

**PETROL VE DOĞALGAZ SONDAJ FAALİYETLERİNDEN
OLUŞAN SONDAJ KESİNTİLERİNİN
SOLIDİFİKASYON/STABİLİZASYONU**

Ezgi FAZLIOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Esra TINMAZ KÖSE

Dr. Suna Özden ÇELİK

2019

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PETROL VE DOĞALGAZ SONDAJ FAALİYETLERİNDEN OLUŞAN SONDAJ
KESİNTİLERİNİN SOLİDİFİKASYON/STABİLİZASYONU**

Ezgi FAZLIOĞLU

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DANIŞMANLAR: Dr. Öğr. Üyesi ESRA TINMAZ KÖSE
Dr. SUNA ÖZDEN ÇELİK

TEKİRDAĞ-2019
Her hakkı saklıdır

Dr. Öğr. Üyesi Esra TINMAZ KÖSE ve Dr. Suna Özden ÇELİK eşdanışmanlığında, Ezgi FAZLIOĞLU tarafından hazırlanan “Petrol ve Doğalgaz Sondaj Faaliyetlerinden Oluşan Sondaj Kesintilerinin Solidifikasyon/Stabilizasyonu” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. İbrahim DEMİR

İmza :

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Esra TINMAZ KÖSE

İmza :

Üye: Dr. Suna Özden ÇELİK

İmza :

Üye: Doç. Dr. Gül KAYKIOĞLU

İmza :

Üye: Doç. Dr. Ali Rıza DİNÇER

İmza :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç. Dr. Bahar UYMAZ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PETROL VE DOĞALGAZ SONDAJ FAALİYETLERİNDEN OLUŞAN SONDAJ KESİNTİLERİNİN SOLİDİFİKASYON/STABİLİZASYONU

Ezgi FAZLIOĞLU

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışmanlar: Dr. Öğr. Üyesi Esra TINMAZ KÖSE

Dr. Suna Özden ÇELİK

Bu çalışmada hidrokarbon arama ve çıkarma çalışmaları sırasında oluşan en önemli atıklardan biri olan su bazlı sondaj kesintilerinin bertaraf edilebilirliği ve inşaat yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada Türkiye Petrolleri Trakya Sahası'ndan alınan sondaj kesintileri kurutularak ve kurutulmadan CEM I 42,5 R Portland çimento kullanılarak çeşitli katkı oranlarında (sırasıyla %4, 8, 12, 16 ve 20 ile %2, 4, 6,8 ve 10) TS EN 196-1 uyarınca 0,5 su/çimento oranı ile solidifiye/stabilize edilmiştir. Öncelikle ham materyal karakterize edilmiş (XRF yarı kantitatif element, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik -ADDDY- parametreleri ve SEM analizleri), ardından dayanım ve dayanıklılık testleri (ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımları ile atmosferik su emme) ile katılaştırılmış ürünlerin ön değerlendirmesi yapılmıştır. Numuneler 0 katkı ile üretilen şahit harç ile karşılaştırılmıştır. Her iki kesinti için de hem bertaraf edilebilecek miktar hem de dayanım açısından optimum katkı oranı %8 olarak belirlenmiştir. Daha sonra tüm numuneler için ağır metal sızma analizleri yapılmış, dayanım ve dayanıklılık açısından optimum belirlenen numuneler ile de ek sızma analizleri (BTEX, PCB, mineral yağ, TOK ve ÇOK) yapılarak ADDDY kapsamında depolanabilirlikleri belirlenmiştir. Çalışmada başlangıçta tehlikeli sınıfta yer alan ham kesintinin tüm katılaştırılmış numunelerinde tehlikesiz atık sınıfı sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Sondaj Kesintileri, Sondaj Atıkları Yönetimi, Solidifikasyon/Stabilizasyon, Yapı Malzemesi

2019, 84 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

SOLIDIFICATION/STABILIZATION OF DRILL CUTTINGS OCCURRING FROM PETROLEUM AND NATURAL GAS DRILLING ACTIVITIES

Ezgi FAZLIOĞLU

Tekirdag Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemical Engineering

Supervisors: Dr. Esra TINMAZ KÖSE

Dr. Suna Özden ÇELİK

This study aims to assess the disposability of water-based drill cuttings (WBDC), one of the most important wastes generated during hydrocarbon exploration and extraction, and their potential use as a construction material. The WBDC generated by Turkish Petroleum in Thrace Region, Turkey was examined in dried and wet forms. Both samples were first solidified/stabilized with CEM I 42.5 R Portland cement according to TS EN 196-1 (0.5 water/cement ratio) with various substitution ratios (4%, 8%, 12%, 16%, 20% for dried and 2%, 4%, 6%, 8%, 10% for wet drill cuttings). First, untreated drill cuttings characterized (XRF semiquantitative element, Regulation of Sanitary Landfilling of the Wastes criteria, and SEM analyses), and then solidified mortars evaluated via strength and durability test (ultrasonic pulse velocity, flexural and compressive strength, and atmospheric water absorption) results. The optimum substitution ratio considering both disposable amount and durability results was 8%. Subsequently, heavy metal leaching tests for all solidified samples and additional leaching tests (BTEX, PCBs, mineral oil, TOC and DOC) for samples with 8% substitution ratios were performed. All the solidified samples were found to meet the criteria for disposal in a 2nd Class Sanitary Landfill.

Keywords: Drill Cuttings, Drilling Waste Management, Solidification/Stabilization, Construction Material

2019,84 pages

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	vi
ŞEKİL DİZİNİ.....	viii
KISALTMALAR	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. HİDROKARBON, SONDAJİ VE ÇIKAN ATIKLARIN YÖNETİMİ.....	4
2.1. Hidrokarbon Tanımı	4
2.2. Sondaj İşlemi	5
2.3. Sondaj İşlemi Atıkları ve Yönetimi	6
2.4. Hidrokarbon Sondaj Kesintisi Arıtma ve Bertaraf Yöntemleri	8
2.4.1. Sahada Arıtma Yöntemleri	9
2.4.1.1. Fiziksel Arıtma	9
2.4.1.2. Fiziksel – Kimyasal Arıtma	10
2.4.1.3. Biyolojik Arıtma	11
2.4.1.4. Termal Arıtma	13
2.4.2. Saha Dışında Arıtma Yöntemleri.....	14
2.4.2.1. Boru Hattı ile Deşarj	14
2.4.2.2. Enjeksiyon	14
2.4.2.3. Düzenli Depolama Sahasında Bertaraf.....	15
2.5. Hidrokarbon Sondaj Atıklarının Bertarafı Konusunda Türkiye’deki Mevzuat.....	15
2.5.1. Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY).....	16
2.5.2. Maden Atıkları Yönetmeliği.....	17
2.5.3. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDY).....	18

3. LİTERATÜR TARAMASI	19
3.1. Solidifikasyon/Stabilizasyon Prosesleri için Kullanılan Çeşitli Atıklara Dair Çalışmalar	19
3.2. Hidrokarbon Sondaj Kesintisi İçin Çeşitli Bertaraf Yöntemleri.....	22
3.3. Çeşitli Atıkların Solidifikasyon/Stabilizasyon Prosesi Çıktılarının Kullanım Alanları.....	23
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
4.1. Materyal.....	25
4.1.1. Hidrokarbon Sondajı Kesintisi	25
4.1.2. Çimento.....	25
4.1.3. Kum	26
4.1.4. Karma Suyu	26
4.1.5. Kür Suyu	27
4.2. Yöntem	27
4.2.1. Harç Numunelerinin Üretimi	27
4.2.1.1. Hidrokarbon Sondaj Kesintisinin Kurutulması	27
4.2.1.2. Karışım Oranlarının Belirlenmesi	28
4.2.1.3. Harcın Hazırlanması	30
4.2.1.4. Harçlarının Kalıplara Dökülmesi.....	31
4.2.1.5. Sertleşmiş Harç Numunelerinin Kürde Bekletilmesi	32
4.2.2. Karakterizasyon Analizleri	33
4.2.3. Dayanım ve Dayanıklılık Testleri.....	37
4.2.3.1. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi.....	38
4.2.3.2. Eğilme Dayanımı	39
4.2.3.3. Basınç Dayanımı.....	41
4.2.3.4. Atmosferik Su Emme Deneyi	42
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
5.1. Ham Materyal Karakterizasyonu.....	43

5.1.1. pH ve İletkenlik Analizi Sonuçları	43
5.1.2. Yarı Kantitatif Element Analizi (XRF) Sonuçları	44
5.1.3. SEM Görüntüleri	46
5.1.4. BTEX, PCB'ler ve Mineral Yağ Analizi Sonuçları	48
5.1.6. TOK ve ÇOK Analizleri Sonuçları	49
5.1.5. AKM, UAKM ve TÇK Analizi Sonuçları.....	49
5.1.7. Ağır Metal Analizi Sonuçları	50
5.2. Dayanım ve Dayanıklılık Testleri Sonuçları	52
5.2.1. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları	52
5.2.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	54
5.2.3. Basınç Dayanımı Sonuçları	56
5.2.4. Atmosferik Su Emme Deneyi Sonuçları.....	59
5.3. S/S Ürünü Numunelerin Karakterizasyonu	61
5.3.2. Yarı Kantitatif Element Analizi (XRF) Sonuçları.....	61
5.3.3. SEM Görüntüleri	63
5.3.4. BTEX, PCB'ler ve Mineral Yağ Analizi Sonuçları	65
5.3.5. TOK, ÇOK ve İletkenlik Analizi Sonuçları	65
5.3.6. AKM, UAKM ve TÇK Analizi Sonuçları.....	66
5.3.1. Ağır Metal Analizi Sonuçları	66
5.4. Numunelerin Depolanabilirliklerinin Değerlendirilmesi.....	71
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR.....	78
EKLER	83
ÖZGEÇMİŞ.....	84

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Sondaj kesintisi sahada bertaraf yöntemleri	9
Çizelge 2.2. Proses türüne göre S/S yöntemlerinin sınıflandırılması	10
Çizelge 2.3. AYY Ek-4 sondaj çamurları atık kodları	15
Çizelge 3.1. Çeşitli çalışmalarda S/S prosesi uygulamaları	21
Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan CEM I 42,5 R çimento özellikleri	25
Çizelge 4.2. CEN standart kumu özellikleri	26
Çizelge 4.3. HKK için çimento katkı oranları ve harca konulan malzemelerin miktarları (g)	28
Çizelge 4.4. HYK için çimento katkı oranları ve harca konulan malzemelerin miktarları (g)	29
Çizelge 4.5. Karıştırıcı palet hızı	30
Çizelge 4.6. Analiz parametreleri ve standartları	34
Çizelge 4.7. Yapılan dayanım ve dayanıklılık testleri ve standartları	37
Çizelge 4.8. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki bağıntı.....	38
Çizelge 5.1. Şahit harç ile HYK ve HKK'ın pH ve iletkenlikleri.....	43
Çizelge 5.2. HYK'ye ait yarı kantitatif element analizi sonuçları	44
Çizelge 5.3. HKK'ye ait yarı kantitatif element analizi sonuçları	45
Çizelge 5.4. Şahit harç yarı kantitatif element analizi sonuçları	46
Çizelge 5.5. HYK ve HKK için BTEX, PCB'ler ve mineral yağ analizi (C ₁₀ —C ₄₀)	48
Çizelge 5.6. HYK, HKK ve şahit harç TOK ve ÇOK analizi sonuçları.....	49
Çizelge 5.7. HYK ve HKK için AKM ve UAKM değerleri	49
Çizelge 5.8. HYK için ölçülen ultrases geçiş hızları.....	52
Çizelge 5.9. HKK için ölçülen ultrases geçiş hızları.....	52
Çizelge 5.10. Katkı oranının ultrases geçiş hızı üzerindeki etkisine ait ANOVA sonuçları....	54
Çizelge 5.11. HYK katkılı katılaştırılmış ürünlerin eğilme dayanımı sonuçları	54
Çizelge 5.12. HKK katkılı katılaştırılmış ürünlerin eğilme dayanımı sonuçları	55
Çizelge 5.13. Katkı oranının eğilme dayanımı üzerindeki etkisine ait tek yönlü ANOVA sonuçları	56
Çizelge 5.14. HYK ürünleri için ölçülen basınç dayanımı değerleri.....	57
Çizelge 5.15. HKK ürünleri için ölçülen basınç dayanımı değerleri.....	57
Çizelge 5.16. Katkı oranının basınç dayanımı üzerindeki etkisine ait tek yönlü ANOVA sonuçları	58
Çizelge 5.17. HYK katkı oranı ile ortalama su emme değişimi	59
Çizelge 5.18. HKK katkı oranı ile ortalama su emme değişimi	59

Çizelge 5.19. Katkı oranının su emme üzerindeki etkisine ait tek yönlü ANOVA sonuçları ..	60
Çizelge 5.20. 8YK katkılı katılaştırılmış ürünün yarı kantitatif XRF sonuçları.....	61
Çizelge 5.21. 8KK katkılı katılaştırılmış ürünün yarı kantitatif XRF sonuçları.....	62
Çizelge 5.22. 8YK ve 8KK ürünleri için BTEX, PCB'ler ve mineral yağ analizi (C ₁₀ —C ₄₀) .	65
Çizelge 5.23. 8YK ve 8KK için TOK, ÇOK, TÇK ve iletkenlik analizi sonuçları.....	66
Çizelge 5.24. 8YK ve 8KK için AKM, UAKM ve TÇK değerleri	66
Çizelge 5.25. HKK numuneleri için ağır metal sızmaları	67
Çizelge 5.26. HYK katkılı numuneler için ağır metal sızmaları	67
Çizelge 5.27. Katkı oranı ile ağır metal salınımları değişimi ANOVA sonuçları.....	70
Çizelge 5.28. ADDY uyarınca DDT sınır değerleri	71
Çizelge 5.29. Girdi numunelerin depolanabilirliklerinin değerlendirilmesi.....	72
Çizelge 5.30. S/S ürünü numunelerin ADDY kapsamında değerlendirilmesi	73

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. Hidrokarbon yapılarının genel gösterimi	4
Şekil 2.2. Bir sondaj kulesinin şematik gösterimi	6
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan karıştırıcı	30
Şekil 4.2. Üretilen harç numuneleri	31
Şekil 4.3. Kürde bekletilen harç numuneleri	32
Şekil 4.4. Analize gönderilen numuneler	34
Şekil 4.5. Ultrases geçiş hızı ölçümü	39
Şekil 4.6. Eğilme dayanımı ölçümü	40
Şekil 4.7. Basınç dayanımı ölçümü	42
Şekil 4.8. Su emme deneyi için etüvde numunelerin kurutulması	43
Şekil 5.1. Şahit harcın çeşitli ölçeklerdeki SEM görüntüleri	47
Şekil 5.2. HKK'nin çeşitli ölçeklerdeki SEM görüntüleri	48
Şekil 5.3. Numunelerin ağır metal içerikleri	51
Şekil 5.4. Katkılı HYK numuneleri için ultrases geçiş hızı grafiği	53
Şekil 5.5. Katkılı HKK ürünleri için ultrases geçiş hızı grafiği	53
Şekil 5.6. HYK için katkı ile eğilme dayanımı değişim grafiği	55
Şekil 5.7. HKK için katkı ile eğilme dayanımı değişim grafiği	56
Şekil 5.8. Katkılı HYK numuneleri basınç dayanımı grafiği	57
Şekil 5.9. Katkılı HKK ürünleri için basınç dayanımı grafiği	58
Şekil 5.10. Katkılı HYK numuneleri için su emme grafiği	60
Şekil 5.11. Katkılı HKK ürünleri için su emme grafiği	60
Şekil 5.12. 8YK SEM görüntüleri	63
Şekil 5.13. 8KK SEM görüntüleri	64
Şekil 5.14. Katkılı numunelerin tekil ağır metal sızma grafikleri	69

KISALTMALAR

HSK	: Hidrokarbon Sondaj Kesintisi
HYK	: Yaş Ham Hidrokarbon Sondaj Kesintisi
XYK	: %X HYK katkılı ürün
HKK	: Kurutulmuş Ham Hidrokarbon Sondaj Kesintisi
XKK	: %X HKK katkılı ürün
ŞB	: Şahit harç
Çim	: Çimento
L/S	: Sıvı/Katı oranı
ADDDY	: Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
DDT	: Düzenli Depolama Tesisi
AKM	: Askıda Katı Madde
UAKM	: Uçucu Askıda Katı Madde
TÇK	: Toplam Çözünen Katı
TOK	: Toplam Organik Karbon
OK	: Organik Karbon
İK	: İnorganik Karbon
ÇOK	: Çözünmüş Organik Karbon
df	: Serbestlik derecesi
SS	: Kareler toplamı
MS	: Kareler ortalaması
F	: F oranı
P	: P değeri
NABİLTEM	: Namık Kemal Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi
TÜBİTAK MAM	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu : Marmara Araştırma Merkezi
ANOVA	: Varyans analizi

ÖNSÖZ

Enerjiye bağımlılığın gün geçtikçe arttığı günümüzde, her ne kadar sürdürülebilir enerji türleri ortaya çıksa da hidrokarbon türevli enerji kaynaklarının sektördeki ağırlığı yadsınmazdır. Hidrokarbon türevli enerji kaynaklarının kullanımına devam ettikçe sadece kullanımından kaynaklı kirliliğin değil, daha en başından, çıkartılmasından itibaren verimli, sürdürülebilir bir atık yönetimi kaçınılmazdır. Hidrokarbonun aranması ve çıkartılması sırasında kullanılan en büyük miktarda atıklardan biri olan sondaj kesintileri de bu yönetilmesi gereken atıklardan biridir. Bu çalışma kapsamında, bu amaçla Trakya Bölgesi'nde hidrokarbon sondajı sırasında oluşan ve çukurlarda biriktirilen su bazlı atık hidrokarbon sondaj kesintisinin bertarafı ve yapı malzemesi olarak geri kazanımı araştırılmıştır.

Portland çimentosu pek çok araştırmacı tarafından çeşitli atıkların bertarafı için solidifikasyon yönteminin uygulanmasında uygun bir bağlayıcı ve bir katılaştırma ajanı olarak öne çıkmaktadır. Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) adıyla öne çıkan bu yöntem ile atıklar gerek monoblok, gerek de daha küçük boyutlarda daha küçük parçacıklar halinde katı matris içerisinde tutulabilmektedirler. Yöntemin daha küçük boyutlu parçacıkların da verimli bir şekilde üretilmesine olanak vererek atıkların geri kazanımına olanak tanınması, araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bir prosesin çıktısının başka bir prosesin girdisi olarak kullanılmasının ekonomik getirisi kaçınılmaz olacaktır.

Literatürdeki çalışmalarda hidrokarbon sondaj çamurlarının S/S yöntemi ile bertarafı ve çeşitli atıkların bu yöntem ile geri kazanım ürününün inşaat sektöründe çeşitli alanlarda kullanımı mevcuttur; ancak hidrokarbon sondaj çamurunun S/S prosesi sonucu elde edilen ürünün yapı malzemesi olarak kullanımına dair hem sızma hem de dayanım açısından bir bütün olarak inceleyen çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışma ile bu konudaki eksikliğin giderilmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde ve tezin ortaya konulmasındaki yol göstericilikleri ve katkılarından dolayı sevgili danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Esra Tınmaz Köse ve Dr. Suna Özden Çelik'e, dayanım ve dayanıklılık analizlerinde yol göstericiliği ve yardımları için Dr. Öğr. Üyesi Aylin Akyıldız'a, materyal temini için Türkiye Petrolleri Genel Müdürlüğü ve Trakya Bölge Müdürlüğüne, yüksek lisans öğrenimim boyunca desteklerini esirgemeyen eski birim amirlerime, beni ben yapan sevgili anne ve babama ve her zorlanmamda bana devam edecek gücü veren sevgili eşim Dr. Fatih Fazlıoğlu'na teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs, 2019

Ezgi FAZLIOĞLU
(Kimya Mühendisi)

1. GİRİŞ

Gün geçtikçe artan nüfus ile kaçınılmaz şekilde kentleşme ve teknolojik gelişmeler de artmakta, buna bağlı olarak insan faaliyetlerinin sonucu atık türü değişmekte, atık miktarı da artmaktadır. Oluşan atıklar ve atık türlerindeki değişim çevre sorunlarına da yol açmakla birlikte insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Düzensiz depolanmalarıyla bu atıklar yeraltı sularına karışabilmekte, yüksek kirletici içeriğinden dolayı yaşamı tehdit etmektedir.

Dünya nüfusunun her geçen gün hızla artması, insanoğlunun çeşitli faaliyetleri için yakıt ihtiyacını, dolayısıyla önemli enerji kaynaklarından biri olan fosil kaynaklı yakıtlar petrol ve doğal gaz ihtiyacını da artırmaktadır. Bugün dünyada tüketilen enerji, çok sayıda enerji kaynağından elde edilirken; petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil kaynaklar, bu kaynaklar içinde %87'ye yakın bir ağırlık taşımaktadır (TPAO, 2015). Her ne kadar günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları öne çıkmaya başlayıp enerji verimliliği gibi kavramlar önem kazansa da fosil yakıtlar önemini korumaktadır. Fosil yakıtların 2035 yılı için de toplam enerji temininin yaklaşık %80'i ile enerji kaynakları arasında liderliğini koruması beklenmektedir (BP 2016). Bu ihtiyaç da petrol ve doğal gaz sondajlarını artırmaktadır. 1934 yılından beri ülkemizde 4617'si karalarda 73'ü denizlerde olmak üzere 4690 adet sondaj kuyusu mevcuttur. Bu kuyuların da %36'sı son 13 yılda açılmıştır (PIGM, 2016).

Sondaj faaliyeti sırasında ve sonucunda ortaya çıkan atıklardan kaynaklı çevre kirliliğinde artışa yol açmaktadır. Hidrokarbon arama, sondaj ve üretim çalışmaları, petrol ve doğal gaz çıkarılması kaynaklı çevresel sorunların yaşanmasına neden olan faaliyetlerin başlıcalarıdır. Bu faaliyetler ekonomiye katkı sağlamalarına rağmen akabinde çevrede yol açtıkları kirlilikler pek çok soruna neden olmaktadır (Shell 1983).

Arama, üretim, taşıma, depolama ve rafinasyon, petrol ve doğalgazın aranılmasından tüketime sunulmasına kadar geçen süreçte gerçekleştirilen başlıca işlemlerdir. Bu işlemler esnasında kullanılan çeşitli kimyasallar ve teknikler katı, sıvı ve gaz atıkların oluşmasına yol açmaktadır.

Çevre kirliliğinin oluşmasında öncelikle petrolle birlikte çıkarılan ve daha sonra ayrıştırılan yüksek oranda tuz ve emülsifiye halde petrol içeren suyun tahliyesi, petrolle birlikte çıkarılan formasyon suları, sabotajlar veya boru hatlarındaki kaçaklar gibi çeşitli

nedenlerle oluşan ham petrol döküntüleri, hidrokarbon kaynağının yer aldığı kayaçta bulunan ağır metaller ve hatta bazı durumlarda radyoaktif maddeler ve çeşitli bakteriler, karada hidrokarbonların çıkartılması sırasında kullanılan sondaj sıvıları, sondaj esnasında petrol ve doğal gazın kontrolsüz akması gibi sebep olmaktadır (BP 2016). Bu faaliyetlerden sondaj faaliyeti, kullanılan sondaj sıvılarının tatlı su rezervuarlarına karışması ile sulara, petrol ve doğal gazın kontrolsüz akması veya boru hatlarındaki hasarlar sebebiyle toprakta ve atmosferde kirliliğe neden olmaktadır. Ayrıca sondaj esnasında açığa çıkan ve oldukça toksik bir gaz olan H₂S, bir kaza durumunda çevrede bulunanların sağlığını tehdit edebilmektedir (IFC 2007).

Petrol ve doğal gaz arama çalışmaları, hidrokarbon kaynaklarının varlığını belirlemek için jeofizik yöntemlerin kullanılmasından başlayıp arama kuyusu açılmasına kadar olan süreçlerden oluşmaktadır. Bu çalışmalar esnasında özellikle sondaj faaliyetleri esnasında dikkate değer miktarlarda katı (kayaç kesintileri ve kırıntıları olarak) ve sıvı (sondaj sıvısı/çamuru olarak) atık üretilmektedir.

Sondaj sıvısı olarak da bilinen sondaj çamuru, a) burguyu soğutmak ve kayganlaştırmak için ve b) kuyu hafriyatını dışarı çıkarmak için döner sondaj esnasında kullanılan ve kuyu boyunca devir daim eden sıvıyı ifade eder. Pek çok sondaj çamuru aynı zamanda a) yüzey altı sıvılarını kontrol eder ve b) kuyu duvarları boyunca filtre keki oluşturur (Norman 2014)

Sondaj işlemi esnasında karşılaşılan kayaç katmanları arasında cıva, kadmiyum, çinko, molibden, bakır, krom gibi ağır metaller bulunabilmektedir. Bu kayaçlarda bulunan ağır metaller, sondaj işlemi sırasında kesintiler içerisinde sondaj sıvısıyla yeryüzüne aktarılır. Sondaj sıvısının bu kesintilerden arındırılmadan atılması da kirliliğe yol açmaktadır. Ayrıca sondaj sıvısına ilave edilebilen çeşitli kimyasallar da kirlilik yaratmaktadır. Örneğin, basıncı karşılamak üzere sondaj sıvısının %35'i kadar eklenen barit, içeriğindeki ağır metaller sebebiyle kullanıldığı oranda kirlilik yaratır. Bu nedenle baritin içindeki ağır metal içeriğinin azaltılmasının sağlanması çevresel açıdan gereklidir (Meriçboyu 2011).

Sondaj sıvıları, su bazlı petrol sıvıları, petrol bazlı sondaj sıvıları ve pnömatik sıvılar olmak üzere üç gruba ayrılır. Bu sıvılardan özellikle petrol bazlı olanların çevre kirliliği açısından oldukça zararlı olduğu araştırmalarda yer almaktadır (APC 2010). Dünya genelinde açılan kuyularda kullanılan sondaj sıvılarının %85'i su bazlıdır (Reis 1996).

Sondaj hafriyatı ve kullanılan sondaj sıvısı çevresel açıdan uygun bir şekilde bertaraf edilmelidir. Hem su bazlı hem de petrol bazlı sondaj çamurlarının depolamaya gönderilebilmesi için arıtılmaları gerekir (Norman 2014).

Her ne kadar kişisel olarak çevreyi koruma konusunda hassasiyetlerimiz olsa da asıl itici gücü çevre mevzuatı oluşturmaktadır. Dünya genelinde çevre mevzuatı giderek sıkı kontrol gerektiren adımlar atmaktadır. Örneğin deşarj veya bertaraf öncesi toplam petrol hidrokarbonları (TPH) oranının ağırlıkça %1 olması gibi çeşitli sınırlamalar getirilmiştir (Pierce vd. 2006).

Sondaj kesintileri için etkin bir şekilde bertarafı yukarıda anılan nedenlerle kaçınılmazdır. Bu çalışmaya konu solidifikasyon/stabilizasyon da bu atıkların bertarafında öne çıkan bir yöntemdir. Bu konu hakkında detaylı bilgiye ileriki bölümlerde daha detaylı yer verilecektir. Portland çimentosu veya kireç kullanılarak solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) prosesi özellikle biriktirme çukurlarının bütün halde katılaştırılması için uygulanan bir yöntemdir. Son yıllarda atıkların başka proseslerin hammaddesi olarak kullanılması anlayışının öne çıkması ile S/S prosesi ürünlerinin inşaat yapı malzemesi olarak kullanılabilir olması fikrini doğurmuştur. Çimento bazlı S/S ürünleri de beton ve çimento bazlı diğer malzemeler ile aynı fiziksel ve kimyasal hassasiyetlere sahiptir. Yapı malzemesi olarak kullanılacak geleneksel beton üretiminde ideal oranlarda hazırlanan karışım malzemeleri, dayanım ve dayanıklılık özelliklerine göre seçilir. S/S prosesinde karışımlar kirlenmiş ortamın özelliklerine, arıtma ihtiyacına göre hazırlanırlar (USEPA 2009).

Trakya Bölgesi'nde yer alan bir hidrokarbon sondaj sahasından alınan su bazlı sondaj kesintisinin S/S prosesi ile arıtılması ve yapı malzemesi olarak geri kazanımı amacıyla çevresel ve dayanım ve dayanıklılık açısından bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır.

2. HİDROKARBON, SONDAJI VE ÇIKAN ATIKLARIN YÖNETİMİ

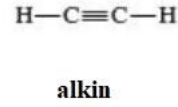
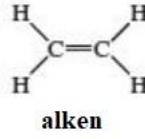
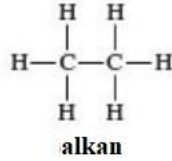
2.1. Hidrokarbon Tanımı

Genel tanımıyla hidrokarbon, sadece karbon (C) ve hidrojen (H) atomlarından oluşan organik bileşikleridir. Karbon atomları bir araya gelerek bir iskelet yapısı oluştururlar, hidrojen atomları da pek çok farklı konfigürasyonla bu karbonlara bağlanırlar.

