi azaltır. Porozitenin azalması ile refrakter malzeme yumuşar, sıvı metalin direnci çok az olduğu için de kalıp kumu metale doğru genleşmeye başlar ve bu genleşme sıvı metal katılaşmaya başlayınca kadar devam eder. Kumun metale doğru termal genleşmesi, döküm malzemesinin son şeklini ve parça büyüklüğünü olumsuz yönde etkiler (Peters ve diğ, 2007). Isınan kum tabakası kalıp boşluğu içine doğru ovalleşir, bükülür ve kalıptan ayrılır.

3.4.6.2 Tane şekli

Kalıp kumunu meydana getiren kuvars, çeşitli irilik ve şekillerdeki tanelerden meydana gelmiştir. Kuvars taneleri yuvarlak, oval, köşeli, yarı keskin ve keskin köşeli; tane yüzeyleri ise çatlak, düzgün, kaypak ve pürüzlü olabilir (Fidaner ve diğ, 1978). Şekil 3.7'de çeşitli kum taneleri (yuvarlak, köşeli, birleşik ve yarı-köşeli) görülmektedir:

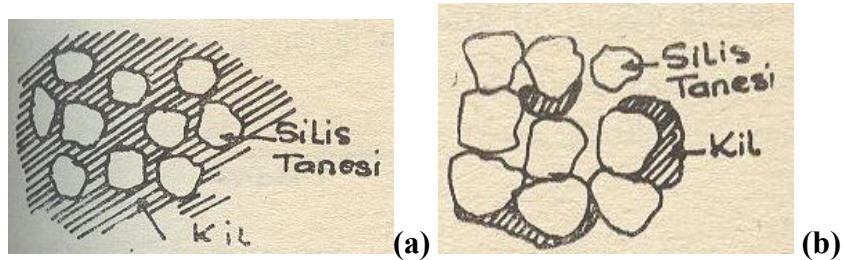


Şekil 3.7 : Çeşitli kum taneleri, Heine ve diğ, (1967)'den uyarlanmıştır.

Çatlaklı ve pürüzlü tanelerin bağlanma kabiliyeti, düzgün yüzeylilere göre daha iyidir. Köşeli taneler yuvarlak tanelere göre daha yüksek mukavemet sağlar.

3.4.6.3 Oolitleşme

Kil (bentonit), sulu alüminyum silikattır ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$). Su alınca yapışkan bir hal alır, silis kumlarına katılarak kum tanelerinin etrafını sarar ve su ile şişerek taneleri birbirine bağlar. Bu sayede kalıp kumuna şekil alma özelliği sağlar. Kilin en önemli özelliği, su ile hidratasyonu sonucu şişmesidir. Kil ve suyun kum taneleri arasında homojen yayılması gerekir. Şekil 3.8'de iyi ve kötü karışmış kum görülmektedir (Ersümer ve Uzunova, 1971):



Şekil 3.8 : Kum taneleri arasında kil: (a) İyi karışmış kum. (b) Kötü karışmış kum, Ersümer ve Uzunova (1971)'den uyarlanmıştır.

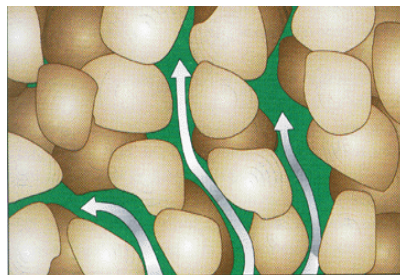
İyi bir karıştırıcıda her bir kum taneciği ince tabaka halinde bentonitle kaplanır. Kalıpta ergimiş metal ile temas halinde bulunan kum tanelerinin üzerindeki bentonit

pişer ve kristal suyunu kaybeder. Bu özelliğe sahip kum tekrar kum hazırlama ünitesine gelir, bentonit ilavesi yapılır. Her defasında kum üzerinde yeni bir bentonit tabakası oluşur. Zamanla tabakalaşma olayı artar ve oolitleşme meydana gelir. Oolitik tabaka kalın olduğu sürece refrakterlik (ateşe dayanıklılık) özelliği azalır. Ergime sıcaklığı 1730°C olan kuvarsa nazaran bağlayıcı olarak kullanılan bentonitin ergime sıcaklığı 1200°C'dir. İnce bentonit tabakası ile kaplanmış kum tanesindeki kil miktarı normal seviyede ise kumun ergime sıcaklığında olumsuz bir azalma olmaz. Fakat oolitleşme derecesi, yani bentonit tabakasının kalınlığı arttıkça, sinterleşme sıcaklığının azalması döküm kalitesi yönünden elverişsizlik yaratır (İzgiz, 1987).

Kil miktarı arttıkça tane yüzeyleri kapanır, kum taneleri arasındaki boşluklar dolar, belirli bir miktardan sonra kuvars taneleri birbiri üzerinde kolayca kayar, mukavemet azalır ve kalıp dağılır (Ersümer ve Uzunova, 1971).

3.4.6.4 Permeabilite

Gaz geçirgenliği kalıp kumları için oldukça önemlidir. Sıvı ergimiş metalin kalıp boşluğuna girmesiyle bol miktarda gaz açığa çıkar, bu gaza *kalıp gazı* denir. Kalıp gazlarını; kalıp boşluğundaki hava, kumdaki yanıcı organik maddeler, kum bileşenlerinden (kil) ayrılan bazı karbonatlar, kömür tozu ve su buharı karışımı oluşturur. Kalıp gazları, kuvars taneleri arasında yer alan küçük kanallardan sızarak (Şekil 3.9) kalıp dışına çıkar. Kalıp gazlarının kumdaki gözenekler yardımıyla kalıp dışına kolayca çıkabilmesi, yani kalıp kumunun gaz geçirgenliğinin az veya çok olması, kumu meydana getiren tanelerin şekil ve büyüklükleri ile yakından ilgilidir. Kalıp kumunun gözenekli yapıda olması istenir (Sylvia, 1972). Mekanik aşınmalar, yapıdaki deformasyonlar ve tane boyutu dağılımının istenen boyutların altına inmesi sebebiyle meydana gelen tozumalar, kuvars tanecikleri arasında yer alan bu küçük kanalların tıkanmasına; dolayısıyla gaz geçişinin gerçekleşememesine sebep olur.



Şekil 3.9 : Gazların kum taneleri arasından geçişi.

Tane şekilleri gelişigüzel veya çok küçük olan kumların gaz geçirgenlikleri oldukça az iken, büyük taneli kumlarınki fazladır; en iyi gaz geçirgenliğini büyük taneli kumlar verir. Bu özellik için kilin kum içinde düzenli yayılmış olması gerekir. Metalin sıcaklığı ile yumuşayan bir kumun gözenekleri tıkanır ve gaz geçirgenliği ortadan kalkar. Çok sıkı bir kalıpta gazların kum taneleri arasından çıkması zorlaşır (Fidaner ve diğ, 1978). Oluşan gazların kalıptan dışarı çıkabilmesi için kumun yeteri kadar gaz geçirgenliği olması gerekir. Aksi takdirde kalıp içerisinde kalan gazlar, döküm parça yüzeyinin gözenekli ve kabarcıklı çıkmasına sebep olur, ürün kalitesi olumsuz olarak etkilenir. Gaz geçirme kabiliyeti doğrudan doğruya kumun sıkıştırılmasına, tanelerin büyüklük, şekil ve dağılımına, rutubete ve kil miktarına bağlıdır (Ersümer ve Uzunova, 1971).

Gaz geçirgenliğinin tayini için gaz geçirgenlik analizörü kullanılır. Hava belirli bir basınçla standart tüpteki numuneden geçirilir ve bu esnada kum tabakasının hava akımına karşı gösterdiği mukavemet ölçülür (Heine ve diğ, 1967).

3.4.6.5 Kohezyon

Dökümhanelerde kullanılan kalıpların yeterli seviyede mekanik stabiliteye sahip olması ve yüksek sıcaklığa karşı direnç göstermesi istenir. Döküm kalıplarında refrakter malzeme olarak silika kumu (kuvars) kullanılır, kum kalıpların sıvı metale karşı göstereceği mukavemet ise bağlayıcılarla sağlanmaktadır. Kalıp kumlarının kalıbın şeklini kolayca alabilmesi ve şeklini koruyabilmesi için plastik yapıda olması gerekir; bu da ancak kil ve rutubetin desteğiyle sağlanır (Ay, 2008). Kum taneleri uygun bir bağlayıcı (bentonit) ile bağlanıp şekil verilerek, kum kalıba yeterli mekanik direnç kazandırılır. Bağlayıcı, kum taneleri arasındaki uygun boşluklara yerleşir, buralarda sıkışır ve kuvars taneleri arasında kohezyon etki sağlar. Bu sayede döküm kalıbı mekanik olarak stabil hale gelir. Kohezyon, uygun sıkıştırma ve bağlayıcı kullanımı yoluyla kalıbın şeklini korumasını sağlayan özelliktir.

Döküm kumu dökümhanelerde belli bir çevrim kullanıldıktan sonra, döküm kalıplarında daha fazla kullanılamayacak hale gelir, bunun nedenlerinden biri de içerisindeki bentonitin (kil) bağlayıcılık özelliğinin kaybolması ve kuvars tanelerini daha fazla birarada tutamaması sebebiyle, kum kalıbın mukavemetinin azalmasıdır. Kuvars taneleri, bağlayıcı olarak kalıp kumuna ilave edilen bentonit (kil) ile bir film tabakası şeklinde kaplanır ve böylece, birbirini tutması güçleşir.

3.4.6.6 Refrakterlik

Kalıp malzemesinin refrakter özelliği, ergimiş metalin dökümü sırasında kumun kalıptaki yüksek sıcaklıklara dayanması, fiziksel değişime uğramaması ve metale kaynamamasıdır. Kum, bu özelliğini, SiO_2 varlığı ile kum tanelerinin şekil ve boyutları sayesinde kazanır. Pürüzlü ve büyük taneler daha yüksek refrakterliğe sahiptir. Diğer taraftan, kumda bulunan safsızlıklar (demir oksitler, Ca, K, Na gibi alkaliler) ergimiş metalin dökümü sırasında kimyasal olarak reaksiyona girerek kumun ergime noktasının düşmesine sebep olur ve kumun refrakter özelliği azalır (Heine ve diğ, 1967). Saf kumun ergime sıcaklığı 1730°C olduğu için kalıp kumuna dayanabilir özellik verir (Ersümer, 1969). Kalıp kumu bu sıcaklığa kadar parçalanmadan veya topaklanmadan kalabilir; ancak içerisindeki safsızlıklara (özellikle metal oksitlere) bağlı olarak ergime sıcaklığı düşer. Kum ne kadar safsa, yani silisin yanında dökümden kaynaklanan yabancı maddeler ne kadar az ise yüksek sıcaklığa dayanıklılık o derecede yüksektir. Safsızlık arttıkça kum taneleri birbirine kaynar ve topaklanır. Kumdaki yabancı maddeler kumun ergime noktasını düşürür ve ısı dayanımını azaltır (Sylvia, 1972). Isıya dayanımı iyi olmayan kum, yüksek sıcaklıkta ergir ve metale yapışır. Bu durum, kumun aldığı şeklin bozulmasına ve döküm parça yüzeylerinin pis ve hatalı çıkmasına sebep olur, ilave temizleme masrafına yol açar. Aynı zamanda kumun gözeneklerini kapatarak gaz geçirgenliğini azaltır (Fidaner ve diğ, 1978; Ersümer ve Uzunova, 1971). Kalıp kumunun yüksek sıcaklığa dayanıklılığı, topaklanma sıcaklığı ölçülerek tespit edilir. Kumdan yapılmış bir deney parçası, sıcaklığı ayarlanabilen bir elektrik fırınında ısıtılarak topaklanmaya başladığı sıcaklık pirometre ile belirlenir (Ersümer, 1969). Kalıp kumunun yüksek sıcaklıklardaki davranışı ise dilatometre cihazı ile izlenebilir. Dilatometre, bir malzemenin sıcaklık karşısında bünyesinde meydana gelen boyutsal değişimlerin (genleşme ve büzülme) ölçümünde kullanılır. Tamamen bilgisayar kontrollü olan cihaz, $0,1-50^\circ\text{C}/\text{dk}$. ısıtma hızları ile 1500°C 'ye çıkabilmektedir (Sylvia, 1972).

3.4.7 Atık döküm kumunun diğer alanlarda değerlendirilme imkanları

Ülkemizde ADK tekrar değerlendirilemeden düzenli depolama sahasında depolanmak suretiyle bertaraf edilmektedir (Solmaz ve diğ, 2007). Artan depolama maliyeti ve özellikle büyük şehirlerdeki kısıtlı depolama sahaları, döküm sektöründe

önemli bir sorun haline gelmiştir (Gedik ve diğ, 2010). Dökümhanelerin genellikle İstanbul ve çevresinde yoğunlaştığı göz önüne alındığında, ADK düzenli depo sahalarının giderek azaldığı bu bölgede, söz konusu atık malzemenin başka alanlarda değerlendirilmesi zorunluluk haline gelmiştir (Solmaz ve diğ, 2007). Bu nedenle döküm sanayicileri ADK'ların yeniden kullanımı için uygun bir alan aramaktadırlar (Gedik ve diğ, 2010).

ADK daha çok zemin ıslahında; yani yol ve bina alt temeli, yol kenarı seddesi, çöp depo yeri dolgusu/örtüsü, otoban inşası, yapısal dolgu vb. uygulamalarda kullanılmakla birlikte, çimento üretiminde, asfalt yapımında (ince agrega yerine kısmen) ve beton blok imalatında da kullanılmaktadır (Gönüllü, 2007). Portland çimentosu endüstrisi, son yıllarda üretim proseslerinde ADK'yı %80 silika içeriği, düşük alkali seviyesi, uygun tane boyutu vb. şartları sağlamak koşuluyla kullanmaktadır. ADK, beton karışımlarında ince agrega yerine kullanılarak briket, blok, kaldırım taşı yapımında da değerlendirilmektedir (AFS, 2006). ADK içerisinde en az %6 oranında bentonit bulunması sebebiyle sıkıştırma sonucu belirli bir hidrolik iletkenliğe sahip geçirimsiz tabaka oluşumuna imkan tanımaktadır. Kum/çimento/katkı ile duvar arası harç, kompost ile beraber toprak iyileştirici olarak da değerlendirilebilmektedir. Yüksek silika içeriği ile de tehlikeli atıkların vitrifikasyonunda faydalı olmaktadır (Gönüllü, 2007).

ADK'nın geri kazanımına ilişkin dört temel potansiyel uygulama şu şekilde sıralanabilir (AFS, 2006; US EPA, 2006; Lawrence ve Mavroulidou, 2009):

- İmalat ürünü uygulamaları (Portland çimentosu, harç, asfalt betonu, beton ve beton ürünleri (tuğla-briket, blok, parke taşı)) (US EPA (2006); AFS (2006)),
- Geoteknik uygulamalar (bent, yapısal dolgu, akışkan dolgu, düzenli depo sahası örtüsü, geçirimsiz perde),
- Karayolu uygulamaları (yol alt temel malzemesi, yol üst kaplaması, bitümlü asfalt karışımları, karlı-buzlu yollarda kaymayı önleyici malzeme),
- Tarımsal uygulamalar (toprak iyileştiricisi, kompost, üretim toprağı, yüzey örtüsü) (US EPA, 2006).

Agrega, betonun %75'ini oluşturan ve betonun iskeletini teşkil eden değişik boyutlardaki mineral maddedir. İnşaat sektöründe ya doğrudan ya da başka

maddelerle karıştırılarak yeni bir malzemenin bileşeni olarak kullanılmaktadır. Agregası, betonun dayanım ve dayanıklılığına etki eden önemli faktörlerden biridir (Temiz ve diğ, 2006). ADK temel olarak ince agregadır, bu nedenle doğal kumun yerine pek çok uygulamada kullanılabileceği ve doğal kaynak korunumunun sağlanabileceği düşünülmektedir (Lawrence ve Mavroulidou, 2009). Çizelge 3.6'da ADK'nın endüstride kullanım alanı bulduğu uygulamalar sıralanmıştır (AFS, 2004).

Çizelge 3.6 : ADK'nın endüstriyel uygulamaları, AFS (2004)'ten uyarlanmıştır.

Sıralama	Uygulama
1	Set/bent, yapısal dolgular, akışkan dolgular
2	Karayolu temel ve alt temel malzemesi
3	Bitümlü asfalt karışımları
4	Toprak ve tarımsal uygulamalar
5	Çimento ve beton ürünleri
6	Karlı havada yollarda kaymayı önleyici malzeme
7	Diğer uygulamalar

ADK'nın akışkan dolgu olarak Ohio/ABD'deki Cleveland Havaalanı inşaatı ve beton bariyerlerde, Ohio Turnpike karayolunda yol dolgusu ve kademeli dolgu olarak, ayrıca Ohio'daki fidanlıklarda toprak ve gübreyle karıştırılarak süs bitkisi yetiştirilmesinde ve golf sahası yeşillendirilmesinde kullanıldığı ifade edilmiştir (AFS, 2004).

ABD Federal Karayolları İdaresi'nin ADK'ların geoteknik ve karayolu inşaatları başta olmak üzere inşaat mühendisliği uygulamaları üzerine hazırladığı teknik rapora göre, ADK'ların;

1. Karayollarında yol dolgusu ve kademeli dolgu olarak,
2. Yol alt yapısında dolgu malzemesi ve yol üst yapısında temel tabaka olarak, bitümlü asfalt karışımlarda ince agregası olarak, kış aylarında yollarda kaymayı önleyici malzeme olarak,
3. Grobeton (dolgu betonu, zemin betonu) ve hazır betonda ince agregası olarak,
4. Portland çimentosu üretiminde,
5. Derz dolgusu ve harç yapımında,
6. Bitkisel toprakların özelliklerinin iyileştirilmesinde,

7. Taş yünü ve fiberglas üretiminde kullanımları mevcuttur (AFS, 2004).

Karayolu inşaatları ve geoteknik uygulamalar başta olmak üzere inşaat sektörü bu alanların başında gelmektedir (Solmaz, 2008). ABD'de yılda yaklaşık 500-700 bin ton ADK'nın mühendislik uygulamalarında kullanıldığı bildirilmiştir (Guney ve diğ, 2010). Kanada'da ADK'nın bitümlü asfalt karışımlarında kullanımına 1980'den beri izin verilmekte; Avustralya'da akışkan dolgularda kullanımı (US EPA, 1999), Kuzey Amerika'da ise Portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadır (Monosi ve diğ, 2010). Siddique ve diğ. (2011) de ADK'nın İngiltere, Avrupa ve Kuzey Amerika'da geri kazanılarak çimento, asfalt, beton, briket ve akışkan dolgu üretimi gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanıldığını, bu uygulamaların Hindistan'da da benimsendiğini ancak henüz başlangıç aşamasında olduğunu bildirmişlerdir.

4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Çeşitli yazarlar, ADK'nın imalat ürünleri uygulamalarında, geoteknik uygulamalarda, karayolu inşaatları ve tarımsal faaliyetlerde kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır.

4.1 İmalat Ürünü Uygulamaları

Berenni ve Nobili (1993), Etxeberria ve diğ. (2010), Fiore ve Zanetti (2007), Javed ve diğ. (1994), Khatib ve Ellis (2001), Lawrence ve Mavroulidou (2009), Monosi ve diğ. (2010), Naik ve diğ. (1994; 1996; 2003; 2004), Siddique ve diğ. (2007; 2009; 2011), Smith (1994), Stephan ve diğ. (1996), ADK'nın beton ve beton ürünlerindeki (tuğla-briket, blok, parke taşı) kullanımına dikkat çekmişlerdir. Naga ve El-maghraby (2003), Paupp-Pereira ve diğ. (2006), Quaranta ve diğ. (2004), Seung-Whee ve Woo-Keun (2006) ADK'nın seramik-fayans malzemelerindeki kullanımına; Bakis ve diğ. (2006), Guney ve diğ. (2010), Javed ve diğ. (1994b) asfalt betonlardaki uygulamalarına, Korac ve diğ. (2006), Raupp-Perairaa ve diğ. (2004), Monosi ve diğ. (2010) ise harçlardaki kullanımına değinmişlerdir.

Khatib ve Ellis (2001), ince agrega yerine ADK kullanarak hazırladıkları betonların mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında, dökümhaneden temin ettikleri üç tür kum kullanmışlardır: a) Kil ve kömür tozu eklenmemiş ince beyaz kum (WS), b) döküm işlemi öncesi harmanlanmış döküm kumu (BS) ve c) döküm sonrası oluşan ADK (SS). Standard kumu (M sınıfı) farklı ikame oranlarındaki (%0, %25, %50, %75 ve %100) bu üç tür kumla değiştirmişler ve 13 farklı beton karışımı oluşturmuşlardır. Beton karışımların basınç dayanımlarını (MPa) 90 gün sonunda; rötre (kuruma büzülmesi) ve genleşme değerlerini ise 60 gün sonunda ölçmüşlerdir. Standard kum yerine kullanılan dökümhane kumu oranı arttıkça betondaki dayanımın azaldığını (maksimum ikame oranı %25 olmalı), basınç dayanımı değerlerinin $WS > SS > BS$ şeklinde sıralandığını, üç kumun ilavesinin rötre ve genleşmeyi arttırdığını, sıralamanın ise $SS > BS > WS$ şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Beyaz kum içeren betonun tüm karışım oranlarında standard kum içeren beton ile benzer dayanım gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Uçaroğlu (2002), otomotiv endüstrisi zararlı atıklarının solidifikasyonunu ve geri kazanılabilirliğini araştırdığı çalışmada, tehlikeli atıkların tanım ve tespitini yaparak tehlikeli atık yönetim sistemini ortaya koymaya çalışmış, otomotiv endüstrisi tehlikeli atıklarından metal çamuru, fosfat çamuru ve endüstriyel arıtma çamuruna S/S teknolojisi uygulayarak geri kazanımlarını araştırmıştır. Katılaştırma malzemesi olarak Portland çimentosu (PÇ 42,5) ve mukavemeti arttırmak için doğal kum, kırma kum, ince ve kalın agrega ile su kullanarak hazırladığı (15x15x15 cm) briketlere 28 günlük kür süresi sonunda basınç dayanım testi uygulamış ve sızma (liç) özelliklerini tespit etmiştir. Her üç atık için de S/S teknolojisinin uygun bir arıtım yöntemi olduğunu belirtmiş; endüstriyel arıtma çamurunun ancak düşük oranda kullanımının başarılı sonuç verdiğini ifade etmiştir. Ayrıca, yüksek miktarda çinko ve asit içeren fosfat çamurunun S/S yöntemi ile nötralize edilebildiğini belirtmiştir.

Yalçın ve arkadaşları (2003), ADK'nın betonda kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada, standard beton karışımına ince kum yerine %15 oranında ADK ekleyerek değişik s/ç oranlarında hazırladıkları karışımlarda fiziksel-mekanik özellikleri incelemişlerdir. Taze betonda slump, sertleşmiş betonda ise basınç ve çekme dayanımı, su emme, özgül ağırlık, kılcal geçirimsizlik ve ultrases dalga hızı testlerini gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçları, ADK'nın içerisinde bulunan kil ve toz parçacıkların aderansı (beton-donatı kenetlenmesini) zayıflattığını ve beton içerisindeki boşlukların artmasına sebep olduğunu, ADK'lı betonun fiziksel-mekanik özelliklerinin bir miktar bozulduğunu, buna rağmen ADK'lı betonun betonarme olmayan büyük kütle betonlarında (baraj gölü setlerinde) kullanımının uygun olacağını bildirmişlerdir.

Bayar (2005), zararlı atıkların S/S teknolojisi ile yönetimi üzerine yaptığı çalışmada, kimya-metal endüstrisinden kaynaklanan ve mevcut durumda yakma yolu ile bertaraf edilen endüstriyel arıtma çamurunun S/S prosesi ile arıtılmasını ve yapı malzemesi olarak geri kazanılmasını incelemiş; yüksek TOK ve toksik ağır metaller (Cr, Cu, Hg, Ni, Pb ve Zn) içeren zararlı atığı katılaştırmak (solidifiye etmek) için Portland çimentosu PÇ-42,5 kullanmıştır. Farklı ikame oranlarında (1/100, 5/100, 10/100, 20/100, 40/100) hazırladığı katılaştırılmış C35 sınıfı beton numunelerine basınç dayanımı ve sızma (liç) deneyleri uygulamış, sözkonusu zararlı atığın yapı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, bütün beton numunelerinde hedef metal eluat konsantrasyonlarının standartlardan düşük

olduğunu, bu nedenle S/S prosesinin çevresel etkiler açısından başarıyla tamamlandığını ifade etmiştir.

Bakis ve arkadaşları (2006), tane boyutu 0,8-30 mm olan ADK'nın asfalt betonda kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada, ince agregaya yerine farklı ikame oranlarında (%0, %4, %7, %10, %14, %17, %20) ADK ile hazırladıkları asfalt beton karışımlarındaki indirekt çekme dayanımının ADK oranı azaldıkça lineer azalma gösterdiğini, %10 ikame oranında hazırlanan asfalt betonunun optimum sonuç verdiğini ifade etmişlerdir. Çekme dayanımlarını, şahit betonda 1,39 MPa, %20 ADK içeren betonda 0,94 MPa ölçmüşlerdir.

Lawrence ve Mavroulidou (2009), polimerik bağlayıcılı ADK ve kalıp kumu içeren betonların özelliklerini inceledikleri çalışmada, ince agregaya yerine farklı ikame oranlarında (%0, %10, %30, %50, %70 ve %100) ADK ve kalıp kumu içeren taze ve sertleşmiş betonlarda işlenebilirlik, hava içeriği, basınç ve yarmada çekme dayanımı, elastisite ve kırılma modülüyle su emme oranı gibi özellikleri araştırmışlardır. ADK ve kalıp kumu içeren tüm taze betonlarda slump ve işlenebilirliğin yüksek olduğunu, ADK arttıkça hava içeriğinin arttığını ve su emme oranının azaldığını; beton numunelerin basınç ve yarmada çekme dayanımı ile elastisite ve kırılma modülünün tüm ikamelerde birbirine yakın olduğunu, ADK'nın betonda kullanılabileceğini belirlemişlerdir.

Siddique ve arkadaşları (2009), ADK'nın betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırdıkları çalışmada, ince agregaya yerine ADK ile üç farklı ikame oranında (%10, %20 ve %30) hazırladıkları beton numunelerin basınç, çekme ve eğilme dayanımı ile elastisite modülünü farklı kür sürelerinde (7, 28, 56, 91 ve 365 günlük) ölçmüşler; ADK eklendikçe ve kür süresi arttıkça beton karışımlarındaki mekanik özelliklerin artış gösterdiğini ve ADK'nın kaliteli beton ve inşaat malzemeleri üretiminde kullanımının uygun olduğunu ortaya koymuşlardır.

Doğan (2010), yaptığı çalışmada otomotiv sektöründe fosfatlama prosesi sonucunda oluşan ve tehlikeli atık olarak sınıflandırılan fosfat çamurunun bertaraf edilmesi ve geri kazanımı kapsamında uygun kimyasal yöntemler ve S/S prosesini uygulamış; atık karakterizasyonu, uygun bağlayıcı seçimi, S/S prosesi ve katılaşmış ürünün performans ve çevresel etkilerinin belirlenmesi çalışmalarına yer vermiştir. Bağlayıcı olarak Portland çimentosu, dolgu malzemesi olarak kum kullanan Doğan, farklı

ikame oranlarında (%25; %10; %5; %2,5; %1; %0,5) hazırladığı karışımları (7, 28 ve 90 günlük) kür ettikten sonra parke taşı yapımında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Buna göre, %1 ikame oranındaki katı ürüne ait kalite değerleri ve çevresel etkiler temelinde, parke taşı yapımında kullanılmasının bir sakınca yaratmayacağını ifade etmiştir.

Güney ve arkadaşları (2010), ADK'nın yüksek dayanımlı beton malzemesi üretiminde kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada, ince agrega yerine dört farklı ikame oranında (%0, %5, %10, %15) ADK kullanarak hazırladıkları betonların basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülünü saptamışlardır. Betondaki ADK oranı arttıkça taze betonda slump ve işlenebilirlik değerlerinde, sertleşmiş betonda ise basınç ve çekme dayanımı ve elastisite modülünde azalma olduğunu; %10 ikame oranındaki betonun fiziksel-mekanik özelliklerinin şahit beton ile benzerlik gösterdiğini ve ADK'nın yüksek dayanımlı betonlarda (65 MPa dayanım sınıfı) partikül boyutu dağılımını ayarlamak şartıyla kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Khatib ve arkadaşları (2010), ADK'nın betondaki kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmalarında, ADK ve bağlayıcı olarak Portland çimentosu içeren betonun özelliklerini incelemişlerdir. İnce agrega yerine farklı ikame oranlarında (%0, %20, %40, %60, %80 ve %100) ADK kullanarak hazırladıkları karışımlarda su/çimento oranını sabit tutarak, taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini ortaya koymuşlardır. Sertleşmiş betonda 14, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda su emme, ultrasonik darbe hızı, basınç dayanımı ve boy değişimi özelliklerini incelemişlerdir. ADK miktarı arttıkça ince agregadaki tane boyutu küçüldüğü için slump değerinde azalma gözlemlenmiştir; kür süresi arttıkça ultrasonik darbe hızının arttığını, ADK miktarı arttıkça darbe hızının azaldığını belirlemişlerdir. ADK'nın basınç dayanımını, ultrasonik darbe hızını ve betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilediğini, bununla beraber su emme oranını ve rötreyi arttırdığını tespit etmişlerdir.

Monosi ve arkadaşları (2010), ADK'nın çimento harcı ve betonda kullanılabilirliğine yönelik yaptıkları çalışmada, doğal kum yerine üç farklı ikame oranı (%10, %20, %30) ve 0,45, 0,50, 0,55 s/ç oranında ADK kullanarak hazırladıkları çimento harçlarının basınç dayanımını; ayrıca, iki farklı ikame oranı (%7 ve %10) ve s/ç oranında (0,46 ve 0,50) ADK kullanarak hazırladıkları betonların basınç dayanımını, elastisite modülünü ve rötre özelliklerini farklı kür sürelerinde (1,

3, 7, 14 ve 28 günlük) incelemişlerdir. Doğal kum yerine kullanılan ADK'nın işlenebilirliği (slamp) azalttığını ve aynı slump değeri için daha fazla süper akışkanlaştırıcının eklenmesi gerektiğini, ADK'nın yapısal harç ya da çimento üretiminde kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Harçlarda (tüm s/ç oranlarında) ADK arttıkça basınç dayanımının azaldığını, aynı ADK oranı için s/ç oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığını belirlemişlerdir. Betonlarda ADK oranı arttıkça basınç dayanımı ve elastisite modülünün azaldığını, rötrenin ise arttığını ifade etmişler ve ADK'nın bina yapı malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Kaur ve arkadaşları (2012), mantar kültürü ile muamele edilen (arıtılan) ADK içeren betonun mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında, mantar (*Aspergillus spp.*) kültürünün betonun basınç dayanımı, su emme oranı ve porozitesine olan etkisini incelemişlerdir. %5 (ağ./hacim) oranındaki kültür mantarının, %20 ADK içeren betonda 28 günlük kür süresi sonunda, betonun basınç dayanımında %15,6'lık artma, su emme oranında %68,8'lik azalma ve porozitesinde %45,9'luk azalma tespit etmişlerdir. XRD analiz sonuçları da mantar kültürünün betonda çimentonun ADK ile reaksiyon kabiliyetini arttırdığını ve C-S-H jel oluşumunu hızlandığını ifade etmişlerdir.

Singh ve Siddique (2012), ADK'nın betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırdıkları çalışmalarında, ince agrega (normal kum) yerine ADK ile beş farklı ikame oranında (%0, %5, %10, %15 ve %20) hazırladıkları beton numunelerin basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını, elastisite modülünü, ultrasonik darbe hızını ve Cl⁻ iyonu nüfuzunu farklı kür sürelerinde (7, 28 ve 91 günlük) ölçmüşlerdir. ADK eklendikçe ve kür süresi arttıkça beton karışımlardaki dayanım özelliklerinin %15 ikame oranına kadar artış gösterdiğini; ayrıca, ADK miktarı arttıkça ultrasonik darbe hızının arttığını ve Cl⁻ iyonu nüfuzunun azaldığını, bu sayede betonun daha yoğun ve daha geçirimsiz hale geldiğini; dolayısıyla, ADK'nın %15 ikame oranı ile yapısal beton üretiminde kullanımının uygun olduğunu ortaya koymuşlardır.

4.2 Geoteknik Uygulamalar

Engroff ve diğ. (1989), Fero ve diğ. (1986), Ham ve Boyle (1981), Ham ve diğ. (1990b) ile Tikalsky ve diğ. (1998) ADK'nın sızma (liç) karakteristiklerini incelemişlerdir. Reddi ve diğ. (1995), Tarun ve Shiw (1997), TRB (1994) ADK'ları çamurlarla karıştırarak permeabilite değerlerini araştırmışlar ve geri dönüştürülebilir

bir atık olarak geoteknik uygulamalardaki kullanımlarını incelemişlerdir. Ham ve diğ. (1986) ise ADK'nın depolandığı sahadaki sızıntı suyunun kalitesini araştırmışlardır. Ayrıca, başka çalışmalarda, ADK'ların hidrolik bariyerlerde (Abichou ve diğ. (1998; 2000), Goodhue ve diğ. (2001)), akışkan dolgularda (Bhat ve Lovell (1996), Deng ve Tikalsky (2008), Dingando ve diğ. (2004)), kontrollü düşük dayanım malzemelerinde (Naik ve diğ. (2001; 2004), Siddique ve Noumowe (2008), Tikalsky ve diğ. (1998; 2000)), diğer geoteknik uygulamalarda (Dungan ve diğ. (2006)) ve zemin ıslahında (Vipulanandan ve diğ. (2000)) da kullanılabilirliği irdelenmiştir.

Solmaz (2008), ADK'nın geçirimsizlik özelliğini bentonit katkısıyla iyileştirerek depo sahasında geçirimsiz perde yapımında kullanılabilirliğini incelemiştir. İstanbul civarındaki 14 dökümhaneden temin ettiği ADK'ların indeks özelliklerini (Atterberg limitleri, tane boyutu dağılımı ve birim hacim ağırlığı, %bentonit, kızdırma kaybı) belirlemiştir. ADK'ları farklı oranlarda bentonit katkısı ilavesiyle standart (ASTM D698) ve modifiye Proktor (ASTM D1557) teknikleri uygulayarak sıkıştırmış; deneyler sonucu optimum su içeriğini (%12-23) ve kuru birim hacim ağırlıklarını ($1,44-1,86 \text{ g/cm}^3$) belirlediği numunelerin permeabilitesini ölçmüş, süzüntü sularında ağır metal analizlerini yapmıştır. Sıkıştırma enerjisi arttıkça kuru birim hacim ağırlığın arttığını, su içeriğinin azaldığını ve daha iyi sıkışma elde edildiğini, permeabilitenin $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ 'ye kadar indiğini gözlemlemiş, ADK'nın III. sınıf (inert atık) düzenli depolama tesislerinde geçirimsiz perde olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

4.3 Karayolu İnşaatı Uygulamaları

Abichou ve Edil (1998), Abichou ve diğ. (2004), AFS (1991), FIRST (2004), Ham ve diğ. (1990a), Javed ve Lovell (1994a), Kirk (1998), Kleven ve diğ. (2000), Mast ve Fox (1998), MOEEE (1993) ve Traeger (1987) ADK'nın karayolu seddelerinde, Braham (2002) ise bitümlü asfalt karışımlarda kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Güney ve Koyuncu (2002) ile Güney ve diğ. (2006) ADK'nın yol alt ve üst yapısında dolgu malzemesi ve temel tabaka olarak kullanımını araştırmışlardır.

Güney ve Koyuncu (2002), ADK'ların yol alt yapısında kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada, ADK'ları çimento, kireç, kaolin ve Na bentonit kiliyle stabilize edip standart Proktor deneyi ile optimum su içeriklerine göre sıkıştırarak 1,

7 ve 28 günlük küre tabii tutmuşlardır. Bu karışımlar üzerinde serbest basınç, permeabilite, donma-çözünme ve CBR deneylerini uygulamışlardır. Stabilizasyon malzemesi ilavesinin maksimum kuru birim hacim, ağırlık ve optimum su içeriğini azalttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, kür süresi ile serbest basınç mukavemetinin arttığını, permeabilitenin azaldığını ve donma-çözünme dayanımının yeteri kadar sağlandığını, en iyi CBR değerinin %70 olduğunu saptamışlardır. Sonuç olarak, yol yapımında aranan şartların Türk Karayolları Standartlarını sağladığı, iyi kür edilmiş ve sıkıştırılmış ADK'nın ilave stabilizasyon malzemesi (örneğin %10 kireç) ile yol alt temel inşasında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Gedik ve arkadaşları (2010), ADK'nın karayolunda dolgu malzemesi veya stabilize edilerek yol alt temel ve temel malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada, indeks ve geoteknik özellikleri belirlenen ADK'yı optimum su içeriğinde sıkıştırmışlar ve mekanik testlere tabii tutmuşlardır. Stabilizasyon yol malzemesinin mekanik özelliklerini (taşıma kapasitesi, plastisite, permeabilite vb.) iyileştirdiğinden, ADK'yı %2, %4, %8 ve %10 oranında çimento ve kireçle ayrı ayrı stabilize etmişler; 7, 14, 28 gün, 3 ay ve 6 ay boyunca nem odasında (%100 nem, 21°C) küre tabii tutmuşlar, numuneleri standart (ASTM D698) ve modifiye Proktor (ASTM D1557) teknikleriyle farklı enerji seviyesinde hazırlayarak stabilizasyonun etkisini Kaliforniya taşıma oranı (CBR), ultrasonik dalga hızı ve serbest basınç dayanım testleriyle incelemişlerdir. Çimento ve kireçle ayrı ayrı stabilize ederek hazırladıkları malzemeyi klasik yol malzemesiyle ekonomik açıdan karşılaştırmışlar ve ADK'nın umut verici bir yol malzemesi olduğunu belirtmişlerdir.

4.4 Tarımsal Uygulamalar

Dayton ve diğ. (2010), ADK'nın çoğu kez toprak benzeri kalite göstermesi ve bitki besin maddeleri (N, P, K, S), karbon, kil ve eser elementler (Cu, Zn, Mn, Mo, Co) içermesinden ötürü, üretim topraklarının fiziksel ve kimyasal özelliklerine katkı sağladığını bildirmişlerdir. US EPA (2006) ile Lindsay ve Logan (2005) da ADK'nın tarımsal uygulamalarına (toprak iyileştiricisi, kompost, üretim toprağı, yüzey örtüsü) dikkat çekmişlerdir.

Tüm bu alternatif endüstriyel uygulamalar, hem dökümhanelere hem de diğer kullanıcı durumundaki sanayicilere ekonomik yönden kazanç sağladığı gibi, yerel ve ulusal bazda çevresel fayda da sağlamaktadır (Deng ve Tikalsky, 2008).

4.5 Diğer Genel Uygulamalar

Regan ve diğ. (1997) ADK'nın günlük depo sahası örtüsü, akışkan dolgu, harç, yapısal dolgu, yol alt temel malzemesi, Portland çimentosu hammaddesi, asfalt ve hazır beton agregası olarak değerlendirilebilirliğine dikkat çekmişlerdir.

Siddique ve Noumowe (2008), Siddique ve Singh (2011), ADK'nın set-bent ve geçirimsiz perde yapımında, akışkan dolgularda, karayolunda, toprak iyileştirme ve zemin ıslahı gibi tarımsal uygulamalarda, bitümlü asfalt karışımlarında, Portland çimentosu üretiminde, harçlarda, karlı-buzlu yollarda kaymayı önlemede, tehlikeli maddelerin vitrifikasyonunda, taş yünü ve cam yünü üretiminde ve depo sahası örtüsü olarak kullanılmasına ilişkin olası mühendislik uygulamalarına değinmişlerdir.

Yerlikaya (2001), dökümhane atık kumlarındaki inorganik ve organik kirleticilerin karakterizasyonu üzerine yaptığı çalışmada, bir dökümhane tesisinde üretilen beş çeşit katı atıkta (soğuk ve sıcak maça kırıkları, kalıp kumu ve ince toz atıklar (filtre tozları, cüruflar)), üç farklı karışım atığında ve beş çeşit üretim hammaddesinde (iki farklı doğal kum, bentonit, kömür tozu ve kromit kumu) toplam kirlilik yüklerini belirleme ve daha sonra, sızma (liç) testleri ile, inorganik ve organik kirleticilerin yeraltı suyunu kirlletme potansiyelini saptama çalışmalarını yürütmüştür.

Gönüllü (2007), ADK'nın daha çok zemin ıslahı işlerinde; örneğin, yol tabanı, yol kenarı seddesi, çöp depo yeri dolgusu/örtüsü, otoban inşası vb. kullanıldığını vurgulamıştır. Güney ve diğ. (2010) ise ADK'nın karayolu seddelerinde, geçirimsiz perde yapımında, depo sahası örtüsü uygulamalarında, akışkan dolgu, bitümlü asfalt karışımı, Portland çimentosu ve harç üretiminde, karlı-buzlu yollarda kaymayı önlemede ve taş yünü ile fiberglas üretiminde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Colombo ve diğ. (2003), Ferraris ve diğ. (2001), Gao ve Drummond (1999), ADK'nın tehlikeli maddelerin vitrifikasyonunda kullanımını araştırmışlardır. Siddique ve Singh (2011) ise ADK'nın betonda kullanımına ilişkin hazırladıkları çalışmada, ADK'nın fiziksel, kimyasal, mekanik ve potansiyel kirletici özelliklerini ortaya koymuşlar; ADK'nın yönetim seçeneklerini, uygulama alanlarını ve ADK ile hazırlanan betonların performans özelliklerini incelemişlerdir.

Uluslararası alanda ADK geri kazanımı üzerine gerçekleştirilen endüstriyel faaliyetlere karşın, ülkemizde ADK'nın yeniden kullanımıyla ilgili uygulamalar

oldukça yetersizdir. Daha önceleri belediyelere ait çöp sahalarında yüzey örtüsü olarak kullanılmak suretiyle bertaraf edilen ADK'nın 2005'li yıllardan itibaren düzenli depolama tesislerinde depolanması Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından zorunluluk haline getirilmiştir. Bu nedenle, ülkemizde ADK'lar genellikle düzenli depo sahalarında depolanmak suretiyle bertaraf edilmektedir (Solmaz ve diğ, 2007). Ülkemizdeki sınırlı sayıdaki yeniden kullanım uygulamalarında ADK genel olarak depo sahası örtüsü olarak kullanılmaktadır, çok az bir miktar ise mühendislik uygulamalarında tekrar değerlendirilmektedir (Güney ve diğ, 2010). Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (TÜDOKSAD)'nden edinilen bilgiler ışığında, ADK'nın, yüksek orandaki silis içeriğinden ötürü çok az sayıdaki çimento fabrikasında hammadde olarak kullanıldığı; ayrıca, beton park/bahçe mobilyaları imalatında ve kaldırımlar için parke taşı ve bordür üretiminde sınırlı miktarda kullanıldığı belirlenmiştir. Bu durum, ADK'nın olası kullanım alanlarındaki bilgi ve araştırma eksikliğinden ileri gelmektedir (Güney ve diğ, 2010). Ayrıca, endüstriyel atıkların ülkemizde farklı mühendislik alanlarında tekrar kullanımıyla ilgili yasal ve bürokratik düzenlemeler ile çevresel yatırımı destekleyen teşvik mekanizmalarındaki yetersizlikler de ADK'ların geri kazanım potansiyelini yavaşlatmaktadır.

Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de, çimento üretimi sırasında doğal hammaddeler belli oranlarda atıklar ve yan ürünler gibi alternatif malzemelerle ikame edilmekte, doğal kaynakların korunumuna katkıda bulunulmakta ve ekonomik tasarruf sağlanmaktadır. Akçansa'da alternatif hammadde olarak en büyük payı grid almaktadır. Gridi, sırasıyla pirit külü ve yüksek fırın cürufu takip etmektedir. Alüminyum, demir vb. içeren mermer atıkları ile ADK, demir tozu ve cürufu, tufal, alçı kırığı ve uçucu kül gibi diğer atıklar da çimentoda değerlendirilmekte ve doğal hammadde ihtiyacı azaltılmaktadır (Akçansa, 2010).

İnce agrega yerine belirli oranlarda ADK kullanılarak beton vb. ürünler elde etmeye yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde; genellikle bağlayıcı olarak Portland çimentosunun kullanıldığı ve elde edilen ürünlerin sadece fiziksel-mekanik özellikler (kalite, performans) açısından analiz edildiği, buna karşılık çevresel etkiler açısından çok fazla irdelenmediği görülmüştür (Bakis ve diğ. (2006), Güney ve diğ. (2010), Khatib ve Ellis (2001), Khatib ve diğ. (2010), Lawrence ve Mavroulidou (2009), Monosi ve diğ. (2010), Siddique ve diğ. (2009), Yalçın ve diğ. (2003)). Halbuki endüstriyel atık olarak nitelendirilen ADK'nın farklı alan ve kullanım

uygulamalarında "çevresel etkiler" açısından da değerlendirilmesi, AB'ye üyelik müzakerelerinde en zorlu alanların başında çevrenin yer aldığı ve çevre korunmasının AB'nin temel öncelikleri arasında ciddi bir yer tuttuğu gözönünde bulundurulduğunda, ayrı bir önem kazanmaktadır.

Bu çalışmanın başlıca amaçlarından biri, ülkemizde yürütülen sınırlı sayıdaki yeniden kullanım uygulamalarına ışık tutacak şekilde, bir geri kazanım yöntemi olan solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) prosesiyle yapı endüstrisine yönelik faydalı ürün (hazır beton) eldesinin ve bu ürünün betonarme yapılarda kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Ayrıca, elde edilen katılaştırılmış ürünlerin fiziksel-mekanik özellikler, çevresel etkiler ve mikro-yapısal özellikler açısından değerlendirilmesinin yanısıra ürün özelliklerinin ilgili Çevre Mevzuatı Yönetmeliklerinde ve Türk Standartlarında yer alan kriterlerle karşılaştırılmasıdır. "Üniversite-sanayi işbirliği" çerçevesinde yapılan bu çalışmada, ADK'nın, ülkemizde lokomotif konumda olan inşaat endüstrisinin önemli kollarından biri olan "hazır beton sektörü"nde kullanılabileceğinin ortaya çıkarılması planlanmıştır.

Betonu oluşturan malzemeler içerisinde en büyük orana sahip olan agregâ (%75), doğal kaynakları hızla tükenen ve standartlara uygun, temiz ve kaliteli örneklerinin bulunması giderek güçleşen bir malzeme olarak, hazır beton sektöründeki stratejik önemini her geçen gün arttırmaktadır. Bu alanda ciddi planlamalar yapılarak önlemler alınmazsa, yakın gelecekte agregâ ithali bile sözkonusu olabilecektir (Demiryürek, 2007). Bu durumu önlemek adına ADK'nın hazır beton imalatında agregâlarla birlikte kullanılabilirliğinin ortaya konulması ve çalışma sonuçlarının sanayide uygulamaya aktarılması, yalnızca dökümhanelerin atık problemini çözmeye yardımcı olmakla kalmayacak, aynı zamanda hazır beton sektöründe gelecek yıllarda yaşanması olası agregâ ihtiyacına yönelik sorunun aşılmasına da katkı sağlamış olacaktır.

Bunun yanısıra, çeşitli ön işlem proseleri (yakma, yıkama, S/S) uygulanarak olası organik/inorganik kirleticilerin ADK'dan kısmen ve/veya tamamen uzaklaştırılması, düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi bakımından, özellikle döküm sektöründe büyük bir kazanç sağlayacaktır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Hammadde Ve Atık Döküm Kumu Karakterizasyonu

5.1.1 Materyal

Karakterizasyon çalışmasında kullanılan kimyasal maddelere ve cihazlara ilişkin bilgiler sırasıyla, Çizelge 5.1 ve 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Karakterizasyon çalışmasında kullanılan kimyasal maddeler.

Kimyasal maddeler	Kullanılma sebebi
HCl, HNO ₃ , argon gazı, N ₂ O ve asetilen gazı, AAS kalibrasyon std (26 elementli)	Metal analizi
HCl, potasyum biftalat (C ₈ H ₅ KO ₄), Na ₂ CO ₃ , NaHCO ₃ , kuru hava tüpü	TOK/ÇOK analizi
Basıncılı hava, klorür IC std., florür IC std., sülfat IC std	Anyon analizi
n-heptan, Na ₂ SO ₄ , aseton, florosil, n-decane, n-tetrakontan, helyum gazı ve kuru hava, hidrokarbon GC std.	Mineral yağ analizi
Metil oranj indikatörü, H ₃ PO ₄ , stok fenol çözeltisi, NaOH, NaCl, HCl, CHCl ₃ , Na ₂ SO ₄ , KI, K ₃ Fe(CN) ₆ , 4-aminoantipirin, nişasta	Fenol analizi
CH ₂ Cl ₂ , asetonitril, siklohekzan, silika jel, hekzan, dimetilformamid, azot gazı, PAH kalibrasyon std.	PAH analizi
BTEX kalibrasyon std., helyum gazı ve kuru hava	BTEX analizi
Hekzan, aseton, toluen, silika jel, alumina oksit, tetradekan, azot ve helyum gazı, PCB kalibrasyon std.	PCB analizi
pH4, pH7 ve pH10 tampon çözeltileri	pH ölçümü
HCl, KOH	Kil miktarı tayini

5.1.2 Yöntem

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir dökümhane tesisinde, demir döküm işlemi sırasında yüksek miktarlarda ortaya çıkan ve halen düzenli depolama tesislerinde depolanmak suretiyle bertaraf edilen atık döküm kumu (ADK) kullanılmıştır. ADK'nın temin edildiği dökümhane tesisi, 1970'de kurulmuş; otomotiv, elektrik ve makine endüstrilerinin pik ve sfero döküm ihtiyacını karşılayan

Çizelge 5.2 : Karakterizasyon çalışmasında kullanılan cihazlar.

Cihazlar	Özellikleri	Kullanılma sebebi
GC-FID	GC 6890N Agilent, Agilent FID Dedector	Hidrokarbon analizi
GC-MS	Thermo Finnigan GC Ultra, AS 3000 Autosampler, AI 3000 Autoinjector, Thermo DSQ MS	Hidrokarbon tayini
GC-ECD	Thermo Finnigan GC Ultra, Thermo AS 3000 Autosampler, Thermo AI 3000 Autoinjector, ⁶³ Ni-ECD Thermo Dedector	PCB analizi
GC-FID	GC 6890N Agilent, Agilent FID Dedector (OI-Analytical Eclipse Model 4660)	BTEX analizi
HPLC	Shimadzu	PAH analizi
TOK analizörü	Shimadzu TOC-V CSH TOK analizörü, SSM-5000A Katı Madde modülü, ASI-V Autosampler	TOK ve ÇOK analizleri
İyon krom. cihazı	Dionex ICS-1000 Ion Chromat.	Anyon analizi
AAS	Varian 220FS Alevli, VGA77 Hidrür, GTA110 Grafit üniteleri	Metal analizi
XRD	Shimadzu XRD-6000	İnorganik madde cinsi tayini (kalitatif faz)
XRF	PHILIPS PW-2404	Yarı-kantitatif element analizi
SEM	JEOL 6335F	Morfolojik analiz için
Kalorimetre bombası	LECO-AC350	Üst ve alt ısı değer tayini
CHN-S Elementel Analiz Cihazı	LECO Truspec	Elementel analiz
TGA	LECO Model TGA701	Kısa analiz
FTIR	Perkin Elmer Pyris 1	Fonksiyonel grup analizi
UV spektrofotometre	CADAS 200 Dr. Lange	Fenol analizi
Shaker (Çalkalayıcı)	Braun Biotech Int., Certomat RM	Hidrokarbon analizi
Shaker (Çalkalayıcı)	Behr Labor Technik GmbH	24 sa.lık eluat hazırlama
Nem tayin cihazı	Sartorius MA 45	Nem tayini
Konsantratör	Turbo VAP II Konsantratör	Örnekleri derişikleştirme
Clean-up seti	SUPELCO	Numunelerin temizlenmesi
Döner buharlaştırıcı	Heidolph	Solvent buharlaştırma
Etüv	Binder	Kurutma
Analitik terazi	Metler Toledo	Tartım
Kül fırını	Carbolite	Kızdırma kaybı tayini
pHmetre	WTW Inolab Multi level1	pH ölçümü
İletkenlik ölçer	WTW Multi parametre ölçer	İletkenlik ölçümü
Tane boyutu dağılımı	Malvern Mastersizer, Hydro 2000	Tane boyutu dağılımı
BET cihazı	Quantachrome Instr. Autosorb-1	BET yüzey alanı ölçümü
Ultra saf su cihazı	MILLIPORE MILLI-Q	Saf su eldesi için

bir dökümhane olarak günümüze kadar faaliyetini sürdürmüştür. Tesiste, otomotiv endüstrisi ve inşaat makineleri pik ve sfero döküm yedek parçaları, elektrik sanayii için kalıplar, metal aksam vb. üretimi yapılmaktadır. Tesis üretim kapasitesinin %95'ini otomotiv endüstrisi döküm parçaları oluşturmaktadır. Söz konusu dökümhane tesisinde döküm kalıplarında ve maça kumunda bağlayıcı olarak sırasıyla sodyum bentonit ve fenol formaldehit reçinesi kullanıldığı bildirilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasını oluşturan karakterizasyon kısmında, kum hazırlama ünitesinde kum kalıp yapımında kullanılan hammaddenin (silika kumu) ve demir döküm işlemi sırasında ortaya çıkan ADK'nın ayrı ayrı karakterizasyonu yapılmış, bu sayede ADK'daki kontaminasyonunun hammaddeden (silika kumu) mi, yoksa döküm prosesinden mi ileri geldiği ortaya konulabilmiştir.

Karakterizasyon çalışması sonucu bileşimler belirlenmiş; hammaddenin (silika kumu) ve ADK'nın fiziksel, kimyasal ve morfolojik özellikleri ile sızma (liç) potansiyeli ortaya konulmuştur. Analiz sonuçları 05.07.2008 tarihli ve R.G. 26927 sayılı "Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (AYGEİY)-EK 3B: Tehlikeli atık eşik konsantrasyonları" ve 24.03.2010 tarihli ve R.G. 27531 sayılı "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY)-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" çerçevesinde değerlendirilmiş ve söz konusu ADK'nın tehlikeli ve depolanabilir olma özellikleri belirlenmiştir.

ADK, "AYGEİY-EK IV"te verilen Tehlikeli Atık Listesi'nde (10) kodlu, "Isıl işlemlerden kaynaklanan atıklar"-10 09 "Demir döküm işleminden kaynaklanan atıklar" grubuna dahil edilebilir. Bu tür atıklar tehlikeli atıklar listesinin alt sınıflarında 10 09 07 olarak kodlanmış ve "Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları" (M) ve (*) işareti ile belirtilmiştir.

Hammaddenin (silika kumu) ve ADK'nın nem/katı madde tayini Sartorius MA 45 marka nem tayin cihazı, pH ölçümü WTW Inolab Multi level1 marka pHmetre, iletkenlik ölçümü ise WTW Multi parametre ölçer kullanılarak yapılmıştır. BET yüzey alanı Quantachrome Autosorb-1 cihazı ile, tane boyutu dağılımı ise Malvern Mastersizer Hydro 2000 kullanılarak yaş yöntemiyle belirlenmiştir. Özgül ağırlık tayini için piknometre kullanılmıştır.

ADK numunesinin nem, uçucu madde, sabit karbon ve kül içeriği kısa analiz yöntemi ile LECO Model TGA701 termogravimetrik analiz cihazı kullanılarak kısa

analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Hammaddenin (silika kumu) inorganik yapısı nedeniyle kısa analizi yapılmamıştır. Kısa analiz parametreleri, ADK'ya uygulanan ısı dönüşüm sürecinin belirlenmesinde önemli parametrelerdir.

Karakterizasyon çalışması kapsamında hammadde (silika kumu) ve ADK, Çizelge 5.3'te belirtilen fiziksel analizlere tabii tutulmuştur:

Çizelge 5.3 : Fiziksel karakterizasyon parametreleri ve analiz yöntemleri.

Parametre	Analiz yöntemi
pH değeri (Sulu çözelti)	TS 8753 EN 12176:2002
İletkenlik (Sulu çözelti)	SM 2510B
Katı madde miktarı (%ağ.)	TS 9546 EN 12880:2002
Partikül boyutu dağılımı	Lazer tekniği (yaş ölçüm) ISO 13320-1:2009
Toplam yüzey alanı	BET cihazı ile
Özgül ağırlık	TS EN 1097-6:2002
Gevşek ve sıkışık birim ağırlık	TS EN 1097-6/A1: 2007
Su emme oranı (%)	
Kısa analiz (kuru temel)	
Nem tayini	ASTM D 3173
Uçucu madde tayini	ASTM D 1375
Kül tayini	ASTM D 3174
Sabit karbon	Farktan hesapla

Kalitatif faz-mineralojik analiz, Shimadzu marka XRD-6000 model XRD cihazı ile Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1.5405^\circ\text{A}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kimyasal bileşimde bulunan inorganik elementlerin yarı-kantitatif analizi Philips PW-2404 model dalgaboyu dağılımlı XRF cihazı ile saptanmıştır. FTIR analizi Perkin Elmer marka Pyris 1 model cihaz kullanılarak $400-4000\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir.

ADK'nın karbon, hidrojen, azot, oksijen ve kükürt (CHONS) içerikleri (%ağ.) LECO Truspec marka elementel analiz cihazı kullanılarak belirlenmiş ve molar formülasyonu ($\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d\text{S}_e$) ortaya konulmuştur. ADK'nın C, H, N içeriği ASTM D 5373-02 test yöntemine göre, S içeriği ise ASTM D 4239-05 test yöntemine göre belirlenmiştir. O içeriği toplam kütleden diğer elementlerin kütlelerinin farkı alınarak hesaplanmış; ayrıca, H/C ve O/C molar oranları da saptanmıştır. Elementel analiz

kuru numunede yapılmıştır. Hammaddenin (silika kumu) inorganik yapısı nedeniyle elementel analizi yapılmamıştır.

Kuru kum numuneleri 550°C'de sabit tartıma gelinceye kadar yakılmış, organik ve inorganik madde miktarları (%ağ.) hesaplanmıştır.

Kil miktarı tayini (Oolitic content): Zanetti ve Fiore (2002) tarafından önerilen yöntemle göre, kuru kum numunesi 900°C'de 4 sa. kalsine edilmiştir. Yanmış numuneden 25 g alınmış ve ilk olarak 100 ml 6 N HCl ile 25 dk. kaynatılarak reaksiyona tabii tutulmuştur. Asitle reaksiyon tamamlandığında, kum saf su ile birkaç sefer yıkanarak nötrleştirilmiştir. 30 g KOH'un 125 ml saf suda çözülmesiyle hazırlanan alkali çözelti, kalan numuneye eklenmiş ve 25 dk. da bu şekilde kaynatılarak reaksiyona tabii tutulmuştur. Alkalinite giderilinceye kadar kum saf su ile birkaç sefer yıkanmıştır. Kalan kum filtre edilmiş, kurutulmuş ve ilk ve son tartım arasındaki farktan kil içeriği hesaplanmıştır.

ADK'nın üst ısı değer (kuru temel) tayini ASTM D 5865 yöntemine göre LECO-AC350 marka kalorimetre bombası ile yapılmıştır. Alt ısı değer ise üst ısı değer ve %H kullanılarak, ASTM D 240 yöntemiyle hesaplanmıştır. Alt ısı değerinin hesaplanmasında kullanılan bağıntı (5.1) no.lu eşitlikte verilmiştir:

$$\text{Alt ısı değer (MJ/kg)} = \text{Üst ısı değer (MJ/kg)} - 0,2122 * \%H \quad (5.1)$$

Karakterizasyon çalışması kapsamında, hammadde (silika kumu) ve ADK Çizelge 5.4'te belirtilen kimyasal analizlere tabii tutulmuştur.

Hammaddenin (silika kumu) ve ADK'nın metalografik tekniklerle parlatılmış (altın, karbon kaplama) yüzeylerinin mikroyapısal ve morfolojik karakterizasyonu JEOL 6335F marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmış; ayrıca, yarı-kantitatif mikroanalitik yöntemle Enerji Dispersif X-Işını Spektroskopisi (EDS) kullanılarak kimyasal olarak da incelenmiştir.

"ADDDY-EK 2"ye göre atıkların düzenli depolama tesislerinde depolanabilme özellikleri incelenirken, depolanması düşünülen atıkların depo sahasında yağmur suyu ile reaksiyona girmesi sonucu toprağı ve yer altı sularını kirletme potansiyeli dikkate alınır. Atığın içerisinde bulunması olası kirleticilerin sızıntı suyuna (eluat) geçme özelliğinin belirlenmesi amacıyla, sızma (liç) testi uygulanır (TS EN 12457-4:2004: Atıkların nitelendirilmesi, granül haldeki katılardan özütleme analizi, sıvı/

Çizelge 5.4 : Kimyasal karakterizasyon parametreleri ve analiz yöntemleri.

Parametre	Analiz yöntemi
(*)Toplam organik karbon (TOK mg/kg)	SM 5310 B Yüksek sıcaklıkta yakma
BTEX (benzen, toluen, etilbenzen ve ksilen) (mg/kg)	EPA 8015C (Purge&Trap GC-FID)
(*) ^a PCBs (mg/kg)	TS EN 12766-1:2003 (GC-ECD)
(*)PCDD/F (mg/kg)	TS EN 1948/2-3:2006 (HRGC/MS)
(*)PAH (mg/kg)	EPA 8310 (HPLC)
(*) ^b Mineral yağ (mg/kg)	TS EN 14039:2004 (GC-FID)
(*)Kızdırma kaybı (%)	TS EN 12879:2003
Kalitatif analiz (Mineralojik analiz)	X-ışını difraksiyonu (XRD)
Kantitatif analiz	X-ışını floresans (XRF)
İnorganik/organik madde miktarı (%ağ.)	550°C'de yakma
Kil miktarı tayini	Zanetti ve Fiore (2002)
Organik madde cinsi	GC-MS, FTIR
Elementel analiz (kuru temel)	
C, H, N analizi	ASTM D 5373-02
S analizi	ASTM D 4239-05
O analizi	Farktan hesapla
Üst ısı değeri (kJ/kg) (kuru temel)	ASTM D5865 (Kalorimetre bombası)
Alt ısı değeri (kJ/kg) (kuru temel)	ASTM D240 (Hesapla)

^a PCBs: 28, 52, 101, 153, 138 ve 180 IUPAC nolu PCB üyelerinin EN 12766-1 yöntemiyle analizi sonucu elde edilen değerlerden, TS EN 12766-2:2004- B kullanılarak Toplam PCB hesaplanmıştır.

^b Mineral yağ, organik çözücüde çözünebilir toplam yağ miktarıdır.

(*) işaretli analizler ISO/IEC 17025:2005'e göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiştir.

katı oranı: 10/1). Bu standarda göre, partikül boyutu 10 mm'den küçük olan 100 g kuru numune 1 L saf su ile 24 sa. süreyle çalkalanarak özütlenir. Özütlenme sonrasında katı ve sıvı faz santrifüj yöntemi ile birbirinden ayrılır, sıvı faz "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için kabul kriterleri" tablosunda yer alan parametrelere göre analiz edilir.

Hammaddeye (silika kumu) ve ADK'ya uygulanan sızma (liç) testinde, eluattaki kirletici parametreler ve analiz yöntemleri Çizelge 5.5'te verilmiştir. Tüm

konvansiyonel parametrelerin analizleri Standart Yöntemlere (APHA, 2005) göre yapılmıştır.

Çizelge 5.5 : TS EN 12457-4:2004 Sızma (liç) potansiyeli parametreleri ve analiz yöntemleri.

Parametre	Analiz yöntemi
(*)Arsenik (As mg/L)	SM 3114 AAS (Hidrür sistem)
(*)Baryum (Ba mg/L)	
(*)Kadmiyum (Cd mg/L)	SM 3113 AAS (Grafit fırın)
(*)Krom (Cr mg/L)	
(*)Bakır (Cu mg/L)	
(*)Cıva (Hg mg/L)	SM 3112 AAS (Soğuk buhar ünitesi)
(*)Molibden (Mo mg/L)	SM 3113 AAS (Grafit fırın)
(*)Nikel (Ni mg/L)	
(*)Kurşun (Pb mg/L)	SM 3113 AAS (Grafit fırın)
(*)Antimon (Sb mg/L)	SM 3114 AAS (Hidrür sistem)
(*)Selenyum (Se mg/L)	
(*)Çinko (Zn mg/L)	SM 3111 AAS (Alevli sistem)
(*)Klorür (Cl ⁻ mg/L)	SM 4110 B İyon Kromatografi
(*)Florür (F ⁻ mg/L)	SM 4500 - F ⁻ İyon Seçici Elektrod
(*)Sülfat (SO ₄ ⁼ mg/L)	SM 4110 B İyon Kromatografi
(*)Çöz. Organik Karbon (ÇOK mg/L)	SM 5310 B Yük. Sıc. Yakma
(*)Top. Çözünen Katılar (TÇKM mg/L)	SM 2540 C Gravimetrik
(*)Fenol indeksi (C ₆ H ₅ OH mg/L)	SM 5530 D Fotometrik

(*) işaretli analizler ISO/IEC 17025:2005'e göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiştir.

5.2 Atık Döküm Kumunun Geri Dönüşümü/Tekrar Kullanımı

5.2.1 Materyal ve yöntem

ADK'nın demir döküm tesisinde yeniden hammadde olarak değerlendirilmesi ve proseste kum hazırlama ünitesinde kalıp yapımında tekrar kullanılmasına yönelik yürütülen saha ve laboratuvar çalışmalarında, ADK özellikleri kalıp kumu özellikleri ile karşılaştırılmış ve atığın döküm tesisinde geri dönüşüm/tekrar kullanıma uygunluğu değerlendirilmiştir.

Hammaddenin (silika kumu) ve ADK'nın tane boyutu dağılımı Malvern Mastersizer Hydro 2000 kullanılarak ISO 13320-1:2009'a göre yaş yöntemle belirlenmiştir.

Hammaddenin (Silika kumu) ve ADK'nın metalografik tekniklerle parlatılmış (altın, karbon kaplama) yüzeylerinin mikroyapısal ve morfolojik karakterizasyonu JEOL 6335F marka SEM ile yapılmış; ayrıca, yarı-kantitatif mikroanalitik yöntemle EDS kullanılarak kimyasal olarak da incelenmiştir.

5.3 Atık Döküm Kumunun Düzenli Depolanmasına Yönelik Ön İşlemler

5.3.1 Materyal

Düzenli depolama ön işlem çalışmasında kullanılan kimyasal maddeler ve cihazlar ile ilgili bilgiler, sırasıyla Çizelge 5.6 ve 5.7'de verilmiştir:

Çizelge 5.6 : Düzenli depolama ön işlem çalışmasında kullanılan kimyasal maddeler.

