

**ALTERNATİF YAKIT KULLANILARAK ÜRETİLEN ÇİMENTODAN  
MAMUL BETONARME SU YAPILARINDA ESER ELEMENT ÖZÜTLEME  
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Mete Emre ERGÜÇLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Arzu ÇİÇEK**

**Eskişehir**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Mayıs, 2016**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mete Emre ERGÜÇLÜ'nün "Alternatif Yakıt Kullanılarak Üretilen Çimentodan Mamul Betonarme Su Yapılarında Eser Element Özütleme Karakteristiklerinin İncelenmesi" başlıklı tezi 24/05/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

|                     | Unvanı-Adı Soyadı            | <u>İmza</u> |
|---------------------|------------------------------|-------------|
| Üye (Tez Danışmanı) | : Prof. Dr. Arzu ÇİÇEK       | .....       |
| Üye                 | : Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN  | .....       |
| Üye                 | : Yrd. Doç. Dr. Esengül KÖSE | .....       |

.....

Enstitü Müdürü

## ÖZET

### ALTERNATİF YAKIT KULLANILARAK ÜRETİLEN ÇİMENTODAN MAMUL BETONARME SU YAPILARINDA ESER ELEMENT ÖZÜTLEME KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mete Emre ERGÜÇLÜ

Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 2016

Danışman: Prof. Dr. Arzu ÇİÇEK

Çimento; hammaddesi doğal kayalar olan, üretimi enerji yoğun olarak tanımlanan hidrolik bağlayıcı yapı malzemesidir. Çimento yarı mamulü olan klinker; kalker, kil, demir cevheri, marn gibi doğal hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile üretilmektedir. Klinker üretiminde kömür, petrol koku, doğal gaz vb. fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Sektörde gerekli yasal izinleri alan fabrikalar tarafından evlerden ve endüstriden kaynaklanan atıkların bir bölümü, artan enerji maliyetleri, enerjide dışa bağımlılığın azaltılması ve atıkların çevreye olan zararının minimize edilmesi amacı ile alternatif yakıt olarak kullanılabilir.

Özellikle son yıllarda gelişen teknoloji ve ilgili konuda yapılan yatırımlar ile, yakıt ısı gücünün önemli bölümünü alternatif yakıtlardan sağlayan çimento fabrikalarının sayısı artmıştır. Çimento Endüstrisi atık yönetiminde ülke ekonomisine önemli faydalar sağlamaktadır.

Dünyada örnekleri uzun yıllardır süre gelen alternatif yakıt kullanım operasyonları, teknolojinin getirdiği imkânlar ile yüksek ikame oranlarına ulaşmıştır. Avrupa’da, yüksek ikame oranlarının son ürün olan betona etkisinin incelenmesi amacı ile birçok çalışma yapılmış, özellikle özütleme (leaching) karakteristiklerinin belirlenmesi için laboratuvar ölçekli metodolojiler geliştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, özütleme (leaching) konusunda yapılmış çalışmaları ve yöntemleri referans olarak, Amerikan Çevre Koruma Ajansı tarafından yayınlanan EPA Yöntem 1315 bu çalışma kapsamında kullanılmış; “alternatif yakıt kullanılarak üretilen çimentodan mamul betonarme su yapılarında eser element özütleme karakteristikleri” incelenmiştir. Elde edilen veriler, yerel ve uluslararası İçme ve Kullanma Suyu Standartları ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Alternatif Yakıt, Beton, Çimento, Klinker, Özütleme

## **ABSTRACT**

### **RESEARCH ON TRACE ELEMENTS LEACHING CHARACTERISTICS OF CONCRETE WATER TANKS WHICH CONSTRUCTED WITH ALTERNATIVE FUEL USED CEMENT IN ITS PRODUCTION PROCESS**

Mete Emre ERGÜÇLÜ

Department of Environmental Engineering

Anadolu University, Graduate School of Science May, 2016

Supervisor: Prof. Dr. Arzu ÇİÇEK

Cement is a hydraulic binder which produced with natural resources and its sector defined energy intensive industry.

Clinker, semi-finished product of cement, produces in high temperature with firing of raw materials as limestone, clay, iron ore and marl. Fossil fuels; coal, petroleum coke, natural gas, conventionally use in clinker production. Likewise, reasons which are increasing of energy costs, decreasing of dependence of foreign sources and minimizing of environmental hazards of wastes, a part of domestic and industrial waste can be used by cement industry as secondary fuels.

Recent years in Turkey, number of cement plants that are using alternative fuels, increased with technological improvements and regarding investments. Cement industry contributed economic benefits for waste management policy of country.

In the World, most of cement plants reached high substitution rates for secondary fuel usage. Especially in European countries, various studies are made for researches which are related with effects of high substitution rates on concrete. And many laboratory scale methodologies are improved for detecting leaching characteristics of cement.

EPA Method 1315 was published by American Environmental Protection Agency (EPA) for determination of leaching characteristics of cement mortar. In this study, method used for trace elements leaching characteristics of concrete water tanks which constructed with alternative fuel used cement. Investigated data by analysis of trace elements are compared local and international drinking water standards.

**Keywords:** Alternative Fuels, Cement, Clinker, Concrete, Leaching

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleőtirilmesi esnasında emeği geçen Danıőmanım Sn. Prof. Dr. Arzu ÇİÇEK'e, desteklerini hiçbir zaman eksiltmeyen eőim ve kızıma, manevi destekleri her zaman hissettiğim annem ve babama, beton numunelerinin hazırlanması surecinde yardımlarını esirgemeyen Sn. Songül BİLGE ve ekibine, numunelerin hazırlanmasından deney surelerinin takibine kadar yanımda olan yöneticilerime ve çalışma arkadaőlarıma, imento sanayi uygulamalarında evre Yönetimi alanında bilgisine her zaman baővurduęum Sn. Canan DERİNÖZ GENCEL'e, su numunelerinin analizlerinde emeği geçen Anadolu niversitesi evre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi Personeline teşekkür ederim.