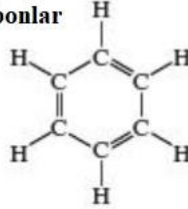
Hidrokarbonlar alifatik (alkanlar, alkenler, alkinler) ve aromatik hidrokarbonlar olmak üzere iki ana başlıkta incelenir. Aromatik hidrokarbonlar halkalı yapıda olup Lewis yapıları nedeniyle daha kararlıdır. Petrol ve doğal gazın temel bileşenleri hidrokarbonlardır.

Şekil 2.1.de Hidrokarbonların genel gösterimleri yer almaktadır.

alifatik hidrokarbonlar



aromatik hidrokarbonlar



Şekil 2.1. Hidrokarbon yapılarının genel gösterimi (Brittanica 2018)

Tüm dünyada kara ve denizlerin altında çeşitli derinliklerde hayvan ve bitki kalıntılarının uzun yıllar önce bozunmasıyla oluşmuş hidrokarbon birikimleri mevcuttur. Hidrokarbonlar, normal sıcaklık ve basınç altında moleküllerinin karmaşık yapısına göre gaz, sıvı veya katı hallerde bulunabilirler. Hidrokarbon rezervleri bu üç halde bir arada bulunabilir (Shell 1983).

Sıvı petrol, rafine edilmiş petrolden ayırt edilebilmek için ham petrol, gaz halinde bulunan petrol doğal gaz, yarı katı ve katı haldeki petrol ise ağır karbon ve katran olarak tanımlanır. Bu yarı katı ve katı haldeki petrole özelliklerine göre asfalt, zift, katran gibi

isimlerde verilebilir. Ham petrol ve doğal gazın ana bileşenleri hidrojen ve karbon olduğu için iki kaynak ortak bir şekilde 'Hidrokarbon' olarak da adlandırılır. Sıvı halde bulunan petrol, ticari alanda en önemli olanıdır (PIGM 1995).

Doğal gazın, 2013 yılı sonu itibari ile dünya enerji talebinin %24'ünü, petrolün ise %33'ünü karşıladığı ifade edilmektedir. Bugüne kadar, Uluslararası Enerji Ajansı, ABD Enerji İdaresi, BP ve ExxonMobil gibi çeşitli uluslararası kurum ve kuruluşlarca yapılan çeşitli öngörülere göre petrolün birincil enerji tüketimi içindeki payını önümüzdeki uzun dönemde de koruyacağı düşünülmektedir (TPAO 2015).

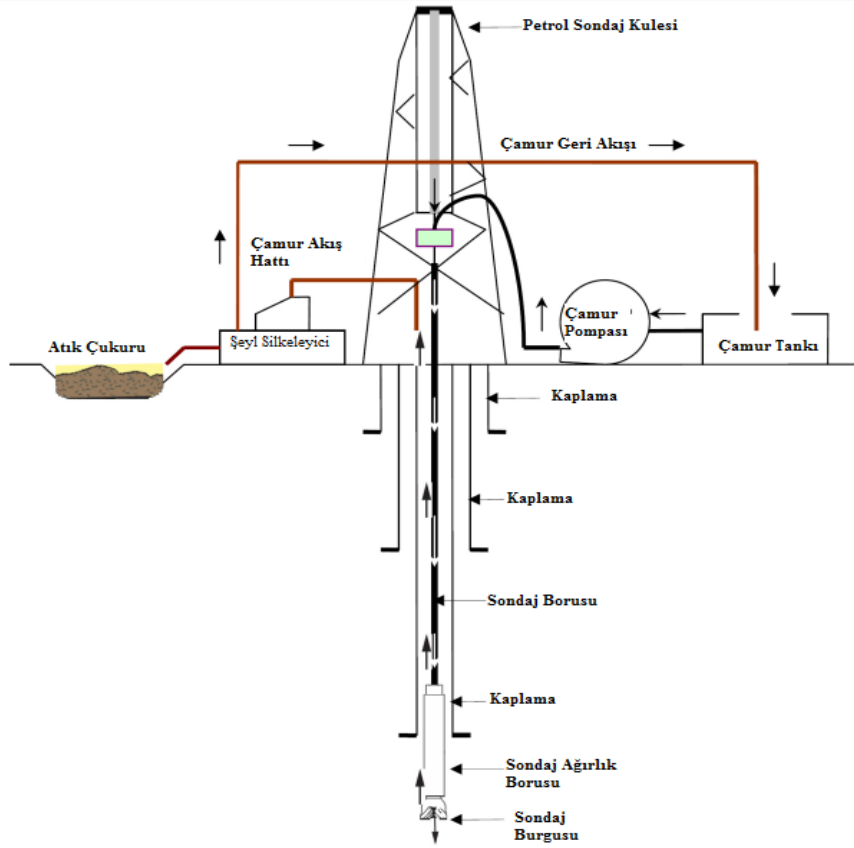
2.2. Sondaj İşlemi

Hidrokarbonların üretimi, doğada buldukları yerlerin aranması, buldukları yerlerden çıkarılmaları (sondaj) ve işlenmeleri aşamalarından oluşur. Bu aşamalardan sondaj, kelime anlamıyla yüzey altı kayaçlar boyunca bir delik açma işlemidir. İlk sondaj işlemleri de kablolu sondaj kuleleri aracılığıyla gerçekleştirilmiş olsa da günümüzde dönel donanım ile gerçekleştirilmektedir (Norman 2014).

Sondaj sisteminin amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Petrol aramak ve üretmek,
- Madenlerin veya malzeme ocaklarının varlığının doğrultusunu, yatımını, derinlik ve miktarını saptamak
- Su aramak ve üretmek,
- Doğal gaz aramak ve üretmek,
- Jeotermal kaynak aramak ve üretmek,
- Drenaj,
- Enjeksiyon (yer altı beton baraj inşaatı),
- Dinamit lağımı açmak ve beton kırmak,
- Havalandırma bacası inşaatı,
- Maden kazalarında can kurtarma işlemleri,
- Yer altı nükleer denemeleri,
- Zeminin taşıma kapasitesinin saptanması ve zemin mekaniği deneyleri için sondaj yapmak

Şekil 2.2.de bir sondaj kulesinin temsili gösterimi bulunmaktadır. Ölçüler birebir olmayıp fikir verme amacı taşımaktadır.



Şekil 2.2. Bir sondaj kulesinin şematik gösterimi (Zoveidavianpoor 2012)

2.3. Sondaj İşlemi Atıkları ve Yönetimi

Petrol ve gaz kuyularının sondaj işlemi esnasında çeşitli atık türleri oluşur. Bu atıkların bazıları sondaj kesintisi gibi kazı işleminden doğal yan ürünler, sondaj sıvısı ve onunla alakalı katkı maddeleri gibi kuyunun açılması için kullanılan malzemelerdir. Bu atıklar hidrolik kırılma, kuyu tahrik, kuyudan hidrokarbon çıkarma veya çıkarılan hidrokarbonun taşınması esnasında oluşabilir. (Reis 1996).

Hidrolik kırılma esnasında kimyasal ek maddeler ve propant (dolgu gereci) içeren özellikle geliştirilmiş akışkanlar, yüksek basınç altında kuyuya pompalanarak jeolojik oluşum içerisinde kırıklar oluşturulur veya kırıklar açık tutulur. Hidrolik kırılma genellikle aşamalı gerçekleşir ve her bir aşamayı kırma sıvısı yüzeye geri dönerken bazı sıvıların da geri dönmesi takip eder ('geri akış').

Hidrolik kırılmayla birlikte gerçekleştirilen yatay sondaj, sıklıkla büyük miktarda geri akış ile sonuçlanır ve bu diğer arama ve çıkarma faaliyetleri sırasında açığa çıkan atıklarla konvensiyonel olmayan rezervuarların hidrolik kırılması sırasında açığa çıkan atıkları birbirinden ayırmak için anahtar bir özelliktir. Örneğin daha büyük miktarlardaki geri akış, ya yerleşik birimler (çukur) ya da tankları kullanan daha büyük yerinde depolama kapasiteleri gerektirmektedir (EPA 2016).

Sondaj esnasında sondaj sıvısı sondaj iğnesinden aşağı doğru enjekte edilir. Burgu ve delikler, sıvının delik içerisindeki hafriyatı temizlemesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanır. Daha sonra sıvı askıdaki hafriyat ile tekrar yüzeye taşınır. Yüzeyde hafriyat sıvıdan ayrılır. Üzerinde sıvı kalan hafriyat (kesinti) daha sonra arıtılmak ve bertaraf edilmek üzere çukurlarda toplanır. Ayrılan sıvı daha fazla hafriyat çıkarması amacıyla tekrar yüzey altına enjekte edilir.

Sondaj işlemi esnasında kullanılan sondaj sıvılarından su bazlı olanların çevre üzerinde olumsuz etkileri, petrol bazlı olanlara göre çok daha düşüktür. Atık sondaj sıvısının bertarafı için yöntem belirlemede içerdikleri kimyasalların bilinmesi önemlidir (Shell 1983).

Sondaj atıkları, genellikle çukur diye adlandırılan alanlarda biriktirilir. Çukurlar, hafriyat veya çimento gibi geri dönen atıklar da dahil olmak üzere sondaj atıklarını biriktirmek için de kullanılan kazılmış alanlardır. Ayrıca tanklar ve geçirgen olmayan sentetik astarlı çukurlar gibi alternatifler de mevcuttur.

Yalnızca geri dönen sondaj atığı, kesinti veya çimento bu çukurlarda biriktirilmelidir. Atıksu veya diğer petrol sahası atıklarının sondaj atığına karışması engellenmelidir. (BCGOC 2012).

Hidrokarbon sondajının en önemli atığı olan sondaj atık kesintisi, endüstriyel atık kaynakları arasında tanımlanan ve sıkı bir atık yönetimi gerektiren bir atık çeşididir. Atık yönetim prensipleri hidrokarbon sondaj atık kesintisi için de geçerlidir. Öncelikle atık kaynağında azaltılmalı, mümkünse geri dönüştürülmeli veya yeniden kullanılmalı, geri kazanılmalı, atık çıkışı önlenemediği durumlarda arıtılmalı ve en son seçenek olarak da nihai bertaraf yöntemi olan düzenli depolamaya gönderilmelidir.

Atık azaltma, hidrokarbon saçılmalarının önüne geçilmesi, daha az sondaj sıvısı kullanımı gerektiren yöntemlerin kullanılması, sondaj sıvısının sondaj işlemi sonrasında kesintilerin ayrılması ve sondaj sıvısının ayrılması, ayrılan sondaj sıvılarının yeniden kullanımları/geri dönüşümü veya geri kazanımı gibi önlemler ile sağlanabilir (Shell 1983, Reis 1996, NETL 2008, Woodside 2012).

Atık azaltma sonrası önlenemeyen atıklar için bertaraf uygulanır. Atık sondaj kesintisi için en yaygın olarak uygulanan yöntemlerden birisi de hidrokarbonun çıkarıldığı sahada yer alan çukurlarda biriktirmektir. Bu çukurlar saçılmaların önüne geçmek için sondaj yapılan noktaya yakın, toprağa ve daha sonra da yer altı sularına karışmayı engelleyecek şekilde bir astar kullanılan, amacı dışındaki kesinti, atıksu veya çeşitli kimyasallar gibi atıkların karışmadığı atık sondaj kesintisi biriktirme alanlarıdır (NETL 2008).

Sondaj esnasında dökülme ve saçılmalar nedeniyle de kirlilik oluşumu gözlenebilmektedir.

2.4. Hidrokarbon Sondaj Kesintisi Arıtma ve Bertaraf Yöntemleri

Arıtmanın amacı, topraktaki toksik varlığıyla ilişkili riski çevresel olarak kabul edilebilir seviyeye indirmektir. Bu bağlamda arıtma, kirliliğin tamamen giderilmesi anlamına gelmez. Risk değerlendirmesinde (taşınma, biyoygunluk, dönüşüm vb.) göz önünde bulundurulmuş her bir faktör konusunda pozitif etkiye sebep olacak arıtma yöntemi değerlendirilmelidir. Risk değerlendirmesi kadar bu parametrelerin de çeşitli koşullar altında arıtma üzerine etkileri uygun arıtma yönteminin seçiminde öne çıkacaktır (Yaron vd. 1996).

Sondaj atık kesintisinin bertarafı için uygun yöntem seçiminde, atığın geri mi kazanılacağı yoksa nihai bertaraf yöntemi olan depolamaya mı gönderileceği tercihi önem kazanmaktadır. Sondaj atık kesintilerinin bertarafında, solidifiye/stabilize edildikten sonra inşaat yapı malzemesi olarak kullanımı sürdürülebilirlik açısından önemli örneklerden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla kullanılacak sondaj atık kesintisinin ağır metal ve toplam hidrokarbon içeriği gibi özelliklerinin takibi önem kazanmaktadır.

Sondaj kesintileri için arıtma yöntemleri tanımlanırken sahada ve saha dışında olmak üzere sınıflandırma yapılır.

Bu çalışma kapsamında sondaj kesintisi bertaraf yöntemleri kısaca tanımlanacak, bertaraf yöntemi olarak seçilen solidifikasyon/stabilizasyon yöntemi hakkında diğer yöntemlere göre daha detaylı bilgi verilecektir.

2.4.1. Sahada Arıtma Yöntemleri

Sondaj kesintilerinin sahada bertarafı için bazı yöntemler tanımlanmıştır. Bu yöntemler biyolojik, fiziksel-kimyasal, kimyasal ve termal arıtma yöntemleridir.

Yöntemlerine göre arıtma teknikleri Çizelge 2.1.de verilmiştir (Reis 1996, ASME 2005, NETL 2008, Mohee ve Mudhoo 2012, USEPA 2014, IOGP 2016).

Çizelge 2.1. Sondaj kesintisi sahada bertaraf yöntemleri

Arıtma Yöntemi	Arıtma Tekniği
Fiziksel arıtma	Susuzlaştırma
Fiziksel-kimyasal arıtma	Solidifikasyon/stabilizasyon
	Biyoremediasyon
Biyolojik arıtma	Fitoremediasyon
	Zemine uygulama
	Yakma
Termal arıtma	Vitrifikasyon
	Termal desorpsiyon

2.4.1.1. Fiziksel Arıtma

i. Susuzlaştırma

Sondaj esnasında büyük miktarda sondaj atığı oluşur. Bu atığın hacminin azaltılması ileri arıtma yöntemlerinin uygulanması için ön hazırlık görevi görecek, aynı zamanda da atık bertaraf maliyetini düşürecektir. Proses yoluyla üretilen atık miktarı azaltıldıktan sonra, susuzlaştırılma ile oluşan atığın da hacmi azaltılarak arıtma verimi artırılabilir.

Sondaj atıklarının susuzlaştırılması doğal yollarla veya mekanik yöntemlerle yapılabilir. Sondaj atıklarını susuzlaştırmak için kullanılan doğal yöntem buharlaştırmadır. Buharlaştırmada büyük açık çukurlarda biriktirilen sondaj kesintisi açık havada buharlaştırılır. Bu sayede sondaj sırasında açığa çıkan su da uzaklaştırılmış olur. Ancak böyle bir uygulama için çukurların inşası önem kazanmaktadır (Mutch 1990).

Mekanik yöntemle kurutma ise buharlaştırma ile su gideriminin çok yavaş olduğu bazı durumlarda öne çıkan yöntemdir. Böyle durumlarda şeyl çalkalayıcılar, hidrosiklonlar veya yerleşim havuzları ile serbest sıvının uzaklaştırılması sağlanır. Daha ileri susuzlaştırma için filtre presler, santrifüjler veya vakum filtrasyon uygulanabilir (Reis 1996).

2.4.1.2. Fiziksel – Kimyasal Arıtma

i. Solidifikasyon / Stabilizasyon

Solidifikasyon, atığı yüksek yapısal bütünlükteki monolitik bir katı içerisine hapsetme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Stabilizasyon ise atıkların potansiyel tehlikelerini, kirleticileri daha az çözünebilen, daha az yer değiştiren veya daha az zehirli formlara dönüştüren teknikler olarak tanımlanır. Stabilizasyon sonucu atıkların fiziksel doğaları ve idare etme özellikleri değişmek zorunda değildir (USEPA 2014).

Rezerv çukurlarının solidifikasyonu, gömmeye göre pek çok çevresel avantajlar sağlar. Ağır metaller gibi potansiyel tehlikeli malzemelerin yer değiştirme yeteneğini azaltarak, katılaştırılmamış gömülü rezerv çukuru atıklarından sızabilecek suların yer altı sularını kirletme potansiyelini de azaltır. Rezerv çukuru sıvıları ve kesintiyi görece çözünmez beton benzeri bir matrise sahip ve hatta yapı malzemesi olarak kullanılacak bir yapı elde etmek amacıyla ticari çimento, kireç fırını tozu gibi solidifikasyon ajanları ile kullanılabilir. Bu yöntem ile atığı yönetmek kolay olsa da çok yaygın bir yöntem değildir (APC 2010).

Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) prosesleri kimyasal prosesler, fiziksel prosesler ve termal prosesler olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilirler. Çizelge 2.2.de proses türlerine göre S/S yöntemlerinin sınıflandırılması gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Proses türüne göre S/S yöntemlerinin sınıflandırılması (Conner and Hoeffner 1998)

S/S Proses Türü	Proses Adı
Kimyasal Prosesler	Çimento Bazlı
	Puzolan bazlı
	Kireç bazlı
	Çeşitli bazlar ve katkılar
Fiziksel Prosesler	Makroenkapsülasyon/konteynerizasyon
	Kimyasal olmayan mikroenkapsülasyon

Çimento bazlı malzemeler, ilgili proses maliyetlerinin düşük olması, çeşitli bertaraf senaryolarına uygunluğu ve katı proses ve performans gerekliliklerini karşılaması gibi nedenlerle en fazla tercih edilen S/S katkı maddeleri olarak öne çıkmaktadır (Conner and Hoeffner 1998). Çimentomsu atıkların gözenekli yapıları, polimerik veya gaz formdaki atıklara göre iç kısımların daha erişilebilir olmasına olanak sağlar. Daha ucuz ve basit bir arıtma için pH, E_h ve/veya absorbanlar aracılığıyla sızma kontrolü şarttır.

2.4.1.3. Biyolojik Arıtma

i. Biyoremediasyon

Sondaj faaliyetleri sırasında ortaya çıkan pek çok hidrokarbon, bakteri ve fungi gibi mikroplar sayesinde biyolojik olarak karbon dioksit ve suya indirgenebilir. Biyolojik indirgeme esnasında bakteriler hidrokarbonları besin olarak kullanırlar. Biyolojik indirgeme koşulları mikrop büyümesini optimize etmeyi sağlayacak şekilde iyileştirilebilir. Biyolojik indirgemenin planlı olarak iyileştirilmesi biyoremediasyon adını alır (Reis 1996).

Biyoremediasyon; organik kirleticilerin, oksijen veya sınırlayıcı besinlerin eklenmesi veya yabancı mikrobiyal türlerin eklenmesi gibi belirli iyileştirmeler sağlayan yerli mikrobiyal popülasyonların uyarılması yoluyla biyobozunmasını kullanan bir arıtma teknolojisidir. Kendiliğinden oluşan veya dışarıdan uygulanan mikroorganizmaların, zararlı organik bileşenleri tehlikeliliği azaltılmış ve/veya kullanılabilir bileşenlere indirgemesi ve dönüştürülmesi yolunu kullanır. Sahada veya saha dışı uygulanabilir (USEPA 1991).

Biyoremediasyon;

- Kompostlama,
- Biyoreaktörler,
- Vermikültür şeklinde uygulanabilir (IOGP 2016).

Kompostlama, zemin arıtımına benzerdir ancak daha yüksek verim elde edilebilecek bir yöntemdir. Kompostlamada ahşap kıymıkları, hasır, çeltik gibi yığın ajanlara karıştırılarak gözenekliliği ve hava geçirgenliği artırılan atıkların biyolojik indirgenmesi ile gerçekleştirilir.

Kompostlanan atıklardan sağlık bazlı kriterleri karşılayanlar toprak şartlandırıcı, toprak örtüsü ve temiz dolgu temini için kullanılabilir (IOGP 2016).

Biyoreaktörler, zemin arıtımı ve kompostlamada da geçerli bazı benzer aerobik biyolojik koşullara göre çalışır; ancak meydana gelen reaksiyonlar açık veya kapalı olabilecek bir tankta ya da bir kabinde gerçekleştirilir. Bu tür bir ortam sıcaklık gibi önemli koşulların daha iyi kontrol edilmesini sağlayarak biyodegradasyon hızını artırır. Biyoreaktör proseslerine su ve atığı çamurlaştırmak için besin eklenir ve mekanik bir şekilde veya hava püskürtme ile karışımın karıştırılması ve oksijen alması sağlanır (NETL 2008).

Vermikültür ile arıtma, organik atıkları bitki gelişimi için gerekli besinlere dönüştürecek bozunmayı solucanlar aracılığı ile gerçekleştirme prosesi olarak tanımlanabilir. Uzun yıllar boyunca organik atıkların organik gübrelere dönüştürülmek için kullanılmasından sonra, son yıllarda bu proses bazı sentetik bazlı sondaj atıklarında da denenmiş ve başarılı olmuştur. Yeni Zelandalı bir grup araştırmacı solucanların hidrokarbon bazlı sondaj sıvılarının hızlı bozunmasını sağlamak ve akabinde kesintideki mineralleri işleyebilecek özellikte olduklarına dair gerçekleştirdikleri deneylerde 15-30 mm ortalama derinlikle yayılan kümelerin, solucanlar tarafından her birinin tüketilmelerinin 5 ila 7 gün arasında sürdüğünü ve solucanların gübre veya toprak şartlandırıcı olarak kullanılabilen bir ürün çıkardığını göstermişlerdir (IOGP 2016).

ii. Fitoremediasyon

Fitoremediasyon, kirleticilerin remediasyonunu yani arıtımını bitkilerin sağlaması olarak tanımlanmaktadır. Toprak ve yer altı sularını iyileştirilmesi için bitkilerin kullanılması oldukça yeni bir kavramdır ve pazarda henüz geçerliliği kabul edilmiş bir yöntem olarak sayılmamaktadır. Bu nedenle fitoremediasyon uygulamaları hakkındaki bilgilerin çoğunluğu sahadan ve laboratuvar araştırmalarından gelmektedir; ancak bu çalışmalarda ucuz, basit ve etkin bir toprak ve yer altı suyu arıtımı yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Genellikle toksik ağır metaller, radyoaktif çekirdek, klorlu çözücüler, Benzen tolüen etilbenzen o- ksilen (BTEX) bileşikleri, aromatik olmayan petrol hidrokarbonları, nitrotoluenli mühimmat atıkları ve diğer organik bileşiklerle kirlenmiş toprak ve yer altı sularının iyileştirilmesi için kullanılır (Mohee ve Mudhoo 2012).

iii. Zemin uygulama

Zemine uygulama yönteminde atığın biriktirdiği rezerv çukurları genellikle sıvı kısmın çekilmesi ile susuzlaştırılır ve akabinde bertaraf için düzenli bir şekilde arıtılır. Katılar genellikle kimyasal solidifikasyon ile işlenir ve daha sonra geriye kalan kısım rezerv çukurunun orijinal duvarları arasında kalan alan kullanılarak yeniden doldurulur. Daha kuru mevsimlerde, genellikle pompalanamayan malzemenin geriye kalanı gömme veya rezerv çukuruna geri doldurma için sahaya serilir (NETL 2008).

Kesintide yer alan katı ve sıvı kısımları toprak işleme makineleriyle çevredeki toprağa sahaya serme ile uygulamak da yaygın bir bertaraf yöntemidir. Toprağa serme organik ve inorganik bileşiklerin seyrelme, biyoindirgeme ve adsorpsiyon ile indirgenmesini artırır. Bazı alanlarda toprak sahibinin izninin alınması gerekebilir. Tuzlu sıvılar bitki üzerinde tahrip edici etki yaratabileceği ve de yer altı sularına karışabileceği için bu yöntem ile bertaraf edilemezler. Aromatik malzemelerin/petrolün düşük konsantrasyonlarda bulunması halinde kısa vadede uygulama toprağa zarar verse de uzun vadede oluşacak problem göze alınabilir düzeydedir ve bu nedenle etkin bir şekilde toprağa serme ile bertaraf edilebilirler. Toprakta bulunan bakteriler de devamında uygun anaerobik koşullar altında petrolü biyoindirgeyebilir. Ancak yüksek nem içeriği söz konusu ise bu durumun biyoaktiviteyi geciktirecek olmasından dolayı petrol içeren sıvıların yüzeyde bertarafı için bu yöntem uygulanamaz. Tüm toprağa serme uygulamalarında, aşırı kuruma süresi ve yüzey sularına olası karışmaları engelleme gibi nedenlerle aşırı uygulamadan kaçınılmalıdır (APC 2010).

2.4.1.4. Termal Arıtma

i. Yakma

Hidrokarbonları gidermek için bir başka etkin yöntem de yakmadır. Yakma fırınları petrolü katılarda bulunabilecek görece az miktarlardaki yanabilir malzemeyi yakmak için özel olarak tasarlanırlar. Yakmayı takiben oluşan ve tuz ile ağır metaller içeren kül, tehlikeli kalıntıların sızmasını engellemek için katılaştırılır.

Tipik bir yakma prosesi ile atıktaki hidrokarbon içeriği %99'un üzerinde giderilebilir. Etkinliği yüksek bir yöntem olmasına rağmen baca gazına karışabilecek ağır metallerin hava kirliliğine yol açması uygulanmasını zorlaştırır. Ayrıca petrol katı atıklarının içeriğindeki

hidrokarbon miktarı yakmayı başlatabilmek için yeterli seviyede olmadığı için ikinci bir yakıt kullanımını gerektirir ve bu da işletmeye maliyet artışı olarak yansır (Reis 1996).

ii. Termal Desorpsiyon

Termal desorpsiyon, sondaj atığının 600 °C'ın altındaki sıcaklıklarda ısıtılması ile birlikte atığın düzenli depolamaya gönderilebilir hale getirilmesi işlemidir. Bu işlem sırasında uçucu sıvılar uzaklaştırılır ve bu sayede petrol de geri kazanılmış olur. Sistem petrol bazlı kirlilik dışında tuzluluk veya ağır metal içeriği gibi kirleticileri gidermediği için ilave arıtma uygulanmasını gerektirir (ASME 2005).

2.4.2. Saha Dışında Arıtma Yöntemleri

2.4.2.1. Boru Hattı ile Deşarj

Saha dışında boru hattı ile deşarj, adından da anlaşılacağı üzere sondaj sıvısı ve kesintinin bir boru hattı ile saha dışına taşınarak yine saha dışında çevreye bırakılmasıdır. Tipik bir proste katı kontrol ekipmanında kesinti su ile yıkanır ve su altına ulaşan bir boru ile deşarj edilir. Eğer sondaj kesintisi deşarj edilirse, deşarj edilecek çamur genellikle sistemdeki ilk iki çukurdan salınırlar. Bu sayede çukurlarda çökme ile genellikle şeyl salıcı ile giderilemeyen sondaj kesintileri ve kum birikir. Bu yöntemle yalnızca sulu çamurlar deşarj edilebilir. Kesinti üzerindeki kalıntılar dışında hiçbir sulu olmayan çamur gerçekte deşarj edilmez (CAPP 2001).

2.4.2.2. Enjeksiyon

Özellikle yer altı suları koruma bölgeleri açısından şartlar uygunsa izin alınmak suretiyle tercih edilebilecek bir yöntemdir. Yöntem, boşta bulunan kuyulara atıkların enjekte edilmesiyle uygulanır. (APC 2010)

Derin kuyu bertaraf faaliyetleri için enjeksiyon stratejisi aşağıdaki adımların birleşimi olarak değerlendirilebilir:

- Enjeksiyon hızı ve basıncı
- Döngü süresi (enjeksiyon-kapatma-enjeksiyon kademelerinin süreleri)
- Ön yıkama, sonradan yıkama stratejileri
- Kademe/hazne boyutu (hacim)
- Çamur tasarım parametreleri (yoğunluk, reoloji ve parçacık boyutu)

- Enjeksiyon faaliyeti sırasında proses gözlem verilerinin (pompa basıncı, pompa enjeksiyon hızı ve hacim gibi) toplanması ve analizi (Marika vd 2009)

2.4.2.3. Düzenli Depolama Sahasında Bertaraf

Sondaj kesintilerinin düzenli depolama sahasında bertaraf edilebilmesi için bulunduğu ülke mevzuatı hükümlerine uygun hale getirilip düzenli depolama sahalarında, geçirimsiz zeminlerde bertarafını içerir. Ülkemizde bu bertaraf yöntemi için gerekli mevzuat hükümleri bir sonraki başlıkta detaylandırılmıştır.

2.5. Hidrokarbon Sondaj Atıklarının Bertarafı Konusunda Türkiye'deki Mevzuat

Sondaj kesintilerinin (çamurlarının) atık tanımlanması diğer tüm atıklarda olduğu gibi Çevre ve Şehircilik Bakanlığı kılavuzları doğrultusunda yapılmaktadır. Çizelge 2.3.te sondaj çamurlarının Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY) Ek-4 doğrultusunda tanımlamaları yer almaktadır.