Kimyasal maddeler	Kullanılma sebebi
HCl, HNO ₃ , argon gazı, N ₂ O ve asetilen gazı, AAS kalibrasyon std (26 elementli)	Metal analizi
HCl, potasyum biftalat (C ₈ H ₅ KO ₄), Na ₂ CO ₃ , NaHCO ₃ , kuru hava tüpü	TOK/ÇOK analizi
Basıncılı hava, klorür IC std., florür IC std., sülfat IC std	Anyon analizi
K ₂ Cr ₂ O ₇ , H ₂ SO ₄ , ferroin indikatör çözeltisi, std ferro amonyum sülfat titrantı, HgSO ₄	KOI analizi
HCl, n-hekzan, metil-ter-butyl-eter, Na ₂ SO ₄	Yağ-gres analizi
Kloramin-T, std CN çözeltisi, piridin-barbiturik asit, asetat tampon çözeltisi, NaOH	Toplam CN analizi
pH4, pH7 ve pH10 tampon çözeltileri	pH ölçümü
HCl, NaOH, H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , şebeke suyu	Yıkama deneyleri için
Portland kalkerli çimento, kireç	S/S deneyleri için

5.3.2 Yöntem

ADK'nın depolanabilme özelliği 24.03.2010 tarihli ve R.G. 27531 sayılı "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" çerçevesinde Bölüm 6.1.5'te incelenmiş; ÇOK değeri sebebiyle 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu saptanmıştır.

Çizelge 5.7 : Düzenli depolama ön işlem çalışmasında kullanılan cihazlar.

Cihazlar	Özellikleri	Kullanılma sebebi
TOK analizörü	Shimadzu TOC-V CSH TOK analizörü, SSM-5000A Katı Madde modülü, ASI-V Autosampler	TOK ve ÇOK analizleri
İyon krom. cihazı	Dionex ICS-1000 Ion Chromat.	Anyon analizi
AAS	Varian 220FS Alevli, VGA77 Hidrür, GTA110 Grafit üniteleri	Metal analizi
SEM	JEOL 6335F	Morfolojik analiz için
TGA	Perkin Elmer Pyris1	TGA analizi
Shaker (Çalkalayıcı)	Behr Labor Technik GmbH	24 sa.lık eluat hazırlama
Shaker (Çalkalayıcı)	IKA Werke marka HS 501	Yıkama deneyleri
Nem tayin cihazı	Sartorius MA 45	Nem tayini
Etüv	Binder	Kurutma
Analitik terazi	Metler Toledo	Tartım
Kül fırını	Heraeus	Yakma deneyleri
pHmetre	WTW Inolab Multi level1	pH ölçümü
Tane boyutu dağılımı	Malvern Mastersizer, Hydro 2000	Tane boyutu dağılımı
XRD	Shimadzu XRD-6000	İnorganik madde cinsi tayini (kalitatif faz)
XRF	PHILIPS PW-2404	Yarıkantitatif element analizi
BET cihazı	Quantachrome Instr. Autosorb-1	BET yüzey alanı ölçümü
UV spektrofotometre		
Ceketli ısıtıcı	ISOLAB	Toplam CN analizi
Distilasyon ünitesi	Behr	
Ceketli ısıtıcı	Gerhard	KOI analizi

ADK'nın inert/tehlikesiz atık olarak muamele görebilecek şekilde, düzenli depolanmaya engel oluşturan ÇOK ve diğer organik/inorganik kirletici içeriğinin istenilen seviyeye indirilmesine yönelik olarak ön işlem kapsamında aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

5.3.2.1 Yakma yolu ile kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması

Atık döküm kumunun ısıl bozunma davranışının TGA ile incelenmesi

Termogravimetrik analiz (TGA), karakterizasyonu destekleyen ve yapıların ısıl özellikleri ile ısıl bozunma kinetiği verilerinin hesaplanmasını sağlayan bir analitik tekniktir. Bu çalışmada, ADK'nın ısıl bozunma davranışını incelemek amacıyla TGA'dan faydalanılmış; TG/DTG eğrileri ile ısıl bozunma hızının en yüksek olduğu sıcaklığı tespit etmek üzere hava atmosferi ve sabit ısıtma hızında ısıl analiz yöntemleri uygulanmıştır.

Termogravimetrik analizlerde kütle kaybı yüzdesi (5.2) no.lu eşitlikle hesaplanmaktadır:

$$Kütle\ kaybı\ (\%) = \frac{(m_i - m_t)}{m_i} * 100 \quad (5.2)$$

(5.2) no.lu eşitlikte m_i ; başlangıç kütlesini (mg) ve m_t , T sıcaklığındaki kütleyi (mg) ifade etmektedir (Karayıldırım ve diğ, 2006).

TGA, Perkin Elmer Pyris1 model ısı analiz cihazı ile izotermal olmayan (dinamik) koşullarda, 30 ml/dk. akış hızında ve hava atmosferi altında, oda sıcaklığı ile 900°C sıcaklık aralığında, 10°C/dk. ısıtma hızında yapılmıştır. ADK'ya ait ısı bozunma ve buna bağlı kütle kayıplarını gösteren TG/DTG eğrileri eş-zamanlı çizilmiştir. Bu eğrilerdeki (termogramlar) toplam kütle kayıpları ve bozunma sıcaklık aralıkları incelenerek, laboratuvar ölçekli yakma için en uygun sıcaklık aralığı seçilmiştir.

Kül fırınında yakma

ADK, sekiz farklı sıcaklıkta (200-900°C) ve dört farklı zaman diliminde (30 dk., 1 sa., 2 sa., 4 sa.), Heraeus marka KR 260 E Model 8 kW güce sahip (380 volt, 18 A) ve maksimum çalışma sıcaklığı 1200°C olan kül fırınında yakılmış, orijinal katı üründe TOK değerleri ile eluatta ÇOK ve pH değerlerindeki değişimler izlenmiştir. TOK ve ÇOK konsantrasyonları Shimadzu marka TOC-V CSH model TOK analizöründe, eluat pH'ı ise WTW Inolab Multi level1 marka pHmetre ile ölçülmüştür.

Kızdırma kaybı (LOI), TS EN 12879:2003 yöntemine uygun olarak 200-900°C sıcaklık aralığında saptanmıştır. Yöntemin esası, kuru kütlenin çeşitli sıcaklıklardaki yanma kaybını gravimetrik yöntemlerle saptamaya dayanmaktadır; kurutulmuş numunenin yanma öncesi ve belirlenen sıcaklıktaki yanma sonrası ağırlık farkından hesaplanmaktadır.

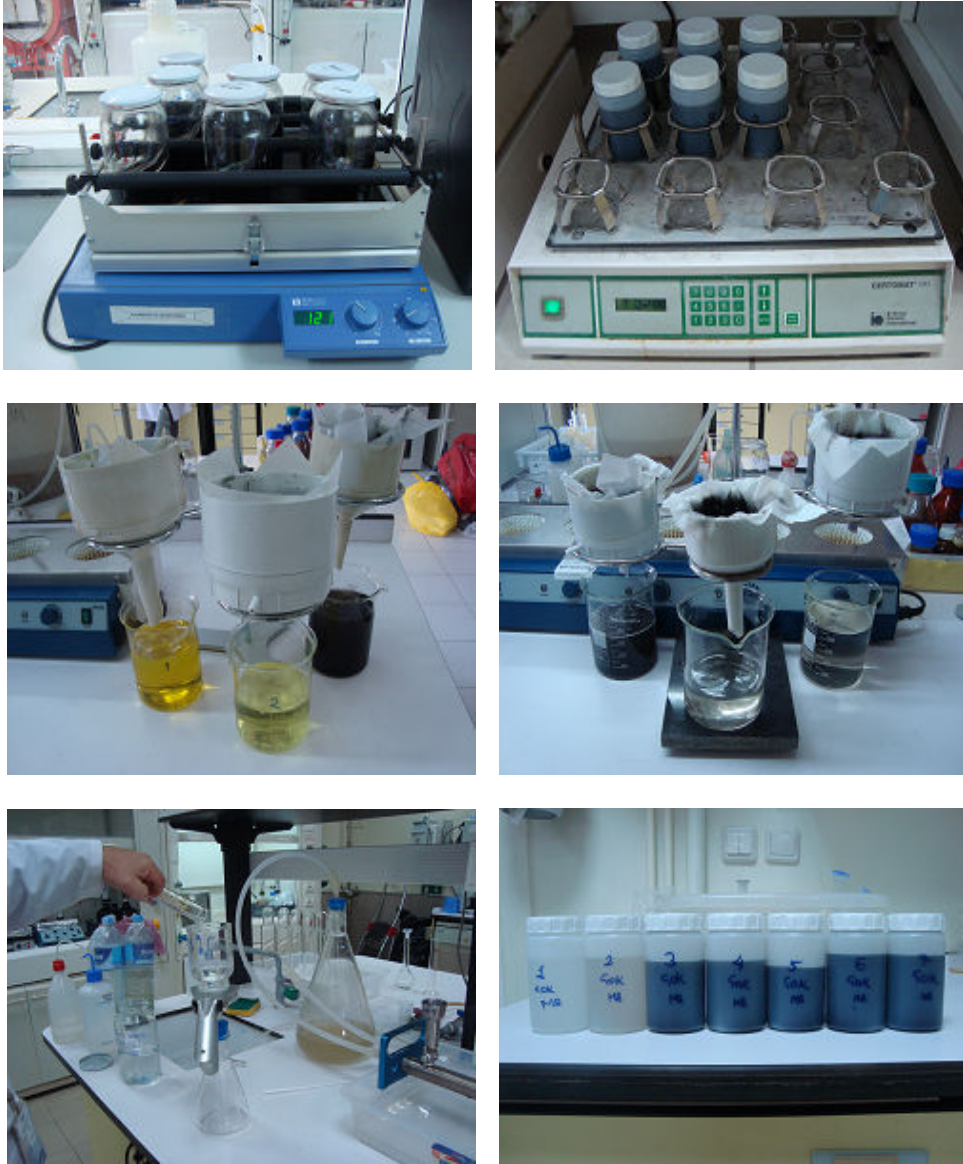
5.3.2.2 Yıkama yolu ile kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması

Yıkama deneylerinde yıkama sıvısı olarak farklı konsantrasyonlarda (1 M, 3 M, 6 M) hazırlanan asidik (HCl, H₂SO₄, HNO₃) ve bazik (NaOH) çözeltiler ile şebeke suyu kullanılmıştır. Yıkama işleminde kullanılan çözeltilere ilişkin bilgiler Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Yıkama işleminde kullanılan çözeltilere ilişkin bilgiler.

Solvent	Tehlike işareti	Risk faktörü	Güvenlik faktörü	Güvenlik faktörüyle ilgili açıklama
H₂SO₄	C:Korozif	R35: Ciddi yanıklara neden olur.	S:26 S:30 S:45	S26: Göz ile temasında derhal bol su ile yıkayın ve doktora başvurun. S30: Kesinlikle üzerine su dökmeyin ve ilave etmeyin. S45: Kaza halinde veya kendinizi iyi hissetmiyorsanız hemen bir doktora başvurun. S23: Gaz/ Duman/ Buhar/ Aerosollerini solumayın.
HNO₃	C:Korozif	R35: Ciddi yanıklara neden olur.	S:23 S:26 S:36/37/39 S:45	S26: Göz ile temasında derhal bol su ile yıkayın ve doktora başvurun. S36/37/39: Çalışırken uygun koruyucu giysi, koruyucu eldiven, koruyucu gözlük/maske kullanın. S45: Kaza halinde veya kendinizi iyi hissetmiyorsanız hemen bir doktora başvurun.
HCl	C:Korozif	R34: Yanıklara neden olur. R37: Solunum sistemini tahriş eder.	S:26 S:36/37/39 S:45	S26: Göz ile temasında derhal bol su ile yıkayın ve doktora başvurun. S36/37/39: Çalışırken uygun koruyucu giysi, koruyucu eldiven, koruyucu gözlük/maske kullanın. S45: Kaza halinde veya kendinizi iyi hissetmiyorsanız hemen bir doktora başvurun.
NaOH	C:Korozif	R35: Ciddi yanıklara neden olur.	S:26 S:37/39 S:45	S26: Göz ile temasında derhal bol su ile yıkayın ve doktora başvurun. S37/39: Çalışırken uygun koruyucu eldiven, koruyucu gözlük/maske kullanın. S45: Kaza halinde veya kendinizi iyi hissetmiyorsanız hemen bir doktora başvurun.

Yıkama deneyleri 40 g ADK ve 400 mL farklı yıkama sıvısı içeren kesikli reaktörlerde (1 L'lik cam kavanoz) oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1). Reaktörler farklı yıkama sürelerinde (6 sa., 15 sa., 24 sa.) IKA Werke marka HS501 model çalkalayıcıda 121 devir/dk. hızla çalkalanmış; her deney sonunda çözeltiler süzölmüş ve kurutulmuştur. Orijinal katı üründe TOK değerlerindeki, eluatta ise ÇOK ve pH parametrelerindeki değişimler izlenmiştir. TOK ve ÇOK konsantrasyonları Shimadzu marka TOC-V CSH model TOK analizörü, eluat pH'ı ise WTW Inolab Multi level1 marka pHmetre kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 5.1 : Yıkama deneyleri.

Şebeke suyu kullanılarak ADK'daki organik kirleticilerin yıkamayla uzaklaştırılması denemesi sonucunda ele geçen yıkama suyu deşarj numunesinin 31.12.2004 tarihli ve R.G. 25687 sayılı "Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY)" Tablo 15.17: Sektör: Metal Sanayi (Demir ve Demir Dışı Dökümhane ve Metal Şekillendirme) alıcı ortama deşarj kirlilik parametreleri temelinde analiz edilmiş ve analiz sonuçlarının "SKKY" Tablo 15.17 limit değerlerine uygunluğu araştırılmıştır.

ADK yıkama suyu deşarj numunesi analiz parametreleri ve yöntemleri Çizelge 5.9'da verilmiştir. Tüm konvansiyonel parametrelerin analizleri Standart Yöntemlere (APHA, 2005) göre yapılmıştır.

Çizelge 5.9 : ADK yıkama suyu deşarj numunesi analiz parametreleri ve yöntemleri.

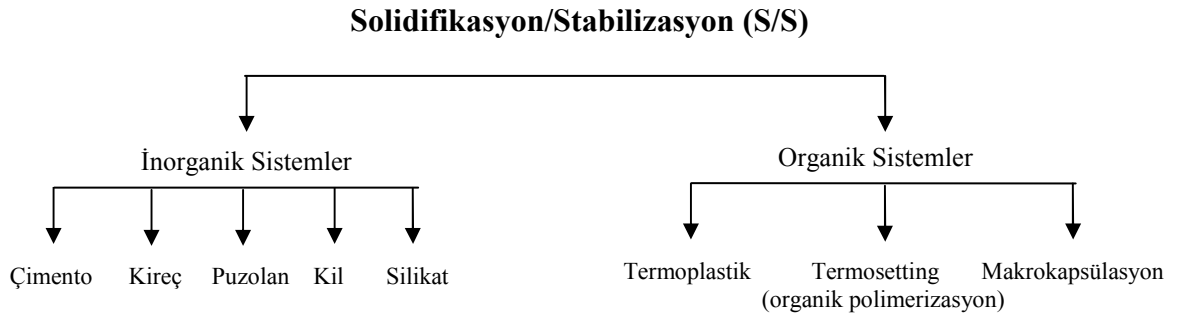
Parametre	Analiz yöntemi
(*) Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ mg/L)	SM-5220 B Açık Riflaks
(*) Askıda katı madde (AKM mg/L)	SM-2540 D Gravimetrik
(*) Yağ ve gres (mg/L)	SM-5520 C Kısmi infrared
(*) Kadmiyum (Cd mg/L)	EPA 6020A ICP-MS
(*) Cıva (Hg mg/L)	SM-3112 AAS Soğuk buhar
(*) Çinko (Zn mg/L)	
(*) Kurşun (Pb mg/L)	
(*) Bakır (Cu mg/L)	EPA 6020A ICP-MS
(*) Demir (Fe mg/L)	
(*) Toplam Krom (Toplam Cr mg/L)	
(*) Krom (Cr ⁺⁶ mg/L)	SM- 3113 AAS Grafit fırın
(*) Arsenik (As mg/L)	
(*) Alüminyum (Al mg/L)	EPA 6020A ICP-MS
(*) Nikel (Ni mg/L)	
(*) Toplam siyanür (Toplam CN ⁻ mg/L)	SM-4500 CN ⁻ E Kolorimetrik
(*) pH	TS 8753 EN 12176:2002

(*) işaretli analizler ISO/IEC 17025:2005'e göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiştir.

5.3.2.3 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) yolu ile kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması

Bağlayıcı seçimi

Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) sistemleri organik ve inorganik olmak üzere iki genel kategoride incelenir. Bu kategoriler, kullanılan solidifikasyon katkıları baz alınarak belirlenir. Bu prosesler Şekil 5.2'de özetlenmiştir (Çelik ve Sivri, 2005):



Şekil 5.2: S/S prosesi genel kategorileri, Çelik ve Sivri (2005)'den uyarlanmıştır.

Portland çimentosu en yaygın kullanılan bağlayıcı ve stabilizasyon malzemesidir (Bulut ve diğ., 2009). Diğer bağlayıcı maddeler; $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (alçıtaşı), CaO , uçucu kül, mortel çimento, aktif karbon, çimento fırını tozu, kireç fırını tozu, zeolit vb.'dir. Bu çalışmada, S/S yöntemi ile ADK'daki olası kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması amacıyla iki farklı bağlayıcı (ayrı ayrı ve birlikte) kullanılmıştır:

- 1. Çimento** olarak, kütlece %80-94 klinker, %6-20 kireçtaşı (kalker) ve %0-5 minör katkıları içeren, dayanım sınıfı 42,5 olan, normal erken dayanımlı CEM II/A-LL 42,5 N Portland kalkerli çimento (TS EN 197-1:2002) kullanılmıştır. Bu çimento, piyasada "beyaz Portland kalkerli çimento (inşaat tipi)" adı altında 50 kg'lık ambalajlarda satılan "Trakya Çimento" marka çimentodur. Portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (priz ayarlayıcı) ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen bir hidrolik bağlayıcıdır.
- 2. Kireç** olarak CL 80-S sönmüş kalker kireci (TS EN 459-1:2010) kullanılmıştır. Piyasada "paketlenmiş söndürülmüş kireç" adı altında 25 kg'lık ambalajlarda satılan "Nuh Kireç" marka kireçtir. TS EN 459-1:2010 "Yapı Kireci-Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" standardındaki çeşitli kireç tiplerine göre, CL 80-S sönmüş kalker kirecinin bileşen değerleri $\geq 80\% \text{CaO} + \text{MgO}$, $\leq 5\% \text{MgO}$, $\leq 7\% \text{CO}_2$ ve $\leq 2\% \text{SO}_3$ şeklindedir.

Bağlayıcıların karakterizasyonu

S/S prosesinin performansının ölçülebilmesi için sistemde kullanılan bağlayıcıların fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Bu sayede bağlayıcılardan gelebilecek olası kirleticiler ve konsantrasyonları saptanabilmiştir. Bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin tespiti için tane boyutu, toplam yüzey alanı, özgül ağırlık, nem, gevşek ve sıkışık birim ağırlık analizleri yapılmıştır. Bağlayıcıların kimyasal ve mikro-yapısal karakterizasyonu kapsamında XRF, XRD, pH, kızdırma kaybı, TOK, ÇOK ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

Atık döküm kumu için laboratuvar ölçekli S/S çalışması

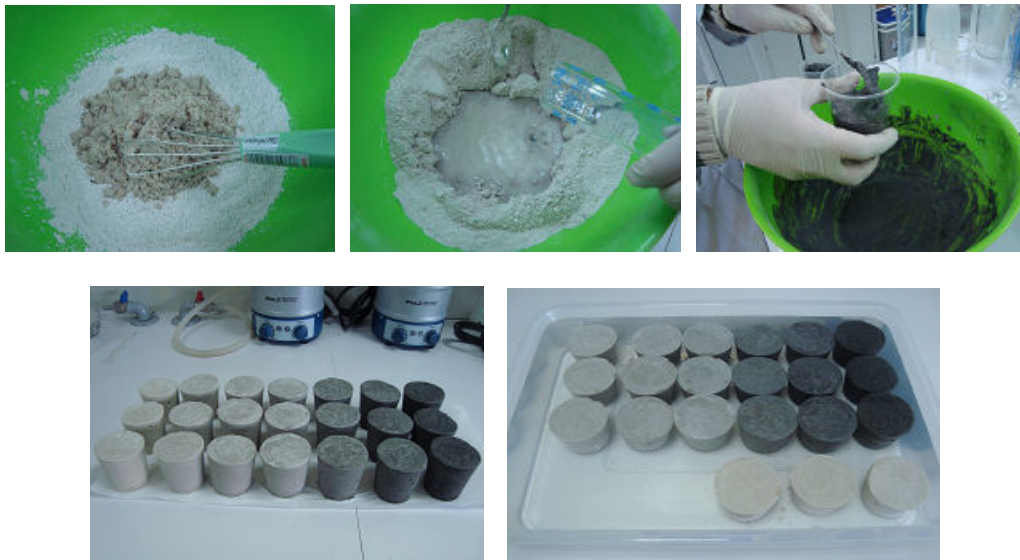
ADK'ya Portland çimentosu-kireç-esaslı S/S prosesi uygulanmış ve sonuçlar Portland çimentosu-esaslı ve kireç-esaslı S/S proses sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karışımlardaki ADK oranının %0-90 arasında değiştiği üç tür harç hazırlanmıştır:

- ADK, Portland çimentosu, su,

- ADK, kalker kireci, su,
- ADK, Portland çimentosu, kalker kireci, su.

Bağlayıcı olarak Portland kalkerli çimento ve kalker kireci (birlikte ve ayrı ayrı), dolgu malzemesi olarak ise silika kum kullanılmıştır. Tüm katı bileşenler su eklenmeden önce 5 dk. kuru olarak karıştırılmış, ADK'yı katılaştırmak/stabilize etmek için farklı bileşimlerde hazırlanan harçlara 0,2 ml şebeke suyu/g katı karışım oranında su ilave edilmiş; 10 dk. çırpma teli ile karıştırılmış olan harçlar polietilen kalıplara dökülerek sıkıştırılmış ve 1 günlük prizlenme süresi sonunda kalıplardan çıkarılmışlardır (Şekil 5.3). Farklı karışım oranlarında hazırlanan katılaşmış ürünler 20°C'deki kür havuzunda 28 gün kür edilmiş; 2,36 mm (8 mesh) tane boyutuna kadar küçültülmüş, TS EN 12457-4:2004 standardına göre eluatları hazırlanmış ve 24 sa. süresince sızma (liç) testine tabii tutulmuşlardır. Sızma (liç) testi sonrasında atık/bağlayıcı karışım oranlarına göre eluatta ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ ve pH, orijinal katı üründe TOK değerlerindeki değişimler izlenmiştir.

Eluatta Ni ve Cr konsantrasyonları Varian marka GTA110 Grafit üniteli AAS, eluatta Zn konsantrasyonu Varian marka 220FS Alevli AAS, eluatta F⁻ konsantrasyonu Dionex ICS-1000 İyon Kromatografi cihazı, orijinal katı üründe TOK ve eluatta ÇOK konsantrasyonları Shimadzu marka TOC-V CSH model TOK analizörü, eluat pH'ı ise WTW Inolab pHmetre kullanılarak, eluatta TÇKM konsantrasyonu ise gravimetrik yöntemle ölçülmüştür.



Şekil 5.3 : Laboratuvar ölçekli S/S deneyleri.

5.4 Atık Döküm Kumundan Geri Kazanım İle Faydalı Ürün Elde Edilmesi

5.4.1 Materyal

ADK geri kazanımı çalışmasında kullanılan kimyasal madde ve malzemeler ile ilgili bilgiler Çizelge 5.10'da, cihazlara ilişkin özellikler Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.10 : ADK geri kazanımı çalışmasında kullanılan kimyasal madde ve malzemeler.

Kimyasal maddeler	Kullanılma sebebi
HCl, HNO ₃ , argon gazı, N ₂ O ve asetilen gazı, AAS kalibrasyon std (26 elementli)	Metal analizi
HCl, C ₈ H ₅ KO ₄ , Na ₂ CO ₃ , NaHCO ₃ , kuru hava tüpü	TOK/ÇOK analizi
Basınçlı hava, klorür IC std., florür IC std., sülfat IC std	Anyon analizi
pH4, pH7 ve pH10 tampon çözeltileri	pH ölçümü
NaOH, asetik asit, saf su	Sızma (liç) testi
Metilen mavisi	Agrega analizi
Mıdır, taş tozu, silika kumu, Portland çimentosu	S/S deneyleri
Süper akışkanlaştırıcı	

Çizelge 5.11 : ADK geri kazanımı çalışmasında kullanılan cihazlar.

Cihazlar	Özellikleri	Kullanılma sebebi
TOK analizörü	Shimadzu TOC-V CSH TOK analizörü, SSM-5000A Katı Madde modülü, ASI-V Autosampler	TOK ve ÇOK analizi
İyon krom. cihazı	Dionex ICS-1000 Ion Chromat.	Anyon analizi
AAS	Varian 220FS Alevli, VGA77 Hidrür, GTA110 Grafit üniteleri	Metal analizi
SEM	JEOL 6335F	Morfolojik analiz
EDS	Oxford Instruments	Yarı-kantitatif analiz
pHmetre	WTW Inolab Multi level1	pH ölçümü
Shaker (Çalkalayıcı)	Behr Labor Technik GmbH	Eluat hazırlama
Nem tayin cihazı	Sartorius MA 45	Nem tayini
Etüv	Binder	Kurutma
Analitik terazi	Metler Toledo	Tartım
XRD	Shimadzu XRD-6000	İnorganik madde cinsi tayini
XRF	PHILIPS PW-2404	Yarı-kantitatif analiz
Tane boyutu dağılımı	Malvern Mastersizer	Tane boyutu dağılımı
Basınç dayanımı cihazı	Çelik Makine	Basınç dayanımı
Yarmada çekme dayanımı cihazı	Çelik Makine	Yarmada çekme dayanımı

5.4.2 Yöntem

Geri kazanım yoluyla yapı endüstrisinde ekonomik değeri olan faydalı ürün eldesi kapsamında, inşaat endüstrisinin temel taşlarından biri olan hazır beton sektöründe ADK'nın "hazır beton" imalatında agrega ile birlikte kullanılabilirliğini belirlemek ve çalışma sonuçlarının "üniversite-sanayi işbirliği" çerçevesinde sanayide uygulamaya aktarılabilirliğini araştırmak amacıyla yapılan pilot ölçekli S/S çalışması, İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları Sanayi ve Tic. A.Ş. (İSTON A.Ş., Tuzla/İstanbul)'nin alt yapı imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.4.2.1 Atık döküm kumunun agrega özelliklerinin incelenmesi

Beton agregalarında, TS 706 EN 12620+A1:2009 standardında belirtilen deneyler uygun aralıklarla yapılarak, kalite sürekliliği takip edilmelidir. Agrega, yapılarda kullanılan taneli malzeme olup doğal, yapay veya geri kazanılmış özellikte olabilir. *İnce agrega*, "D" tane büyüklüğünün ≤ 4 mm olduğu agregadır.

"TS 706 EN 12620+A1:2009-Beton Agregaları" standardına göre ince agrega olarak uygunluğunun değerlendirilmesi için hammaddenin (silika kumu) ve ADK'nın incelenen geometrik, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve uygulanan analiz yöntemleri Çizelge 5.12'de verilmiştir.

5.4.2.2 Beton karışımlarının hazırlanması

Herhangi bir beton karışımının üretiminde yer alabilecek malzemeler; çimento, ince ve iri agrega, su ve kimyasal katkı maddeleridir. Beton karışımlarında kullanılan ince agregalar genellikle tane boyutu 200 μ m'den az olan kil içerirler. Bu malzemelerin aşırı kullanımı, çimento/agreganın aderansında zayıflama, su ihtiyacında artma, çimentonun hidratasyonunda gecikme gibi istenmeyen etkilere neden olur. Ayrıca, çimento hidratasyonu sırasında su emme oranının ve dolayısıyla sertleşmiş betondaki su kaybının artması, betonda boşlukların oluşmasına sebebiyet verir ve beton içerisinde çatlamlar gerçekleşir. Bu istenmeyen koşullar altında betonun dayanım ve durabilitesinde azalma gerçekleşir. Bu sebeple, beton içerisinde kil parçalarının belirli bir miktardan fazla olması istenmez. Ayrıca, bu malzemelerin belirlenen fazla miktarda kullanılması, betondaki porozitenin düşmesine ve dolayısıyla da betonun mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin etkilenmesine sebep olur (Guney ve diğ, 2010).

Çizelge 5.12 : TS 706 EN 12620+A1:2009 beton agregası parametreleri ve analiz yöntemleri.

Parametre	Analiz yöntemi
Agrega türü	TS 706 EN 12620+A1:2009
A) Geometrik özellikler	
Tane sınıfı (büyüklüğü) (mm)	TS 706 EN 12620+A1:2009
Tane büyüklüğü dağılımı (granülometri)	TS 3530 EN 933-1:1999
Çok ince malzemenin içeriği (%)	TS 3530 EN 933-1/ A1:2007
Çok ince malzeme kalitesi-kum eşdeğeri (SE)	TS EN 933-8:2001
Çok ince malzeme kalitesi-metilen mavisi (MB) değeri (g boya/100 g numune)	TS EN 933-9:2010
B) Fiziksel özellikler	
Tane yoğunluğu (kg/m ³)	TS EN 1097-6:2002
Su emme oranı (%)	TS EN 1097-6/A1: 2007
Gevşek yığın yoğunluğu (kg/m ³)	TS EN 1097-3:1999
Kuruma büzülmesi (%)	TS EN 1367-4:2009
Alkali-silika reaktivliği	ASTM C 1260-07
C) Kimyasal özellikler	
Suda çözüneabilen klorür iyonu içeriği (% ağı.)	TS EN 1744-1:2011 Madde 7
Asitte çözüneabilen sülfat içeriği (%ağı.)	TS EN 1744-1:2011 Madde 12
Toplam kükürt içeriği (%ağı.)	TS EN 1744-1:2011 Madde 11
Asitte çözüneabilen sülfat içeriği (%ağı.)	TS EN 1744-1:2011 Madde 13
Betonun priz alma ve sertleşme hızını değiştiren bileşenler	TS EN 1744-1:2011 Madde 15

Pilot ölçekli S/S çalışması ile C25/30 sınıfı hazır beton (normal beton) imalatında, iki şahit ve yedi farklı ikame oranında (%) ADK kullanılarak uygulama yapılmıştır. ADK %10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100 ikame oranlarında silika kumu ile yer değiştirilmiş olup şahit hazır beton numunelerinde ADK kullanılmamıştır. İlk denemeler %50, %75 ve %100 ikame oranında ADK kullanılarak yapılmıştır. Ancak, yüksek orandaki ADK miktarının taze ve sertleşmiş beton özelliklerini olumsuz etkilemesinden ötürü, ADK miktarı azaltılarak %10, %20, %30 ve %40 ikame oranlarında yeni karışımlar hazırlanmış ve ikinci denemeler yapılmıştır.

Deneylerde katılaştırma malzemesi olarak Portland çimentosu (CEM I 42,5R), iri agrega olarak iki farklı tane boyutunda mıcır (kırmı taş), ince agrega olarak ise taş

tozu, silika kumu ve ADK kullanılmıştır. Hazırlanan tüm karışımlarda maksimum tane boyutu (D_{max}) 22,5 mm olarak alınmıştır.

Beton karışımlarına eklenen su miktarı arttıkça dayanım düşeceği için, kullanılan su miktarını azaltmak amacıyla, melamin-bazlı ticari süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Su azaltıcı katkı maddeleri, taze betonda olması gereken çökme (slamp) değerinin daha az miktarda karma suyu kullanılarak elde edilebilmesini sağlar. Bu katkı maddeleri, içerdikleri aktif maddelerin genel bileşimlerine göre sınıflandırılırlar (Erdoğan, 2007).

Çimento bağlayıcısı kullanılarak hazırlanan beton karışımları iki şahit (Şahit 1-2) ve yedi farklı ikame oranında denenmiştir (Deneme 1-3 ve Deneme 4-7). İlk denemelerde (Deneme 1-3) EPO515 klasik süper akışkanlaştırıcı (normal miktarda su-azaltıcı katkı maddesi) kullanılırken, ikinci denemelerde (Deneme 4-7) daha etkin bir klasik süper akışkanlaştırıcı olan EPO SP954 (yüksek miktarda su-azaltıcı katkı maddesi) kullanılmıştır. Yapılan denemelerde uygulanan ikame oranları ve bileşen miktarları Çizelge 5.13'te verilmektedir. Laboratuvar tipi betoniye (harç karma mikseri) ile yapılan karıştırma işlemi beton homojen ve uniform bir görünüm kazanıncaya kadar devam ettirilmiştir.

5.4.2.3 Taze betonun özelliklerinin belirlenmesi

Taze betonun en önemli özelliği olan işlenebilme, betonun "kolayca karılabilmesi, ayrışma yapmadan taşınabilmesi, yerleştirilebilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin düzeltilebilmesi"ni ifade etmektedir. Yeterli işlenebilmeye sahip olmayan taze beton, sertleştğinde yeterli dayanım ve dayanıklılığı gösteremez. Kıvam ise, taze betonun ıslaklık derecesini, yani betonun ne ölçüde ıslak veya kuru olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, çoğu kez betonun işlenebilmesini belirlemek amacıyla kullanılır (Erdoğan, 2007). Hazırlanan taze betonun kıvamını (işlenebilirliği) saptamak için kullanılan deney yöntemlerinden bazıları; Çökme (slamp) deneyi (TS EN 12350-2:2010), Vebe deneyi (TS EN 12350-3:2010), Sıkıştırılabilme derecesi (EN 12350-4:2010) ve Yayılma tablası deneyi (EN 12350-5:2010)'dır.

Beton deneylerinin belirli kıvam sınırları dışında hassas olmaması sebebiyle, belirtilen kıvam tayini deneyleri şu şekilde verilen sınır değerleri arasında yapılmalıdır: $1 \text{ cm} \leq \text{Çökme} \leq 21 \text{ cm}$; $5 \text{ sn} < \text{Vebe süresi} \leq 30 \text{ sn}$; $1,04 \leq \text{Sıkıştırılabilme derecesi} < 1,46$; $34 \text{ cm} < \text{Yayılma çapı} \leq 62 \text{ cm}$.

Çizelge 5.13 : S/S amaçlı uygulanan ikame oranları ve bileşen miktarları.

Hazır beton (C25/30 sınıfı) denemesinde kullanılan bileşenler	Bileşen miktarı, kg										
	Şahit	Deneme	Deneme	Deneme	Deneme	Şahit	Deneme	Deneme	Deneme	Deneme	Deneme
	1	1	2	3	2	2	4	5	6	7	7
Çimento (CEM 1 42,5), kg	8,750	8,750	8,750	8,750	8,750	8,750	8,750	8,750	8,750	8,750	8,750
Mıcır No 1 (Yıkanmamış), kg	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339
Silika kumu, kg	11,056	5,528	2,764	-	11,056	0	9,950	8,845	7,739	6,634	6,634
ADK, kg	0	5,528	8,292	11,056	0	1,106	2,211	3,317	4,422	4,422	4,422
İkame oranı, %	%0	%50	%75	%100	%0	%10	%20	%30	%40	%40	%40
Taş tozu (Yıkanmış), kg	8,966	8,966	8,966	8,966	8,966	8,966	8,966	8,966	8,966	8,966	8,966
Mıcır No 2, kg	12,858	12,858	12,852	12,852	12,858	12,852	12,852	12,852	12,852	12,852	12,852
Su, kg	4,527	5,710	6,120	7,000	3,986	4,500	4,581	4,618	4,685	4,685	4,685
Klasik süper akışkan., kg	0,158	0,158	0,158	0,158	0	0	0	0	0	0	0
Daha etkin süper akışkan., kg	0	0	0	0	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158
Toplam	58,654	59,837	60,241	61,127	58,113	58,621	58,702	58,739	58,806	58,806	58,806

Çökme (slamp) testi

Bu deneyde, taze beton kesik huni şekilli kalıp (Abrams konisi) içerisine sıkıştırılarak doldurulur. Kalıbın yukarı doğru çekilerek alınmasından sonra, taze beton kütesindeki çökme mesafesi ivedilikle cetvelle ölçülür; bu değer betonun kıvam ölçüsü olarak da kullanılır (Şekil 5.4). Çökme deneyi, 1-21 cm arasında çökme değerine sahip betonların kıvamındaki değişimlere duyarlıdır. Bu sınırlar dışında çökme değerinin ölçülmesiyle kıvam tayinin yapılması uygun değildir ve bu durumda diğer kıvam tayini deneyleri kullanılmalıdır. Deney esnasında, kalıbın çekilmesinden sonraki 1 dk.'lık süreden sonra da taze betondaki çökmenin devam etmesi, çökme deneyinin bu betonun kıvamını tayin etmek için uygun olmadığını gösterir (TSE, 2010b). Taze betonun kıvamı, TS EN 206-1:2002'de belirtilen ve Çizelge 5.14'te verilen çökme değerlerine göre sınıflandırılmaktadır.



Şekil 5.4 : Çökme (slamp) testi.

Çizelge 5.14 : Taze beton için çökme ile ifade edilen kıvam sınıfları.

Sınıf	Çökme (slamp), cm	Kullanım yeri
S1	1-4	Vibrasyon mastarlı pist, yol betonu
S2	5-9	Kalıpsız eğimli çatı vb. betonlar
S3	10-15	İyi vibratör kullanılabilen şantiyeler
S4	16-21	Vibratörlü genel şantiyeler
S5	≥22	Vibratör kullanılamayan özel betonlar, kazıklar vb.

Bu çalışmada, betoniyerde (harç karma mikserinde) hazırlanan taze betonların kıvamı, çökme testi ile TS EN 12350-2:2010'a göre belirlenmiş ve tüm denemelerde çökme miktarı **S4** sınıfına uygun olacak şekilde su ilavesi yapılmıştır.

Birim ağırlık testi

Taze betonun birim ağırlığı, TS 2941:1978'e göre, belirli bir hacim içerisinde sıkıştırılarak yerleştirilmiş taze betonun birim hacime isabet eden ağırlığı (kg/m^3) şeklinde ifade edilir. Taze beton, kalibreli ölçme kabına üç eşit hacme bölünerek doldurulur. Her seferinde şişleme çubuğu ile 25 defa şişlenerek içerisinde kalması mümkün olan boşluk ve hava kabarcıkları giderilerek, beton sıkıştırılır (Şekil 5.5). Ölçme kabındaki betonun net ağırlık değeri (kg) ölçme kabının kalibre edilmiş hacim değerine (m^3) bölünerek taze beton birim ağırlığı hesaplanır.

Bu çalışmada, betoniyerde hazırlanan taze betonların birim ağırlıkları, TS 2941:1978'e uygun olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.5 : Birim ağırlık testi.

Sıcaklık testi

Taze betonun sıcaklığı, betonun kıvamını, priz süresini, hidrasyon ısını, dayanımını ve içinde oluşabilecek plastik rötre çatlaklarının miktarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Taze beton için en uygun sıcaklığın $15-16^{\circ}\text{C}$ olduğu belirtilmektedir (Erdoğan, 2007). Bu çalışmada, betoniyerde hazırlanan taze betonların sıcaklıkları, beton numunelerinin içerisinde metalik uçlu termometre daldırılarak ölçülmüştür.

5.4.2.4 Kalıpların doldurulması

İki şahit ve yedi farklı ikame oranına göre hazırlanan beton harçları 15 cm kenar uzunluğundaki kübik standart kalıplara ($15 \times 15 \times 15$ cm) yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleştirme işlemini iyi yapmak ve karışımları sıkıştırmak için, kalıplar yanlardan tokmaklanmış ve TS EN 12390-2:2010 "Beton, Numune Hazırlama" standardında belirtilen şekilde ve sayıda şişleme yapılmıştır. Vibrasyon masası da kullanılarak harçların tam olarak yerleşmesi sağlanmıştır (Şekil 5.6). Deney numuneleri, kalıp içerisinde yaklaşık 16-24 sa. yeterli sertliğe ulaşmaya kadar bekletilmiştir.



Şekil 5.6 : Karışımların kalıplara dökülmesi.

5.4.2.5 Beton numunelerinin kür edilmesi

Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların büyük bir bölümü genelde betonun ilk günlerinde gerçekleşmektedir. Bu yüzden, beton içerisindeki su miktarı ile sıcaklık değerinin yeterli seviyede olması, özellikle betonun ilk günleri için büyük önem taşımaktadır. Yeterince hidratasyonu sağlayabilmek üzere yeterli su miktarı ve sıcaklık değerine sahip ortamın korunması işlemine "betonun kürü (bakımı)" denir (Erdoğan, 2007).

Priz alma süresi tamamlanan karışımlar küplerden çıkarılarak kür havuzuna alınmıştır (Şekil 5.7). Kür uygulama süreleri 7, 28, 56 ve 90 gün olarak seçilmiştir.



Şekil 5.7 : Kür havuzu ve kalıptan çıkarılan numunelerin kür edilmesi.

Kür havuzundaki suyun sıcaklığını havuzun her yerinde $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de sabit tutmak için termostat kontrollü özel paslanmaz ısıtıcı ızgara ve sirkülasyon pompası bulunmaktadır. **Kür havuzu**, beton numunelere stabil sıcaklık ve nem ortamı sağlar ve korozyona karşı dayanıklıdır. Kür sırasında beton numunelerinin tamamen suyla çevrili olması sağlanmıştır.

5.4.2.6 Sertleşmiş betonun özelliklerinin belirlenmesi

S/S çalışması tamamlanmış iki şahit ve yedi farklı ikame oranında (%10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100) ADK kullanılarak hazırlanmış ve sertleşmiş olan betonların fiziksel-mekanik performans özelliklerini belirlemek üzere priz alma ve sonlanma süresi, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü, su emme oranı ve yoğunluk gibi özellikleri incelenmiştir. Çalışmada elde edilen hazır beton ürünleri Şekil 5.8'de gösterilmiştir:



Şekil 5.8: Çalışmada elde edilen hazır beton ürünleri.

Priz alma ve sonlanma sürelerinin tespiti

Priz, bağlayıcı maddelerin katılaşması veya plastik deformasyon geçirme yeteneğini kaybetmesi olayıdır. Priz alma, çimento hamurunun şekil verilebilir bir durumdan katı duruma geçmesidir. Çimentonun suyla birleştiği an ile çimento hamurunun katılaşarak akıcılık ve plastik özelliğini kaybettiği an arasındaki süre priz alma süresidir.

Priz başlama süresi, çimentoyla suyun birleştiği an ile çimento hamurunun fiziksel değişiklik göstererek katılaşmaya başladığı an arasındaki süredir. **Priz sonlanma süresi** ise, çimento ve suyun birleştiği an ile çimento hamurunun katılaşığı an arasındaki süredir (TSE, 2010c). Bu çalışmada, iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin priz alma ve sonlanma süreleri, TS EN 196-3+A1:2010 standardında belirtildiği şekilde tayin edilmiştir.

Basınç dayanım testi

Beton, basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük gevrek bir malzemedir. Çimentonun dayanımının yüksek olması betonun mukavemetini arttırmaktadır. Beton dayanımı, TS EN 12350-1:2010'a uygun şekilde alınan taze beton numunelerle oluşturulan ve TS EN 12390-2:2010'a uygun olarak hazırlanıp kür (bakım) uygulanan, TS EN 12390-1:2002'ye uygun standard 15 cm x 15 cm kenarlı küp numuneler veya 30 cm x 15 cm silindir numunelerde yapılan deneyler ile belirlenir.

Beton dayanımı, üzerine gelen yüklerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı betonun gösterebileceği maksimum direnmedir (Erdoğan, 2007). Beton basınç dayanımı, TS EN 12390-3:2010'a uygun küp şekilli numunede tayin edilmiş ise $f_{c,küp}$, silindir şekilli numunede tayin edilmiş ise $f_{c,sil}$ ile gösterilir. Numunelere, TS EN 12390-4:2002'ye uygun basınç dayanım testi cihazında (Şekil 5.9) kırılıncaya kadar basınç uygulanır. Numunenin taşıyabildiği en büyük yük belirlenerek beton basınç dayanımı hesaplanır.



Şekil 5.9 : Basınç dayanım testi cihazı.

Basınç dayanımı, (5.3) no.lu eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5.3)$$

(5.3) no.lu eşitlikte, f_c , basınç dayanımını (MPa); F , betonun kırılması anında ulaşılan en büyük yükü (N); A_c ise beton numunesinin üzerine basınç yükünün uygulandığı alanı (mm^2) ifade etmektedir. Basınç dayanımı, aksi belirtilmedikçe, 28 günlük numunelerde tayin edilir. Kür edilme işlemi eksiksiz uygulanmış olan

betonlarda ilk 7 gün içerisinde kazanılan basınç dayanımı, 28 günlük basınç dayanımının %70'i kadardır. Betonun karakteristik basınç dayanımı, Çizelge 5.15'te verilen en düşük karakteristik basınç dayanımından daha büyük veya eşit olmalıdır (TSE, 2002b). Beton sınıfları, beton anlamında olan "concrete" kelimesinin baş harfi olan "C" ile ifade edilir. Sınıflandırmada, çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan silindir şekilli numunenin ya da kenar uzunluğu 150 mm olan küp şekilli numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı (sırasıyla ($f_{ck,sil}$ ve $f_{ck,küp}$) kullanılabilir. Örneğin, C20/25, karakteristik silindir basınç dayanımı 20 MPa, küp basınç dayanımı 25 MPa olan beton için sınıflama ifadesidir (TSE, 2002b).

Çizelge 5.15 : Normal ve ağır beton için basınç dayanım sınıfları,
TS EN 206-1 (2002b)'den uyarlanmıştır.

Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı (MPa), $f_{ck,sil}$	En düşük karakteristik küp dayanımı (MPa), $f_{ck,küp}$
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Betonun basınç dayanımı, eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği maksimum direnme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan, 2007). Gerilme cinsinden ifade edilen dayanım, kırılma yükünün yüzey alanına bölünmesi ile elde edilir. Kullanılan malzemenin kalitesi, su/bağlayıcı oranı,

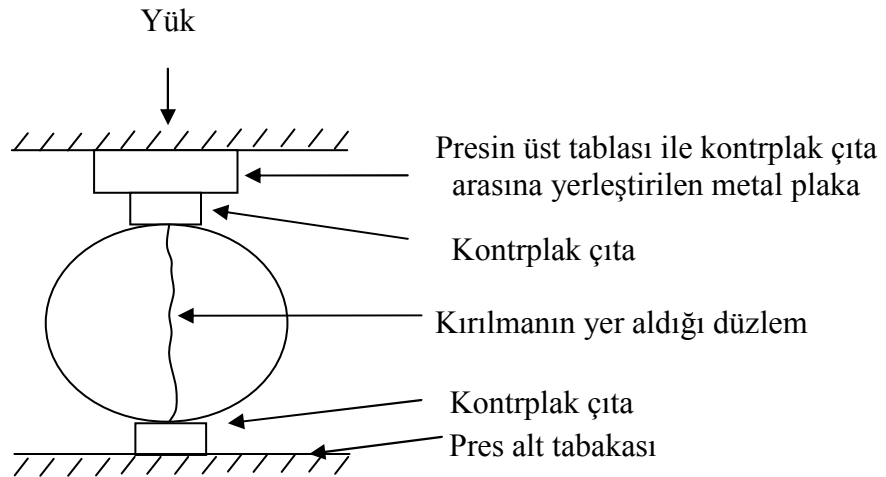
betonun kıvamı ve bekletildiği ortamın fiziksel özellikleri, basınç dayanımını etkileyen en önemli parametrelerdir.

Bu çalışmada, iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri sonundaki basınç dayanımları, TS EN 12390-3:2010 standardında belirtildiği şekilde tayin edilmiştir.

Yarmada çekme dayanım testi

Betonun yarmada çekme dayanımı, TS EN 12390-6:2010 standardında belirtildiği şekilde, silindir veya küp/prizma şekilli beton numunelere uzunlukları boyunca dar bir alana basınç yükü uygulanarak tayin edilir. Yükleme doğrultusuna dik doğrultuda oluşan çekme kuvvetinin etkisi sonucu, numunedeki çekme gerilmesi parçalanmaya yol açar. Betondaki basınç dayanımı ve çekme dayanımı birbiriyle yakından ilgilidir. Genel olarak, betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının %9-10'u kadardır. Betonun kalitesine ve yaşına bağlı olarak, bu oran %7-17 arasında değişebilmektedir (Erdoğan, 2007).

Kür havuzundan çıkarılan beton numunesinin yüzeyindeki fazla su kurulanır, numune çekme dayanım makinasına konur, numunenin yükleme düzleminde üst ve alt kısmı boyunca kontrplak çitaları ve yükleme parçaları yerleştirilir (Şekil 5.10). Numunelere, TS EN 12390-6:2010'a uygun yarmada çekme dayanım testi cihazında (Şekil 5.11) kırılıncaya kadar yük uygulanır.



Şekil 5.10 : Yarmada çekme deneyi uygulama düzeni.



Şekil 5.11 : Yarmada çekme dayanım testi cihazı.

Yarmada çekme dayanımı (5.4) no.lu eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$f_{ct} = \frac{2 * F}{\pi * L * d} \quad (5.4)$$

(5.4) no.lu eşitlikte, f_{ct} , yarmada çekme dayanımını (MPa); F, betonun kırılması anında ulaşılan en büyük yükü (N); L, beton numunesinin yükleme parçasına temas çizgisinin uzunluğunu (mm); d, beton numunesinin seçilen çapı (mm) ifade etmektedir.

Bu çalışmada, iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri sonundaki yarmada çekme dayanımları, TS EN 12390-6:2010 standardında belirtildiği şekilde tayin edilmiştir.

Elastisite testi

Beton, genel olarak elastik bir malzeme değildir. Elastisite, üzerindeki yük kaldırıldığında malzemenin başlangıç biçimine dönebilme özelliğidir. Betonun gerilme deformasyon ilişkisi, genellikle bir eğri şeklindedir. Elastisite modülünün zamana bağlı değeri, zamana ve kalıcı yüke bağlıdır. Betonun basınç dayanımı bilindiği takdirde, elastisite modülünün değeri, Amerikan Beton Enstitüsü, Avrupa Beton Komitesi veya Türk Standartları Enstitüsü (TSE)'nin TS 500:2000 no.lu standardında önerilen formüller yardımıyla hesaplanır.

TS 500:2000 standardına göre elastisite modülü değeri (5.5) no.lu eşitlikte verilmiştir:

$$E_{cj} = 3250 \sqrt{f_{ckj}} + 14000 \text{ MPa} \quad (5.5)$$

(5.5) no.lu eşitlikte E_{cj} , j günlük betonun elastisite modülünü (MPa); f_{ckj} ise j günlük beton karakteristik basınç dayanımını (MPa) ifade etmektedir. Bu çalışmada, iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri sonundaki elastisite modülü değerleri TS 500:2000'e göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Su emme oranı testi

Donma-çözülme, ıslanma-kuruma, ısınma-soğuma, kimyasal maddeler, buz çözücü tuzlar ve aşındırıcı kuvvetler gibi çevresel etkenler karşısında sertleşmiş betonun göstermesi gereken dayanıklılık (durabilite) çok önemlidir. Bu etkenlere karşı yeterli dayanıklılığı göstermeyen betonlar bir süre sonra yıpranmakta, beklenen hizmeti verememektedir. Su ve kimyasal sıvıların beton içerisine sızabilmesini azaltabilmek için daha az kapiler boşluklu betonlar gerektiğinden, su/çimento oranı mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır.

Sertleşmiş betonun içerisindeki boşlukların tümü suyla dolu durumda değil ise, ıslak ortamda, betonun içerisindeki boşluklara dışarıdan su girebilmekte ve betonun suya doymun duruma gelmesine kadar devam edebilmektedir. Betonun içerisindeki boşluklara fiziksel olarak su çekme özelliğine "su emme" denir (Erdoğan, 2007). Elde edilen hazır beton içerisindeki kapiler boşluk oranı ne kadar düşükse beton o derece geçirimsiz bir betondur ve su emme oranı o derece düşük olur; bu durum ise durabilitenin yani betonun dayanıklılığın artmasını sağlar. Su emme kapasitesi yüksek olan betonların dayanımları daha düşük olmaktadır.

Sertleşmiş betonda su emme oranı, TS EN 480-11:2008 standardında belirtildiği gibi, kuru betonun suya doymun kuru yüzeyli duruma getirilmesiyle ortaya çıkan ağırlık artışının kuru beton ağırlığına oranıdır ve 28 günlük standard kür süresi sonunda tayin edilir. Beton numuneleri kür havuzundan çıkarıldıktan sonra kurutulur ve tartılır. Daha sonra 48 sa. süreyle $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki su içinde tutulur, suya doymun hale gelmesi sağlanır ve bu süre sonunda sudan çıkarılarak yüzey ıslaklığı bir havlu ile alınıp tartılır. Su emme oranı (5.6) no.lu eşitlik ile hesaplanır ve % cinsinden verilir.

$$m_1 = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (5.6)$$

(5.6) no.lu eşitlikte m_1 , ağırlıkça su emme oranını (%); B, suya doymuş betonun ağırlığını (g); A ise kuru betonun ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Bu çalışmada, iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin 28 günlük kür süresi sonundaki su emme oranları TS EN 480-11:2008'e uygun olarak tayin edilmiştir.

Yoğunluk testi

Yoğunluk testi, TS EN 12390-7:2010 standardında belirtildiği şekilde, 7 günlük kür süresi sonunda uygulanır. Beton numuneleri kür havuzundan çıkarıldıktan sonra kurutulur ve kuru numunenin kütlesi kg olarak kaydedilir. Betonun yoğunluğu, kuru beton ağırlığının beton küp hacmine oranı (kg/m^3) cinsinden hesaplanır.

Beton, yoğunluğa göre; hafif beton, normal beton veya ağır beton olarak tarif edilmektedir. TS EN 206-1:2002'de tanımlanmış beton sınıfları ve yoğunlukları Çizelge 5.16'da verilmektedir. Bu çalışmada elde edilen hazır beton, normal beton standartlarında hazırlanmış betondur. İki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin 7 günlük kür süresi sonundaki yoğunluk değerleri TS EN 12390-7:2010'a uygun olarak tayin edilmiştir.

Çizelge 5.16 : Beton sınıfları ve yoğunlukları,
TS EN 206-1 (2002b)'den uyarlanmıştır.

Beton çeşidi	Yoğunluk (kg/m^3)
Hafif beton sınıfı	800-2000
Normal beton sınıfı	2000-2600
Ağır beton sınıfı	≥ 2600

5.4.2.7 Beton ürünlerin çevreye olabilecek etkilerinin belirlenmesi

Farklı ikame oranlarında ADK ilave edilerek yapılan S/S çalışması sonucu elde edilen hazır beton ürünleri üzerinde sızma testi, mikro-yapısal inceleme (X-ışını difraktometre (XRD) ve X-ışını floresans spektrofotometre (XRF) ile) ve solidifikasyon özelliklerini belirleme (taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dispersif X-ışını spektroskopisi (EDS) ile) çalışmaları yürütülmüştür.

Sızma (liç) testi

S/S işlemi tamamlanmış beton numuneleri, çevreye olabilecek etkilerinin ve farklı doğa koşullarında gösterdikleri davranışlarının incelenmesi; ayrıca, bünyelerindeki olası kirleticilerin sızıntı suyuna (eluat) geçme özelliğinin belirlenmesi amacıyla, farklı pH'larda (pH 5,5; pH 9 ve pH 4) özütleme testine tabii tutulmuştur. Sızma (liç) testi yöntemi olarak TS EN 12457-4:2004 yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle göre, boyutları 10 mm'yi geçmeyen beton parçaları sıvı/katı oranı 10 L/kg olan özütleme çözeltisi içerisinde Çizelge 5.17'de belirtilen koşullarda ekstrakte edilmiş ve elde edilen eluat çözelti filtre edildikten sonra, eluat içerisindeki kirleticiler analizle saptanmıştır. Eluat hazırlama işlemi,

- pH değeri 5,5 olan su,
- pH değeri 4 olan (asetik çözeltisi ilave edilerek) su
- pH değeri 9 olan (baz çözeltisi ilave edilerek) su

ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.17 : Özütleme testi koşulları.

Parametreler		TS EN 12457-4:2004		
Özütleme süresi		24 sa.		
Sıvı/Katı oranı		10 L/kg		
pH		5,5	4	9
Özütleme çözeltisi		Su	Asetik asit çözeltisi (pH: 4)	NaOH çözeltisi (pH: 9)
Sıcaklık		20°C	20°C	20°C
Çalkalama tekniği		Yavaşça döndürerek çalkalama		

TS EN 12457:2004 standardının prensibi, katı atık içerisindeki kirleticilerin suya geçebilen kısmının belirlenmesi amacıyla, eluat hazırlama yöntemine dayanmaktadır. Bu çalışmada, ADK ve beton karışımı numuneleri saf su ile 24 sa. süre ile muamele edilmiştir (Şekil 5.12). Özütleme işleminde geniş ağızlı cam veya HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen)/PP (polipropilen) kaplar kullanılmış ve 24 sa.lik özütleme süresi sonunda sıvı faz katı fazdan filtrasyon yolu ile ayrılmıştır. Filtrasyon işleminde 0,45 µm boyutunda membran filtre ve filtrasyon düzeneği kullanılmış, suya geçebilen kirleticiler uygun analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 5.12 : Özütleme işleminin gerçekleştiği çalkalayıcılar.

Mikro-yapısal özelliklerin belirlenmesi

Şahit hazır beton ve ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerinin mikro-yapısal olarak incelenmesinde; XRD cihazı, XRF cihazı, SEM ve EDS kullanılmıştır.

Kalitatif faz - mineralojik analiz, Shimadzu marka XRD-6000 model XRD cihazı ile Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1,5405^{\circ}\text{A}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Hazır beton numunelerinin kimyasal bileşiminde bulunan inorganik elementlerin yarı-kantitatif analizi, Philips PW-2404 model dalga boyu dağılımlı XRF cihazı ile yapılmıştır. Yarı-kantitatif element analizlerinde periyodik cetvelde Oksijen - Uranyum arasındaki elementler tanımlanabilmektedir.

Hazır beton numunelerinin metalografik tekniklerle parlatılmış (altın, karbon kaplama) yüzeylerinin mikro-yapısal ve morfolojik karakterizasyonu JEOL 6335F marka SEM mikroskobu ile yapılmıştır. Numuneler ayrıca, yarı-kantitatif mikroanalitik yöntemle Oxford Instruments EDS cihazı kullanılarak kimyasal olarak da incelenmiştir.

6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Marmara Bölgesi'nde faaliyetini sürdüren bir dökümhane tesisinde, demir döküm işlemi sırasında yüksek miktarlarda ortaya çıkan ve halen düzenli depolama yoluyla bertaraf edilen ADK'nın uygun geri kazanım/tekrar kullanım ve bertaraf yöntemlerinin belirlenmesi ve çalışma sonuçlarının sanayide uygulanabilirliğinin araştırılması amacıyla gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

6.1 Hammadde Ve Atık Döküm Kumu Karakterizasyon Sonuçları

Karakterizasyon çalışması kapsamında, kalıp kumu yapımında kullanılan hammaddenin (silika kumu) ve döküm işlemi sırasında ortaya çıkan ADK'nın fiziksel, kimyasal, morfolojik özellikleri ile sızma (liç) potansiyelleri ortaya konulmuş ve elde edilen sonuçlar "AYGEİY-EK 3B" ve "ADDDY-EK 2" limit değerleriyle karşılaştırılmıştır.

6.1.1 Kısa ve elementel analiz sonuçları

ADK numunesine ait kısa ve elementel analiz sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : ADK'nın kısa ve elementel analiz sonuçları.

Parametre	ADK (%ağ.)	Parametre	ADK (%ağ.)
Kısa analiz ^a		Elementel analiz ^a	
Uçucu madde	3,20	H	0,300
Sabit karbon ^c	4,83	C	6,880
Kül	91,97	N	0,099
Yanabilen ^d	8,03	O ^c	0,581
Nem ^b	2,17	S	0,170
		Molar gösterim	CH _{0,523} O _{0,063} N _{0,012}

^a kuru temel; ^b yaş temel; ^c farktan; ^d Yanabilen = Uçucu madde + sabit karbon.

Kısa analizde uçucu madde, sabit karbon, kül ve nem içeriği; elementel analizde ise C, H, O, N, S ve kül (maddenin yanması sonucunda geriye kalan kısım) içeriği toplamı 100 olmalıdır. Kısa analiz sonuçları, ADK'nın düşük oranda nem, uçucu madde ve sabit karbon, yüksek oranda kül içerdiğini; elementel analiz sonuçları ise, ADK'da kül haricinde, karbonun (C) temel element olduğunu göstermiştir.

6.1.2 Isıl değer analiz sonuçları

Üst ısı değer, yanma sırasında açığa çıkan ısıyı ifade eder ve sözkonusu maddenin enerji içeriğini gösterir ve enerji amaçlı kullanılabilirliğinin önemli bir ölçütüdür. ADK'ya ait üst ve alt ısı değeri (kuru temel) sırasıyla 368,192 kJ/kg ve 304,532 kJ/kg olarak bulunmuştur. ADK'nın ısı değeri, diğer katı malzemelerin ısı değerleriyle karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : Bazı katı fosil yakıtlar ve atık çamurlara ilişkin ısı değerler, Punnaruttanakun ve diğ, (2003)'ten uyarlanmıştır.

Malzeme	Isıl değer (kJ/kg)
Kömür	14600-26700
Antrasit	~37000
Bitüm	~28000
Linyit	~24400
Odun	16000-20000
Kuru arıtma çamuru	12000-20000
Islak arıtma çamuru	1000-3000
Petrol çamuru (kuru temel)	44860
ADK (bu çalışma) (üst ısı değeri)	368,192
ADK (bu çalışma) (alt ısı değeri)	304,532

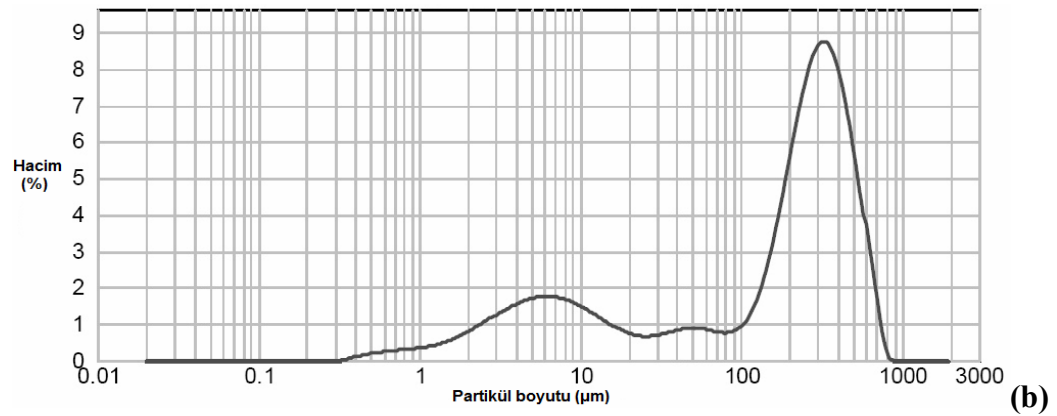
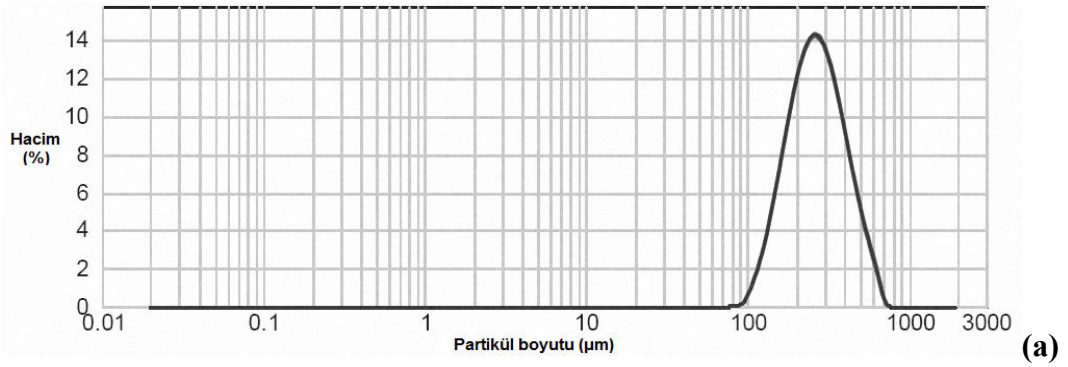
ADK'nın ısı değeri, diğer katı fosil yakıtların (kömür, antrasit, bitüm, linyit, odun) ısı değerlerine nazaran oldukça düşük çıkmıştır; bu nedenle, ADK'nın yakılarak enerjisinden faydalanılmasına yönelik çalışmanın anlamsız olacağı sonucuna varılmıştır. Ancak, yakma ile, ADK'daki organik kontaminasyon giderilebilir.

6.1.3 Fiziksel özellikleri belirleme analiz sonuçları

Ham madde (silika kumu) ve ADK'nın fiziksel analiz sonuçları Çizelge 6.3'te, tane boyutu dağılımları ise Şekil 6.1'de verilmiştir:

Çizelge 6.3 : Hammaddenin (silika kumu) ve ADK'nın fiziksel özelliklerini belirleme.

Analizler	Silika kumu		ADK	
pH (Sulu çözelti)	6,830		10,04	
İletkenlik (20°C'de) (μS/cm)	6,200		237,00	
BET yüzey alanı (m ² /g)	0,025		0,502	
Tane boyutu dağılımı	mm	Miktar (%)	mm	Miktar (%)
	0,023	0	0,023	25,00
	0,120	2,06	0,120	9,10
	0,275	52,44	0,275	25,60
	0,479	38,22	0,479	29,52
	0,631	6,65	0,631	8,53
	0,831	0,63	0,831	2,25
	1,258	0	1,258	0
Özgül ağırlık (birimsiz)	2,615		2,103	
Su emme oranı (%)	0,810		1,200	
Gevşek birim ağırlık (kg/m ³)	1451,600		1245,200	
Sıkışık birim ağırlık (kg/m ³)	1965,600		1448,100	



Şekil 6.1 : Tane boyutu dağılımı: (a) Silika kumu. (b) ADK.

Hammaddenin (silika kumu) ve ADK'nın tane boyutu dağılımları incelendiğinde; hammaddedeki (silika kumu) uniform tane boyutu dağılımının ADK'da gözlenemediği, mekanik aşınmalar sebebiyle ADK'daki tanelerde ufalanmalar olduğu görülmüştür.