Mete Emre ERGCL

24 /05/2016

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....

Mete Emre ERGÜÇLÜ

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|  |      |
|--|------|
| BAŞLIK SAYFASI .....   | i    |
| JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI .....  | ii   |
| ÖZET .....   | iii  |
| ABSTRACT .....   | iv   |
| TEŞEKKÜR .....   | v    |
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....  | vi   |
| İÇİNDEKİLER .....  | vii  |
| TABLolar DİZİNİ .....  | x    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....  | xi   |
| GÖRSELLER DİZİNİ .....   | xii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....   | xiii |
| 1. GİRİŞ .....   | 1    |
| 2. ÇİMENTO VE BETON ÜRETİMİ HAKKINDA TEKNİK BİLGİLER .....                                       | 3    |
| 2.1. Çimento Nedir? Nasıl Üretilir? .....  | 3    |
| 2.1.1. Hammadde üretimi .....  | 4    |
| 2.1.2. Yakıt hazırlama .....   | 6    |
| 2.1.3. Klinker üretimi .....   | 8    |
| 2.1.4. Çimento üretimi ve çimento tipleri .....  | 12   |
| 2.2. Çimento Sanayiinde Kontrol Altında Tutulan Çevresel Unsurlar .....                          | 15   |
| 2.2.1. Hava kirliliği .....  | 15   |
| 2.2.2. Su yönetimi .....   | 21   |
| 2.2.3. Gürültü kontrolü .....  | 21   |
| 2.2.4. İklim değişikliği .....   | 22   |
| 2.2.5. Atık yönetimi .....   | 24   |
| 2.3. Çimento Sanayinde Atıkların Alternatif Yakıt Ve Hammadde Olarak Kullanımı .....             | 24   |
| 2.4. Alternatif Yakıt ve Hammadde Kullanımının Çimento Üretimi Kaynaklı Emisyonlara Etkisi ..... | 28   |
| 2.5. Beton nedir? Nasıl Üretilir? .....  | 29   |
| 2.5.1. Çimento su ile karıştırılınca ne olur? .....  | 30   |
| 2.5.2. Beton üretimi .....   | 30   |

|   |    |
|---|----|
| 2.5.3. Beton karışım suyu .....                                       | 32 |
| 2.6. Beton üretiminde kontrol altında tutulan çevresel unsurlar ..... | 33 |
| 2.7. Analiz Edilen Parametrelerin Toksikolojik Etkileri.....          | 34 |
| 2.7.1. Demir (Fe).....  | 34 |
| 2.7.2. Alüminyum (Al) .....   | 35 |
| 2.7.3. Bor (B).....   | 36 |
| 2.7.4. Çinko (Zn) .....   | 37 |
| 2.7.5. Kurşun (Pb) .....  | 37 |
| 2.7.6. Gümüş (Ag) .....   | 38 |
| 2.7.7. Bakır (Cu).....  | 39 |
| 2.7.8. Krom (Cr).....   | 40 |
| 2.7.9. Sodyum (Na).....   | 40 |
| 2.7.10.Arsenik (As) .....   | 41 |
| 2.7.11.Kadmiyum (Cd).....   | 43 |
| 3. YÖNTEM.....  | 45 |
| 3.1. Özütleme (leaching) Test Yöntemleri.....                         | 45 |
| 3.2. Uygulanacak Yöntemin Seçimi .....                                | 47 |
| 3.3. Yöntemin Özeti.....  | 49 |
| 3.4. Girişimler .....   | 49 |
| 3.5. Ekipman ve Malzemeler .....                                      | 49 |
| 3.5.1. Numune tutucu.....   | 49 |
| 3.5.2. Özütleme tankı .....   | 50 |
| 3.5.3. Özütleme düzeneği .....  | 50 |
| 3.6. Reaktifler ve Standartlar.....                                   | 52 |
| 3.7. Numune Alma, Koruma ve Depolama .....                            | 53 |
| 3.8. Kalite Kontrol.....  | 53 |
| 3.9. Kalibrasyon ve Standardizasyon .....                             | 53 |
| 3.10.Deney Prosedürü .....  | 53 |
| 3.10.1.Monolitik numunelerin hazırlanması.....                        | 53 |
| 3.10.2.Eluat değişim süreleri .....                                   | 54 |
| 4. BULGULAR VE YORUM.....   | 55 |
| 4.1. Ölçüm ve Analizler.....  | 60 |



|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.2. Beton Numuneleri ile Elde Edilen Verilerin Şehir Şebekelerinde Kullanılan Su Deposu Boyutlarında Değerlendirilmesi .....</b> | <b>66</b> |
| <b>5. SONUÇ.....</b>   | <b>70</b> |
| <b>KAYNAKÇA.....</b>   | <b>71</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>  |           |