Çizelge 2.3. AYY Ek-4 sondaj çamurları atık kodları

Kod	Tanım	Sınıf
01	Maden Atıkları	Çeşitli
01 05	Sondaj çamurları ve diğer sondaj atıkları	4 tehlikeli 2 tehlikesiz
01 05 04	Tatlı su sondaj çamurları ve atıkları	Tehlikesiz
01 05 05*	Yağ içeren sondaj çamurları ve diğer sondaj atıkları	*Kesin tehlikeli (A)
01 05 06*	Tehlikeli maddeler içeren sondaj çamurları ve diğer sondaj atıkları	*Muhtemel tehlikeli (M)
01 05 07	01 05 05 ve 01 05 06 dışındaki barit içeren sondaj çamurları ve atıkları	Tehlikesiz
01 05 08	01 05 05 ve 01 05 06 dışındaki klorür içeren sondaj çamurları ve atıkları	Tehlikesiz
01 05 99	Başka bir şekilde tanımlanmamış atıklar	Tehlikesiz

Ülkemizde tanımlanan hidrokarbon sondajı atıklarının yönetimi de yine Çevre Kanunu doğrultusunda hazırlanan AYY, Maden Atıkları Yönetmeliği ve Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik hükümleri doğrultusunda yapılmaktadır.

2.5.1. Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY)

i. Yönetmeliğin Amacı

AYY'nin amacı mevzuatta yer aldığı haliyle;

“a) Atıkların oluşumundan bertarafına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetiminin sağlanmasına,

b) Atık oluşumunun azaltılması, atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü, geri kazanımı gibi yollar ile doğal kaynak kullanımının azaltılması ve atık yönetiminin sağlanmasına,

c) Çevre ve insan sağlığı açısından belirli ölçütlere, temel şart ve özelliklere sahip, bu Yönetmeliğin kapsamındaki ürünlerin üretimi ile piyasa gözetimi ve denetimine, ilişkin genel usul ve esasların belirlenmesi”dir.

ii. Atık Yönetimine İlişkin Genel İlkeler

İlgili yönetmelik doğrultusunda atık yönetimine ilişkin genel ilkeler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

“a) Atık üretiminin ve atığın tehlikelilik özelliğinin;

1) Doğal kaynakların olabildiğince az kullanıldığı temiz teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanılması,

2) Üretim, kullanım, geri kazanım veya bertaraf aşamalarında çevre ve insan sağlığına en az zarar verecek şekilde ürünlerin tasarlanması, pazarlanması,

3) Daha dayanıklı, yeniden kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir ürünlere odaklanan teknolojiler ile atık üretimine ve atık içerisinde bulunan zararlı maddelere yönelik, ürün çevresel tasarım yaklaşımının oluşturulması, suretiyle önlenmesi ve azaltılması esastır.

b) Atık üretiminin kaçınılmaz olduğu durumlarda atıkların; yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve ikincil hammadde elde etme amaçlı diğer işlemler ile geri kazanılması, enerji kaynağı olarak kullanılması veya bertaraf edilmesi esastır. Atıkların alternatif hammadde ve ek yakıt olarak kullanılmasına ilişkin esaslar Bakanlıkça belirlenir.”

2.5.2. Maden Atıkları Yönetmeliği

i. Yönetmeliğin Amacı

Madenlerin;

- a) Aranması,
- b) Çıkarılması
- c) Hazırlanması/zenginleştirilmesi
- d) Depolanması sonucunda ortaya çıkan atıkların üretiminden nihai bertarafına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde yönetilmesine ilişkin usul ve esaslar” bu yönetmelik kapsamında düzenlemektir.

ii. Maden Atıkları Yönetmeliğinde Sondaj Çamurlarına İlişkin Özel Hükümler

Maden atıkları arasında yer alan sondaj atıkları bu başlıkta değerlendirilmektedir. Bu hususla ilgili yönetmelikte;

“(1) Sondaj çamuru, devir daim suyu ve sondajdan çıkan kırıntıların çöktürülmesi amacıyla hazırlanan çamur havuzunda depolanır veya lisanslı bertaraf tesislerine gönderilir.

(2) Eğer sondaj çamuru temiz su ve bentonit haricinde kullanılan katkı maddelerinin malzeme güvenlik bilgi formlarında alıcı ortamlar üzerinde tehlikelilik riski bulunmadığının belirtilmesi halinde çamur havuzunda herhangi bir geçirimsizlik şartı aranmaz. Aksi takdirde, çamur havuzunda ve üst örtü sisteminde doğal/jeosentetik kil veya jeomembran kullanılarak geçirimsizlik sağlanır.

(3) Sondaj havuzu kazısı aşamasında bitkisel toprak ve hafriyat toprağı, faaliyetin bitiminin ardından sondaj çamurunun kurutulması sonrasında havuzun kapatılması işleminde kullanılmak üzere ayrı yerlerde biriktirilmelidir.

(4) Yağ içeren ya da tehlikeli maddeler içeren sondaj çamurları, lisanslı yakma veya tehlikeli atık bertaraf/geri kazanım tesislerinde bertaraf edilir.” özel hükümleri yer almaktadır.

2.5.3. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDY)

i. Yönetmeliğin Amacı

Bu Yönetmeliğin amacı; atıkların düzenli depolama yöntemi ile bertarafı sürecinde;

“a) Oluşabilecek sızıntı sularının ve depo gazlarının toprak, hava, yeraltı suları ve yüzeysel suların üzerindeki olumsuz etkilerinin asgari düzeye indirilerek çevre kirliliğinin önlenmesine,

b) Atıkların türüne göre uygun depo tabanı teknik tasarımlarının yapılması ve düzenli depolama tesislerinin inşa edilmesine,

c) Düzenli depolama tesislerine atık kabulü işlemlerine,

ç) Düzenli depolama tesislerinin işletilmesi, kapatılması ile kapatma sonrası kontrol ve bakım süreçlerine,

d) İşletme, kapatma ve kapatma sonrası bakım süreçlerinde sera etkisi de dâhil olmak üzere çevre ve insan sağlığı açısından risk teşkil edebilecek olumsuzlukların önlenmesine,

e) Mevcut düzenli depolama tesislerinin ıslahı, kapatılması ve kapatma sonrası bakım süreçlerine ilişkin teknik ve idari hususlar ile uyulması gereken genel kuralları belirlemektir.”

3. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölüm kapsamında öncelikle akademik literatürde solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) prosesi ile denenen çeşitli atıklar, daha sonra hidrokarbon sondaj kesintisi özelinde de çeşitli arıtma yöntemleri ve yine bu atıkların çeşitli S/S yöntemleri ile bertarafı çalışmaları ve en son da S/S prosesi ürünlerinin çeşitli kullanımları incelenmiş, bu araştırma verilerinden derlenen kısa bilgilerin verilmesi amaçlanmıştır.

3.1.Solidifikasyon/Stabilizasyon Prosesleri için Kullanılan Çeşitli Atıklara Dair Çalışmalar

Qian ve ark. (2006), ağır metaller içeren endüstriyel atık kesintisin arıtılması için S/S yönteminde bağlayıcı olarak Portland çimentosu ile belediye atıkları yakma fırınından çıkan uçucu kül kullanmışlardır. Çalışmada 103°C'ta bir fırında kurutulup <9.5 mm olacak şekilde toz haline getirilen atık çamur, uçucu kül ve Portland çimentosu ile su çimento oranı 0,3 olacak şekilde farklı oranlarda, küp halinde katılaştırılmıştır. 0,3 MPa hedef ile 3 ve 7 günlük dayanımları, toksisite karakteristiği sızma prosedürü (TCLP) ile sızmaları ölçülmüş, FTIR ve XRD analizleri ile karakterizasyonları yapılmıştır. %5, 10 ve 15 çimento oranları ile hazırlanan numunelerde hedef dayanım elde edilmiş, belediye atıkları yakma külünün matrisin dayanımını artırdığını ortaya koymuşlardır. Optimum karışım ise %45 uçucu kül, %5 çimento ve %50 endüstriyel atık çamurdan oluşan karışım olarak bulunmuştur.

Kim ve ark. 2005 yılında literatüre kazandırdıkları çalışmalarında solidifikasyon uygulayacakları atık malzeme olarak çürütülmüş atıksu arıtma çamurunu kullanmışlardır. Çalışma kapsamında katılaştırılmış çamurun depolama sahası örtü malzemesi olarak

kullanıma uygunluğu araştırılmıştır. Bu kapsamda XRD, SEM ve EDS ile matris ve karakterizasyon analizleri yapılmış, üretilen malzemenin dayanım ve su geçirgenliği gibi mekanik özellikleri ile ağır metallerin sızma davranışları incelenmiştir. Katılaştırma için sönmemiş kireç kullandıkları bu yöntemde elde edilen katılaştırılmış ürünün düzenli depolama sahası örtü malzemesi olarak uygun bir malzeme olacağı sonucunu elde etmişlerdir.

Tınmaz Köse ve Akyıldız (2017) çalışmalarında çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 katkılı olacak şekilde S/S prosesi ile beton harcı üretimi için atık olarak kırmızı çamur kullanmışlar, basınç ve eğilme dayanımları ile metal sızma analizlerini gerçekteştirmişlerdir. Tüm numunelerde sızma testi sonuçları, işlenmemiş kırmızı çamurun değerlerinden daha düşük elde edilmiştir. Beton özellikleri açasından en yüksek basınç ve eğilme dayanımları %5 içeren numune ile elde edilmiştir.

Hunçe ve ark. (2012) düzenli depolama sahası sızıntı suyunun ters ozmos ile arıtımından çıkan atık konsantresinin katılaştırılması için bağlayıcı olarak çimento sabit olmak üzere agrega olarak çakıl, kum ve zeolite kullanılarak farklı agrega oranları ile S/S yöntemini denemişler ve en uygun bağlayıcı olarak sızma testi sonuçlarına göre değerlendirme yapmışlardır. Sızıntı suyu içeriğindeki tüm kirleticiler, tüm bağlayıcılar ile başarıyla katılaştırılmış, dahası katılaşmış numunelerin eluat konsantrasyonları Türk ve Avrupa Toplulukları standartları ile uygunluk göstermiştir. Çalışmada katılaştırılmış malzemenin bir başka proste değerli bir girdi olabileceği değerlendirilmış, ancak bu doğrultuda bir çalışma gerçekteştirilmemiştir.

Karamalidis ve Voudrias (2004) yılında gerçekteştirdikleri çalışmalarında petrol rafinerisinden kaynaklanan ağır metallerle kirlenmiş petrollü çamurun arıtılması için normal Portland çimento ile S/S yönteminin uygulanabilirliğini araştırmışlar, sızma testleri uygulamışlardır. Çalışmada yöntemin ağır metaller için iyi bir tutulma aracı olduğu, ancak yine de düşük bir miktar da olsa metal sızması verdiği ifade edilmiştir. Karamalidis ve ark. (2007 ve 2008) daha sonra rafineri petrolü çamuru ve yakılmış petrollü çamur külü ile Portland çimentosu kullanılarak bu yöntemi denemişler, yöntemin etkinliğini ölçmek için morfolojik ve sızma değerlendirmeleri yapmışlardır. Petrollü çamur içeren S/S ürünü numunelerin XRD sonuçları portlandit, kalsit, C₃S, C₂S ve C₄AF gibi çimento kaynaklı katı fazlar ve SEM sonuçları da etrenjit oluşumu göstermiştir. SEM analizinin uygulanması, katılaşmış numunedeki XRD ile tanımlanamayan atık bileşenlerinin (ağır metaller ve toksik

anyonlar) oluşturdukları yeni çimento bazlı düşük konsantrasyonlu yapıların tanımlanmasına yardımcı olmuştur. Katılaştırılmış ürünlerde etrenjit oluşumunun sülfat, kromat ve metallerde sızma davranışını kontrol ettiği düşünülmektedir. Sızma davranışları için yaptıkları testlerde metal sızmasını belirleyen esas katı fazın demir hidroksitleri olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca Zn, Ni ve Cu sızmalarının pH'a bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Çizelge 3.1.de diğer çeşitli araştırmacıların S/S prosesi için kullandıkları atık malzemeler ve bağlayıcı malzemelerin özeti yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Çeşitli çalışmalarda S/S prosesi uygulamaları

Çalışma	Girdi Atık Malzeme	S/S için bağlayıcı malzeme	Katkı veya Karışım Oranı	Değerlendirme Yöntemleri
Tay J (1987)	Pulverize atıksu arıtma çamuru külü	Çimento	%0, 10, 20, 30 ve 40	Taze harcın işlenebilirliği ve basınç dayanımı
Galiano ve ark. (2010)	Belediye atıkları yakma fırını uçucu külü	Çeşitli jeopolimerler	0,5	Basınç dayanımı ve çeşitli sızma testleri
Jung ve Kwon (2013)	Kömür yakma fırını antrasitli veya bitümlü dip külü	Portland çimento	%0, 30 ve 60	İşlenebilirlik ve dayanım
Anastasiadou ve ark. (2012)	Tıbbi atık yakma tesisi uçucu ve dip külü	Portland çimentosu	%40, 50, 60 ve 70	Basınç dayanımı ve sızma testi
Choi ve ark. (2009)	Arsenikle kirlenmiş maden atıkları	Portland çimentosu	%5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35	Basınç dayanımı ve çeşitli sızma testleri
Shi ve Fernandez-Jimenez (2006)	Tehlikeli ve radyoaktif atıklar	Alkali aktifleştirilmiş metakaolin veya uçucu kül çimentoları	%30, 60 ve 70	Basınç dayanımı ve çeşitli sızma testleri

3.2.Hidrokarbon Sondaj Kesintisi İçin Çeşitli Bertaraf Yöntemleri

Hickenbottom ve ark. (2013) çalışmalarında sondaj kesintisinin bertarafında öncelikle susuzlaştırma için ters ozmos membran yöntemini denemişlerdir. Çalışmada öncelikle sondaj kesintisini susuzlaştırmış, akabinde ayrılan su üzerinde ters ozmos membran ile çıkış suyunun arıtımını sağlamışlardır.

Carignan ve ark. (2007) yılında yayımladıkları çalışmalarında Birleşik Krallık ve Kanada'daki sahalardan alınan iki termal işlem görmüş atık sondaj çamurunun yapısını ortaya koymak ve ardından da depolama sahalarında depolanabilme olanağını araştırmışlardır. Çalışmada numune öncelikle laboratuvar ölçekli termal desorpsiyon prosesi için çeker ocakta 100 °C'de 16 saat ısıtılarak serbest sıvısı giderilmiş, akabinde bacalı fırında 250 °C'de 1 saat bekletilmiştir. Numunelere çeşitli elementel, kimyasal ve mineralojik testler uygulanmıştır. Çalışmada termal işlemin atık içerisindeki kirliliği azalttığı ancak yine de sınır değerlerin sağlanması için ek işlemlerin uygulanmasının gerekebileceği vurgulanmıştır.

Xie ve ark. (2015), sondaj sıvısının arıtılması için çeşitli ajanları farklı dozlarda uygulayarak optimum dozaj için bir formül elde etmeye çalışmışlardır. Değerlendirme için sızma testleri uygulamışlardır. Çalışmada temel amaç depolama sahasına gönderilmeden veya örtü olarak kullanılmadan önce atık sondaj sıvısının kararlı hale getirilmesi ve sonrasında doğal yolla kurumasıdır.

Cantarel ve ark. (2015) sıvı petrol atığının bertarafı için metakaolin bazlı jeopolimer kullanılmasını araştırmışlardır. Çeşitli oranlarda jeopolimer/petrol karışımları ile dayanım ve sızma testleri gerçekleştirmişler, jeopolimerin petrol atıkları için iyi bir tutulma malzemesi olduğunu ortaya koymuşlardır. SEM görüntüleri aracılığıyla yağ taneciklerinin camsı yapı içerisinde hapsediği ve elde edilen ürünün mekanik özelliklerinin de iyi olduğu gözlenmiştir.

Rojas-Avelizapa ve ark. (2007) Meksika'nın güneyinde yer alan sondaj kesintisi ile kirlenmiş bir sahanın remediasyonu için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Biyokümlerin kompostlanmasıyla yapılan çalışmada hacim artırıcı olarak 97/3 saman kullanılmıştır. Çalışma sonunda uygun besin ilavesi, hacim artırıcı ve nem içeriği olduğunda aerobik mikrobiyal aktivitenin arttığı ve dolayısıyla hidrokarbon giderimi sağlandığını ortaya koymuşlardır.

3.3.Çeşitli Atıkların Solidifikasyon/Stabilizasyon Prosesi Çıktılarının Kullanım Alanları

Oreshkin ve ark. (2015) Rusya’da yer alan atık sondaj kesintisi çukurlarından elde edilecek malzemenin inşaat yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar atık sondaj kesinti içerisinde sondaj için kullanılan sondaj sıvısı ile çıkarma esnasında oluşan kum, kaolinit formundaki killi mineraller, jips, mika ve anhidrit gibi malzemeler bulunduğundan yola çıkarak bu atık sondaj kesintisinin inşaat yapı malzemesi olarak değerlendirilebileceği fikrinden yola çıkmışlar, elde edilen malzemenin tuğla, kil veya diğer benzer yapı malzemelerinin üretiminde kullanılabilirliğini öne sürmüşlerdir. Değerlendirme amacıyla atık sondaj kesintisi üzerinde elementel, kimyasal, mineral, mikroyapı, tane ve X-Ray bileşimini analiz etmişlerdir. Çalışmada atık sondaj kesintisinin yapı malzemesi olarak kullanımının ekolojik olarak faydalı ve uygulanabilir olabileceği ifade edilmiş, ileri çalışma ortaya konmamıştır.

Adegbotolu ve ark. (2014) çalışmalarında petrol bazlı atık sondaj kesintisinden ekstrakte edilen nanokillerin, nanokompozit malzeme üretiminde nanodolgu olarak kullanımını araştırmışlardır. Değerlendirme amacıyla taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji yayılım spektrometresi (EDS) ile morfolojik özellikler ve elementel özellikler, indüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) ile de metal konsantrasyonları belirlenmiştir. Petrol bazlı sondaj sıvısı içeriğinde yer alan Poliamit 6 için yüksek mekanik dayanımına dayanarak hali hazırda içeriğinde yer aldığı gitar ve keman gibi müzik aletleri için tel, fırça, ambalaj malzemeleri veya otomotiv yedek parçalarının üretimleri için iyi bir kaynak olabileceği değerlendirilmiştir. Bu yöntemin aynı zamanda kalan (ekstrakte edilmeyen) ağır metaller için de solidifikasyon/stabilizasyon yöntemi olarak işlev göreceği öne sürülmektedir.

Liu (2017) doktora çalışmasında sentetik bazlı atık sondaj kesintisinin jeopolimer kullanılarak kuyu inşasında kullanılabilir bir malzeme olup olmadığını araştırmıştır. Çalışmada çeşitli oranlarda jeopolimer ile katılaştırılan atık sondaj çanuru kuyu duvarlarını oluşturacak şekilde sertleştirilerek geri kazanılmak istenmektedir. Bu amaçla değerlendirmeler amacıyla basınç dayanımı ve pompalanabilirlik gibi mekanik özellikler araştırılmıştır. Daha önceki çalışmalarda jeopolimerlerin organik temelli kirleticiler için iyi bir solidifikasyon/stabilizasyon aracı olarak değerlendirilmesinden ötürü sızma testleri gerçekleştirilmemiştir. Çalışmada uygulamanın uygulanabilirlik potansiyeli olduğu ancak daha ileri çalışmalar gerektiği ifade edilmektedir.

Tınmaz Köse ve ark. (2013) çalışmalarında kömür külünü çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50 katkılı olacak şekilde beton harcı üretiminde kullanarak numunelerin beton kalitesine ait özelliklerini ve çevresel etkilerini araştırmışlardır. Kömür külü içeriği arttıkça harç numunelerinin dayanımlarının yüksek organik içeriği sebebiyle düştüğünü gözlemlemişlerdir. Dayanım kür süresiyle arttığı ifade edilmiştir. Çalışmada %20 katkılı numune 30 MPa basınç dayanımı seviyesine ulaşmıştır ve %20 katkı oranına kadar kömür külü için Portland çimento ile S/S prosesinin hem sızma hem de dayanım açısından uygulanabilir olduğu ve yapı malzemesi olarak kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Uçaroğlu ve Talınlı (2002) otomotiv sektöründen kaynaklı metal çamuru, fosfat çamuru ve endüstriyel arıtma çamuruna S/S teknolojisini uygulamışlar, proses çıktısı ürünün grobeton olarak geri kazanımını araştırmışlardır. Çalışmada karakterizasyonları yapılan atıkların katılaştırılmaları için Portland çimentosu kullanılmış, C20 beton kontrol olacak şekilde çeşitli karışım oranlarında hazırlanan briket numunelerde dayanım ve ağır metal sızma testleri uygulanmıştır. Çalışmada her üç atık için de S/S'in uygun bir arıtma yöntemi olduğu, ancak söz konusu grobeton olarak geri kazanım olduğunda metal çamuru ve fosfat çamuru uygun iken endüstriyel arıtma çamuru sadece çok düşük oranlarda kullanıldığında uygulanabileceği ortaya konmuştur. Arıtma çamurlarının uygun olmama nedeni olarak da yağlı ve boyalı atık içeriğinin olabileceği ifade edilmektedir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. Hidrokarbon Sondajı Kesintisi

Bu çalışmada Türkiye Petrolleri Lüleburgaz (Tekirdağ) sahasından alınan su bazlı sondaj sıvısının kullanıldığı sondaj sırasında üretilen kesinti kullanılmıştır. Sondajın yapıldığı saha Trakya Havzası'nda yer almaktadır ve bu havza batıda Rodop Masifi, kuzeyde Istranca Masifi ve güneyde ise Marmara Denizi ile İstanbul Paleozoyiği ile sınırlı tersiyer havzası olarak tanımlanmaktadır. Havzanın temeli yaşlı metamorfik ve magmatik kayalardan oluşmaktadır (Güler 2005).

4.1.2. Çimento

Bu tez çalışması kapsamında bağlayıcı olarak Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.den elde edilen, TS EN 197-1 (2012) kapsamında CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya dair analiz sonuçları Çizelge 4.1.de yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan CEM I 42,5 R çimento özellikleri

Analizin Türü	Parametre	Birim	Değer	
Kimyasal Analiz	Çözünmeyen Kalıntı	%	0,29	
	SO ₃	%	3,25	
	Kızdırma Kaybı	%	1,85	
	Cl ⁻	%	0,0421	
	Özgül Ağırlık	g/cm ³	3,14	
Fiziksel Analiz	Priz süresi	Başlama	dk	126
		Bitiş	dk	199
	Hacim Genleşmesi	mm	1	
	Özgül Yüzey- Blaine	cm ² /g	3530	
	İncelik	45µm elek kalıntısı	%	3,7
90µm elek kalıntısı		%	0,3	

Analizin Türü	Parametre	Birim	Değer
Dayanım Deneyleri	Mekanik Özellik		
	Erken Dayanım	MPa	30,4
	Erken Dayanım	MPa	43,5
	Standard Dayanım	MPa	55,7

4.1.3. Kum

Bu çalışmada çimento ve harç deneyleri için Limak Çimento San. ve Tic. A.Ş. Trakya Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEN standardında TS EN 196-1 rilem kumu kullanılmıştır. Çizelge 4.2.de bu çalışmada da kullanılan CEN standart kumuna ait fiziksel özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 4.2. CEN standart kumu özellikleri (TS EN 196-1)

Kare göz açıklığı, mm	Elekte kalan yığılımlı, %
2,00	0
1,60	7±5
1,00	33±5
0,50	67±5
0,16	87±5
0,08	99±1

4.1.4. Karma Suyu

Çimento ile birleşerek hidratasyonu başlatma ve taze beton harcı karışımında işlenebilirliği sağlama işlevi gören karma suyunun seçimi kaynağına göre yapılır. Kullanılabilecek karma suyunun özellikleri TS EN 1008: 2003 standardında nitelenmiştir.

Çalışmada karma suyu olarak Çorlu şehir isale hattından gelen içme suyu kullanıldığı için ilgili standart gereği analiz yapılmasına gerek duyulmamıştır. Su çimento oranı olarak da TS EN 196-1'de belirtilen 0,5 kullanılmıştır.

4.1.5. Kür Suyu

Harcın üretiminden sertleşmesi ve kullanım amacına uygun özellikleri kazanmasına kadar geçen zaman boyunca yapılan koruma işlemi olarak tanımlanan kür işleminde kullanılan su için genellikle çeşme suyu kullanılır. Karma suyu için geçerli özellikler kür suyu için de geçerlidir.

Bu çalışmada kür suyu olarak Çorlu şehir isale hattından gelen içme suyu kullanılmıştır.

4.2. Yöntem

4.2.1. Harç Numunelerinin Üretimi

Özellikleri belirlenecek harç numuneleri, TS EN 196-1'e uygun şekilde hazırlanmalıdır. 0,5 su/çimento oranı ile standart kum kullanılır. Oda sıcaklığında çalışılır. Harç mekanik karıştırma ile hazırlanır, bir kalıba dökülür ve kalıplar nemli bir atmosferin hakim olduğu oda koşullarında 24 saat bekletilir. Akabinde kürde bekletme olarak da adlandırılan işlem ile analiz edilecekleri ana kadar (7, 14, 28 veya 90 gün) oda koşullarında standartlar açısından uygun suda bekletilir.

Bu çalışma kapsamında harç numuneleri şahit (hidrokarbon sondaj kesintisi kullanılmadan) ve çimento ile katkı edilen kurutulmuş ve kurutulmamış sondaj kesintisi içerecek şekilde hazırlanmıştır. Harç numunelerinin hazırlanması için öncelikle kurutularak kullanılacak kesinti numuneleri kurutulmuş, ardından eklenecek kesinti ve su miktarları belirlenerek belirlenen oranlarda karışımlar hazırlanmıştır.

4.2.1.1. Hidrokarbon Sondaj Kesintisinin Kurutulması

Çalışmada kapsamında kurutma işlemi su bazlı hidrokarbon sondaj kesintisi 25 °C oda sıcaklığının canlandırıldığı etüvde sabit tartıma gelene kadar bekletilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sabit tartıma gelen kuru hidrokarbon sondaj kesinti numuneleri desikatörde bekletilerek korunmuştur.

4.2.1.2. Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada 0,5 su çimento oranına sahip harç numuneleri üretilerek analizler gerçekleştirilmiştir. 450 g çimento, 1350 g rilem kumu ve 225 g su üzerinden, yaş ve kuru sondaj kesintisi ilaveleri ile üretim yapılmıştır.

Katkı miktarları kuru kesinti için literatürde benzer çalışmalarda olduğu gibi ağırlıkça %4, %8, %12, %16 ve %20 olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.3.te HKK için çimento katkı oranları ve harca konulan malzemelerin miktarları verilmiştir. Kurutulmuş kesintiyle hazırlanacak numuneler için eklenecek su miktarı 225 g olarak sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.3. HKK için çimento katkı oranları ve harca konulan malzemelerin miktarları (g)

Numune Kodu	Katkı oranı (% ağırlık)	HKK, g	Çim, g	Kum, g	Su, g
KK0	0	0	450	1350	225
KK4	4	18	432	1350	225
KK8	8	36	414	1350	225
KK12	12	54	396	1350	225
KK16	16	72	378	1350	225
KK20	20	90	360	1350	225

Eklenecek yaş kesinti miktarının belirlenebilmesi için çimento ile katkı edilecek kuru madde içeriğinden yola çıkılması gerekir. Yaş kesintideki su oranı nem tayini ile %63,39 olarak bulunmuştur. 100 g HYK'de 36,61 g kuru madde (kesinti) vardır. HYK'nin içeriğindeki nem içeriği de düşünüldüğünde kuru kesinti için uygulanan katkı oranları ile %10'un üzerinde katkı oranları ile sağlıklı veriler elde edilemeyeceği göz önünde bulundurularak katkı oranları %2, %4, %6, %8 ve %10 olarak belirlenmiştir. Bu oranlar için (4.1)deki bağıntı kullanılmıştır.

$$\frac{A \times n}{KM} = B \quad (4.1)$$

A: 0,5 Su/çimento oranlı standart harç çimento miktarı, g (450; sabit)

n: Katkı oranı, %

KM: HYK kuru madde içeriği, % (36,61; sabit)

B: Eklenecek HYK miktarı, g

Katkı oranlarının belirlenmesi için yapılan hesaplamalara örnek olarak %2'lik katkı oranı için eklenecek kesinti miktarı aşağıda hesaplanmıştır.

$$\frac{450 \times 2}{36,61} = 24,6 \text{ g}$$

Kurutulmayan HSK numuneleri için eklenecek su miktarı belirlenirken nem içeriğinden gelecek su miktarı göz önünde bulundurulmuştur. Bu durumda 0,5 su/çimento oranına sahip beton deney numuneleri için sabit 225 g'dan HYK içeriğindeki nem miktarı çıkarılarak eklenecek su miktarı bulunmuştur. Bunun için öncelikle her katkı oranındaki kesintiden gelen su miktarı belirlenmiştir. Aşağıda 24,6 g kesintinin (%2 katkı oranlı numune için eklenecek miktar) su içeriğini bulmak için örnek hesaplama verilmiştir.

$$\text{Kesintiden gelen su miktarı} = 24,6 * \%63,69$$

Kesintiden gelen su miktarı = 15,6 g

Bu doğrultuda yine %2 katkı oranlı beton harcı hazırlanırken kesintiden gelen (15,6 g) hariç eklenecek su miktarını bulmak için örnek hesaplama aşağıdaki gibi olur.

$$\text{Eklenecek su miktarı} = 225 - 15,6$$

Eklenecek su miktarı = 209,4 g

Bu doğrultuda Çizelge 4.4.te HYK için çimento katkı oranları ve harca konulan malzemelerin miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.4. HYK için çimento katkı oranları ve harca konulan malzemelerin miktarları (g)

Numune Kodu	Katkı oranı (% ağırlık)	HYK, g		Çim, g	Kum, g	Su, g		
		Yaş Kesinti	Kuru Madde			HYK'den gelen	Eklenen	Toplam
YK0	0	0,0	0,0	450,0	1350,0	0,0	225,0	225,0
YK2	2	24,6	9,0	450,0	1350,0	15,6	209,4	225,0
YK4	4	49,2	18,0	450,0	1350,0	31,2	193,8	225,0
YK6	6	73,8	27,0	450,0	1350,0	46,8	178,2	225,0
YK8	8	98,4	36,0	450,0	1350,0	62,4	162,6	225,0
YK10	10	123,0	45,0	450,0	1350,0	78,0	147,0	225,0

4.2.1.3. Harcın Hazırlanması

Harç numunelerinin TS EN 196-1 standardına uygun bir şekilde karıştırılması gerekir. Harca eklenecek malzemeler ve deney ekipmanının oda sıcaklığında olması gerekir. Bunun için öncelikle karıştırmanın yapılacağı standart özelliklerde bir karıştırıcının kabına bir miktar su dökülür, ardından çimento ilave edilir. Daha sonra 30 s boyunca düşük hızda karıştırma uygulanır. Sonraki 30 s boyunca sürekli ve tutarlı bir şekilde kum ilave edilir. Karıştırma işlemine 30 s hızlı karıştırma ile devam edilir. Karıştırıcı durdurulur, kenarlara yapışan harç temizlenir ve 60 s daha yüksek hızda karıştırmaya devam edilir. Çizelge 4.5.te standart karıştırma hızları verilmiştir.