6.1.4 Kimyasal bileşimi belirleme analiz sonuçları

Hammaddenin (silika kumu) ve ADK'nın kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.4'te verilmiştir:

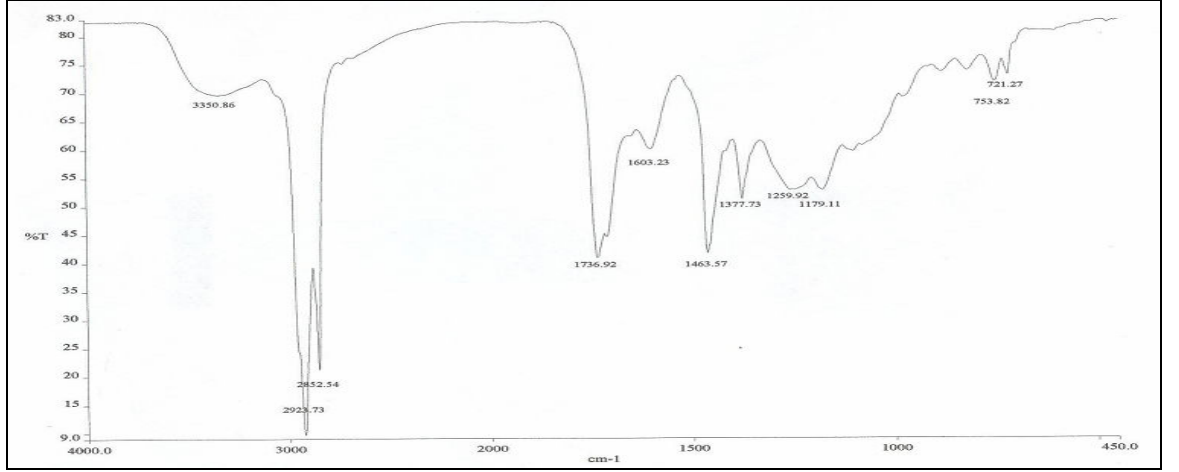
Çizelge 6.4 : Hammadde (silika kumu) ve ADK'nın kimyasal bileşimini belirleme.

Analizler	Silika kumu	ADK
Katı madde (%ağ.)	95,84	97,83
İnorganik madde (%ağ.)	95,84	91,28
Organik madde (%ağ.)	-	6,55
Nem miktarı (%ağ.)	4,16	2,17
Kil miktarı (%ağ.)	2,14	10,00
İnorganik madde cinsi	Kuvars, SiO ₂	Kuvars, SiO ₂
Organik madde cinsi (FTIR)	Yok	Alifatik hidrokarbon
PAH (mg/kg)	<0,04	3,09
PCDD/F (pg/g I-TEQ)	0,412	0,50

ADK'nın 400-4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında çekilen FTIR spektrumu Şekil 6.2'de verilmiştir. Buna göre, ADK'daki organik maddenin alifatik hidrokarbon karışımı olduğu belirlenmiştir. Maça kumlarında fenol formaldehit reçinesi (bağlayıcı) kullanılmasına ve kalıp kumları bozulurken maça kumları kalıp kumuna karışmasına rağmen, ADK'da alifatik hidrokarbon karışımı haricinde organik bir yapıya rastlanmamıştır. Bunun nedeni, maça kumlarının 1500°C'deki ergimiş metale maruz kalması dolayısıyla, organik yapının yanmasıdır.

FTIR spektroskopisinde fonksiyonel grupların belirlenmesi için kullanılan dalga boyu aralıkları şu şekildedir:

Fonksiyonel grup	Dalga boyu, cm ⁻¹	Fonksiyonel grup	Dalga boyu, cm ⁻¹
Asimetrik metil	3000-2850	Alifatik C-C	1300-800
Alifatik C-H	2950-2900	CH ₂	900-700
Simetrik metil	2850-2800		



Şekil 6.2 : ADK FTIR spektrumu.

Hammaddenin (silika kumu) ve ADK'nın kimyasal bileşiminde bulunan inorganik bileşen ve elementlerin tehlike işaretleri ve risk faktörleri, sırasıyla, Çizelge 6.5 ve 6.6'da, yarı-kantitatif elementel analiz sonuçları ise Çizelge 6.7'de verilmiştir:

Çizelge 6.5 : Hammaddenin (silika kumu) AYGEİY-EK 3B'ye göre irdelenmesi.

Bileşik	Miktar (%ağ.)	Tehlike işareti	Risk faktörü	Risk faktörüyle ilgili açıklama	AYGEİY EK 3B'de belirtilen eşik kons.
Kuvars, SiO ₂	97,38	Xn Zararlı	R: 48/20	R: 48/20 Zararlı: İnhalasyon yoluyla uzun süreli maruziyetlerde sağlık için ciddi hasar tehlikesi	Zararlı olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %25 olması,

ADK bileşiminin %91,28 inorganik madde, %6,55 organik madde ve %2,17 nemden oluştuğu belirlenmiştir. Organik madde cinsi FTIR analizi sonucu alifatik hidrokarbon karışımı, inorganik madde cinsi ise XRD analizi sonucu kuvars (SiO₂) olarak tespit edilmiştir. Hammadde (silika kumu) ve ADK'nın PCDD/F analiz sonuçları Dungan ve diğ, (2009) tarafından 10 farklı ADK'da yapılan PCDD/F analiz sonuçları (0,01-0,87 pg/g I-TEQ) ile tutarlılık göstermiştir.

Çizelge 6.6'da "Alevlenebilir (F)" olarak nitelendirilen elementler için, AYGEİY-EK 3B'de belirlenmiş bir eşik konsantrasyonu bulunmamaktadır. Ancak, parlama noktası 55°C'den düşük olan kolay alevlenebilir nitelikteki maddeler Tehlikeli Atık olarak nitelendirilmiştir. Çizelge 6.6'da yer alan Al, Mg, Mn, P, S, Y, Zn ve Zr'nin literatürden belirlenmiş parlama noktaları, AYGEİY-EK 3B'deki parlama noktası sınır değeri olan 55°C'nin çok üzerindedir.

Çizelge 6.6 : ADK'nın AYGİİY-EK 3B'ye göre irdelenmesi.

Bileşik	Miktar (%ağ.)	Tehlike işareti	Risk faktörü	Risk faktörüyle ilgili açıklama	AYGİİY EK 3B'de belirtilen eşik konsantrasyonu
Kuartz, SiO ₂	81,851	Xn:Zararlı	R:48/20	R: 48/20 Zararlı: İnhalasyon yoluyla uzun süreli maruziyetlerde sağlık için ciddi hasar tehlikesi R10:Kolay alevlenebilir R15:Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır	Zararlı olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %25 olması
Alüminyum (Al)	5,510	F:Alevlenebilir	R:10-15	R15:Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır	Mevcut değil
Kalsiyum (Ca)	0,865	F:Alevlenebilir	R:15	R15:Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır.	Mevcut değil
Krom (Cr)	0,017	F:Alevlenebilir Xi:Tahriş edici	R:11-40	R11:Kolay alevlenebilir. R40: Kanserojen etki şüphesi-Yetersiz veri	R40'a göre kalıtsal değişikliklere yol açıcı olarak sınıflandırılan Kategori 3 maddesindeki konsantrasyonun $\geq$ %1 de olması
Bakır (Cu)	0,006	F:Alevlenebilir Xi:Tahriş edici	R:11-36/37/38	R11:Kolay alevlenebilir; R36/37/38: Gözleri, solunum sistemini tahriş edicidir.	R36, R37 ve R38'e göre tahriş edici olarak sınıflandırılan bir veya daha fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %20 olması
Demir (Fe)	1,272	F:Alevlenebilir Xi:Tahriş edici	R:11-36/37	R11:Kolay alevlenebilir. R36/37:Gözleri, solunum sistemini ve cildi tahriş edicidir.	R34'e göre aşındırıcı olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %5 olması
Potasyum (K)	0,410	F:Alevlenebilir C:Korozif	R:14/15-34	R14/15:su ile kolay alevlenebilir gaz oluşumuna yol açan şiddetli reaksiyon. R34:Yanıklara neden olur	Mevcut değil
Magnezyum (Mg)	1,190	F:Alevlenebilir	R:11-15	R11:Kolay alevlenebilir. R15:Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır.	Mevcut değil
Mangan (Mn)	0,038	F:Alevlenebilir	R:11	R11:Kolay alevlenebilir	Mevcut değil

Çizelge 6.6 (devam) : ADK'nın AYGEİY-EK 3B'ye göre irdelenmesi.

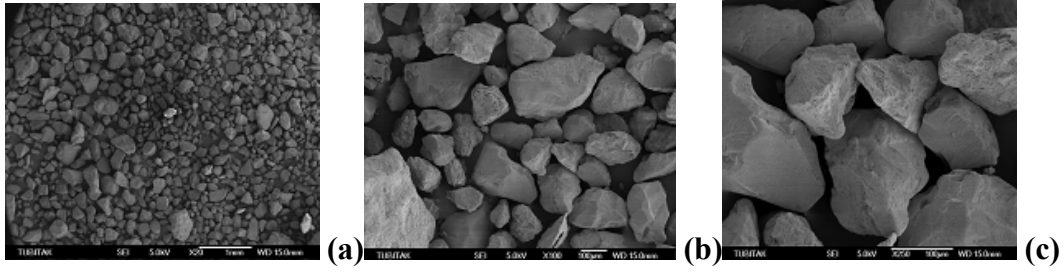
Bileşik	Miktar (%ağ.)	Tehlike işareti	Risk faktörü	Risk faktörüyle ilgili açıklama	AYGEİY EK 3B'de belirtilen eşik konsantrasyonu
Sodyum (Na)	0,567	F:Alevlenebilir C:Korozif	R:14/15-34	R14/15:Su ile kolay alevlenebilir gaz oluşumuna yol açan şiddetli reaksiyon R34:Yanıklara neden olur.	R34'e göre aşındırıcı olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %5 olması
Klor (Cl)	0,071	T:Zehirli madde	R:45	R45:Kanser yapabilir.	Zehirli olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %3 olması
Nikel (Ni)	0,004	Xn:Zararlı	R:40-43	R40:Kanserojen etki şüphesi-yetersiz veri R43:Cilt ile temasında alerji yapabilir.	R40'a göre kalıtsal değişikliklere yol açıcı olarak sınıflandırılan Kategori 3 maddesindeki konsantrasyonun $\geq$ %1 olması
Kükürt (S)	0,337	F:Alevlenebilir Xi:Tahriş edici	R:11	R11:Kolay alevlenebilir	Mevcut değil
Stronsiyum (Sr)	0,004	F:Alevlenebilir	R:11-14-38	R11:Kolay alevlenebilir. R14:Su ile şiddetli reaksiyon verir. R38:Cildi tahriş eder.	R36, R37 ve R38'e göre tahriş edici olarak sınıflandırılan bir veya daha fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %20 olması
Titanyum (Ti)	0,196	F:Alevlenebilir	R:15-17 R:20 R:36	R15:Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır. R17:Havada kendiliğinden alevlenir. R20:Soluması halinde sağlığa zararlıdır. R36:Gözleri tahriş eder.	Mevcut değil
Çinko (Zn)	0,014	F:Alevlenebilir	R:10-15	R10:Alevlenebilir. R15:Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır.	Mevcut değil
Zirkonyum (Zr)	0,033	F:Alevlenebilir	R:15-17	R15:Su ile temas halinde kolay alevlenir gazlar çıkarır. R17: havada kendiliğinden alevlenir.	Mevcut değil
Fosfor (P)	0,031	F:Alevlenebilir N:Çevre için zararlı madde	R:11-16-50	R11:Kolay alevlenebilir. R16: Oksitleyicilerle karıştırdığında patlayabilir. R50: Sudaki organizmalar için çok toksik.	Mevcut değil
Rubidyum (Rb)	0,002	F:Alevlenebilir C:Korozif	R:14/15-34	R14/15:Su ile kolay alevlenebilir gaz oluşumuna yol açan şiddetli reaksiyon R34:Yanıklara neden olur.	R34'e göre aşındırıcı olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %5 olması

ADK'da %81,851 oranında saptanan SiO₂ bileşiğinin "Zararlı, Xn" özellikte olduğu ve "R:48/20" no.lu risk faktörlerine sahip olduğu belirlenmiş; "AYGEİY-EK 3B listesinde yer alan "Zararlı olarak sınıflandırılan bir ya da birden fazla maddedeki toplam konsantrasyonun $\geq$ %25" olması sebebiyle tehlikeli atık olarak sınıflandırılmıştır. Ancak, silis içeriğinin hammaddeden kaynaklandığı ve kendi mineralojik yapısından dolayı yüksek değerde olduğu düşünülerek Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nca tolere edilmekte ve tehlikesiz atık olarak kabul edilmektedir. Ancak inhalasyon yoluyla uzun süreli maruziyetlerde sağlığa zararlı olması sebebiyle ADK'nın kontrolsüz bertarafı yasaktır.

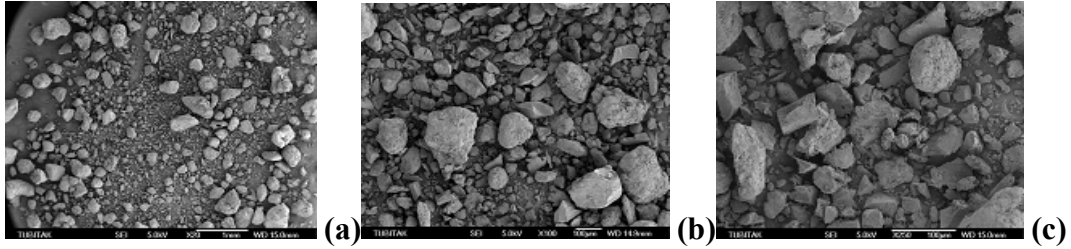
Çizelge 6.7 : Hammadde (silika kumu) ve ADK numuneleri yarı-kantitatif elementel analiz sonuçları.

Silika kumu		ADK		Silika kumu		ADK	
Bileşen	(%ağ.)	Bileşen	(%ağ.)	Bileşik	(%ağ.)	Bileşik	(%ağ.)
Al	0,998	Al	5,510	Na ₂ O	0,068	Na ₂ O	0,764
Ca	0,044	Ca	0,865	MgO	0,156	MgO	1,974
Cr	0,015	Cr	0,017	Al ₂ O ₃	1,887	Al ₂ O ₃	10,410
Cu	0,002	Cu	0,006	SiO ₂	97,379	SiO ₂	81,850
Fe	0,096	Fe	1,272	SO ₃	0,016	SO ₃	0,842
K	0,136	K	0,410	K ₂ O	0,164	K ₂ O	0,494
Mg	0,094	Mg	1,190	CaO	0,062	CaO	1,210
Mo	0,001	-	-	TiO ₂	0,090	TiO ₂	0,326
Na	0,051	Na	0,567	Cr ₂ O ₃	0,022	Cr ₂ O ₃	0,025
Nb	0,001	-	-	Fe ₂ O ₃	0,137	Fe ₂ O ₃	1,818
Ni	0,002	Ni	0,004	NiO	0,002	NiO	0,005
O	52,972	O	51,173	CuO	0,002	CuO	0,007
S	0,007	S	0,337	ZnO	0,001	ZnO	0,018
Si	45,518	Si	38,260	SrO	0,001	SrO	0,005
Sr	0,001	Sr	0,004	ZrO ₂	0,010	ZrO ₂	0,045
Ti	0,054	Ti	0,196	Nb ₂ O ₅	0,002	-	-
Zn	0,001	Zn	0,014	MoO ₃	0,002	-	-
Zr	0,007	Zr	0,033			MnO ₂	0,061
		P	0,031			P ₂ O ₅	0,070
		Rb	0,002			Rb	0,002
		Cl	0,071			Cl	0,071
		Mn	0,038				

Elektron mikroskobu ile yapılan çoklu nokta incelemesinde elde edilen hammadde (silika kumu) ve ADK numunelerine ait SEM mikroskobu görüntüleri Şekil 6.3 ve 6.4'te verilmiştir:



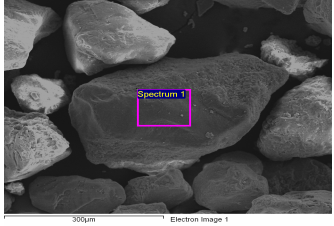
Şekil 6.3 : Silika kumu numunesi SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme.



Şekil 6.4 : ADK numunesi SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme.

Hammadde (silika kumu) ve ADK numunelerinin aynı büyütme oranlarında (20X, 100X ve 250X) çekilmiş SEM görüntüleri incelendiğinde; ADK'daki kuvars taneciklerinin, aşınma ve ufalanma nedeniyle köşeli ve düzensiz yapılarında meydana gelen bozulmalar sonucu, daha düzenli ve daha küresel yapıda olduğu gözlenmiştir. SEM EDS ile yapılan çoklu nokta incelemesinde elde edilen hammadde (silika kumu) ve ADK'ya ait yarı-kantitatif analiz sonuçları Şekil 6.5 ve 6.6'da verilmiştir:

Element	%ağ.	%Atomik
O	50,79	64,42
Al	0,86	0,65
Si	48,35	34,93
Toplam	100,00	



The SEM image on the right shows a single grain of the ADK sample. A red box labeled 'Spectrum 1' is overlaid on the grain, indicating the area analyzed by EDS. The image has a scale bar at the bottom indicating 100µm.

Şekil 6.5 : Hammadde (silika kumu) numunesine ait EDS'de yapılan yarı-kantitatif analizin sonucu.

6.1.5 TS EN 12457-4:2004-Sızma (liç) testi sonuçları

Hammadde (silika kumu) ve ADK için hazırlanan eluatların (özütleme çözeltileri) analizi neticesinde elde edilen değerler, "ADDDY-EK 2"de verilen limit değerler ile birlikte Çizelge 6.8'de orijinal atık parametrelerini de içerecek şekilde verilmiştir. Bu sayede, ADK'da gözlenen kontaminasyonun proses ve/veya hammadde kaynaklı olup olmadığı irdelenmiş; ayrıca, ADK'nın ADDDY-EK 2 temelinde depolanabilirlik özellikleri ortaya konulmuştur.

Element	%ağ.	%Atomik
C	4,33	12,01
O	28,13	58,58
Al	1,06	1,31
Si	2,15	2,55
S	12,50	12,98
Ba	51,83	12,57
Toplam	100,00	

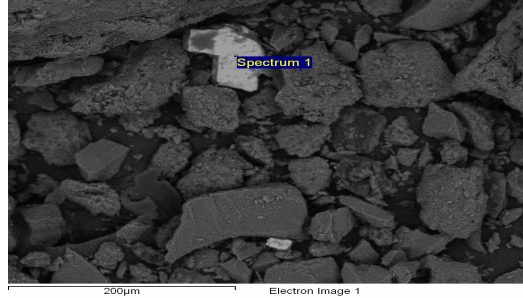
Seramik tozu vb.

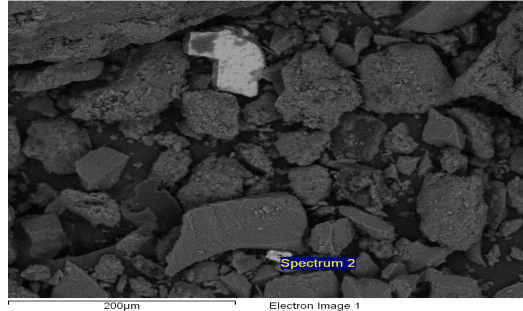
Element	%ağ.	%Atomik
O	11,47	34,82
Al	2,06	3,71
Si	15,75	27,24
S	2,88	4,36
Fe	11,39	9,91
Ba	56,46	19,97
Toplam	100,00	

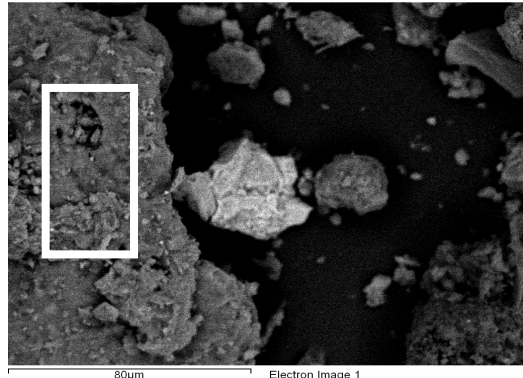
Metal parçası

Element	%ağ.	%Atomik
C	36,12	48,20
O	37,55	37,62
Na	0,82	0,57
Mg	0,84	0,56
Al	5,26	3,13
Si	14,88	8,49
K	0,40	0,20
Ca	0,85	0,34
Ti	0,27	0,09
Fe	2,25	0,65
Zn	0,66	0,16
Toplam	100,00	

Kömür tozu+kil karışımı







Şekil 6.6 : ADK numunesine ait EDS'de yapılan yarı-kantitatif analizlerin sonuçları.

"Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY)-EK 2" temelinde analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için kabul kriterleri: Atıklar kabul kriterlerine ilişkin sınır değerlere göre uygun depolama tesisinde bertaraf edilir.

- Yönetmelikte verilen değer sınıfları; tehlikeli atık için belirlenen değerler arasında olan atıklar, "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için kabul kriterleri tablosunda"

2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre, I. sınıf depolama tesislerinde depolanırlar. Ancak, tehlikeli atık için belirlenen üst sınırdan daha yüksek konsantrasyonu olan atıklar I. sınıf depolama tesislerinde depolanmadan önce ön işleme tabi tutulmalı ve üst sınır altına çekilmelidir. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, bu atıklar I. sınıf depolama tesislerinde ayrı olarak (tek tür) depolanmalıdır.

- Yönetmelikte verilen değer sınıfları; tehlikesiz atık için belirlenen değerler arasında olan atıklar, "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için kabul kriterleri tablosunda" 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre, II. sınıf depolama tesislerinde depolanırlar. Sınır değerler, reaktif olmayan ve kararlı tehlikeli atıklarla birlikte aynı lotta depolanacak olan granüler tehlikesiz atıklara uygulanır.

- Yönetmelikte verilen değer sınıfları; inert atık için belirlenen değerler arasında olan atıklar, "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için kabul kriterleri tablosunda" 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre, III. sınıf depolama tesislerinde depolanırlar.

ADK numunesi eluatu (özütleme çözeltisi) ve orijinal ADK numunesinin analizleri neticesinde, ADK'nın "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda, ÇOK değeri sebebiyle 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre, I. sınıf depolama tesislerinde depolanmasının uygun olduğu saptanmıştır. Ülkemizdeki ADK'lara ilişkin "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Kalıp kumu hazırlama prosesinde kullanılan kömür tozunun ÇOK ve TOK değerlerinde ciddi yükselmelere sebep olduğu belirlenmiştir. Hammadde (silika kumu) ve ADK eluatları incelendiğinde Zn, Ni ve toplam Cr konsantrasyonlarında artış olduğu gözlenmiş, bu durumun endüksiyon ocaklarında ergitilen çelik hurdalardan çıkan Zn, Ni, Cr buharı ve toz emisyonlarından kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır. ADK'nın içerdiği silis (%81,851) sebebiyle dökümhane tesisinde veya başka bir sektörde, ürün kalitesi bakımından incelendikten sonra, hammadde girdisi (çimento hammaddesi veya ince agrega) olarak değerlendirilebileceği düşünülmüştür. ADK'nın geri kazanım/tekrar kullanım ve bertaraf yöntemlerinin belirlenmesi üzerine yapılan laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalarda eluatta ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻, pH ile orijinal katı üründe TOK konsantrasyonlarındaki değişimlerin izlenmesi uygun görülmüştür.

Çizelge 6.8 : Hammadde (silika kumu) ve ADK eluati, orijinal kum numuneleri analiz sonuçları ve ADDDY-EK 2 limit değerleri.

Parametre	Silika kumu	ADK	ADDDY-EK 2		
			A) İnert atıkların depolanabilme kriterleri III. sınıf depolama tesisleri için sınır değerler	B) Tehlikesiz atıkların depolanabilme kriterleri II. sınıf depolama tesisleri için sınır değerler	C) Tehlikeli atıkların depolanabilme kriterleri I. sınıf depolama tesisleri için sınır değerler
Eluat					
(*)Arsenik (As mg/L)	<0,0005	0,0488	0,05	0,20	2,5
(*)Baryum (Ba mg/L)	0,006	1,7424	2	10	30
(*)Kadmiyum (Cd mg/L)	<0,00012	0,00055	0,004	0,10	0,5
(*)Krom (Cr mg/L)	0,00125	0,11944	0,05	1	7
(*)Bakır (Cu mg/L)	0,02313	0,11563	0,2	5	10
(*)Cıva (Hg mg/L)	<0,0005	<0,00050	0,001	0,02	0,2
(*)Molibden (Mo mg/L)	0,00318	0,00751	0,050	1	3
(*)Nikel (Ni mg/L)	0,00304	0,13874	0,040	1	4
(*)Kurşun (Pb mg/L)	<0,002	0,04310	0,050	1	5
(*)Antimon (Sb mg/L)	0,00055	0,0004	0,006	0,07	0,5
(*)Selenyum (Se mg/L)	<0,0006	0,006	0,010	0,05	0,7
(*)Çinko (Zn mg/L)	0,0314	0,593	0,4	5	20
(*)Klorür (Cl ⁻ mg/L)	0,38	11,38	80	1500	2500
(*)Fluorür (F ⁻ mg/L)	<0,02	1,89	1	15	50
(*)Sülfat (SO ₄ ⁼ mg/L)	0,99	37,53	100	2000	5000
(*)ÇOK (mg/L)	1,052	89,4	50	80	100
(*)TÇKM (mg/L)	<14,3	4731	400	6000	10000
(*)Fenol (C ₆ H ₅ OH mg/L)	0,07	0,09	0,100		
Orijinal atık					
(*)TOK (mg/kg)	1223	45601	30000 (%3)	50000 (% 5)	60000 (%6)
BTEX (mg/kg)	<0,05	0,18	6		
(*)PCBs (mg/kg)	<0,01	<0,01	1		
(*)Mineral yağ (mg/kg)	<65	123,54	500		
(*)Kızdırma kaybı (%)	0,14	6,93			10000 (%10)
(*)Kati madde (%)	95,84	97,83	-	-	-
(*) işletli analizler ISO/IEC 17025:2005'e göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiştir.					

6.2 Atık Döküm Kumunun Geri Dönüşümü/Tekrar Kullanılmasına Yönelik Yapılan Çalışmalarda Elde Edilen Sonuçlar

ADK'nın demir döküm tesisinde yeniden hammadde olarak değerlendirilmesi ve proste kum hazırlama ünitesinde kalıp yapımında tekrar kullanılmasına yönelik yürütülen saha ve laboratuvar çalışmalarında, ADK özellikleri ile kalıp kumu özellikleri karşılaştırılmış ve atığın döküm tesisinde geri dönüşüm/tekrar kullanıma uygunluğu değerlendirilmiştir.

Dökümhanelerde, kum kalıplar her döküm işleminden sonra açılır ve kumdaki büyük parçalar elenerek uzaklaştırılır; azalan kum kadar sisteme yeni kum eklenerek tesiste çevrim devam ettirilir (Zanetti ve Fiore, 2002; Siddique ve diğ., 2009). Ancak, döküm kumu belli bir çevrimden sonra döküm kalıplarında daha fazla kullanılamayacak hale gelir ve ADK olarak dökümhaneden uzaklaştırılır (Clegg, 1991; Siddique ve diğ., 2010; Güney ve diğ., 2010).

6.2.1 Atık döküm kumunun dökümhane tesislerinde tekrar kullanılamama sebepleri

Döküm kumunun döküm kalıplarında daha fazla kullanılamayacak hale gelmesinin ve ADK olarak dökümhane tesisinden uzaklaştırılmasının sebepleri aşağıda açıklanmıştır:

- Kumun fiziksel ve kimyasal olarak bozulması,
- Kumun tane boyutu ve tane şekillerinin değişmesi,
- Oolitleşme olayının meydana gelmesi, kum tanelerinin etrafındaki bentonit tabakası kalınlığının artması ve sinterleşme sıcaklığının azalması,
- Kumun döküm işlemi sırasında yüksek sıcaklıktaki (1500°C) ergimiş metale maruz kalması (ısıl şok),
- Kumun gözenekli yapısının kaybolması, kum taneleri arasındaki gaz geçirgenliğinin azalması,
- Bentonitin bağlayıcılık özelliğini kaybetmesi, kum tanelerinin birbirine tutunamaması ve kalıbın mukavemetinin azalması sonucu kalıp şeklinin korunamaması,
- Mekanik aşınmadan dolayı kum tanelerinin direncinin kırılması,
- Kumun refrakterlik özelliğinin azalması.

Bölüm 3.4.6'da ADK'ların dökümhane tesislerinde tekrar kullanılamama nedenleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

6.2.1.1 Tane boyutu dağılımı

Şekil 6.1'deki hammadde (silika kumu) ve ADK numunelerinin tane boyutu dağılımları incelendiğinde; hammaddedeki uniform tane boyutu dağılımının ADK'da gözlenemediği, mekanik aşınmalar sebebiyle ADK'daki tane boyutunda ufalanmalar olduğu görülmüştür.

Kum tanelerindeki kırılmalar, yapıdaki deformasyonlar ve tane boyutu dağılımının istenen değerlerin altına inmesi, ADK'nın dökümhane tesisinde tekrar kullanılmasına olanak sağlamamaktadır. Yapıdaki deformasyonlardan ötürü küçülen kuvars parçacıklarının tekrar kullanım esnasında tozuma sebebiyet vermesi de döküm tesisinde istenmeyen bir durumdur. Ayrıca, ince taneler iri olanlara oranla yüksek sıcaklığa daha az dayanıklıdır.

Tane büyüklüğü ile beraber bu tanelerin dağılımı da önemlidir. Çok ince fakat farklı boyutlu tanelerden meydana gelmiş kumun geçirgenliği, daha iri fakat aynı tane büyüklüğünden meydana gelmiş olandan daha düşüktür. Bu durumda tanelerin uniform dağılımı önem teşkil etmektedir.

6.2.1.2 Tane şekli

Elektron mikroskobu ile yapılan çoklu nokta incelemesinde hammadde (silika kumu) ve ADK numunelerine ait taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yapılan incelemelerde elde edilen görüntüler Şekil 6.3 ve 6.4'te verilmiştir.

Hammadde (silika kumu) ve ADK numunelerinin aynı büyütme oranlarında (20X, 100X ve 250X) çekilmiş SEM görüntüleri incelendiğinde; ADK'daki kuvars tanecikleri üzerinde aşınmalar ve ufalanmalar ile köşeli düzensiz yapısında bozulmalar (düzenli ve daha küresel yapı) gözlenmiştir. Çatlaklı ve pürüzlü tanelerin bağlanma kabiliyeti, düzgün yüzeylilere göre daha iyidir. Köşeli taneler yuvarlak tanelere göre daha yüksek mukavemet sağlar.

Kuvars tanelerinin köşeli düzensiz yapısı, kalıp kumunun tesiste döküm işlemi sırasında birkaç defa kullanılması sonucu, küresel yapı şeklini almaktadır ve tanelerin birbirine tutunma yüzeyleri azaldığı için, kuvars tanelerinin birarada bulunması zorlaşmaktadır.

Mekanik aşınmalar, yapıdaki deformasyonlar ve tane boyutu dağılımının istenen boyutların altına inmesi sebebiyle meydana gelen tozular, kuvars tanecikleri arasında yer alan küçük kanalların tıkanmasına, dolayısı ile gaz geçişinin gerçekleşmemesine sebep olur. Ayrıca pürüzlü ve büyük taneler daha yüksek refrakterliğe sahiptir.

6.3 Atık Döküm Kumunun Düzenli Depolanmasına Yönelik Yapılan Ön İşlem Çalışmalarında Elde Edilen Sonuçlar

ADK'nın depolanabilme özelliği 24.03.2010 tarihli ve R.G. 27531 sayılı "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" temelinde Bölüm 6.1.5'te incelenmiş ve ÇOK değeri sebebiyle 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri çerçevesinde I. sınıf depolama tesislerinin sınır değerlerine uygun olduğu tespit edilmiştir. ADK'nın inert/tehlikesiz atık olarak muamele görmesine ve düzenli depolanmasına engel teşkil eden ÇOK ve diğer organik/inorganik kirleticilerin istenilen seviyeye indirilmesi için uygulanması gereken ön işlemler kapsamında yapılan çalışmalara ilişkin sonuçlar aşağıda verilmektedir.

6.3.1 Yakma yolu ile kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması

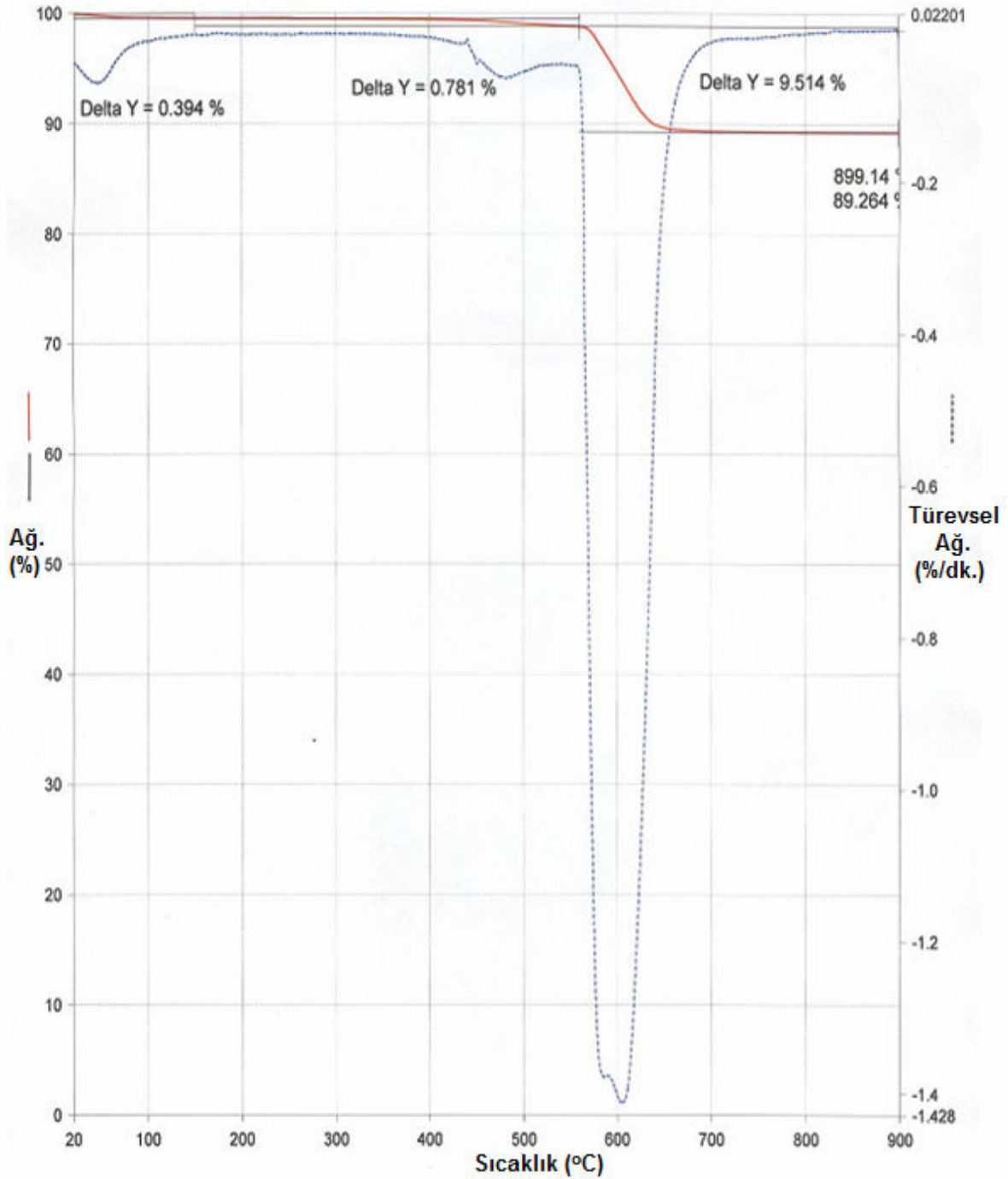
ADK'dan yakma yolu ile olası kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolamayla bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında yapılan çalışmalarda elde edilen TGA sonuçlarından faydalanılarak yakma (kül) fırınında uygun yakma sıcaklığı ve yakma süresi belirlenmiş, yakma sonucu ele geçen kum, organik kirleticiler (ÇOK ve TOK) açısından "ADDDY-EK 2" limit değerleri temelinde değerlendirilmiştir.

6.3.1.1 Atık döküm kumunun ısıl bozunma davranışının TGA ile incelenmesi

ADK'nın ısıl bozunma davranışının TGA ile incelenmesi kapsamında Şekil 6.7'deki TG/DTG eğrileri birlikte incelendiğinde; ADK için iki bozunma bölgesi görülmüştür. 150°C'nin altındaki ilk bozunma bölgesinde meydana gelen ~%0,5'lik kütle kaybının ADK'daki nem çıkışını; 150-900°C arasındaki ikinci bozunma bölgesinde iki adımda gerçekleşen %10,3'lük kütle kaybının ise yapıdaki uçucu organik bileşiklerin çıkışını ve organik yapının bozunmasını gösterdiği tespit edilmiştir. 900°C'ye kadar olan ısıtma sonucu kalan kısmın yani atıktaki bakiyenin (kalıntı) oranı %90'dır. ADK'nın hava atmosferi altında maksimum bozunma hızı sıcaklığı 610°C olarak gözlenmiş, etkin bozunma sıcaklığı aralığı ise 550-670°C olarak belirlenmiştir.

6.3.1.2 Kül fırınında yakma

ADK'nın sekiz farklı sıcaklıkta (200-900°C) ve dört farklı zaman diliminde (30 dk., 1 sa., 2 sa., 4 sa.) kül fırınında yakılması sonucu elde edilen bulgular Çizelge 6.10-6.13'te verilmiştir.



Şekil 6.7 : ADK numunesine ait TG ve DTG eğrileri.

ADK'daki organik kirleticilerin kül fırınında 4 sa. süreyle sekiz farklı sıcaklıkta (200-900°C) yakılarak uzaklaştırılması çalışmasında (Çizelge 6.10), başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu sırasıyla, 36,98, 21,47 ve 0,5 mg/L değerlerine; başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu ise 20139, 12345 ve <1884 mg/kg değerlerine düşmüştür. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı 7,58-7,91 aralığında değişim göstermiştir.

Çizelge 6.10 : ADK'nın farklı sıcaklıklarda 4 sa. süreyle yakılması.

No	T (°C)	TOK (mg/kg)	ÇOK (mg/L)	Eluat pH'ı
Orijinal atık	-	45601	89,40	10,04
1	200	20139	36,98	7,91
2	300	12345	21,47	7,80
3	400	<1884	0,50	7,91
4	500	<1884	0,50	7,85
5	600	<1884	0,50	7,79
6	700	<1884	0,50	7,58
7	800	<1884	0,50	7,65
8	900	<1884	0,50	7,62

ADK'daki organik kirleticilerin kül fırınında 2 sa. süreyle sekiz farklı sıcaklıkta (200-900°C) yakılarak uzaklaştırılması çalışmasında (Çizelge 6.11), başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu sırasıyla, 47,13, 33,74, 22,71, 5,62, 4,82, 4,39, 3,65 ve 3,85 mg/L değerlerine; başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu ise 35556, 29390, 21026, 3033, 2315 ve <1884 mg/kg değerlerine düşmüştür. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı 7,76-8,43 aralığında değişim göstermiştir.

Çizelge 6.11 : ADK'nın farklı sıcaklıklarda 2 sa. süreyle yakılması.

No	T (°C)	TOK (mg/kg)	ÇOK (mg/L)	Eluat pH'ı
Orijinal atık	-	45601	89,40	10,04
1	200	35556	47,13	8,43
2	300	29390	33,74	8,35
3	400	21026	22,71	8,40
4	500	3033	5,62	8,12
5	600	2315	4,82	7,95
6	700	<1884	4,39	7,90
7	800	<1884	3,65	7,83
8	900	<1884	3,85	7,76

ADK'daki organik kirleticilerin kül fırınında 1 sa. süreyle sekiz farklı sıcaklıkta (200-900°C) yakılarak uzaklaştırılması çalışmasında (Çizelge 6.12), başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu sırasıyla, 52,08, 36,33, 22,96, 7,03, 4,99, 9,43, 3,18 ve 4,7 mg/L değerlerine; başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu ise 38347,

32445, 24219, 13837, 9225, 4382 ve <1884 mg/kg değerlerine düşmüştür. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı 7,95-8,69 aralığında değişim göstermiştir.

Çizelge 6.12 : ADK'nın farklı sıcaklıklarda 1 sa. süreyle yakılması.

No	T (°C)	TOK (mg/kg)	ÇOK (mg/L)	Eluat pH'ı
Orijinal atık	-	45601	89,40	10,04
1	200	38347	52,08	8,69
2	300	32445	36,33	8,48
3	400	24219	22,96	8,24
4	500	13837	7,03	8,23
5	600	9225	4,99	8,15
6	700	4382	9,43	8,03
7	800	<1884	3,18	8,12
8	900	<1884	4,70	7,95

ADK'daki organik kirleticilerin kül fırınında 30 dk. süreyle sekiz farklı sıcaklıkta (200-900°C) yakılarak uzaklaştırılması çalışmasında (Çizelge 6.13), başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu sırasıyla, 62,3, 43,74, 28,12, 9,49, 7,62, 11,18, 8,56 ve 8,09 mg/L değerlerine; başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu ise 42163, 36219, 31781, 19362, 12524, 6973, 5236 ve <1884 mg/kg değerlerine düşmüştür. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı 7,83-9,32 aralığında değişim göstermiştir.

Çizelge 6.13 : ADK'nın farklı sıcaklıklarda 30 dk. süreyle yakılması.

No	T (°C)	TOK (mg/kg)	ÇOK (mg/L)	Eluat pH'ı
Orijinal atık	-	45601	89,40	10,04
1	200	42163	62,30	9,32
2	300	36219	43,74	8,28
3	400	31781	28,12	7,99
4	500	19362	9,49	7,86
5	600	12524	7,62	7,89
6	700	6973	11,18	7,83
7	800	5236	8,56	8,01
8	900	<1884	8,09	7,86

Çizelge 6.14'te ADDDY-EK 2: I. sınıf, II. sınıf ve III. sınıf depolama tesisleri için ÇOK ve TOK parametreleri limit değerleri verilmiştir:

Çizelge 6.14 : ÇOK ve TOK parametreleri için ADDDY-EK 2 limit değerleri.

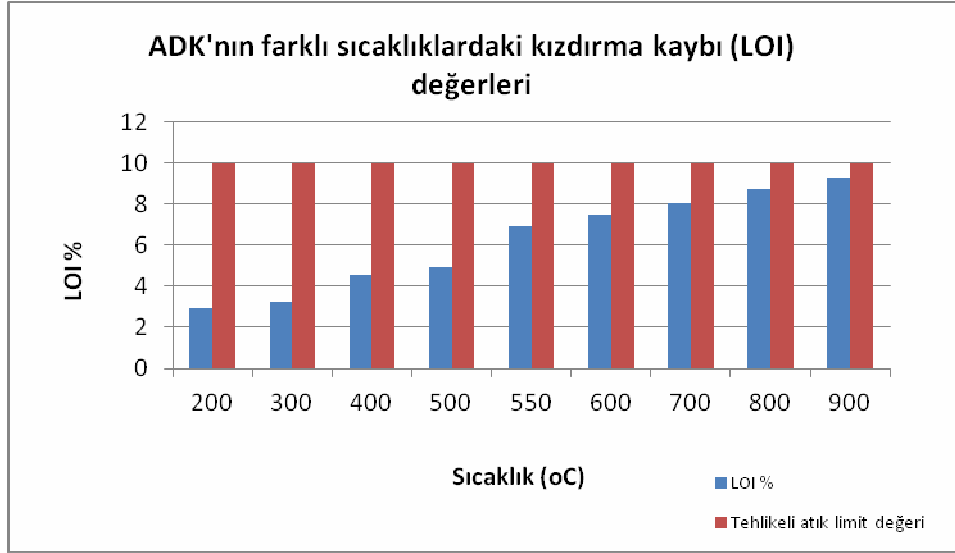
Parametre	ADDDY-EK 2		
	A) İnert atıkların depolanabilme kriterleri III. sınıf depolama tesisleri için sınır değerler	B) Tehlikesiz atıkların depolanabilme kriterleri II. sınıf depolama tesisleri için sınır değerler	C) Tehlikeli atıkların depolanabilme kriterleri I. sınıf depolama tesisleri için sınır değerler
Eluat			
(*) ÇOK (mg/L)	50	80	100
Orijinal atık			
(*) TOK (mg/kg)	30000 (%3)	50000 (%5)	60000 (%6)

ADK'nın kül fırınında yakılarak organik kirleticilerin uzaklaştırılması kapsamında yapılan laboratuvar ölçekli yakma deneylerinde elde edilen sonuçlar toplu olarak incelendiğinde; eluattaki ÇOK konsantrasyonunun ve atıktaki TOK konsantrasyonunun azaltılabildiği; dolayısıyla çalışmanın başarıya ulaştığı tespit edilmiştir. Ön işlem olarak 200°C'de 4 sa., 300°C'de 2 sa., 400°C'de 1 sa. ya da 500°C'de 30 dk. süreyle yakma prosesine tabii tutulması durumunda, ADK'nın "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre, III. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale getirilebileceği; organik kirleticileri giderildiği halde, Zn, Ni, toplam Cr, F⁻ ve TÇKM değerleri açısından 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre II. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu saptanmıştır. Ayrıca, yakma süresi arttıkça eluat pH değerlerinin azaldığı ve nötr seviyelere indiği gözlenmiştir. Bunun sebebi organik kirleticilerle birlikte ADK içerisinde bulunan ve ADK'ya bazik karakter kazandıran bentonitin özelliğini kaybetmesidir. ADK'daki organik kirleticilerin yakılarak uzaklaştırılması için belirlenen en uygun sıcaklık ve süre değerleri, 7. Bölümde ayrıntılı olarak üzerinde durulan ekonomik analiz ile ortaya konulmuştur.

Kül fırınında 200-900°C'de farklı sürelerde yakma sonucunda, orijinal katı üründe TOK değerleri ile eluatta ÇOK ve pH değerlerindeki değişimler Şekil A.1-A.12'de verilmiştir. ADK'nın 200-900°C sıcaklık aralığında kızdırma kaybı değerleri, Çizelge 6.15 ve Şekil 6.8'de verilmiştir:

Çizelge 6.15 : ADK'nın farklı sıcaklıklardaki kızdırma kaybı değerleri.

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T (°C)	200	300	400	500	550	600	700	800	900
LOI (%)	2,93	3,22	4,58	4,94	6,93	7,51	8,02	8,75	9,30



Şekil 6.8 : ADK'nın farklı sıcaklıklardaki kızdırma kaybı değerleri.

6.3.2 Yıkama yolu ile kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması

ADK'dan yıkama yolu ile olası kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında yapılan çalışmada, uygun yıkama sıvısı, çözelti konsantrasyonu ve yıkama süresi belirlenmiş; yıkama sonucu ele geçen kum, organik kirleticiler (ÇOK ve TOK) açısından "ADDDY-EK 2" limit değerleri temelinde değerlendirilmiştir. Laboratuvar ölçekli yıkama deneylerinin sonuçları incelendiğinde (Çizelge 6.16), ADK'daki organik kirleticilerin uzaklaştırılması için farklı çözelti ve konsantrasyonlarda 6 sa.'lik yıkama süresinin "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre, II. sınıf depolama tesisleri limit değerleri açısından yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

ADK'daki organik kirleticilerin üç farklı konsantrasyondaki HCl çözeltisi kullanılarak 6 sa. süreli yıkama ile uzaklaştırılması çalışması sonuçlarına göre, başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu, sırasıyla, 4,371; 4,101 ve 3,39 mg/L değerlerine; başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu ise 44325, 47636 ve 43910 mg/kg değerlerine ulaşmıştır. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı 3,18-3,48 aralığında değişim göstermiştir.

Üç farklı konsantrasyondaki H₂SO₄ çözeltisi ile 6 sa. süreli yıkama sonucunda, eluatta başlangıçta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu sırasıyla, 15,79; 25,85 ve 34,56 mg/L değerlerine; başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu 49574, 46892

Çizelge 6.16 : ADK'nın farklı çözelti ve konsantrasyonlardaki yıkama deneyi sonuçları.

	Çözelti	t (sa.)	ÇOK (mg/L)	TOK (mg/kg)	Eluat pH'ı
1	Şebeke suyu	24	10,285	34460	8,27
2	Şebeke suyu	15	28,450	37329	7,68
3	Şebeke suyu	6	37,850	41561	8,82
4	6 M HCl	24	1,071	48637	2,92
5	3 M HCl	24	1,072	46324	3,05
6	1 M HCl	24	1,325	45983	4,19
7	6 M H ₂ SO ₄	24	2,762	48753	3,57
8	3 M H ₂ SO ₄	24	6,478	43527	3,75
9	1 M H ₂ SO ₄	24	15,210	46820	3,97
10	6 M HNO ₃	24	4,517	47201	3,61
11	3 M HNO ₃	24	6,099	48697	3,58
12	1 M HNO ₃	24	7,976	44335	3,52
13	6 M NaOH	24	117,500	42696	10,41
14	3 M NaOH	24	121,800	45832	10,24
15	1 M NaOH	24	125,200	45228	9,92
16	6 M HCl	15	2,180	41975	4,21
17	3 M HCl	15	3,894	45937	4,39
18	1 M HCl	15	5,640	44982	4,86
19	6 M H ₂ SO ₄	15	10,280	43234	3,46
20	3 M H ₂ SO ₄	15	18,738	48602	3,47
21	1 M H ₂ SO ₄	15	27,330	45018	3,65
22	6 M HNO ₃	15	13,230	46189	3,34
23	3 M HNO ₃	15	16,120	43820	3,39
24	1 M HNO ₃	15	27,620	45687	3,47
25	6 M HCl	6	4,371	44325	3,18
26	3 M HCl	6	4,101	47636	3,30
27	1 M HCl	6	3,390	43910	3,48
28	6 M H ₂ SO ₄	6	15,790	49574	3,55
29	3 M H ₂ SO ₄	6	25,850	46892	3,86
30	1 M H ₂ SO ₄	6	34,560	47352	4,30
31	6 M HNO ₃	6	30,020	46142	3,42
32	3 M HNO ₃	6	32,600	43256	3,95
33	1 M HNO ₃	6	36,240	44323	3,87

ve 47352 mg/kg değerlerine ulaşmıştır. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı 3,55-4,30 aralığında değişim göstermiştir.

Başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu, üç farklı konsantrasyondaki HNO₃ çözeltisi ile 6 sa. süreli yıkama sonucunda sırasıyla, 30,02; 32,6; 36,24 mg/L değerlerine, başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu aynı HNO₃ çözeltisi konsantrasyonlarında 46142, 43256 ve 44323 mg/kg değerlerine ulaşmıştır. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı 3,42-3,95 aralığında değişim göstermiştir.

ADK'daki organik kirleticilerin şebeke suyu kullanılarak farklı sürelerde (6, 15 ve 24 sa.) yıkama ile uzaklaştırılması çalışmasında, başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu, sırasıyla, 37,85; 28,45 ve 10,285 mg/L değerlerine, başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu aynı yıkama sürelerinde 41561, 37329 ve 34460 mg/kg değerlerine düşmüştür. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı 7,68-8,82 aralığında değişim göstermiştir.

Farklı konsantrasyonlarda (6 M, 3 M, 1 M) bazik çözelti (NaOH) kullanılarak yıkama yolu ile ADK'daki organik kirleticilerin uzaklaştırılması denemelerinde eluattaki ÇOK konsantrasyonu ile atıktaki TOK konsantrasyonunun arttığı ve dolayısıyla, ilgili çalışmanın başarılı olmadığı saptanmıştır.

Farklı konsantrasyonlarda (6 M, 3 M, 1 M) asit çözeltileri (HCl, H₂SO₄, HNO₃) kullanılarak 6 sa. süreyle yıkama yolu ile ADK'daki organik kirleticilerin (ÇOK ve TOK) uzaklaştırılması çalışmasında eluattaki ÇOK konsantrasyonunun azaldığı, atıktaki TOK konsantrasyonunda ise herhangi bir değişikliğin olmadığı; böylece, denemelerin başarıya ulaştığı görülmüştür. Mevcut durumda ÇOK değeri sebebiyle "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre, I. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu tespit edilen ADK'nın, ön işlem olarak asit çözeltisi (HCl, H₂SO₄, HNO₃) ile yıkama prosesine tabii tutulması durumunda 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri III. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale getirilebileceği; ancak, organik kirleticileri giderildiği halde, Zn, Ni, toplam Cr, F⁻ ve TÇKM değerleri açısından 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre, II. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu saptanmıştır.

Farklı konsantrasyonlarda, farklı sürelerde ve farklı yıkama sıvıları ile yıkama sonucu orijinal atıktaki TOK ve eluattaki ÇOK değerlerindeki değişimler Şekil B.1-B.22'de verilmiştir.

ADK'daki organik kirleticilerin uzaklaştırılması için belirlenen farklı yıkama sıvısı (şebeke suyu ile HCl, H₂SO₄ ve HNO₃ çözeltileri) ve çözelti konsantrasyonu (6 M, 3 M, 1 M) seçeneklerinden en uygun olanlar, sonuçları ayrıntılı olarak 7. Bölüm'de verilen ekonomik analiz ile ortaya konulmuştur.

6.3.2.1 Atık döküm kumu yıkama suyu deşarj numunesinin "SKKY Tablo 15: Metal Sanayi Atıksularının Alıcı Ortama Deşarj" standardına göre değerlendirilmesi

7. Bölümde verildiği gibi, ekonomik analiz sonucu en uygun çözelti türü "şebeke suyu" olarak saptanmıştır. ADK'daki organik kirleticilerin şebeke suyu ile yıkanması sonucu ele geçen deşarj suyu numunesi analiz edilmiş ve elde edilen analiz sonuçlarının "SKKY Tablo 15.17: Sektör: Metal Sanayi (Demir ve Demir Dışı Dökümhane ve Metal Şekillendirme) atıksuları" alıcı ortam deşarj limit değerlerine uygun olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 6.17).

Çizelge 6.17 : ADK yıkama suyu deşarj numunesi analiz sonuçları ve SKKY/Tablo 15.17 Alıcı ortam deşarj limit değerleri.

Parametre	ADK yıkama suyu deşarj numunesi	SKKY/Tablo 15.17 kompozit numune 2 sa.lik
(*) Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ mg/L)	17	200
(*) Askıda katı madde (AKM mg/L)	14	150
(*) Yağ ve gres (mg/L)	<0,32	20
(*) Kadmiyum (Cd mg/L)	<0,00004	1
(*) Cıva (Hg mg/L)	<0,001	-
(*) Çinko (Zn mg/L)	0,037	5
(*) Kurşun (Pb mg/L)	0,0006	2
(*) Bakır (Cu mg/L)	0,019	2
(*) Demir (Fe mg/L)	0,674	10
(*) Toplam Krom (Toplam Cr mg/L)	0,001	2
(*) Krom (Cr ⁺⁶ mg/L)	<0,01	0,5
(*) Arsenik (As mg/L)	0,0086	0,1
(*) Alüminyum (Al mg/L)	1,81	3
(*) Nikel (Ni mg/L)	1,2	3
(*) Toplam siyanür (Toplam CN ⁻ mg/L)	<0,08	0,1
(*) pH	8,21	6-9

SM: Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 21th Edition (2005).

(*) işaretli analizler ISO/IEC 17025:2005'e göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiştir.

6.3.3 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) yolu ile kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması

ADK'dan S/S yolu ile olası kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla yapılan çalışmada çeşitli bağlayıcılar vasıtasıyla katılaştırılmış ürünler, kirleticiler (eluatta ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ ve

pH ile orijinal katıda TOK) açısından "ADDDY-EK 2" limit değerleri temelinde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, kullanılan bağlayıcıların fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu, uygun atık-bağlayıcı karışım oranlarının belirlenmesi ve katılaştırılmış ürünlerin çevresel etkiler açısından değerlendirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

6.3.3.1 Bağlayıcıların karakterizasyonu

Bu çalışmada bağlayıcı olarak CEM II/A-LL 42,5 N Portland kalkerli çimento (TS EN 197-1:2002) ve CL 80-S sönmüş kalker kireci (TS EN 459-1:2010) kullanılmıştır. Söz konusu bağlayıcıların XRF cihazı ile tespit edilen kimyasal bileşimi Çizelge 6.18'de, kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları ise Çizelge 6.19'da verilmiştir:

Çizelge 6.18 : Kullanılan bağlayıcıların kimyasal bileşimi.

Kimyasal bileşim (%)	CEM II/A-LL 42,5 N Portland kalkerli çimento	CL 80-S Sönmüş kalker kireci
Na ₂ O	0,063	-
MgO	0,632	1,955
Al ₂ O ₃	5,258	0,440
SiO ₂	16,635	0,929
P ₂ O ₅	0,124	0,085
SO ₃	6,230	1,387
K ₂ O	0,187	0,210
CaO	70,050	94,221
V ₂ O ₅	-	0,061
MnO ₂	-	0,089
TiO ₂	0,146	-
Cr ₂ O ₃	0,031	-
Fe ₂ O ₃	0,388	0,535
NiO	0,012	0,019
As ₂ O ₃	0,010	-
SrO	0,093	0,061
ZrO ₂	0,029	-
BaO	0,111	-
ZnO	-	0,008

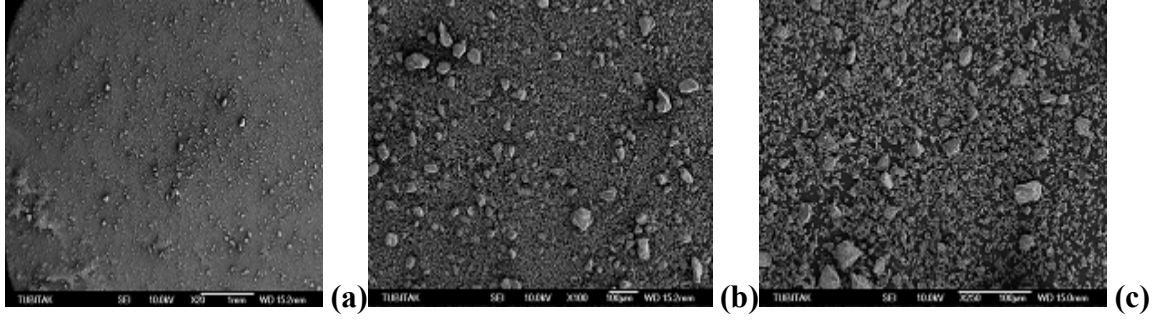
Elektron mikroskobu ile yapılan çoklu nokta incelemesinde Portland kalkerli çimento ve kalker kirecine ait taramalı elektron mikroskobunda (SEM) elde edilen görüntüler Şekil 6.9-6.10'da verilmiştir:

Çizelge 6.19 : Kullanılan bağlayıcıların kimyasal ve fiziksel özellikleri.

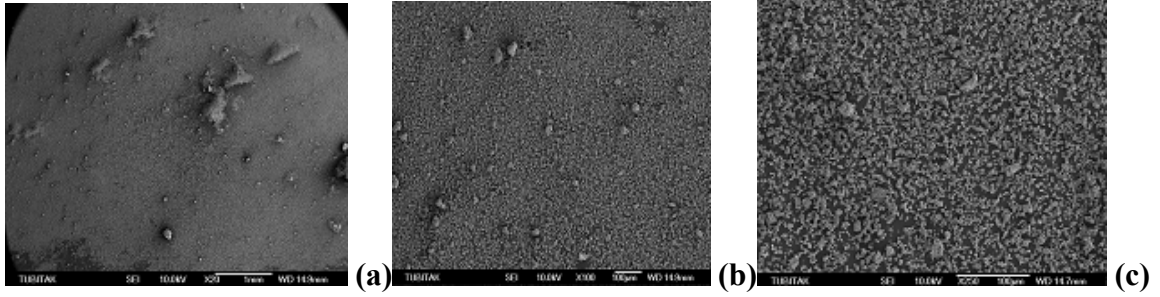
Parametre	CEM II/A-LL 42,5 N Portland kalkerli çimento	CL 80-S Sönmüş kalker kireci	Analiz yöntemi
Kimyasal özellikler			
İnorganik madde cinsi	1) Ca silikat, Ca ₃ SiO ₅ 2) Kalsit, CaCO ₃ 3) Portlandit, Ca(OH) ₂ 4) Jips, CaSO ₄ .2H ₂ O 5) Etrinjit, Al ₂ Ca ₆ H ₆₄ O ₅₀ S ₃ 6) Kristobalit, SiO ₂	1) Portlandit, Ca(OH) ₂ 2) Kalsit, CaCO ₃ 3) Anhidrit, CaSO ₄ 4) Kireç, CaO	Kalitatif faz (mineralojik analiz) (XRD cihazı ile)
pH değeri (Sulu çöz.)	12,67	12,66	TS 8753 EN 12176:2002
Kızdırma kaybı LOI%	7,95	24,91	TS EN 12879: 2003
TOK (mg/kg)	4443	1881	SM-5310 B
ÇOK (mg/L)	16,7	1,9	Yük. Sıc. Yakma
Fiziksel özellikler			
Renk	Beyaz-gri	Beyaz-krem	Görsel
Şekil	İnce toz	İnce toz	Görsel
	mmMiktar (%)	mmMiktar (%)	
	0,00010	0,00010	
	0,00042,33	0,00041,73	
Partikül boyutu	0,001010,06	0,001011,95	Lazer tekniği ile (kuru ölçüm)
dağılımı	0,004024,87	0,004061,57	ISO 13320- 1:2009
	0,010018,12	0,010024,75	
	0,030025,63	0,03000	
	0,080018,99	0,08000	
Nem miktarı (%ağ.)	0,83	1,11	TS 9546 EN 12880:2002
Toplam yüzey alanı (m ² /g)	2,623	12,35	BET cihazı ile
Özgül ağırlık	2,88	2,05	
Gevşek ve sıkışık birim ağırlık (kg/m ³)	980-1584	446-638	TS EN 1097- 6:2002

6.3.3.2 Atık döküm kumu için laboratuvar ölçekli S/S çalışması

ADK'ya Portland çimentosu-kireç-esaslı S/S prosesi uygulanmış ve sonuçlar Portland çimentosu-esaslı ve kireç-esaslı S/S proses sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karışımdaki ADK oranının %0-90 arasında değiştiği üç tür harç hazırlanmıştır:



Şekil 6.9 : Portland kalkerli çimento SEM görüntüleri:(a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme.



Şekil 6.10 : Kalker kireci SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme.

- ADK, Portland çimentosu, su,
- ADK, kalker kireci, su,
- ADK, Portland çimentosu, kalker kireci, su.

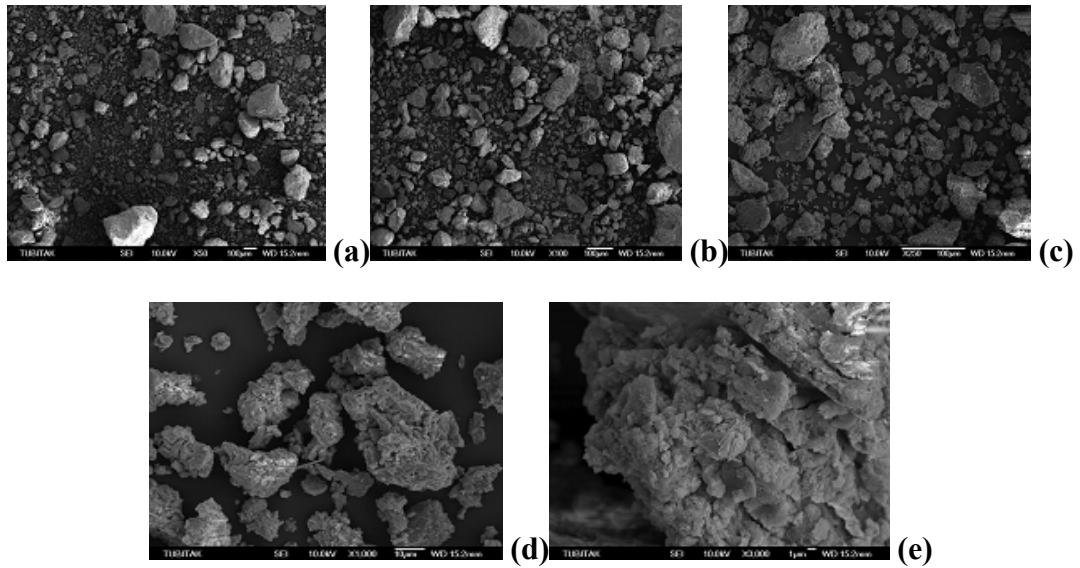
6.3.3.3 Portland kalkerli çimento ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S çalışması

Belli oranlardaki (%0, %10, %20, %40, %100, %200, %300, %900) ADK/Portland kalkerli çimento karışımları ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S çalışması sonuçlarına göre, karışım oranı arttıkça; başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu, sırasıyla, 3,11; 3,97; 3,31; 3,56; 3,28; 3,80; 3,85 ve 10,48 mg/L değerlerine; başlangıçta eluatta 138,74 µg/l olan Ni konsantrasyonu <2 ve 2,65 µg/l değerlerine; başlangıçta eluatta 593 µg/l olan Zn konsantrasyonu, sırasıyla, 42, <35, <35, 71, <35, <35, 62 ve 83 µg/l değerlerine; başlangıçta eluatta 119,44 µg/l olan toplam Cr konsantrasyonu, sırasıyla, 20,09; 19,86; 21,50; 24,27; 15; 12,04; 8,2 ve 13,4 µg/l değerlerine; başlangıçta eluatta 4731 mg/L olan TÇKM konsantrasyonu <14,3 mg/L değerine; başlangıçta eluatta 1,89 mg/L olan F⁻ konsantrasyonu ise <0,2 mg/L değerine düşmüştür. Başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu aynı karışım oranlarında, sırasıyla, 6318, 6727, 7878, 14011, 12874, 26539, 28355 ve 34289 mg/kg değerlerine düşmüştür.

ADK/çimento karışım oranlarına göre eluatta ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ ve pH ile orijinal katı üründe TOK konsantrasyonlarında meydana gelen değişimler Çizelge 6.20 ve Şekil C.1-C.8'de verilmiştir. Karışımlardaki ADK/çimento oranı arttıkça, TOK değerinde artış olduğu gözlenmiştir. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı ise, aynı karışım oranlarında 12,88; 12,89; 12,87; 12,89; 12,76; 12,81; 12,68 ve 12,71 olarak ölçülmüştür. pH değerindeki artışın sebebi olarak Portland çimentosunun bazik karakteri gösterilebilir.