## TABLULAR DİZİNİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| <b>Tablo 3.1</b> Numune Değişim Çizelgesi .....   | 54           |
| <b>Tablo 4.5.</b> Numune Ağırlıkları.....   | 63           |
| <b>Tablo 4.6.</b> Özütleme Aralıklarına Göre Numune Ağırlıkları .....   | 64           |
| <b>Tablo 4.7.</b> Özütleme Aralıklarına Göre pH Değerleri.....  | 64           |
| <b>Tablo 4.8.</b> Özütleme Aralıklarına Göre ORP Değerleri.....   | 65           |
| <b>Tablo 4.9.</b> Tespit Edilen Eser ve Makro element Konsantrasyon Değerleri.....  | 66           |
| <b>Tablo 4.10.</b> Birim Alan Başına Özütlenen Eser ve Makro Element Konsantrasyon Değerleri .....  | 67           |
| <b>Tablo 4.11.</b> 500 m <sup>3</sup> Hacimli Betonarme Su Deposu için Özütleme Konsantrasyon Değerlerinin İçme Suyu Referans Değerleri ile Karşılaştırılması ..... | 69           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 2.1 Çimento Üretimi Akış Şeması.....  | 4            |
| Şekil 2.2. Döner Fırın Ünitesi.....   | 8            |
| Şekil 2.3. Klinkerleşme Reaksiyonları .....   | 11           |
| Şekil 2.4. 2012 Yılı Toplam Sera Gazı Emisyonlarının Dağılımı .....   | 23           |
| Şekil 2.5. 2012 Yılında AB28 Ülkelerinde Kullanılan Alternatif Yakıtların Toplam Isıl Güce Oranı .....      | 26           |
| Şekil 2.6.2012-2014 Yılları Arasında Türkiye’de Alternatif Yakıt ve Hammadde Kullanım Oranları .....        | 26           |
| Şekil 2.7.Alternatif Yakıt Kullanımının İnsinerasyon Sistemlerine Göre Sera Gazı Emisyonlarına Etkisi ..... | 27           |
| Şekil 2.8. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Hacimsel Oranları.....                                  | 31           |
| Şekil 2.9. Hazır Beton Üretimi .....  | 32           |
| Şekil 4.1. Özütleme Aralıklarına Göre Numune Ağırlıklarındaki Değişim .....                                 | 60           |
| Şekil 4.2. Özütleme Aralıklarına Göre Numune pH Değerlerindeki Değişim.....                                 | 61           |
| Şekil 4.3. Özütleme Aralıklarına Göre Numune ORP Değerlerindeki Değişimi .....                              | 61           |
| Şekil 4.4. Özütleme Aralıklarına Göre Numune Sıcaklık Değerlerindeki Değişim.....                           | 62           |

## GÖRSELLER DİZİNİ

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| <b>Görsel 2.1</b> Çimento Üretiminde Ana Bileşen Kalkerin İstihraç Edildiği Açık Ocak İşletmesi ..... | 5                   |
| <b>Görsel 2.2.</b> Alev Borusu.....   | 7                   |
| <b>Görsel 2.3.</b> Klinker.....   | 12                  |
| <b>Görsel 2.4.</b> Çimento Değirmeni .....  | 13                  |
| <b>Görsel 3.1.</b> Numuneler ve Numune Tutucu .....   | 48                  |
| <b>Görsel 3.2.</b> Numune Tutucu .....  | 51                  |
| <b>Görsel 3.3.</b> Özütleme Sıvısı (Eluat) Değişimi.....  | 51                  |
| <b>Görsel 3.4.</b> Numune Hazırlama (Filtrasyon).....   | 52                  |
| <b>Görsel 3.5.</b> pH Ölçüm Düzeneği .....  | 52                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                 |   |
|-----------------|---|
| <b>AAS</b>      | : Atomic Adsorption Spectrometry (Atomik Adsorpsiyon Spektrometrisi)  |
| <b>AB</b>       | : Avrupa Birliği  |
| <b>ANSI</b>     | : American National Standards Institute (Amerikan Ulusal Standart Enstitüsü)  |
| <b>ATY</b>      | : Atıktan Türetilmiş Yakıt  |
| <b>BMDL</b>     | : Lower confidence limit on the benchmark zone (karşılaştırma bölgesinde en düşük güven seviyesi)   |
| <b>CEN</b>      | : European Committee Standardization (Avrupa Standardizasyon Komitesi)  |
| <b>DEV – S4</b> | : Deutsches Einheitsverhaffen / S4 (Alman Standardı S4)   |
| <b>FAO</b>      | : United Nations Food and Agriculture Organization (Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü)   |
| <b>HDPE</b>     | : High Density Poly Ethylene (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)   |
| <b>HPLC</b>     | : High performance liquid chromatography (Yüksek performans sıvı kromatografi)  |
| <b>IARC</b>     | : International Agency for Research on Cancer (Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı)  |
| <b>ICP MS</b>   | : Inductively coupled plasma mass spectrometry (İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma Kütle Spektrometrisi)                                    |
| <b>IPCS</b>     | : International Programme on Chemical Safety (Uluslararası Kimyasal Güvenlik Programı)  |
| <b>IQ</b>       | : Intelligence quotient (zeka katsayısı)  |
| <b>JECFA</b>    | : Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (Gıda Katkıları Hakkında BM Gıda ve Tarım Örgütü/Dünya Sağlık Örgütü Ortak Uzman Komitesi) |
| <b>L/A</b>      | : Liquid/Area (Birim Alan için Hacim)   |
| <b>LOELs</b>    | : Lowest observed effect levels (en düşük gözlemlenen etki seviyesi)  |
| <b>NEN</b>      | : Nederlands Normalisatie Instituut (Hollanda Standartları Enstitüsü)   |
| <b>NOAEL</b>    | : No observed adverse effect level (gözlenmeyen yan etki seviyesi)  |
| <b>NOELs</b>    | : No observed effect limit (gözlenmeyen etki seviyesi)  |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>NO<sub>x</sub></b> | : Azot Oksitler   |
| <b>NTP</b>            | : USA National Toxicology Program (ABD Ulusal Toksikoloji Programı)                           |
| <b>NVN</b>            | : Nederlandse Voor Norm (Hollanda Standardı)  |
| <b>ORP</b>            | : Oxidation Reduction Potential (Oksidasyon İndirgeme Potansiyeli)                            |
| <b>PC</b>             | : Polycarbonate (Polikarbon)  |
| <b>PCDD/PCDF</b>      | : Dioksin ve Furan  |
| <b>PMTDI</b>          | : Provisional maximum tolerable daily intake(geçici maksimum izin verilebilir günlük alım)    |
| <b>PP</b>             | : Polypropylene (Polipropilen)  |
| <b>PTMI</b>           | : Provisional tolerable monthly intake (geçici izin verilebilir aylık malım)                  |
| <b>PTWI</b>           | : Provisional tolerable weekly intake (geçici izin verilebilir haftalık alım)                 |
| <b>PVC</b>            | : Polyviynl chloride (Polivinil klorür)   |
| <b>SO<sub>x</sub></b> | : Kükürt Oksitler   |
| <b>TCLP</b>           | : Toxicity Characteristic Leaching Procedure (Özütleme Prosedüründe Toksisite Karakteristiği) |
| <b>TÇMB</b>           | : Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği   |
| <b>THBB</b>           | : Türkiye Hazır Beton Birliği   |
| <b>TCLP</b>           | : Toxicity Characteristic Leaching Procedure (Özütleme Prosedüründe Toksisite Karakteristiği) |
| <b>TS EN</b>          | : Türk Standardı Avrupa Normu   |
| <b>TVA</b>            | : Technische Verordnung Abfälle (Atıklar Hakkında Yasal Düzenleme)                            |