Çizelge 4.5. Karıştırıcı palet hızı (TS EN 196-1)

Hız	Kendi ekseninde dönme hızı, dk ⁻¹	Yörüngesel dönme hızı, dk ⁻¹
Düşük	140±5	62±5
Yüksek	285±10	125±10

Bu çalışma kapsamında şahit ve katkılı harç numuneleri TS EN 196-1’de belirtildiği usulde hazırlanmıştır. Şekil 4.1.de çalışmada kullanılan karıştırıcı gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan karıştırıcı

4.2.1.4. Harçlarının Kalıplara Dökülmesi

Hazırlanan beton harcı numuneleri, TS EN 196-1 gereği 40 mm x 40 mm x 160 mm kesitlerine sahip üç adet yatay bölmeden oluşan kalıplara dökülürler. Bu sayede aynı harç için üç adet prizma elde edilir. Kalıplar en az 10 mm et kalınlığına sahip çelik levhalardan ve numunelerin kalıptan çıkarma sırasında hasar görmesini engelleyecek şekilde üretilmiş olmalıdır. Her bir bölmede yer alan numunenin üzerine bir belirtici konularak karışmaları engellenir. Temiz bir kalıp kullanılmadan önce kalıbın iç yüzeylerine ince bir tabaka halinde kalıp yağı sürülmelidir.

Hazırlanan harç numunelerini içeren kalıplar 15 kez sert bir şekilde sarsılarak oturuşması ve boşlukların giderilmesi sağlanmıştır. Ardından numuneler numaralandırılarak oda sıcaklığında 24 saat beklemeye alınmıştır. Şekil 4.2a.da kalıplara dökülen taze beton harcı numuneleri, Şekil 4.2b.de 24 saat bekletme sonunda kalıpta sertleşmiş harç numuneleri ve Şekil 4.2c.de kalıptan çıkarılmış sertleşmiş harç numuneleri yer almaktadır.



a. Kalıplara dökülen taze beton harcı numuneleri

b. Kalıpta sertleşmiş harç numuneleri

c. Kalıptan çıkarılıp numaralandırılan sertleşmiş harç numuneleri

Şekil 4.2. Üretilen harç numuneleri

4.2.1.5. Sertleşmiş Harç Numunelerinin Kürde Bekletilmesi

Kürde bekletme, çimentonun hidratasyonuna katkı yapan ve sıcaklık ile beton içine ve dışına nemin hareketini kontrol eden işleme standart prosedürlerce verilen addır. İyi bir beton elde etmek için sertleşmenin başlarında uygun bir ortamda bekletilmesi, yani kürde bekletilmesi gerekir. Kürde bekletme ile beton doygun veya doyguna en yakın halde tutulmuş olur. Bu işlem sayesinde başlangıçta su ile dolu boşluklar çimentonun hidratasyonu ile oluşan ürünlerle dolmuş olur. Hidratasyon ancak doygun koşullarda maksimum hıza ulaşır. Bunun için harç numunesi uygun süre boyunca su ile doyurulur, bu esnada harç numuneleri uygun sıcaklıkta da tutulmuş olacaktır (Neville 2011).

Sertleşmeye bırakılan harç numuneleri 24 saatlik bekleme süresinin ardından deneyler için numaralandırılarak bekletilmeden kür edilmelidir. Çimentoların dayanımları zamana bağlı olarak değişir. Standart uygulamada 28 günlük dayanım kullanılır, ancak yol gösterici olarak 2, 7 veya 90 günlük dayanımlar da gösterge olarak kullanılabilir.

Bu çalışma kapsamında 28 günlük beton dayanımı kullanılmıştır. Bu doğrultuda numaralandırılmış numuneler oda sıcaklığındaki şebeke suyunda (içme suyu) 28 gün boyunca bekletilmişlerdir. Şekil 4.3.te kürde bekletilen harç numuneleri gösterilmektedir.

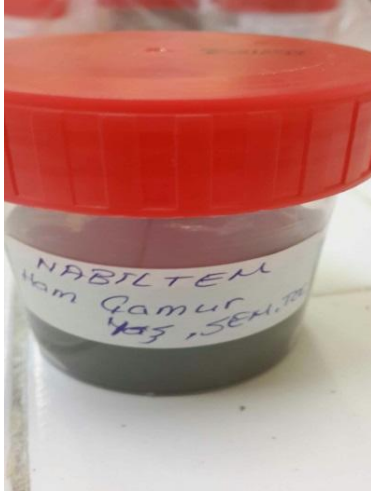


Şekil 4.3. Kürde bekletilen harç numuneleri

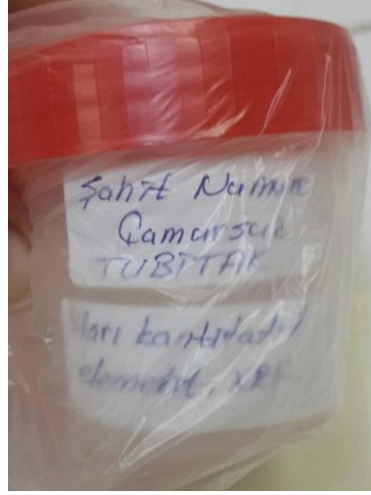
4.2.2. Karakterizasyon Analizleri

Bu çalışma kapsamında kullanılan materyallerin karakterizasyonu için literatürde ve mevzuatta belirtilen yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler pH, elektrik iletkenliği, nem içeriği, toplam organik karbon (TOK), çözünen organik karbon (ÇOK), toplam çözünen katı (TÇK), ağır metal analizi (As, Ba, Cd, Cr toplam, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se ve Zn için), X Işını Floresans (XRF) ile yarı kantitatif element analizi ve Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) analizidir. Nem ve uçucu madde tayini ham yaş ve kuru kesinti numuneleri için uygulanmıştır. Nem ve uçucu madde tayini hariç tüm analizler TS EN 12457/1-4 Granüllü Atıklar ve Atık Çamurlar için Uygunluk Testi'ne göre hazırlanan eluatlar ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında yaş ve kurutulmuş ham kesinti numuneleri ile optimum değerlerin elde edildiği %8 katkı ürünler SEM, TOK ve ÇOK analizleri için eluatları hazırlanmadan; çimento, kum, şahit harç, YK ve KK katkı ürünler ise eluatları hazırlanarak ağır metal analizi için Namık Kemal Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (NABİLTEM) gönderilmiştir. HYK ve HKK ile bu girdilerin optimum katkı ürünleri de yine eluatları hazırlanmadan Yarı Kantitatif XRF, BTEX, poliklorobifeniller (PCB) ve mineral yağ analizleri için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi'ne (TUBİTAK MAM) gönderilmiştir. Şekil 4.4a.da NABİLTEM'e gönderilen ham numuneler, Şekil 4.4b.de NABİLTEM'e gönderilen eluat sızıntılar ve Şekil 4.4c.de TUBİTAK MAM'a gönderilen ham numunelere örnekler görülmektedir.



a. NABİLTEM'e gönderilen ham numuneler



b. TUBİTAK'a gönderilen ham numuneler



c. NABİLTEM'e gönderilen eluat sızıntıları

Şekil 4.4. Analize gönderilen numuneler

Çizelge 4.6.da materyal karakterizasyonu için gerçekleştirilen analizlerin standartları ve hangi numuneler için gerçekleştirildikleri verilmiştir.

Çizelge 4.6. Analiz parametreleri ve standartları

Parametre	Standart
Eluat Hazırlama	TS EN 12457-4
İletkenlik	ASTM D1125-14
Nem miktarı	TS EN 14346
TÇK, AKM ve UAKM	SM-2540 C Gravimetrik Yöntem
Ağır Metal Analizi	TL-ICP-001 Prosedürü
SEM	TL-SEM-001 Prosedürü
TOK, İK, TK ve ÇOK	SM-5310 B Yüksek Sıcaklıkta Yakma
BTEX	EPA 8015C
PCB	ISO 10382
Mineral Yağ (C ₁₀ -C ₄₀)	TS EN 14039
XRF	ASTM S1621

Elektrik iletkenliği bir malzemenin içerisinde bulunan çözünmüş bileşenlerin elektrik iletebilme kapasitesini gösterir. Bir numunede çözünmüş bileşen miktarı, yani kirlilik arttıkça elektrik iletkenliğinin de artması beklenir. Elektrik iletkenliği ölçümü için çeşitli yöntemler olsa da en yaygın kullanılanı kalibre edilmiş bir prob aracılığıyla pH ve elektrik iletkenliğini aynı anda ölçebilen pH ve iletkenlik ölçerlerdir. Bu çalışmada bu yöntem uygulanmıştır.

Bir numunenin birim kuru ağırlığı başına birim nem ağırlık nem miktarı veya birim kuru hacim başına birim nem hacim miktarı olarak tanımlanan nem içeriği bir atığın fiziksel karakterizasyonu için gerekli parametrelerden biridir. Özellikle düzenli depolama sahalarında ve kompost tesislerinde uygun mikrobiyal aktivite için önem kazanır. Ayrıca nem içeriği havanın nemliliği veya sıcaklık gibi etkenlerden etkilenebileceği için nem içeriğini belirlemek bir malzeme ile ilgili çalışılırken daha net sonuçlar elde edilmesine olanak verir. Bu çalışmada nem içeriği harç numuneleri hazırlanırken eklenecek su miktarının belirlenmesinde yol gösterici olarak hesaplanmıştır.

XRF (X Işını Floresan Spektrometresi) sıvı, katı ve toz dahil her tür malzemenin elementel bileşimini belirlemek için en yaygın kullanılan tekniklerden birisidir. Kalibrasyonu mümkün olmayan ve/veya bilinen içerik konsantrasyonları olmayan numunelerde element konsantrasyonu açısından değerlendirmenin mühim olduğu durumlarda yarı kantitatif XRF analizi uygundur. Bu çalışmada ham sondaj kesintisi ve şahit harcın (kesinti içermeyen) karakterizasyonu yarı kantitatif olarak Philips PW-2404 model dalga boyu dağılımlı X-ışını floresan spektrometre cihazı ile analiz edilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) tıpkı diğer mikroskoplar gibi numunenin yüksek çözünürlüklü görüntüsünün alınabilmesi için kullanılır. Görüntüler doğrultusunda numunenin özellikleri hakkında değerlendirme yapılmasını sağlar. Bu çalışma kapsamında SEM görüntülerinin alınması NABİLTEM tarafından FEI QUANTA FEG 250 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

BTEX (Benzen, tolüen, etilbenzen ve o,m,p-ksilen), hava ve su kalitesini belirleyen ve bir arada bulunan bir grup uçucu organik bileşiğin genel adıdır. (ATSDR 1999). BTEX, hidrolik kırmada kullanılan sondaj sıvılarının içerisinde katkı olarak da kullanılan bir maddedir. BTEX, ülkemizde ADDDY’de yer alan takip edilmesi zorunlu parametrelerden biridir. Bu çalışma kapsamında ham kuru kesinti, ham yaş kesinti ve en iyi dayanımı veren harç numunelerinden %8 yaş kesinti katkılı ve %8 kuru kesinti katkılı olanlar için BTEX analizi gerçekleştirilmiştir.

PCB’ler (Poliklorlu bifeniller) karbon, hidrojen ve klorür atomları içeren insan yapımı bir grup organik kimyasaldır. PCB’ler Poliklorlu Bifenil ve Poliklorlu Terfenillerin Kontrolü Hakkında Yönetmelik ve ADDDY’de yer alan parametrelerden biridir. Bu çalışma

kapsamında ham kuru kesinti, ham yağ kesinti ve en iyi dayanımı veren harç numunelerinden %8 yağ kesinti katkılı ve %8 kuru kesinti katkılı olanlar için PCB analizi gerçekleştirilmiştir.

Mineral yağlar 10-50 arasında karbon atomu içeren hidrokarbonlardır. Çeşitli kullanım alanları olmakla birlikte bu çalışmaya konu atıkların kaynağı sondaj çamurlarında da hidrolik kırma yardımcı olarak kullanılırlar. ADDDY kapsamında mineral yağlar (C₁₀-C₄₀) değerlendirilecek öncelikli parametrelerdendir. Bu çalışma kapsamında ham yağ kesinti, ham kuru kesinti, %8 ham yağ kesinti ilaveli harç numunesi ve %8 ham kuru kesinti ilaveli harç numunesi için mineral yağ analizi gerçekleştirilmiştir.

Organik maddelere bağlı karbon atomlarının tamamını tanımlamak için kullanılan Toplam Organik Karbon (TOK), atıklarda bulunan organik kirleticileri belirlemenin öncelikli parametrelerinden biridir. ADDDY’de temel parametrelerden biri olarak öne çıkar. Bu çalışma kapsamında TK, IK ve TOK ölçülen parametrelerdendir. Yönetmelikte kızdırma kaybı (LOI) veya TOK analizinden birinin yapılması gerektiği tanımlanmıştır. Bu nedenle çalışma kapsamında LOI analizi yapılmamıştır.

Çözünmüş organik karbon (ÇOK), eluatta çözünebilir halde bulunan çözünmüş organik karbonu ifade eder. ÇOK da TOK ve TÇK gibi ADDDY’de tanımlanan ve çalışma kapsamında ölçümü yapılan parametrelerdendir.

Askıda katı maddeler (AKM) suda çözünmeyip süspansiyon halde kalan katı maddeleri tanımlamak için kullanılan bir parametredir. Uçucu askıda katı maddeler (UAKM) askıda katı maddelerin organik bileşiklerden oluşan kısmını gösterir. Toplam çözünmüş katı (TÇK) ise numunenin su içerisinde çözünebilir kısmını ifade eder. TÇK kirliliğin niteliğini belirlemek için yeterli olmasa da nicelik açısından değerlendirilmesini sağlar. Yüksek değerler safsızlığın yani kirliliğin yüksek olduğunu gösterir.

Sızma testlerinin amacı, depolama sahalarında yer alan atıkların yağışlar veya içeriklerindeki çözünebilir malzemelerin suyun toprağa, oradan da yer altı sularına taşındığı koşulları laboratuvar koşullarında canlandırmaktır. Sızma testleri genel olarak filtrasyon sıvısı ile belirli sıvı katı (L/S) oranını sağlayacak şekilde hazırlanan atıkların, belirli bir süre ve hızda çalkalanması sonrası içerdikleri kirleticilerin atıktan ne kadar salındığını gösterir. Toksikite Karakteristiği Sızma Prosedürü (TCLP), Sentetik Yağış Sızma Prosedürü (SPLP), Granüllü Atıklar ve Atık Çamurlar için Uygunluk Testi veya NEN 7341 Yararlanabilirlik Testi gibi yöntemler mevcuttur. Dünya genelinde tüm ülkeler için kabul edilmiş bir sızma

testi bulunmamakla birlikte Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA, 1996) genellikle TCLP yöntemini, Avrupa Birliği ve ona paralel olarak ülkemiz TS EN 12457/1-4 Granüllü Atıklar ve Atık Çamurlar için Uygunluk Testi'ni önermektedir. Atıkların değerlendirilmesinde uygun mevzuat limitleri ile bu testlerin sonuçları kıyaslanır. Bu çalışma kapsamında sertleştirilmiş numunelerin ağır metallerin sızma davranışlarının araştırılması için TS EN 12457/1-4 Granüllü Atıklar ve Atık Çamurlar için Uygunluk Testi uygulanmıştır.

Arsenik (As), baryum (Ba), krom (Cr), kadmiyum (Cd), bakır (Cu), cıva (Hg), nikel (Ni), molibden (Mo), kurşun (Pb), antimon (Sb), çinko (Zn) ve selenyum (Se) ADDDY'de yer alan ve her biri ayrı ayrı limit değerleri olan parametrelerdir. Birleşik Devletler Kaynak İyileştirme ve Koruma Yasası (RCRA) da sekiz metali (As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se ve Ag) takip edilmesi gereken metaller olarak sınıflandırmaktadır. Bu metaller için de ayrıca yasal mevzuatlar Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında atık ve atık ile üretilen malzeme için ağır metal analizi hazırlanan eluatlarda NABİLTEM tarafından ICP/OES cihazı ile yapılmıştır.

4.2.3. Dayanım ve Dayanıklılık Testleri

Harcın (harcın) ve dolayısıyla onu oluşturan yapı taşları çimento, kum ve suyun yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi için bazı kalite standartlarını sağlaması gerekmektedir. Harcın, kullanım amacı, hedeflenen kullanım ömrü ve kullanılacağı yerin çevresel koşulları gibi nedenlere bağlı olarak taşınması gereken özellikler ve sağlaması gereken kriterler değişiklik gösterebilir. Bu kalite değerlerinin belirlenebilmesi için çeşitli standartlar kapsamında analizlerin gerçekleştirilmesi gerekir. Bu deneyler taze ve sertleşmiş beton (harç) deneylerini kapsar.

Bu çalışmada beton kalitesini belirlemek için yol gösterici olarak basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve su emme deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 4.7.de bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen dayanım ve dayanıklılık testleri özetlenmiştir.

Çizelge 4.7. Yapılan dayanım ve dayanıklılık testleri ve standartları

Analiz	Standart
Ultrases Geçiş Hızı	TS EN 12504-4
Eğilme Dayanımı	TS EN 191-1

Basınç Dayanımı	TS EN 191-1
Atmosferik Su Emme	ASTM C642

4.2.3.1. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyi, uzun süredir kullanılan bir tahribatsız test yöntemidir. Bu yöntemle ultrases dalgaların betononun içinden geçerken yayılma hızı ölçülür. Yöntem, ultrases dalganın, alıcı ve verici arasındaki belirli bir mesafeyi geçiş hızının bir cihaz yardımıyla ölçülmesi prensibine dayanır. Bu yöntem ile beton içerisinde yer alabilecek boşluk, homojenite, çatlak ve benzer diğer kusurların belirlenmesinde ve dayanım belirlenebilir, ancak tek başına dayanım için kullanılmamalıdır (Neville 2011). Ultrases dalga geçiş hızı deneyi sonuçlarının dayanım için net sonuçlar elde etmek için kullanmak yerine en yüksek ve en düşük dayanım kıyaslaması yapmak için kullanmak daha doğrudur (IAEA 2002). Çizelge 4.8.de dalga geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki bağlantı gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki bağlantı (IAEA 2002)

Boylamsal dalga geçiş hızı, km/s	Beton Kalite Sınıflandırması
>4,5	Mükemmel
3,5-4,5	İyi
3,0-3,5	Orta
2,0-3,0	Zayıf
<2,0	Çok Kötü

Bir harcın geçiş hızından bahsedildiğinde çimento türünün hız üzerinde çok belirgin bir etkisi olmasa da farklı çimentoların hidrasyon oranları da farklı olacaktır. Dolayısıyla dalga hızı da farklı olacaktır. Hidrasyon derecesi arttıkça elastisite modülü de dolayısıyla geçiş hızı da artacaktır. Ultrases geçiş hızını etkileyen faktörler ayrıca su/çimento oranı, katkı maddeleri, beton yaşı, transdüser teması, beton sıcaklığı ve kür koşulları gibi özelliklerdir (Naik ve ark. 2004).

Bu çalışma kapsamında ultrases geçiş hızı deneyi çimento ile katkı edilen malzeme ile elde edilen harcın kalite değerlendirmesi amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla kürden çıkarılan her bir numune için ASTM C 597-02 (2002) ve BS 1881 Part 203 (1986) standartlarına uygun Matest Ultrasonic Tester cihazı ile direkt transmisyon yöntemi ile ultrases geçiş hızı ölçümü yapılmıştır. Bu amaçla numunelerin iki yanına tam karşılıklı olacakları şekilde alıcı ve

vericiler yerleştirilmeden önce yüzeydeki pürüzleri doldurmak amacıyla gliserin sürülmüş, ardından ses geçiş süresi ($t, \mu S$) ölçümü yapılmıştır. Aynı işlem problemlerin yer değiştirilmesi sureti ile tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Ölçüm ile elde edilen veriler (4.2)'de yer alan bağıntıda kullanılarak ultrases geçiş hızı hesaplanmıştır.

$$V = l/t \quad (4.2)$$

Burada;

V=Ultrases geçiş hızı, km/s

l=Sinyalin gidiş ve dönüş mesafesi, km

t=Sinyalin geçiş süresi, s

Ultrases geçiş hızı deneyi ile toplamda 33 numune için ölçüm alınmıştır. Şekil 4.5.de ultrases geçiş hızı ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Ultrases geçiş hızı ölçümü

4.2.3.2.Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı güçlendirilmemiş bir beton kirişinin eğilmeye karşı dayanımını ifade eder. Eğilme dayanımı genellikle kaldırımların tasarımında önem kazanan bir parametredir; ancak genellikle minimum eğilme dayanımının gerekli olduğu başka beton tasarımlarında da basınç dayanımıyla birlikte ölçülebilir (NRMCA 2000). TS EN 196-1 kapsamında çimento uygunluk testlerinden biridir.

Çimento uygunluğu için eğilme dayanımı deneyi basınç dayanımından önce kürden çıkarılan numuneler için yapılır. Numuneler TS EN 196-1’de belirtilen şartları taşıyan üç noktadan yüklemeli cihazda mesnet silindirlerinin eksenine dik olacak şekilde yerleştirilir. Mesnetleri oturan yüzünün karşıt yüzüne düşey olarak 50 ± 10 N/s sabit hızlı yük uygulanır ve bu yük numune kırılıncaya kadar artırılır. Elde edilen veriler (4.3)te gösterilen bağıntıya göre kullanılır.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times I}{b^3} \quad (4.3)$$

Bu denklemde;

R_f :Eğilme dayanımını, MPa

b :Numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm

F_f :Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yükü, N

I :Mesnet silindirleri arasındaki mesafeyi, mm gösterir.

Deney her bir harç numunesi ile hazırlanan üç numune için tekrar edilir ve (4.2)’deki denklem ile elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınır. Sonuç en yakın değere 0,1 MPa yuvarlanarak ifade edilir.

Bu çalışmada eğilme dayanımı deneyi prosedürde belirtildiği şekilde yapılmıştır. Her bir beton karışımı için hazırlana 3 prizmatik numune için gerçekleştirilen deney ile 33 adet ölçüm alınmıştır. Şekil 4.6.da çalışma için gerçekleştirilen eğilme dayanımı ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Eğilme dayanımı ölçümü

4.2.3.3.Basınç Dayanımı

Çimento ile katkı olarak kullanılacak malzemenin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla TS EN 196-1 standardı uygulanır. Standartta da belirtildiği gibi 1 kısım çimento, 3 kısım CEN standart kumu ve 0,50 su çimento oranının sağlandığı harcın karıştırılıp ardından 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarındaki kalıplara dökülür. Kalıptaki numuneler yerleşmesi için sarsmaya tabi tutulur ve kalıp içinde sıkıştırılarak 24 saat nemli bir ortamda korunur. Daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler, istenilen yaştaki dayanımları ölçülecek şekilde kür suyunda bekletilir. İstenilen yaş süresince bekletilen numuneler, deneyden en fazla 15 dakika önce kür suyundan çıkarılır ve nemli bir beze sarılarak bekletilir. Bu numuneler öncelikle eğilme deneyine tabi tutulur. Bu esnada ikiye ayrılan numunelerin her bir parçasına basınç dayanım deneyi uygulanır.

Basınç dayanımı ölçümü TS EN 196-1'de özellikleri belirtilen basınç dayanım cihazında yapılır. Bu parçaların her biri yan yüzlerine yük uygulanacak şekilde deneye tabi tutulur. Deney boyunca, yani prizma kırılıncaya kadar yükleme plakaları arasına yatay konumda yerleştirilen numuneler üzerine 2400±200 N/s sabit hızla kuvvet uygulanır. Bu işlem her bir numune (her bir beton karışımı için 3 adet) için tekrarlanır. Basınç dayanımı (4.4)te belirtilen bağıntıya göre hesaplanır.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4.4)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı, MPa

F_c : Kırılmadaki en yüksek yük, N

1600 : Yükleme plakaları veya uzatma plakalarının alanı (40 mm x 40 mm), mm²

Bu denklem doğrultusunda her bir numune için elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak tüm harç numunesini temsil eden değere ulaşılır. Gerekli ise bu değer en yakın 0,1 MPa'a yuvarlanır.

Bu çalışmada basınç dayanımı deneyi standartta belirtildiği gibi yapılmıştır. Her bir karışım için hazırlana 3 adet prizmatik numune için yapılan eğilme deneyini takiben oluşan 2 parçadan biri basınç dayanımı deneyi için kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyi için toplamda 33 ölçüm alınmıştır. Şekil 4.7.de basınç dayanımı ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Basınç dayanımı ölçümü

4.2.3.4. Atmosferik Su Emme Deneyi

Gözeneklilik ve muhtemel bozunma ile ilişkili olan su emme, beton sağlamlığını etkileyen özelliklerden biridir. Bu amaçla harcın atmosferik su emmesi ölçülerek harcın dayanıklılığı hakkında görüş elde edilir. Beton içerisindeki boşluklar azaldıkça suyun beton içine alınması da azalır, dolayısıyla su emmesi daha düşük olan betonda dayanıklılık da daha yüksek olacaktır.

Atmosferik su emme deneyi ASTM C642 yöntemi doğrultusunda yapılır. Bu doğrultuda numuneler en az 24 saat 100~110 °C'ye ayarlanmış etüvde kurutulur. Daha sonra tartılır. Ardından yaklaşık 21 °C suya tamamen batırılarak en az 48 saat bekletilir. Bu 48 saatlik sürede ilk 24 saatte çıkartılarak yüzeylerindeki fazla su alınarak tartılır, ardından sonraki 24 saatte bu işlem tekrarlanır. İki tartım arasında %0,5'ten fazla fark kalmayınca kadar 24 saatlik periyotlarda bu işleme devam edilir. Su emme (4.5)te verilen formül yardımıyla hesaplanır.

$$S_a = [(B - A)/A] \times 100 \quad (4.5)$$

Burada;

S_a :Su emme, % w/w

A :Etüvde kurutulanan numunenin ağırlığı, g

B :Suya daldırmadan sonra yüzeyi kurulananan numunenin ağırlığı, g

Bu çalışmada her bir beton karışımı için elde edilen 3 adet prizmatik numunenin eğilme dayanımı deneyi sonucu ikiye ayrılan parçalarından biri basınç dayanımı deneyi için, diğeri de su emme deneyi için kullanılmıştır. Su emme deneyi toplamda 33 numune için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8.de etüvde kurutulanan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Su emme deneyi için etüvde numunelerin kurutulması

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Ham Materyal Karakterizasyonu

5.1.1. pH ve İletkenlik Analizi Sonuçları

Materyal karakterizasyonu ve gerekli ön değerlendirmeler için öncelikle pH ve iletkenlik analizi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.1.de elde edilen sonuçlar verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi ham yaş kesintinin pH değeri ham kuru kesintiye göre daha yüksektir, ancak şahit harcın pH'ı her iki numuneden de daha yüksek bazik özellik göstermektedir. İletkenlik olarak ise kuru kesinti en yüksek değere, yaş kesinti ise en düşük değere sahiptir.