Portland kalkerli çimento ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S denemelerinde eluattaki ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ konsantrasyonları ile orijinal atıkta TOK konsantrasyonlarında (%90 ADK+%10 çimento hariç) azalma sağlandığı; dolayısıyla, çalışmanın başarılı olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, çevresel etkiler açısından Portland kalkerli çimentonun S/S çalışması için uygun olacağına karar verilmiştir.

Elektron mikroskobu ile çoklu nokta incelemesinde; Portland kalkerli çimento ile yapılan S/S çalışmasının katı ürününe (%75 ADK+%25 çimento) ait elde edilen SEM görüntüleri Şekil 6.11'de verilmiştir:



Şekil 6.11 : Portland kalkerli çimento S/S ürünü SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X. (d) 1000X. (e) 3000X büyütme.

Mevcut durumda, ÇOK değeri sebebiyle "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu tespit edilen ADK'nın, ön işlem olarak Portland kalker çimentosu ile S/S prosesine tabii tutulması durumunda 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri III. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale getirilebileceği saptanmıştır.

Çizelge 6.20 : ADK/çimento oranlarına göre eluattaki kirletici konsantrasyon ve eluat pH değerleri.

No	ADK %	Çimento %	Kum %	ADK/çimento %	ÇOK (mg/L)	TOK (mg/kg)	Ni (µg/l)	Zn (µg/l)	Top. Cr (µg/l)	TÇKM (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Eluat pH'ı
0	100	-	-	-	89,4	45601	138,74	593	119,44	4731	1,89	10,04
1	90	10	0	900	10,48	34289	2,65	83	13,40	<14,3	<0,20	12,71
2	75	25	0	300	3,85	28355	<2,00	62	8,20	<14,3	<0,20	12,68
3	50	25	25	200	3,80	26539	<2,00	<35	12,04	<14,3	<0,20	12,81
4	25	25	50	100	3,28	12874	<2,00	<35	15,00	<14,3	<0,20	12,76
5	10	25	65	40	3,56	14011	<2,00	71	24,27	<14,3	<0,20	12,89
6	5	25	70	20	3,31	7878	<2,00	<35	21,50	<14,3	<0,20	12,87
7	2,5	25	72,5	10	3,97	6727	<2,00	<35	19,86	<14,3	<0,20	12,89
8	0	25	75	0	3,11	6318	<2,00	42	20,09	<14,3	<0,20	12,88
(Şahit)												
Toplam numune miktarı 500 g												

6.3.3.4 Kalker kireci ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S çalışması

Belli oranlardaki (%0, %10, %20, %40, %100, %200, %300, %900) ADK/Kalker kireci karışımları ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S çalışması sonuçlarına göre, karışım oranı arttıkça; başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu, sırasıyla, 1,38; 1,43; 1,86; 1,76; 2,21; 3,63; 3,57 ve 15,39 mg/L değerlerine; başlangıçta eluatta 138,74 µg/l olan Ni konsantrasyonu <2 ve 2,23 µg/l değerlerine; başlangıçta eluatta 593 µg/l olan Zn konsantrasyonu, sırasıyla, 35, 100, 49, <35, 42, <35, 35 ve 56 µg/l değerlerine; başlangıçta eluatta 119,44 µg/l olan toplam Cr konsantrasyonu, sırasıyla, <2; 17,27; 14,3; 14; 7,8; 4,5, <2 ve 21,6 µg/l değerlerine; başlangıçta eluatta 4731 mg/L olan TÇKM konsantrasyonu <14,3 mg/L değerine; başlangıçta eluatta 1,89 mg/L olan F⁻ konsantrasyonu <0,2 mg/L değerine düşmüştür. Başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu aynı karışım oranlarında <1870, 2713, 11385, 8559, 14432, 23596, 29378 ve 36437 mg/kg değerlerine azalmıştır. Karışımlardaki ADK/kireç oranı arttıkça, TOK değerinde artış olduğu gözlenmiştir. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı ise, aynı karışım oranlarında, sırasıyla, 12,88; 12,98; 12,94; 12,95; 12,97; 12,95; 12,86 ve 12,85 olarak ölçülmüş olup pH artışının sebebi olarak Kalker kirecinin bazik karakteri gösterilebilir.

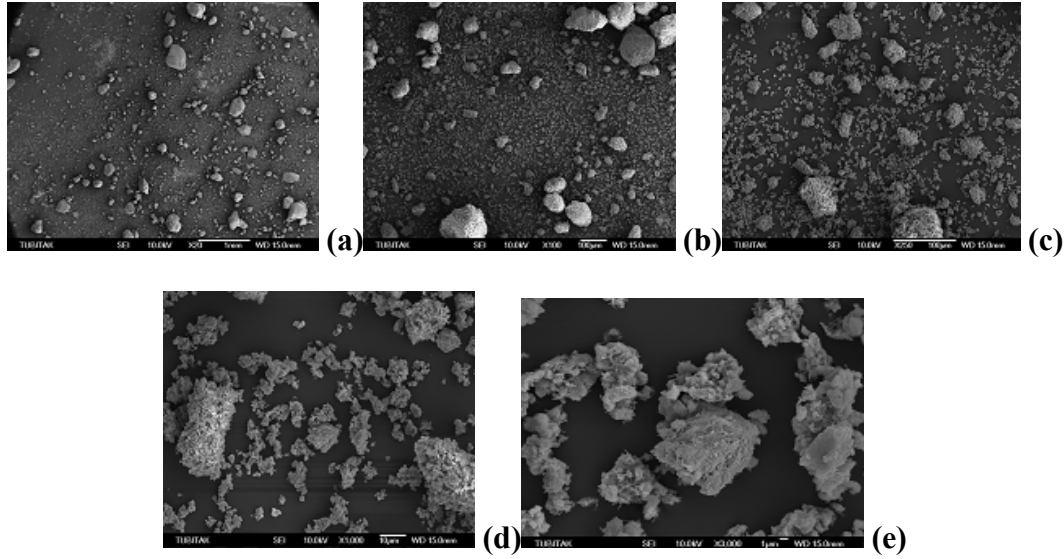
ADK/kireç karışım oranlarına göre eluatta ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ ve pH ile orijinal katı üründe TOK konsantrasyonlarında meydana gelen değişimler Çizelge 6.21 ve Şekil C.9-C.16'da verilmiştir.

Kalker kireci ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S denemelerinde eluattaki ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ konsantrasyonları ile orijinal atıkta TOK konsantrasyonlarında (%90 ADK+%10 kireç hariç) azalma sağlandığı; dolayısıyla, çalışmanın başarılı olduğu saptanmıştır. Buna göre çevresel etkiler açısından kalker kirecinin S/S çalışması için uygun olacağına karar verilmiştir.

Elektron mikroskobu ile çoklu nokta incelemesinde; kalker kireci ile yapılan S/S çalışmasının katı ürününe (%75 ADK + %25 kireç) ait elde edilen SEM görüntüleri Şekil 6.12'de verilmiştir:

Çizelge 6.21 : ADK/kireç oranlarına göre eluattaki kirlетici konsantrasyon ve eluat pH değерleri.

No	ADK %	Kireç %	Kum %	ADK/ Kireç %	ÇOK (mg/L)	TOK (mg/kg)	Ni (µg/l)	Zn (µg/l)	Top. Cr (µg/l)	TÇKM (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Eluat pH'ı
0	100	-	-	-	89,40	45601	138,74	593	119,44	4731	1,89	10,04
1	90	10	0	900	15,39	36437	2,23	56	21,60	<14,3	<0,20	12,85
2	75	25	0	300	3,57	29378	<2,00	35	<2,00	<14,3	<0,20	12,86
3	50	25	25	200	3,63	23596	<2,00	<35	4,50	<14,3	<0,20	12,95
4	25	25	50	100	2,21	14432	<2,00	42	7,80	<14,3	<0,20	12,97
5	10	25	65	40	1,76	8559	<2,00	<35	14,00	<14,3	<0,20	12,95
6	5	25	70	20	1,86	11385	<2,00	49	14,30	<14,3	<0,20	12,94
7	2,5	25	72,5	10	1,43	2713	<2,00	100	17,27	<14,3	<0,20	12,98
8	0	25	75	0	1,38	<1870	<2,00	35	<2,00	<14,3	<0,20	12,88
(Şahit)												
Toplam numune miktarı 500 g												



Şekil 6.12 : Kalker kireci S/S ürünü SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X. (d) 1000X. (e) 3000X büyütme.

Mevcut durumda, ÇOK değeri sebebiyle "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu tespit edilen ADK'nın, ön işlem olarak kalker kireci ile S/S prosesine tabii tutulması durumunda 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri III. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale getirilebileceği saptanmıştır.

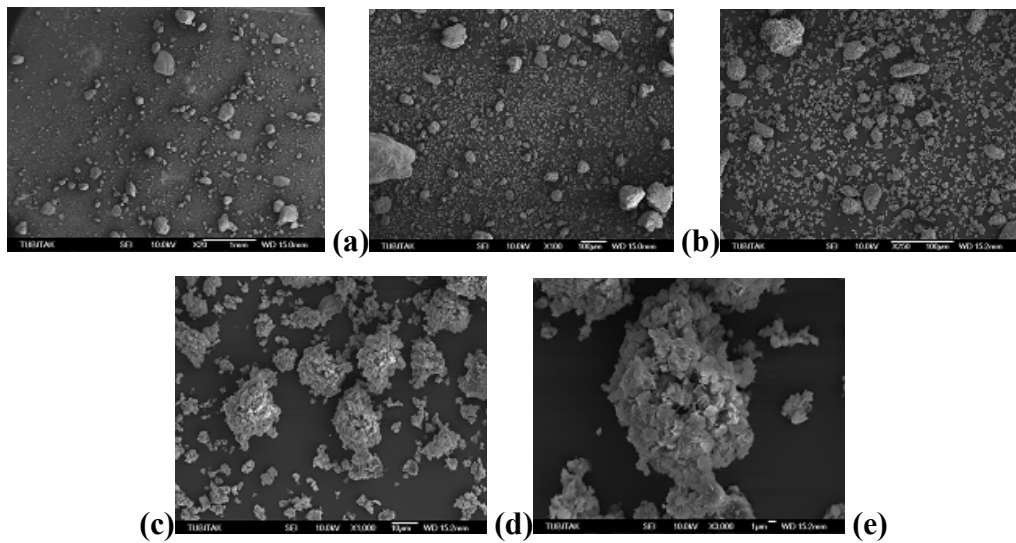
6.3.3.5 Portland kalkerli çimento ve kalker kireci ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S çalışması

Belli oranlardaki (%0, %10, %20, %40, %100, %200, %300, %900) ADK/Portland kalkerli çimento-kalker kireci karışımları ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S çalışması sonuçlarına göre, karışım oranı arttıkça; başlangıçta eluatta 89,4 mg/L olan ÇOK konsantrasyonu, sırasıyla, 4,97; 5,69; 4,87; 5,57; 5,10; 4,98; 5,14 ve 13,26 mg/L değerlerine, başlangıçta eluatta 138,74 µg/l olan Ni konsantrasyonu, sırasıyla, <2; <2; <2; <2; 2,48; <2, 2,40 ve 2,82 µg/l değerlerine; başlangıçta eluatta 593 µg/l olan Zn konsantrasyonu, sırasıyla, 40; 38; 35; <35; <35; <35, 44 ve 65 µg/l değerlerine; başlangıçta eluatta 119,44 µg/l olan toplam Cr konsantrasyonu, sırasıyla, 26,90; 25,82; 24,62; 26,11; 18,51; 11,67; 8,71 ve 29,8 µg/l değerlerine; başlangıçta eluatta 4731 mg/L olan TÇKM konsantrasyonu <14,3 mg/L değerine; başlangıçta eluatta 1,89 mg/L olan F⁻ konsantrasyonu <0,2 mg/L değerine düşmüştür. Başlangıçta orijinal atıkta 45601 mg/kg olan TOK konsantrasyonu aynı karışım

oranlarında, sırasıyla, 1870, 2697, 5492, 5390, 13428, 19439, 28935 ve 35986 mg/kg değerlerine azalmıştır. Karışımlardaki ADK/çimento-kireç oranı arttıkça TOK değerinde artış olduğu gözlenmiştir. Başlangıçta 10,04 olan eluat pH'ı ise, aynı karışım oranlarında, sırasıyla, 12,68; 12,63; 12,62; 12,63; 12,60; 12,59; 12,61 ve 12,72 olarak ölçülmüş olup pH artışının sebebi olarak Portland kalkerli çimento ve kalker kirecinin bazik karakteri gösterilebilir. ADK/çimento-kireç karışım oranlarına göre eluatta ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ ve pH ile orijinal katı üründe TOK konsantrasyonlarında meydana gelen değişimler Çizelge 6.22 ve Şekil C.17-C.24'te verilmiştir.

Portland kalkerli çimento ve kalker kireci ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S denemelerinde eluattaki ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ konsantrasyonları ile orijinal atıkta TOK konsantrasyonlarında (%90 ADK+%5 çimento+%5 kireç hariç) azalma sağlandığı; dolayısıyla, çalışmanın başarılı olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, çevresel etkiler açısından Portland kalkerli çimento ve kalker kirecinin S/S çalışması için uygun olacağına karar verilmiştir. ADK'daki organik/inorganik kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması için belirlenen üç farklı bağlayıcı-esaslı S/S prosesinden en uygun olanı, ayrıntıları 7. Bölüm'de açıklanan ekonomik analiz ile ortaya konulmuştur.

Elektron mikroskobu ile çoklu nokta incelemesinde; Portland kalkerli çimento ve kalker kireci ile yapılan S/S çalışması sonucu elde edilen katı ürüne (%75 ADK + %12,5 çimento + %12,5 kireç) ait SEM görüntüleri Şekil 6.13'te verilmiştir:



Şekil 6.13 : Portland kalkerli çimento ve kalker kireci S/S ürünü SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X. (d) 1000X. (e) 3000X büyütme.

Çizelge 6.22 : ADK/çimento-kireç oranlarına göre eluattaki kirletici konsantrasyon ve eluat pH değerleri.

N ₀	ADK %	Çimento %	Kireç %	Kum %	ÇOK (mg/L)	TOK (mg/kg)	Ni (µg/l)	Zn (µg/l)	Top. Cr (µg/l)	TÇKM (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Eluat pH'i
0	100	-	-	-	89,40	45601	138,70	593	119,44	4731	1,89	10,04
1	90	5	5	0	13,26	35986	2,82	65	29,80	<14,3	<0,20	12,72
2	75	12,5	12,5	0	5,14	28935	2,40	44	8,71	<14,3	<0,20	12,61
3	50	12,5	12,5	25	4,98	19439	<2,00	<35	11,67	<14,3	<0,20	12,59
4	25	12,5	12,5	50	5,10	13428	2,48	<35	18,51	<14,3	<0,20	12,60
5	10	12,5	12,5	65	5,57	5390	<2,00	<35	26,11	<14,3	<0,20	12,63
6	5	12,5	12,5	70	4,87	5492	<2,00	35	24,62	<14,3	<0,20	12,62
7	2,5	12,5	12,5	72,5	5,69	2697	<2,00	38	25,82	<14,3	<0,20	12,63
8 (Şahit)	0	12,5	12,5	75	4,97	1870	<2,00	40	26,90	<14,3	<0,20	12,68
Toplam numune miktarı 500 g												

Mevcut durumda, ÇOK değeri sebebiyle "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu tespit edilen ADK'nın, ön işlem olarak çimento ve kireç ile S/S prosesine tabii tutulması durumunda 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri III. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale getirilebileceği saptanmıştır.

6.4 Atık Döküm Kumundan Geri Kazanım İle Faydalı Ürün Elde Edilmesine Yönelik Yapılan Çalışmalarda Elde Edilen Sonuçlar

ADK'dan geri kazanım yoluyla yapı endüstrisine yönelik ekonomik değeri olan faydalı ürün eldesi kapsamında, günümüzde ülkemizde lokomotif konumunda yer alan inşaat endüstrisinin alt kolu ve temel taşlarından biri olan hazır beton sektöründe, "hazır beton" imalatında agrega ile birlikte kullanılabilirliğini ve çalışma sonuçlarının "üniversite-sanayi işbirliği" çerçevesinde sanayide uygulanabilirliğini araştırmak amacıyla pilot ölçekli S/S çalışması gerçekleştirilmiştir.

Modern yaşam, sağlıklı kentleşme ve sağlam yapılaşmanın gereklerinden biri de modern inşaat teknolojileriyle birlikte "hazır beton" kullanımudur. Hazır beton sektörü, ülkemizde lokomotif konumunda olan inşaat endüstrisinin önemli kollarından biri olmakla birlikte, diğer ülkelerle karşılaştırıldığında oldukça yenidir. hazır beton sektörü ilk olarak 1903 yılında Almanya'da kurulmuştur. Türkiye'de ise 1976'da ilk hazır beton üretimi Ankara'da başlamıştır (Karakule ve diğ, 2004). Çeşitli ülkelerin hazır beton sektörüne başlangıç yılları Çizelge 6.23'te verilmiştir:

Çizelge 6.23 : Çeşitli ülkelerin hazır beton sektörüne başlangıç yılları, Demiryürek (2007)'ten uyarlanmıştır.

Ülke	Yıl	Ülke	Yıl	Ülke	Yıl
Almanya	1903	Hollanda	1948	İsrail	1963
İngiltere	1930	Belçika	1956	Portekiz	1966
Norveç	1930	Avusturya	1961	Yunanistan	1968
Fransa	1933	İtalya	1962	Türkiye	1976
İspanya	1942				

Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO)'ne üye ülkelerde 2010 yılı hazır beton üretim miktarları Çizelge 6.24'te, yıllara göre ülkemizdeki toplam hazır beton üretimi Çizelge 6.25'te verilmiştir:

Çizelge 6.24 : ERMCO'ya üye ülkelerde 2010 yılı hazır beton üretim miktarları, ERMCO (2011)'den uyarlanmıştır.

Ülkeler	Üretim (milyon m ³)	Kişi başı hazır beton (m ³ /kişi)	Ülkeler	Üretim (milyon m ³)	Kişi başı hazır beton (m ³ /kişi)
Avusturya	10,2	1,22	Polonya	18,6	0,49
Belçika	10,8	1,00	Portekiz	7,5	0,71
Çek Cumh.	6,4	0,61	Slovakya	2,4	0,44
Danimarka	1,7	0,31	İspanya	39,1	0,85
Finlandiya	2,6	0,49	İsveç	3,3	0,35
Fransa	37,4	0,58	İngiltere	15,7	0,25
Almanya	42	0,51	İsrail	11	1,51
Yunanistan	12	1,06	Norveç	3	0,62
İrlanda	2,7	0,60	İsviçre	12,1	1,55
İtalya	54	0,89	Türkiye	79,7	1,10
Hollanda	8,1	0,49	TOPLAM	380,3	0,70

Hazır beton; kullanıcı olmayan şahıs veya kuruluş tarafından hazırlanarak taze halde teslim edilen plastik ve sertleşmemiş betondur (TSE, 2002). Hazır beton, mutlak hacimce %75 agrega, %10 çimento ve %15 sudan oluşmakta olup hazır beton endüstrisinde yüksek miktarlarda agrega (kum, çakıl, kırma taş vb.) tüketilmektedir.

Çizelge 6.25 : Yıllara göre ülkemizdeki toplam hazır beton üretimi, THBB (2011)'den uyarlanmıştır.

Yıl	Toplam hazır beton üretimi (m ³)	Yıl	Toplam hazır beton üretimi (m ³)
1988	1.500.000	2006	74.359.847
1993	10.000.000	2007	74.836.700
1998	26.542.905	2008	69.600.000
2003	46.300.000	2009	66.430.000
2005	70.732.631	2010	79.680.000

Agregalarda aranan en önemli özellikler şunlardır: Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları; zayıf taneler içermemeleri; basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları; toz,

toprak ve betona zarar verebilecek maddelerle yassı ve uzun taneler içermemeleri; çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir (Alp, 2004). Agreganın kirli (kil, toz vb.) olması aderansı (beton-donatı kenetlenmesini) olumsuz etkilemekte; ayrıca, bu küçük taneler su ihtiyacını da arttırmaktadır. Ülkemizde sadece hazır beton üretimi için agrega ihtiyacının yıllık 140 milyon ton olduğu ve bu miktarın gelecek yıllarda daha da artacağı düşünüldüğünde, endüstriyel atıkların (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, döküm kumu vb.) hazır beton imalatında agregalarla birlikte kullanılabilirliğinin ortaya konulmasının, hazır beton sektöründe ileride yaşanması olası agrega ihtiyacının aşılmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir (Demiryürek, 2007).

Hazır beton, günümüzde en çok kabul gören yapı malzemelerinden olan betonun kullanıldığı her yapıda kullanım alanına sahiptir. Klasik betona göre işçilikten ve zamandan tasarruf sağlayıp çağdaş bir çalışma imkanı sunar. Köprü, baraj, yol gibi alt yapı inşaatları, fabrikalar, toplu konutlar, konutlar gibi yapı projelerinde hazır beton kullanılmaktadır. Hazır beton kullanıcısının hazır betonda arayacağı nitelikler TS EN 206-1:2002 standardında yer almaktadır.

Betonun plastikliğini koruduğu süredeki durumuna "taze beton", betonun katılaşma olayından sonraki safhadaki durumuna ise "sertleşmiş beton" denilmektedir. İstenilen kalitede beton elde edebilmek için yapılması gereken iş, betonu oluşturacak malzemelerin seçilmesi, özelliklerinin belirlenmesi ve bu malzemelerin hangi oranlarda kullanılacaklarının doğru olarak hesaplanması olmaktadır. 02.07.1998 tarihli ve R.G. 23390 sayılı "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik" hükümleri uyarınca; deprem bölgelerindeki yapılarda C16, birinci ve ikinci derece deprem bölgelerinde ise C20 dayanım sınıfının altındaki betonların kullanılmaması gerekmektedir (Anonim, 1998). Ancak, yapılan araştırmalar, yapıların uzun ömürlü olmasının (durabilitesinin) de, en az dayanım kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye'nin önde gelen üniversitelerinden inşaat mühendisliği profesörleri, 2001 yılında, 17 Ağustos Depremi'nin ikinci yıldönümü nedeniyle yayınladıkları "Betonda Kalite Deklarasyonu"nda, Türkiye'deki yapılarda dayanım ve uzun ömür açısından C30 ve daha yukarı dayanım sınıflarında betonların kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır (IMO, 2001).

Türkiye'de en yaygın beton dayanım sınıfının $\geq C25/30$ ve $< C35/45$ olduğu belirtilmiştir (THBB, 2011). Bu nedenle bu çalışmada ADK'nın C25/30 ve C30/37 dayanım sınıfındaki hazır beton imalatında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

6.4.1 Atık döküm kumunun "TS 706 EN 12620+A1:2009-Beton Agregaları" standardına göre ince agregası olarak uygunluğunun değerlendirilmesi

6.4.1.1 Geometrik özellikler

Agrega tane büyüklüğü: Agreganın alt (d) ve üst (D) elek göz açıklıkları ve agregası tane sınıfı cinsinden ifade edilen d/D olarak gösteriliştir. Silika kumu ve ADK birer ince agregası olup tane sınıfı d/D=0/4'tür.

Tane büyüklüğü dağılımı (granülometri): TS 3530 EN 933-1:1999 ve TS 3530 EN 933-1/A1:2007 standartlarına uygun olarak tayin edilmiş agregaların tane büyüklüğü, agregası tane sınıfına bağlı olarak Çizelge 6.26'daki şartları sağlamalıdır:

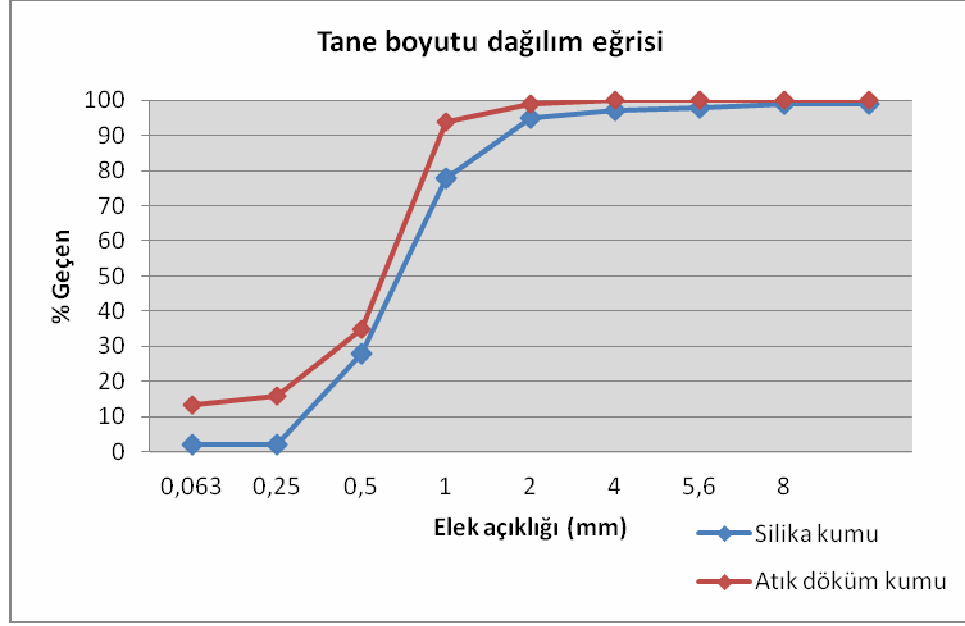
Çizelge 6.26 : Tane büyüklüğü dağılımı için genel özellikler.

Agrega	Tane büyüklüğü, mm	Elekten geçen %ağ.					Kategori, G ^d
		2D	1,4D	D	d	d/2	
İnce agregası	D≤4, d=0	100	95-100	85-99	-	-	G _F 85

Silika kumu ve ADK için elde edilen elek analizi sonuçları Çizelge 6.27'de, tane büyüklüğü dağılımı eğrileri (granülometri) ise Şekil 6.14'te verilmiştir. Buna göre 0-4 mm tane büyüklüğüne sahip ince agregası niteliğindeki silika kumunun ve ADK'nın kategorisi G_F85 olarak isimlendirilmiştir.

Çizelge 6.27 : Silika kumu ve ADK için elek analizi sonuçları.

Elek açıklığı (mm)	Elekten geçen %ağ.	
	Silika kumu	ADK
0,063	2,02	13,2
0,125	2,11	16,0
0,250	28,00	35,0
0,500	78,00	94,0
1,000	95,00	99,0
2,000	97,00	100,0
4,000	98,00	100,0
5,600	99,00	100,0
8,000	99,00	100,0
Kategori, G^d	G _F 85	G _F 85



Şekil 6.14 : Silika kumu ve ADK için tane büyüklüğü dağılımı eğrisi.

Çok ince malzeme içeriği: TS 3530 EN 933-1:1999 ve TS 3530 EN 933-1/A1:2007 standartlarına uygun olarak tayin edilmiş olan çok ince malzeme içeriği, Çizelge 6.28'de belirtilen ince agrega kategorisine uygun olarak beyan edilmelidir:

Çizelge 6.28 : Çok ince malzeme içeriğinin en yüksek değerlerine göre belirlenmiş kategoriler.

Agrega	0,063 mm göz açıklıklı elekten geçen %ağ.	Kategori, f
İnce agregalar	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	f_{Beyan}
Serbest		f_{NR}

Silika kumuna ve ADK'ya ait çok ince malzeme içeriği Çizelge 6.29'da verilmiştir. Buna göre; silika kumunun f_3 , ADK'nın ise f_{16} kategorisinde olduğu belirlenmiştir.

Çok ince malzeme kalitesi: İnce agregalardaki çok ince malzeme kalitesi, TS 706 EN 12620+A1:2009 standardı EK D'ye uygun olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, TS EN 933-8:2001 standardına uygun kum eşdeğeri (SE) ve TS EN 933-9:2010 standardına uygun metilen mavisi (MB) değeri hesaplanmıştır. Çok ince mal-

Çizelge 6.29 : Silika kumuna ve ADK'ya ait çok ince malzeme içeriğine göre kategoriler.

Agrega	0,063 mm göz açıklıklı elekten geçen %ağ.	Kategori, f
Silika kumu	2,27	f ₃
ADK	13,20	f ₁₆

zeme, aşağıda belirtilen iki durumdan birinin sözkonusu olması halinde zararsız olarak kabul edilmelidir:

- İnce agreganın toplam çok ince malzeme içeriğinin %3'ten daha az olması,
- TS EN 933-8:2001'e uygun olarak deneye tabi tutulduğunda, kum eşdeğerinin (SE), belirtilen alt sınırı aşmaması,
- TS EN 933-9:2010'a uygun olarak deneye tabi tutulduğunda, metilen mavisi (MB) deneyinin, belirtilen alt sınır değerinden daha küçük bir değer vermesi.

Silika kumu ve ADK için elde edilen çok ince malzeme kalitesi kum eşdeğeri (SE) ve metilen mavisi (MB) değerleri cinsinden Çizelge 6.30'da verilmiştir:

Çizelge 6.30 : Silika kumu ve ADK için çok ince malzeme kalitesi.

Agrega	Kum eşdeğeri (SE) %	Metilen mavisi (MB) değeri (g boya/100 g numune)
Silika kumu	89,09	0,08
ADK	32,00	0,85

Buna göre; çok ince malzeme kalitesi yönünden ADK'nın metilen mavisi değeri (kil miktarı) yüksek ve kum eşdeğeri, beton sektörü tarafından istenilen %40 değerinin altında çıkmıştır. Ancak, ADK'nın belli ikame oranında silika kumu ile karıştırılarak hazır betonda ince agregalar olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

6.4.1.2 Fiziksel özellikler

Tane yoğunluğu ve su emme oranı: Agregalar tane yoğunluğuna göre; hafif, normal veya ağır agregalar olarak sınıflandırılmakta olup agregalar sınıfları ve tane yoğunlukları Çizelge 6.31'de verilmektedir:

Çizelge 6.31 : TS EN 1097-6:2002 Agregası sınıfları ve tane yoğunlukları.

Agrega	Tane yoğunluğu (kg/m³)
Hafif agrega sınıfı	≤2000
Normal agrega sınıfı	2000-3000
Ağır agrega sınıfı	≥ 3000

Tane yoğunluğu ve su emme oranı, TS EN 1097-6:2002 ve TS EN 1097-6/A1:2007 standartlarına uygun tayin edilmiş olup elde edilen değerler Çizelge 6.32'de verilmiştir:

Çizelge 6.32 : Silika kumu ve ADK için tane yoğunluğu ve su emme oranı değerleri.

Agrega	Tane yoğunluğu (kg/m³)	Su emme oranı (%)
Silika kumu	2650-2700	0,7
ADK	2510	0,9

Bu çalışmada kullanılan ADK'nın, normal agrega sınıfında olduğu saptanmıştır.

Gevşek yığın yoğunluğu: Gevşek yığın yoğunluğu, TS EN 1097-3:1999 standardına uygun tayin edilmiş olup silika kumu ve ADK için elde edilen gevşek yığın yoğunluk değerleri Çizelge 6.33'te verilmiştir:

Çizelge 6.33 : Silika kumu ve ADK gevşek yığın yoğunluk değerleri.

Agrega	Gevşek yığın yoğunluğu (kg/m³)
Silika kumu	1390
ADK	1160

Hacim kararlılığı-kuruma büzülmesi: Kuruma büzülmesi, sertleşmiş betonun içerisindeki suyun bir miktarının buharlaşarak kaybolması sonucunda oluşan büzülmedir. Agregası özellikleri sebebiyle betonda hasara yol açan büzülmenin %0,075'i aşmaması gerekir. Kuruma büzülmesi, TS EN 1367-4:2009 standardına uygun tayin edilmiş olup silika kumu ve ADK için elde edilen değerler Çizelge 6.34'te verilmiştir:

Çizelge 6.34 : Silika kumu ve ADK için kuruma büzülmesi değerleri.

Agrega	Kuruma büzülmesi (%)
Silika kumu	0,02-0,03
ADK	0,054

Alkali-silika reaktifliği: Belirli agregalar, betondaki gözenekler içerisindeki sıvılarda mevcut bulunan alkali hidroksitlerle reaksiyona girebilir. Olumsuz şartlar altında ve rutubet bulunduğunda, bu olay, betonda şişmeye, çatlamaya ve parçalanmaya yol açabilir. En yaygın reaksiyon şekli, alkaliler ve belirli silis formları arasında meydana gelir (alkali-silis reaksiyonu). Betonda yeterli miktarda rutubet bulunuyorsa, $\text{Alkali} + \text{Silika} \rightarrow \text{Jel}$ (alkali silikat çözeltisi), $\text{Jel} + \text{Rutubet} \rightarrow \text{Genleşme}$ gerçekleşir. İkinci aşama sonunda meydana gelen genleşme, çatlamalara yol açarak, betonu hasara uğratar. Alkali-silika reaktifliği, ASTM C 1260-07 standardına uygun olarak tayin edilmiş olup silika kumu ve ADK için elde edilen sonuç Çizelge 6.35'te verilmiştir:

Çizelge 6.35 : Silika kumu ve ADK için alkali-silika reaktifliği.

Agrega	Ortalama uzama oranı (%)	Alkali-silika reaktifliği
Silika kumu	0,08	Tehlikesiz agreg
ADK	0,17	Potansiyel tehlike arz edebilir agreg

ASTM C 1260-07 standardına göre ortalama uzama oranı $< \%0,1$ olan ince agregalar alkali silika reaktifliği yönünden tehlikesiz, $\%0,1-\%0,2$ olan ince agregalar potansiyel tehlike arz edebilir, $> \%0,2$ olan ince agregalar ise tehlikelidir. Buna göre; alkali-silika reaktifliği yönünden silika kumu tehlikesiz, ADK potansiyel tehlike arz edebilir agreg olarak saptanmıştır. Ancak, ADK'nın belli ikame oranında silika kumu ile karıştırılarak hazır betonda ince agreg olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

6.4.1.3 Kimyasal özellikler

Suda çözünebilen klorür iyonu içeriği: TS EN 1744-1:2011 standardı Madde 7'ye uygun olarak tayin edilmiş olup silika kumu ve ADK için elde edilen suda çözünebilen klorür iyonu içerikleri Çizelge 6.36'da verilmiştir:

Çizelge 6.36 : Silika kumu ve ADK için suda çözünebilen klorür iyonu içerikleri.

Agrega	Suda çözünebilen klorür iyonu içeriği (%)
Silika kumu	0,06
ADK	0,09

Kükürtlü bileşikler: İyi sıkıştırılmış betonlarda, hava akımı ve rutubet nedeniyle oksitlenen sülfatlar sülföalüminat tuzlarını oluştururlar. Sülfatlar, betondaki kireç ve Al bileşikleriyle reaksiyona girerler ve zamanla kristallenerek betonun parçalanmasına neden olabilirler. Kükürtlü bileşikler üç grup halinde incelenir:

1) Asitte çözünebilen sülfat içeriği: TS EN 1744-1:2011 standardı Madde 12'ye uygun olarak tayin edilen beton agregalarının asitte çözünebilen sülfat içeriği, Çizelge 6.37'de belirtilen ilgili kategoriye göre beyan edilmelidir:

Çizelge 6.37 : Asitte çözünebilen en yüksek sülfat içeriği değerleri için kategoriler.

Agrega	Asitte çözünebilen sülfat içeriği (%ağ.)	Kategori, AS
	≤0,2	AS _{0,2}
Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu dışındaki agregalar	≤0,8	AS _{0,8}
	>0,8	AS _{BEYAN}
	Serbest	AS _{NR}

Asitte çözünebilen sülfat içeriği, TS EN 1744-1:2011 standardı Madde 12'ye uygun olarak tayin edilmiş olup silika kumu ve ADK için elde edilen sonuç Çizelge 6.38'de verilmiştir:

Çizelge 6.38 : Silika kumu ve ADK için asitte çözünebilen sülfat içeriği.

Agrega	Asitte çözünebilen sülfat içeriği (%ağ.)	Kategori, AS
Silika kumu	0,02-0,03	AS _{0,2}
ADK	0,15	AS _{0,2}

2) Toplam kükürt içeriği: TS EN 1744-1:2011 standardı Madde 11'e uygun olarak tayin edilmiş olup silika kumu ve ADK için elde edilen toplam kükürt içerikleri Çizelge 6.39'da verilmiştir:

Çizelge 6.39 : Silika kumu ve ADK için toplam kükürt içerikleri.

Agrega	Toplam kükürt içeriği (%ağ.)
Silika kumu	0,04-0,06
ADK	0,11

Toplam kükürt içeriği %1'i aşmamalıdır.

3) Asitte çözünebilen sülfid içeriği: TS EN 1744-1:2011 standardı Madde 13'e uygun olarak tayin edilmiş olup silika kumu ve ADK için elde edilen asitte çözünebilen sülfid içeriği Çizelge 6.40'ta verilmiştir:

Çizelge 6.40 : Silika kumu ve ADK için asitte çözünebilen sülfid içeriği.

Agrega	Asitte çözünebilen sülfid içeriği (%ağ.)
Silika kumu	0,03
ADK	0,1

Betonun priz alma ve sertleşme hızını değiştiren bileşenler: Betonun priz alma ve sertleşme hızını değiştiren oranlarda maddeler içeren agregalar, katılaşma süresi ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri bakımından TS EN 1744-1:2011 standardı Madde 15.3-Harç yöntemine uygun olarak değerlendirilmelidir. Harç yöntemi, agreganın içinde bulunan, harcın sertleşmesine ve katılaşmasına etkisi olabilen organik kirleticilerin miktarını saptayan bir performans deneyidir. Betonun priz alma ve sertleşme hızını değiştiren bileşenler, TS EN 1744-1:2011 standardı Madde 15'e uygun olarak tayin edilmiş olup silika kumu ve ADK için elde edilen sonuç Çizelge 6.41'de verilmiştir:

Çizelge 6.41 : Betonun priz alma ve sertleşme hızını değiştiren bileşenler.

Agrega	Humus içeriği	Fulvo asit içeriği	Hafif organik kirleticiler (%)
Silika kumu	Yok	Yok	0,20
ADK	Yok	Yok	4,50

Organik madde içeriği, TS EN 1744-1:2011 standardı Madde 15.1'e uygun olarak tayin edilmelidir. Sonuçlar, yüksek bir organik madde içeriğinin varlığını gösterirse, fulvo asitlerin mevcudiyeti, TS EN 1744-1/2011 standardı Madde 15.2'ye uygun olarak tayin edilmelidir. Bu deneylerde kullanılan berrak sıvı, standard renklerden

daha açık ise, agregaların organik madde içermediği kabul edilmelidir. Buna göre; hafif organik kirletici oranı silika kumuna göre yüksek olan ADK'nın belli ikame oranında silika kumu ile karıştırılarak hazır betonda ince agrega olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

6.4.1.4 Genel değerlendirme

"TS 706 EN 12620+A1:2009-Beton agregaları" standardına göre silika kumu (doğal kum) ve ADK'ya ait geometrik, fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 6.42'de toplu olarak verilmiştir.

ADK'nın silika kumuna göre metilen mavisi değeri ve hafif organik kirletici içeriği yüksek, kum eşdeğeri düşük tespit edilmiş olup potansiyel tehlike arz edebilir agrega olarak saptanmıştır. Ancak, ADK'nın belli ikame oranında silika kumu ile karıştırılması suretiyle, hazır betonda ince agrega olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

Çizelge 6.42 : Agrega özelliklerinin TS 706 EN 12620+A1:2009 standardına göre karşılaştırılması.

Parametre	Silika kumu	ADK
Agrega türü	İnce agrega	İnce agrega
A) Geometrik özellikler		
Tane sınıfı (büyüklüğü) (mm)	0-4 (d/D=0/4)	0-4 (d/D=0/4)
Tane büyüklüğü dağılımı (granülometri)	Çizelge 6.27'de verilmiştir.	
Çok ince malzemenin içeriği (%)	2,27	13,2
Çok ince malzeme kalitesi-kum eşdeğeri	89,09	32
Çok ince malzeme kalitesi-metilen mavisi (MB) değeri (g boya/100 g numune)	0,08	0,85
B) Fiziksel özellikler		
Tane yoğunluğu (kg/m ³)	2650-2700	2510
Su emme oranı (%)	0,7	0,9
Gevşek yığın yoğunluğu (kg/m ³)	1390	1160
Kuruma büzülmesi (%)	0,02-0,03	0,054
Alkali-silika reaktivliği	Tehlikesiz	Potansiyel tehlike arz edebilir
C) Kimyasal Özellikler		
Suda çözünebilir klorür iyonu içeriği (%)	0,06	0,09
Asitte çözünebilir sülfat içeriği (%ağ.)	0,02-0,03	0,15
Toplam kükürt içeriği (%ağ.)	0,04-0,06	0,11
Asitte çözünebilir sülfid içeriği (%ağ.)	0,03	0,10
Betonun priz alma ve sertleşme hızını değiştiren bileşenler	Çizelge 6.41'de verilmiştir.	

6.4.2 Taze beton özelliklerine ilişkin sonuçlar

Pilot ölçekli S/S çalışması ile C25/30 sınıfı hazır beton üretiminde kullanılan ince ve iri agregaların tane boyutları ve bazı fiziksel özellikleri Çizelge 6.43'te verilmiştir:

Çizelge 6.43 : Agregaların tane boyutları ve bazı fiziksel özellikleri.

Malzeme	Tane boyutu (mm)	Yoğunluk (kg/m ³)	Su emme (%)
Mıcır No 1 (Yıkanmamış)	5-12	2700-2750	0,4
Mıcır No 2	12-22,5	2700-2750	0,4
Taş tozu (Yıkanmış)	0-5	2700-2750	0,4
Silika kumu	0-4	2650-2700	0,7

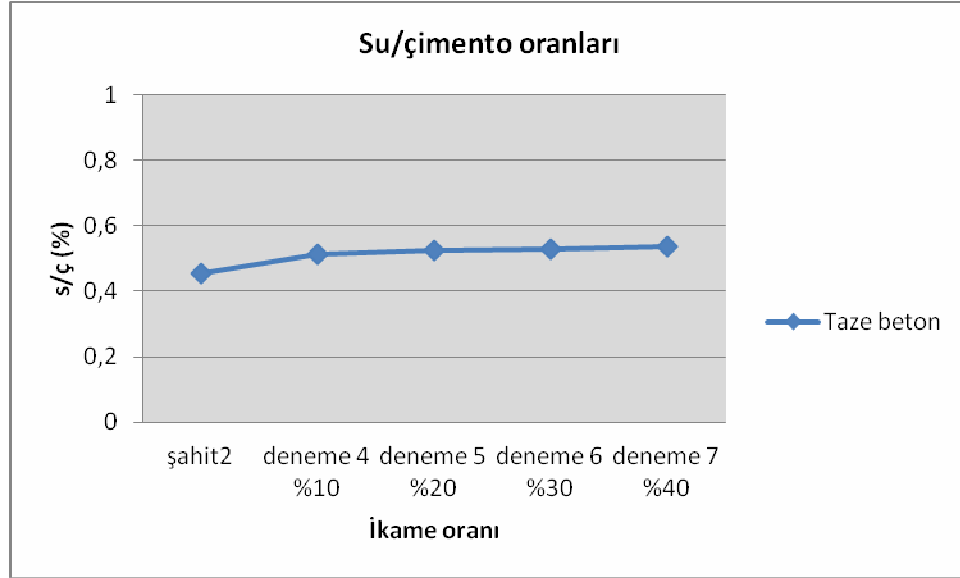
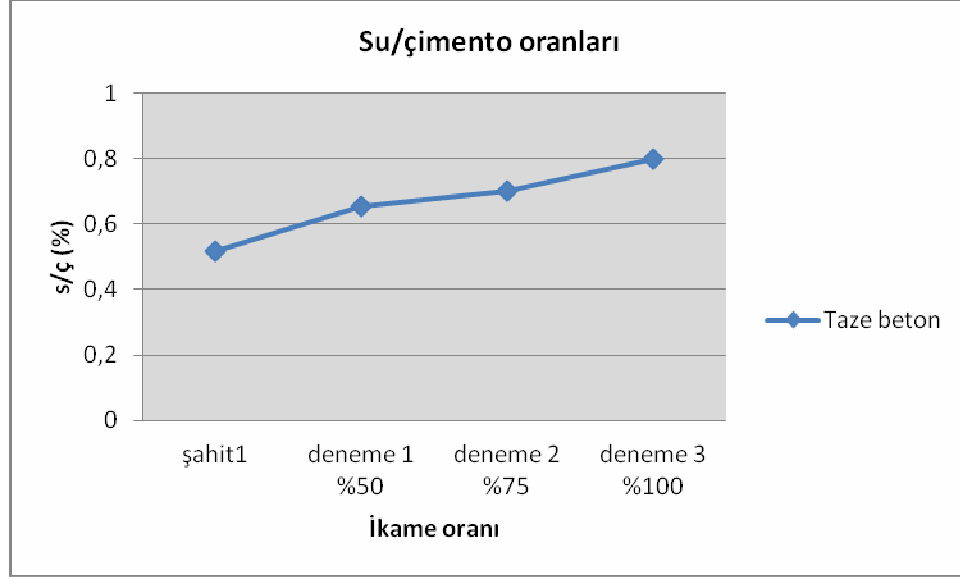
6.4.2.1 Çökme (slamp) testi sonuçları

İki şahit ve yedi farklı ikame oranına göre hazırlanan taze betonların çökme değerleri Çizelge 6.44'te verilmiştir. Aynı çökme sınıfı (S4 sınıfı) için ikame oranı arttıkça su/çimento (s/ç) (%) oranlarında yükselme gözlenmiştir. Bunun nedeni, ADK yapısındaki ince partiküller (kil, safsızlık vb.) nedeniyle taze betonun akışkanlığının azalması ve su ihtiyacının artmasıdır. Farklı ikame oranları için s/ç (%) oranları Şekil 6.15'te verilmiştir:

Çizelge 6.44 : Farklı ikame oranlarına göre taze beton çökme deneyi sonuçları.

Numune	Çökme (slamp) değeri (cm)	Numune	Çökme (slamp) değeri (cm)
Şahit 1	19,0	Şahit 2	19,0
Deneme 1	18,0	Deneme 4	18,0
Deneme 2	19,5	Deneme 5	20,0
Deneme 3	19,0	Deneme 6	19,5
		Deneme 7	20,0

İlk denemelerde (Deneme 1-3) ikame oranı arttıkça s/ç (%) oranlarında ciddi yükselme olmasına rağmen ikinci denemelerde (Deneme 4-7) kayda değer bir artış gözlenmemiştir.



Şekil 6.15 : Farklı ikame oranlarına göre su/çimento oranları (%).

6.4.2.2 Birim ağırlık testi sonuçları

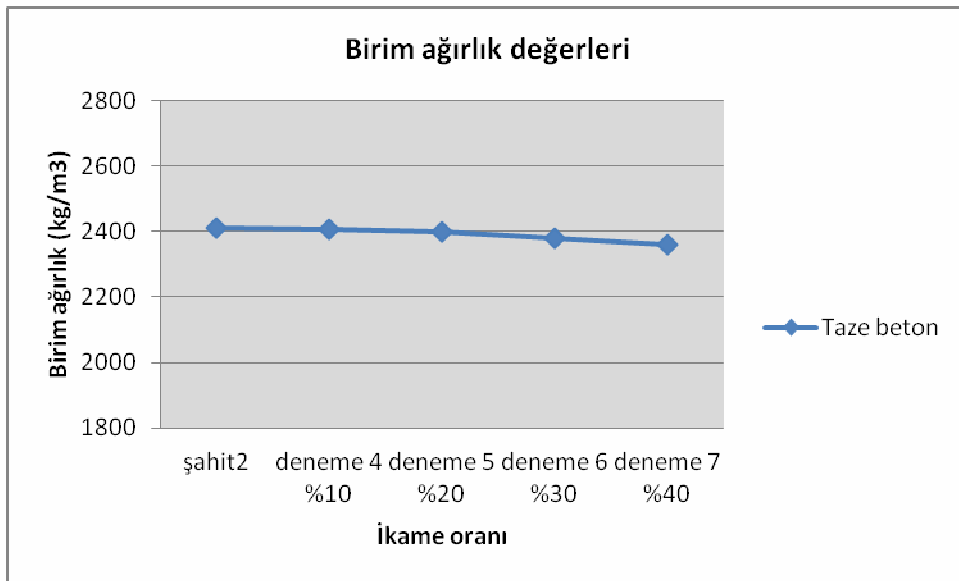
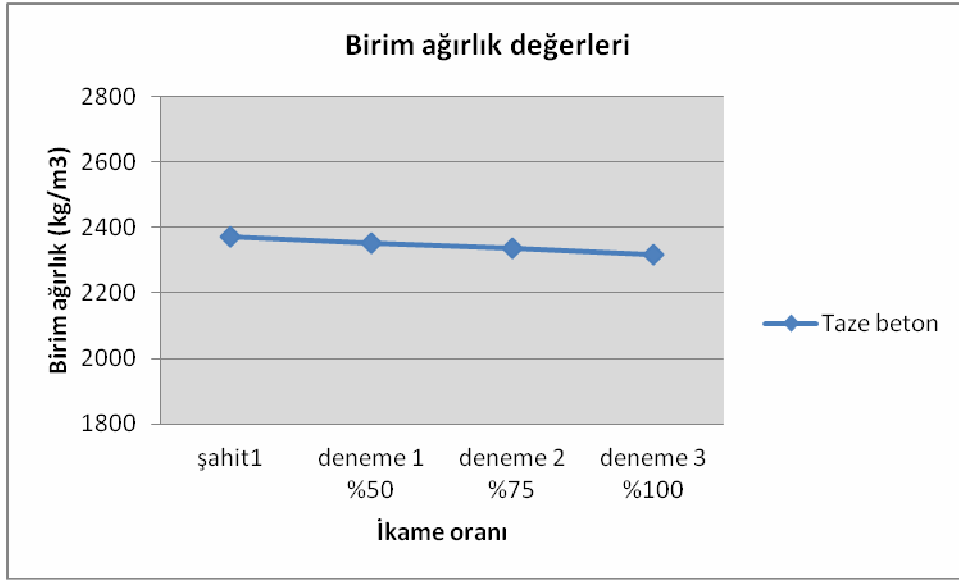
İki şahit ve yedi farklı ikame oranına göre hazırlanan taze betonların birim ağırlıkları Çizelge 6.45'te verilmiştir.

Betonun birim ağırlığının düşük veya yüksek olması, betonu oluşturan malzemelerin özelliklerine ve beton içerisinde yer alan boşluk miktarına bağlıdır. Özgül ağırlığı yüksek olan agregaların oluşturduğu betonun birim ağırlığı da yüksektir. Taze betonun birim ağırlığının bilinmesi ve ölçülmesi, beton karışım hesapları için gerekli olduğu gibi, üretilen betonun kalitesini kontrol etmek amacıyla sıkça uygulanan bir

Çizelge 6.45 : Farklı ikame oranlarına göre taze beton birim ağırlık deney sonuçları.

Numune	Birim ağırlık (kg/m ³)	Numune	Birim ağırlık (kg/m ³)
Şahit 1	2370	Şahit 2	2410
Deneme 1	2353	Deneme 4	2406
Deneme 2	2335	Deneme 5	2400
Deneme 3	2318	Deneme 6	2378
		Deneme 7	2361

işlemdir. Taze betonun birim ağırlığı, normal ağırlıklı agreganın kullanıldığı betonlar için 2200-2450 kg/m³ değerindedir (Erdoğan, 2007).



Şekil 6.16 : Farklı ikame oranlarına göre birim ağırlık değerleri.

Karışımların birim ağırlık değerlerinde kayda değer bir değişim görülmemekle birlikte, ikame oranı arttıkça birim ağırlık değerlerinde azalma olduğu ve karışımdaki ADK miktarının birim ağırlık değerlerini olumsuz etkilediği gözlenmiştir (Şekil 6.16). Bunun nedeni, ADK'nın özgül ağırlığının silika kumuna oranla daha düşük olmasıdır.

6.4.2.3 Sıcaklık testi sonuçları

Taze betonda yapılan sıcaklık ölçümlerinde tüm ikame oranlarında sıcaklık değerleri 15-16°C olarak saptanmıştır.

6.4.3 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) işlemi tamamlanmış ürünün performans testi sonuçları

S/S çalışması tamamlanmış iki şahit ve yedi farklı ikame oranında (%10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100) ADK kullanılarak hazırlanmış ve sertleşmiş olan betonların performans etkilerini (fiziksel-mekanik özelliklerini) belirlemek üzere priz alma ve sonlanma süresi, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü, su emme oranı ve yoğunluk gibi özellikleri incelenmiştir.

6.4.3.1 Priz alma ve sonlanma sürelerinin tespit edilmesi

İki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan beton karışımların TS EN 196-3+A1:2010 standardına uygun olarak saptanan priz alma ve sonlanma süreleri Çizelge 6.46'da verilmiştir. Malzemelerin karılmasından hemen sonra plastik durumdaki bir betonda, plastiklik kayboluncaya kadar geçen sürenin uzunluğu (priz süresi), gerekenden daha uzun veya kısa olmamalıdır (Erdoğan, 2007).

Çizelge 6.46 : Farklı ikame oranlarına göre priz başlama ve sonlanma süreleri.

Deneme	Priz başlama süresi	Priz sonlanma süresi	Deneme	Priz başlama süresi	Priz sonlanma süresi
Şahit 1	4 sa. 20 dk.	7 sa. 20 dk.	Şahit 2	4 sa. 20 dk.	7 sa. 20 dk.
Deneme 1	4 sa. 25 dk.	7 sa. 25 dk.	Deneme 4	4 sa. 30 dk.	7 sa. 30 dk.
Deneme 2	4 sa. 35 dk.	7 sa. 35 dk.	Deneme 5	4 sa. 40 dk.	7 sa. 30 dk.
Deneme 3	5 sa.	8 sa. 30 dk.	Deneme 6	4 sa. 50 dk.	7 sa. 45 dk.
			Deneme 7	5 sa. 10 dk.	8 sa.

İkame oranı arttıkça priz başlama ve priz sonlanma sürelerinde gecikme olduğu saptanmıştır. Bu durum, karışımdaki ADK miktarının artışına bağlı olarak priz başlama ve sonlanma sürelerinin uzaması anlamını taşımakta olup istenen bir sonuç değildir. ADK'daki karbon (kömür tozu) parçacıklarının ve çimento-agrega aderansındaki (beton-donatı kenetlenmesindeki) zayıflamanın, çimento hidrasyonunda gecikmeye sebep olduğu düşünülmektedir (Monosi ve diğ., 2010). Beton içerisindeki ikame oranında artışın, priz sonlanma süresine olumsuz etki yaptığı, arıtma çamuru ile yapılan S/S çalışmalarında da gözlenmiştir (Bayar, 2005).

Buna rağmen, çimento ve farklı ikame oranlarında ADK kullanılarak hazırlanan beton karışımların priz süreleri, şahit numunelerle elde edilen priz süreleri ile karşılaştırıldığında, priz başlama ve sonlanma sürelerinin şahit denemelerle benzer olduğu saptanmıştır.

6.4.3.2 Basınç dayanım testi sonuçları

S/S işleminde; iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan beton numuneleri için kenar uzunluğu 15 cm olan küp kalıplar kullanılmış, basınç dayanım testleri bu numuneler üzerinde İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'ye ait basınç dayanım test cihazı kullanılarak 7, 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri sonunda gerçekleştirilmiştir. S/S işlemi tamamlanan yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan hazır beton numunelerinin ve şahit hazır beton numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanım testlerinde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.47'de verilmektedir:

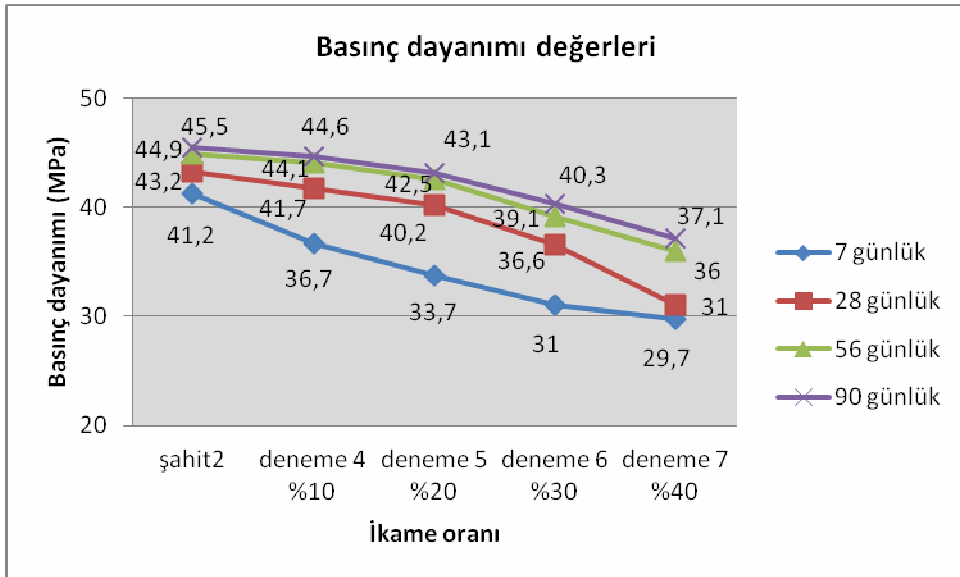
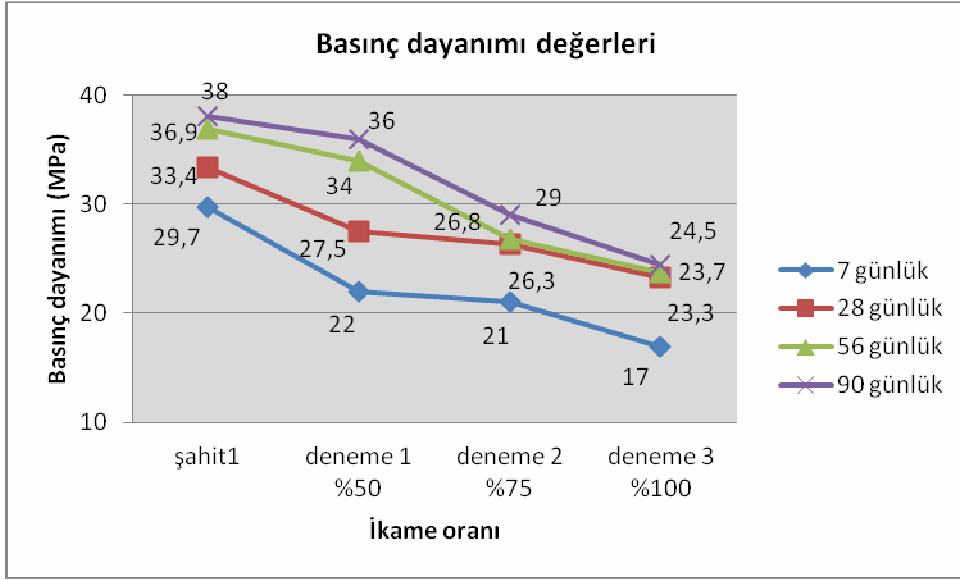
İlk denemelerde (Deneme 1-3) EPO515 klasik süper akışkanlaştırıcı kullanılarak C25/30 sınıfı hazır beton (normal beton) imal edilebilirliği araştırılmıştır. C25/30 sınıfı hazır beton için 28 günlük basınç dayanımlarının ≥ 30 MPa ve ≤ 37 MPa olması istenmektedir. Çizelge 6.47'deki ilk deneme ölçüm sonuçları incelendiğinde; %50, %75 ve %100 ikame oranında hazırlanan beton numunelerinde istenilen basınç dayanımı değerleri elde edilememiştir. Bu nedenle daha düşük ikame oranlarında ikinci denemeler gerçekleştirilmiştir. İkinci denemelerde (Deneme 4-7) su kesmesi daha yüksek ve daha etkin bir süper akışkanlaştırıcı olan EPO SP954 kullanıldığı için, C25/30 sınıfı hazır beton reçetesi ile C30/37 sınıfı hazır beton değerlerine ulaşılmıştır. C30/37 sınıfı hazır beton için 28 günlük basınç dayanımlarının ≥ 37 MPa ve ≤ 45 MPa olması istenmektedir.

Çizelge 6.47 : Farklı ikame oranlarına göre basınç dayanım testi sonuçları.

Deneme	Basınç dayanımı, MPa			
	7 günlük	28 günlük	56 günlük	90 günlük
Şahit 1	29,7	33,4	36,9	38,0
Deneme 1	22,0	27,5	34,0	36,0
Deneme 2	21,0	26,3	26,8	29,0
Deneme 3	17,0	23,3	23,7	24,5
Şahit 2	41,2	43,2	44,9	45,5
Deneme 4	36,7	41,7	44,1	44,6
Deneme 5	33,7	40,2	42,5	43,1
Deneme 6	31,0	36,6	39,1	40,3
Deneme 7	29,7	31,0	36,0	37,1

Çizelge 6.47'deki ikinci deneme ölçüm sonuçları incelendiğinde; ikame oranı arttıkça, basınç dayanım değerlerinde azalma olduğu, karışımdaki ADK miktarının basınç dayanımını olumsuz etkilediği gözlenmiştir (Şekil 6.17). Benzer sonuçlar Monosi ve diğ, (2010), Khatib ve diğ, (2010), Siddique ve diğ, (2011) ve Khatib ve Ellis (2001) tarafından da ortaya konulmuştur.

ADK arttıkça basınç dayanım değerlerinin azalmasının sebebi, küçük parçacıkların daha fazla yüzey alanına sahip olmasından ötürü su-çimento jel oluşumunu azaltması ve bu yüzden agregalarla çimento hamuru arasında uygun bir bağlanma gerçekleşmemesidir. Ayrıca ADK'da çok ince toz halindeki karbon ve kil bulunması da beton numunelerindeki basınç dayanımını azaltmaktadır (Mroueh ve Wahlstrom, 2002; Naik ve diğ, 2003; Siddique ve diğ, 2009). Ancak %10 ve %20 ikame oranına sahip ölçüm sonuçlarına bakıldığında, basınç dayanım değerlerinin şahit deneme numunesine ait değerle paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel işlemlerden gelebilecek belirsizlikler de düşünüldüğünde, %10 ve %20 ikame oranı sonuçları kabul edilebilir aralıklar içerisinde. Şekil 6.17 incelendiğinde; %20 ikame oranından daha yüksek ikame oranı denemelerinde, basınç dayanımı değerlerinde düşüş olduğu saptanmıştır.



Şekil 6.17 : Farklı ikame oranlarında basınç dayanım testi sonuçları.

6.4.3.3 Yarmada çekme dayanım testi sonuçları

S/S işleminde; iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanan beton numuneleri için 15 cm x 15 cm x 15 cm küp kalıplar kullanılmış, yarmada çekme dayanım testleri bu numuneler üzerinde İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'ye ait çekme dayanım test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. S/S işlemi tamamlanan yedi farklı ikame oranına sahip hazır beton karışımı ve şahit hazır beton numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük yarmada çekme dayanım testlerinde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.48'te verilmektedir:

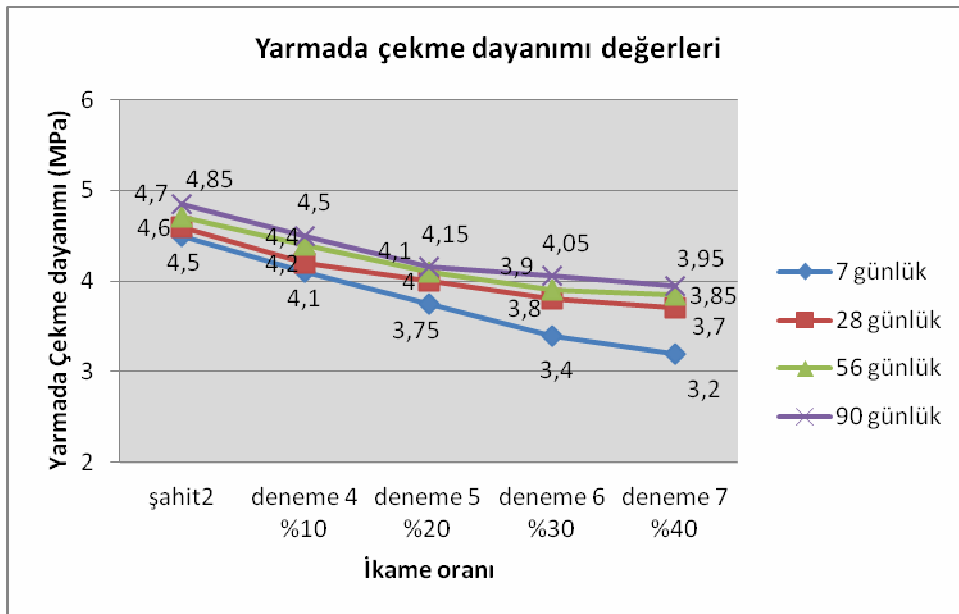
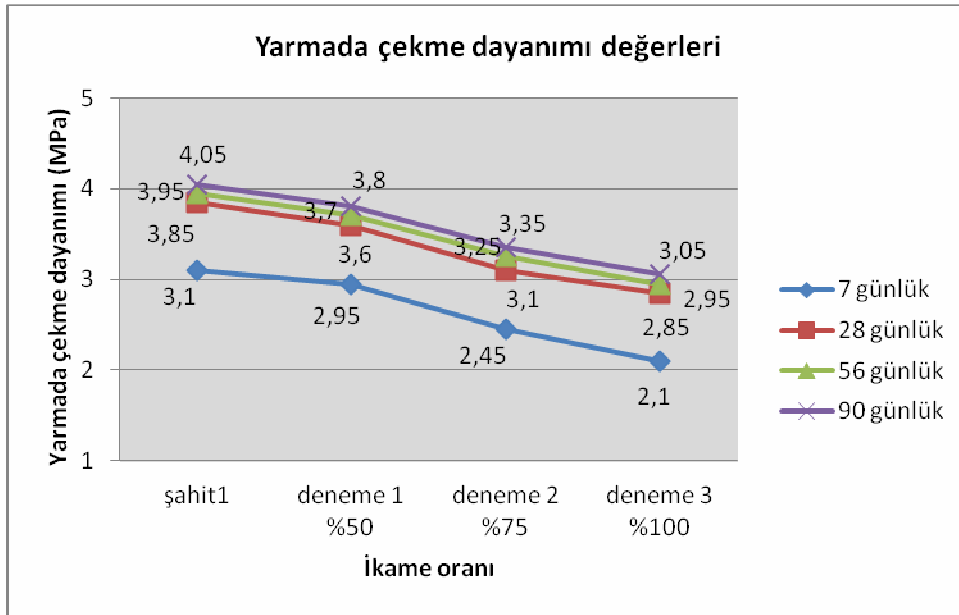
Çizelge 6.48 : Farklı ikame oranlarına göre yarmada çekme dayanım testi sonuçları.