## 1. GİRİŞ

Çimento, hammaddesi doğal kayalar olan ve bileşimini dört temel ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) oksit oluşturduğu bilinen ve kullanımı en yaygın yapı malzemesidir.

Modern çimento üretimi, hammaddenin tesislere en yakın lokasyonlardan çıkarılarak öğütülüp homojene edildiği, öğütülen hammaddenin özel olarak tasarlanmış döner fırınlarda pişirildiği ve üretilen yarı mamulün çeşitli katkı malzemeleri ile öğütülerek çimento adı ile piyasaya arz edildiği süreçleri bünyesinde ihtiva etmektedir.

Çimento yarı mamulü olan klinkerin üretimi, çimento fabrikalarının en önemli bileşenidir. Klinker üretimi değirmenlerde öğütülen hammaddenin kalsine edilmesi ve pişirilmesi süreçlerini ihtiva etmektedir. Proses kalsinasyon sürecinde ortalama  $800-900\text{ }^\circ\text{C}$ , pişirme sürecinde ortalama  $1.350-1.450\text{ }^\circ\text{C}$  mertebesinde sıcaklığa ihtiyaç duymaktadır. Söz konusu sıcaklıkların eldesinde fosil yakıtlar kullanılmakta, yakıtın türü (kömür, fuel oil, doğalgaz, vb.) proses tipine göre değişiklik göstermektedir.

Üretimde kullanılan enerjinin yanında en önemli tüketim kalemi her biri doğal kayaç olan hammaddelerdir. Hammaddeler kullanım yoğunluğu ve sıklığına göre kalker, kil, demir cevheri, alçı ve tras (puzollan) olarak sıralanabilmektedir. Hammaddelerin çıkarıldığı ocaklar süreklilik ve maliyet gerekçeleri nedeni ile çimento fabrikalarının kurulu bulunduğu lokasyonlara yakın bölgelerden seçilmektedir.

Çimento sanayinin bilinen en önemli çevre boyutları doğal kaynak kullanımı ve fosil yakıt tüketimidir. Son yıllarda artan enerji maliyetleri ve iklim değişikliğinin etkileri nedeni ile ülkemizde ve dünyada çimento üretiminde kullanılan doğal kayaç ve fosil yakıtlara ikame edebilecek alternatif yakıt ve hammaddelerin kullanımına ağırlık verilmiştir.

Çimento üretiminde kullanılan konvansiyonel yakıtlara ikame edebilecek alternatif yakıtlar, çeşitli sanai faaliyetler ve insani tüketim nedeni ile oluşan tehlikeli ve tehlikesiz özelliğe sahip atıklardır. Kullanılan alternatif yakıtların en önemli özelliği, üretilen çimentonun kalitesini olumsuz yönde etkilemeyecek kimyasal özelliklere ve enerjisinden yararlanılabilecek kalorifik değere sahip olmasıdır.

Ülkemizde ve dünyada piyasaya sürülen çimentoların bünyesinde tespit edilen eser elementlerin bir bölümünün kullanılan hammadde ve fosil yakıtlardan

kaynaklandığı çeşitli literatür çalışmaları ile tespit edilmiştir. Bu çalışmada, alternatif yakıt ve hammadde kullanılarak üretilen çimentodan mamul beton numunelerin özellikleri incelenmiş, elde edilen sonuçlar ulusal ve uluslar arası standartlara göre değerlendirilmiştir.



## 2. ÇİMENTO VE BETON ÜRETİMİ HAKKINDA TEKNİK BİLGİLER

Çimento ile harç ve beton gibi çimentolu ürünler insanoğlunun geçmişte en fazla kullandığı ve gelecekte en fazla kullanacağı yapı malzemesi olmakla beraber aynı zamanda en fazla küçümsenen ve özellikleri en az bilinen malzemelerdir. Belki de bunun nedeni ilk bakıştaki basit görünümleri ve kolay sanılan üretimleridir (Yeğınobalı, 2008, s.5).

"Çimento" kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince "caementum" sözcüğünden türemiş, sonraları "bağlayıcı" anlamında kullanılmaya başlamıştır<sup>1</sup>.

Günümüzde kullanılan türden çimentonun ilk üretimi İngiltere'nin Portland bölgesinde 1820'li yıllarda gerçekleştirilmiştir. Çimento Üretimi Fransa'da ve Almanya'da geliştirilmiş ve ekonomik anlamda büyüme imkânı bulmuştur (Kuleli, 2010, s. 1-4).

### 2.1. Çimento Nedir? Nasıl Üretilir?

Çimento, esas olarak, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Hidrolik bağlayıcı maddeler, su ile reaksiyonu sonucu sert bir kütle oluşturduktan sonra su içerisinde dağılmayan, sertliğini ve mukavemetini muhafaza eden veya artıran bağlayıcı maddelerdir<sup>2</sup>.

Çimentonun ana bileşeni klinkerdir. Klinker kireçtaşı ve kil gibi hammaddelerin öğütülüp homojenize edilerek döner fırınlarda beslenmesi ile üretilmektedir. Klinker pişirme yeni bileşenlerin oluşması için gereken 1450°C'lik malzeme sıcaklığında gerçekleşmektedir. Çimento klinkeri, CaO, MgO gibi alkalın öğeler ve SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi hidrolik öğelerden oluşur. Alkalın ve hidrolik öğelerin oranları da bağlayıcı maddenin niteliğini belirler<sup>3</sup>.