Çizelge 5.1. Şahit harç ile HYK ve HKK'ın pH ve iletkenlikleri

Numune	pH	İletkenlik, $\mu\text{S/cm}$
Şahit harç	12,800	8500

HYK	10,380	4380
HKK	8,920	15260

5.1.2. Yarı Kantitatif Element Analizi (XRF) Sonuçları

Bu bölümde yapılan çalışmanın değerlendirilmesine referans sağlamak amacıyla yağ hidrokarbon sondaj kesintisi (HYK), kuru hidrokarbon sondaj kesintisi (HKK) ve şahit harca ait yarı kantitatif element analizi (XRF) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.2.de HYK'ye ait yarı kantitatif XRF analizi sonuçları gösterilmektedir. Analiz doğrultusunda HYK'nin yapısını büyük oranda O'nun (%41,590) oluşturduğu görülmektedir. Metal olarak en büyük içerik sırasıyla Si (%21,482), Ca (%11,080) ve Al (%7,150) olarak görülmektedir. Oksit olarak ise yine metal içeriğine paralel şekilde en fazla bulunanlar sırasıyla SiO₂ (%45,958), CaO(%15,503) ve Al₂O₃'tür (%13,509). HYK içerisinde ağır metal olarak bulunan elementler sırasıyla Ba (%1,394), Mn (%0,084), Cu (%0,042), Cr (0,041), Ni (%0,017) ve Zn (%0,011)'dir. Çimento özelliklerini belirleyen parametreler SO₃ ve Cl açısından Çizelge 4.1.de yer alan değerler ile kıyaslandığında ise SO₃ değerlerinin HYK'nin girdi olarak kullanılan çimentodan (Çizelge 4.1) daha düşük değere sahip olduğu görülmektedir (%1,263 ve %3,25); ancak Cl değerleri daha yüksektir (%3,009 ve %0,0421).

Çizelge 5.2. HYK'ye ait yarı kantitatif element analizi sonuçları

Element	%	Oksit	%	Element	%	Oksit	%
O	41,590	—	—	Ti	0,362	TiO ₂	0,605
Na	2,150	Na ₂ O ₃	2,898	Cr	0,041	Cr ₂ O ₃	0,060
Mg	2,482	MgO	4,115	Mn	0,084	MnO	0,108
Al	7,150	Al ₂ O ₃	13,509	Fe	3,952	Fe ₂ O ₃	5,650
Si	21,482	SiO ₂	45,958	Co	0,012	Co ₃ O ₄	0,016
P	0,070	P ₂ O ₅	0,161	Ni	0,017	NiO	0,022
S	0,506	SO ₃	1,263	Cu	0,042	CuO	0,053
Cl	3,009	Cl	3,009	Zn	0,011	ZnO	0,014
K	4,565	K ₂ O	5,499	Zr	—	—	—
Ca	11,080	CaO	15,503	Ba	1,394	BaO	1,557

Çizelge 5.3.te HKK'ye ait yarı kantitatif XRF analizi sonuçları gösterilmektedir. Analiz doğrultusunda HKK'nin yapısını büyük oranda O'in (%38,667) oluşturduğu görülmektedir. Metal olarak en büyük içerik sırasıyla Si (%18,612), Ca (%10,344) ve Na

(%6,666) olarak görülmektedir; ancak Al'nin de oransal olarak Na'ya çok yakın olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (%6,409). Oksit olarak ise en fazla bulunanlar sırasıyla SiO₂ (%49,530), CaO (%35,114) ve Al₂O₃.Ce₂O₃'tür (%35,114). Element olarak daha fazla olan Ca'nın oksitinin (CaO) daha düşük olmasının, CaO'in ayrıca MgO.CaO (%1,048) yapısında da yer almasından kaynaklandığı düşünülmektedir. HKK içerisinde ağır metal olarak bulunan elementler sırasıyla Ba (%1,316), Mn (%0,073), Cr (0,042), Ni (%0,014), Zn (%0,011), Cu'dur (%0,005). SO₃ ve Cl değerlendirildiğinde ise HYK ile paralel olarak HKK de çimento standartlarına uygun SO₃ değerine sahiptir (%1,355); ancak HKK oldukça yüksek Cl değerine sahiptir (%6,350).

Çizelge 5.3. HKK'ye ait yarı kantitatif element analizi sonuçları

Element	%	Oksit	%	Element	%	Oksit	%
O	38,667	—	—	Ti	0,345	TiO ₂	0,575
Na	6,666	Na ₂ O.As ₂ O ₃	8,985	Cr	0,042	Cr ₂ O ₃	0,062
Mg	2,167	MgO.CaO	3,594	Mn	0,073	MnO.Nb ₂ O ₅	0,094
Al	6,409	Al ₂ O ₃ .Ce ₂ O ₃	12,109	Fe	3,689	Fe ₂ O ₃ .NiO	5,274
Si	18,612	SiO ₂	39,818	Co	0,009	Co ₃ O ₄ .NiO	0,013
P	0,072	P ₂ O ₅	0,166	Ni	0,014	NiO	0,018
S	0,543	SO ₃	1,355	Cu	0,005	CuO	0,007
Cl	6,350	Cl	6,350	Zn	0,011	ZnO	0,013
K	4,631	K ₂ O	5,579	Zr	0,033	ZrO ₂	0,044
Ca	10,344	CaO	14,474	Ba	1,316	BaO	1,470

Çizelge 5.4.te şahit harç numunesine ait yarı kantitatif XRF analizi sonuçları yer almaktadır. Şahit harcın yapısını oluşturan elementler arasında en büyük HYK ve HKK numunelerinde olduğu gibi O'dur (%42,618). Metal kompozisyonu olarak da diğer numunelere paralel olarak Si (%24,994), Ca (%23,695), ve Al'dir (%3,136). Oksit kompozisyonunda ise metal içeriğine paralel şekilde bulunma yüzdeleri en yüksek olanlar sırasıyla SiO₂ (%53,471), CaO (%32,525) ve Al₂O₃'tür (%5,924). Şahit harcın genel element kompozisyonu büyük oranda HYK ve HKK numunelerine benzese de ağır metaller açısından bakıldığında onlardan farklı olarak içerisinde Ni, Cu ve Zn bulunmaktadır. İçerdiği ağır metallerin elementel kompozisyon yüzdeleri sırasıyla Cr (0,059), Ba (%0,057) ve Mn'dir

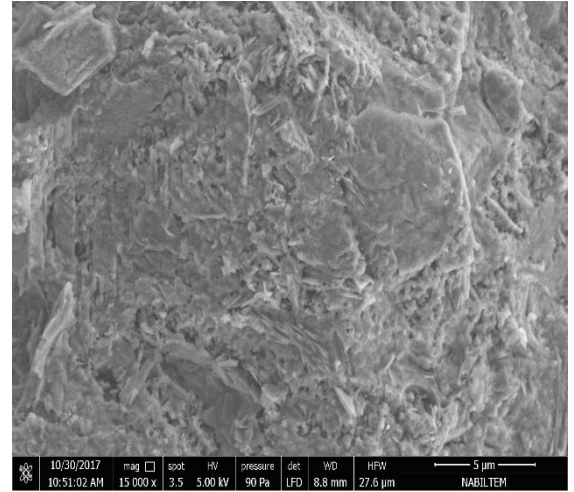
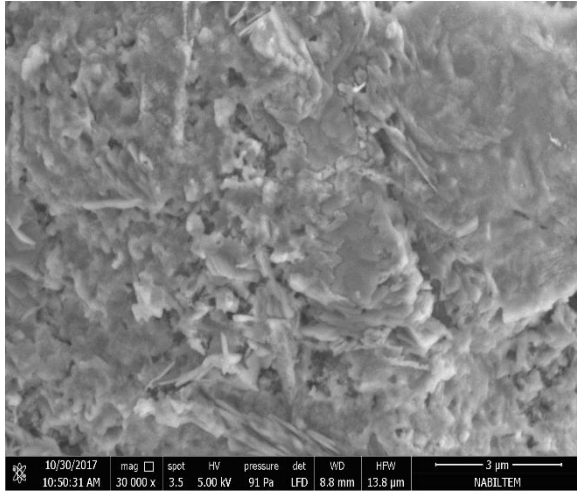
(%0,038). Şahit harcın SO_3 ve Cl değerleri ise girdi olarak kullanılan çimentonun bileşimi ile paralellik göstermektedir (%2,172 ve 0,024, sırasıyla).

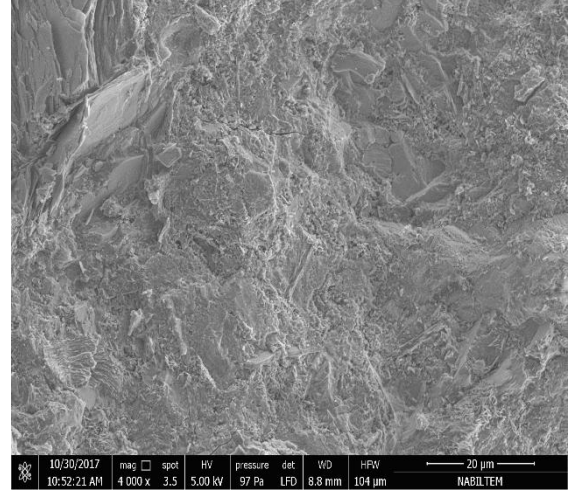
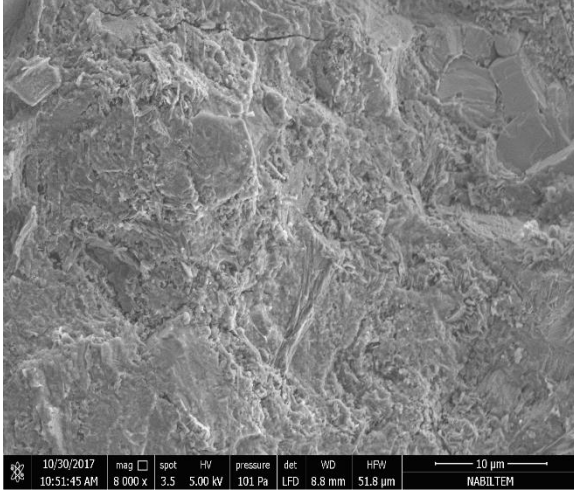
Çizelge 5.4. Şahit harç yarı kantitatif element analizi sonuçları

Element	%	Oksit	%	Element	%	Oksit	%
O	43,459			K	1,401	K_2O	1,687
Na	0,846	Na_2O	1,140	Ca	23,245	CaO	32,525
Mg	0,411	MgO	0,682	Ti	0,132	TiO_2	0,220
Al	3,136	Al_2O_3	5,924	Cr	0,059	Cr_2O_3	0,086
Si	24,994	SiO_2	53,471	Mn	0,038	MnO	0,049
P	0,067	P_2O_5	0,153	Fe	1,244	Fe_2O_3	1,779
S	0,870	SO_3	2,172	Zr	0,017	ZrO_2	0,022
Cl	0,024	Cl	0,024	Ba	0,057	BaO	0,064

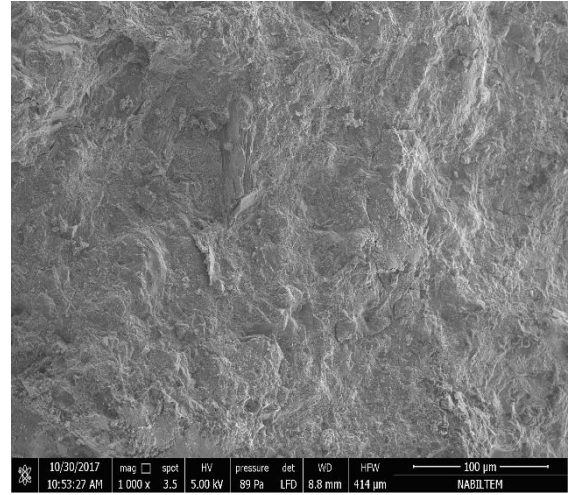
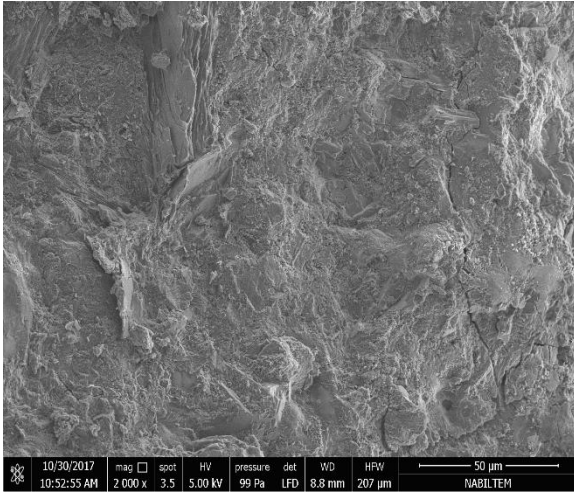
5.1.3. SEM Görüntüleri

Çalışmada S/S prosesi sonucu elde edilen ürünlerin morfolojik özelliklerini kıyaslamak açısından şahit harç ve kurutulmuş hidrokarbon sondaj kesintisinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri çekilmiştir. Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.de şahit harç ve HKK'ye ait çeşitli ölçeklerdeki SEM görüntüleri yer almaktadır. HYK katı formda yer almadığı için SEM görüntüsü alınmamıştır.

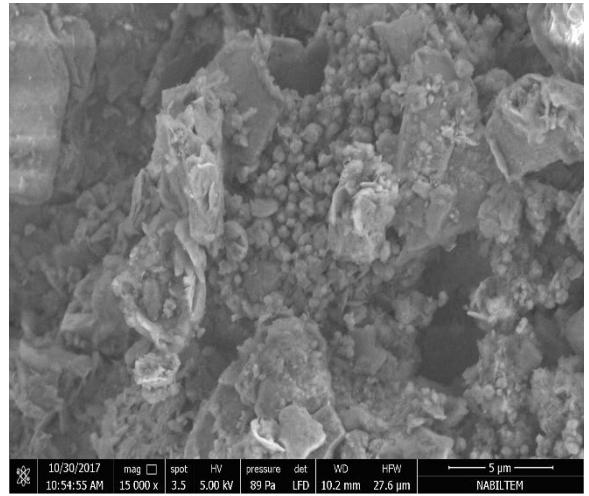
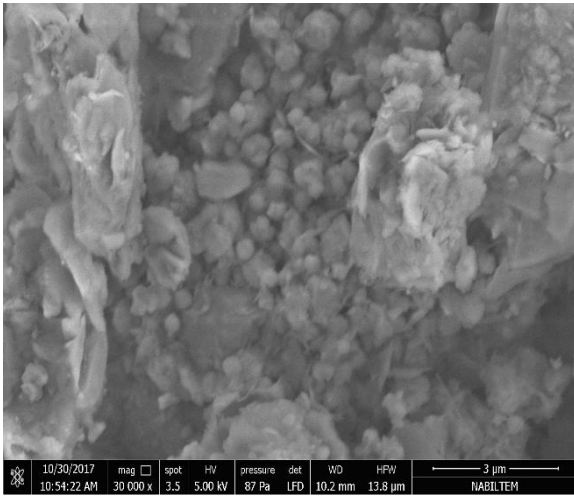


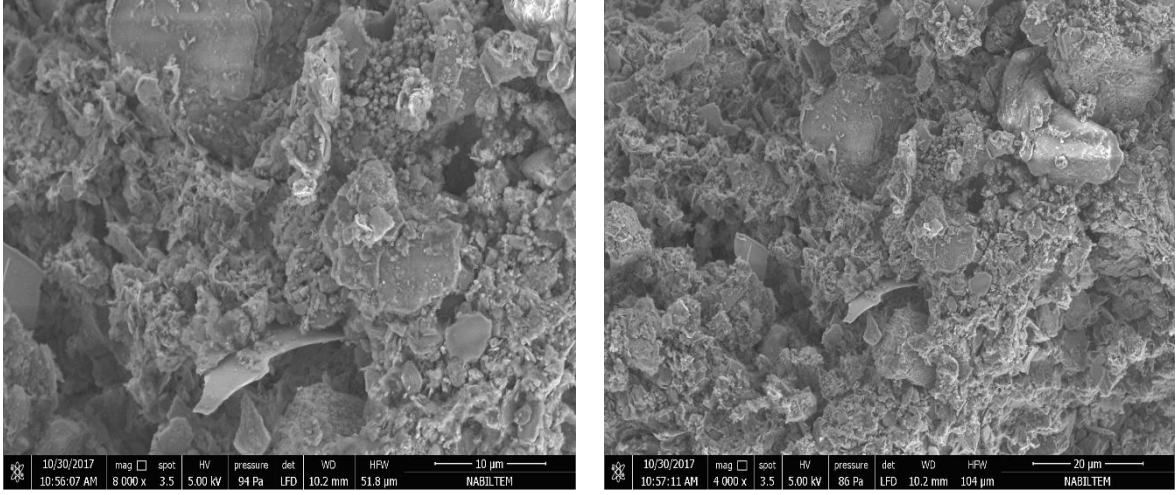


Şekil 5.1. Şahit harcın çeşitli ölçeklerdeki SEM görüntüleri

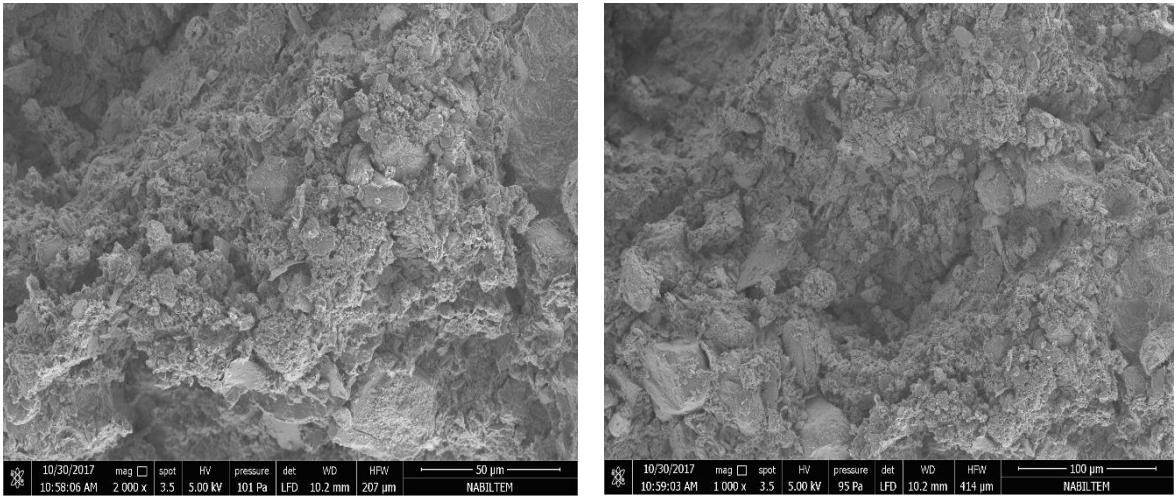


Şekil 5.1. Şahit harcın çeşitli ölçeklerdeki SEM görüntüleri (devam)





Şekil 5.2. HKK'nin çeşitli ölçeklerdeki SEM görüntüleri



Şekil 5.2. HKK'nin çeşitli ölçeklerdeki SEM görüntüleri (devam)

5.1.4. BTEX, PCB'ler ve Mineral Yağ Analizi Sonuçları

Bu bölümde HYK ve HKK için BTEX, PCB'ler ve mineral yağ analizi (C_{10} — C_{40}) sonuçları verilmiştir. Bu analizler petrol kaynaklı atıklar için uygulandığından şahit harc numunesi için bu analizler yapılmamıştır. Bu analizlerin sonuçları Çizelge 5.5.te verilmiştir.

Çizelge 5.5. HYK ve HKK için BTEX, PCB'ler ve mineral yağ analizi (C_{10} — C_{40})

Parametre/Örnek	HYK	HKK
BTEX, mg/kg	< 0,5	< 0,5
PCB'ler, mg/kg	< 0,1	< 0,1
Mineral yağ, mg/kg	1247	4070

Çizelge 5.5'ten görüleceği gibi ADDDY kapsamında her iki atık da BTEX ve PCB'ler içerikleri açısından inert atık kriterlerini sağlamaktadır. Bu nedenle III. Sınıf Düzenli Depolama Tesisinde (DDT) depolama için bu parametreler açısından uygundur; ancak hem HYK hem de HKK mineral yağ içerikleri (sırasıyla 1247 mg/kg ve 4070 mg/kg) III. Sınıf DDT'nin 500 mg/kg sınır değerinin çok üzerinde yer almaktadır. Kurutulan numunede mineral yağ oranının daha yüksek çıkmasının, kurutma sonucu kaybın büyük oranda su olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

5.1.6. TOK ve ÇOK Analizleri Sonuçları

Bu bölümde atık karakterizasyonu için HYK, HKK ve şahit harç için yapılan TOK ve ÇOK analizlerine dair sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.6'da yer almaktadır.

Çizelge 5.6. HYK, HKK ve şahit harç TOK ve ÇOK analizi sonuçları

Numune	TOK, %	ÇOK, mg/l
Şahit	0,079	-
HYK	0,723	209,79
HKK	0,643	577,47

Şahit harç içerisinde beklenildiği gibi TOK oranı çok düşük olup ÇOK mevcut değildir. HYK TOK yüzdesinin HKK'den yüksek olması kurutma sırasında uçucu bileşenlerin kaybı ile açıklanabilir. ÇOK açısından ise HKK'nin değerlerinin HYK'nin değerlerinden yüksek olmasının kurutma sırasında kütle kaybının daha çok su olarak olmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

5.1.5. AKM, UAKM ve TÇK Analizi Sonuçları

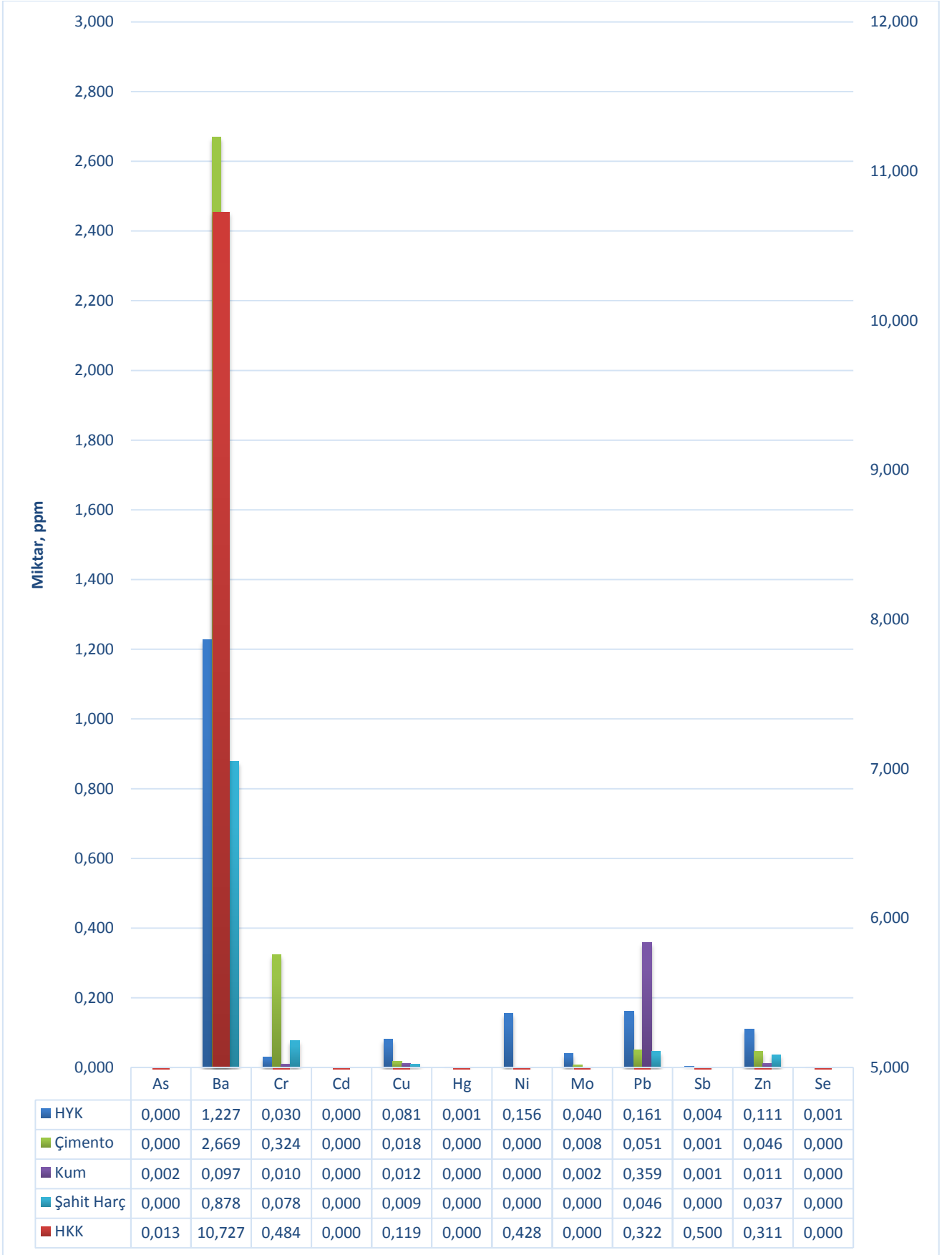
HYK ve HKK için elde edilen AKM, UAKM ve TÇK değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi HKK'nin AKM, UAKM ve TÇK değerlerinin hepsi HYK değerlerinden yüksek sonuç vermiştir. Bunun, kurutmadan kaynaklı kütle kaybının daha çok su üzerinden olması kaynaklı kirlilik yoğunlaşması olarak düşünülmektedir.

Çizelge 5.7. HYK ve HKK için AKM ve UAKM değerleri

Numune	AKM, mg/L	UAKM, mg/L	TÇK, mg/L
HYK	6,078	1,016	2,810
HKK	11,022	2,231	4,102

5.1.7. Ağır Metal Analizi Sonuçları

Çalışmada kullanılan girdilerin karakterizasyonları amacıyla HYK, HKK ve şahit harcın yanında çimento ve kum için de sızma testleri uygulanmıştır. Şekil 5.6.da bu girdiler için elde edilen sonuçlar, girdi içindeki bulunma miktarlarına dair grafik üzerinde verilmiştir. Grafikte HYK, çimento, kum ve şahit harç numunelerine ait değerler birinci ekseninde, HKK numunesine ait değerler de ikinci ekseninde gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi en yüksek ağır metal içeriği Ba (10,7 mg/L) ile HKK'de bulunmaktadır. Mo hariç tüm ağır metallerde sızma kesinti kurdukça artmıştır. Metal taşınmasının sondaj kesintisinin kuruluşu arttıkça arttığı düşünülmektedir.



Şekil 5.3. Numunelerin ağır metal içerikleri

5.2. Dayanım ve Dayanıklılık Testleri Sonuçları

Bu başlık altında, HYK ve HKK'nin çimento ile çeşitli oranlarda katkılarıyla hazırlanan S/S prosesi ürünlerine ait numunelerin yapı malzemesi olarak kullanıma uygunlukları değerlendirilmiştir. Sonuçlar deneylerin yapılış ve verilerin elde edilmiş sıralarına göre verilmiştir. Şahit harca ait veriler de referans oluşturması amacıyla %0 katkı oranı ile diğer katkı oranlı ürünlerle birlikte verilmiştir. Verilerin istatistiksel yorumlanması için JMP 13 istatistik yazılımı kullanılmıştır.

5.2.1. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

Ultrases geçiş hızının belirlenebilmesi için her bir HYK numunesi (%2, 4, 6, 8, 10) için yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen değerler Çizelge 5.8.de yer almaktadır.

Çizelge 5.8. HYK için ölçülen ultrases geçiş hızları

Katkı, %	Katkı, g	Numune	Ort. V, km/s
0	0	3	4,29
2	9	3	3,49
4	18	3	3,37
6	27	3	3,20
8	36	3	3,38
10	45	3	2,94

Her bir HKK numunesi (%4, 8, 12, 16, 20) için de aynı işlem yapılarak elde edilen veriler Çizelge 5.9.da verilmiştir.