Deneme	Yarmada çekme dayanımı, MPa			
	7 günlük	28 günlük	56 günlük	90 günlük
Şahit 1	3,10	3,85	3,95	4,05
Deneme 1	2,95	3,60	3,70	3,80
Deneme 2	2,45	3,10	3,25	3,35
Deneme 3	2,10	2,85	2,95	3,05
Şahit 2	4,50	4,60	4,70	4,85
Deneme 4	4,10	4,20	4,40	4,50
Deneme 5	3,75	4,00	4,10	4,15
Deneme 6	3,40	3,80	3,90	4,05
Deneme 7	3,20	3,70	3,85	3,95

İkame oranı arttıkça yarmada çekme dayanım değerlerinde sistematik azalma olduğu, karışımdaki ADK miktarının yarmada çekme dayanımını olumsuz etkilediği ve yarmada çekme dayanımı değerlerinin basınç dayanımı değerleriyle paralellik gösterdiği saptanmıştır (Şekil 6.18). Benzer sonuçlar Siddique ve diğ., (2011) tarafından da ortaya konulmuştur.

Ancak %10 ve %20 ikame oranına sahip ölçüm sonuçlarına bakıldığında, yarmada çekme dayanım değerlerinin şahit deneme numunesine ait değerle paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel işlemlerden gelebilecek belirsizlikler de düşünüldüğünde, %10 ve %20 ikame oranı sonuçları kabul edilebilir aralıklar içerisinde. Şekil 6.18 incelendiğinde; %20 ikame oranından daha yüksek ikame oranı denemelerinde yarmada çekme dayanım değerlerinde düşüş olduğu saptanmıştır.

ADK ile hazırlanan hazır beton numunelerinde hem basınç dayanımı hem de yarmada çekme dayanım değerlerinin şahit hazır beton numunelerindeki değerlerden daha düşük olması, ADK'da bulunan kilin, aderansı olumsuz etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Aderans, betonarmenin en önemli özelliklerinden biridir.



Şekil 6.18 : Farklı ikame oranlarında yarmada çekme dayanımı testi sonuçları.

6.4.3.4 Elastisite testi sonuçları

S/S işlemi tamamlanan yedi farklı ikame oranına sahip hazır beton karışımı ve şahit hazır beton numunelerinin hesap yoluyla elde edilen elastisite modülü sonuçları Çizelge 6.49'da verilmektedir:

Çizelge 6.49 : Farklı ikame oranlarına göre elastisite testi sonuçları.

Deneme	Elastisite modülü, MPa			
	7	28	56	90
	günlük	günlük	günlük	günlük
Şahit 1	31712	32782	33742	34034
Deneme 1	29244	31043	32951	33500
Deneme 2	28893	30667	30825	31502
Deneme 3	27401	29688	29822	30087
Şahit 2	34861	35361	35777	35922
Deneme 4	33689	34987	35583	35705
Deneme 5	32867	34606	35187	35336
Deneme 6	32095	33662	34322	34632
Deneme 7	31712	32095	33500	33796

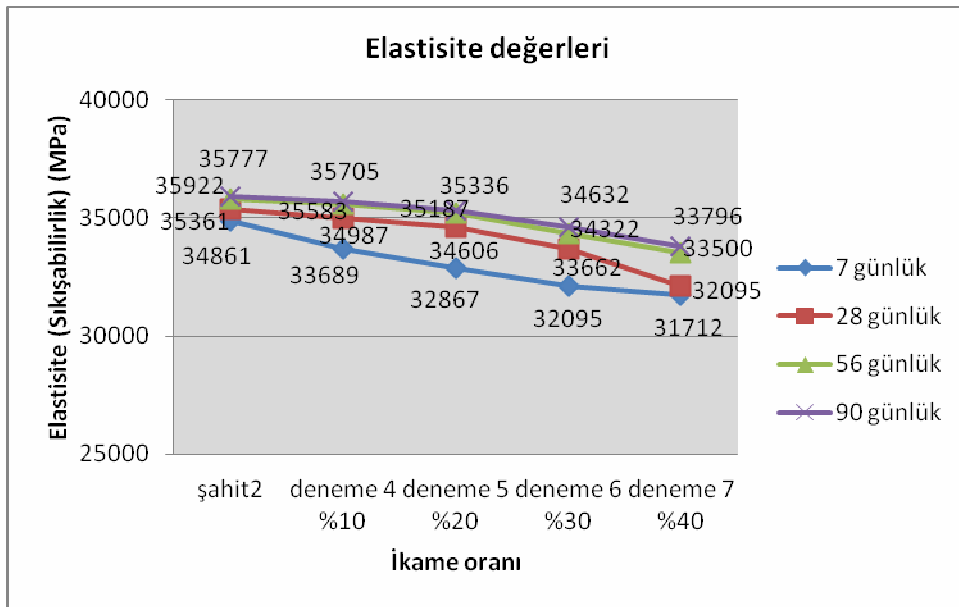
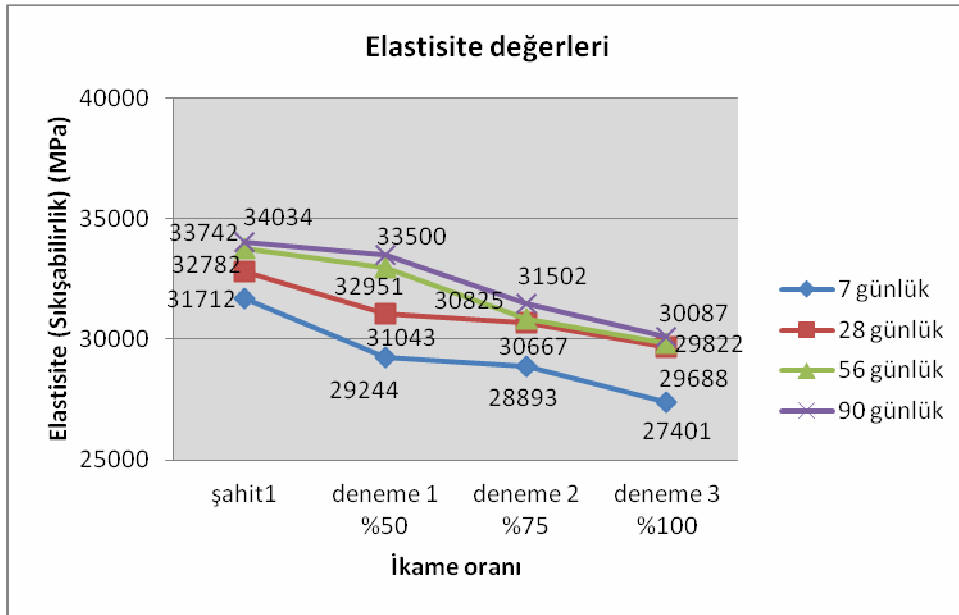
İkame oranı arttıkça elastisite değerlerinde azalma olduğu, karışımdaki ADK miktarının elastisiteyi olumsuz etkilediği saptanmıştır (Şekil 6.19). Benzer sonuçlar Monosi ve diğ. (2010) tarafından da ortaya konulmuştur.

Ancak %10 ve %20 ikame oranına sahip ölçüm sonuçlarına bakıldığında, elastisite değerlerinin şahit deneme numunesine ait değerle paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel işlemlerden gelebilecek belirsizlikler de düşünüldüğünde %10 ve %20 ikame oranı sonuçları kabul edilebilir aralıklar içerisinde. Şekil 6.19 incelendiğinde; %20 ikame oranından daha yüksek ikame oranı denemelerinde elastisite değerlerinde düşüş olduğu saptanmıştır.

6.4.3.5 Su emme oranı testi sonuçları

TS 2824 EN 1338:2005-04 (AC: 2009-02) standardına göre; zemin döşemesindeki beton kaplama blokları için su emme oranı $\leq$ %6 olmalıdır, bu oran hazır beton uygulamaları için de kullanılabilir.

S/S işlemi tamamlanan yedi farklı ikame oranına sahip hazır beton karışımı ve şahit hazır beton numunelerinin su emme oranı testlerinde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.50'de verilmektedir:

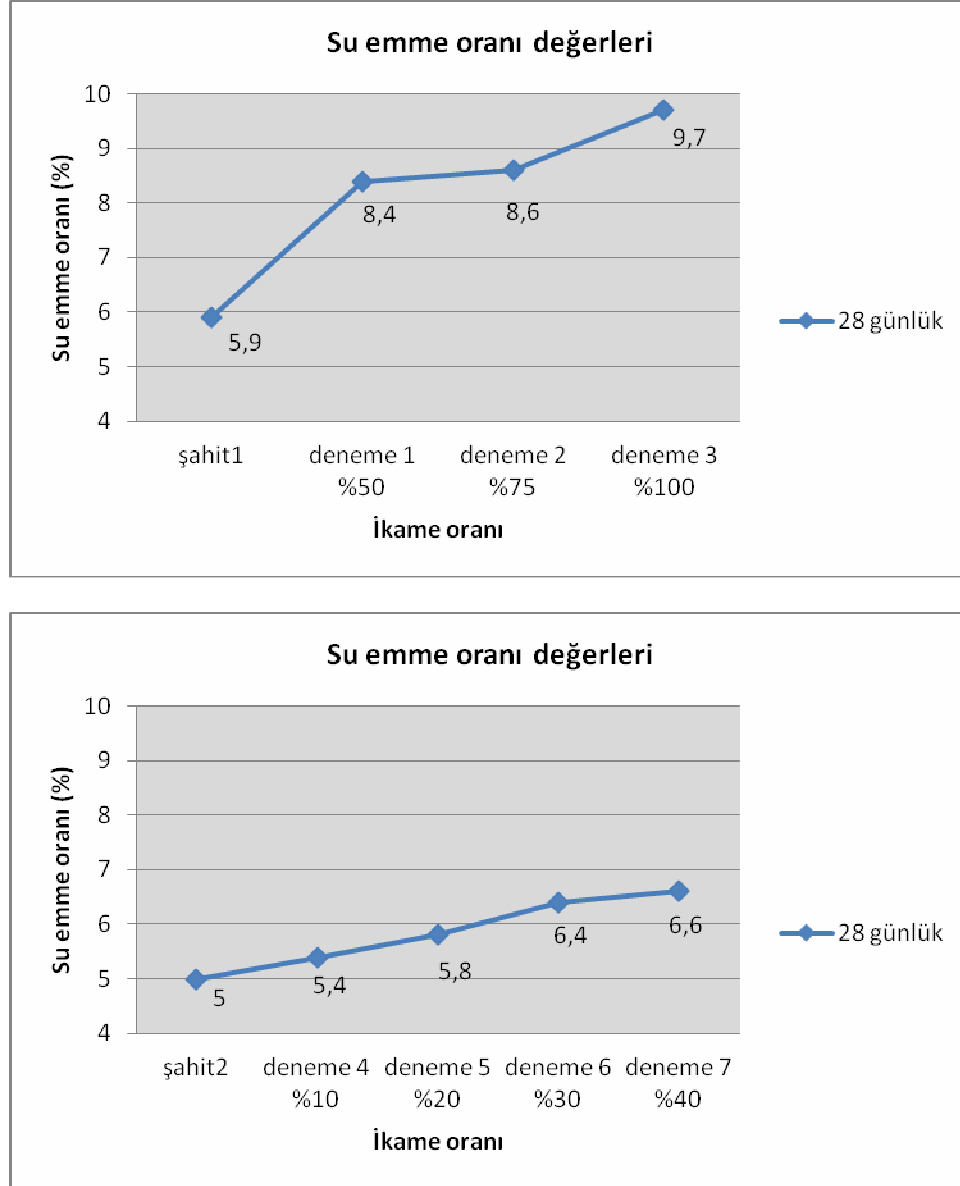


şekil 6.19 : Farklı ikame oranlarında elastisite testi sonuçları.

Çizelge 6.50 : Farklı ikame oranlarına göre su emme oranı testi sonuçları.

Deneme	Su emme oranı (%)	Deneme	Su emme oranı (%)
şahit 1	5,9	şahit 2	5,0
Deneme 1	8,4	Deneme 4	5,4
Deneme 2	8,6	Deneme 5	5,8
Deneme 3	9,7	Deneme 6	6,4
		Deneme 7	6,6

İkame oranı arttıkça su emme oranlarında ciddi yükselme olduğu, karışımdaki ADK miktarının su emme oranını olumsuz etkilediği gözlenmiştir (Şekil 6.20). Benzer sonuçlar Khatib ve diğ. (2010) tarafından da ortaya konulmuştur.



Şekil 6.20 : Farklı ikame oranlarında su emme oranı testi sonuçları.

ADK'nın hazır beton üretiminde kullanılması, hazır betondaki boşlukları arttırdığından ötürü, su emme oranının yükselmesine sebep olmuştur. Ancak %10 ve %20 ikame oranına sahip ölçüm sonuçlarına bakıldığında, su emme oranı değerlerinin şahit deneme numunesine ait değerle paralellik gösterdiği ve limit değer olan %6'dan düşük olduğu saptanmıştır. Deneysel işlemlerden gelebilecek belirsizlikler de düşünüldüğünde, %10 ve %20 ikame oranı sonuçları kabul edilebilir aralıklar içerisinde. Şekil 6.20 incelendiğinde; %20 ikame oranından daha yüksek

ikame oranı denemelerinde su emme oranlarında ciddi yükselme olduğu görülmüştür.

6.4.3.6 Yoğunluk testi sonuçları

S/S işlemi tamamlanan yedi farklı ikame oranına sahip hazır beton karışımı ve şahit hazır beton numunelerinin yoğunluk testlerinde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.51'de verilmektedir.

Çizelge 6.51 : Farklı ikame oranlarına göre yoğunluk testi sonuçları.

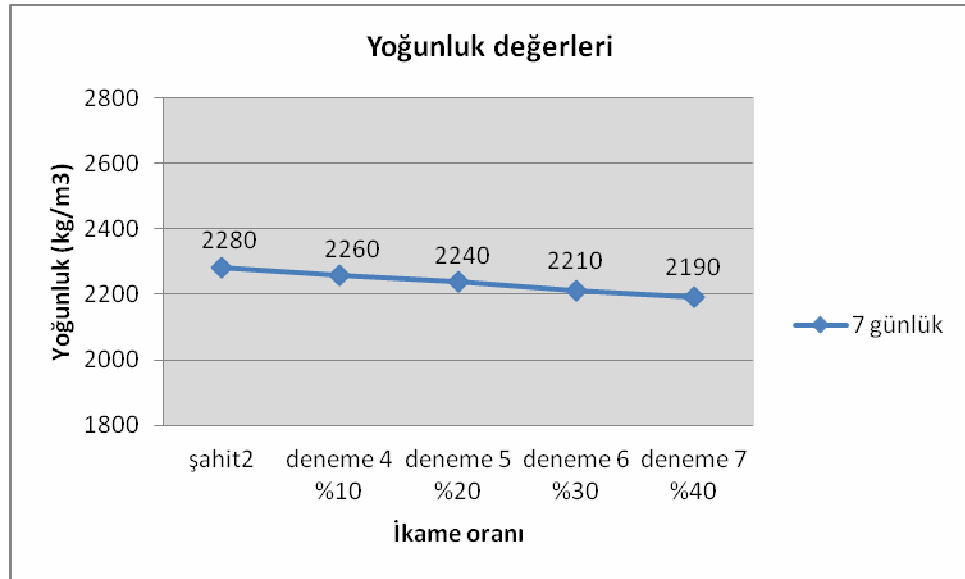
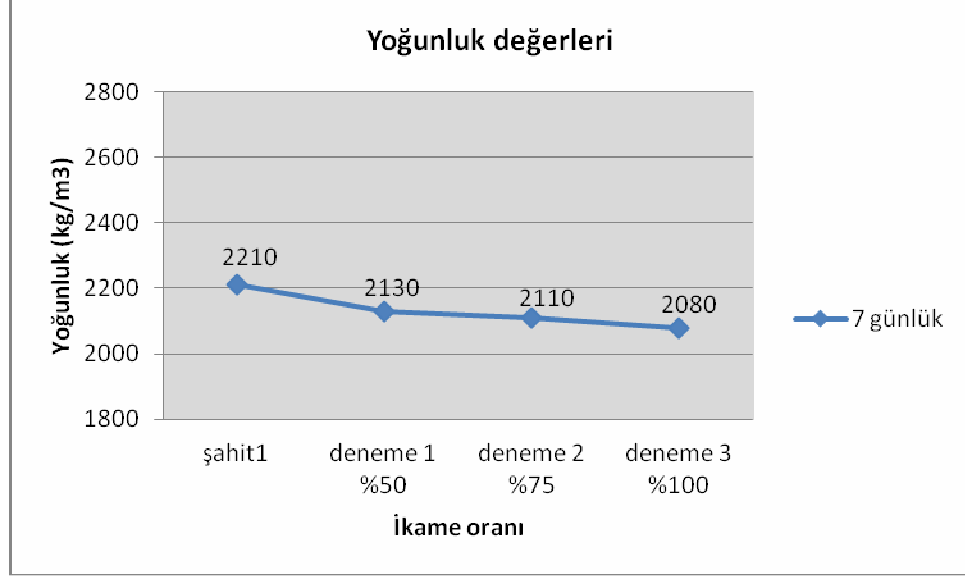
Deneme	Yoğunluk (kg/m ³)	Deneme	Yoğunluk (kg/m ³)
Şahit 1	2210	Şahit 2	2280
Deneme 1	2130	Deneme 6	2260
Deneme 2	2110	Deneme 7	2240
Deneme 3	2080	Deneme 8	2210
		Deneme 9	2190

Tüm ikame oranlarında elde edilen yoğunluk değerlerinin, "normal beton sınıfı" için verilen değer aralığında (2000-2600 kg/m³) olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, ölçüm sonuçlarına göre, ikame oranı arttıkça yoğunluk değerlerinde azalma olduğu, karışımdaki ADK miktarının yoğunluk değerini olumsuz etkilediği gözlenmiştir (Şekil 6.21). Bunun sebebi; ADK'daki safsızlıkların (kömür tozu, kil vb.) ve tozların varlığından ötürü beton karışımında kullanılan su miktarının artması ve ADK'nın silika kumuna göre yoğunluğunun daha az olmasıdır.

Sonuç olarak; S/S çalışması tamamlanmış iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak (%10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100) hazırlanmış ve dört farklı kür süresi (7, 28, 56 ve 90 gün) uygulanmış taze betonların ve sertleşmiş betonların tüm performans test sonuçları incelendiğinde; en uygun ikame oranının %20 olduğu sonucuna varılmıştır. Şahit hazır beton ve ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesi Şekil 6.22'de verilmiştir.

Ülkemizde sadece hazır beton üretimi için agrega ihtiyacı yıllık 140 milyon ton olup bu miktarın gelecek yıllarda daha da artacağı düşünülmektedir. Doğal kaynakları giderek tükenen ve standartlara uygun, temiz, kaliteli örneklerinin bulunması güç bir malzeme olan agregaların hazır beton sektöründeki stratejik önemi her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, ADK'nın hazır beton imalatında agregalarla birlikte

kullanılması, hazır beton sektöründe ileride yaşanması olası agrega ihtiyacının aşılmasına katkı sağlamış olacaktır.



Şekil 6.21 : Farklı ikame oranlarına göre yoğunluk değerleri.



Şekil 6.22 : a) Şahit hazır beton numunesi, b) %20 ikame oranındaki hazır beton numunesi

6.4.4 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) işlemi tamamlanmış ürünün çevresel etkilerinin belirlenmesi çalışmasında elde edilen sonuçlar

6.4.4.1 Sızma (liç) testi sonuçları

Katılaştırılmış beton numunelerin çevreye olabilecek etkilerinin belirlenmesi için eluata geçebilen Ni, Zn, toplam Cr, F⁻, TÇKM ve ÇOK ile orijinal katı üründe TOK kirleticilerinin inert atık olma özellikleri "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda belirtilen sınır değerler dikkate alınarak değerlendirilmiştir (Çizelge 6.52).

Çizelge 6.52 : Atıkların düzenli depolanmasına dair sınır değerler.

Parametre	Atık kabulü için sınır değerler (ADDDY-EK 2)		
	A) İnert atıkların depolanabilme kriterleri III. sınıf depolama tesisleri için sınır değerler	B) Tehlikesiz atıkların depolanabilme kriterleri II. sınıf depolama tesisleri için sınır değerler	C) Tehlikeli atıkların depolanabilme kriterleri I. sınıf depolama Tesisleri için sınır değerler
(*)Ni (mg/L)	0,04	1	4
(*)Zn (mg/L)	0,4	5	20
(*)Top. Cr (mg/L)	0,05	1	7
(*)F ⁻ (mg/L)	1	15	50
(*)TÇKM (mg/L)	400	6000	10000
(*)ÇOK (mg/L)	50	80	100
(*)TOK (mg/kg)	30000 (%3)	50000 (%5)	60000 (%6)

6.4.4.1.1 pH değeri 5,5 olan su ile yapılan sızma (liç) testi sonuçları

pH değeri 5,5 olan su ile yapılan sızma (liç) testi sonuçlarına göre, ADK'dan gelebilecek eluatta Zn, Ni, toplam Cr, TÇKM, F⁻, ÇOK ve pH değerleri ile orijinal katı üründe TOK değerinin inert atık olarak değerlendirilebilecek özellikler taşıdığı saptanmıştır. İkame oranı arttıkça TOK değeri artmakla birlikte, bütün beton numunelerindeki TOK değerleri ADK'daki TOK değerinden daha düşük çıkmıştır (Çizelge 6.53). Buna göre; S/S yönteminin organik madde sızmasını önlediği söylenebilir. Bütün beton numunelerinde hedef metallerin (Ni, Zn, toplam Cr), F⁻, TÇKM ve ÇOK eluat değerlerinin standartlardan düşük olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, S/S prosesinin başarıyla tamamlandığı söylenebilir. Hazır beton karışımı olarak Portland çimentosu, ADK ve diğer agregalarla gerçekleştirilen solidifikasyon

ürünü olan beton malzemenin çevreyi kirletici özelliğinin bulunmadığı tespit edilmiştir. Suyla yapılan sızma testi sonucunda, hazır beton üretimi için kullanılan reçeteye göre oluşturulan iki şahit numune ve yedi farklı ikame oranında hazırlanan solidifikasyon ürünlerinin eluatlarında ADK'dan gelebilecek kirleticiler (Ni, Zn, toplam Cr, F⁻, TÇKM, ÇOK, TOK, pH) açısından farklılık tespit edilememiştir (Çizelge 6.53).

Çizelge 6.53 : pH değeri 5,5 olan su ile yapılan sızma testine ait analiz sonuçları.

Deneme	Ni (µg/L)	Zn (µg/L)	Cr (µg/L)	F ⁻ (mg/L)	TÇKM (mg/L)	ÇOK (mg/L)	TOK (mg/kg)	Eluat pH'ı
Şahit 1	6,89	21	35	<0,2	<14,3	11,5	21318	12,50
Deneme 1	3,90	29	37	<0,2	<14,3	9,7	35299	12,40
Deneme 2	2,88	26	31	<0,2	<14,3	12,0	40514	12,42
Deneme 3	4,34	27	40	<0,2	<14,3	12,5	44930	12,44
Şahit 2	7,41	20	36	<0,2	<14,3	12,8	20690	12,51
Deneme 4	<5,00	14	39	<0,2	<14,3	10,1	24443	12,43
Deneme 5	2,93	13	29	<0,2	<14,3	10,3	27967	12,43
Deneme 6	3,78	22	32	<0,2	<14,3	10,2	29504	12,49
Deneme 7	1,86	14	34	<0,2	<14,3	9,3	31645	12,49

6.4.4.1.2 pH değeri 4 olan su ile yapılan sızma (liç) testi sonuçları

pH değeri 4 olan asetik asit (CH₃COOH) ilave edilmiş su (asit yağmurlarını temsil eden su) ile yapılan sızma (liç) testi sonuçlarına göre, ADK'dan gelebilecek Zn, Ni, toplam Cr, F⁻, TÇKM, ÇOK ve pH eluat değerleri ile TOK değerinin inert atık olarak değerlendirilebilecek özellikler taşıdığı saptanmıştır. İkame oranı arttıkça TOK değeri artmakla birlikte, bütün beton numunelerindeki TOK değerleri ADK'daki TOK değerinden daha düşük çıkmıştır (Çizelge 6.54). Buna göre; S/S yönteminin organik madde sızmasını önlediği söylenebilir. Bütün beton numunelerinde hedef metallerin (Ni, Zn, toplam Cr), F⁻, TÇKM ve ÇOK eluat değerlerinin standartlardan düşük olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, S/S prosesinin başarıyla tamamlandığı söylenebilir. Hazır beton karışımı olarak Portland çimento, ADK ve diğer agregalarla gerçekleştirilen solidifikasyon ürünü olan beton malzemenin çevreyi kirletici özelliğinin bulunmadığı tespit edilmiştir. pH değeri 4 olan asetik asit (CH₃COOH) ilave edilmiş suyla yapılan sızma testi sonucunda, hazır beton üretimi için kullanılan reçeteye göre oluşturulan iki şahit numune ve yedi farklı ikame oranında hazırlanan

solidifikasyon ürünlerinin eluatlarında ADK'dan gelebilecek kirleticiler (Ni, Zn, toplam Cr, F⁻, TÇKM, ÇOK, TOK, pH) açısından farklılık tespit edilememiştir (Çizelge 6.54).

Çizelge 6.54 : pH değeri 4 olan su ile yapılan sızma testine ait analiz sonuçları.

Deneme	Ni (µg/L)	Zn (µg/L)	Cr (µg/L)	F ⁻ (mg/L)	TÇKM (mg/L)	ÇOK (mg/L)	TOK (mg/kg)	Eluat pH'ı
Şahit 1	16,53	24	38	<0,2	<14,3	29,2	21318	7,83
Deneme 1	19,55	27	40	<0,2	<14,3	38,6	35299	7,40
Deneme 2	14,68	23	39	<0,2	<14,3	36,4	40514	7,46
Deneme 3	<5,00	11	41	<0,2	<14,3	41,5	44930	7,54
Şahit 2	17,26	27	39	<0,2	<14,3	30,1	20690	7,86
Deneme 4	29,65	51	35	<0,2	<14,3	27,6	24443	7,28
Deneme 5	21,20	20	36	<0,2	<14,3	35,8	27967	7,27
Deneme 6	<5,00	9	40	<0,2	<14,3	39,3	29504	7,30
Deneme 7	19,47	80	37	<0,2	<14,3	28,2	31645	7,32

6.4.4.1.3 pH değeri 9 olan su ile yapılan sızma (liç) testi sonuçları

pH değeri 9 olan sodyum hidroksit (NaOH) ilave edilmiş su (yağmur suyunu temsil eden su) ile yapılan sızma (liç) testi sonuçlarına göre, ADK'dan gelebilecek Zn, Ni, toplam Cr, TÇKM, F⁻, ÇOK ve pH eluat değerleri ile TOK değerinin inert atık olarak değerlendirilebilecek özellikler taşıdığı saptanmıştır. İkame oranı arttıkça TOK değeri artmakla birlikte bütün beton numunelerindeki TOK değerleri ADK'daki TOK değerinden daha düşük çıkmıştır (Çizelge 6.55). Buna göre; S/S yönteminin organik madde sızmasını önlediği söylenebilir. Bütün beton numunelerinde hedef metallerin (Ni, Zn, toplam Cr), F⁻, TÇKM ve ÇOK eluat değerlerinin standartlardan düşük olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, S/S prosesinin başarıyla tamamlandığı söylenebilir. Hazır beton karışımı olarak Portland çimento, ADK ve diğer agregalarla gerçekleştirilen solidifikasyon ürünü olan beton malzemenin çevreyi kirletici özelliğinin bulunmadığı tespit edilmiştir. Yağmur suyu ile toprak yüzeyinin yıkanması sonucu yağmur suyunun alabileceği en yüksek değer olan pH 9 olan saf suyla yapılan sızma testi sonucunda, hazır beton üretimi için kullanılan reçeteye göre oluşturulan iki şahit numune ve yedi farklı ikame oranında hazırlanan solidifikasyon ürünlerinin eluatlarında ADK'dan gelebilecek kirleticiler (Ni, Zn, toplam Cr, F⁻, TÇKM, ÇOK, TOK, pH) açısından farklılık tespit edilememiştir (Çizelge 6.55).

Çizelge 6.55 : pH değeri 9 olan su ile yapılan sızma testine ait analiz sonuçları.

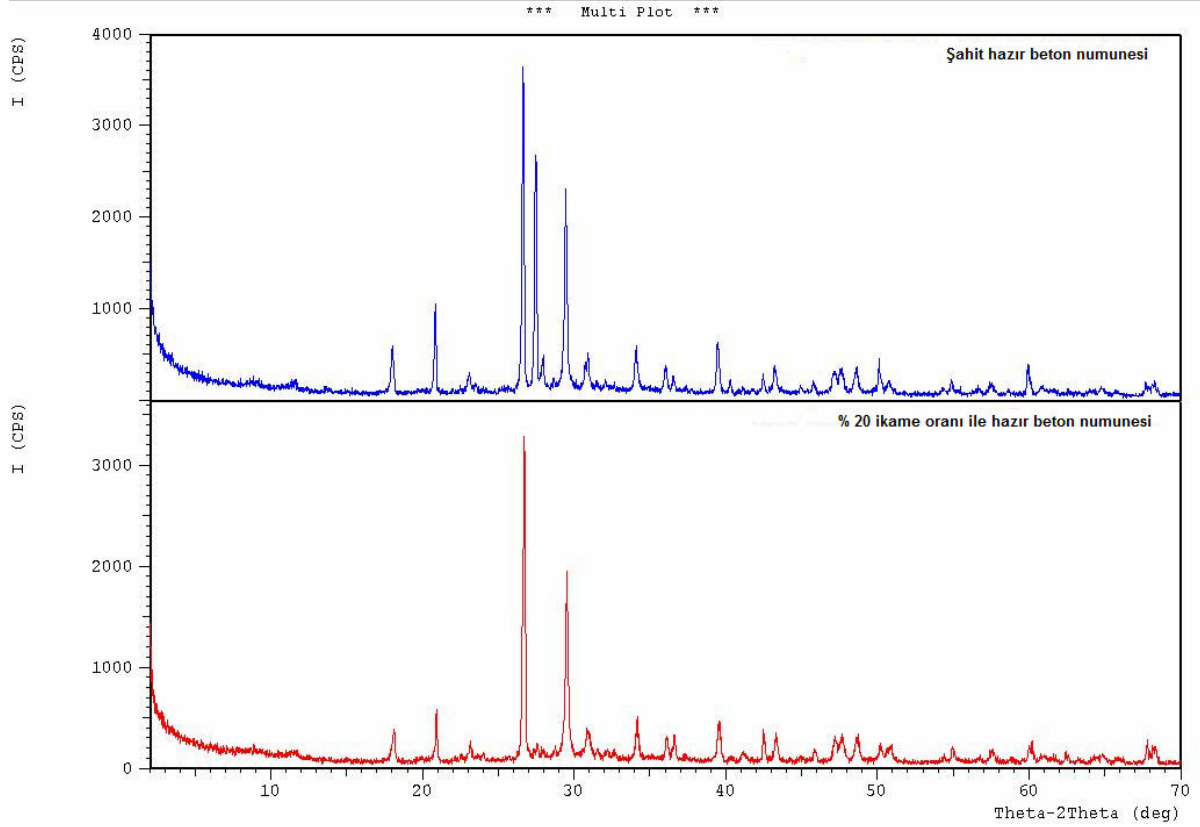
Deneme	Ni (µg/L)	Zn (µg/L)	Cr (µg/L)	F ⁻ (mg/L)	TÇKM (mg/L)	ÇOK (mg/L)	TOK (mg/kg)	Eluat pH'ı
Şahit 1	5,54	40	33	<0,2	<14,3	16,5	21318	12,52
Deneme 1	3,45	42	32	<0,2	<14,3	12,5	35299	12,49
Deneme 2	2,44	30	35	<0,2	<14,3	12,1	40514	12,49
Deneme 3	2,30	37	40	<0,2	<14,3	11,6	44930	12,47
Şahit 2	6,52	42	36	<0,2	<14,3	17,7	20690	12,51
Deneme 4	2,97	21	40	<0,2	<14,3	12,1	24443	12,55
Deneme 5	4,04	21	35	<0,2	<14,3	11,4	27967	12,59
Deneme 6	2,25	42	32	<0,2	<14,3	9,4	29504	12,57
Deneme 7	2,06	41	33	<0,2	<14,3	9,9	31645	12,54

Sonuç olarak; pH 4, pH 5,5 ve pH 9 aralığında yapılan sızma (liç) testi sonuçlarına göre, sırasıyla, %10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100 ikame oranlarında hazırlanan tüm solidifikasyon ürünlerinin doğa şartlarında ADK'dan kaynaklı çevre kirliliğine sebebiyet vermeyecek nitelikte olduğu saptanmıştır.

6.4.4.2 Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) işlemi tamamlanmış ürünün mikro-yapısal özelliklerinin incelenmesi çalışmasında elde edilen sonuçlar

6.4.4.2.1 X-ışını difraksiyon spektrometresi (XRD) ile yapı belirleme çalışmasının sonuçları

XRD cihazıyla yapılan kalitatif analizde; şahit hazır beton ve ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numuneleri incelenmiş ve her iki üründe benzer mikro-yapısal özelliklere rastlanmıştır (Şekil 6.23).



Şekil 6.23 : Şahit hazır beton ve %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerine ait XRD grafiği.

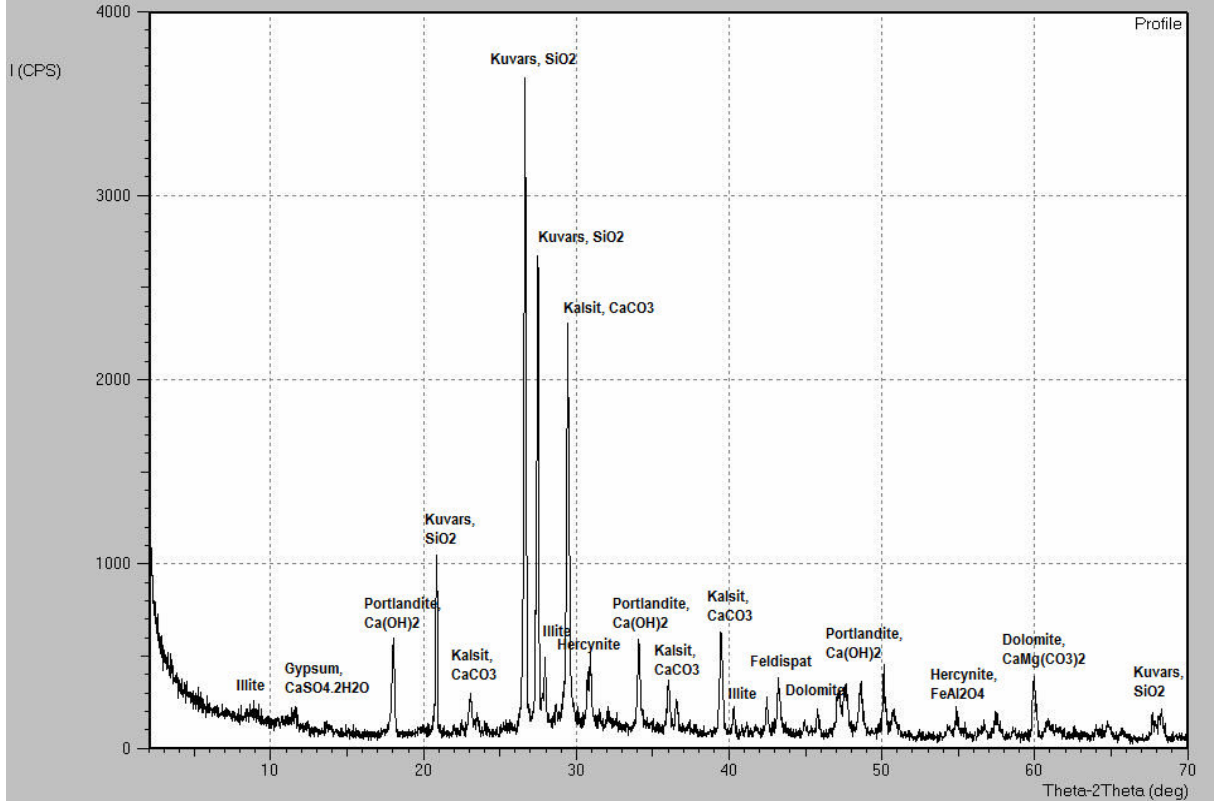
Şahit hazır beton ve %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerine ait XRD cihazıyla belirlenen kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.56'da verilmiştir:

Çizelge 6.56 : Hazır beton numuneleri kimyasal analiz sonuçları.

Parametre	Şahit hazır beton numunesi	%20 ikame oranına sahip hazır beton numunesi
İnorganik madde cinsi	1) Kuvars, SiO_2 2) Kalsit, CaCO_3 3) Portlandit, Ca(OH)_2 4) Dolomit, $\text{CaMg(CO}_3)_2$ 5) Feldispat 6) Hersinit, FeAl_2O_4 7) Jips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 8) Illit $(\text{K,H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	1) Kuvars, SiO_2 2) Kalsit, CaCO_3 3) Portlandit, Ca(OH)_2 4) Dolomit, $\text{CaMg(CO}_3)_2$ 5) Feldispat 6) Hersinit, FeAl_2O_4 7) Jips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

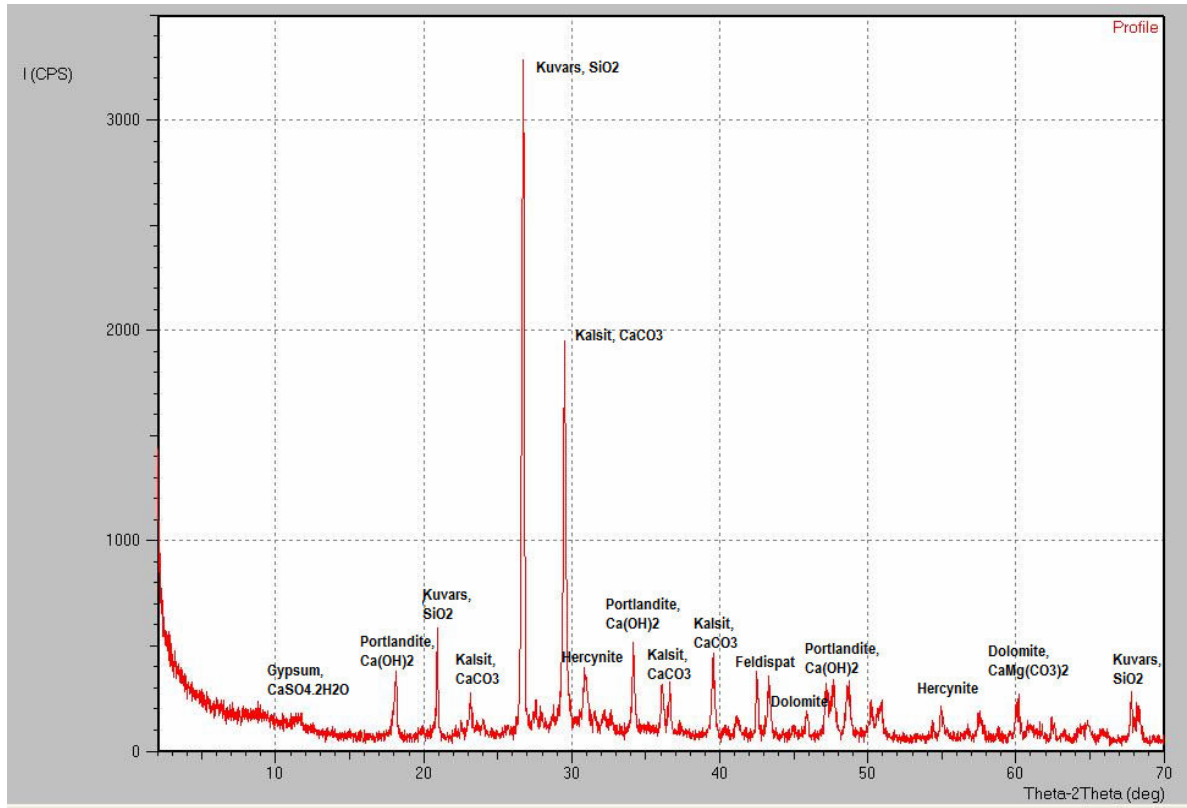
ADK ilave edilmeden hazırlanan şahit hazır beton numunesinin X-ışını difraksiyonu sonucunda beton malzemenin içerisinde bulunan maddeler çoktan aza doğru, sırasıyla, kuvars (SiO_2), kalsit (CaCO_3), portlandit (Ca(OH)_2), hersinit (FeAl_2O_4),

jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), illit ($\text{K}_2\text{H}_3\text{OAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), feldispat olarak saptanmıştır (Şekil 6.24).



Şekil 6.24 : Şahit hazır beton numunesine ait X-ışınımı difraksiyonu.

ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesinin X-ışını difraksiyonu sonucunda beton malzemenin içerisinde bulunan maddeler çoktan aza doğru, sırasıyla, kuvars (SiO_2), kalsit (CaCO_3), portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), hersinit (FeAl_2O_4), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), feldispat olarak saptanmıştır (Şekil 6.25).



Şekil 6.25 : %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesine ait X-ışınımı difraksiyonu.

Şahit hazır beton ve ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerine ait XRD cihazıyla belirlenen kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde; iki hazır beton ürünü arasında mikro-yapısal olarak herhangi bir farklılık gözlenmemiştir.

6.4.4.2.2 X-ışını floresans spektrofotometre (XRF) ile yapı belirleme çalışmasının sonuçları

XRF ile yapılan yarı-kantitatif analizde; şahit hazır beton ve ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numuneleri incelenmiş ve her iki üründe benzer kantitatif özelliklere rastlanmıştır. Şahit hazır beton ve %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerine ait yarı-kantitatif elementel analiz sonuçları Çizelge 6.57'de verilmiştir:

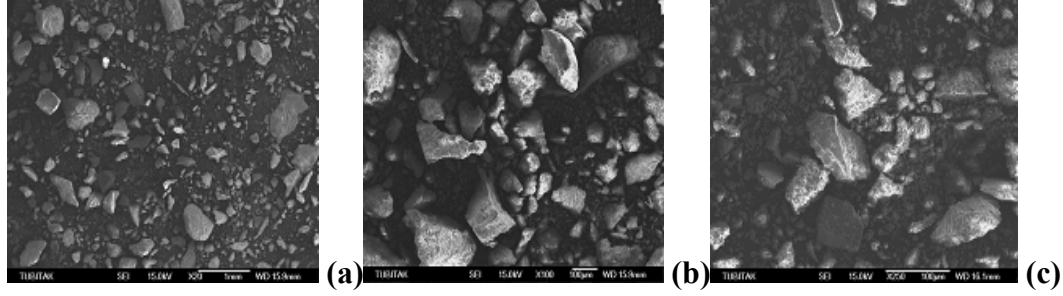
Çizelge 6.57 : Hazır beton numuneleri yarı-kantitatif elementel analiz sonuçları.

Şahit hazır beton numunesi		%20 ikame oranına sahip hazır beton numunesi		Şahit hazır beton numunesi		%20 ikame oranına sahip hazır beton numunesi	
Bileşen	Miktar (%ağ.)	Bileşen	Miktar (%ağ.)	Bileşik	Miktar (%ağ.)	Bileşik	Miktar (%ağ.)
Al	3,391	Al	3,236	Na ₂ O	0,311	Na ₂ O	0,259
Ba	0,084	Ba	0,072	MgO	2,839	MgO	4,235
Ca	40,331	Ca	40,580	Al ₂ O ₃	6,408	Al ₂ O ₃	6,114
Cl	0,086	Cl	0,090	SiO ₂	26,755	SiO ₂	25,766
Cr	0,032	Cr	0,034	P ₂ O ₅	0,151	P ₂ O ₅	0,129
Cu	0,008	Cu	0,007	SO ₃	2,019	SO ₃	1,956
Fe	2,162	Fe	2,026	Cl	0,086	Cl	0,090
K	1,035	K	0,869	K ₂ O	1,247	K ₂ O	1,047
Mg	1,712	Mg	2,554	CaO	56,431	CaO	56,779
Mn	0,055	Mn	0,059	TiO ₂	0,290	TiO ₂	0,335
Na	0,231	Na	0,192	Cr ₂ O ₃	0,047	Cr ₂ O ₃	0,049
Ni	0,009	Ni	0,011	MnO ₂	0,088	MnO ₂	0,093
O	37,206	O	37,064	Fe ₂ O ₃	3,091	Fe ₂ O ₃	2,896
P	0,066	P	0,056	NiO	0,011	NiO	0,014
-	-	Pb	0,007	CuO	0,010	CuO	0,009
Rb	0,006	Rb	0,006	ZnO	0,016	ZnO	0,019
S	0,808	S	0,783	Rb	0,006	Rb	0,006
Si	12,506	Si	12,044	SrO	0,084	SrO	0,082
Sr	0,071	Sr	0,070	Y ₂ O ₃	0,003	Y ₂ O ₃	0,004
Ti	0,174	Ti	0,201	ZrO ₂	0,013	ZrO ₂	0,030
Y	0,002	Y	0,003	BaO	0,093	BaO	0,081
Zn	0,013	Zn	0,016	-	-	PbO	0,008
Zr	0,010	Zr	0,022				

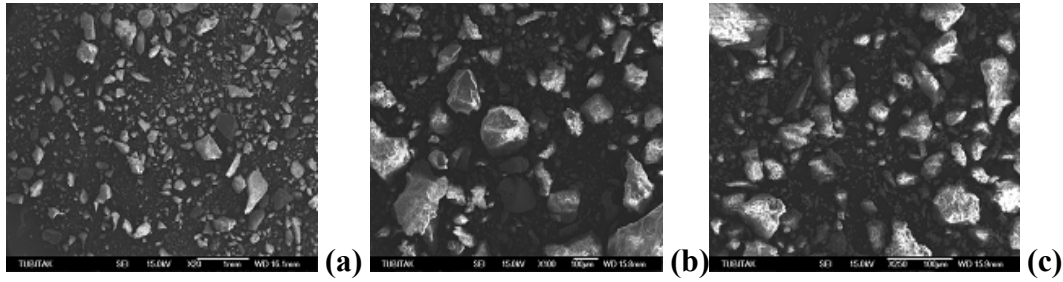
6.4.4.2.3 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapı belirleme çalışmasının sonuçları

Şahit hazır beton ve %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerinin görünümü ve yapı değişikliği tayini JEOL 6335F SEM mikroskobuyla, yarı-kantitatif mikroanalizi ise Oxford Instruments EDS spektroskopisiyle gerçekleştirilmiştir.

Elektron mikroskopuyla yapılan çoklu nokta incelemesinde elde edilen şahit hazır beton ve ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerine ait SEM mikroskobu görüntüleri Şekil 6.26-6.27'de, EDS'de yapılan yarı-kantitatif analiz (elementel kimyasal analiz) sonuçları ise EDS spektrumlarıyla birlikte Şekil 6.28-6.29'da verilmiştir:



Şekil 6.26: Şahit hazır beton numunesi SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme.

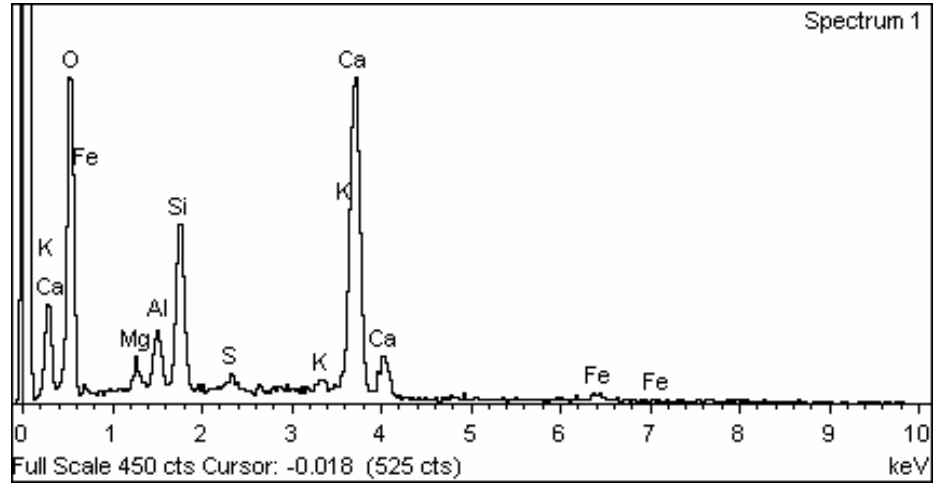
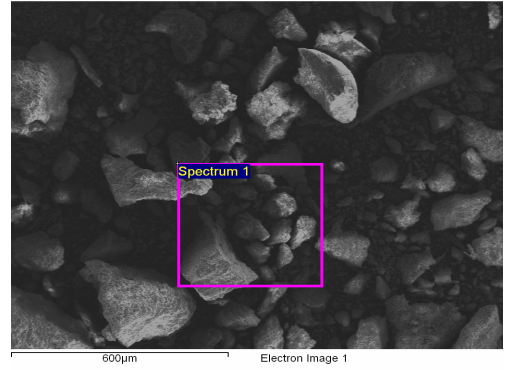


Şekil 6.27 : %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesi SEM görüntüleri: (a) 20X. (b) 100X. (c) 250X büyütme.

Şahit hazır beton ve ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerine ait SEM mikroskobunda farklı büyütme oranlarında (20X, 100X, 250X) elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde; iki hazır beton ürünü arasında mikro-yapısal ve morfolojik olarak herhangi bir farklılık gözlenmemiştir.

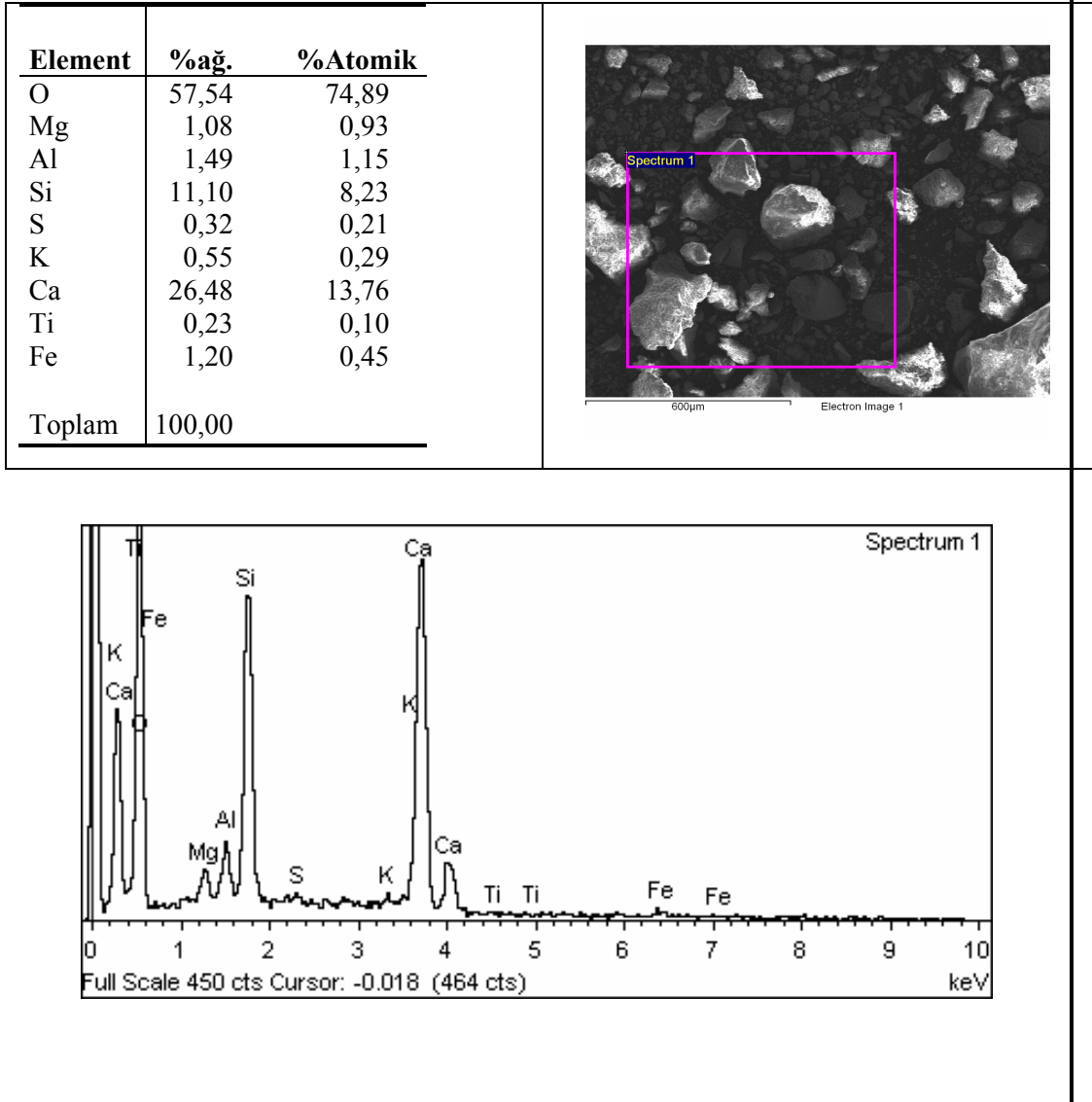
Şahit hazır beton numunesinin Şekil 6.28'de verilen 100X büyütmeli SEM görüntüsü, EDS ile yapılan yarı-kantitatif mikroanaliz sonucu ve EDS spektrumu incelendiğinde; şahit hazır beton numunesinin bünyesinde Ca, Si, Al, Fe ile az oranda Mg, K ve S elementleri saptanmıştır.

Element	%ağ.	%Atomik
O	54,07	72,70
Mg	1,12	0,99
Al	2,39	1,91
Si	8,14	6,23
S	0,54	0,36
K	0,97	0,53
Ca	30,65	16,45
Fe	2,12	0,81
Toplam	100,00	



Şekil 6.28 : Şahit hazır beton numunesine ait EDS'de yapılan yarı-kantitatif analizin sonucu ve EDS spektrumu.

ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesinin Şekil 6.29'da verilen 100X büyütmeli SEM görüntüsü, EDS ile yapılan yarı-kantitatif mikroanaliz sonucu ve EDS spektrumu incelendiğinde; %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesinin bünyesinde Ca, Si, Al, Fe, Mg ile az oranda K, S ve Ti elementleri saptanmıştır.



Şekil 6.29 : %20 ikame oranına sahip hazır beton numunesine ait EDS'de yapılan yarı-kantitatif analizin sonucu ve EDS spektrumu.

Şahit hazır beton ve ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerinde EDS ile yapılan yarı-kantitatif mikroanaliz sonucu ve EDS spektrumu incelendiğinde de iki hazır beton ürünü arasında mikro-yapısal ve morfolojik olarak herhangi bir farklılık gözlenmemiştir.

Sonuç olarak, ADK'nın hazır beton üretiminde ince agregaya yerine maksimum %20 ikame oranında kullanımının fiziksel, mekanik, çevresel ve mikro-yapısal açıdan olumsuz bir etkiye sebep olmadığı sonucuna varılmıştır.

7. EKONOMİK ANALİZ

Ülkemizde tehlikeli atıklar ya yakma ya da düzenli depolama yoluyla bertaraf edilmektedir. Kızdırma kaybı (%) ve ısı değeri (kcal/kg) düşük olması nedeniyle ADK'nın yakma yoluyla bertarafı uygun değildir. Bu nedenle I. sınıf düzenli depolama sahasında depolanmak suretiyle bertarafı tek yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Çizelge 7.1'de katı atıkların İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş. (İZAYDAŞ A.Ş.)'ye ait üç farklı düzenli depolama sahasına taşınması ve bertarafı için gerekli olan maliyetler verilmiştir:

Çizelge 7.1 : Üç düzenli depolama bertaraf yöntemi ve atık taşımanın ekonomik açıdan karşılaştırılması.

	Maliyet (TL/ton atık)		
	I. sınıf düzenli depolama	II. sınıf düzenli depolama	III. sınıf düzenli depolama
Taşıma (TL/ton atık)	35	25	25
Depolama (TL/ton atık)	240	200	155
Toplam (TL/ton atık)	275	225	180

7.1 Atık Döküm Kumunun Mevcut Durumdaki Taşıma-Bertaraf Maliyeti

Marmara Bölgesi'nde faaliyet gösteren sözkonusu dökümhane tesisinin İZAYDAŞ A.Ş.'ye ait düzenli depolama sahasına uzaklığı 85 km'dir. İl sınırları içerisinde taşıma maliyeti bedeli gidiş-geliş 2,5 TL/km olup herbir taşıma aracı başına 100 TL de sabit ücret alınmaktadır. Herbir tehlikeli atık lisanslı taşıma aracının atık taşıma kapasitesi 15 tondur. Sözkonusu dökümhane tesisinde 2011 yılında toplam 24.000 ton ADK olduğu göz önünde bulundurulduğunda; bu miktar 1600 kamyonu eşdeğer gelmektedir. Tek bir kamyonun 15 ton ADK'yı dökümhane tesisinden alıp düzenli depolama tesisine bertaraf edilmek üzere taşınması için gereken maliyet 525 TL olup 24.000 ton ADK'nın taşınması için gereken toplam 1600 kamyon için maliyet 840.000 TL'dir. "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul

kriterleri" tablosunda, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesislerine uygun 1 ton atığın taşıma maliyeti 35 TL'dir.

Mevcut durumda ADK, "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri"ne göre, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesislerinde depolanmak suretiyle bertaraf edilmektedir. I. sınıf düzenli depolama bertaraf maliyeti 240 TL/ton'dur. Söz konusu dökümhane tesisinde 2011 yılında oluşan toplam 24.000 ton ADK'nın I. sınıf düzenli depolama tesisindeki bertaraf maliyeti 5.760.000 TL'dir. 2011 yılında ADK'nın depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyeti toplam 6.600.000 TL olmuştur (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2 : ADK'nın mevcut durumda taşıma-bertaraf maliyeti.

2011 yılı yıllık ADK miktarı	24.000 ton
1 kamyon=15 ton atık alıyor.	Toplam 1600 kamyon ihtiyacı
İZAYDAŞ' a taşıma maliyeti	(170 km*2,5TL/km + 100 TL)/ kamyon*1600 kamyon=840.000 TL
I. sınıf düzenli depolama bertaraf maliyeti (240 TL/ton)	240 TL/ton*24.000 ton=5.760.000 TL
TOPLAM (TL)	6.600.000 TL

7.2 Atık Döküm Kumunun Ön İşlem Olarak Yakma Prosesine Tabii Tutulması Durumundaki Taşıma-Bertaraf Maliyeti

Laboratuvar ölçekli yakma deneylerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde; başlangıçta "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesislerine uygun olan ADK'nın yakma prosesi sonrasında 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri II. sınıf depolama tesislerine uygun hale geldiği saptanmıştır. I. sınıf düzenli depolama bertaraf maliyeti 240 TL/ton iken, II. sınıf düzenli depolama bertaraf maliyeti 200 TL/ton'dur. I. sınıf depolama tesislerine uygun 1 ton atığın taşıma maliyeti 35 TL iken, II. sınıf depolama tesisleri için 25 TL'dir.

Kül fırınında yakma işlemi için gereken elektrik tüketimini belirlemek üzere kül fırınına MAKEL marka T300.K0Y.2216 model 3 fazlı 4 telli aktif elektronik elektrik sayacı (TS EN 62052-11:2005, TS EN 62053-21:2005) bağlanmıştır. Elektriğin birim fiyatı vergi dahil edildiğinde yaklaşık olarak 0,22404 TL/kW.sa'tir.

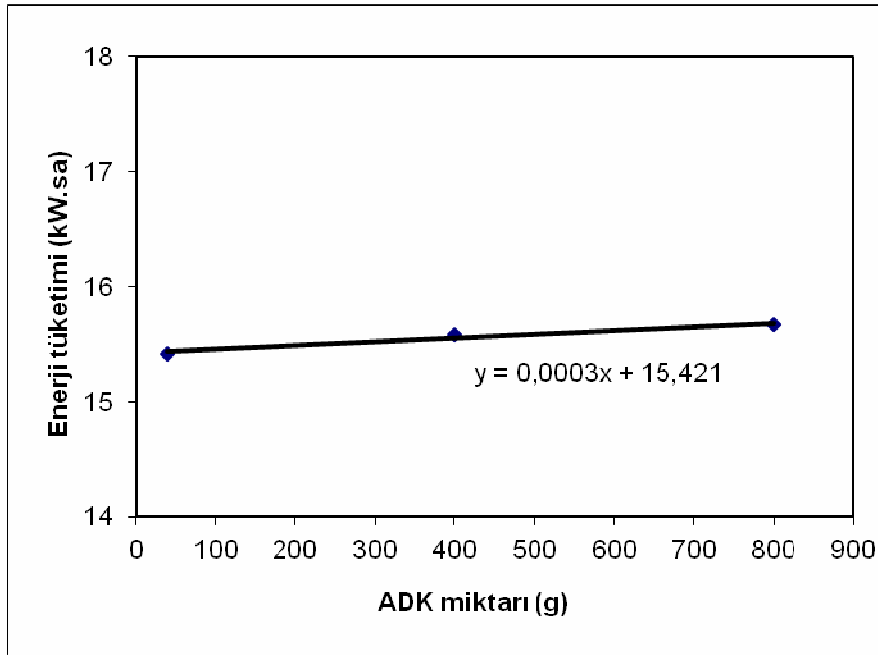
ADK'nın kül fırınında yakılarak organik kirleticilerin uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında yapılan laboratuvar ölçekli yakma deneylerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde; ADK'nın 200°C'de 4 sa., 300°C'de 2 sa., 400°C'de 1 sa. ve 500°C'de 30 dk. yakma prosesine tabii tutulması durumunda "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri III. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale getirilebileceği; organik kirleticileri giderildiği halde, Zn, Ni, toplam Cr, F⁻ ve TÇKM değerleri açısından 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri II. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu saptanmıştır. ADK'daki organik kirleticilerin yakılarak uzaklaştırılması için en uygun sıcaklık ve süre, enerji maliyetinin hesaplanmasıyla ortaya konulmuştur. Çizelge 7.3'te ADK'nın kül fırınında yakılması sırasında tüketilen enerji (kW.sa) miktarı ve elektrik maliyeti (TL) hesabı verilmiştir:

Çizelge 7.3 : Kül fırınında ADK'nın yakılması sırasında tüketilen enerji ve elektrik maliyeti.

T (°C)	Tüketilen enerji (kW.sa)	Elektrik maliyeti (TL)	Tüketilen enerji (kW.sa)	Elektrik maliyeti (TL)	Tüketilen enerji (kW.sa)	Elektrik maliyeti (TL)	Tüketilen enerji (kW.sa)	Elektrik maliyeti (TL)
	t=30 dk. için		t=1 sa. için		t=2 sa. için		t=4 sa. için	
200	8,7730	1,97	14,321	3,21	25,417	5,69	47,609	10,67
300	10,9480	2,45	16,511	3,70	27,637	6,19	49,889	11,18
400	13,2680	2,97	18,996	4,26	30,452	6,82	53,364	11,96
500	15,4175	3,45	21,020	4,71	32,225	7,22	54,635	12,24
600	18,5410	4,15	24,599	5,51	36,715	8,23	60,947	13,65
700	20,7395	4,65	26,705	5,98	38,636	8,66	62,498	14,00
800	23,1885	5,20	29,271	6,56	41,436	9,28	65,766	14,73
900	25,7090	5,76	32,058	7,18	44,756	10,03	70,152	15,72

Çizelge 7.3'teki veriler incelendiğinde; ADK'nın 200°C'de 4 sa., 300°C'de 2 sa., 400°C'de 1 sa. ve 500°C'de 30 dk. yakma prosesine tabii tutulması durumunda tüketilen enerji miktarları, sırasıyla, 47,609 kW.sa, 27,637 kW.sa, 18,996 kW.sa. ve 15,4175 kW.sa iken elektrik maliyetleri 10,67 TL, 6,19 TL, 4,26 TL ve 3,45 TL olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, ADK'daki organik kirleticilerin yakılarak uzaklaştırılması için en uygun sıcaklık ve süre, 500°C ve 30 dk. olarak saptanmıştır.

ADK'nın kül fırınında 500°C'de 30 dk. yakılması için gerekli enerji maliyeti hesabı 40 g ADK ile yapılmış; bu maliyetin gerçek ölçekte 1 ton ADK için hesaplanabilmesi amacıyla, yakma deneyi, aynı sıcaklık ve sürede 400 g ve 800 g ADK ile tekrarlanmıştır (Şekil 7.1). 40 g, 400 g ve 800 g ADK'nın kül fırınında 500°C'de 30 dk. yakılması için tüketilmesi gereken enerji, sırasıyla, 15,4175 kW.sa, 15,5855 kW.sa ve 15,6698 kW.sa olarak hesaplanmıştır. Şekil 7.1'deki grafik yardımıyla elde edilen denklem 1 ton ADK için ekstrapole edildiğinde, enerji tüketimi miktarı 315,4 kW.sa, elektrik maliyeti ise 70,7 TL olarak saptanmıştır.



Şekil 7.1 : Farklı miktarlardaki ADK'nın kül fırınında 500°C'de 30 dk. yakılmasına ilişkin enerji tüketimi.

Tüm bu veriler ışığında, yakma prosesi sonrası iki düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik açıdan karşılaştırılması Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Sözkonusu dökümhane tesisinde 2011 yılında oluşan toplam 24.000 ton ADK'nın mevcut durumda I. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyeti 6.600.000 TL (275 TL/ton atık) iken, ön işlem olarak yakma prosesine tabii tutulduktan sonra II. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyetinin 7.096.800 TL (~295,7 TL/ton atık) olacağı saptanmıştır. ADK'nın ön işlem olarak yakma prosesine tabii tutulduktan sonra düzenli depolama tesisine gönderilmesinin, ilk yatırım ve işçilik maliyeti hariç tutulduğu halde, ekonomik açıdan uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 7.4 : Yakma sonrası iki düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik olarak karşılaştırılması.

I. sınıf düzenli depolama sahasında bertaraf	Maliyet (TL/ton atık)
Taşıma	35
Depolama	240
Toplam (TL/ton atık)	275
II. sınıf düzenli depolama sahasında bertaraf (Yakma sonrası)	
Elektrik sarfıyatı	70,7
Taşıma	25
Depolama	200
Toplam (TL/ton atık)	295,7

7.3 Atık Döküm Kumunun Ön İşlem Olarak Yıkama Prosesine Tabii Tutulması Durumundaki Taşıma-Bertaraf Maliyeti

Laboratuvar ölçekli yıkama deneylerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde; başlangıçta "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesislerine uygun olan ADK'nın yıkama prosesi sonrasında 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri II. sınıf depolama tesislerine uygun hale geldiği saptanmıştır. I. sınıf düzenli depolama bertaraf maliyeti 240 TL/ton iken, II. sınıf düzenli depolama bertaraf maliyeti 200 TL/ton'dur. I. sınıf depolama tesislerine uygun 1 ton atığın taşıma maliyeti 35 TL iken, II. sınıf depolama tesisleri için 25 TL'dir.