Çimento üretiminde bir sonraki aşama, klinkerin öğütme işlemi için kurulan değirmenlerde gerçekleşmektedir. Bu proseste alçıtaşı ve diğer malzemeler (yüksek

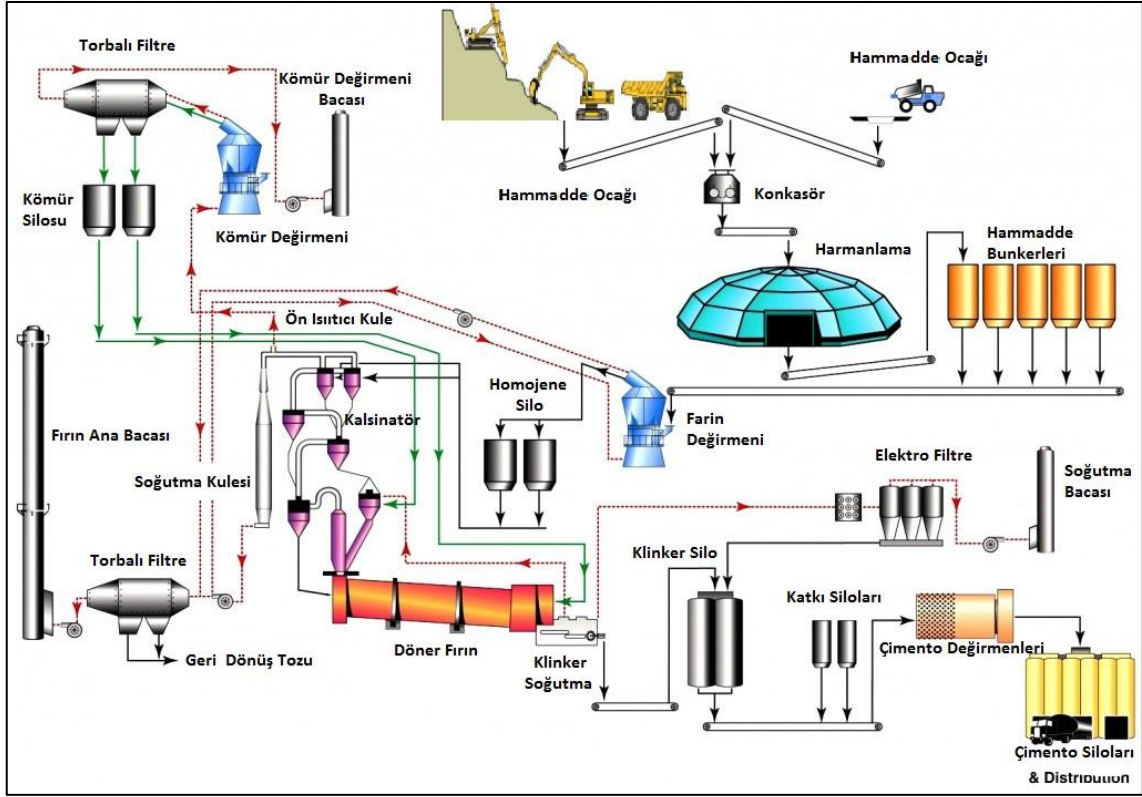
---

<sup>1</sup> <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=53> (Erişim tarihi: 15.03.2016).

<sup>2</sup> <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=53> (Erişim tarihi: 15.03.2016).

<sup>3</sup> <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=53> (Erişim tarihi: 15.03.2016).

fırın cürufu, uçucu kömür külü, doğal puzolan, kireç taşı vb.) klinkere eklenmektedir. Bütün bileşenler ince ve homojen bir toz, yani çimento oluşuna kadar öğütülmektedir.



Şekil 2.1. Çimento Üretimi Akış Şeması

Kaynak: fpaci.org

### 2.1.1. Hammadde üretimi

Üretimde birinci faz her biri doğal kayaç olan hammaddelerin yer kabuğundan istihraç edilmesi ve yüksek sıcaklıklarda pişirilmek üzere hazırlanmasıdır.

Portland çimentosu klinkeri üretiminde dört temel oksidin bünyesinde ihtiva eden doğal kayaçlar kullanılmaktadır. Çimento üretiminin olmazsa olmaz bileşenleri olan dört temel oksit aşağıda verilmektedir.

- Kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ )
- Silisyum Oksit ( $\text{SiO}_2$ )
- Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

Klinkerin ana hammaddelerinin kalsiyum karbonatın ( $\text{CaCO}_3$ ) kaynağı; kalker, şeyl ve marn, silisyum oksidin kaynağı; kil, şeyl, marn ve kum, alüminanın kaynağı; kil, şeyl, cevher atıkları, demir oksit kaynağı ise; kil ve demir cevheridir. Marn dört oksidi bünyesinde bulunduran en uygun çimento hammaddesidir (Yıldız, 2010, s.57).



**Görsel 2.1.** Çimento üretiminde ana bileşen kalkerin istihraç edildiği açık ocak işletmesi

**Kaynak:** [southampton.ac.uk/Mendip-Hills](http://southampton.ac.uk/Mendip-Hills)

Hammadde hazırlama işlemlerinde ilk aşama; uygun kimyasal özelliklere sahip doğal kayaların uygun boyutlara indirilmesi için kırılmasıdır. Kırma işlemi; vurma ya da çarpma, sürtme, kesme ve basma kuvvetlerinin biri ya da birkaçı ile hammadde olarak kullanılacak doğal kayaların 0-100 mm ebatlara kırılması işlemidir. Hammaddeler bu amaçla fabrikalara yakın bölgelerde inşa edilen kırıcılar işleme tabi tutulur. Kırma işlemi gelişen teknoloji yardımı ile sabit ya da hareketli kırıcılarda yapılır.