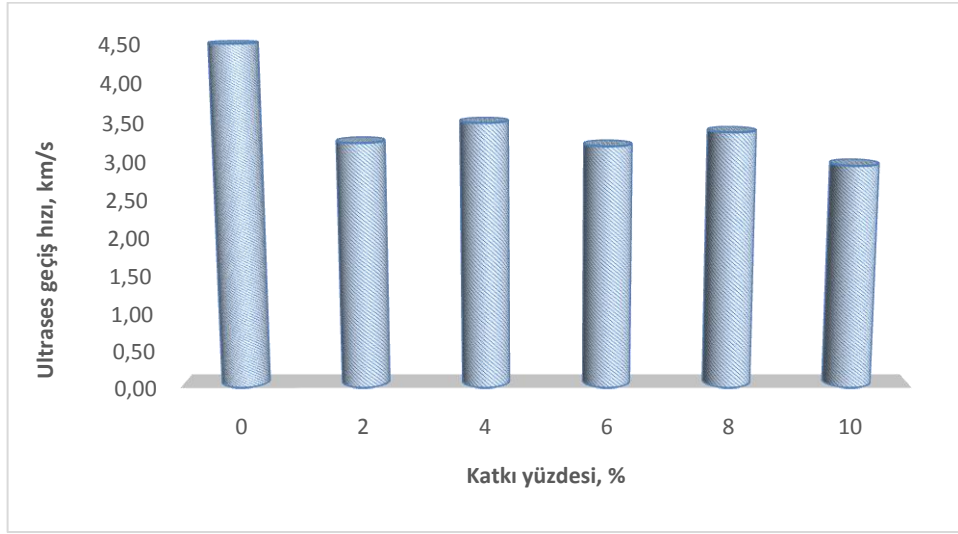
Çizelge 5.9. HKK için ölçülen ultrases geçiş hızları

Katkı, %	Katkı, g	Numune	Ort. V, km/s
0	0	3	4,29
4	18	3	3,54
8	36	3	2,91
12	54	3	2,80
16	72	3	2,59
20	90	3	2,43

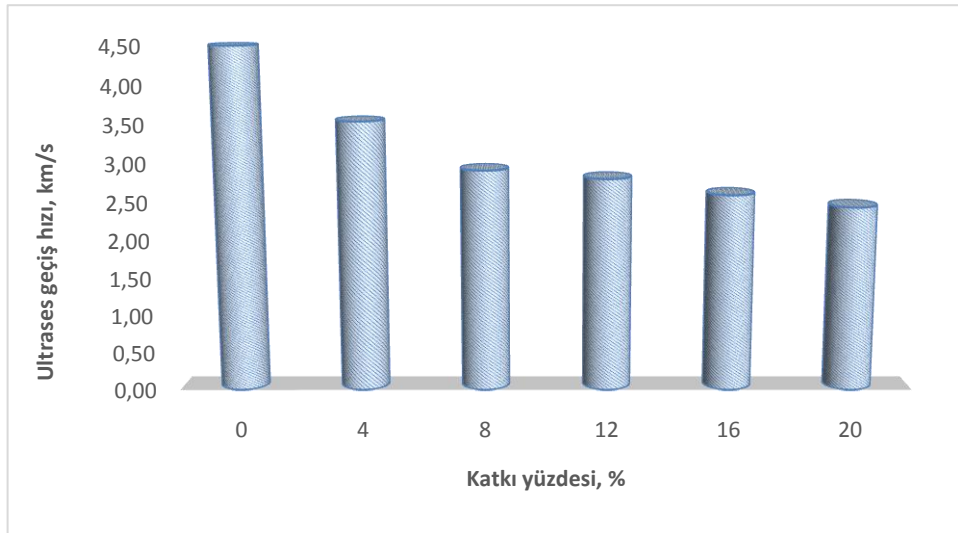
Hem Çizelge 5.8. hem de Çizelge 5.9.dan görülebileceği gibi her iki numunenin harç içerisindeki katkı oranı arttıkça ultrases geçiş hızı azalmaktadır. Ultrases geçiş hızı da betonun

dayanımı ile ilgili bir parametre olduğu için beton içerisindeki safsızlık arttıkça dayanımın azaldığı değerlendirilebilir. Çizelge 4.8.de yer alan beton kalitesi değerlendirmesine göre HYK için %2, 4, 6 ve 8 katkılı S/S ürünlerinin orta, %10 katkılı ürünün ise zayıf olduğu değerlendirilebilir. HKK için ise aynı değerlendirme ile beton kalitesi açısından %4 katkılı ürün iyi, kalan ürünler (sırasıyla %8, 12, 16, 20) zayıf olarak değerlendirilebilir.

Şekil 5.7.de katkılı HYK ürünleri için, Şekil 5.8.de katkılı HKK ürünleri için ultrases geçiş hızı değerlerine ait grafik yer almaktadır.



Şekil 5.4. Katkılı HYK numuneleri için ultrases geçiş hızı grafiği



Şekil 5.5. Katkılı HKK ürünleri için ultrases geçiş hızı grafiği

Katkı olmasının ultrases geçiş hızı üzerindeki etkisi olup olmadığının değerlendirilmesi amacıyla tüm ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları için JMP 13 programı ile yapılan tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile elde edilen istatistiksel veriler Çizelge 5.10.da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Katkı oranının ultrases geçiş hızı üzerindeki etkisine ait tek yönlü ANOVA sonuçları

Varyans Kaynağı	df	SS	MS	F	P-değeri
Gruplar Arasında	1	5,768461	5,76846	36,6668	<0,0001
Gruplar İçinde	31	4,876948	0,15732		
Toplam	32	10,64541			

Çizelge 5.10.dan da görülebileceği gibi analiz sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır ($P < 0,05$). Katılaştırılmış üründe çimento yerine kesinti kullanılması sonucu ultrases geçiş hızı önemli ölçüde değişmektedir.

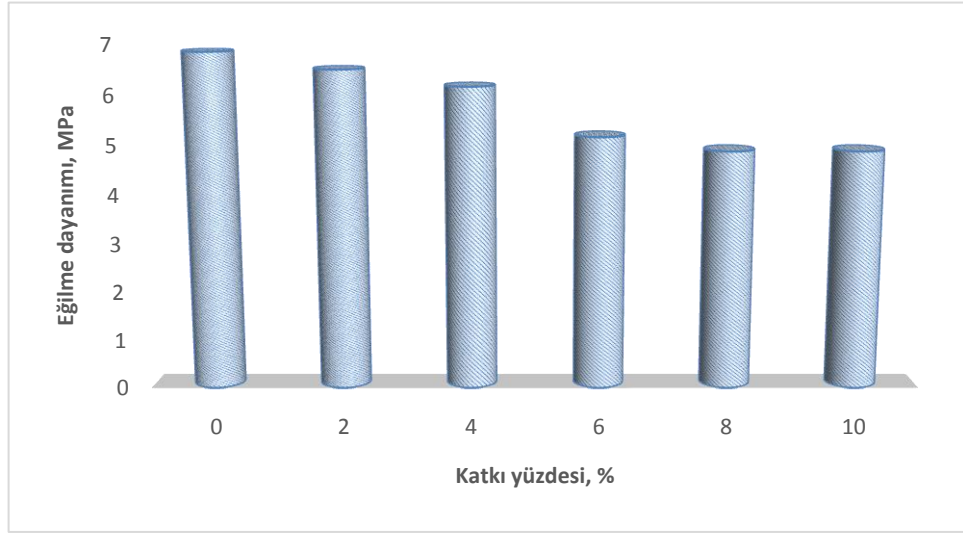
5.2.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları

Bu başlıkta TS EN 196-1'e göre hazırlanan numunelerin basınç dayanımı analizi sırasında kırılan parçalarına uygulanan eğilme dayanımı testi sonuçları verilmiştir. Çizelge 5.11. ve Çizelge 5.12.de referans şahit harç numunesi değeriyle birlikte verilen HYK ve HKK eğilme dayanımı testi sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 5.11. HYK katkılı katılaştırılmış ürünlerin eğilme dayanımı sonuçları

Katkı oranı	Numune	Ort. eğilme dayanımı, MPa
0	3	6,84
2	3	6,49
4	3	6,16
6	3	5,16
8	3	4,87
10	3	4,87

Katkılı HYK numuneleri için eğilme dayanımı grafiği Şekil 5.9.da yer almaktadır.

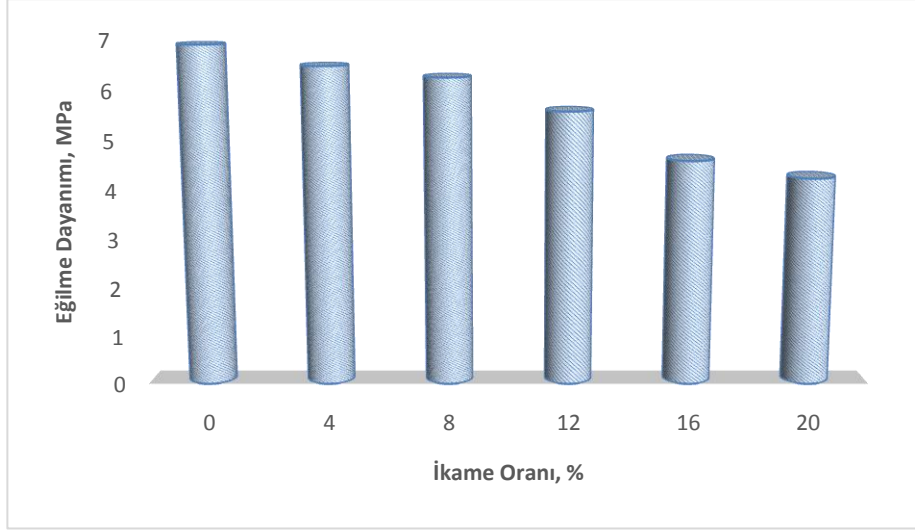


Şekil 5.6. HYK için katkı ile eğilme dayanımı değişim grafiği

Çizelge 5.12. HKK katkılı katılaştırılmış ürünlerin eğilme dayanımı sonuçları

Katkı oranı	Numune	Ort. basınç dayanımı, MPa
0	3	6,84
4	3	6,48
8	3	6,26
12	3	5,58
16	3	4,60
20	3	4,24

Çizelge 5.11.den de görülebileceği gibi %2 ve 4 HYK katkılı katılaştırılmış ürünler 6 MPa'dan daha yüksek eğilme dayanımı (sırasıyla 6,49 ve 6,16 MPa) göstermişlerdir. HKK katkılı ürünlerde ise Çizelge 5.12.de yer aldığı gibi %4 ve %8 katkılı ürünler 6 MPa'dan daha yüksek eğilme dayanımı (sırasıyla 6,48 ve 6,26 MPa) göstermişlerdir. Her iki numunenin katılaştırılmış ürünlerinde katkı oranının artmasıyla eğilme dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Şekil 5.10.da bu eğilim gösterilmiştir.



Şekil 5.7. HKK için katkı ile eğilme dayanımı değişim grafiği

Katılaştırılmış üründeki katkı oranı ile eğilme dayanımlarının değişiminin istatistiksel olarak değerlendirmesi için tek yönlü ANOVA analizi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 5.13.te yer almaktadır.

Çizelge 5.13. Katkı oranının eğilme dayanımı üzerindeki etkisine ait tek yönlü ANOVA sonuçları

Varyans Kaynağı	df	SS	MS	F	P-değeri
Gruplar Arasında	1	4,899528	4,89953	6,939	0,013
Gruplar İçinde	31	21,8887	0,70609		
Toplam	32	26,78822			

Tek yönlü ANOVA ile katkı oranının eğilme dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yarattığı bulunmuştur ($P < 0,05$). Çizelge 5.13.teki sonuçlara göre katkı oranının eğilme dayanımı üzerinde belirgin bir fark yarattığı değerlendirilebilir.

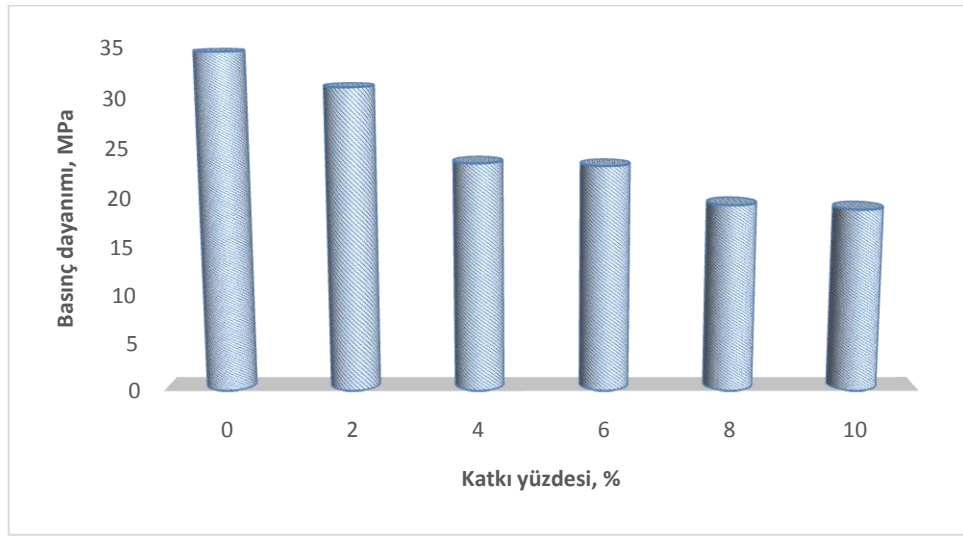
5.2.3. Basınç Dayanımı Sonuçları

TS EN 196-1 standardına göre 0,5 su/çimento oranı ile üretilen, çeşitli katkı oranlarına sahip HYK ve HKK katılaştırılmış ürünlerine ait basınç dayanımları Çizelge 5.14. ve Çizelge 5.15.te verilmiştir.

Çizelge 5.14. HYK ürünleri için ölçülen basınç dayanımı değerleri

Katkı oranı	Numune	Ort. basınç dayanımı, MPa
0	3	34,50
2	3	31,02
4	3	23,47
6	3	23,19
8	3	19,23
10	3	18,78

Katkılı HYK numuneleri için basınç dayanımı grafiği Şekil 5.11.de yer almaktadır.



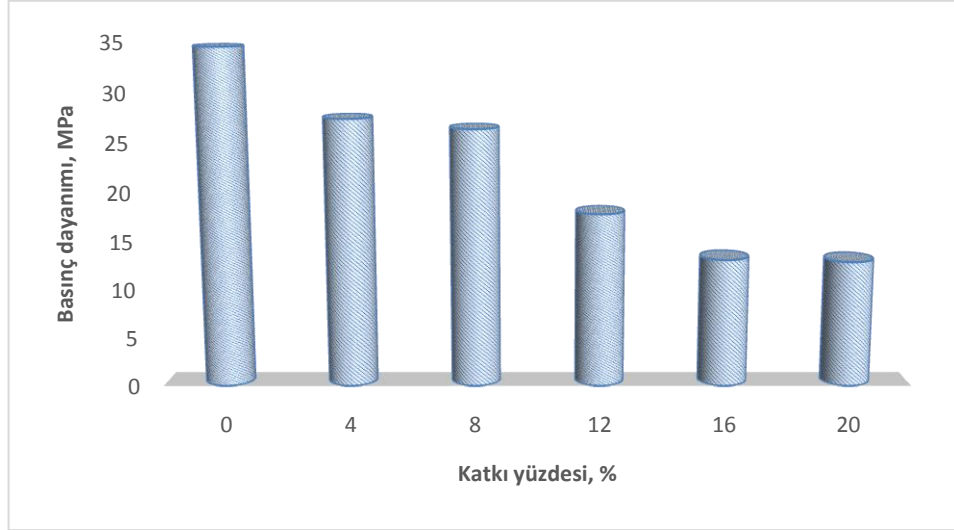
Şekil 5.8. Katkılı HYK numuneleri basınç dayanımı grafiği

Çizelge 5.15. HKK ürünleri için ölçülen basınç dayanımı değerleri

Katkı oranı	Numune	Ort. basınç dayanımı, MPa
0	3	34,50
4	3	27,40
8	3	26,40
12	3	17,80
16	3	13,10
20	3	12,90

HYK ve HKK ürünlerine ait çizelgeler incelendiğinde basınç dayanımları açısından da diğer mekanik analizlerde (ultrases geçiş hızı ve su emme) olduğu gibi katkı oranı arttıkça

performansta düşme görülmektedir. Hem HYK hem de HKK ürünleri için en düşük basınç dayanımı değerleri en yüksek katkı oranlarında (sırasıyla %10 ve %20) elde edilmiştir. Şekil 5.12.de katkılı HKK ürünleri için basınç dayanımı grafiği verilmiştir.



Şekil 5.9. Katkılı HKK ürünleri için basınç dayanımı grafiği

Basınç dayanımının katkı oranıyla değişiminin istatistiksel olarak değerlendirilmesi için yapılan tek yönlü ANOVA sonuçları Çizelge 5.16.da verilmiştir.

Çizelge 5.16. Katkı oranının basınç dayanımı üzerindeki etkisine ait tek yönlü ANOVA sonuçları

Varyans Kaynağı	df	SS	MS	F	P-değeri
Gruplar Arasında	1	472,5876	472,588	12,2048	0,0015
Gruplar İçinde	31	1200,364	38,721		
Toplam	32	1672,951			

Katkı oranının katılaştırılmış ürünün basınç dayanımına etkisinin değerlendirilebilmesi için yapılan tek yönlü ANOVA sonuçlarına göre elde edilen anlamlı fark ($P < 0,05$), katkı oranıyla basınç dayanımının belirgin şekilde değiştiğini istatistiksel açıdan da ortaya koymuştur.

5.2.4. Atmosferik Su Emme Deneyi Sonuçları

Elde edilen ürünün içindeki gözeneklilik ve dolayısıyla uzun vadede içerisine alacağı su ile muhtemel bozunmaya dair görüş kazandırması amacıyla üretilen HYK ve HKK katkılı ürünlerde yapılan su emme deneyine ait verilerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.17. ve Çizelge 5.18.de verilmiştir.

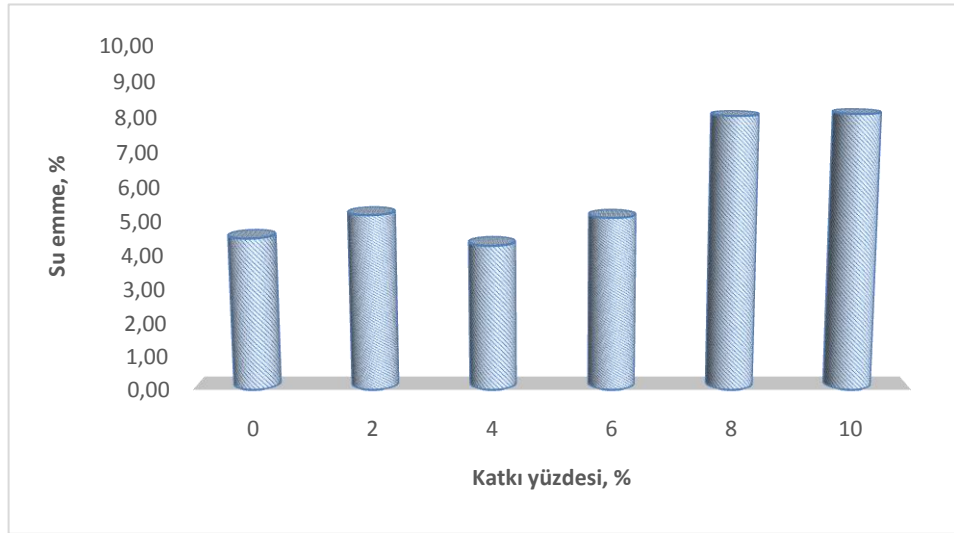
Çizelge 5.17. HYK katkı oranı ile ortalama su emme değişimi

Katkı oranı	Numune sayısı	Ort. su emme, %
0	3	4,50
2	3	5,18
4	3	4,29
6	3	5,10
8	3	8,03
10	3	8,08

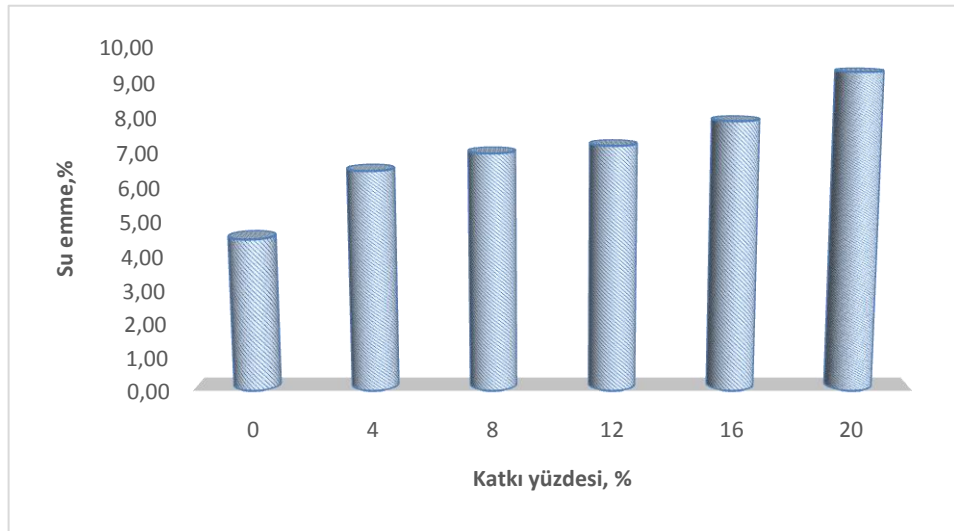
Çizelge 5.18. HKK katkı oranı ile ortalama su emme değişimi

Katkı oranı	Numune sayısı	Ort. su emme, %
0	3	4,50
4	3	6,48
8	3	6,99
12	3	7,20
16	3	7,90
20	3	9,29

Çizelge 5.19. ve Çizelge 5.20.den de görülebileceği gibi her iki numunenin (HYK ve HKK) katılaştırılmış ürünleri için katkı oranı arttıkça su emme yüzdesinin arttığı söylenebilir; ancak hem HYK hem de HKK'nin bazı katkı oranları ile şahit numuneden daha düşük su emme yüzdesi göstermiştir. Her iki numune için de maksimum katkı oranları (HYK için %10 ve HKK için %20) dışında şahit harç numunesinden daha düşük su emme yüzdesine sahip olduğu, dolayısıyla su emme açısından şahit harçtan daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Şekil 5.13.te katkılı HYK ürünleri için, Şekil 5.14.te de katkılı HKK ürünleri için su emme değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Katkılı HYK numuneleri için su emme grafiği



Şekil 5.11. Katkılı HKK ürünleri için su emme grafiği

Katılaştırılmış üründe çimento ile katkılı olarak kesinti kullanımının atmosferik su emme üzerinde etkisi olup olmadığını değerlendirmek için tek yönlü ANOVA yapılmıştır. Çizelge 5.19.da elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

Çizelge 5.19. Katkı oranının su emme üzerindeki etkisine ait tek yönlü ANOVA sonuçları

Varyans Kaynağı	df	SS	MS	F	P-değeri
Gruplar Arasında	1	15,115	15,115	6,7602	0,0142
Gruplar İçinde	31	69,31205	2,2359		
Toplam	32	84,42705			

Çizelge 5.19.da katkı oranının su emme üzerindeki etkisine ait tek yönlü ANOVA değerlendirmesinde anlamlı bir fark bulunmuştur ($P<0,05$). Katkı oranı ile su emme oranının önemli ölçüde değiştiği istatistiksel olarak da söylenebilir.

5.3. S/S Ürünü Numunelerin Karakterizasyonu

S/S ürünü numunelerin karakterizasyon değerlendirilmesi için öncelikle HYK ve HKK'nin çeşitli katkı oranlarıyla hazırlanan ürünlerin ağır metal sızma davranışları incelenmiştir. Bu değerlendirme sonucunda depolanabilirlik açısından optimum olduğu değerlendirilen katkı oranları (8YK ve 8KK) için daha kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir.

5.3.2. Yarı Kantitatif Element Analizi (XRF) Sonuçları

Çalışmada optimum belirlenen numunelerin (8YK ve 8KK) karakterizasyonu için öncelikle yarı kantitatif element (XRF) analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.20 ve Çizelge 5.21.de verilmiştir.

Çizelge 5.20. 8YK katkılı katılaştırılmış ürünün yarı kantitatif XRF sonuçları

Element	%	Oksit	%	Element	%	Oksit	%
O	43,187	—	—	Ti	0,151	TiO ₂	0,252
Na	0,86	Na ₂ O.As ₂ O ₃	1,159	Cr	0,039	Cr ₂ O ₃	0,058
Mg	0,513	MgO.CaO	0,850	Mn	0,035	MnO.Nb ₂ O ₅	0,045
Al	3,155	Al ₂ O ₃ .Ce ₂ O ₃	5,961	Fe	1,229	Fe ₂ O ₃ .NiO	1,757
Si	24,400	SiO ₂	52,201	Co	—	—	—
P	0,068	P ₂ O ₅	0,157	Ni	0,007	NiO	0,009
S	0,923	SO ₃	2,305	Cu	—	—	—
Cl	0,202	Cl	0,201	Zn	—	—	—
K	1,191	K ₂ O	1,435	Zr	0,016	ZrO ₂	0,021
Ca	23,935	CaO	33,489	Ba	0,088	BaO	0,098

Çizelge 5.20.de görülebileceği gibi 8YK katkılı katılaştırılmış üründe de ham HYK numunesinde olduğu gibi Si ve Ca en yüksek bulunan metallerdir (sırasıyla %24,400 ve 23,935). Bulunma yüzdelerine göre mevcut ağır metaller ise Ba (%0,088), Cr (%0,039), Mn (%0,035) ve Ni'dir (%0,007). Oksit olarak ise SiO₂ %52,201 ile en fazla bulunan oksittir. Onu %33,489 ile CaO izlemektedir. Mevcut ağır metallerin oksitleri söz konusu olduğunda ise

sırasıyla Fe₂O₃.NiO (%1,757), BaO (%0,098), Cr₂O₃ (%0,058), MnO.Nb₂O₅ (%0,045) ve NiO'dur (%0,009). Çimento ve dolayısıyla beton kalitesini belirleyen bileşenlerden olan SO₃, ham HYK ve HKK ile şahit harç gibi girdi çimento değerlerine uygun sonuç vermiştir (%2,305). Cl ise ham HYK ve HKK kadar yüksek olmasa da girdi çimento değerlerinden yüksektir.