%37'lik HCl çözeltisi 0,45 TL/L + KDV, %95-98'lik H₂SO₄ çözeltisi 0,45 TL/L + KDV ve %65'lik HNO₃ çözeltisi 0,75 TL/L + KDV'dir. Sanayi için 1 ton şebeke suyu KDV dahil 8 TL, elektriğin birim fiyatı vergi dahil edildiğinde yaklaşık 0,22404 TL/kW.sa'tir. Maliyet hesabı yapılırken aynı yıkama çözeltisinin 10 çevrim kullanılacağı, dolayısıyla 10 ton ADK'yı yıkayacağı öngörülmüştür. Ayrıca ÇOK analiz sonuçları incelendiğinde; tüm asidik çözeltiler için 1 M konsantrasyonun ÇOK giderimi için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. ADK'nın 15 kW elektrikli motor gücüne sahip, 10 m³ karıştırma kapasiteli karıştırma tankında 6 sa. süreyle yıkandığı

öngörülmüştür. 1 M HCl için 833,25 L asit + 9166,75 L su, 1 M H₂SO₄ için 555,5 L asit + 9444,5 L su ve 1 M HNO₃ için 697,25 L asit + 9302,75 L suya ihtiyaç vardır.

Tüm bu veriler ışığında yıkama prosesi sonrası iki düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik açıdan karşılaştırılması Çizelge 7.5'te verilmiştir:

Çizelge 7.5 : Yıkama sonrası iki düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik olarak karşılaştırılması.

I. sınıf düzenli depolama sahasında bertaraf		Maliyet (TL/ton atık)			
Taşıma		35			
Depolama		240			
Toplam (TL/ton atık)		275			
Toplam (TL/yıl)		6.600.000			
II. sınıf düzenli depolama sahasında bertaraf (Yıkama sonrası)	Su ile yıkama	HCl ile yıkama	H ₂ SO ₄ ile yıkama	HNO ₃ ile yıkama	
Şebeke suyu	8	7,3	7,6	7,4	
Solvent (1 M)	-	37,5	25	52,3	
Yıkama için elektrik sarfıyatı	20	20	20	20	
Taşıma	25	25	25	25	
Depolama	200	200	200	200	
Toplam (TL/ton atık)	253	289,8	277,6	304,7	
Toplam kar (%/ton atık)	%8	-	-	-	
Toplam (TL/yıl)	6.072.000	-	-	-	
Toplam kar (TL/yıl)	528.000	-	-	-	

Sözkonusu dökümhane tesisinde 2011 yılında oluşan toplam 24.000 ton ADK'nın mevcut durumda I. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyeti 6.600.000 TL (275 TL/ton atık) iken, ön işlem olarak şebeke suyu ile yıkama prosesine tabii tutulduktan sonra II. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyetinin, ilk yatırım ve işçilik maliyeti hariç 6.072.000 TL (253 TL/ton atık) olacağı saptanmıştır. Bu oran, bertaraf maliyeti açısından dökümhane tesisine yıllık 528.000 TL'lik (%8'lik) kar sağlayacaktır. ADK'nın ön işlem olarak su ile yıkama prosesine tabii tutulduktan sonra düzenli depolama tesisine gönderilmesinin, ilk

yatırım ve işçilik maliyeti hariç, ekonomik açıdan uygun olduğu, asit çözeltileri ile yıkamanın ise ekonomik açıdan uygun olmadığı tespit edilmiştir.

7.4 Atık Döküm Kumunun Ön İşlem Olarak S/S Prosesine Tabii Tutulması Durumundaki Taşıma-Bertaraf Maliyeti

Portland kalkerli çimento ve kalker kireci ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S deneylerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde; başlangıçta "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesislerine uygun olan ADK'nın, S/S prosesi sonrasında 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri III. sınıf depolama tesislerine uygun hale geldiği saptanmıştır. I. sınıf düzenli depolama bertaraf maliyeti 240 TL/ton iken, III. sınıf düzenli depolama bertaraf maliyeti 155 TL/ton'dur. I. sınıf depolama tesislerine uygun 1 ton atığın taşıma maliyeti 35 TL iken, III. sınıf depolama tesisleri için 25 TL'dir.

Portland çimentosunun tonu 95 TL + KDV, kalker kirecinin tonu 118 TL + KDV'dir. Sanayi için 1 ton şebeke suyu KDV dahil 8 TL, elektriğin birim fiyatı vergi dahil edildiğinde yaklaşık olarak 0,22404 TL/kW.sa'tır. Harç karıştırma işleminin 4,5 kW elektrikli motor gücüne sahip 1000 L karıştırma kapasiteli betoniyerde yapıldığı öngörülmüştür. 1 ton ADK için: (333 kg çimento + 266 L su) veya (333 kg kireç + 375 L su) veya (166,5 kg çimento + 166,5 kg kireç + 375 L su) gereklidir. Tüm bu veriler ışığında, S/S prosesi sonrası iki düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik açıdan karşılaştırılması Çizelge 7.6'da verilmiştir:

Sözkonusu dökümhane tesisinde 2011 yılında oluşan toplam 24.000 ton ADK'nın mevcut durumda I. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyeti 6.600.000 TL (275 TL/ton atık) iken, ön işlem olarak kireçle S/S prosesine tabii tutulduktan sonra S/S ön işlem giderleri (elektrik, su, çimento, kireç maliyetleri) de dahil olmak üzere III. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyetinin 5.304.000 TL (~221 TL/ton atık) olacağı saptanmıştır. Bu oran, bertaraf maliyeti açısından dökümhane tesisine yıllık 1.296.000 TL'lik (%18'lik) kar sağlayacaktır. ADK'nın ön işlem olarak kireçle S/S prosesine tabii tutulduktan sonra düzenli depolama tesisine gönderilmesinin ekonomik açıdan en uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 7.6 : S/S sonrası iki düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik olarak karşılaştırılması.

I. sınıf düzenli depolama sahasında bertaraf	Maliyet (TL/ton atık)		
Taşıma	35		
Depolama	240		
Toplam (TL/ton atık)	275		
Toplam (TL/yıl)	6.600.000		
III. sınıf düzenli depolama sahasında bertaraf (S/S sonrası)	Çimento ile S/S	Kireç ile S/S	Kireç-Çimento ile S/S
Şebeke suyu	2	3	3
Kireç	-	37	18,5
Çimento	47	-	23,5
Elektrik sarfıyatı	1	1	1
Taşıma	25	25	25
Depolama	155	155	155
Toplam (TL/ton atık)	230	221	226
Toplam kar (%/ton atık)	%16	%20	%18
Toplam (TL/yıl)	5.520.000	5.304.000	5.424.000
Toplam kar (TL/yıl)	1.080.000	1.296.000	1.176.000

7.5 Atık Döküm Kumunun Hazır Beton Üretiminde Kullanılması Durumunda Hazır Beton Üretim Maliyeti

Betonun maliyetini oluşturan temel faktörler: 1) betonda kullanılan malzemelerin maliyeti, 2) işçilik maliyeti ve 3) beton üretiminde kullanılan ekipman maliyetidir.

Özel betonların dışında kalan (düşük veya yüksek dayanımlı) betonların üretiminde, işçilik ve ekipman maliyeti, üretilecek betonun kalitesiyle büyük değişiklikler göstermemektedir, fark daha çok kullanılan malzemelerin maliyetlerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Herhangi bir beton üretiminde başlıca malzemeler; çimento, ince ve iri agrega, su ve katkı maddeleridir (Erdoğan, 2007).

İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'de bir yıllık hazır beton üretim miktarının 100.000 m³ olduğu bildirilmiştir. İSTON A.Ş.'de 1 m³ hazır beton üretimi için gerekli olan

bileşen miktarları ve herbir bileşen için birim maliyetler TL/ton bazında Çizelge 7.7'de verilmiştir:

Çizelge 7.7 : 1 m³ hazır beton üretimi için bileşen miktarları ve birim maliyetleri.

Hazır beton (C25/30 Sınıfı) denemesinde kullanılan bileşenler	Hazır beton (kg/m³)	Birim maliyet (TL/ton)
Çimento (CEM 1 42,5), kg	350	100
Mıcır no 1 (Yıkanmamış), kg	494	12
Silika kumu, kg	442	20
Taş tozu (Yıkanmış), kg	359	12
Mıcır no 2, kg	514	12
Su, kg	182	8
Süper akışkanlaştırıcı (EPO SP954), kg	6,32	0,0025

İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'de yıllık 100.000 m³ hazır beton üretimi için gerekli olan bileşen miktarları ve herbir bileşen için maliyetler TL/yıl bazında Çizelge 7.8'de verilmiştir:

Çizelge 7.8 : 100.000 m³ hazır beton üretimi için bileşen miktarları ve maliyetler.

Hazır beton (C25/30 Sınıfı) denemesinde kullanılan bileşenler	Hazır beton (ton/yıl)	Maliyet (TL/yıl)
Çimento (CEM 1 42,5), ton	35.000	3.500.000
Mıcır no 1 (Yıkanmamış), ton	49.400	592.800
Silika kumu, ton	44.200	884.000
Taş tozu (Yıkanmış), ton	35.900	430.800
Mıcır no 2, ton	51.400	616.800
Su, ton	18.200	145.600
Süper akışkanlaştırıcı (EPO SP954), ton	632	1.580.000
Toplam	234.732	7.750.000

İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'de silika kumu yerine %20 ikame oranında ADK kullanılması durumunda yıllık 100.000 m³ hazır beton üretimi için gerekli olan bileşen miktarları ve herbir bileşen için maliyetler TL/yıl bazında Çizelge 7.9'da verilmiştir:

Çizelge 7.9 : %20 ikame oranında ADK kullanılması durumunda 100.000 m³ hazır beton üretimi için bileşen miktarları ve maliyetler.

Hazır beton (C25/30 Sınıfı) denemesinde kullanılan bileşenler	Hazır beton (ton/yıl)	Maliyet (TL/yıl)
Çimento (CEM 1 42,5), ton	35.000	3.500.000
Mıdır no 1 (Yıkanmamış), ton	49.400	592.800
Silika kumu, ton	35.360	707.200
ADK, ton	8.840	-
Taş tozu (Yıkanmış), ton	35.900	430.800
Mıdır no 2, ton	51.400	616.800
Su, ton	18.200	145.600
Süper akışkanlaştırıcı (EPO SP954), ton	632	1.580.000
Toplam (ton/yıl)	234.732	7.573.200
Toplam kar (TL/yıl)	-	176.800
Toplam kar (%/yıl)	-	%2,3

100.000 m³ hazır beton üretimi için gerekli olan silika kumu miktarı 44.200 ton olup maliyeti 884.000 TL/yıl'dır. Hazır beton üretiminde silika kumu yerine %20 ikame oranında ADK kullanıldığında, 100.000 m³ hazır beton üretimi için gereken silika kumu miktarı 35.360 ton olup maliyeti 707.200 TL/yıl'dır. Bu durumda, hazır beton üretimi için %20 ikame oranında ADK kullanımı, İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'ye yıllık 176.800 TL (%2,3'lük) kar sağlayacaktır. 100.000 m³ hazır beton üretimi için kullanılacak olan toplam ADK miktarı ise 8.840 ton'dur. Ülkemizde sadece hazır beton üretimi için agrega ihtiyacının yıllık 140 milyon ton olduğu ve bu miktarın gelecek yıllarda daha da artacağı düşünülmektedir. Doğal kaynakları giderek tükenen ve standartlara uygun, temiz, kaliteli örneklerinin bulunması güç bir malzeme olarak, agregaların hazır beton sektöründeki stratejik önemi her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, ADK'nın hazır beton imalatında agregalarla birlikte kullanımı, hazır beton sektöründe gelecek yıllarda yaşanması olası agrega ihtiyacına yönelik sorunun aşılmasına katkı sağlamış olacaktır.

Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) 2010 yılı hazır beton istatistikleri incelendiğinde; Türkiye'deki 2010 yılı hazır beton üretiminin 79.680.000 m³ olduğu görülmüştür. Bu hacimdeki hazır beton üretimi için gerekli olan ADK miktarının %20 ikame oranı gözönüne alınmak koşuluyla 7.043.712 ton olduğu söylenebilir.

TÜDOKSAD 2011 yılı istatistikleri incelendiğinde ise; Türkiye'deki 2011 yılı döküm üretiminin 1.433.050 ton olduğu görülmüştür. Bir ton döküm malzemesi üretiminde yaklaşık 0,6-0,8 ton arası atık oluşmakta olup bunun 0,4-0,6 ton kadarını ADK oluşturmaktadır. Buna göre; Türkiye'deki 2011 yılı ADK miktarı yaklaşık 450.000 ton civarında kaydedilmiştir.

Sözkonusu dökümhane tesisinden kaynaklanan ADK'nın İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'de hazır beton üretiminde %20 ikame oranı göz önüne alınarak kullanılması durumunda dökümhane tesisine sağlayacağı maliyet karı ve yüzdesi Çizelge 7.10'da verilmiştir.

Buna göre; İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'de hazır beton üretimi için silika kumu yerine %20 ikame oranında ADK kullanılması durumunda, dökümhane tesisine yıllık 2.121.600 TL (%32'lik) kar sağlayacaktır.

Çizelge 7.10 : ADK'nın hazır beton üretiminde kullanılması durumunda dökümhane tesisine sağlayacağı maliyet kar ve yüzdesi.

I. sınıf düzenli depolama sahasında bertaraf	Maliyet (TL/ton atık)	Maliyet (TL/yıl)
Taşıma (24.000 ton ADK için)	35	840.000
Depolama (24.000 ton ADK için)	240	5.760.000
Toplam	275	6.600.000
I. sınıf düzenli depolama sahasında bertaraf (İSTON A.Ş.'ye 8.840 ton/yıl ADK gönderilmesi durumunda)	Maliyet (TL/ton atık)	Maliyet (TL/yıl)
Taşıma (24.000 ton ADK için)	35	840.000
Depolama (15.160 ton ADK için)	240	3.638.400
Toplam maliyet (TL/yıl)	-	4.478.400
Toplam kar (TL/yıl)		2.121.600
Toplam kar (%/yıl)		%32

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

8.1.1 Atık döküm kumunun karakterizasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

ADK, "AYGEİY-EK IV"te verilen Tehlikeli Atık Listesi'nde; (10) kodlu, "Isıl işlemlerden kaynaklanan atıklar"-10 09 "Demir döküm işleminden kaynaklanan atıklar" grubuna dahil edilebilir. Bu tür atıklar tehlikeli atıklar listesinin alt sınıflarında 10 09 07 olarak kodlanmış ve "Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları" (M) ve (*) işareti ile belirtilmiştir.

Bu çalışmada, ADK bileşiminin %91,28 inorganik madde, %6,55 organik madde ve %2,17 nemden oluştuğu belirlenmiştir. ADK yapısında bulunan SiO₂ içeriğinin hammaddeden kaynaklandığı ve kendi mineralojik yapısından dolayı yüksek değerde olduğu düşünülerek Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nca tolere edilmekte ve tehlikesiz atık olarak kabul edilmektedir. Ancak inhalasyon yoluyla uzun süreli maruziyetlerde sağlığa zararlı olması sebebiyle ADK'nın kontrolsüz bertarafı yasaktır.

ADK'nın ÇOK değeri sebebiyle "ADDDY-EK 2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için atık kabul kriterleri" tablosunda, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu saptanmıştır. Kalıp kumu hazırlama prosesinde kullanılan kömür tozunun ÇOK ve TOK değerlerinde ciddi yükselmelere sebep olduğu belirlenmiştir.

ADK'nın ısı değeri, diğer katı fosil yakıtların ısı değerlerine nazaran oldukça düşük çıkmıştır; bu nedenle, ADK'nın yakılarak enerjisinden faydalanılmasına yönelik çalışmanın anlamsız olacağı sonucuna varılmıştır. Ancak, yakma ile, ADK'daki organik kontaminasyon giderilebilir.

ADK'nın içerdiği silis (%81,851) sebebiyle dökümhane tesisinde veya başka bir sektörde, ürün kalitesi bakımından incelendikten sonra, hammadde girdisi (çimento hammaddesi veya ince agrega) olarak değerlendirilebileceği düşünülmüştür.

Hammadde (silika kumu) ve ADK eluatları incelendiğinde Zn, Ni ve Cr konsantrasyonlarında artış olduğu gözlenmiş, bu durumun endüksiyon ocaklarında ergitilen çelik hurdalardan çıkan Zn, Ni, Cr buharı ve toz emisyonlarından kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır.

Marmara Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir dökümhane tesisinde, demir döküm işlemi sırasında yüksek miktarlarda ortaya çıkan ve halen düzenli depolama yoluyla bertaraf edilen ADK'nın geri kazanım/tekrar kullanım ve bertaraf yöntemlerinin belirlenmesi üzerine yapılan laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalarda eluatta ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻, pH ile orijinal katı üründe TOK konsantrasyonlarındaki değişimlerin izlenmesi uygun görülmüştür.

8.1.2 Atık döküm kumunun geri dönüşümü/tekrar kullanılmasına yönelik yapılan çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi

ADK'nın demir döküm tesisinde hammadde olarak kalıp kumu yapımında tekrar kullanılmasına yönelik yürütülen saha ve laboratuvar çalışmalarında ADK özellikleri ile kalıp kumu özellikleri karşılaştırılmış, döküm kumlarının belli bir çevrimden sonra, döküm kalıplarında daha fazla kullanılamayacak hale geldiği ve "ADK" olarak dökümhaneden uzaklaştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bunun sebepleri; döküm kumunun fiziksel ve kimyasal olarak bozulması, tane boyutu ve şeklinin değişmesi, oolitleşme olayının meydana gelmesi, kumun döküm işlemi sırasında yüksek sıcaklıktaki ergimiş metale maruz kalması, kum taneleri arasındaki gaz geçirgenliğinin azalması, bentonitin bağlayıcılık özelliğini kaybetmesi, kum tanelerinin birbirine tutunamaması ve kalıbın mukavemetinin azalması, mekanik aşınma nedeniyle kum tanelerinin direncinin kırılması ve kumun refrakterlik özelliğinin azalması olarak sayılabilir.

8.1.3 Atık döküm kumunun düzenli depolanmasına yönelik yapılan ön işlem sonuçlarının değerlendirilmesi

ADK'nın "ADDDY-EK 2" tablosunda, ÇOK değeri sebebiyle 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu saptanmış; çeşitli ön işlem prosesleriyle (yakma, yıkama, solidifikasyon/stabilizasyon (S/S)) inert/tehlikesiz atık olarak muamele görebilecek atık kriterlerine uygun hale getirilebilirliği teknik, çevresel ve ekonomik açıdan irdelenmiştir.

ADK'dan yakma yolu ile olası kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında yapılan çalışmalarda elde edilen TGA sonuçlarından faydalanılarak yakma (kül) fırınında uygun yakma sıcaklığı ve yakma süresi belirlenmiştir. ADK'nın hava atmosferi altında etkin bozunma sıcaklığı aralığı 550-670°C olarak saptanmış, kül fırınında gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli yakma deneylerinde ise, ADK'nın 200°C'de 4 sa., 300°C'de 2 sa., 400°C'de 1 sa. ve 500°C'de 30 dk. yakma prosesine tabii tutulması durumunda "ADDDY-EK 2" tablosunda 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri III. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale getirilebileceği; organik kirleticileri giderildiği halde, Zn, Ni, toplam Cr, F⁻ ve TÇKM değerleri açısından 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriterine göre II. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu saptanmıştır. ADK'daki organik kirleticilerin yakılarak uzaklaştırılması için belirlenen en uygun sıcaklık ve süre, ekonomik analiz ile ortaya konulmuştur.

ADK'dan yıkama yolu ile olası kirleticilerin kısmen uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında yapılan çalışmada, farklı yıkama sıvısı, çözelti konsantrasyonu ve yıkama sürelerinde yıkama deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Şebeke suyu kullanılarak yıkama yolu ile ADK'daki organik kirleticilerin uzaklaştırılması çalışmasında, yıkama süresi arttıkça eluattaki ÇOK konsantrasyonu ve atıktaki TOK konsantrasyonunun azaldığı; böylece, denemelerin başarıya ulaştığı görülmüştür.

Farklı konsantrasyonlarda (6 M, 3 M, 1 M) asit çözeltileri (HCl, H₂SO₄, HNO₃) kullanılarak farklı sürelerle (24 sa., 15 sa., 6 sa.) yıkama yolu ile ADK'daki organik kirleticilerin uzaklaştırılması çalışmasında, her üç asidik çözeltinin (HCl, H₂SO₄, HNO₃) konsantrasyonu ve yıkama süreleri arttıkça, eluattaki ÇOK konsantrasyonlarında azalma olduğu; buna karşılık, ADK'daki TOK konsantrasyonlarında herhangi bir değişim olmadığı saptanmıştır. Laboratuvar ölçekli yıkama deneylerinin sonuçları incelendiğinde; ADK'daki organik kirleticilerin uzaklaştırılması için farklı çözelti ve konsantrasyonlarda 6 sa.'lik yıkama süresinin "ADDDY-EK 2" tablosunda 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri II. sınıf depolama tesisleri limit değerleri açısından yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Farklı konsantrasyonlarda (6 M, 3 M, 1 M) bazik çözelti (NaOH) kullanılarak yıkama yolu ile ADK'daki organik kirleticilerin uzaklaştırılması denemelerinde eluattaki ÇOK konsantrasyonu ile atıktaki TOK konsantrasyonunun arttığı ve dolayısıyla, ilgili çalışmanın başarılı olmadığı saptanmıştır.

ADK'nın, ön işlem olarak asit çözeltisi (HCl, H₂SO₄, HNO₃) ve şebeke suyu ile yıkama prosesine tabii tutulması durumunda 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri III. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale getirilebileceği; ancak, organik kirleticileri giderildiği halde, Zn, Ni, toplam Cr, F⁻ ve TÇKM değerleri açısından 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri II. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun olduğu saptanmıştır. ADK'daki organik kirleticilerin uzaklaştırılması için belirlenen farklı yıkama sıvısı (şebeke suyu ile HCl, H₂SO₄ ve HNO₃ çözeltileri) ve çözelti konsantrasyonu (6 M, 3 M, 1 M) seçeneklerinden en uygun olanlar, ekonomik analiz ile ortaya konulmuştur.

ADK'daki organik kirleticilerin şebeke suyu ile yıkanması sonucu ele geçen deşarj suyu numunesi analiz edilmiş ve elde edilen analiz sonuçlarının "SKKY Tablo 15.17: Sektör: Metal Sanayi (Demir ve Demir Dışı Dökümhane ve Metal Şekillendirme) atıksuları" alıcı ortam deşarj limit değerlerine uygun olduğu tespit edilmiştir.

ADK'dan S/S yolu ile organik ve inorganik kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında yapılan çalışmada, çeşitli bağlayıcılar vasıtasıyla katılaştırılmış ürünler, kirleticiler (eluatta ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ ve pH ile orijinal katı üründe TOK) açısından "ADDDY-EK 2" limit değerleri temelinde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, kullanılan bağlayıcıların fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu, uygun atık-bağlayıcı karışım oranlarının belirlenmesi ve katılaştırılmış ürünlerin çevresel etkiler açısından değerlendirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Laboratuvar ölçekli S/S çalışmasında iki farklı bağlayıcı (ayrı ayrı ve birlikte) kullanılmıştır, bunlar; CEM II/A-LL 42,5 N Portland kalkerli çimento (TS EN 197-1:2002) ve CL 80-S sönmüş kalker kireci (TS EN 459-1:2010)'dir.

Portland kalkerli çimento ve kalker kireci ile (ayrı ayrı ve birlikte) yapılan laboratuvar ölçekli S/S denemelerinde eluattaki ÇOK, Ni, Zn, toplam Cr, TÇKM, F⁻ konsantrasyonları ile orijinal atıkta TOK konsantrasyonlarında azalma sağlandığı; dolayısıyla, çalışmanın başarılı olduğu tespit edilmiştir. Buna göre çevresel etkiler

açısından Portland kalkerli imento ve kalker kirecinin S/S alışması için uygun olacağına karar verilmiştir.

ADK'nın, ön işlem olarak imento ve kireç ile S/S prosesine tabii tutulması durumunda 2-A) *inert atıkların düzenli depolanabilmesi* kriteri III. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale getirilebileceği tespit edilmiştir. ADK'daki organik/inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması için en uygun bağlayıcı türü, ekonomik analiz ile ortaya konulmuştur.

8.1.4 Atık döküm kumundan geri kazanım ile faydalı ürün elde edilmesine yönelik yapılan çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi

ADK'dan geri kazanım yoluyla yapı endüstrisine yönelik ekonomik değer olan faydalı ürün eldesi kapsamında, ilk olarak ADK'nın "TS 706 EN 12620+A1:2009- Beton agregaları" standardına göre ince agrega olarak uygunluğu değerlendirilmiş; ADK'nın silika kumuna göre metilen mavisi değer ve hafif organik kirletici içeriği yüksek, kum eşdeğer i düşük tespit edilmiş olup potansiyel tehlike arz edebilir agrega olarak saptanmıştır. Ancak, ADK'nın belli ikame oranında silika kumu ile karıştırılması suretiyle, hazır betonda ince agrega olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

Pilot lekli S/S alışması ile C25/30 sınıfı hazır beton (normal beton) imalatında, farklı ikame oranları (%) dikkate alınarak iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak uygulama yapılmıştır. ADK %10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100 ikame oranlarında silika kumu ile yer değerştirilmiş olup şahit hazır beton numunelerinde ADK kullanılmamıştır. Katılaştırma malzemesi olarak Portland imentosu (CEM I 42,5R), iri agrega olarak iki farklı tane boyutunda mıcır (kıırma taş), ince agrega olarak taş tozu, silika kumu ve ADK, ayrıca melamin-bazlı süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi ve su kullanılmıştır.

Taze beton numunelerinde çökme (slamp), birim ağrılık ve sıcaklık değerleri ölçülmüş olup ikame oranı arttıkça s/ oranlarında artma, birim ağrılık değerlerinde ise azalma tespit edilmiştir. Taze beton karışımlarının sıcaklıkları tüm ikame oranlarında 15-16°C olarak saptanmıştır. Kr uygulama süreleri 7, 28, 56 ve 90 gün olarak seçilmiştir. S/S alışması tamamlanmış betonların performans etkilerini belirlemek üzere priz alma ve sonlanma süresi, basınç dayanımı, yarmada çekme

dayanımı, elastisite, su emme oranı ve yoğunluk gibi fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Farklı ikame oranlarında ADK ile hazırlanan taze betonların özellikleri incelendiğinde; ADK oranı arttıkça birim ağırlık değerinin azaldığı, aynı çökme sınıfı (S4) için s/ç oranının arttığı ve priz sürelerinin geciktiği saptanmıştır.

İkame oranı arttıkça basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisitede azalma olduğu ve ADK'nın betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği, kür zamanı uzadıkça dayanım ve elastisite değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. İkame oranı arttıkça su emme oranında yükselme, yoğunluk değerinde ise düşme saptanmıştır.

Sonuç olarak; S/S çalışması tamamlanmış iki şahit ve yedi farklı ikame oranında ADK kullanılarak (%10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100) hazırlanmış ve dört farklı kür süresi (7, 28, 56 ve 90 gün) uygulanmış taze betonların ve sertleşmiş betonların tüm performans test sonuçları incelendiğinde; en uygun ikame oranının %20 olduğu sonucuna varılmıştır. %10 ve %20 ikame oranı sonuçları kabul edilebilir aralıklarda olup %20'den yüksek ikame oranlarında ise performans özelliklerinde sapma olduğu belirlenmiştir. %20 ikame oranında ADK kullanılarak hazırlanmış hazır beton, TS EN 206-1:2002 standardına göre aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

- Dayanım Sınıfı : C25/30
- Etki Sınıfı : XC2 (Karbonatlaşmanın sebep olduğu korozyon etkisine maruz, ıslak ve kuru çevrede beton)
- Klorür İçeriği Sınıfı : Cl 0,20 (Çimento kütlesine oranla en fazla %0,20 klorür içeren (%0,18))
- Agrega En Büyük Tane Büyüklüğü: D_{ençok} 22,5 mm
- Kıvam Sınıfı : S4 (Çökme (slamp) değeri 160-210 mm)
- Yoğunluk : Normal Beton (>2000 , <2600 kg/m³ birim hacim kütlesine sahip)

Hazır beton ürünlerinin farklı doğa koşullarında gösterdikleri davranışlarının incelenmesi amacıyla, farklı pH'larda gerçekleştirilen TS EN 12457-4:2004 sızma testi sonuçlarına göre; %20 ikame oranındaki hazır beton numunesinde ADK'dan gelebilecek eluatta Zn, Ni, Cr, TÇKM, F⁻, ÇOK değerlerinin “ADDDY-EK 2” III. Sınıf (inert atık) kabul kriterlerine uygun olduğu saptanmıştır. İkame oranı arttıkça

TOK değeri artmakla birlikte, bütün beton numunelerindeki TOK değerleri ADK'daki TOK değerinden daha düşük çıkmıştır. Sonuç olarak, S/S prosesinin uygulanabileceği ve %20 ikame oranına göre hazırlanan beton numunesinin çevreyi kirlletici özelliğinin bulunmadığı saptanmıştır.

Şahit hazır beton ve ADK ile hazırlanan %20 ikame oranına sahip hazır beton numunelerinin mikro-yapısal ve morfolojik olarak incelenmesi kapsamında; XRD, XRF, SEM ve EDS analizleri yapılmış olup iki hazır beton ürünü arasında mikro-yapısal ve morfolojik olarak herhangi bir farklılık gözlenmemiştir.

ADK'nın hazır beton üretiminde ince agrega yerine maksimum %20 ikame oranında kullanımının fiziksel, mekanik, çevresel ve mikro-yapısal açıdan olumsuz bir etkiye sebep olmadığı sonucuna varılmıştır.

İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul) altyapı imkanları ve C25/30 dayanım sınıfı hazır beton (normal beton) bileşenleri kullanılarak hazırlanan numunelerin fiziksel-mekanik, çevresel ve mikro-yapısal özellikleri incelendiğinde; %20 ikame oranındaki ADK ile hazırlanan hazır betonun betonarme yapılarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Ancak, ADK'nın uniform ve homojen olması önemli bir husustur.

TS EN 206-1:2002 standardına göre; normal ve ağır agregaların prEN 12620:2000'e, hafif agregaların prEN 13055-1:1997'ye uygunluğu kanıtlanmalıdır. Ancak, ADK gibi geri kazanılan agregalarla ilgili hükümler henüz standartlarda yer almamıştır. Bu tür agregalarla ilgili hükümler Avrupa Teknik Şartnamelerinde yer alıncaya kadar, agreganın uygunluğu aşağıdaki verilere göre gösterilebilir:

- Bileşen malzemenin, özellikle TS EN 206-1:2002 standardına uygun betonda kullanımıyla ilişkili Avrupa Teknik onayı,
- Betonun kullanılacağı yerde geçerli, özellikle bileşen malzemenin bu standarda uygun betonda kullanımıyla ilgili milli standard veya şartname.

8.1.5 Ekonomik analiz çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi

Düzenli depolama: Mevcut durumda ADK, "ADDDY-EK 2" tablosuna göre, 2-C) tehlikeli atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri I. sınıf depolama tesislerinde depolanmak suretiyle bertaraf edilmektedir. I. sınıf düzenli depolama bertaraf maliyeti 240 TL/ton atık, 1 ton ADK'nın İZAYDAŞ A.Ş.'ye ait I. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma maliyeti 35 TL olup toplam taşıma-bertaraf maliyeti 275

TL/ton atıktır. Sözkonusu dökümhane tesisinde 2011 yılında oluşan toplam 24.000 ton ADK'nın I. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyeti toplam 6.600.000 TL olmuştur.

Yakma: ADK'dan yakma yoluyla olası organik kirleticilerin uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında yapılan laboratuvar ölçekli yakma deneylerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde; ADK'nın yakma prosesi sonrasında 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri II. sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun hale geldiği saptanmıştır. ADK'daki organik kirleticilerin yakılarak uzaklaştırılması için en uygun sıcaklık ve süre, 500°C ve 30 dk. olarak belirlenmiştir. Sözkonusu dökümhane tesisinde 2011 yılında oluşan toplam 24.000 ton ADK'nın mevcut durumda I. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyeti 275 TL/ton atık (6.600.000 TL/yıl) iken, ön işlem olarak yakma prosesine tabii tutulduktan sonra II. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyetinin yakma ön işlem giderleri (elektrik maliyeti) de dahil edildiğinde, ilk yatırım ve işçilik maliyeti hariç ~295,7 TL/ton atık (7.096.800 TL/yıl) olacağı saptanmıştır. ADK'nın ön işlem olarak yakma prosesine tabii tutulduktan sonra düzenli depolama tesisine gönderilmesinin ekonomik açıdan uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Yıkama: ADK'nın farklı çözeltilerle yıkama işlemine tabii tutularak olası organik kirleticilerin uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında yapılan laboratuvar ölçekli yıkama deneylerinin sonuçları incelendiğinde; ADK'nın yıkama prosesi sonrasında 2-B) tehlikesiz atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri II. sınıf depolama tesislerine uygun hale geldiği saptanmıştır. ADK'daki organik kirleticilerin yıkanarak uzaklaştırılması için en uygun süre ve çözelti, 6 sa. su ile yıkama olarak belirlenmiştir. Sözkonusu dökümhane tesisinde 2011 yılında oluşan toplam 24.000 ton ADK'nın mevcut durumda I. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyeti 275 TL/ton atık (6.600.000 TL/yıl) iken, ön işlem olarak su ile yıkama prosesine tabii tutulduktan sonra II. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyetinin yıkama ön işlem giderleri (çözelti, su, elektrik maliyeti) de dahil edildiğinde, ilk yatırım ve işçilik maliyeti hariç 253 TL/ton atık (6.072.000 TL/yıl) olacağı saptanmıştır. Bu oran, bertaraf maliyeti açısından dökümhane tesisine yıllık 528.000 TL'lik (%8'lik) kar sağlayacaktır. ADK'nın ön işlem olarak su ile yıkama prosesine tabii tutulduktan sonra düzenli depolama

tesisine gönderilmesinin, ilk yatırım ve işçilik maliyeti hariç, ekonomik açıdan uygun olduğu, asit çözeltileri ile yıkamanın ise ekonomik açıdan uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Solidifikasyon/Stabilizasyon (S/S): ADK'dan S/S yolu ile olası organik/inorganik kirleticilerin tamamen uzaklaştırılması ve bu sayede düzenli depolama bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi kapsamında Portland kalkerli çimento ve kalker kireci ile yapılan laboratuvar ölçekli S/S deneylerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde; ADK'nın S/S prosesi sonrasında 2-A) inert atıkların düzenli depolanabilmesi kriteri III. sınıf depolama tesislerine uygun hale geldiği saptanmıştır. ADK'daki organik/inorganik kirleticilerin S/S yoluyla uzaklaştırılması için en uygun karışım oranı %75 ADK+%25 bağlayıcı olarak belirlenmiştir. Söz konusu dökümhane tesisinde 2011 yılında oluşan toplam 24.000 ton ADK'nın mevcut durumda I. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyeti 275 TL/ton atık (6.600.000 TL/yıl) iken, ön işlem olarak kireçle S/S prosesine tabii tutulduktan sonra III. sınıf düzenli depolama tesisine taşıma-bertaraf maliyetinin S/S ön işlem giderleri (elektrik, su, çimento, kireç maliyeti) de dahil edildiğinde, ilk yatırım ve işçilik maliyeti hariç ~221 TL/ton atık (5.304.000 TL/yıl) olacağı saptanmıştır. Bu oran, bertaraf maliyeti açısından dökümhane tesisine yıllık 1.296.000 TL'lik (%20'lik) kar sağlayacaktır. ADK'nın ön işlem olarak kireçle S/S prosesine tabii tutulduktan sonra düzenli depolama tesisine gönderilmesinin ekonomik açıdan en uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tüm bu veriler ışığında, çalışmada uygulanan ön işlem prosesleri sonrası düzenli depolama bertaraf yöntemlerinin ekonomik açıdan karşılaştırılması Çizelge 8.1'de verilmiştir:

Beton Sektörü Açısından Maliyet: İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'de gerçekleştirilen pilot ölçekli hazır beton üretim sonuçları incelendiğinde şu bulgular elde edilmiştir: İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'de hazır beton üretimi yılda 100.000 m³ olup bu miktardaki hazır beton üretimi için gerekli olan silika kumu 44.200 ton ve silika kumunun toplam maliyeti 884.000 TL/yıl'dır. Hazır beton üretiminde %20 ikame oranında ADK kullanıldığı takdirde, 100.000 m³ hazır beton üretimi için gereken silika kumu miktarı 35.360 ton olup maliyeti 707.200 TL/yıl'dır. Bu durumda, hazır beton üretiminde silika kumu ile birlikte %20 ikame oranında ADK kullanımı, İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'ye yıllık 176.800 TL (%2,3'lük) kar sağlayacaktır.

Çizelge 8.1 : Ön işlem prosesleri sonrası düzenli depolama bertaraf yönteminin ekonomik olarak karşılaştırılması.

Maliyet (TL/ton atık)			
Taşıma	35		
Depolama	240 (I.Sınıf)		
Toplam (TL/ton atık)	275		
Toplam (TL/yıl)	6.600.000		
	Yakma	Su ile yıkama	Kireç ile S/S
Diğer giderler	70,7	28	3
Taşıma	25	25	25
Depolama	200 (II.Sınıf)	200 (II.Sınıf)	155 (III.Sınıf)
Toplam (TL/ton atık)	295,7	253	221
Toplam kar/zarar (%/ton atık)	-%7,5	+%8	+%20
Toplam (TL/yıl)	7.096.800	6.072.000	5.304.000
Toplam kar/zarar (TL/yıl)	-496.800	+528.000	+1.296.000

100.000 m³ hazır beton üretimi için kullanılacak olan toplam ADK miktarı ise 8.840 ton'dur. Ülkemizde sadece hazır beton üretimi için agrega ihtiyacının yıllık 140 milyon ton olduğu ve bu miktarın gelecek yıllarda daha da artacağı düşünülmektedir. Doğal kaynakları giderek tükenen ve standartlara uygun, temiz, kaliteli örneklerinin bulunması güç bir malzeme olarak, agregaların hazır beton sektöründeki stratejik önemi her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, ADK'nın hazır beton imalatında agregalarla birlikte kullanımı, hazır beton sektöründe gelecek yıllarda yaşanması olası agrega ihtiyacına yönelik sorunun aşılmasına katkı sağlamış olacaktır.

THBB 2010 yılı hazır beton istatistikleri incelendiğinde; Türkiye'deki 2010 yılı hazır beton üretiminin 79.680.000 m³ olduğu görülmüştür. Bu hacimdeki hazır beton üretimi için gerekli olan ADK miktarının %20 ikame oranı gözönüne alınmak koşuluyla 7.043.712 ton olduğu söylenebilir. TUDOKSAD 2011 yılı istatistikleri incelendiğinde ise; Türkiye'deki 2011 yılı döküm üretiminin 1.433.050 ton olduğu görülmüştür. Bir ton döküm malzemesi üretiminde yaklaşık 0,6 ila 0,8 ton arası atık oluşmakta olup bunun 0,4 ila 0,6 ton kadarını ADK oluşturmaktadır. Buna göre; Türkiye'deki 2011 yılı ADK miktarı yaklaşık 450.000 ton civarında kaydedilmiştir. İSTON A.Ş. (Tuzla/İstanbul)'de hazır beton üretimi için silika kumu yerine %20

ikame oranında ADK kullanıldığı takdirde, dökümhane tesisine yıllık 2.121.600 TL (%32'lik) kar sağlayacaktır.

8.2 Öneriler

- ADK'nın içeriği nedeniyle betonarme yapılarda metal donatı korozyonuna etkisi araştırılmalı, ADK kullanımının hazır beton üretim prosesine herhangi bir olumsuz etkisi olup olmadığını değerlendirmek üzere endüstriyel ölçekli çalışmalar yapılmalıdır.
- Ayrıca, ADK özellikleri dökümhanelere göre değişiklik göstereceğinden, farklı kaynaklardan temin edilen ADK'ların aynı kalitede olması ve sürekliliği sağlanmalıdır.
- Benzer çalışmalar diğer dökümhanelerden kaynaklanan, daha az safsızlık (kil, kömür vb.) ve daha yüksek oranda silika içeren ADK'lar ile tekrarlanmalı ve elde edilen hazır beton üründe mekanik, çevresel ve mikro-yapısal özellikler irdelenmelidir.
- Bundan sonraki çalışmada, ADK'nın parke taşı ve reaktif pudra beton (beton rögar kapakları, yağmur suyu ızgaraları) üretiminde kullanılabilirliği denenebilir.

KAYNAKLAR

- Abichou, B. C., Edil, T.** (1998). Database on beneficial reuse of foundry by-products. Recycled materials in geotechnical applications. In: Vipulanandan C, Elton D, editors. *ASCE Geotechnical Special Publication*, **79**, 210-223.
- Abichou, T., Benson, C. H., Edil, T. B., Freber, B. W.** (1998). Using waste foundry sand for hydraulic barriers, *ASCE Geotechnical Special Publication*, **79**, 86-99.
- Abichou, T., Benson, C. H., Edil, T. B.** (2000). Foundry green sands as hydraulic barriers: laboratory study, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126(12)**, 1174-1183.
- Abichou, T., Edil, T. B., Benson, C. H., Bahai, H.** (2004). Beneficial use of foundry by-products in highway construction, *ASCE Geotechnical Special Publications*, **126**, 715-22.
- Akçansa** (2010). *Akçansa 2007-2009 Sürdürülebilirlik Raporu*, İstanbul.
- Al-Tabaa, A. and Pereda, A. S. R.** (2006). UK stabilization/solidification treatment and remediation-Part I: binders, technologies, testing and research, *Land Cont, Reclamation*, **14**, 14-22.
- Alp, S.** (2004). *Kum, Kil ve Taş Ocakları Sektör Raporu*, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.
- American Foundrymen's Society (AFS)** (1991). Alternative utilization of foundry waste sand, *Final Report (Phase I) prepared by American Foundrymen's Society Inc. for Illinois Department of Commerce and Community Affairs*, Des Plaines, IL.
- American Foundrymen's Society (AFS)** (2004). Foundry sand facts for civil engineers, **Report No: FHWA-IF-04-004**, Prepared by American Foundrymen's Society Inc. for Federal Highway Administration Environmental Protection Agency, Washington DC, US, Sf. 80.
- American Foundry Society (AFS)** (2006). Turning used foundry sand into a marketable resource, *Sand Beneficial Reuse Guide*, US, 1-7.
- Anonim** (1998). *Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik* (2.7.1998, R.G.: 23390), Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Anonim** (2005a). *Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği* (14.03.2005, R.G.: 25755), Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Anonim** (2006). *ÇED Rehberi-Atık Bertaraf Tesisleri*, Çevre ve Orman Bakanlığı Çevresel Etki Değerlendirmesi Sektörel Rehberleri, Ankara.
- Anonim** (2008a). *Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik* (05.07.2008, R.G.: 26927), Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.

- Anonim** (2008b). *Atık Yönetimi Eylem Planı (2008-2012)*, Çevre ve Orman Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Anonim** (2010). *Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (24.03.2010, R.G.: 27531)*, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- APHA** (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st ed., Washington, D.C.
- Aslan, V.** (2011). Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Direktifi (IPPC-2008/01/EC) ve Türkiye Uygulamaları, 17. *Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı (ICCI 2011) Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 15-17 Haziran, sf. 330-332.
- Ay, İ.** (2008). *Döküm Yolu ile İmalat*, Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü İmalat Yöntemleri I Ders Notları, Balıkesir.
- Baccini, P.** (1989). *The Landfill: Reactor and Final Storage*. Springer-Verlag, New York.
- Bakis, R., Koyuncu, H., Demirbas, A.** (2006). An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures, *Waste Management Resources*, **24**, 269-274.
- Batchellor, B.** (2006). Overview of waste stabilization with cement. *Waste Management*, **26**, 689-698.
- Bayar, S.** (2005). *Zararlı atıkların solidifikasyon/stabilizasyon teknolojisi ile yönetimi*, (doktora tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Beeley, P.** (2001). *Foundry Technology*, University of Leeds, England.
- Belevi, H., Baccini, P.** (1989). Long-term behavior of municipal waste landfills, *Waste Management and Research*, **7**, 43-56.
- Berenni, P. and Nobili, F.** (1993). Recovery of foundry sands to manufacture concrete products, *R'93 Recovery recycling and re-integration*, In: *Congress proceedings*, Ginegra, Şubat.
- Bhat, S. T. and Lovell, C. W.** (1996). Design of flowable fill: Waste foundry sand as a fine aggregate, Paper No. 961066, *Transportation Research Board*, 75th Annual Meeting, **1546**, 70-78.
- Blackman, W.C.** (1996). *Basic Hazardous Waste Management*, Boca Raton (FL): CRC Press Lewis Publishers.
- Braham, A.** (2002). The use of blended recycled foundry sand in hot mix asphalt, *Interim Report*, University of Wisconsin-Madison, Asphalt Research Group, US.
- BREF** (2001). *Reference document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*, Spain.
- Bulut, U., Ozverdi, A., Erdem, M.** (2009). Leaching behavior of pollutants in ferrochrome arc furnace dust and its stabilization/solidification using ferrous sulphate and Portland cement, *Journal of Hazardous Materials*, **162**, 893-898.

- BTYK** (2005). *TÜBİTAK Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu 11. Toplantısı, Gelişmelere İlişkin Değerlendirmeler ve Kararlar*, Ankara.
- Büyükbektaş, F. ve Varınca, K. B.** (2008). Entegre Atık Yönetimi Kavramı ve AB Uyum Sürecinde Atık Çerçeve Yönetmeliği, *Üniversite Öğrencileri III. Çevre Sorunları Sempozyumu*, İstanbul, 15-16 Mayıs.
- CDPHE.** (2008). *Hazardous Waste Identification Guidance Document*, Colorado Department of Public Health and Environment, Hazardous Materials and Waste Management Division, 2nd edition, October 2008, US.
- Chaaban, M.A.** (2001). Hazardous waste source reduction in materials and processing technologies, *J. Mater. Process. Technol.*, **119**, 336-343.
- Chan, Y. M., Agamuthu, P., Mahalingam, R.** (2000). Solidification and stabilization of asbestos waste from an automobile brake manufacturing facility using cement, *Journal of Hazardous Materials*, **B77**, 209-226.
- Chen, Q. Y., Tyrer, M., Hills, C. D., Yang, X. M., Carey, P.** (2009). Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review, *Waste Management*, **29**, 390-403.
- Clegg, A. J.** (1991). *Precision Casting Processes*, New York: Pergamon Press, US.
- Colombo, P., Brusatin, G., Bernardo, E., Scarinci, G.** (2003). Inertization and reuse of waste materials by vitrification, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **7**, 225-239.
- Conner, J. R.** (1990). *Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes*, New York: Van Nostrand Reinhold.
- Conner, J. R. and Hoeffner, S. L.** (1998). The history of stabilization/solidification technology, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **28**, 325-396.
- Cossu, R., Lai, T.** (in press). Washing of waste prior to landfilling, *Waste Management*.
- Cossu, R., Lai, T., Pivnenko, K.** (in press). Waste washing pre-treatment of municipal and special waste, *Journal of Hazardous Materials*.
- Cossu, R., Lai, T., Piovesan, E.** (2007). Proposal of a methodology for assessing the final storage quality of a landfill. In: *Proceedings of Sardinia 2007, 11th International Waste Management and Landfill Symposium*, Santa Margherita di Pula, Cagliari, 1-5 Ekim.
- Coz, A., Andres, A., Soriano, S., Viguri, J. R., Ruiz, M. C., Irabien, J. A.** (2009). Influence of commercial and residual sorbents and silicates as additives on the stabilisation/solidification of organic and inorganic industrial waste, *Journal of Hazardous Materials*, **164**, 755-761.
- Cruz, N., Briens, C., Berruti, F.** (2009). Green sand reclamation using a fluidized bed with an attrition nozzle, *Resources, Conservation and Recycling*, **54**, 45-52.
- Cutter, S. L.** (1983). *Living with Risk: The Geography of Technical Hazards*. London (UK): Edward Arnold.

- Çelik, S. Ö. ve Sivri, N.** (2005). Tehlikeli atık bertarafı için iyi bir alternatif olarak solidifikasyon/stabilizasyon teknolojisi, *Ulusal Su Günleri*, Trabzon, 28-30 Eylül.
- Çınar, Ö.** (2008). *Çevre Kirliliği ve Kontrolü*, 1. Basım, Nobel Yayın, Ankara.
- Dayton, E. A., Whitacre, S. D., Dundan, R. S., Basta, N. T.** (2010). Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactured soils, *Plant Soil*, **329**, 27-33.
- Demiryürek, B. E.** (2007). *Türkiye'de hazır beton sektörü ve sektördeki büyüme*, (yüksek lisans tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Deng, A. and Tikalsky, P. J.** (2008). Geotechnical and leaching properties of flowable fill incorporating waste foundry sand, *Waste Management*, **28**, 2161-2170.
- Dingando, J. S., Edil, T. B., Benson, C. H.** (2004). Beneficial reuse of foundry sands in controlled-low strength material, *ASTM Special Technical Publication*, **1459**, 15-30.
- Doğan, Ö.** (2010). *Otomotiv sektöründen kaynaklanan fosfat çamurunun geri kazanımı*, (doktora tezi), GYTE Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- DPT** (2000). Devlet Planlama Teşkilatı sekizinci beş yıllık kalkınma planı, *Demir-Çelik Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu*, Ankara.
- DPT** (2001). Devlet Planlama Teşkilatı sekizinci beş yıllık kalkınma planı, *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu*, Ankara.
- Dungan, R. S., Huwe, J., Chaney, R. L.** (2009). Concentrations of PCDD/PCDFs and PCBs in spent foundry sands, *Chemosphere*, **75**, 1232-1235.
- Dungan, S. R., Kukier, U., Lee, B.** (2006). Blending foundry sands with soil: Effect on dehydrogenase activity, *Sci. Total Environ.*, **357(1-3)**, 221-230.
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, L. S., Greenberg, A. E., Franson, M. A. H.** (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st edition, American Public Health Association, Washington, DC.
- EC** (1999). Council Directive 1999/31/EC of the European Parliament and of the Council of 26 April 1999 on the landfill of waste, *Official Journal of the European Union*, **L 182**, 16.07.1999, 1-19.
- EC** (2008a). Directive 2008/01/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control, *Official Journal of the European Union*, **L 24**, 29.01.2008, 8-29.
- EC** (2008b). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives, *Official Journal of the European Union*, **L 312**, 29.11.2008, 3-30.
- Engroff, E. C., Fero, E. L., Ham, R. K., Boyle, W. C.** (1989). Laboratory leachings of organic compounds in ferrous foundry process waste, *Final Report to American Foundrymen's Society*, Des Plaines, IL.

- EPA** (1995). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources*, Ch 11: Mineral Products Industry: Portland cement manufacturing, 5th ed., AP 42, NC, US.
- Erdoğan, T. Y.** (2007). *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- ERMCO** (2011). *Ready Mixed Concrete Industry Statistics Year 2010*, European Ready Mixed Concrete Organization, Belgium.
- Ersümer, A.** (1969). *Döküm Kaynak Plastik, Makina Teknolojisi İmal Usülleri*, 2. Baskı, İTÜ, İstanbul.
- Ersümer, A.** (1978). *Genel Döküm*, 2. Basım, İstanbul.
- Ersümer, A. ve Uzunova, T.** (1967). *Demir Dökümü*, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
- Ersümer, A. ve Uzunova, T.** (1971). *Demir Döküm*, 2. Baskı, İstanbul.
- Etcheberria, M., Pacheco, C., Meneses, J. M., Berridi, I.** (2010). Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates, *Construction and Building Material*, **24**, 1594-1600.
- Ferraris, M., Salvo, M., Smeacetto, F., Augier, L., Barbieri, L., Corradi, A.** (2001). Glass matrix composites from solid waste materials, *Journal of European Ceramic Society*, **21**, 453-460.
- Fero, R. L., Ham, R. K., Boyle, W. C.** (1986). An investigation of ground water contamination by organic compounds leached from iron foundry solid wastes, *Final Report to American Foundrymen's Society*, Des Plaines, IL.
- Fidaner, S., Çelik, S., Doğmuş, H., Süzen, C., Duran, A. D.** (1978). *Genel Dökümcülük Bilgisi Ders Kitabı*, Cilt:1, Emel Matbaacılık, Ankara.
- Fiore, S., Zanetti, M. C.** (2007). Foundry wastes reuse and recycling in concrete production, *American Journal of Environmental Sciences*, **3(3)**, 135-142.
- FIRST** (2004). *Foundry Sand Facts for Civil Engineers*, Federal Highway Administration Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Fleri, M. and Whetstone, G.** (2007). In situ stabilisation/solidification: Project lifecycle, *J. Hazard. Mater.*, **141**, 441-456.
- Gao, Z. and Drummond, C. H.** (1999). Thermal analysis of nucleation and growth of crystalline phases in vitrified industrial wastes, *Journal of American Ceramic Society*, **82(3)**, 561-565.
- Gedik, A.** (2008). *Utilization of waste foundry sand as highway material*, (doktora tezi), İTÜ Institute of Science and Technology, İstanbul.
- Gedik, A., Lav, A. H., Lav, M. A.** (2008). Utilization of waste foundry sand as pavement sub-base and fill material, *Advances in Transportation Geotechnics, Proceedings of the International Conference held in Nottingham, UK*, 25-27 Ağustos, 143-147.

- Gedik, A., Lav, A. H., Lav, M.A.** (2010). Atık döküm kumlarının yol inşaatında alt temel ve dolgu malzemesi olarak kullanılması, 3. *Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu (IFES 2009)*, İstanbul, 28-29 Ocak.
- Goodhue, M. J., Edil, T. B., Benson, C. H.** (2001). Interaction of foundry sands with geosynthetics, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**, 353-362.
- Gönüllü, M. T.** (2007). Döküm kumu rejenerasyonu değerlendirmesi, 2. *Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu ve Sergisi*, İstanbul, 24-26 Ekim.
- Guney, Y., Aydılek, A., Demirken, M.** (2006). Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway sub-base, *Waste Management*, **26**, 932-945.
- Guney, Y., Sari, Y. D., Yalcin, M., Tuncan, A., Donmez, S.** (2010). Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete, *Waste Management*, **30**, 1705-1713.
- Güney, Y. ve Koyuncu, H.** (2002). Atık döküm kumlarının yol alt yapısında kullanımı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Eskişehir, 21-22 Ekim.
- Ham, R. K. and Boyle, W. C.** (1981). Leachability of foundry process solid wastes, *J. Environ Div*, **107**(1), 155-170.
- Ham, R. K., Boyle, W. C., Blaaha, F. J., Oman, O., Trainer, D., Kunes, T. P., Nichols, D. G., Stanforth, R. D.** (1986). Leachate and groundwater quality in and around ferrous foundry landfill and comparison to leach test results, *Transaction of American Foundrymen's Society*, **94**, 935-942.
- Ham, R. K., Boyle, W. C., Blaha, F.J.** (1990a). Comparison of leachate quality in foundry waste landfills to leach test abstracts, *J Hazardous Ind Solid Waste Testing Disposal*, **6**, 29-44.
- Ham, R. K., Hippe, J. C., Boyle, W. C., Lovejoy, M., Trager, P. A., Wellender, D.** (1990b). Evaluation of foundry wastes for use in highway construction, *ASCE Environmental Engineering*, 681-682.
- HAWAMAN** (2009). Türkiye'de sanayiden kaynaklanan tehlikeli atıkların yönetiminin iyileştirilmesi, *Döküm Sektörü Rehber Döküman*, LIFE HAWAMAN Projesi, **LIFE06 TCY/TR/000292**, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Heine, R. W., Loper, C. R., Rosenthal, P. C.** (1967). *Principles of Metal Casting*, McGraw-Hill Inc, US.
- Henry, J. and Heinke, G.** (1996). *Environmental Science and Engineering*, Prentice Hall; ISBN 0-13-120650-8.
- IPPC BREF EC** (2004). *Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques in the smitheries and foundries industry*, **KV/EIPPCB/SF_BREF_FINAL**, Institute for Prospective Technological Studies; Sustainability in Industry, Energy and Transport, European IPPC Bureau, Spain.

- İMO** (2001). Betonda kalite deklarasyonu, *İMO İstanbul Bülten*, **56**, İstanbul.
- İzgiz, S.** (1987). Dökümhanelerde kalıp, maça malzemeleri, kalıplama yöntemleri ve laboratuvar teknikleri, SEGEM, Ankara.
- Jang, A. and Kim, S.** (2000). Technical note solidification and stabilization of Pb, Zn, Cd and Cu in tailing wastes using cement and fly ash, *Minerals Engineering*, **13(14-15)**, 1659-1662.
- Javed, S. and Lovell, C. W.** (1994a). Use of waste foundry sand in highway construction report. **JHRP/INDOT/FHWA-94/2J**, *Final Report*, Purdue School of Engineering, West Lafayette, IN.
- Javed, S., Lovell, C. W., Wood, L. E.** (1994b). Waste foundry sand in asphalt concrete, *Transport Res Board Rec*, **1437**, 27-34.
- Javed, S. and Lovell, C. W.** (1994c). Use of waste foundry sand in civil engineering, **1486**, *Transportation Research Board*, 109-113.
- Kaantee, U., Zevenhoven, R., Backman, R., Hupa, M.** (2002). Modelling a cement manufacturing process to study possible impacts of alternative fuels, *Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects*, Sweden, June 16-20.
- Karakule, F., Akakın, T., Uçar, S.** (2004). Türkiye'de ve dünyada hazır beton sektörü, *Beton 2004 Kongresi*, Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB), İstanbul, 10-12 Haziran.
- Karamalidis, A. and Voudrias, E.** (2007). Leaching of VOCs from cement based stabilized/solidified refinery oily sludge using solid phase microextraction, *Environ. Technol.*, **28**, 1173-1185.
- Karayildirim, T., Yanik, J., Yuksel, M., Bockhorn, H.** (2006). Characterisation of products from pyrolysis of waste sludges, *Fuel*, **85**, 1498-1508.
- Karpuzcu, M.** (2006). *Çevre Kirlenmesi ve Kontrolü*, Kubbealtı, 8. baskı, İstanbul.
- Kaur, I.** (2006). *Mechanical properties of concrete incorporating used foundry sand*, (yüksek lisans tezi), Deemed University, Thapar Institute of Engg&Tech., Patiala.
- Kaur, G., Siddique, R., Rajor, A.** (2012). Properties of concrete containing fungal treated waste foundry sand, *Construction and Building Materials*, **29**, 82-87.
- Kepez, Ü.** (2007). Türkiye'de döküm sektörü-Demir döküm, *TÜBİTAK Metal Teknoloji Platformu Oluşturma Çalıştayı*, Gebze, Kocaeli, 23-24 Şubat.
- Khatib, J.M, Baig, S., Bougara, A., Booth, C.** (2010). Foundry sand utilisation in concrete production, *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Ancona, Italy, 28-30 Haziran.
- Khatib, J. M. and Ellis, D. J.** (2001). Mechanical properties of concrete containing foundry sand, *American Concrete Institute special publication*, **SP-200**, 733-748.

- Kirk, P.B.** (1998). *Field demonstration of highway embankment constructed using waste foundry sand*, (doktora tezi), Purdue University, West Lafayette, IN, US.
- Kleven, J. R., Edil, T. B., Benson, C. H.** (2000). Evaluation of excess foundry system sands for use as sub-base material, *Transportation Research Record*, **1714**, 40-48.
- Kocasoy, G., Aydın, G. A., Zeren, B. A. (ed.)** (2005). *Gelişmekte Olan Ülkelerde Tehlikeli Atıkların ve Deprem Atıklarının Yönetimi*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Korac, M., Gavrilovski, M., Kamberovic, Z., Illic, I.** (2006). Possibility of used foundry sand exploitation in civil engineering, *Acta Metallurgica Slovaca*, **12**, 203-207.
- KSD** (2009). Kireç Sanayicileri Derneği, <http://www.kirec.org.tr/>, alındığı tarih: 14.03.2011
- Lamond, J. F. and Pielert, J. H.** (2006). *Significance of Tests and Properties of Concrete&Concrete-Making Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Lawrence, D. and Mavroulidou, M.** (2009). Properties of concrete containing foundry sand, *Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Science and Technology*, Chania, Greece, 3-5 Eylül.
- Leonard, S. A., Stegemann, J. A.** (2010). Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings, *Journal of Hazardous Materials*, **174**, 463-472.
- Lindsay, B. J. and Logan, T. J.** (2005). Agricultural reuse of foundry sand, *Journal of Residuals Science & Technology*, **2(1)**, 3-12.
- Mast, D. G. and Fox, P. J.** (1998). Geotechnical performance of a highway embankment constructed using waste foundry sand, *Geotechnical Special Publication*, **79**, 66-85.
- Matschei, T., Lothenbach, B., Glasser, F. P.** (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration, *Cement and Concrete Research*, **37**, 551-558.
- Misra, V., Pandey, S. D.** (2005). Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India, *Environment International*, **31**, 417-431.
- MOEE** (1993). *Spent Foundry Sand - Alternative Uses Study*, Report prepared by John Emery Geotechnical Engineering Limited for Ontario Ministry of the Environment and Energy and the Canadian Foundry Association, Quenn's Printer for Ontario.
- Moir, G.** (2003). *Advanced Concrete Technology, Constituent Materials*, Ch1: Cements, Sf. 1-45, ed. Newman, J., Choo, B.S., Elsevier, London.
- Monosi, S., Sani, D., Tittarelli, F.** (2010). Used foundry sand in cement mortars and concrete production, *The Open Waste Management Journal*, **3**, 18-25.
- Mroueh, U., Wahlstrom, M.** (2002). By-products and recycled materials in earth construction in Finland - an assessment of applicability, *Resour. Conserv. Recycl.*, **35**, 117-129.

- Naga, S. M. and El-Maghraby, A.** (2003). Industrial waste as raw materials for tile making, *Silicates Industrials*, **68**, 89-92.
- Naik, T. R., Kraus, R. N., Chun, Y. M., Ramme, W. B., Singh, S. S.** (2003). Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials, *J Mater Civil Eng*, **15(4)**, 400-407.
- Naik, T. R., Kraus, R. N., Chun, Y. M., Ramme, W. B., Siddique, R.** (2004). Precast concrete products using industrial by-products, *ACI Mater J*, **101(3)**, 199-206.
- Naik, T. R., Patel, V. M., Parikh, D. M., Tharaniyil, M. P.** (1994). Utilization of used foundry sand in concrete, *J. Mater. Civil Eng.*, **6**, 254-263.
- Naik, T. R., Singh, S. S., Tharaniyil, M. P., Wendorf, R. B.** (1996). Application of foundry by-product materials in manufacture of concrete and masonry products, *ACI Mater. J.*, **93**, 41-50.
- Naik, T. R., Singh, S. S., Ramme, W. B.** (2001). Performance and leaching assessment of flowable slurry, *Journal of Environmental Engineering*, **127(4)**, 359-368.
- Neville, A. M.** (1995). *Properties of concrete*, 4th edition, Longman, Harlow.
- NZIC** (1998). *The Manufacture of Portland Cement*. Chemical Processess in New Zealand, 2nd edition, New Zealand Institute of Chemistry, New Zealand.
- Pereira, C. F., Rodriguez-Pinero, M., Vale, J.** (2001). Solidification/stabilization of electric arc furnace dust using coal fly ash-Analysis of the stabilization process, *Journal of Hazardous Materials*, **B82**, 183-195.
- Peters, F., Voigt, R., Ou, S. Z., Beckermann, C.** (2007). Effect of mould expansion on pattern allowances in sand casting of steel, *International Journal of Cast Metals Research*, **20(5)**, 275-287.
- Punnaruttanakun, P., Meeyoo, V., Kalambaheti, C., Rangsunvigit, P., Rirksomboon, T., Kitiyanan, B.** (2003). Pyrolysis of API seperator sludge, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **68-69**, 547-560.
- Quaranta, N., Caligaris, M., Lopez, H., Unsen, M., Pasquini, J., Lalla, N., Boccaccini, A. R.** (2004). Recycling of foundry sand residuals as aggregates in ceramic formulations for construction materials, *Key Engineering Materials*, **264-268**, 1743-1746.
- Rabel, A., Spadaro, J. V., McGavron, P. D.** (1998). Health risks of air pollution from incinerator: a perspective waste management. *Waste Management Res.*, **16**, 365-388.
- Raupp-Pereiraa, F., Hotzab, D., Segadaesa, A. M., Labrincha, J. A.** (2006). Ceramic formulations prepared with industrial wastes and natural sub-products, *Ceramics International*, **32**, 173-179.
- RCRA**, 1989. *Guidance manual for hazardous waste permits*, US Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response, **PB 84-10057**, Washington, DC.