Entegre çimento fabrikalarında hammaddenin kırıcılar sonrasında homojene edilmesi ve stabil fiziksel ve kimyasal özelliklerde bir sonraki prosese sevk edilebilmesi için Harmanlama/Ön Homojenizasyon Üniteleri bulunmaktadır. Harmanlama sahası tesislere, istenilen kimyasal içerikli ve fiziksel boyutta tesis kapasitesine uygun miktarda homojen malzeme besleyebilmeye olanak sağlanmaktadır (Yıldız, 2010, s.57).

Harmanlama/ön homojenizasyon sisteminin bir diğer amacı da üretimin kalite güvencesi ve kararlılığının sağlanmasıdır. Homojene edilmiş hammadde ile üretim uygun fiziksel ve kimyasal içeriğe sahip hammaddenin sürekliliği sağlanmakta ve

üretimde dalgalanma yaşanmamaktadır. Harmanlama sahasının büyüklüğü; tesis kapasitesi, stoklama amacı ve alınan riske göre değişmektedir.

Hammadde hazırlama işlemlerinde ikinci ve son aşama; kırılan ve homojene edilen hammaddenin öğütülmesidir. Öğütme, fırında gerçekleşen kimyasal tepkimeleri kolaylaştırmak için yapılan yüzey artırma işlemidir, özünde boyut küçültme olarak tanımlanabilecek fiziksel değişim sürecidir. Bu süreç içinde malzemeler mikron boyutlarına kadar öğütülmektedir (Kuleli, 2010, s4-1).

Öğütülen hammadde kökeni Fransızca olan farin kelimesi ile tanımlanır. Farin; çimento üretiminde kullanılan kalker, marn, demir cevheri ve uygun diğer hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılıp öğütülmesi ile üretilir. Farin üretiminin yapıldığı değirmenlerde uygun incelikte ayrılarak homojene silolarına alınan farin bir sonraki aşamada kalsinasyon işlemlerinin gerçekleştirileceği ünitelere sevk edilir (Yıldız, 2010, s.65).

Klinker üretim prosesinde aşağıda türleri verilen teknolojiler hammadde öğütme işlemleri için kullanılmaktadır (Kuleli, 2010, s. 4-1).

- Bilyalı değirmenler
- Dik değirmenler
- Ezici – Ön Öğütücü (Roller Pres)
- Valsli değirmenler

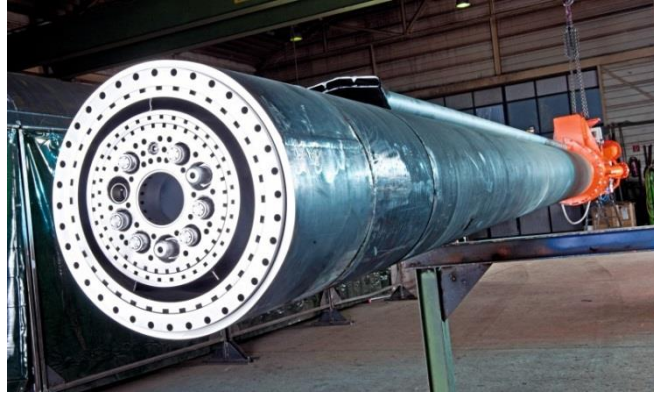
### **2.1.2. Yakıt hazırlama**

Çimento yarı mamulü klinkerin üretiminde konvansiyonel yakıt olarak kömür, petrokok, doğal gaz gibi fosil yakıtlar ile ikincil yakıt olarak kalorifik değere sahip atıklar kullanılmaktadır.

Yaş üretim süreçlerinde harcanan spesifik enerji 1.300-1.600 kcal/kg klinker arasında değişmektedir. Bu değer yarı yaş çimento üretiminde 900-1.100 kcal/kg klinker arasındadır. Kuru üretim sürecinde 850-900 kcal/kg klinker olan enerji kullanımı kalsinasyon sistemine sahip üretim proseslerinde 700-800 kcal/kg klinker arasında değişiklik göstermektedir (Yıldız, 2010, s. 93).

Klinker üretiminde temel yakıt olarak linyit, taş kömürü, petrokok ve/veya doğal gaz kullanılabilir. Üretim prosesine genellikle ortalama kalorifik değeri kuru bazda 5000 ila 8000 kcal/kg arasında değişen değişik türlerde kömürlerin paçalanması ile oluşturulmuş karışımlar beslenir. Kömür yanma verimliliğinin sağlanması için hammadde öğütme sistemlerine benzer niteliklerde kurulmuş kömür değirmenlerinde öğütülerek, pnömatik sistemler ile üretim prosesine sevk edilir. Bu sayede pulverize edilerek beslenen kömürün, yüksek verimlilikte kullanılması sağlanmaktadır.

Öğütülerek hazırlanan yakıtın kullanılabilmesi için brülör olarak da ifade edilen alev borusu teknolojisi kullanılmaktadır. Yakıtın doğalgaz, kömür, fuel-oil vb. olmasına göre alev borusunda, sistem öncesinde kurulu yakıt besleme ünitelerine bağlı değişik besleme kanalları teçhiz edilebilmektedir. Yakıtın söz konusu kanallardan verilmesi esnasında yanma işleminin daha verimli olması amacı ile alev borusu yapısına uygun şekilde tasarlanan diğer kanallardan yakma havası verilmektedir.