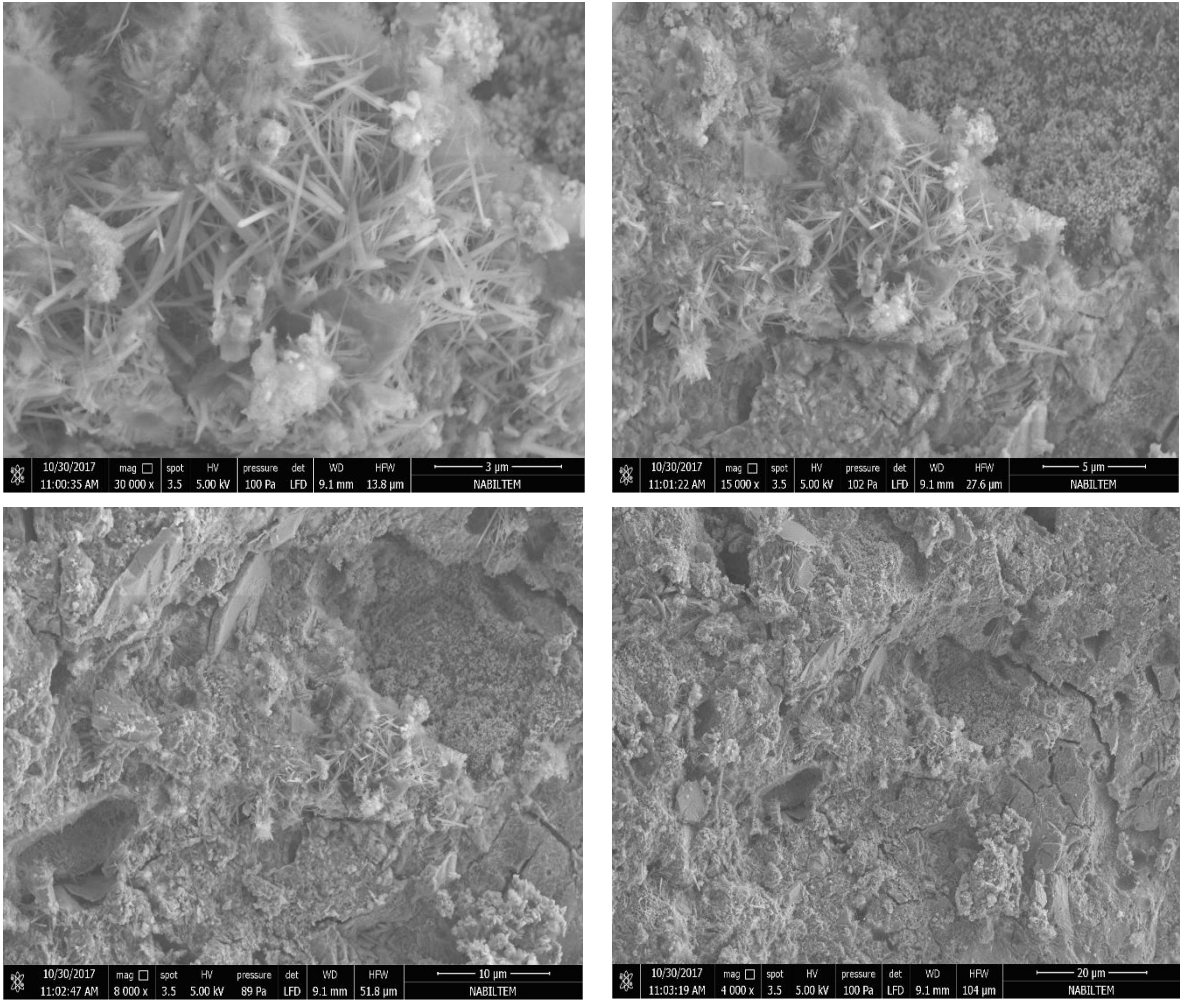
Çizelge 5.21. 8KK katkılı katılaştırılmış ürünün yarı kantitatif XRF sonuçları

Element	%	Oksit	%	Element	%	Oksit	%
O	42,618	—	—	Ti	0,165	TiO ₂	0,275
Na	0,828	Na ₂ O.As ₂ O ₃	1,116	Cr	0,028	Cr ₂ O ₃	0,041
Mg	0,632	MgO.CaO	1,048	Mn	0,041	MnO.Nb ₂ O ₅	0,053
Al	3,438	Al ₂ O ₃ .Ce ₂ O ₃	6,495	Fe	1,330	Fe ₂ O ₃ .NiO	1,901
Si	23,152	SiO ₂	49,530	Co	—	—	—
P	0,068	P ₂ O ₅	0,155	Ni	0,007	NiO	0,009
S	0,910	SO ₃	2,272	Cu	—	—	—
Cl	1,180	Cl	1,180	Zn	—	—	—
K	1,381	K ₂ O	1,663	Zr	0,021	ZrO ₂	0,029
Ca	25,096	CaO	35,114	Ba	0,106	BaO	0,119

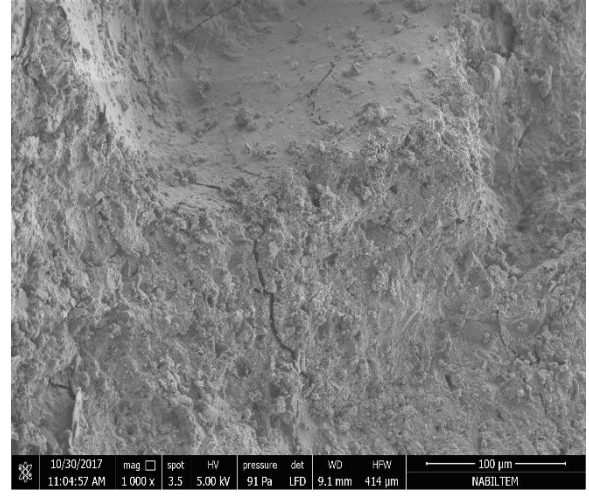
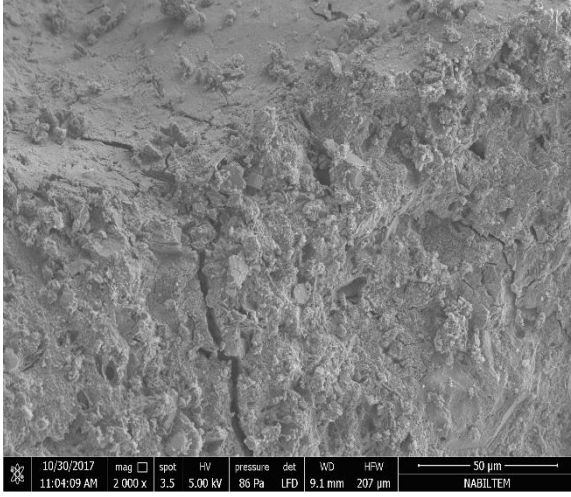
Çizelge 5.21.de %8 katkı oranlı HKK ile üretilmiş harç numunesine ait yarı kantitatif XRF analizi sonuçları yer almaktadır. Analiz sonuçlarına göre %8 katkı oranlı HKK içeriğinde yüzde ağırlıkça bulunma oranı en yüksek element O (%42,618) iken, bulunma oranı en yüksek metaller ise sırasıyla Ca (%25,096) ve Si'dir (23,152). İçerikte bulunan ağır metaller ise bulunma yüzdeleri sırasıyla Ba (0,106), Mn (0,041), Cr (0,028), Zr (0,021) ve Ni'dir (0,007). Oksit olarak ise SiO₂ (49,530) ve CaO (35,114) en yüksek bulunma yüzdesine sahip olanlardır. Ayrıca CaO, MgO.CaO (%1,048) yapısının içinde de yer almaktadır. Ağır metal oksitleri olarak ise bulunma yüzdelerine göre sırasıyla BaO (0,119), MnO.Nb₂O₅ (0,053), Cr₂O₃ (0,041), ZrO₂ (0,029) ve NiO'dur (0,009). SO₃ açısından ise 8YK gibi girdi çimento değerlerinden düşük sonuç vermiştir. Cl değeri olarak da her ne kadar hem HYK hem de HKK'den düşük sonuç verse de hem girdi çimento hem de 8YK değerlerinden oldukça yüksek değere sahiptir (%1,180).

5.3.3. SEM Görüntüleri

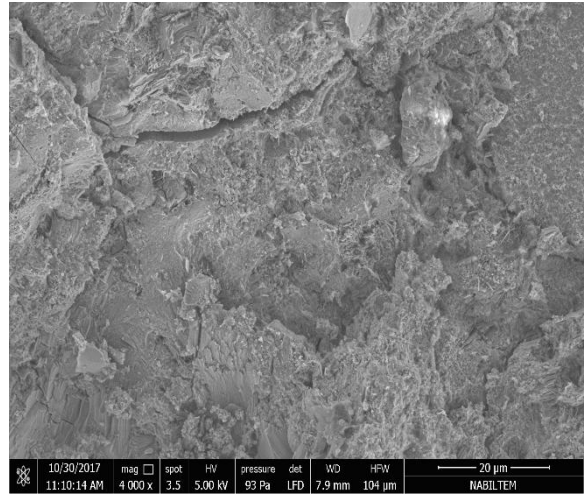
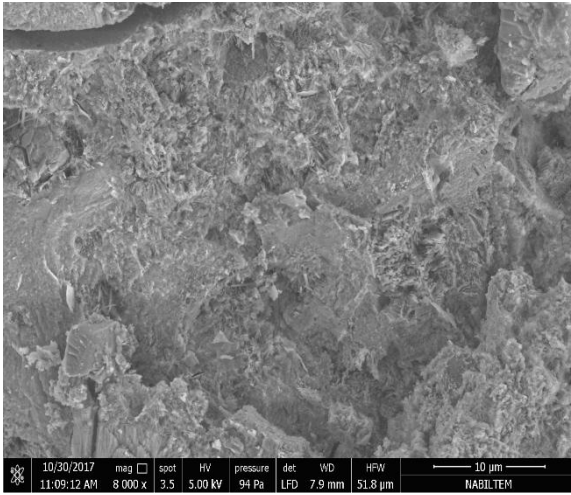
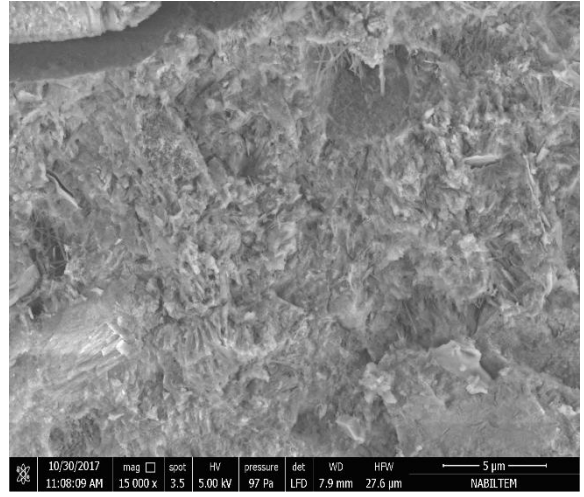
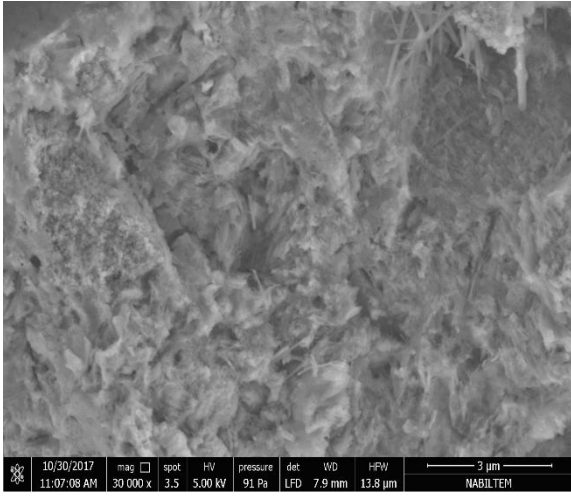
Şekil 5.15. 8YK ürünü için, Şekil 5.16. ise 8KK ürünü için çeşitli yakınlaştırma oranlarında SEM görüntüleri yer almaktadır. 8YK ürününde 8KK ürününe göre daha yüksek etrenjit oluşumu gözlenmiştir. Etrenjit oluşumunun daha yüksek olması dayanımın dayanımın daha düşük olacağı anlamına gelmektedir.



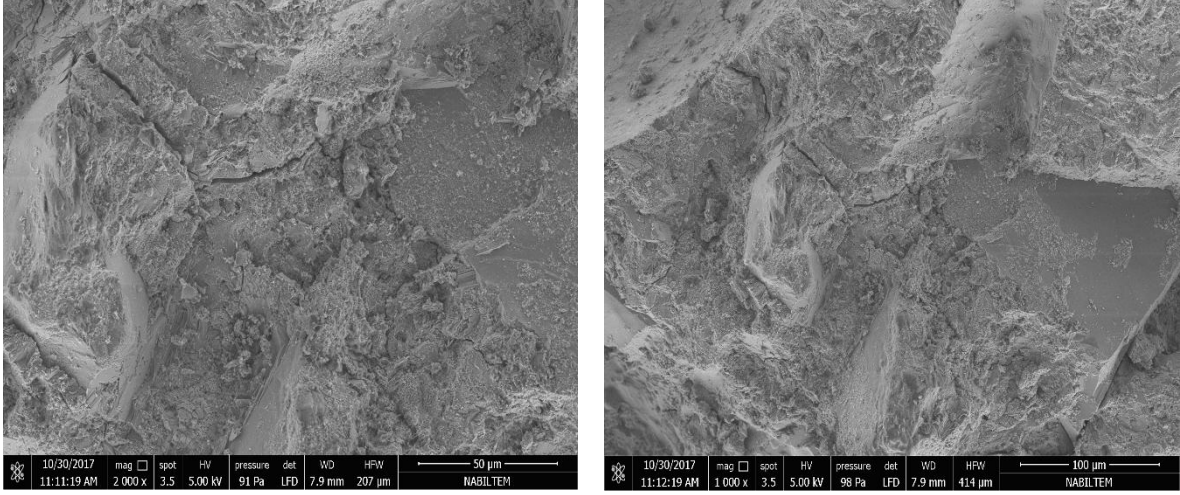
Şekil 5.12. 8YK SEM görüntüleri



Şekil 5.12. 8YK SEM görüntüleri (devam)



Şekil 5.13. 8KK SEM görüntüleri



Şekil 5.13. 8KK SEM görüntüleri (devam)

5.3.4. BTEX, PCB'ler ve Mineral Yağ Analizi Sonuçları

HYK ve HKK için gerçekleştirilen BTEX, PCB'ler ve mineral yağ analizleri (C₁₀—C₄₀), %8 katkı oranlı HYK ve %8 katkı oranlı HKK ile üretilen harç numuneleri için de gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.22.de verilmiştir.

Çizelge 5.22. 8YK ve 8KK ürünleri için BTEX, PCB'ler ve mineral yağ analizi (C₁₀—C₄₀)

Parametre/Örnek	8YK	8KK
BTEX, mg/kg	< 0,5	< 0,5
PCB'ler, mg/kg	0,154	< 0,1
Mineral yağ, mg/kg	211	301

Çizelge 5.22.den görüleceği gibi hem HYK hem de HKK ile %8 katkılı olarak katılaştırılan numunelerin ADDDY kapsamında BTEX, PCB'ler ve mineral yağ (C₁₀—C₄₀) içerikleri açısından inert atık kriterlerini sağlamaktadır. Katılaştırılmadan önce hem yağ hem de kuru haldeki HSK mineral yağ açısından limitleri aşarken, katılaştırma sonucunda değerlerin limitlerin altında kaldığı bulunmuştur. HKK ile katılaştırılmış numunede mineral yağ oranının daha yüksek çıkması, ham HKK'de bulunan değerlerle paralellik göstermektedir.

5.3.5. TOK, ÇOK ve İletkenlik Analizi Sonuçları

HYK, HKK ve şahit harç için gerçekleştirilen TOK, ÇOK ve iletkenlik analizleri, katılaştırılmış 8YK katkılı ve 8KK katkılı numuneleri için de gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 5.23.te yer almaktadır.

Çizelge 5.23. 8YK ve 8KK için TOK, ÇOK, TÇK ve iletkenlik analizi sonuçları

Numune	TOK, %	ÇOK, mg/l	TÇK, mg/l	İletkenlik, uS/cm
8YK	0,072	15,291	25,118	309
8KK	0,027	26,309	24,558	601

Çizelge 5.23.te yer alan sonuçlara göre katılaştırılmış 8YK ve 8KK katkılı numuneler, TOK, ÇOK ve TÇK parametreleri açısından Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğe göre III. Sınıf inert atıklar olarak değerlendirilebilirler. %8 katkılı HYK ürününün TOK yüzdesinin %8 katkılı HKK ürününden yüksek olması, ham HYK'nin kurutulması sonucu HKK'de uçucu bileşenlerin kaybı ile açıklanabilir. ÇOK yüzdesi açısından ise HKK katkılı ürünün değerlerinin HYK katkılı üründen değerlerinden yüksek olmasının HYK'nin kurutulması sırasında kütle kaybının daha çok su üzerinden olmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. İletkenliğin daha yüksek olmasından da yine 8KK katkılı ürünün daha yüksek kirliliğe sahip olduğu değerlendirilebilir.

5.3.6. AKM, UAKM ve TÇK Analizi Sonuçları

8YK ve 8KK katkılı ürünler için elde edilen AKM, UAKM ve TÇK değerleri Çizelge 5.24.te verilmiştir.

Çizelge 5.24. 8YK ve 8KK için AKM, UAKM ve TÇK değerleri

Numune	AKM, mg/L	UAKM, mg/L	TÇK, mg/L
8YK	0,720	0,620	25,118
8HK	1,178	0,827	24,558

Çizelgeden de görüleceği gibi 8KK'nin AKM ve UAKM değerleri ham halleri ile paralel olacak şekilde 8YK değerlerinden yüksektir, ancak ürünlerin sızıntılarının çok daha az kirlilik içerdiği açıktır. TÇK değerleri ise girdi değerlerinden daha yüksektir.

5.3.1. Ağır Metal Analizi Sonuçları

Çeşitli katkı oranlarında hazırlanan katılaştırılmış ürünlerin hazırlanan eluatlarına dair ağır metal sızmaları bu bölümde gösterilmiştir. Şahit harç referans sağlamak amacıyla bu bölümde %0 katkı oranı ile ifade edilmiştir. Çizelge 5.9.da HKK katkılı ürünlere, Çizelge 5.25.te ise HYK katkılı ürünlere ait ağır metal sızma analizi sonuçları değerlendirme için proses girdisi numuneler ile verilmiştir. Cihaz için ağır metal bulunma sınırları numunelerde

rastlanmayan metaller için sırasıyla, As (1,38 ppb), Cd (0,7297 ppb), Hg (3,507 ppb), Mo (7,37 ppb), Sb (6,011 ppb) ve Se (8,918 ppb) şeklindedir.

Çizelge 5.25. HKK numuneleri için ağır metal sızmaları

Numune	Ağır Metal, mg/L											
	As	Ba	Cr	Cd	Cu	Hg	Ni	Mo	Pb	Sb	Zn	Se
HKK	0,00	10,73	0,48	0,00	0,12	0,00	0,43	0,00	0,32	0,50	0,31	0,00
0KK	0,00	0,88	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,04	0,00
4KK	0,00	2,13	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,05	0,00
8KK	0,00	1,68	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,02	0,00
12KK	0,00	2,55	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,04	0,00
16KK	0,00	2,27	0,08	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,04	0,00	0,03	0,00
20KK	0,00	2,32	0,08	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,05	0,00	0,04	0,00

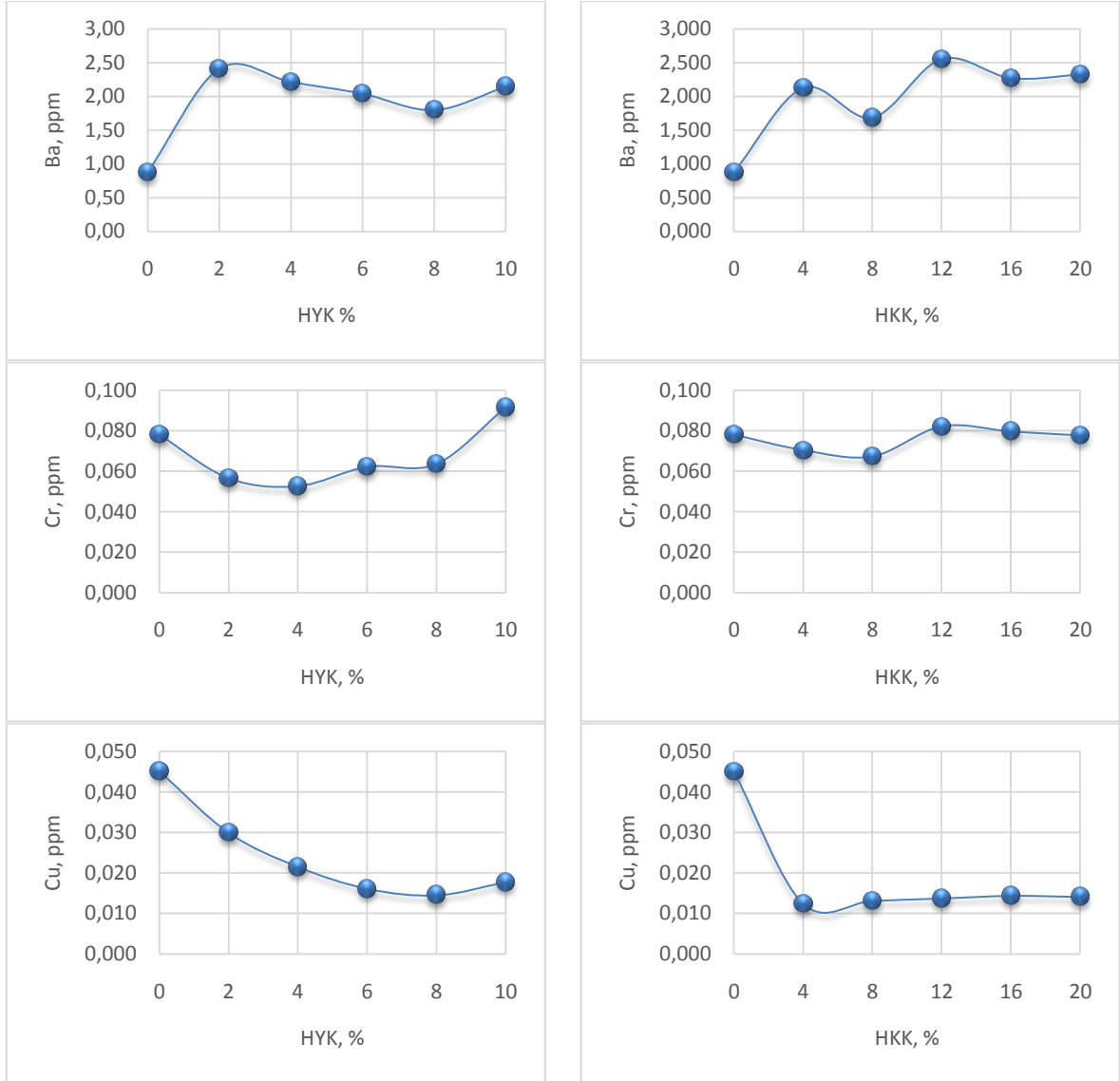
Çizelge 5.22.ye göre tüm proses girdisi numuneler içerisinde en yüksek miktarda bulunan ağır metal Ba'dır. Benzer şekilde katkıli ürünlerde de Ba en yüksek sızmaya sahip ağır metaldir. Ba için en düşük sızma değerine ulaşılan katkı oranı %8'dir. Ba'yı HYK içerisinde bulunma oranı olarak sırasıyla Cr, Ni, Pb, Sb, Zn ve Cu takip etmektedir. Katkıli ürünlerde ağır metal sızmaları da aynı sıraya sahiptir. 8YK ürününde Cr, Pb, Zn ve Cu ağır metalleri Ba gibi ürünün matris yapısında büyük oranda tutulma gösterirken, Ni ve Sb'nin tamamının bu yapıda tutulması sağlanmıştır.

Çizelge 5.26. HYK katkıli numuneler için ağır metal sızmaları

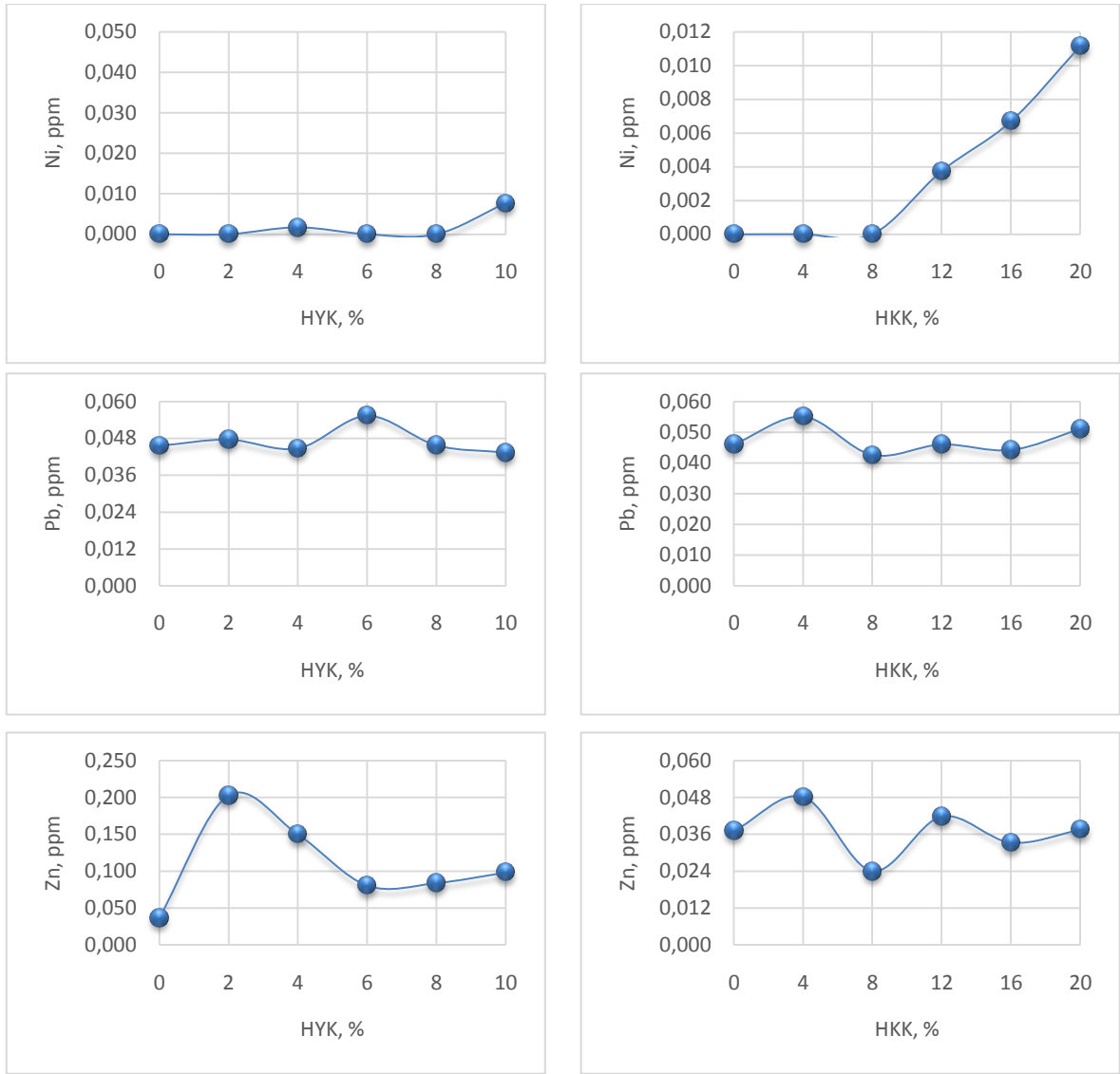
Numune	Ağır Metal, mg/L											
	As	Ba	Cr	Cd	Cu	Hg	Ni	Mo	Pb	Sb	Zn	Se
HYK	0,00	1,23	0,03	0,00	0,08	0,00	0,16	0,000	0,16	0,00	0,11	0,00
0YK	0,00	0,88	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,000	0,05	0,00	0,04	0,00
2YK	0,00	2,41	0,06	0,00	0,03	0,00	0,00	0,000	0,05	0,00	0,20	0,00
4YK	0,00	2,21	0,05	0,00	0,02	0,00	0,00	0,000	0,04	0,00	0,15	0,00
6YK	0,00	2,04	0,06	0,00	0,02	0,00	0,00	0,000	0,06	0,00	0,08	0,00
8YK	0,00	1,80	0,06	0,00	0,01	0,00	0,00	0,000	0,05	0,00	0,08	0,00
10YK	0,00	2,14	0,09	0,00	0,02	0,00	0,00	0,000	0,04	0,00	0,10	0,00

HYK katkılı ürünlerde de en yüksek ağır metal sızması Ba'ya aittir. Ba için en yüksek tutulma %8 katkı oranında sağlanmıştır. Ba'yı Cr, Ni, Pb, Zn ve Cu takip etmektedir. Bu ağır metaller için de benzer şekilde proses ürünlerinin matris yapısı içerisinde etkin bir tutulma sağlanmıştır. Ni tamamen tutulmuşken, Cr, Pb, Zn ve Cu için de yüksek oranda tutulmaya ulaşılmıştır.

Numuneler için tekil ağır metal sızmalarına ait grafikler Şekil 5.19.da yer almaktadır.



Şekil 5.14. Katkılı numunelerin tekil ağır metal sızma grafikleri



Şekil 5.14. Katkılı numunelerin tekil ağır metal sızma grafikleri (devam)

Katkı oranlarının ağır metal taşınması üzerindeki etkisinin istatistiki olarak değerlendirilmesi amacıyla tek yönlü ANOVA yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 5.27.de verilmiştir.

Çizelge 5.27. Katkı oranı ile ağır metal salınımları değişimi tek yönlü ANOVA sonuçları

Metal	Varyans Kaynağı	dF	SS	MS	F	P- değeri
As,ppm	Gruplar arasında	1	0,0000	0,000000	0,6879	0,4283
	Gruplar içinde	9	0,00002	0,000000		
	Toplam	10	0,00002			
Ba,ppm	Gruplar arasında	1	1,48573	1,486080	21,0442	0,0013
	Gruplar içinde	9	0,63569	0,070617		
	Toplam	10	2,12143			
Cr,ppm	Gruplar arasında	1	0,00005	0,000052	0,3619	0,5623
	Gruplar içinde	9	0,00130	0,000145		
	Toplam	10	0,00135			
Cd,ppm	Gruplar arasında	1	0,00000	0,000000		
	Gruplar içinde	9	0,00000	0,000000		
	Toplam	10	0,00000			
Cu,ppm	Gruplar arasında	1	0,00005	0,000053	1,8459	0,2073
	Gruplar içinde	9	0,00026	0,000029		
	Toplam	10	0,00031			
Hg,ppm	Gruplar arasında	1	0,00000	0,000000		
	Gruplar içinde	9	0,00000	0,000000		
	Toplam	10	0,00000			
Ni,ppm	Gruplar arasında	1	0,00001	0,000005	0,3461	0,5708
	Gruplar içinde	9	0,00013	0,000015		
	Toplam	10	0,00014			
Mo,ppm	Gruplar arasında	1	0,00001	0,000000	0,5241	0,581
	Gruplar içinde	9	0,00001	0,000000		
	Toplam	10	0,00002			
Pb,ppm	Gruplar arasında	1	0,00000	0,000004	0,1814	0,6802
	Gruplar içinde	9	0,00019	0,000021		
	Toplam	10	0,00020			
Sb,ppm	Gruplar arasında	1	0,00000	0,000000	0,3313	0,579
	Gruplar içinde	9	0,00001	0,000001		
	Toplam	10	0,00001			
Zn,ppm	Gruplar arasında	1	0,00170	0,001696	0,5092	0,4936
	Gruplar içinde	9	0,02998	0,003331		
	Toplam	10	0,03167			
Se,ppm	Gruplar arasında	1	0,00000	0,000000	0,0909	0,7699
	Gruplar içinde	9	0,00000	0,000000		
	Toplam	10	0,00000			

Elde edilen katkılı ürünlerde katkı oranının metal sızmalarına etkisini değerlendirmek için yapılan tek yönlü ANOVA sonuçlarının yer aldığı Çizelge 5.27.de yer alan verilere göre Ba açısından anlamlı bir fark ($P<0,05$) elde edilmiştir.