- Reddi, N. L., Rieck, P. G., Schwab, A. P., Chou, S. T., Fan, L. T.** (1995). Stabilization of phenolics in foundry sand using cementitious materials, *Journal of Hazardous Materials*, **45**, 89-106.
- Regan, R. W., Heaney, M., Dunkelberger, J. A.** (1997). Weighing sand reuse options from the customer's perspective, *Modern Casting*, **87**, 45-47.
- Rosenfeld, P. E. ve Feng, L. G. H.** (2011). *Risks of Hazardous Wastes*, UCLA School of Public Health, Soil/Water/Air Protection Enterprise, Santa Monica.
- Seung-Whee, R. and Woo-Keun, L.** (2006). Characteristics of spent foundry sand-loess mixture as ceramic supports materials, *Materials Science Forum*, **510-11**, 378-381.
- Shi, C. and Spence, R.** (2004). Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive, and mixed wastes, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **34**, 391-417.
- Siddique, R., Aggarwal, Y., Aggarwal, P., Kadri, E. H., Bennacer, R.** (2011). Strength, durability and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS), *Construction and Building Materials*, **25**, 1916-1925.
- Siddique, R., Gupta, R., Kaur, I.** (2007). Effect of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregate on the properties of concrete, *22nd International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Philadelphia, Pennsylvania, US, 18-21 Mart.
- Siddique, R., Kaur, G., Rajor, G.** (2010). Waste foundry sand and its leachate characteristics, *Resources, Conservation and Recycling*, **54**, 1027-1036.
- Siddique, R. and Noumowe, A.** (2008). Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, **53**, 27-35.
- Siddique, R., Schutter, G., Noumowe, A.** (2009). Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, **23**, 976-980.
- Siddique, R. and Singh, G.** (2011). Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing, *Resources, Conservation and Recycling*, **55**, 885-892.
- Singh, G. and Siddique, R.** (2012). Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete, *Construction and Building Materials*, **26**, 416-422.
- Slyvia, J. G.** (1972). *Cast Metals Technology*, The Pennsylvania University, US.
- Smith, A.** (1994). Utilization of used foundry sand in concrete, *J Mater Civ Eng*, **6(2)**, 254-63.
- Solmaz, P.** (2008). *Atık döküm kumunun geçirimsiz perde yapılarak tekrar kullanımı*, (yüksek lisans tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Solmaz, P., Benli, B., Lav, M. A., Çelik, M. S., Lav, A. H.** (2007). Atık döküm kumunun geçirimsiz perde yapılarak tekrar kullanımı, 2. *Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu ve Sergisi*, İstanbul, 24-26 Ekim.
- Stephan, J., Francois, T., Foundeur, D.** (1996). La reutilization des sables uses de fonderie en fabrication de produits a base de liants hydrauliques, *Founderie Foundeur D'Aujourd' Hui*, Sf. 152.
- Şimşek, O.** (2004). *Beton ve Beton Teknolojisi*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Tarun, R. N. and Shiw, S. S.** (1997). Permeability of flowable slurry materials containing foundry sand and fly ash, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123(5)**, 446-452.
- Temiz, H., Binici, H., Bodur, M. N., Kara, O.** (2006). Kahramanmaraş doğal agregalarının mühendislik özellikleri, *KSU Journal of Science and Engineering*, **9(2)**, 61-65.
- THBB** (2011). *2010 Yılı Hazır Beton Sektörü İstatistikleri*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Tikalsky, P. J., Gaffney, M., Regan, R.** (2000). Properties of controlled low-strength material containing foundry sand, *ACI Mater Journal*, **97(6)**, pp.698-702.
- Tikalsky, P. J., Smith, E., Regan, R.** (1998). Proportioning spent casting sand in controlled low-strength materials, *ACI Mater Journal*, **95(6)**, 740-746.
- Toraman, Ö. Y. ve Topal, H.** (2003). Katı atık ve arıtma çamurlarının değerlendirilmesinde alternatif termal teknolojiler ve uygulamaları, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **18(1)**, 19-33.
- Traeger, P. A.** (1987). *Evaluation of the constructive use of foundry wastes in highway construction*, (yüksek lisans tezi), The University of Wisconsin-Madison, Madison, WI.
- TRB** (1994). Aggregates: Waste and recycled materials; soils, geology and foundations, materials and construction, *National Academy of Science Transportation Research Board*, **TRB/TRR-1437**, Sf. 73.
- TS-3527** (1980). Beton agregalarında ince madde oranı tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN-197-1** (2002a). Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN-206-1** (2002b). Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-500** (2000). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN-459-1** (2005a). Yapı kireci - Bölüm 1: Tarifler, özellikleri ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-2824-EN-1338** (2005b). Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metodları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

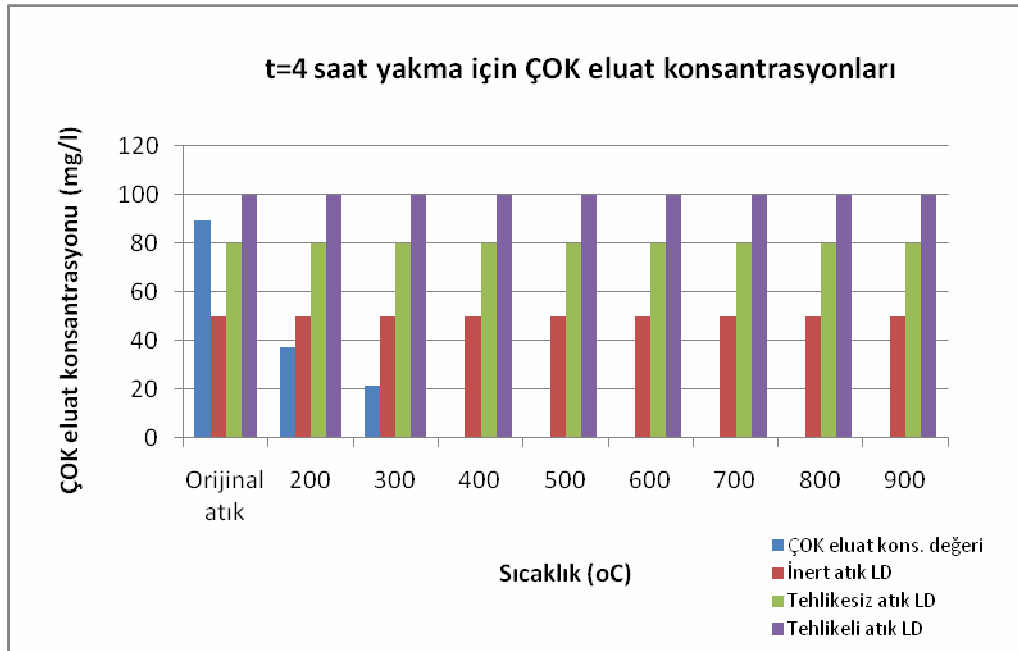
- TS EN-12390-2** (2010a). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN-12350-2** (2010b). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slamp) deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN-196-3+A1** (2010c). Çimento deney yöntemleri - Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN-12390-7** (2010d). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TÜDOKSAD** (2011). *Kişisel görüşme*, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, İstanbul.
- TÜDOKSAD** (2012). Türkiye Döküm Sanayi-2012 yılına girerken mevcut durum, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, İstanbul.
- Uçaroğlu, S.** (2002). *Otomotiv endüstrisi zararlı atıklarının solidifikasyonu ve geri kazanımı*, (doktora tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- US EPA** (1996). *Hazardous Waste Characteristics Scoping Study*, US EPA Office of Solid Waste, Washington DC, US.
- US EPA** (1999). Beneficial re-use of ferrous foundry by-products, *Draft Environmental Guideline*, Washington DC, US.
- US EPA** (2001). Treatment technologies for site cleanup: *Annual Status Report*, 10th ed., **EPA-542-R-01-004**, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC, US.
- US EPA** (2006). *State Toolkit for Developing Beneficial Reuse Programs for Foundry Sands*, Washington DC, US.
- Vipulanandan, C., Weng, Y., Zhang, C.** (2000). Designing flowable grout mixes using foundry sand, clay and fly ash in advances in gouting modification, *ASCE Geotechnical Special Publications*, **104**, 215-233.
- Wentz, C. A.** (1989). *Hazardous Waste Management*, McGraw-Hill, Singapore.
- Winkler, E. S. and Bol'shakov, A. A.** (2000). *Characterization of Foundry Sand Waste*, Chelsea Center for Recycling and Economic Development, University of Massachusetts, MA.
- Yalçın, M., Güney, Y., Koyuncu, H., Baş, Ö. F.** (2003). Atık döküm kumunun betonda kullanılabilirliği, *5. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 1-3 Ekim.
- Yaylalı, G.** (2007). Turkish Foundry Industry in 2007, *Journal of Turkish Metallurgical and Materials*, **13**, İstanbul.
- Yerlikaya, C.** (2001). *Dökümhane atık kumlarındaki inorganik ve organik kirleticilerin karakterizasyonu*, (doktora tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zannetti, M. C. and Fiore, S.** (2002). Foundry processes: the recovery of green moulding sands for core operations, *Resources, Conservation and Recycling*, **38**, 243-254.

EKLER

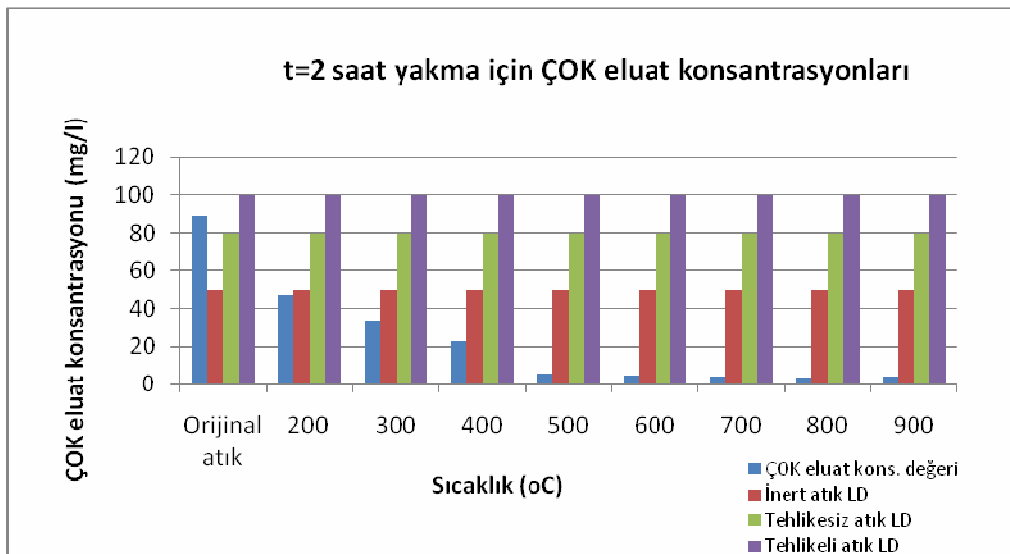
EK A: ADK'nın yakılması ile elde edilen TOK, ÇOK ve pH değerleri

EK B: ADK'nın yıkanması ile elde edilen TOK, ÇOK ve pH değerleri

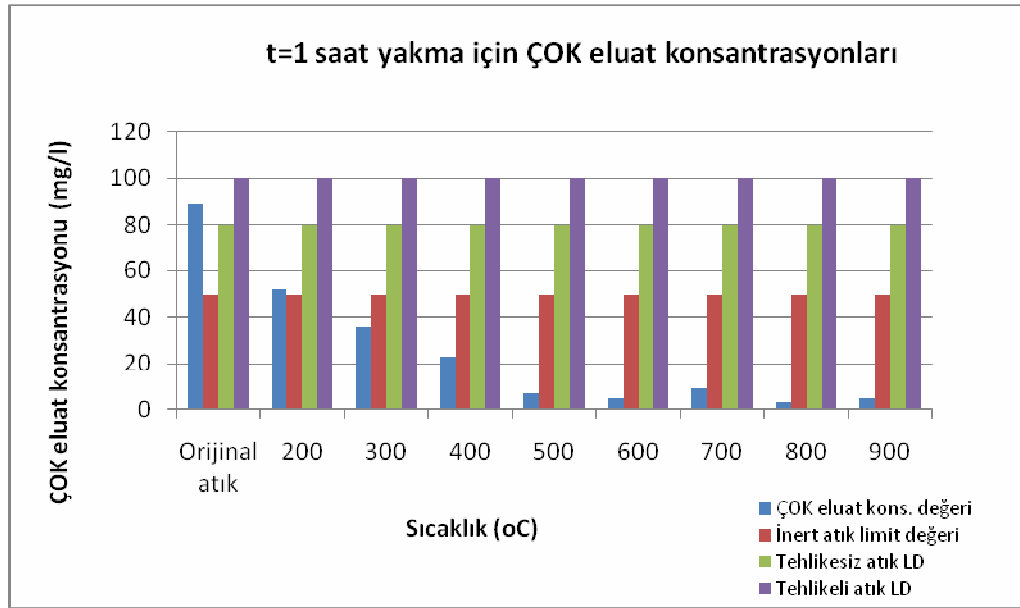
EK C: ADK'nın solidifikasyon/stabilizasyonu ile elde edilen TOK,
ÇOK ve pH değerleri



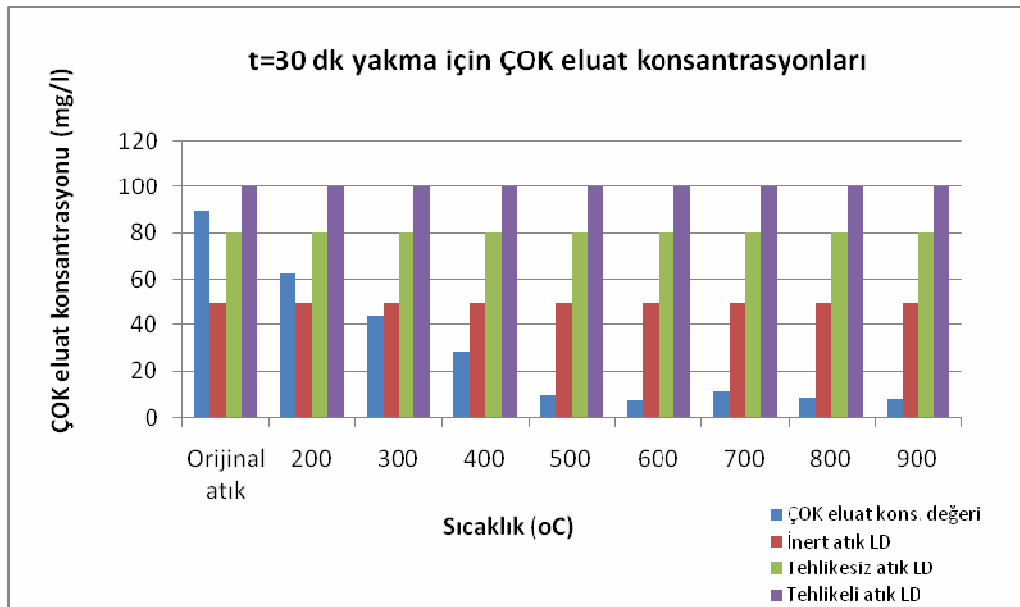
Şekil A.1 : ADK'nın 200-900°C'de 4 sa. yakılması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



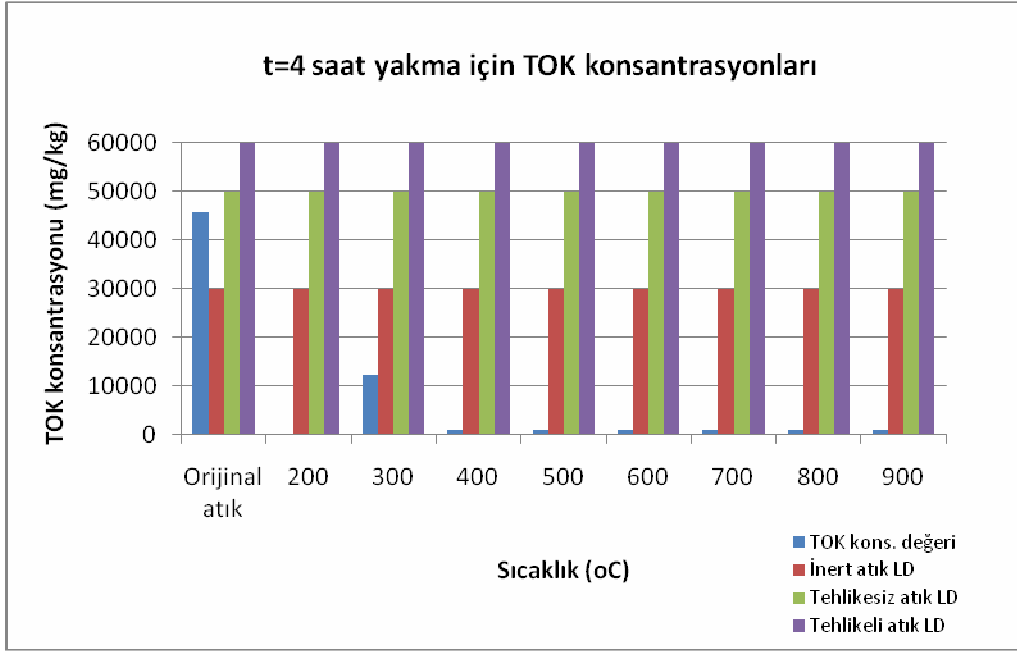
Şekil A.2 : ADK'nın 200-900°C'de 2 sa. yakılması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



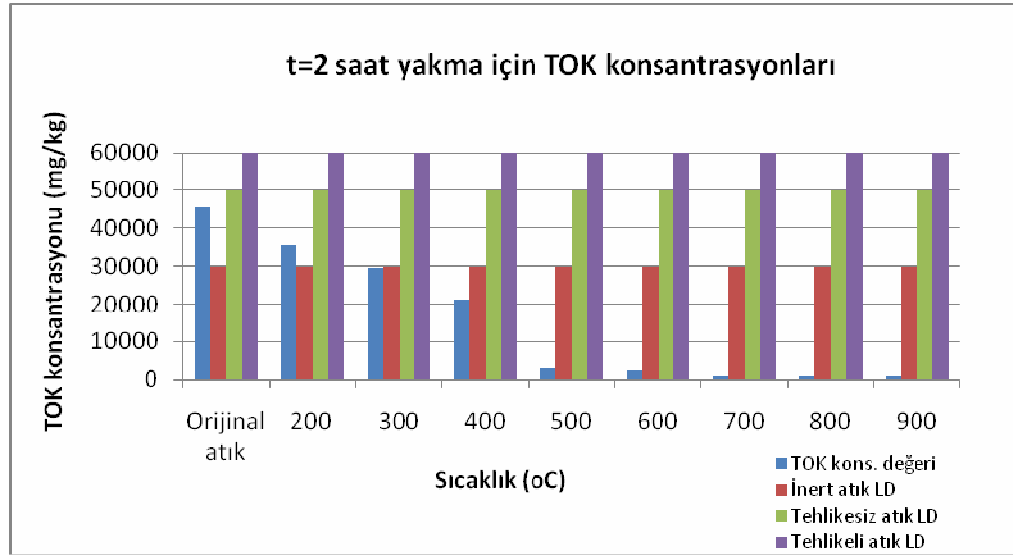
Şekil A.3 : ADK'nın 200-900°C'de 1 sa. yakılması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



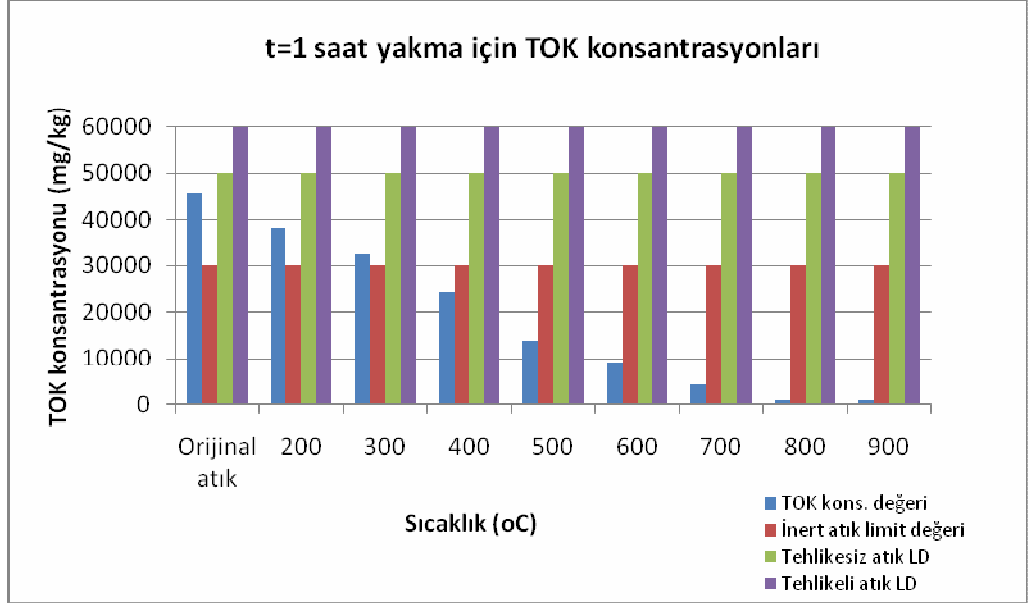
Şekil A.4 : ADK'nın 200-900°C'de 30 dk. yakılması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



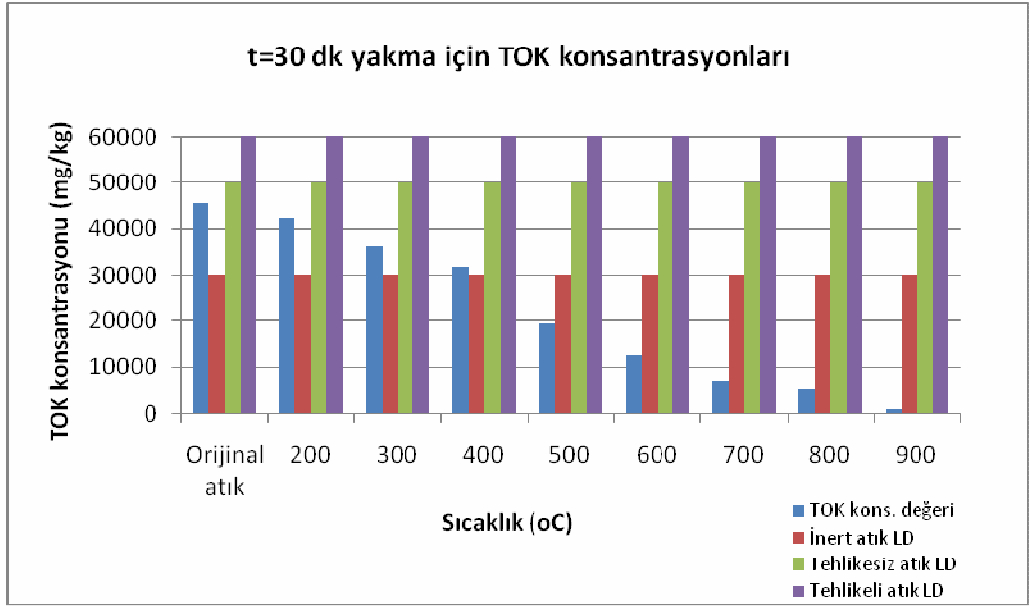
Şekil A.5 : ADK'nın 200-900°C'de 4 sa. yakılması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



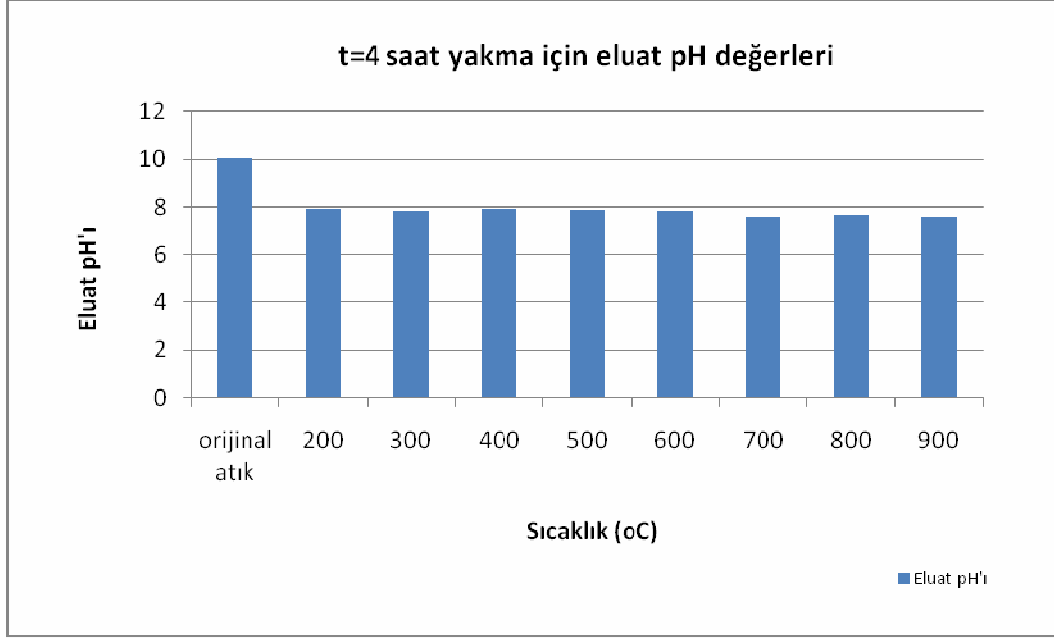
Şekil A.6 : ADK'nın 200-900°C'de 2 sa. yakılması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



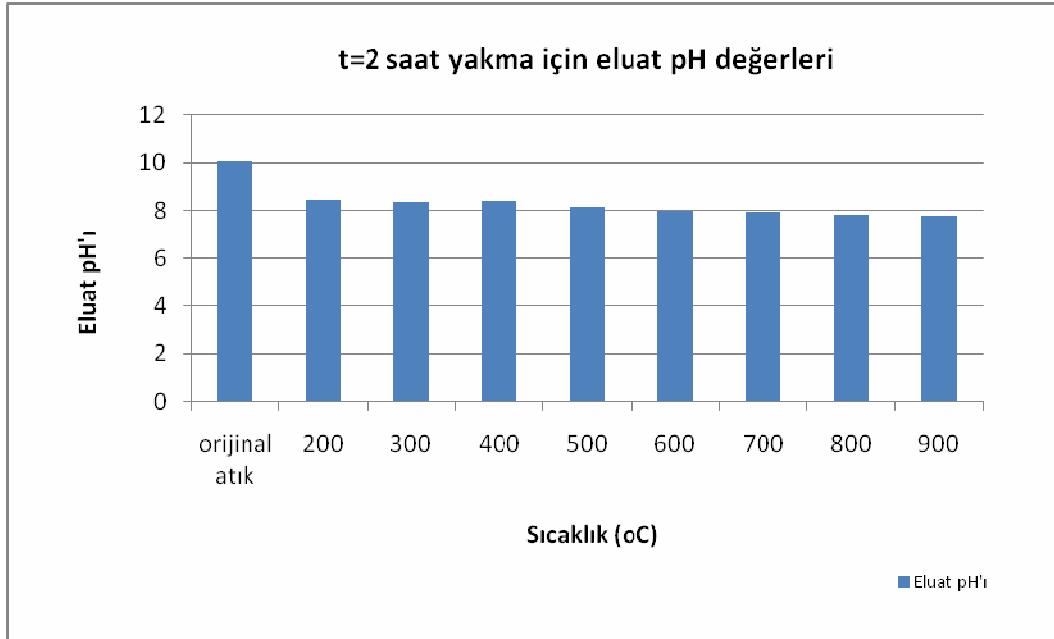
Şekil A.7 : ADK'nın 200-900°C'de 1 sa. yakılması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



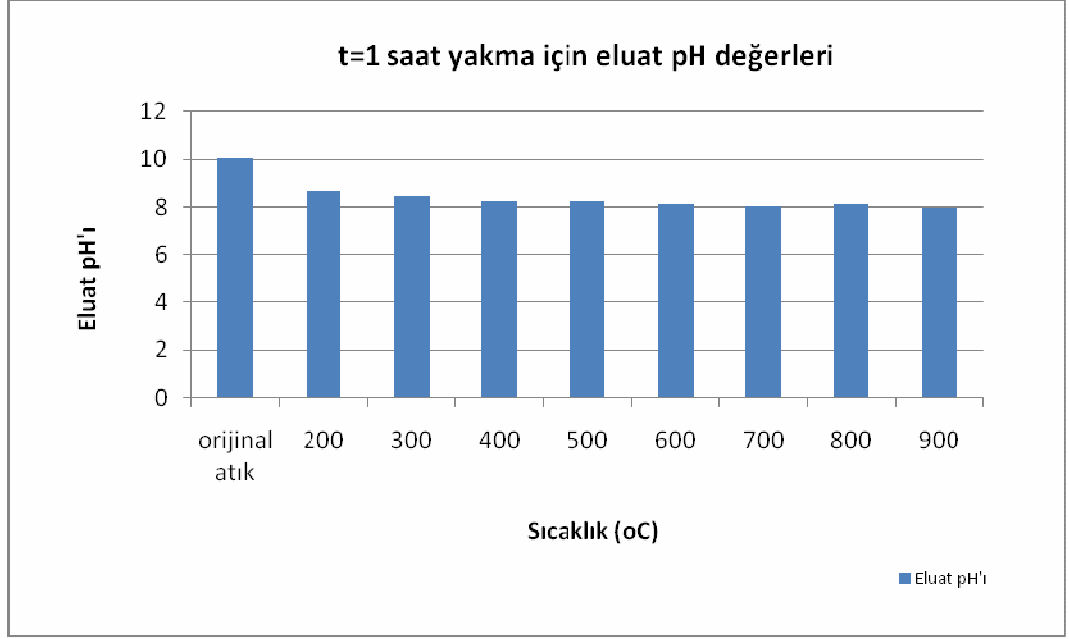
Şekil A.8 : ADK'nın 200-900°C'de 30 dk. yakılması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



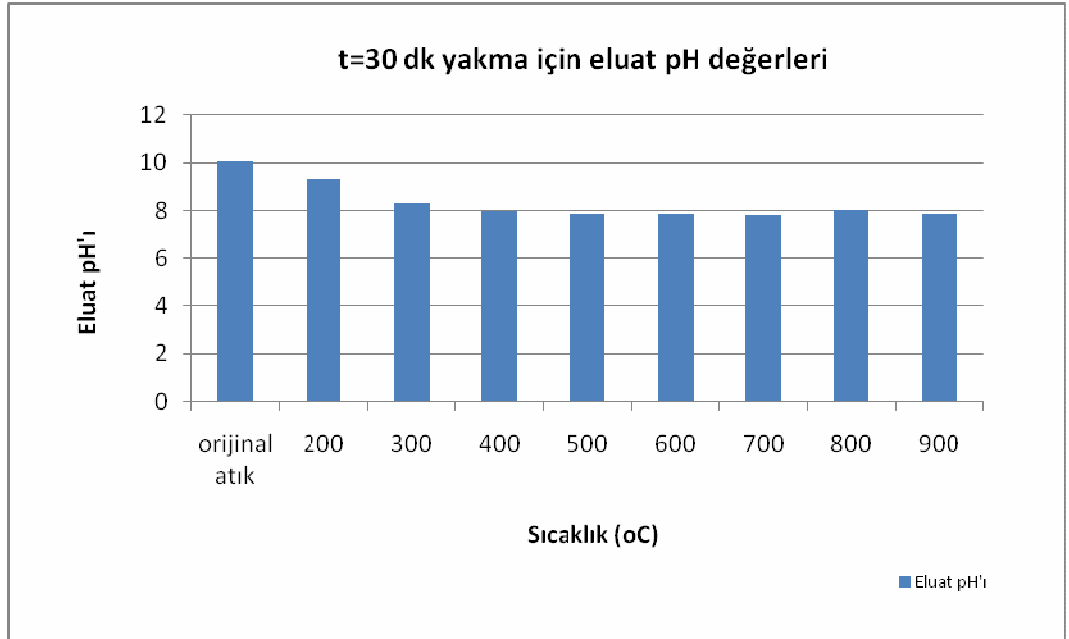
Şekil A.9 : ADK'nın 200-900°C'de 4 sa. yakılması ile elde edilen eluat pH konsantrasyonları.



Şekil A.10 : ADK'nın 200-900°C'de 2 sa. yakılması ile elde edilen eluat pH konsantrasyonları.

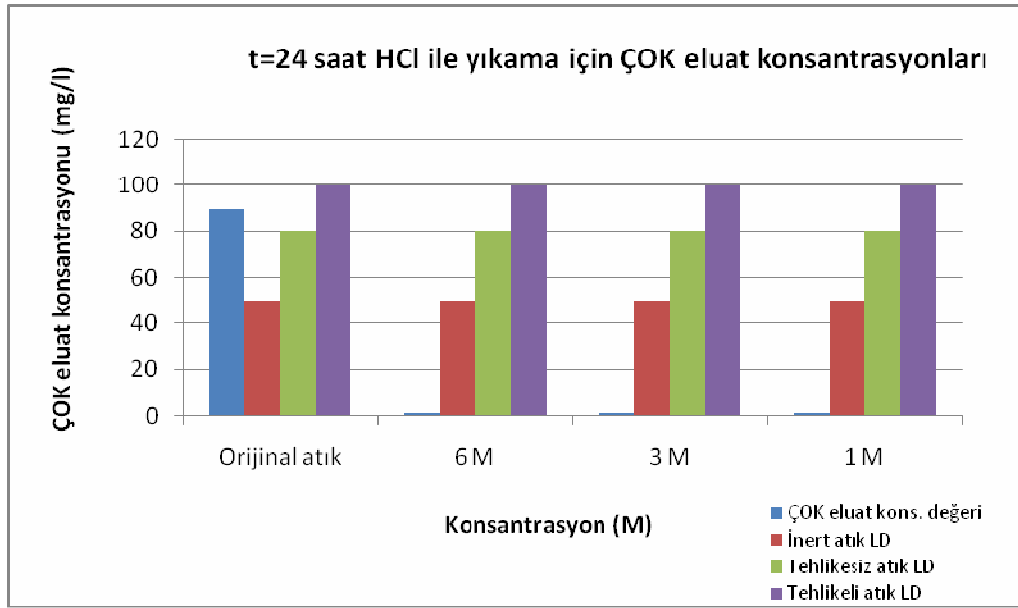


Şekil A.11 : ADK'nın 200-900°C'de 1 sa. yakılması ile elde edilen eluat pH konsantrasyonları.

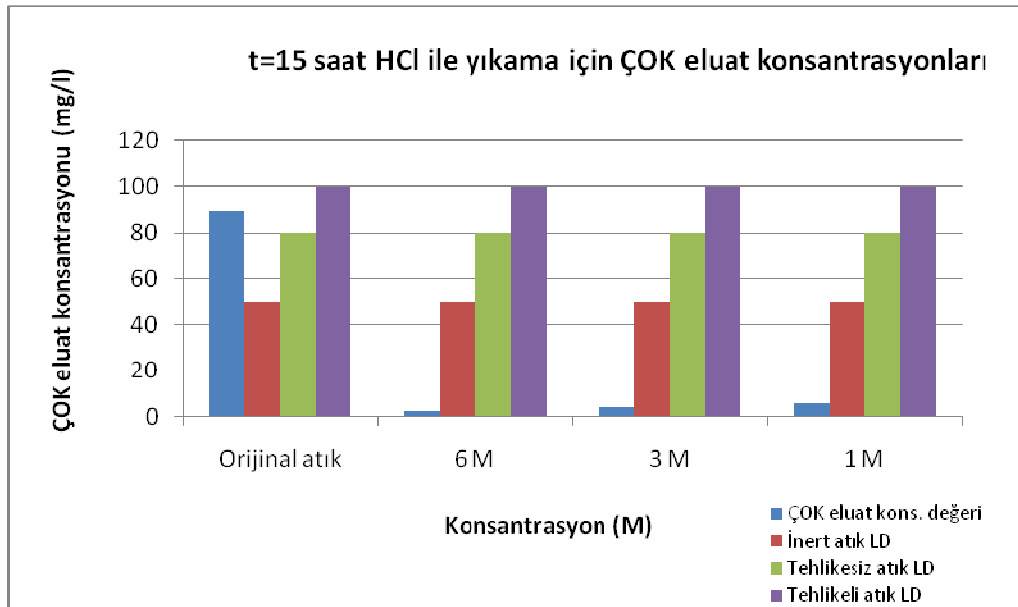


Şekil A.12 : ADK'nın 200-900°C'de 30 dk. yakılması ile elde edilen eluat pH konsantrasyonları.

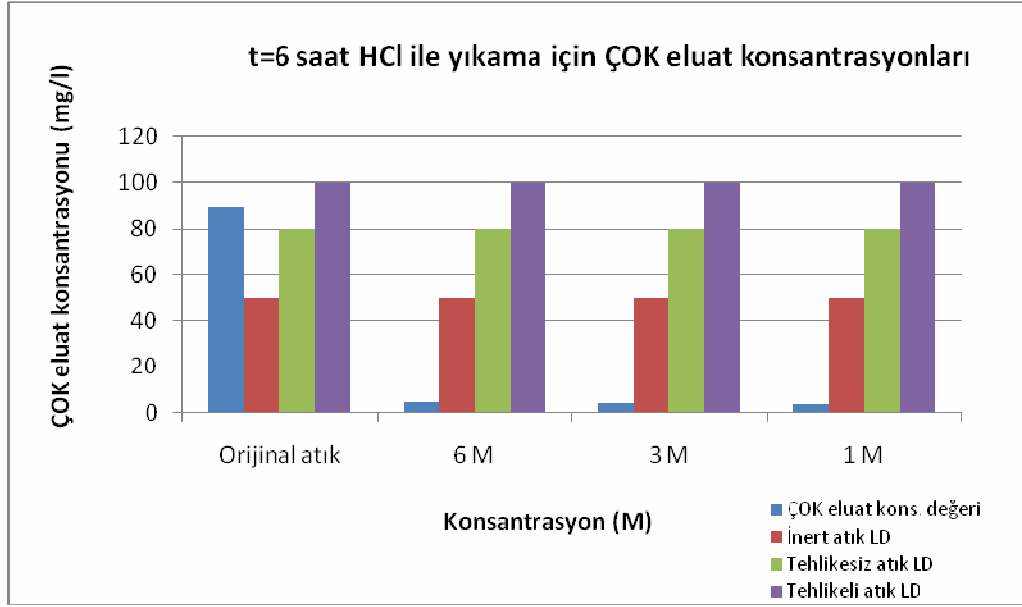
EK B



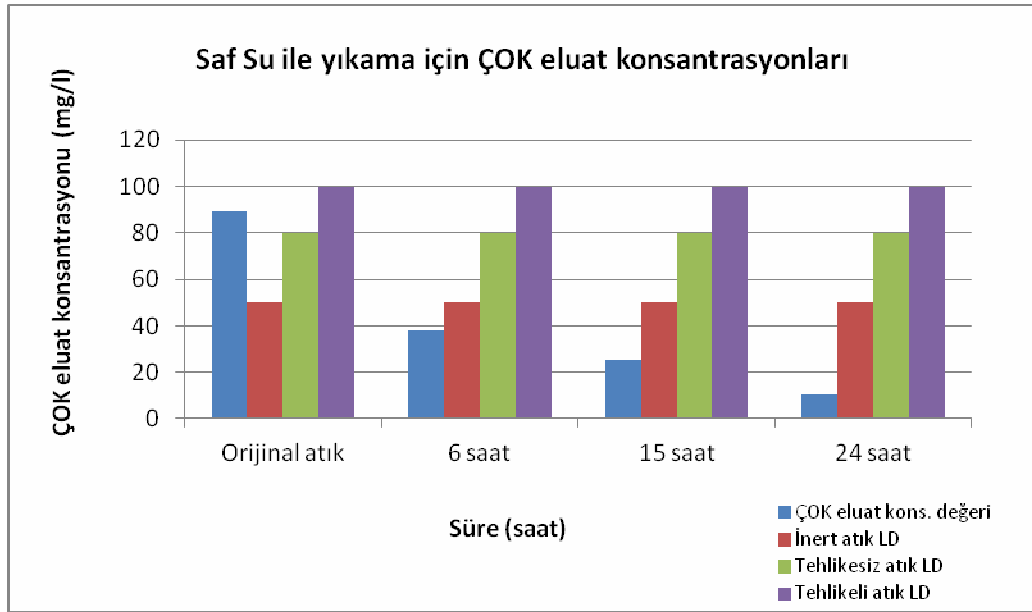
Şekil B.1 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



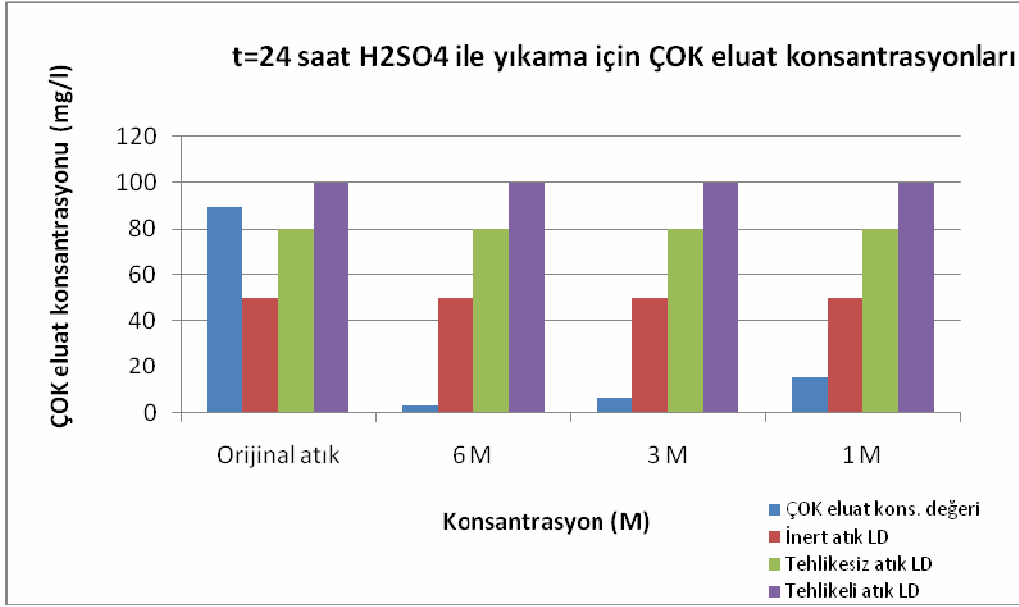
Şekil B.2 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



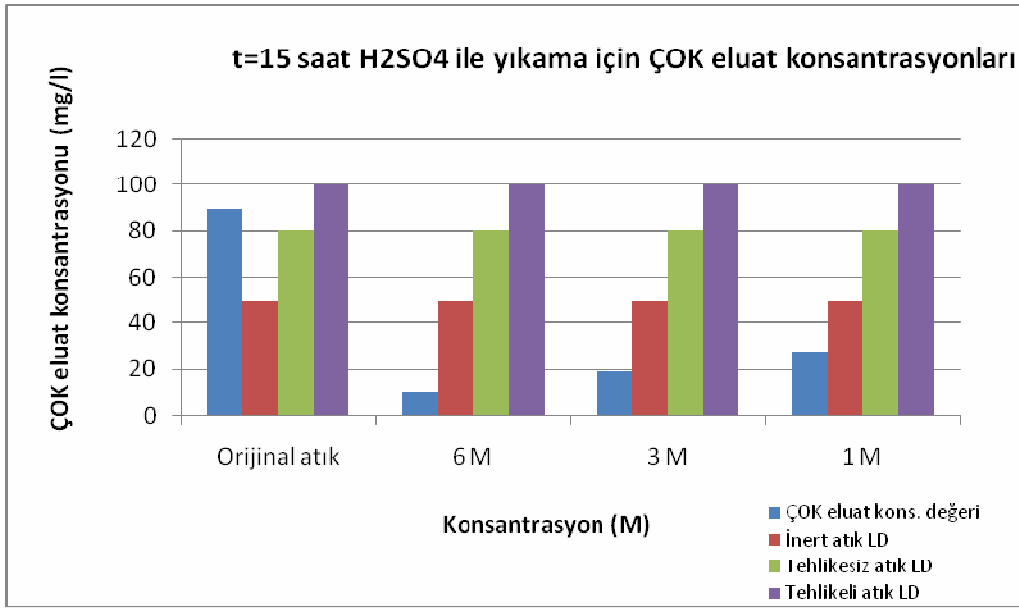
Şekil B.3 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



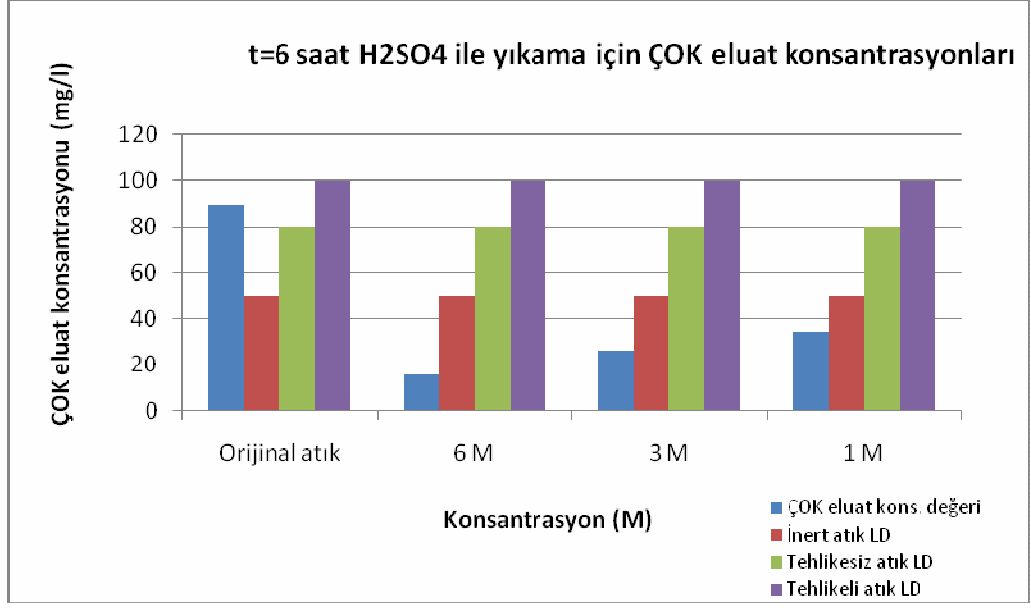
Şekil B.4 : ADK'nın üç farklı sürede şebeke suyuyla yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



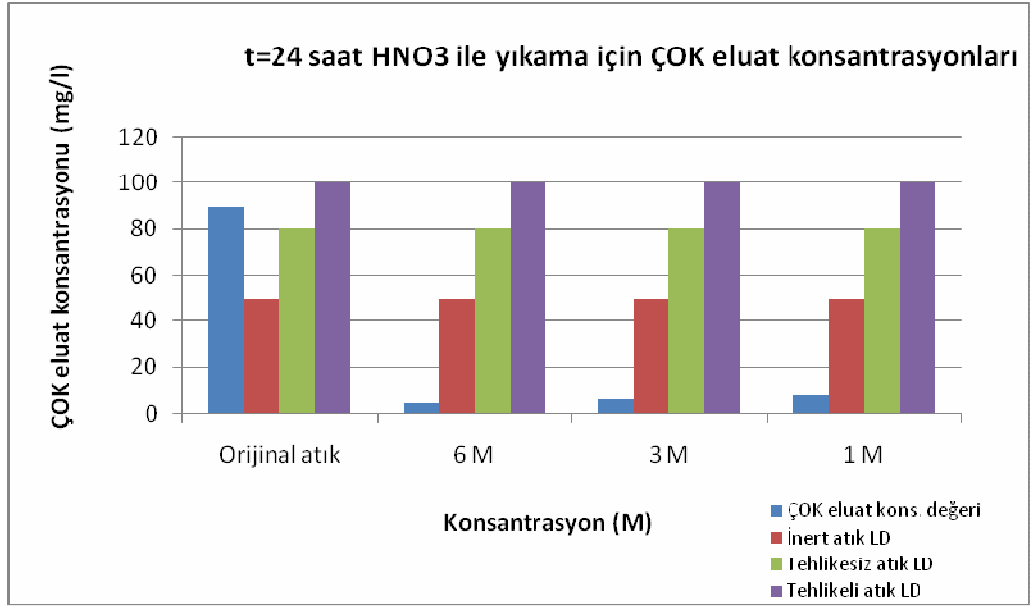
Şekil B.5 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H₂SO₄ çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



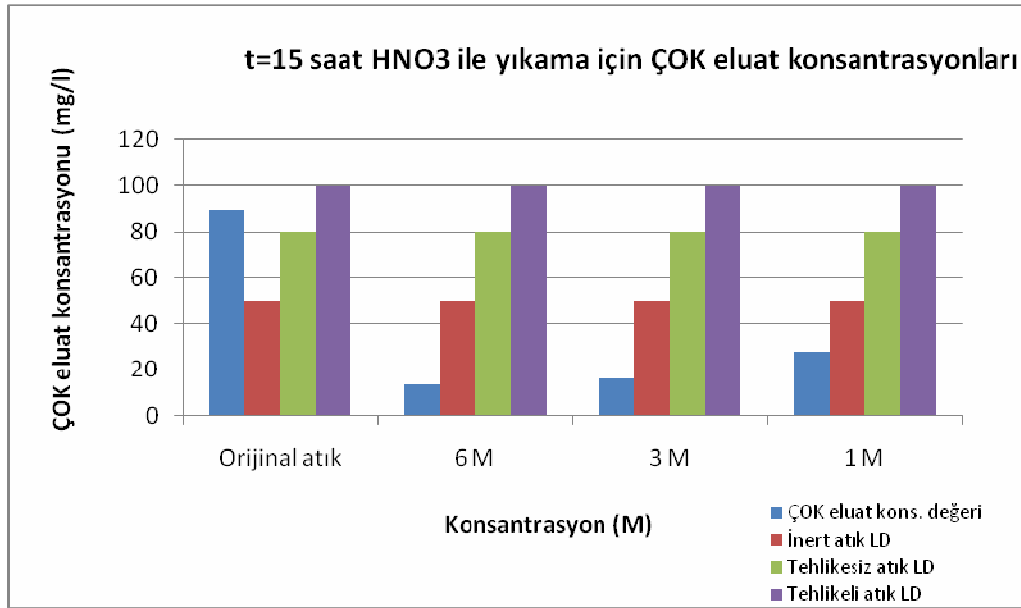
Şekil B.6 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H₂SO₄ çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



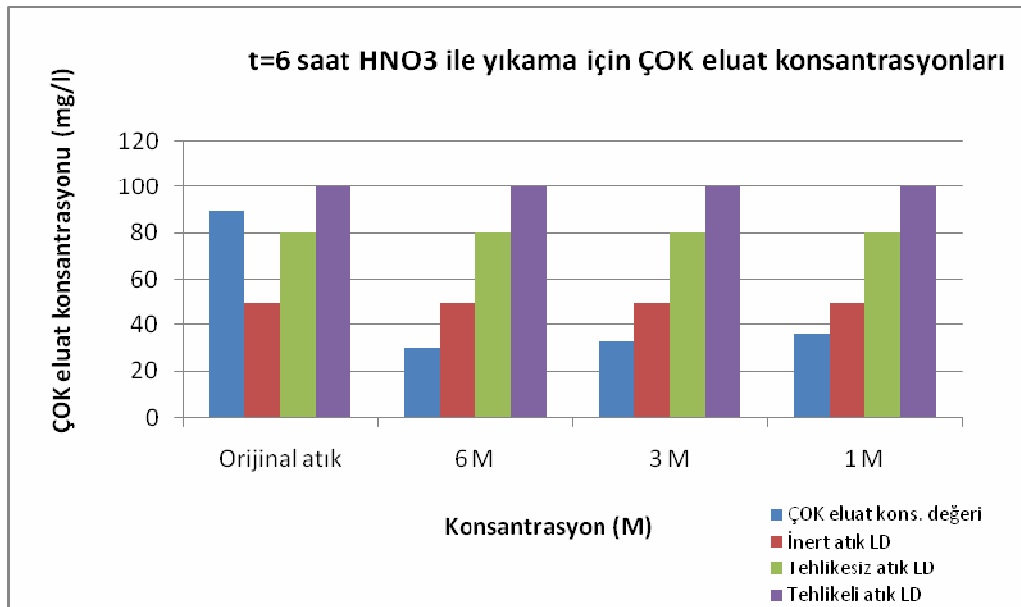
Şekil B.7 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H₂SO₄ çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



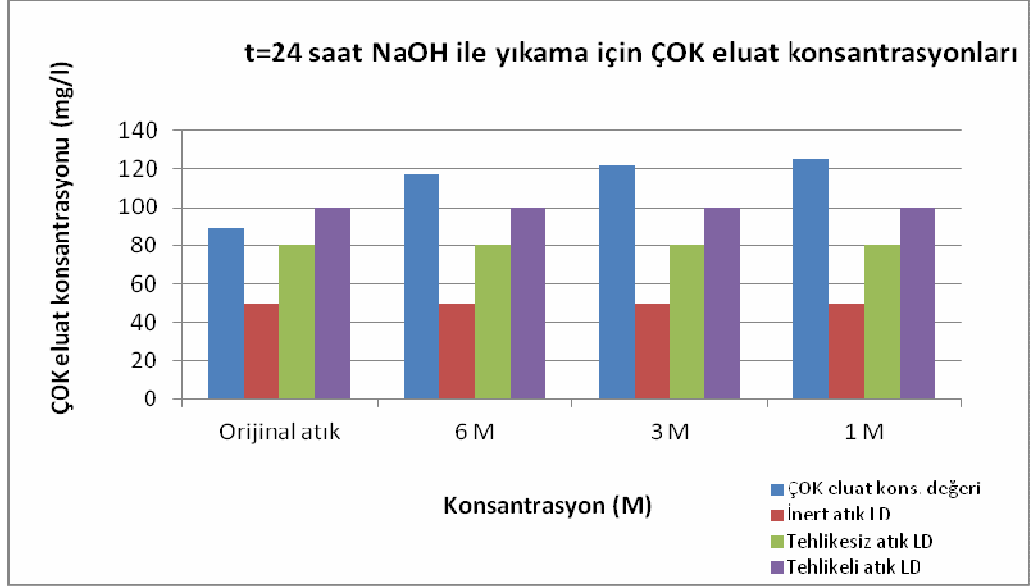
Şekil B.8 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO₃ çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



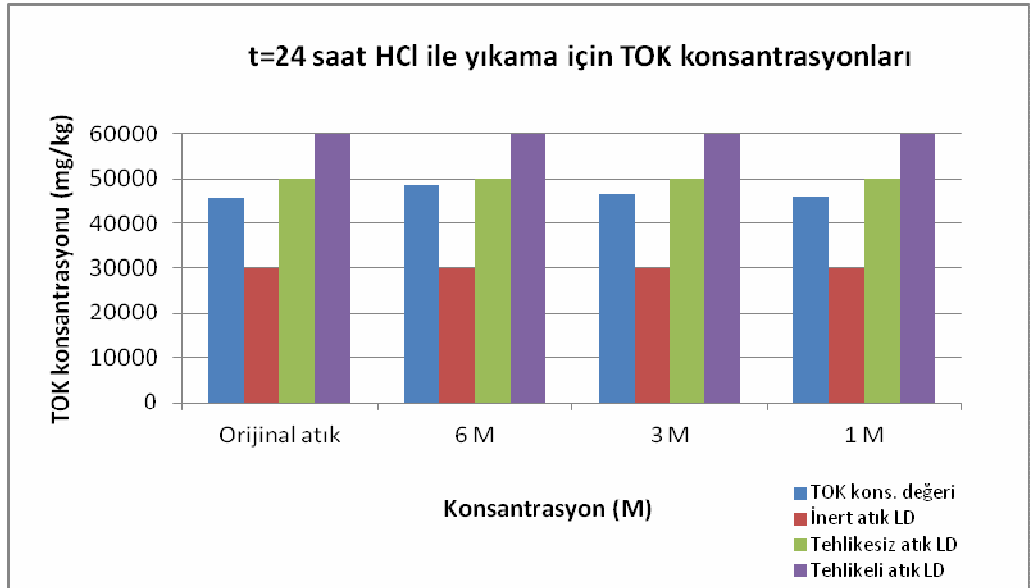
Şekil B.9 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO₃ çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



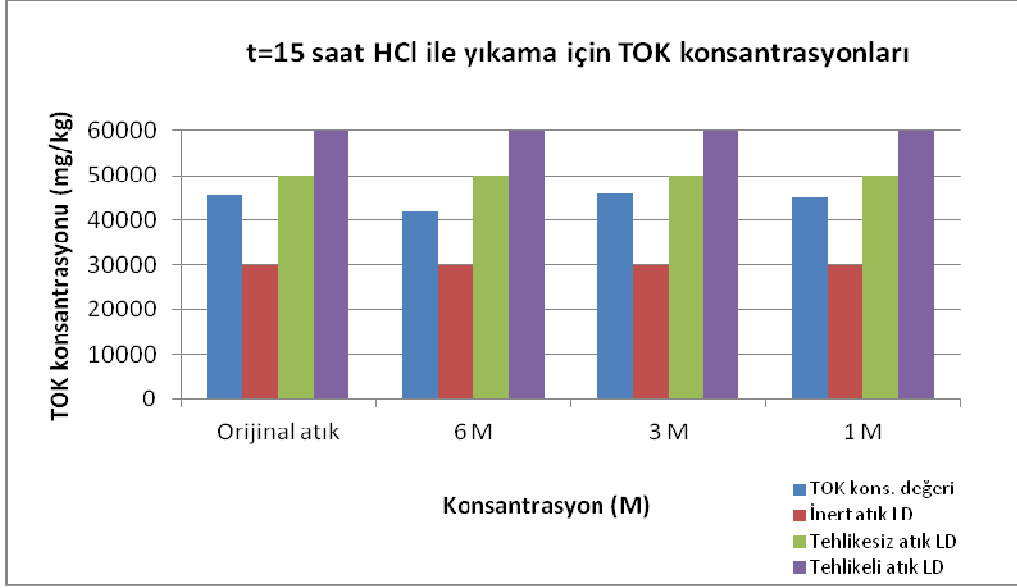
Şekil B.10 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO₃ çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



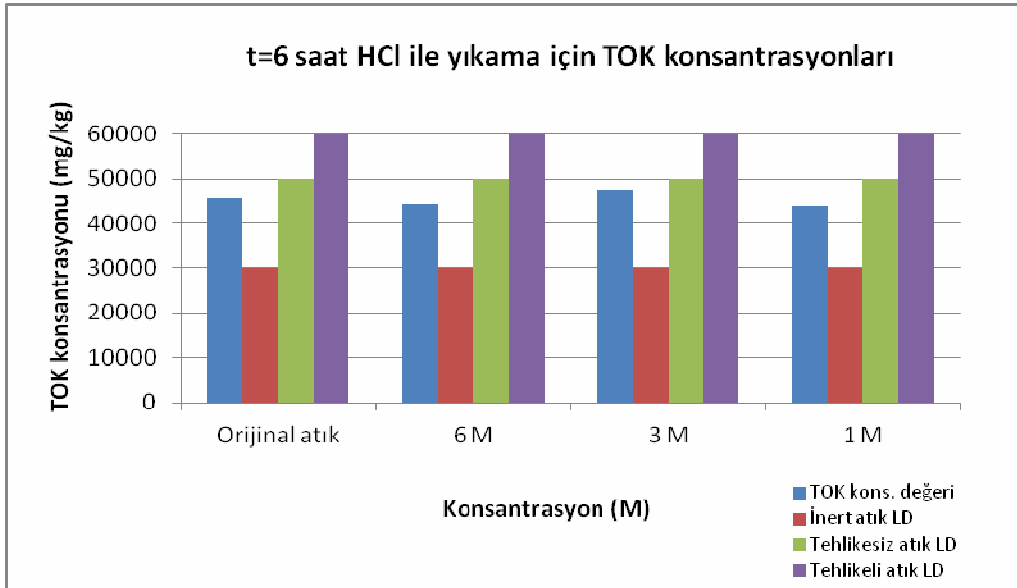
Şekil B.11 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda NaOH çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen ÇOK eluat konsantrasyonları.



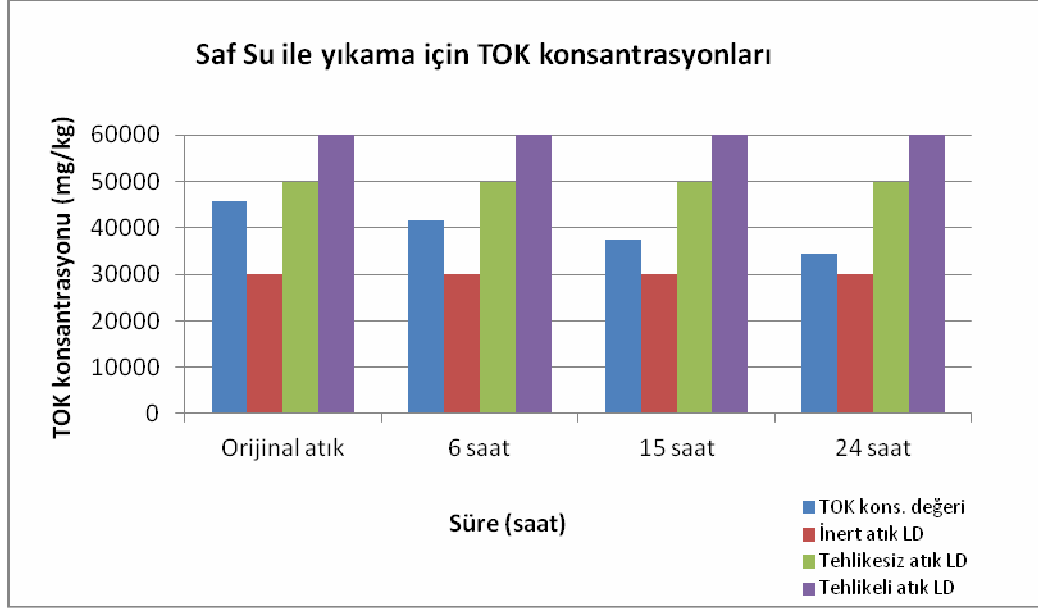
Şekil B.12 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



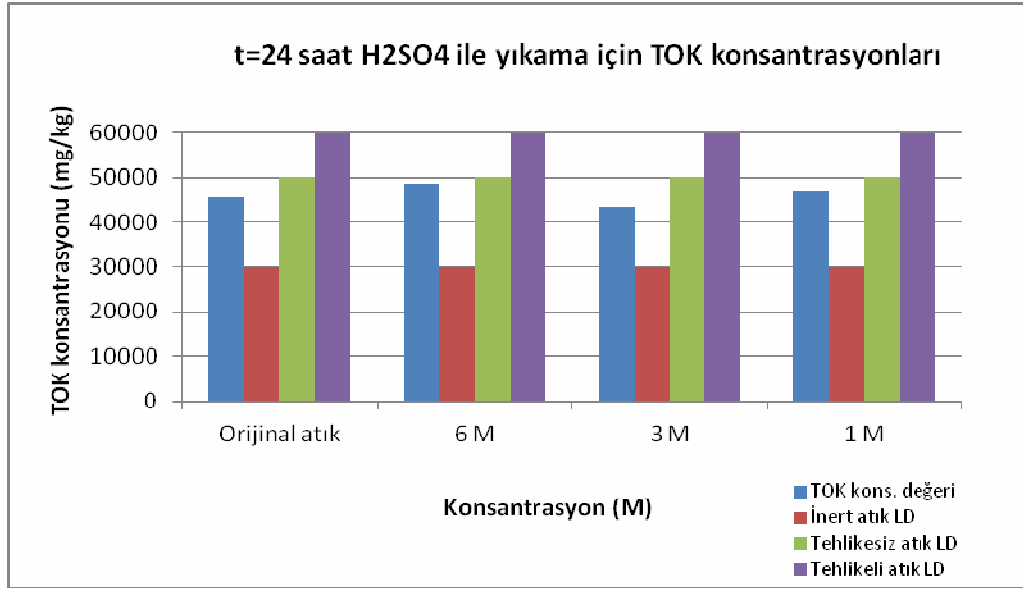
Şekil B.13: ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



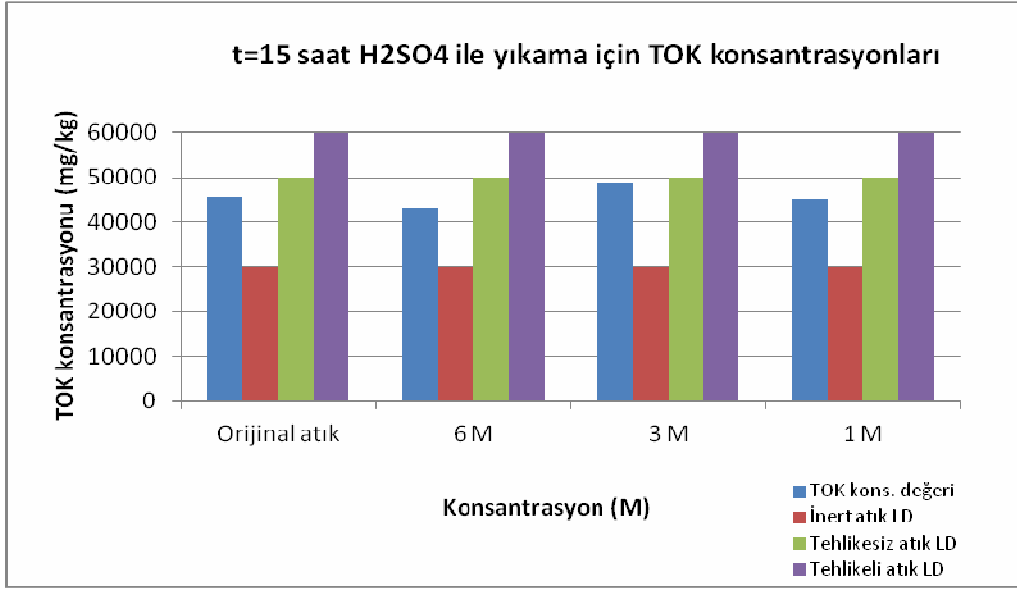
Şekil B.14 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HCl çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



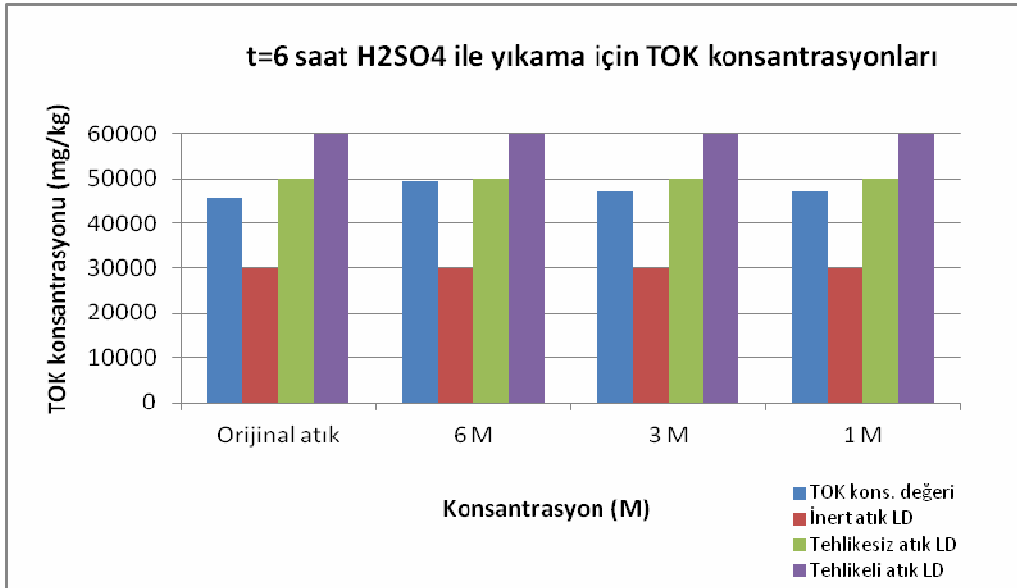
Şekil B.15 : ADK'nın üç farklı sürede şebeke suyuyla yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



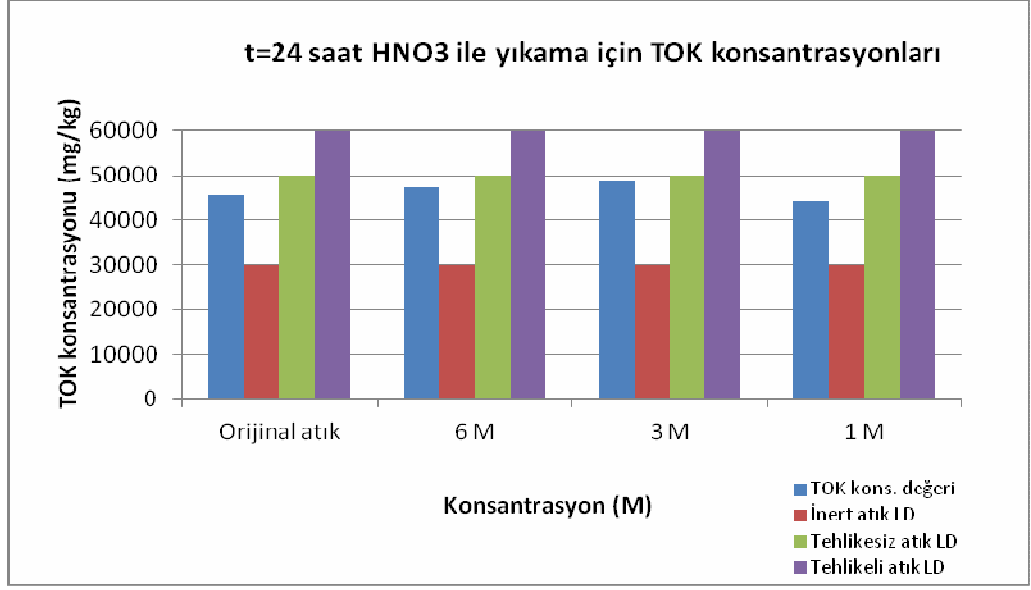
Şekil B.16 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H₂SO₄ çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



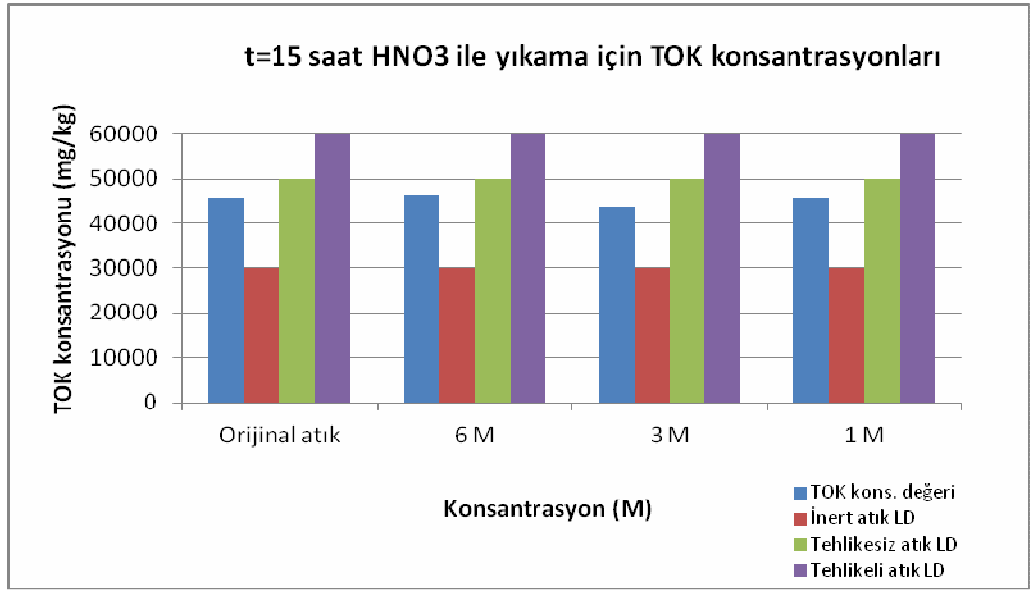
Şekil B.17 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H₂SO₄ çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



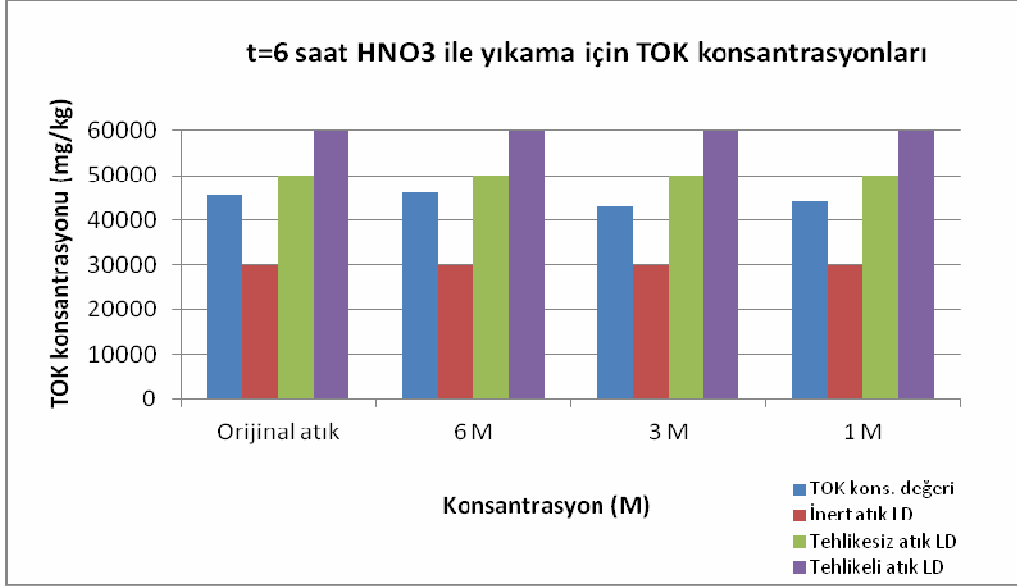
Şekil B.18 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda H₂SO₄ çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



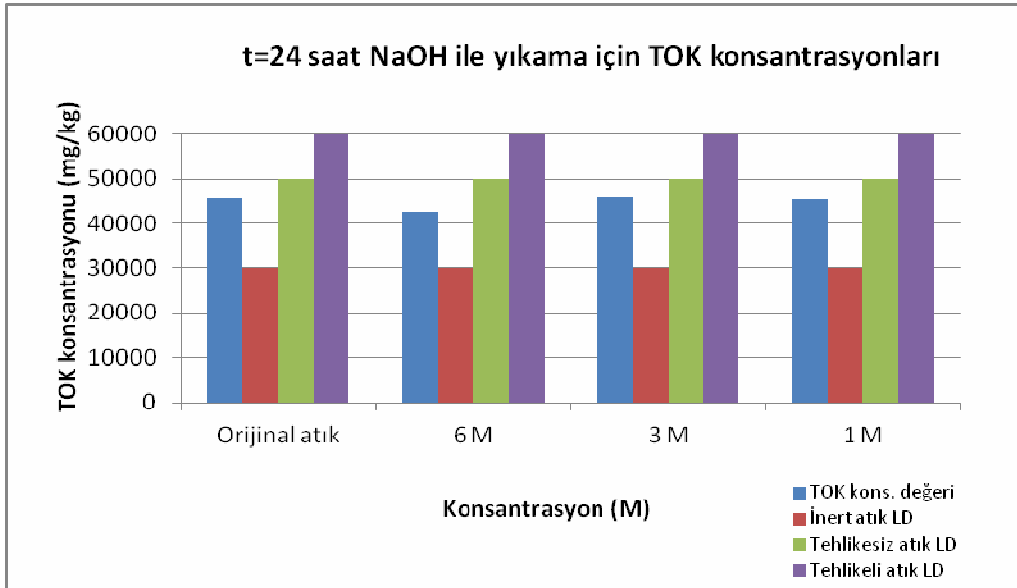
Şekil B.19 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO₃ çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.