**Görsel 2.2.** Alev Borusu

**Kaynak:** *zkg.de A Tec Greco Main Burner*

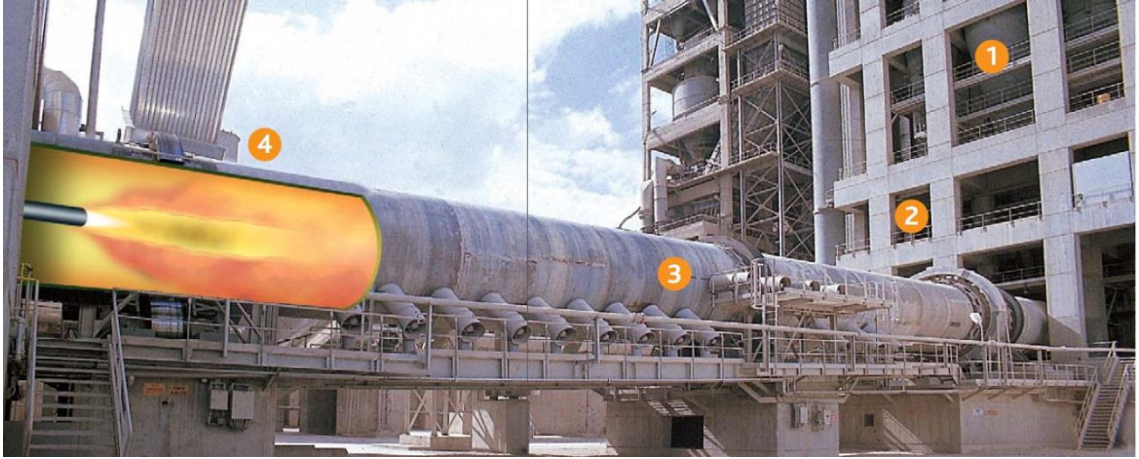
Günümüzde alev borusu farklı tür ve inceliklerde yakıtın beslenmesine olanak sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Bununla birlikte kullanılan konvansiyonel yakıtların (kömür, petrol koku, fuel-oil vb.) yanında klinker üretiminde kullanımı yaygınlaşan ikincil yakıtların sisteme beslenmesi için uygun teknolojide alev borusu imalatı yapılmaktadır. Söz konusu alev boruları yardımı ile sürekli ve düzenli besleme ile, konvansiyonel yakıtlara oranla düzensiz ve homojen olmayan ikincil yakıtların fırın rejimine etkisi minimize edilmektedir.

### 2.1.3. Klinker üretimi

Klinker; ağırlıklı olarak kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ), silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve az miktarda alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ile demir oksidin ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) oluşturduğu hammadde karışımının sinterleşme sıcaklığındaki ısı işleminin sonrası soğutulmasıyla elde edilen yarı mamul bir üründür (Yıldız, 2010, s.146).

İlk klinker fırınları hammadde ve kömürün birlikte muamele edildiği, bugün kü kireç fırınlarına benzeri, dikey ve kesikli çalışan teçhizatlarıdır. Ransome'un 1885 yılında patentini aldığı ilk Döner Fırın yakmayı denetlemeyi, ısının malzemeye daha homojen aktarılmasını ve üretimi sürekli sağladığı için endüstriyel olarak kabul görüp yaygınlaştı (Yıldız, 2010, s.12).

İlk fırınlarda hammaddelerin homojen olarak karıştırılmasını sağlamak için su kullanıldı. Bu şekilde, Yaş Üretim dönemi başladı. Yaş sistemde enerjinin büyük kısmı homojenleştirme işleminde kullanılan suyun buharlaştırılmasında kullanıldığı için malzemenin kuru olarak karıştırılıp homojen hale getirilmesini sağlayacak yeni sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlanmış, bu yolla 1950'den itibaren yeni geliştirilen Kuru Sistem Döner Fırınlara geçiş başlamıştır (Yıldız, 2010, s.13).



Şekil 2.2. Döner Fırın Ünitesi 1. Ön Isıtma, 2. Kalsinasyon, 3. Döner Fırın, 4. Alev Borusu

**Kaynak:** Yeğinobalı, 2008, s.16-17

Üretim süreçlerinin tarihsel kronolojide özetlenen gelişimi aşağıda verildiği gibidir.

- *Yaş Sistem*

Hammadde çamuru doğrudan kurutma ve ön ısıtma bölümlerini içeren uzun döner fırına beslenmektedir. Günümüzde enerji verimliliği gerekçesi ile terk edilen bu üretim yöntemine sahip fabrikalar modernizasyon yatırımlarını tamamlayarak kuru sisteme geçiş yapmıştır.

- *Yarı Yaş Sistem*

Çamur önce filtre presten geçirilip, üretilen kek peletler halinde ızgaralı ön ısıtıcıya beslenmektedir. Bu tip süreçlerde bir sonraki aşama kurutulan çamur kekleri sonrasında kalsinasyon işlemlerinin gerçekleştirileceği Döner Fırına beslenmesidir.

- *Yarı Kuru Sistem*

Kuru madde su ile granül hale getirilip, hareketli bir ızgara marifeti ile ön ısıtıcıdan geçirilip fırına beslendiği bu tip prosesler, Lepol olarak da tanımlanmaktadır.

- *Kuru Sistem*

Kuru hammadde karışımı siklonlardan oluşan bir ön ısıtıcıdan geçtiği, kalsinasyon bir bölümünün bu üniteye tamamlanarak ve döner fırına beslendiği süreçler kuru sistem olarak tanımlanmaktadır. Enerji verimliliği kuru sistemlerde diğer sistemlere göre üst düzeydedir.

Üretimde hammadde, aşağıdaki kimyasal formlara dönüşerek nihai ürün olan klinkere dönüşmektedir. Söz konusu fazlar sırası ve adları ile aşağıda verilmektedir (Kuleli, 2010, s.5-21)

- Alit

Bu yapay mineralin oluşması için sinterleşmenin olması gerekmektedir. Klinkerde olması istenen en önemli maddedir, ortalama olarak klinkerin %60 ' alittir. Yüksek C<sub>3</sub>S içeren klinkerler "reaktif" olarak tanımlanırlar, bunun anlamı; yüksek alit içeren klinkerden mamul çimentoların;

- Dayanımları yüksektir
- Çimento öğütme sırasında daha çok katkı kullanılabilir.