5.4. Numunelerin Depolanabilirliklerinin Değerlendirilmesi

Numuneler için ADDDY kapsamında ilgili parametrelerle depolanabilirlik değerlendirmesi yapılmıştır. Bu doğrultuda Çizelge 5.28.de yer alan sınır değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5.28. ADDY uyarınca DDT sınır değerleri

Parametre	Birim	Sınır Değer		
		I. Sınıf DDT	II. Sınıf DDT	III. Sınıf DDT
As	mg / lt	2,5	0,20	0,050
Ba	mg / lt	30,0	10,00	2,000
Cd	mg / lt	0,5	0,10	0,004
Cr, toplam	mg / lt	7,0	1,00	0,050
Cu	mg / lt	10,0	5,00	0,200
Hg	mg / lt	0,2	0,02	0,001
Mo	mg / lt	3,0	1,00	0,050
Ni	mg / lt	4,0	1,00	0,040
Pb	mg / lt	5,0	1,00	0,050
Sb	mg / lt	0,5	0,07	0,006
Se	mg / lt	0,7	0,05	0,010
Zn	mg / lt	20,0	5,00	0,400
ÇOK	mg / lt	100	80	50
TÇK	mg / lt	10000	6000	400
TOK	% veya mg/kg	6%	5%	30000
BTEX	mg/kg	-	-	6
PCB'ler	mg/kg	-	-	1
Mineral yağ	mg/kg	-	-	500

Çalışma girdisi numunelerin ağır metal içerikleri açısından ADDDY kapsamında DDT uygunlukları Çizelge 5.29.da değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.29. Girdi numunelerin depolanabilirliklerinin değerlendirilmesi

Parametre	HYK	HKK	Çimento	Kum	Şahit Harç
As,mg/L	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Ba,mg/L	III. Sınıf	I. Sınıf	II. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Cr,mg/L	III. Sınıf	II. Sınıf	II. Sınıf	III. Sınıf	II. Sınıf
Cd,mg/L	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Cu,mg/L	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Hg,mg/L	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Ni,mg/L	II. Sınıf	II. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Mo,mg/L	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Pb, mg/L	II. Sınıf	II. Sınıf	II. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Sb, mg/L	III. Sınıf	I. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Zn, mg/L	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
Se, mg/L	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf	III. Sınıf
ÇOK, mg/L	I. Sınıf	I. Sınıf	—	—	—
TÇK	III. Sınıf	III. Sınıf	—	—	—
TOK	III. Sınıf	III. Sınıf	—	—	—
BTEX	III. Sınıf	III. Sınıf	—	—	—
PCB'ler	III. Sınıf	III. Sınıf	—	—	—
Mineral Yağ	—	—	—	—	—

Çizelge 5.9.da çalışma girdisi numuneler ADDY kapsamında ağır metal sızmaları açısından DDT uygunluklarına göre değerlendirildiğinde kumun III. Sınıf DDT'ye, şahit harç, çimento ve yağ kesintinin II. Sınıf DDT'ye, kuru kesintinin ise I. Sınıf DDT'ye uygun olduğu değerlendirilmiştir. Çalışmada çimento, kum ve şahit harcın içermesi beklenmediğinden ÇOK, TÇK, TOK, BTEX, PCB'ler ve mineral yağ için analiz yapılmamıştır. Bu girdilerin sayılan parametreler için III. Sınıf DDT kriterlerine uyduğu varsayımı yapılmıştır. Çalışmada mineral yağ için elde edilen sonuçlar birim ve skala uyumsuzluğundan dolayı değerlendirmeye katılmamıştır.

Elde edilen katılaştırılmış ürünler için ADDDY kapsamında ilgili parametrelerle depolanabilirlik değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu doğrultuda Çizelge 5.8.de yer alan sınır değerler uyarınca değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.28.deki değerler doğrultusunda katılaştırılan ürünlerin depolanabilirlikleri Çizelge 5.29.da verilmiştir.

Çizelge 5.30. S/S ürünü numunelerin ADDY kapsamında değerlendirilmesi

Parametre	HYK					HKK				
	2YK	4YK	6YK	8YK	10YK	4KK	8KK	12KK	16KK	20KK
As,mg/L	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
Ba,mg/L	II	II	II	III	II	II	III	II	II	II
Cr,mg/L	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
Cd,mg/L	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
Cu,mg/L	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
Hg,mg/L	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
Ni,mg/L	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
Mo,mg/L	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
Pb, mg/L	III	III	II	III	III	II	III	III	III	II
Sb, mg/L	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
Zn, mg/L	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
Se, mg/L	III	II	III	III	III	III	III	III	III	III
TOK, % veya mg/kg	—	—	—	III	—	—	III	—	—	—
ÇOK, mg/L	—	—	—	II	—	—	II	—	—	—
TÇK, mg/L	—	—	—	III	—	—	III	—	—	—
BTEX, mg/kg	—	—	—	III	—	—	III	—	—	—
PCB'ler, mg/kg	—	—	—	III	—	—	III	—	—	—
Mineral yağ, mg/kg	—	—	—	III	—	—	III	—	—	—

Çalışmada elde edilen tüm numunelerin II. Sınıf DDT'de depolanabilecekleri sonucuna ulaşılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Çalışmada kullanılan HYK, HKK'den daha baziktir, ancak HKK'nin iletkenliği HYK'den daha yüksektir.
- HYK, HKK ve şahit harç numunelerinin XRF yarı kantitatif element analizine göre HYK, HKK ve şahit harçta en yüksek bulunan metaller sırasıyla Ca, Si, Al ve Fe'dir. En yüksek oksitler ise CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃'tür. Çimentonun ana bileşenlerinin Ca, Si, Al ve Fe oksitleri olduğu düşünüldüğünde sondaj kesintisinin de genel kimyasal bileşimi açısından çimentoya benzer olduğu değerlendirilebilir. Aynı analiz sonuçlarında ağır metal içeriklerine bakıldığında ise HYK ve HKK numuneleri Ba, Cr, Cu, Ni ve Zn içerirken, şahit harç numunesinde bu ağır metallere sadece Ba ve Cr bulunduğu görülmüştür.
- Hidrokarbon sondaj kesintisinin çimento ile katkı kullanılması durumunda, üretilen harcın standart çimento kimyasal özelliklerini sağlayıp sağlamadığına dair yapılan değerlendirmede optimum belirlenen ürünlerin (8YK ve 8KK) SO₃ değerleri açısından düşük değerde olmaları, bu parametrelerden kaynaklanabilecek korozyona karşı görece dayanıklı olduklarını göstermektedir; ancak Cl kaynaklı korozyonlar söz konusu olduğunda her iki numune de yüksek değerlere sahiptir. İki numunenin de inşaat yapı malzemesi olarak kullanılmaları halinde Cl kaynaklı korozyondan uzak olabilecekleri bir amaçla kullanılmaları önerilmektedir.
- Çalışmada harç özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan mekanik özellikler ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve atmosferik su emmedir. Çeşitli katkı oranlarıyla yaş ve kurutulmuş hidrokarbon sondaj kesintisi numunelerinin bu mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu verilerle yapılan istatistiksel değerlendirme ile tüm özelliklerin katkı oranı ile belirgin bir şekilde değiştiği sonucuna varılmıştır. Genel eğilim katkı oranı arttıkça değerlerin düşmesi şeklindedir. Ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı için şahit harç en iyi değerlere sahipken, atmosferik su emme için en iyi değer katkılı bir ürün olan 4KK ile elde edilmiştir.
- Ultrases geçiş hızı analizine göre 5 ürün orta kalite beton özelliği göstermektedir (2YK, 4YK, 6YK, 8YK ve 4KK). Diğer ürünler zayıf kalite beton olarak değerlendirilmiştir.

- Eğilme dayanımları açısından HYK katkılı ürünlerden %2 ve 4 katkılılar, HKK katkılı ürünlerden de %4 ve %8 katkılılar şahit harca yakın sonuçlar vermiştir.
- Basınç dayanımı analizine göre şahit harca en yakın değerleri 2YK ve 4KK ile katkı oranı en düşük ürünler vermiştir; ancak 2YK, 4YK ve 6YK ile 4KK ve 8KK ürünleri de 20MPa'dan yüksek değerler vermiştir. 8YK de 19,23 ile 20 MPa değerine çok yakındır.
- Atmosferik su emme analizi açısından ise HYK katkılı ürünler HKK katkılı ürünlerden çok daha düşük sonuçlar vermişlerdir. Hatta 4YK ürününün su emme değeri şahit harcından daha iyidir, ancak optimum belirlenen ürünlerden 8KK, 8YK'den daha düşük yani daha iyi su emme değerlerine sahiptir.
- Dayanım ve dayanıklılık analizlerine dair sonuçların istatistiki değerlendirmesi katkı oranının üretilen harç numunelerinin literatürde benzer çalışmalarda bulunduğu gibi dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir.
- Çalışmada 8YK, 8KK ve şahit harç numunelerinin SEM görüntüleri incelendiğinde en yüksek etrenjit oluşumu 8YK içeren numunede gözlenmiştir. Etrenjit oluşumu beton kalite parametresi olan basınç dayanımını düşüren bir etkidir. Basınç dayanımları kıyaslandığında 8KK'nin daha yüksek basınç dayanımına sahip olması bunu doğrulamaktadır.
- Dayanım ve dayanıklılık testleri açısından genel değerlendirildiğinde 8KK 8YK'ye kıyasla daha uygun bir malzeme olduğu sonucunu vermiştir. .
- XRF yarı kantitatif element analizi ile sızma testi sonuçları karşılaştırıldığında, XRF analizinde bulunan ağır metaller sızma testinde de oransal olarak benzer sonuç vermiştir. Şahit harç hariç tüm numunelerin XRF analizlerinde en yüksek bulunma yüzdesine sahip olan Ba, sızma testi sonuçlarında da en yüksek değeri vermiştir. XRF analizlerinde bulunmayan Cd'a ise sızma testlerinde de rastlanmamıştır.
- Ağır metal sızmalarının istatistiki değerlendirmesinde katkı oranının ağır metal sızmaları açısından anlamlı fark Ba için bulunmuştur. HYK ve HKK numunelerinde Ba'nın en yüksek yer alan ağır metal olmasının bu sonuçta etkili olduğu düşünülmektedir.

- HYK ve HKK eluat sızma sonuçlarına göre HYK ÇOK parametresi açısından tehlikeli, HKK ise Ba, Sb ve ÇOK parametreleri açısından tehlikeli atık sınıfında yer almaktadır. HYK'nin kurutulmasının yapısal matrisini değiştirerek Ba ve Sb tutulmasını artırmış olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca HKK sızma sonuçlarında ölçülen tüm parametrelerde HYK değerlerinden daha yüksek sonuç vermiştir. Bunun nedeni kurutmaya bağlı kütle kaybının su üzerinden olması ve bileşimin daha konsantre hale gelmesidir.
- Proses ürünleri olan HYK ve HKK katkılı katılaştırılmış numunelerin hepsi ağır metal sızmaları açısından tehlikesiz atık olarak değerlendirilmiştir. Tüm katkılı ürünler en az iki ağır metal için (Ba ve Cr) için II. Sınıf DDT'ye uygun olarak değerlendirilirken, 8YK ve 8KK katkılı ürünler sadece bir ağır metal için (sadece Cr) II. Sınıf DDT'ye uygunluk göstermektedir. Bu ürünlerde başta Ba olmak üzere (Cr hariç) tüm ağır metallerde tutulmanın ADDY III. Sınıf DDT limitleri dahilinde başarılı olduğu bulunmuştur.
- Proses ürünlerinden ağır metal sızmaları en iyi sonuç veren 8YK ve 8KK numuneleri, HYK ve HKK girdilerinin tehlikeli sınıfta yer almasına neden olan diğer parametre (ÇOK) açısından ise tehlikesiz sınıfta değerlendirilmiştir. ÇOK giderimi açısından da prosesin başarılı olduğu bulunmuştur.
- Bertaraf edilebilecek miktar, depolanabilirliğe uygunluk (II. Sınıfa uygun sadece 2 parametreye sahip oluş), korozif bileşen içeriği ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda optimum katkı oranı hem HYK hem de HKK için 8 olarak belirlenmiştir.
- 8YK ve 8KK ikili değerlendirmesine göre yukarıda sıralanan depolanabilirlik kriterlerine göre en iyi sonuçları veren numune 8YK'dir. Kesintinin kurutulmadan kullanılması ayrıca kurutma maliyeti gereksinimini de giderecektir.
- Depolanabilirlik kriterleri ve dayanım ve dayanıklılık testleri birlikte değerlendirildiğinde 8KK oranı ile elde edilen ürün daha iyi özellik göstermekle birlikte hem kurutulmuş hem de kurutulmadan kullanılmış sondaj kesintisinden elde edilen ürün, yapı sektöründe düşük dayanım gerektiren alanlarda kullanılabilir alternatif bir malzeme olarak kullanılabilir. Hidrokarbon sondaj kesintisinin

ikincil hammadde olarak kullanımı hidrokarbon sondaj prosesi atıklarının bertarafı konusunda çözüm sunmaktadır.

- Katkı oranının hem ağır metal sızmaları hem de dayanım ve dayanıklılık değerleri üzerinde anlamlı bir fark yaratıyor olması, sondaj kesintilerinin Portland çimentosu ile solidifikasyon/stabilizasyonunun başarılı olduğunu ve üretilen harç ürününün istenilen kullanım yerine göre optimize edilebileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Adegbotolu U V, Njuguna J, Pollar P, Yates K (2014). Waste to Want: Polymer nanocomposites using nanoclays extracted from Oil based drilling mud waste. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering No:64 012023.
- Anastasiadou K, Christopoulos K, Mousios E, Gidarakos E (2012). Solidification/stabilization of fly and bottom ash from medical waste incineration facility. Journal of Hazardous Materials, Vol:207-208 165-170.
- APC (2010). Drilling Fluids Manual. Amoco Production Company.
- ASTM C 642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- ATSDR (1999) Toxicological Profile for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH). U.S. Department of Health and Human Services, 315p, Georgia, USA.
- Bayar S ve Talınlı İ (2006). Zararlı atıkların solidifikasyon/stabilizasyon teknolojisi ile yönetimi. İTÜ Dergisi/D Mühendislik. Cilt 5 Sayı 1, Kısım 2, 281-289.
- Britannica (2018). <https://www.britannica.com/science/hydrocarbon> Erişim Tarihi:19.09.2018.
- British Petrol — BP (2016). Statistical Review of World Energy. BP Global P.L.C.
- Cantarel V, Nouaille F, Rooses A, Lambertin D, Poulesquen A, Frizon F (2015). Solidification/stabilisation of liquid oil waste in metakaolin-based geopolymer. Journal of Nuclear Materials, Vol:464 16-19.
- Carignan M P, Lake C B, Menzies T (2007). Assessment of two thermally treated drill mud wastes for landfill containment applications. Waste Management & Research, Vol: 25 No:5 394-401.
- Choi W H, Lee S R, Park J Y (2009). Cement based solidification/stabilization of arsenic contaminated mine tailings. Waste Management, Vol: 29 Issue:5 1766-1771.
- Conner JR, Hoeffner SL (1998). The History of Stabilization and Solidification Technology. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, Vol:28 No:4 325–396.
- EN 196-2: 2013 - Methods of testing cement-Part 2: Chemical analysis of cement
- European Union (2003). Official Journal of the European Communities, L 11/40
- Fayemiwo O M, Daramola M O, Moothi K (2017). BTEX compounds in water – future trends and directions for water treatment. Water SA, Vol:43 No:4
- Fırat Üniversitesi. Beton Teknolojisi. Beton: Bileşenleri ve Özellikleri Durabilite Özel Betonlar https://abs.firat.edu.tr/upload/user_68/4d65368626305e1f19410f80d57b94cee6d47cae_dosya_68.pdf Erişim Tarihi: 17.09.2018.
- Galiano Y L, Pereira C F, Vale J (2010). Stabilization/solidification of a municipal solid waste incineration residue using fly ash-based geopolymers. Journal of Hazardous Materials, Vol:185 Issue:1 373-381.
- Güler B (2005). Pnarhisar-Saray (Trakya Havzası Kuzeyi) Arasında Yüzeyleyen Soğucak Formasyonun Rezervuar Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Hickenbottom K L, Hancock N T, Hutchings N R, Appleton E W, Beaudry E G, Xu P, Cath T Y (2013). Forward osmosis treatment of drilling mud and fracturing wastewater from oil and gas operations. *Desalination*, Vol: 312 60-66.
- <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eper-chemicals-glossary/benzene-toluene-ethylbenzene-xylenes-as-btex> Erişim Tarihi: 19.09.2018.
- <https://www.epa.gov/pcbs/learn-about-polychlorinated-biphenyls-pcbs> Erişim Tarihi:19.09.2018.
- Hunice S Y, Akgul S, Demir G, Mertoglu B (2012). Solidification/Stabilization of Landfill Leachate Concentrate Using Different Aggregate Materials. *Waste Management*, 32: 1394-1400.
- IFC (2007). Environmental, Health, and Safety Guidelines for Offshore Oil and Gas Development. [http://www.ifc.org/ifcext/enviro.nsf/AttachmentsByTitle/gui_EHSGuidelines2007_OnshoreOilandGas/\\$FILE/Final+-+Onshore+Oil+and+Gas+Development.pdf](http://www.ifc.org/ifcext/enviro.nsf/AttachmentsByTitle/gui_EHSGuidelines2007_OnshoreOilandGas/$FILE/Final+-+Onshore+Oil+and+Gas+Development.pdf) Erişim Tarihi: 21.09.2018
- International Atomic Energy Agency (2002). Guidebook On Non-Destructive Testing Of Concrete Structure. IAEA. 231p. Vienna, Austria.
- Jung S H, Kwon S J (2013). Engineering properties of cement mortar with pond ash in South Korea as construction materials: from waste to concrete. *Central European Journal of Engineering*, Vol:3 No:3 522-533.
- Karamalidis A K, Voudrias E A (2004). Application of Stabilization/Solidification Technology on Oil Refinery Sludge Contaminated by Heavy Metals. *Journal of Environmental Science and Health Part A- Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, Vol: A39 No:4 961-971.
- Karamalidis A K, Psycharis V, Nicolis I, Pavlidou E, Bénazeth S, Voudrias E A (2008). Characterization of Stabilized/Solidified Refinery Oily Sludge and Incinerated Refinery Sludge with Cement Using XRD, SEM and EXAFS. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, Vol: 43 1144-1156.
- Karamalidis A K, Voudrias E A (2007). Release of Zn, Ni, Cu, SO₄²⁻ and CrO₄²⁻ as a Function of pH from Cement-based Stabilized/Solidified refinery oily Sludge and Ash from Incineration of Oily Sludge. *Journal of Hazardous Material*, Vol: 141 591-606.
- Karayolları Genel Müdürlüğü — KGM (2008). Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneylemleri. Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Malzeme Lab. Şubesi Müdürlüğü, 236p.
- Kim E, Cho J, Yim S (2005). Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover. *Cemosphere*, Vol 59, 387-395.
- Liu X (2017). Mud-to-Cement Conversion of Synthetic-Based Drilling Muds using Geopolymers. Doktora Tezi, The Faculty of the Graduate School of The University of Texas, Austin, USA.
- Meriçboyu A, Yavuz N (2011). Enerji Çevre Hukuku Ders Notları. İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.

- Naik TR, Malhotra VM, Popovics JS (2004). The Ultrasonic Pulse Velocity Method. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. Second Ed. Ed: Malhotra V M, Carino N J, 365p. ASTM International. CRC Press LL, Pennsylvania, USA.
- National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) (2000). Concrete in Practice What, Why & How?. Maryland, USA. <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/16p.pdf> Erişim Tarihi: 21.09.2018.
- National Energy Technology Laboratory (NETL) (2008). Drilling Waste Management Technology Descriptions. Argonne National. U.S.Department of Energy. http://www.oilfieldtrash.com/custom/php/files/1252686135Drilling_Waste_Management_Technology_1_.pdf Erişim Tarihi:22.09.2018.
- Neville AM (2011). Properties of Concrete, Fifth Edition. Pearson Education Limited, 867 p, Essex, England.
- Norman JH (2014). Dictionary of Petroleum Exploration, Drilling & Production, 2nd Edition. PennWell Corporation, USA.
- Oreshkin DV, Chebotaev AN, Perfilov VA (2015). Disposal of Drilling Sludge in the Production of Building Materials. Procedia Engineering, Vol:111 607-611.
- Pierce DA, Wood B, Gaddis C (2006). Lessons Learned From Treating 500,000 Tons of Oil-Based Drill Cuttings on Five Continents. IADC/SPE Drilling Conference.
- PİGM (1995). Petrolün Tarihi ve Türkiye’de Açılan Petrol Kuyuları. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- Qian G, Cao Y, Chui P, Tay J (2006).Utilization of MSWI fly ash for stabilization/solidificationof industrial waste sludge. Journal of Hazardous Materials, Vol 129 Issues:1-3 274-281.
- Reis JC (1996). Environmental Control in Petroleum Engineering. Gulf Publishing Company, Houston, USA.
- Rojas-Avelizapa NG, Roldan-Carrillo T, Zegarra-Martinez H, Munoz-Colunga AM, Fernandez-Linares LC (2007). A field trial for an ex-situ bioremediation of a drilling mud-polluted site. Chemosphere, Vol:66 1595-1600.
- Shell (1983). The Petroleum Handbook. 6th Edition, Elsevier, New York, USA.
- Shi C, Fernandez-Jimenez A (2006). Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. Journal of Hazardous Materials, Vol: 137 Issue:3 1656-1663.
- Tay JH (1989). Reclamation of wastewater and sludge for concrete making. Resource Conservation and Recycling, Vol:2, 211-227.
- T.C. Resmi Gazete. Atık Yönetimi Yönetmeliği. 29314, 2015.
- T.C. Resmi Gazete. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. 27533, 2010.
- T.C. Resmi Gazete. Maden Atıkları Yönetmeliği, 29417, 2015.
- Tınmaz Köse E, Akyıldız A, Yıldız A (2013). Recycling of Coal Ash as a Building Material via a Stabilization/Solidification Method. Global Nest Journal, Vol 15 No 4: 485-493.

- Tınmaz Köse E, Akyıldız A (2017). Kırmızı Çamurun Çimento Bazlı Solidifikasyon/Stabilizasyonu: Ağır Metallerin Sızma Özellikleri. Pamukkale Univ. Müh. Bilim Derg, Vol 23 No 6: 741-747.
- Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı —TPAO (2015). Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu.
- Türk Standartları Enstitüsü —TS 706 EN 12620+A1: 2009 Beton agregaları
- TS EN 1008:2003 Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları.
- TS EN 12457/1-4:2004 Atıkların nitelendirilmesi ve değerlendirilmesi.
- TS EN 196-1: 2016 Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini.
- TS EN 197-1:2012 Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri.
- TS EN 206:2013+A1: 2017 Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk.
- Uçaroğlu S, Talınlı İ (2002). Otomotiv endüstrisi zararlı atıklarının solidifikasyonu ve geri kazanımı. İTÜ Dergisi/d Mühendislik, Cilt:1 Sayı:2 39-50.
- United Nations Environment Programme — UNEP (2001).The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Geneva, Switzerland.
- US Environmental Protection Agency — USEPA (1991). Stabilization/Solidification Processes for Mixed Waste. Report no. EPA 402- R- 96- 014. US Environmental Protection Agency, Office of Environmental Restoration, USA.
- USEPA (1996). SW-846: Test Methods for Evaluating Solid Wastes, 3rd Ed., U.S. EPA Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, D.C., USA.
- USEPA (2009). Technology Performance Review: Selecting and Using Solidification/Stabilization Treatment for Site Remediation, National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development. Ohio, USA.
- USEPA (2014). Evaluation of impacts to underground sources of drinking water by hydraulic fracturing of coalbed methane reservoirs. Report no. EPA 816- R- 04- 003. US Environmental Protection Agency, Office of Groundwater and Drinking Water, USA
- Woodside Energy Ltd (2012). Riserless Mud Recovery. Fact Sheet. http://www.woodside.com.au/Working-Sustainably/Technology-and-Innovation/Documents/Riserless_Mud_Recovery_fact_sheet.pdf Erişim Tarihi: 23.09.2018.
- Xie S X, Jiang G C, Chen M, Li Z Y, Mao H, Zhang M, Li Y (2015). Treatment Technology for Waste Drilling Fluids in Environmental Sensitivity Areas. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol:37 817-824.
- YAPICHEM (2014). Beton Teknisyeni El Kitabı http://www.yapichem.com.tr/Upload/User/BetonTeknisyen_convert.pdf Erişim Tarihi:13.09.2018.
- Zoveidavianpoor M, Samsuri A, Shadizeh S R (2012). Overview of Environmental Management by Drill Cutting Re-Injection Through Hydraulic Fracturing in Upstream

Oil and Gas Industry. Sustainable Development, Ed: S. Curkovic, IntechOpen, 389-410.

Bölmeler	Gruplar	0100	0104	0105	0106	0107	0108	0109	0110	0111	0112	0113	0114
01	0101	...	0103	0105	0106	0107	0108	0109	0110	0111	0112	0113	0114
Madençik	Kazı işleri	Metal içeren madde içeren	Metal içeren	Sarıya çamurları									
02	0201	0202	0204	0205	0206	0207							
Terim	Elhayvan	Alkaloit	Sular	Sü	Yıllık mamüller	İçecekler							
03	0301	0302	0303										
Teknik	İşleme	Koruma	Kesit										
04	0401	0402											
denkleme	Tesviye												
05	0501	...	...	...	0504	0507	...						
Perforasyon	Rafineri				proje	Diğer gaz							
06	0601	0602	0603	0604	0605	0606	0607	0608	0609	0610	0611	0613	
Organik kimya	Azotlu FTK	Bazı FTK	Tuzlu FTK	Metal içeren sıvılar	Akış su çamuru	FTK Selenidy	Hidrojen FTK	Silikon FTK	P-kimya FTK	N-kimya FTK	Pigmentler	...	b.b.b.
07	0701	0702	0703	0704	0705	0706	0707						
Organik kimya	Temel kimyasallar	Plastikler FTK	Pigmentler FTK	PPP FTK	Farmasötikler FTK	FTK yağlar	b.b.b. FTK						
08	0801	0802	0803	0804	0805								
Kaplamalar	Boyalar FTK	Kaplamalar FTK	FTK baskı mürekkepleri	FTK yapıştırıcılar	b.b.b.								
09	0901												
Fotograf													
10	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013
Malzemeler	Güç elemanları	Çelik	Alüminyum	Pb-metali	Zn-metali	Cu-metali	Diğer metaller	Ni-metali	Fe-ösküm	Ni-ösküm	cam	seramik	çimento
11	1101	1102	1103	...	1105								
12	1201	...	1203										
Sevileme													
13	1301	1302	1303	1304	1305	...	1307	1308					
Akış	Hidrolik yağ	Motor yağ	boya yağ	Serine yağ	Yağ-su ayırıcı		Suy. yağlar	b.s.b.					
14	...	...	...	...	...	1406							
Çözümler						Organik çözümler							
15	1501	1502											
Polimerler	Polimerler	Çalgımlar											
16	1601	1602	1603	1604	1605	1606	1607	1608	1609	1610	1611		
b.b.b.	Uçucu organik	Elektronik	Elektronik	belirli	gazlar, kimyasallar	filizler	Tanık kimyasallar	katılaşıcılar	Duyulabilir maddeler (concentrate)	Yoğunlaştırma	asitler		
17	1701	1702	1703	1704	1705	1706	...	1708	1709				
Yağlar	Beton, çimento	Akış su çamuru	Karbon içeren sıvılar	metaller	toprak	kozmetik, sabun	b.s.b.						
18	1801	1802											
İlaç	İlaçlar	Veterinerlik											
19	1901	1902	1903	1904	1905	1906	1907	1908	1909	1910	1911	1912	1913
Arım	Akış su çamuru	Kimyasal kazeol	Stabilize katı atıklar	Sıvı atıklar	Araçlık atım	Araçlık atım	Sıvı atım	Akış su atımı	Su hazırlama	Pancalama atık	Akış su atımı	Mekanik atım	Remedasyon
20	2001	2002	2003										
Enzimatik	Arım	Bazı atıklar	Bazı atıklar										

AYY atık sınıflandırma bölümleri ve alt grupları

ÖZGEÇMİŞ

Ezgi Fazlıoğlu 1987 yılında Keşan'da doğdu. İlköğretimini Keşan'da, ortaöğrenimini Çanakkale Fen Lisesi'nde tamamladı. Liseden mezun olduğu yıl Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Lisans eğitimini 2013 yılında tamamladı. 2015-2018 yılları arasında Keşan Belediyesi'nde Kimya Mühendisi olarak çalıştı. C Sınıfı İş Güvenliği Uzmanı yetki belgesine sahiptir. İyi derecede İngilizce ve orta derecede Japonca bilmektedir.