Şekil B.20 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO₃ çözeltisi ile 15 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.

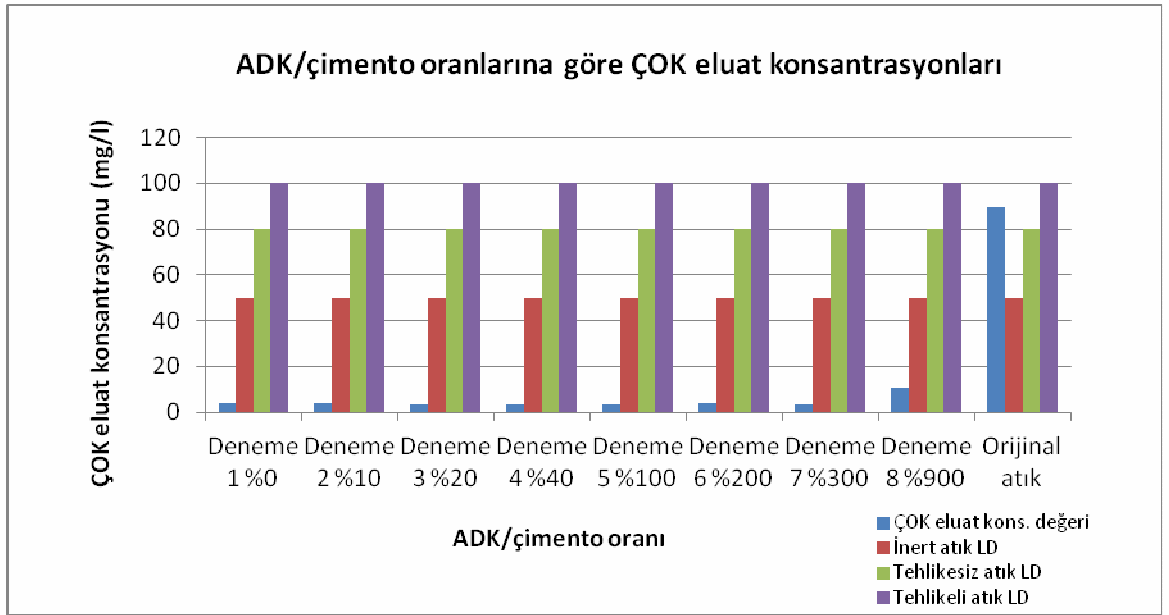


Şekil B.21 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda HNO₃ çözeltisi ile 6 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.

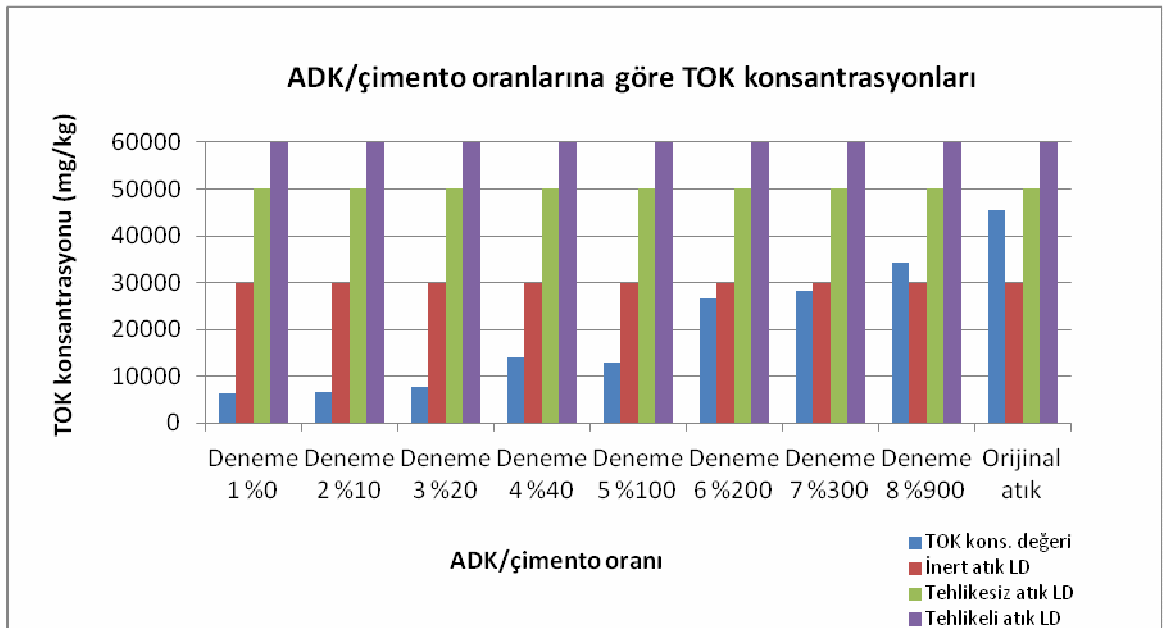


Şekil B.22 : ADK'nın üç farklı konsantrasyonda NaOH çözeltisi ile 24 sa. yıkanması ile elde edilen TOK konsantrasyonları.

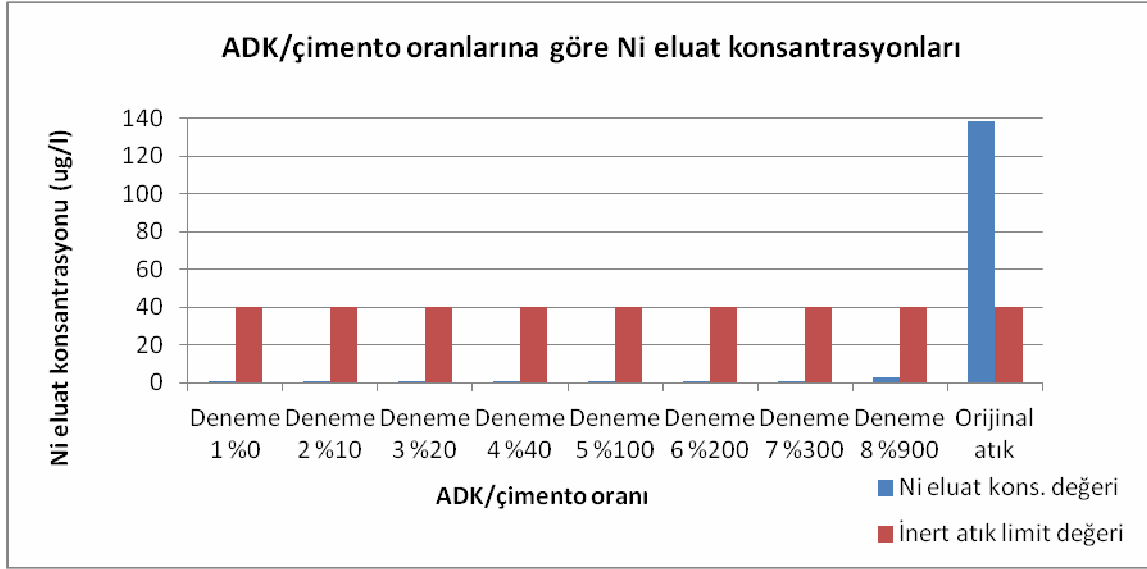
EK C



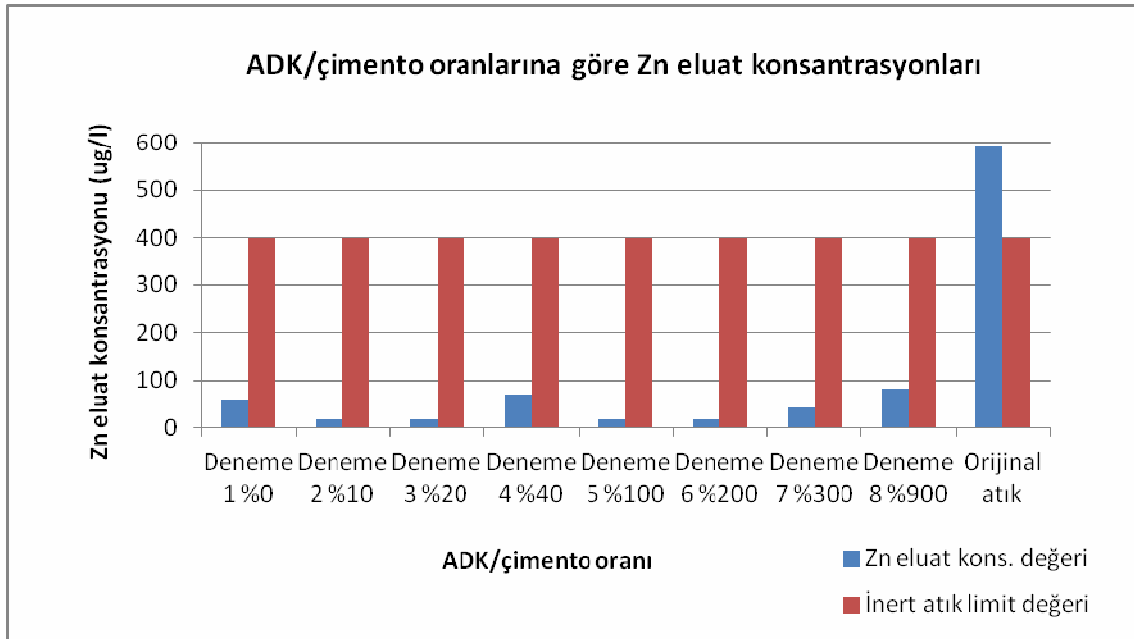
Şekil C.1 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre ÇOK eluat konsantrasyonları.



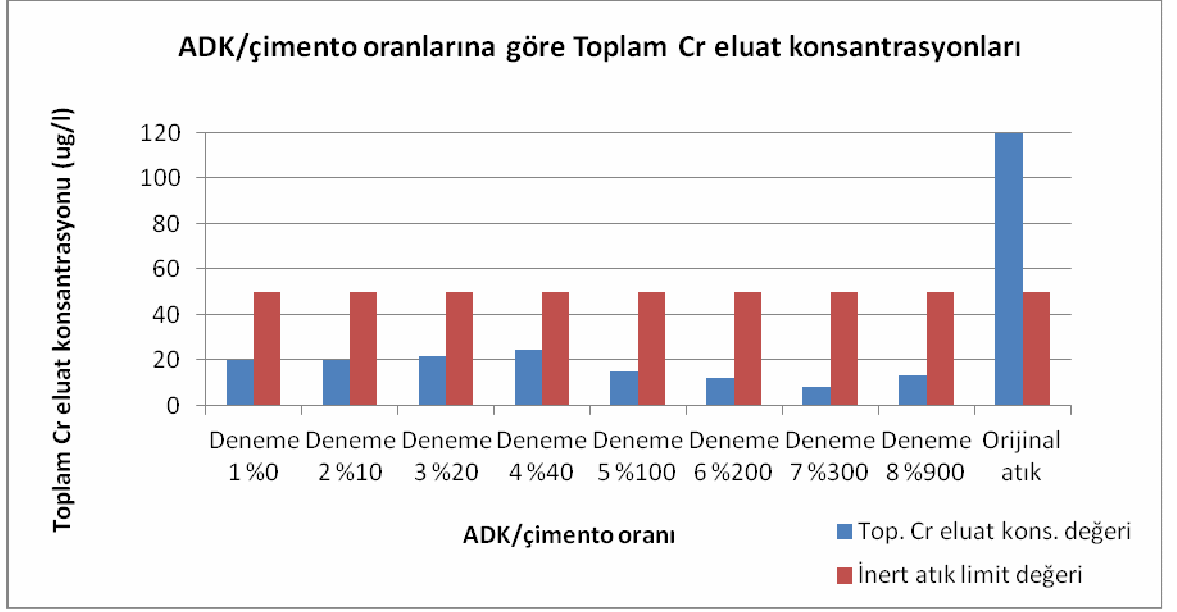
Şekil C.2 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre TOK konsantrasyonları.



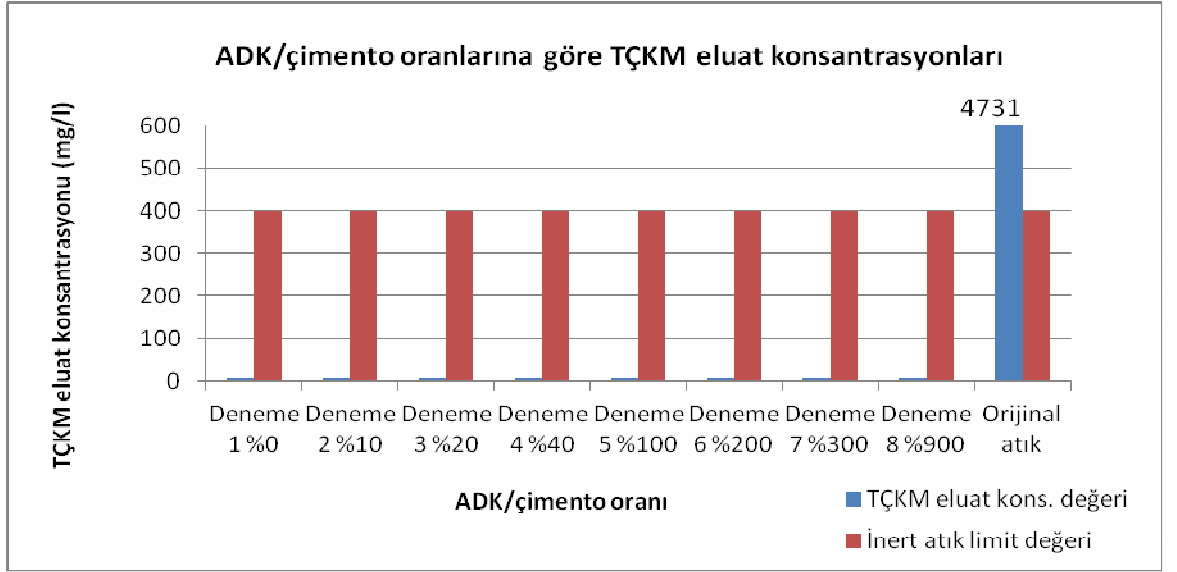
Şekil C.3 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre Ni eluat konsantrasyonları.



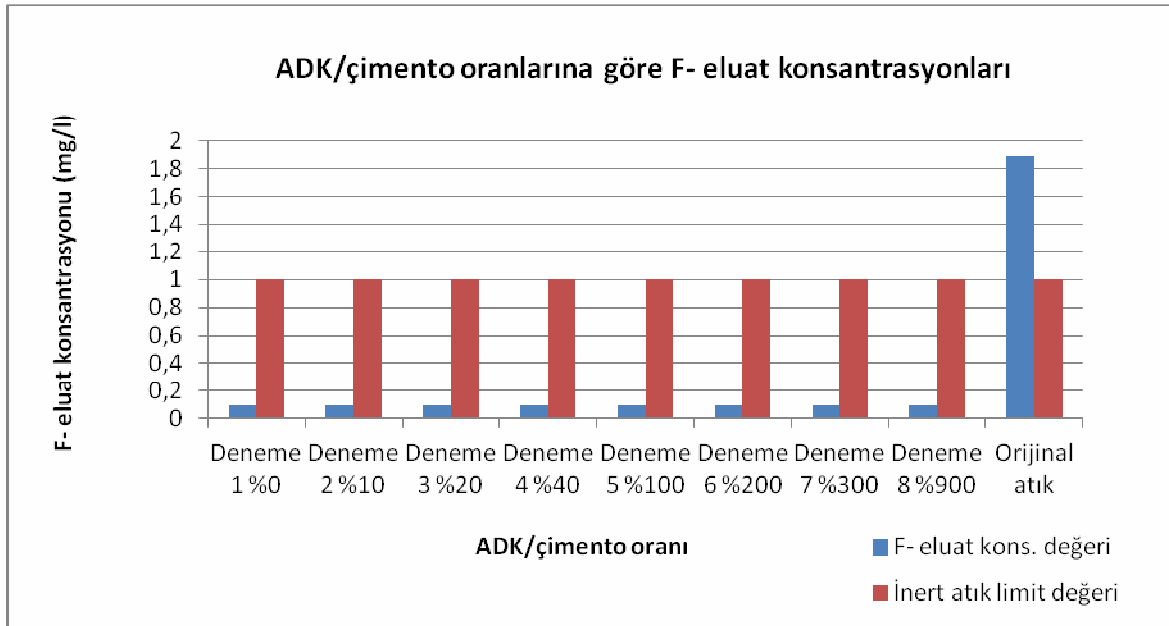
Şekil C.4 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre Zn eluat konsantrasyonları.



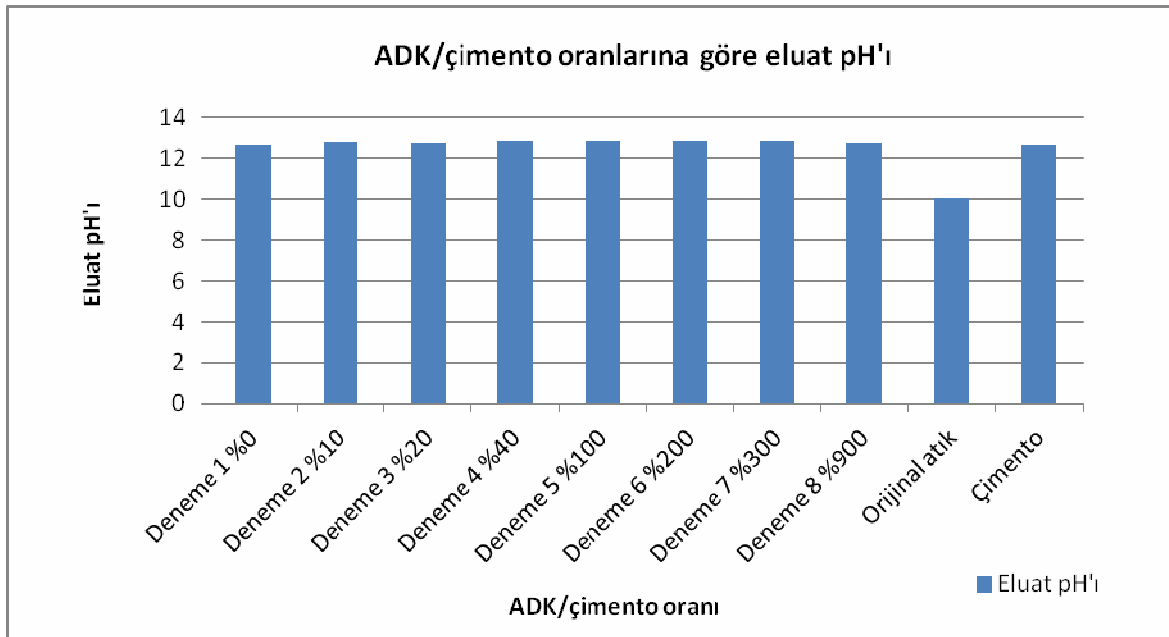
Şekil C.5 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre toplam Cr eluat konsantrasyonları.



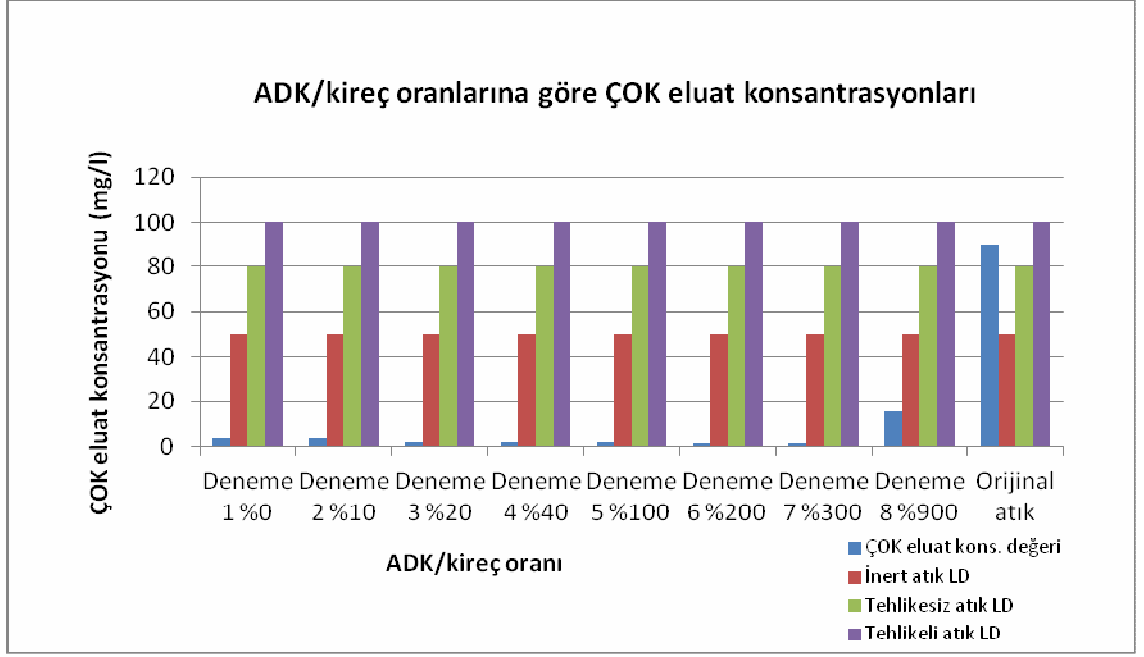
Şekil C.6 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre TÇKM eluat konsantrasyonları.



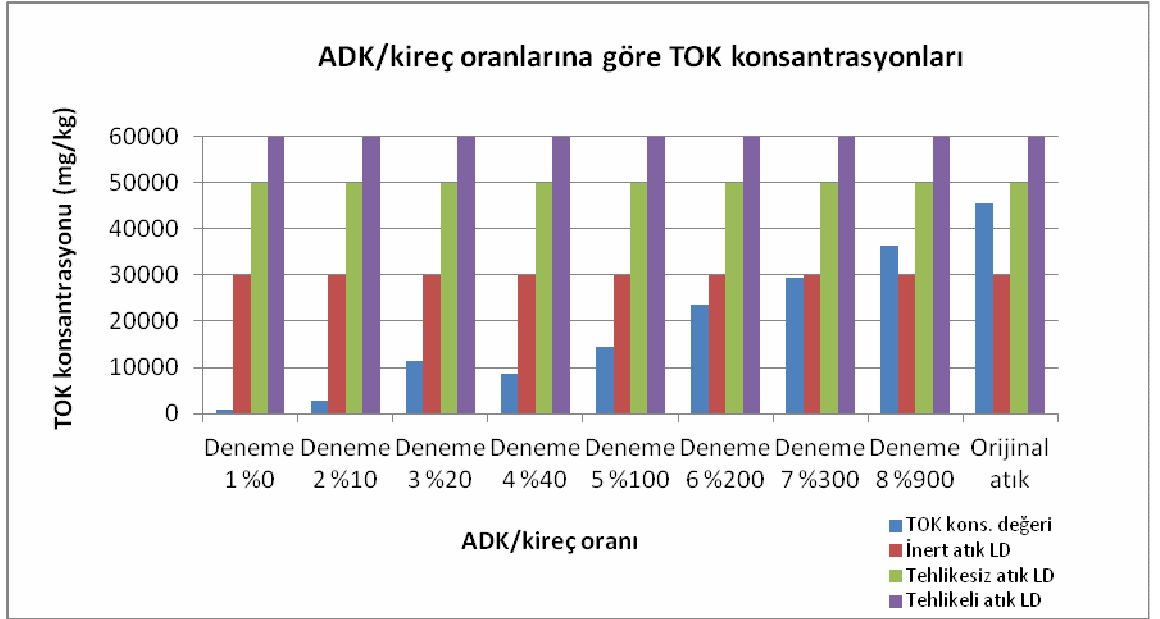
Şekil C.7 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre F⁻ eluat konsantrasyonları.



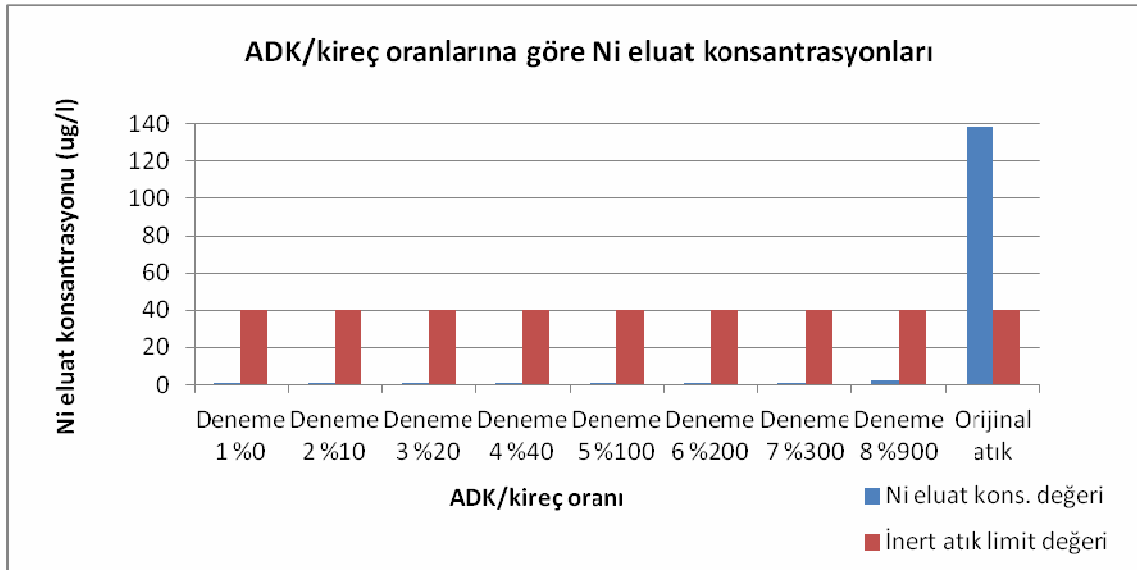
Şekil C.8 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento oranlarına göre eluat pH değerleri.



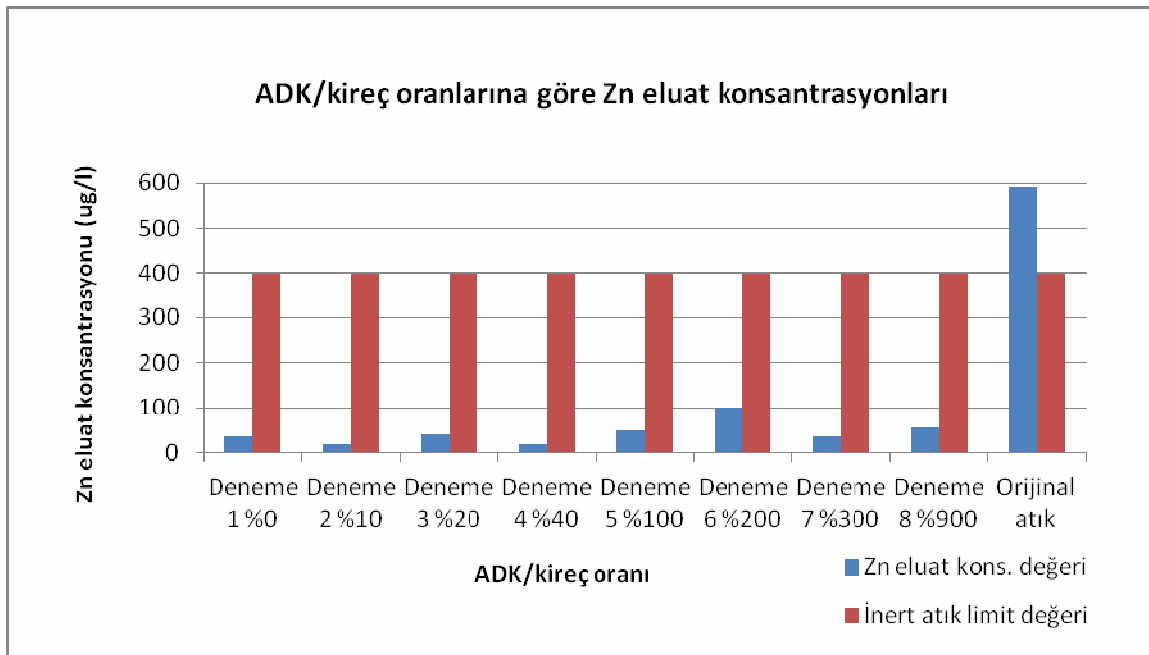
Şekil C.9 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre ÇOK eluat konsantrasyonları.



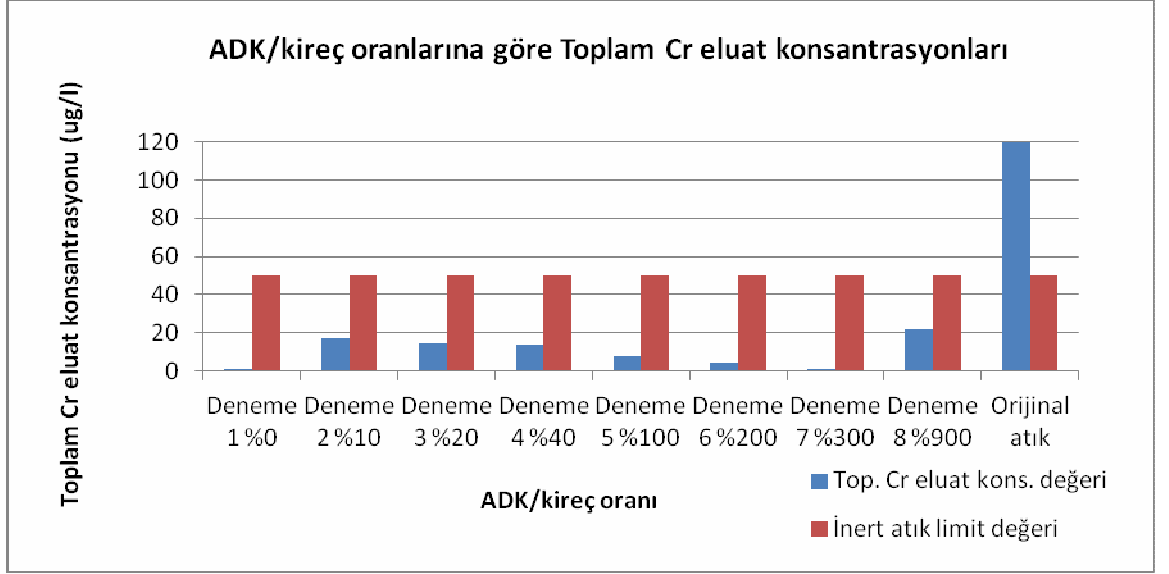
Şekil C.10 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre TOK konsantrasyonları.



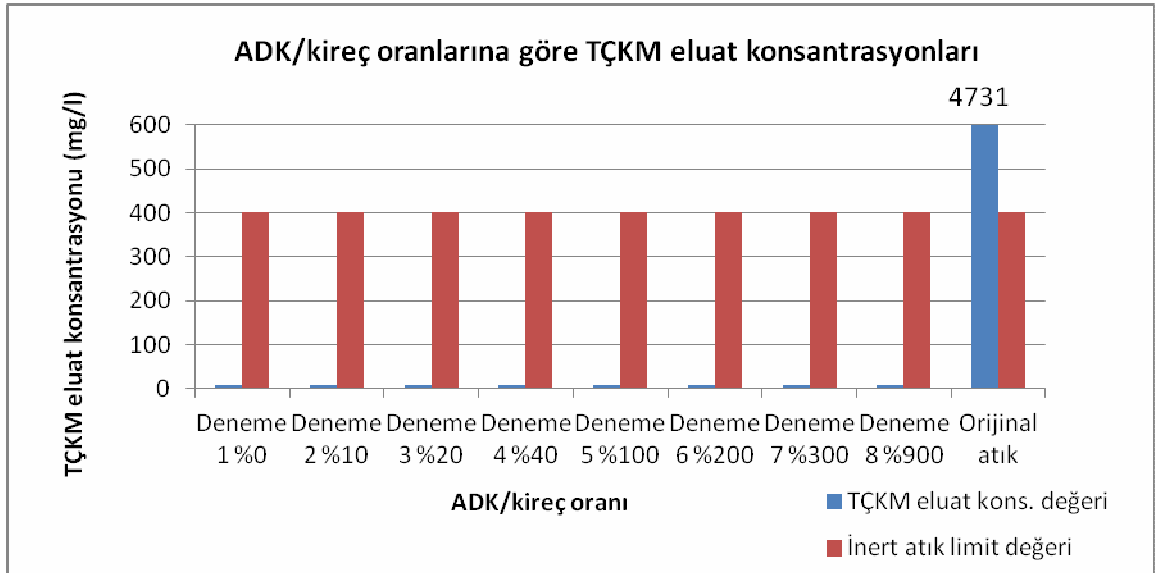
Şekil C.11 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre Ni eluat konsantrasyonları.



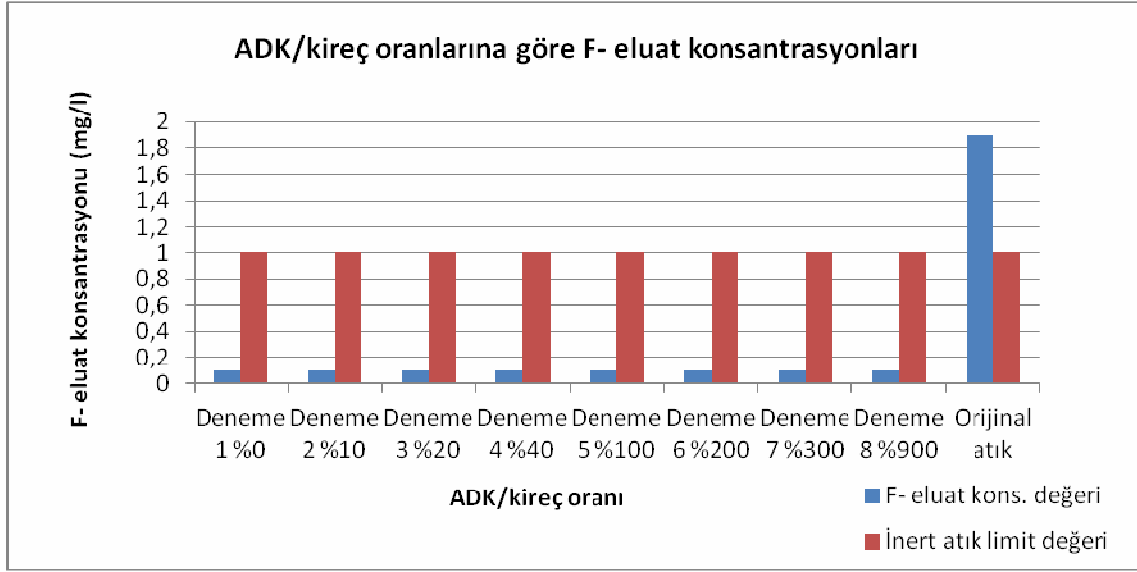
Şekil C.12 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre Zn eluat konsantrasyonları.



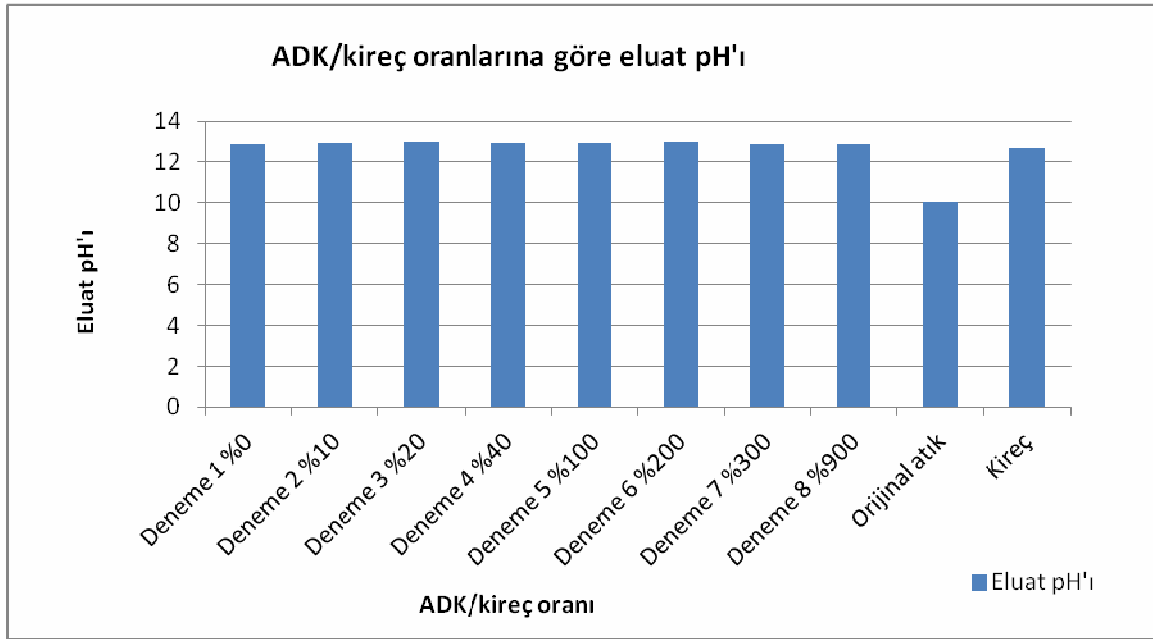
Şekil C.13 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre toplam Cr eluat konsantrasyonları.



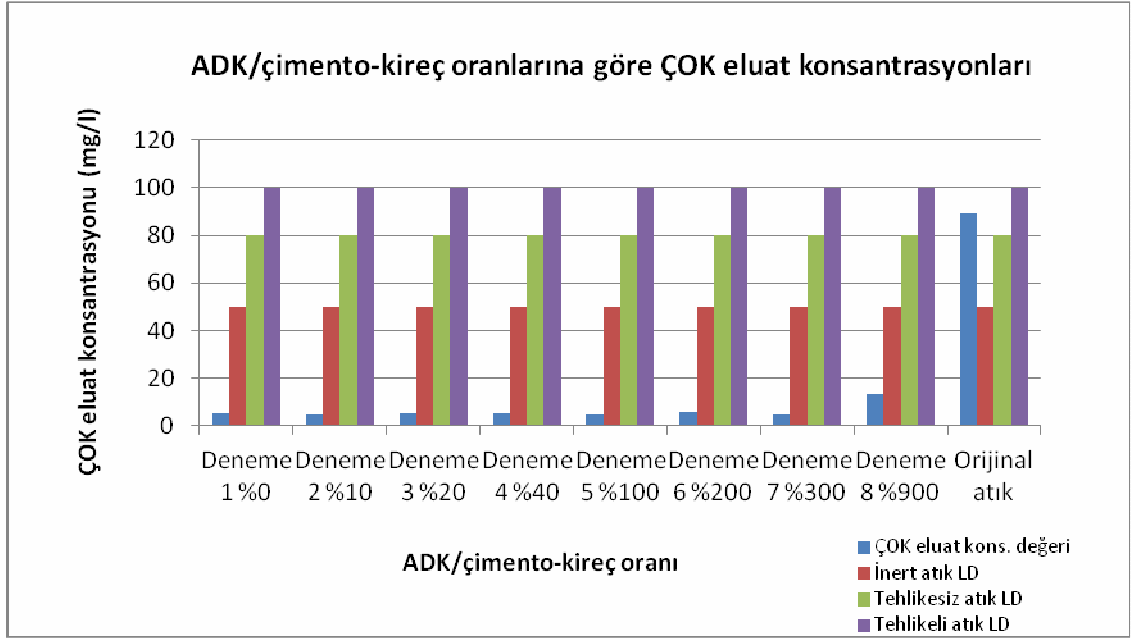
Şekil C.14 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre TÇKM eluat konsantrasyonları.



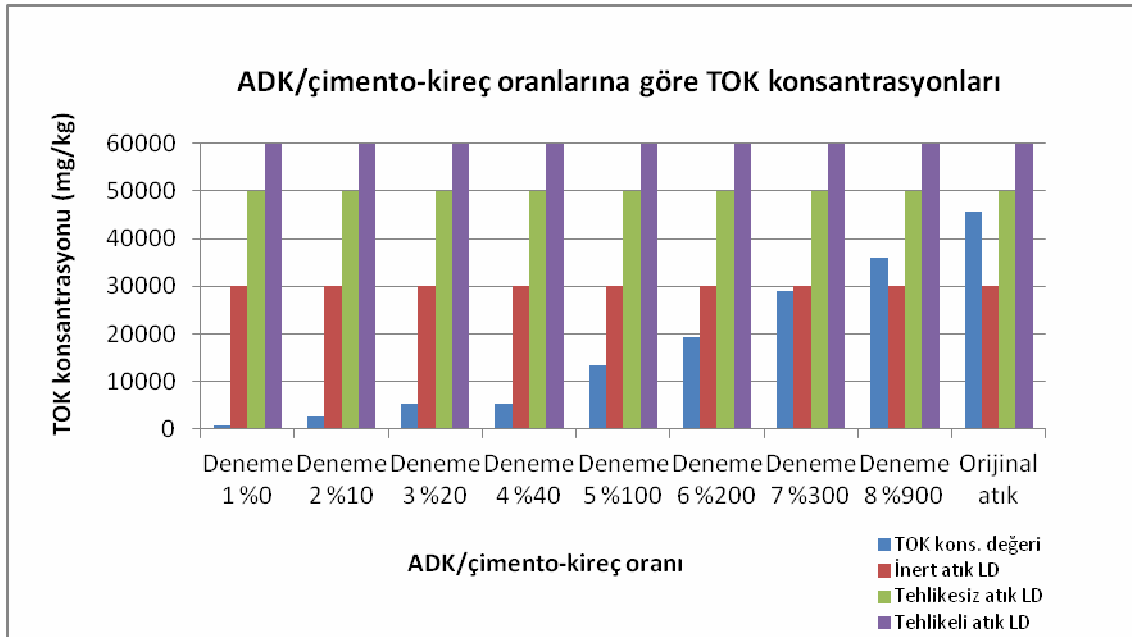
Şekil C.15 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre F⁻ eluat konsantrasyonları.



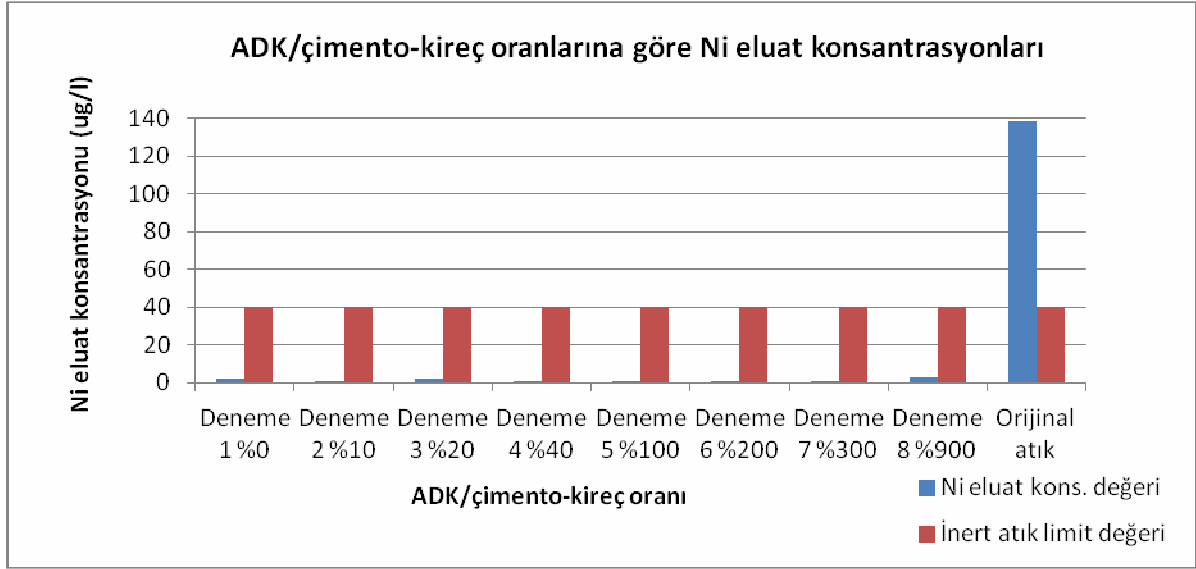
Şekil C.16 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/kireç oranlarına göre eluat pH değerleri.



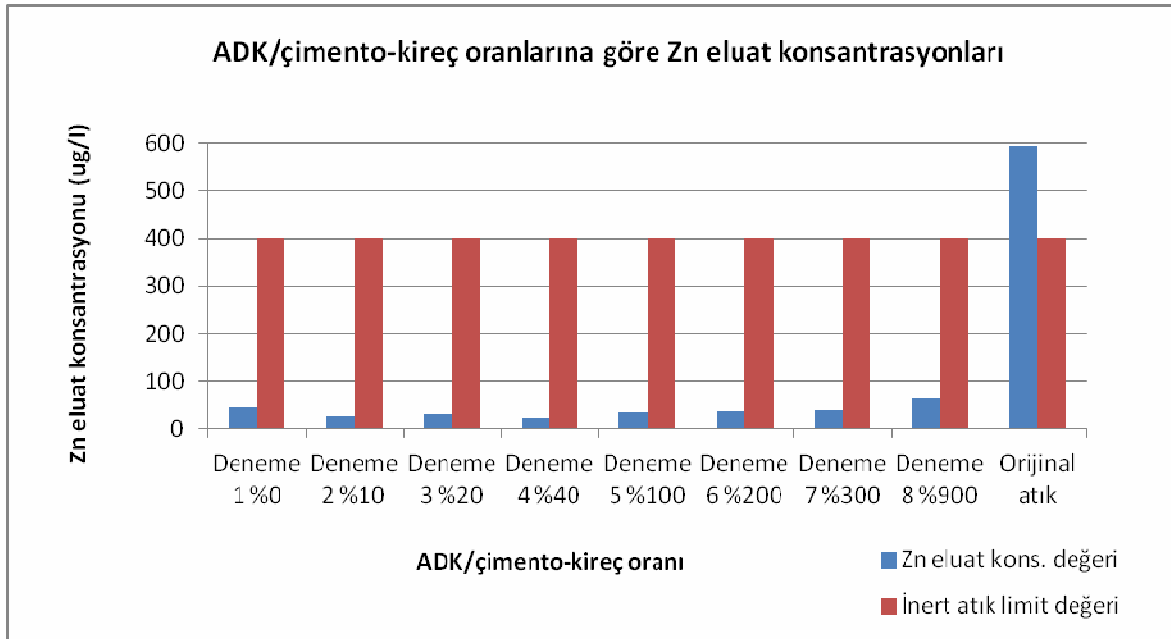
Şekil C.17 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre ÇOK eluat konsantrasyonları.



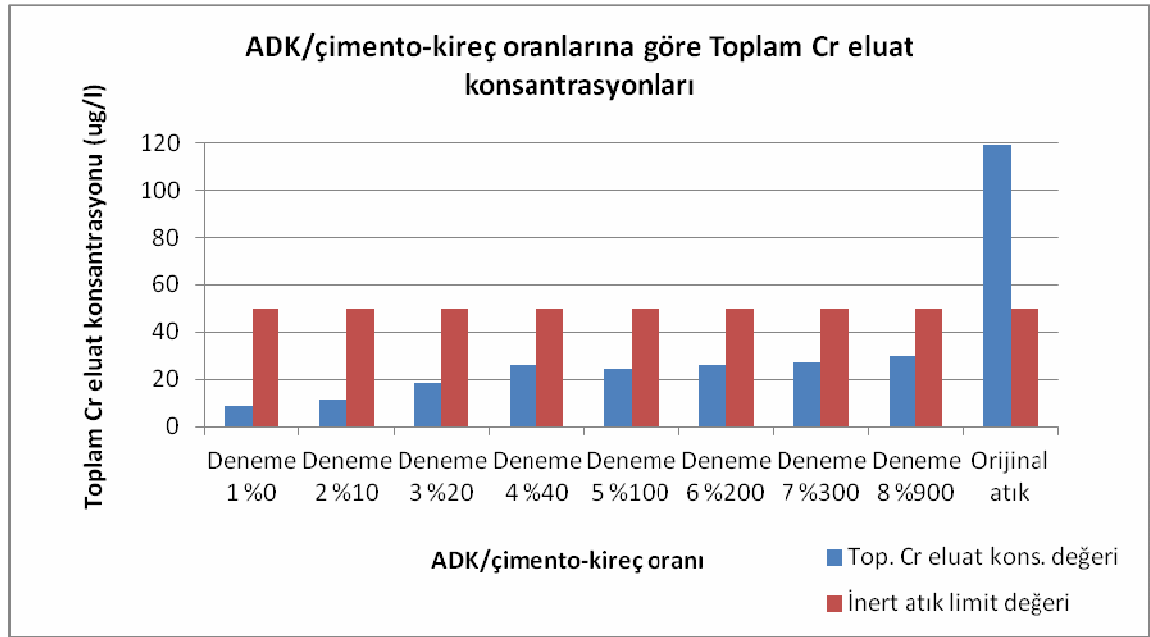
Şekil C.18 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre TOK konsantrasyonları.



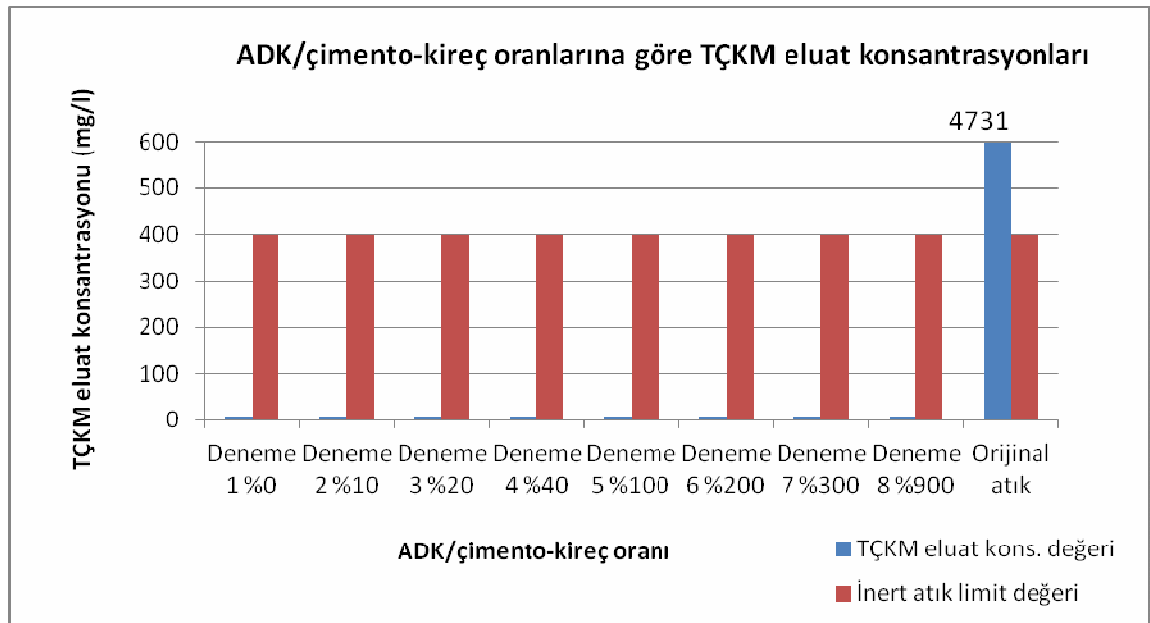
Şekil C.19 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre Ni eluat konsantrasyonları.



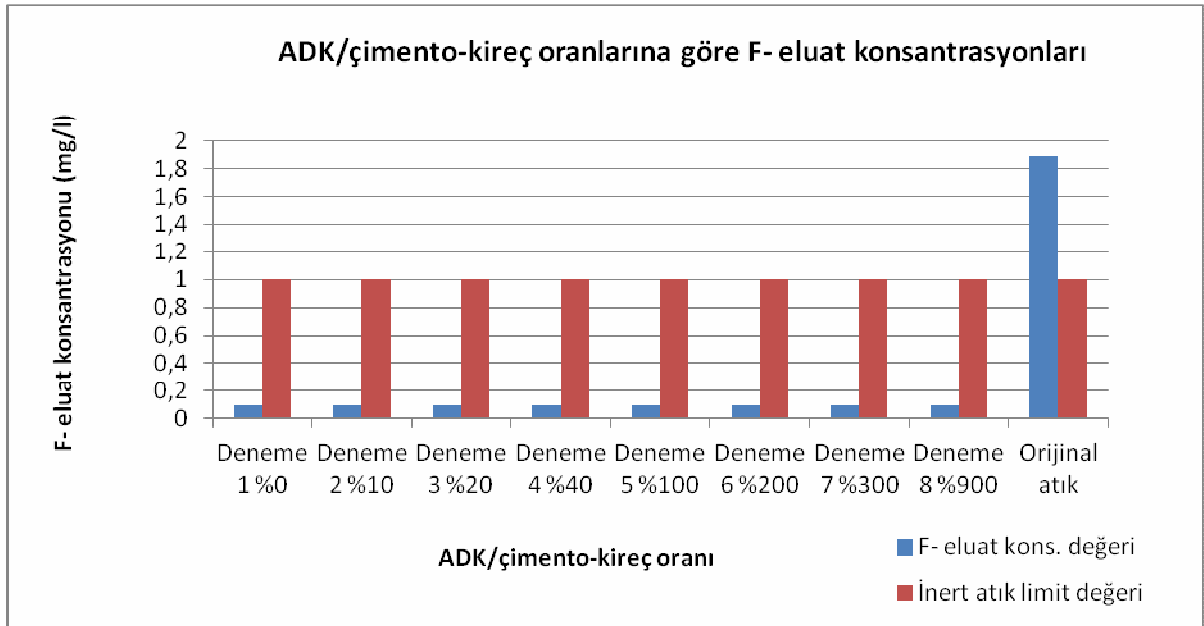
Şekil C.20 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre Zn eluat konsantrasyonları.



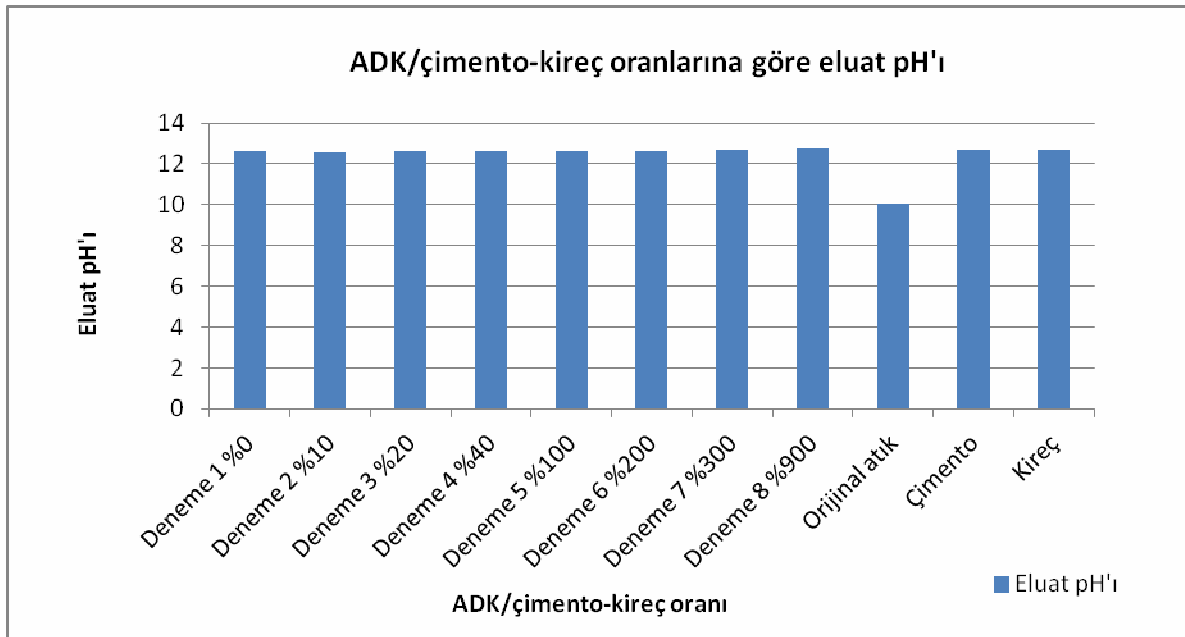
Şekil C.21 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre toplam Cr eluat konsantrasyonları.



Şekil C.22 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre TÇKM eluat konsantrasyonları.



Şekil C.23 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre F⁻ eluat konsantrasyonları.



Şekil C.24 : Katılaştırılmış ADK'nın atık/çimento-kireç oranlarına göre eluat pH değerleri.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hatice Merve BAŞAR

Doğum Yeri ve Tarihi: 28/04/1981-İstanbul

Adres: TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, P.K. 21, 41470, Gebze-KOCAELİ.

E-Posta: mervebasar@yahoo.com, Merve.Basar@tubitak.gov.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü (1999-2003)

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü (2003-2006)

Doktora: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü (2007-2012)

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Uzman Araştırmacı (Mayıs 2006-devam), TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Çevre Enstitüsü Katı ve Tehlikeli Atık Yönetimi Stratejik İş Birimi, Gebze, Kocaeli.

- TÜBİTAK MAM Teşvik Ödülü (2011)
- TÜBİTAK MAM Teşekkür Belgesi (2011)
- TÜBİTAK BİDEB Yüksek Lisans Başarı Bursu (2005-2006)
- İTÜ Kimya Bölümü Bölüm 1.si (2003)
- İTÜ Fen-Edebiyat Fakültesi Fakülte 3.sü (2003)

Yayın Listesi:

1. Pelitli, V., Doğan, Ö., **Başar, H. M.**, Uyuşur, B. (2011). Atık madeni yağların geri kazanımında baz yağ üretim teknolojileri, *YTÜ Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, **29(4)**, 422-434.
2. **Başar, H. M.**, Doğan, Ö., Yılmaz, H.R., Orbay, Ö., Pelitli, V., Uyuşur, B., Erdoğdu, S. (2011). Karton üretiminden kaynaklanan atıklarla kirlenmiş sahaların çevresel etkilerinin araştırılması, *9. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, Samsun, 5-8 Ekim.

3. Erdoğan, S., Doğan, Ö., **Başar, H. M.**, Pelitli, V., Yetiş, Ü. (2011). Türkiye'de ilaç sanayinden kaynaklanan tehlikeli atıkların atık üretim faktörlerinin belirlenmesi, *Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi (UKAY 2011)*, Lefkoşa, KKTC, 7-10 Eylül.
4. Doğan, Ö., **Başar, H. M.**, Dağlı, S., Ünsal, M., Tolun, L. (2011). Tehlikeli atıkların belirlenmesinde uygulanacak analizler laboratuvar hizmetleri, *Atık Yönetimi Sempozyumu 2011*, Antalya, 16-21 Nisan..
5. **Başar, H. M.**, Doğan, Ö. (2010). Atık yönetimi, *AVM'lerde Ambalaj Dışı Atık Yönetimi Çalıştayı*, İstanbul, 2 Haziran.
6. Canli, O., Dağlı, S., **Başar, H. M.** (2008). Comparison of accelerated solvent extractor (ASE) and soxhlet extractor for extraction of polychlorinated biphenyls (PCBs) in industrial soil reference material - CRM 481, 6. *Aegean Analytical Chemistry Days*, Denizli, 9-12 Ekim.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- **Başar, H. M., Deveci Aksoy, N.**, 2012. The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete, *Construction and Building Materials*, 35, 508-512.
- **Başar, H. M., Deveci Aksoy, N.**, 2012. Pre-treatment of waste foundry sand via solidification/stabilization, *Clean - Soil, Air, Water*, (kabul edildi. clen.201200043).
- **Başar, H. M., Deveci Aksoy, N.**, 2012. Atık döküm kumunun geri kazanım uygulamaları, *YTÜ Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, (kabul edildi. No: YTUJENS-2012-186).
- **Başar, H. M., Deveci Aksoy, N.**, 2012. Atık döküm kumunun hazır betonda kullanılabilirliğinin araştırılması, *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, (tezle birlikte teslim edildi).
- **Başar, H. M., Deveci Aksoy, N.**, 2012. Atık döküm kumunun uygun geri kazanım/tekrar kullanım ve bertaraf yöntemlerinin incelenmesi, *İTÜ XIII. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu 2012*, 17-19 Ekim, 2012 İstanbul, (bildiri özeti gönderildi).