Alit çağdaş yapı tekniğinin gerektirdiği yüksek erken dayanımı sağlayan temel klinker bileşenidir, hızla suyla tepkimeye girip hidratize olur, hidratasyon ısısı orta derecededir

- Belit ( $C_2S$ )

$C_2S$  klinker içinde saf olarak bulunmaz, her zaman diğer oksitler ile birlikte bulunur. Klinkerin ortalama olarak % 15'i belittir. Basınç dayanımı artışı yavaştır. Ancak uzun dönemde  $C_3S$  ile aynı dayanım değerine ulaşır. Yavaş hidratize olur, hidratasyon ısısı düşüktür.

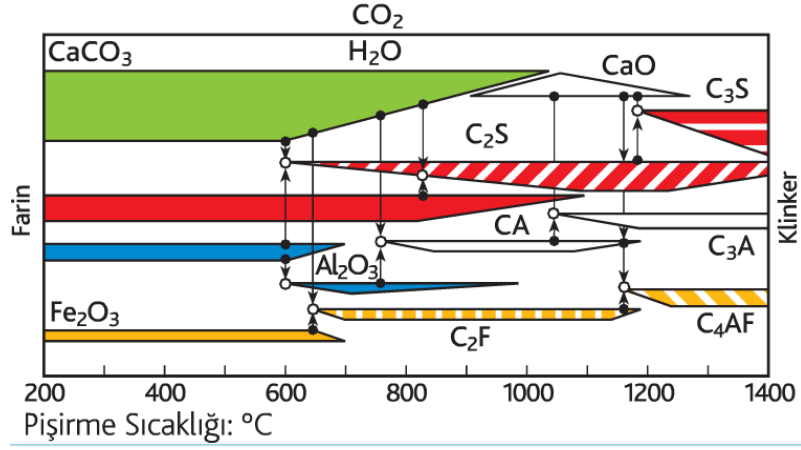
- Alüminat ( $C_3A$ )

İçinde özellikle alkaliler olmak üzere iyonlar içerir, çok etkindir. Klinkerin ortalama % 11'i alüminattır. Sülfatlar ile tepkimeye girerek hacim genişlemesine neden olur. Suyla çok hızla birleşir, yüksek hidratasyon ısısı yüksek dayanımı artırır. Alüminat evresinin suyla hızlı tepkimesinin yaratacağı olumsuzlukları azaltmak için bütün çimentolara az miktarda sülfat (% 2-5 alçıtaşı (doğal kalsiyum sülfat)) katılır, böylece betonun, harcın son biçimini alıncaya dek sertleşmesi için geçen süre denetim altına alınmış olur.

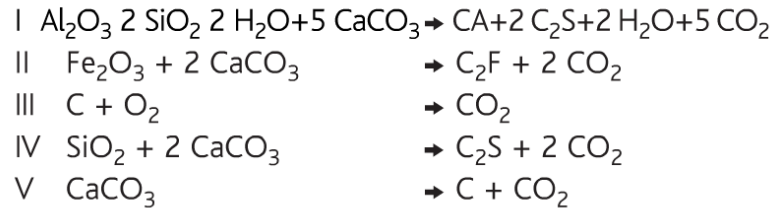
- Ferrit ( $C_4AF$ )

Bu evre aslında  $C_2A$ ,  $C_6A_2F$ ,  $C_4AF$  ve  $C_2F$  gibi evrelerin katı çözeltilisidir. Bileşimi  $C_4AF$  formülü ile tanımlanmaktadır. Klinkerin ortalama % 8'i ferrittir. Diğer evrelere göre işlevi daha azdır. Çimentoya bilinen rengini veren bileşendir. Basınç dayanımına katkısı azdır. Yavaş hidratize olur.

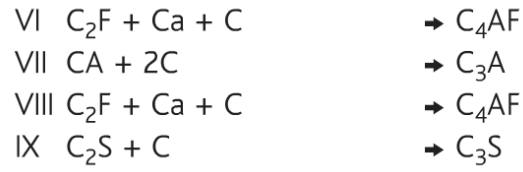




### 650-1050°C

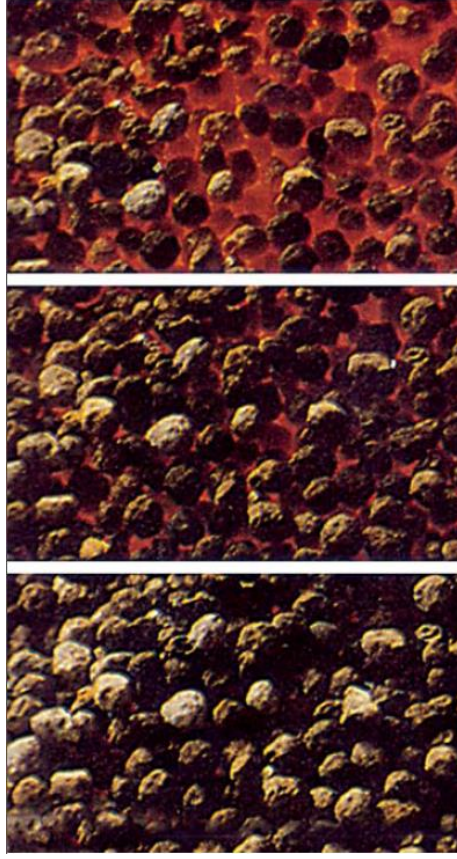


### 1250-1450°C



Şekil 2.3. Klinkerleşme reaksiyonları

Kaynak: Yeğınobalı, 2008, s.19



**Görsel 2.3.** Klinker

**Kaynak:** *Yeğinoğlu, 2008, s.18*

#### **2.1.4. Çimento üretimi ve çimento tipleri**

Bu bölüme kadar üretimi hakkında genel bilgiler verilen klinkerin; alçı taşı, tras ve diğer katkı maddelerin belirli oranda karıştırılarak beraberce öğütülmesi ya da ayrı öğütülmüş bu malzemelerin belirli oranda karıştırılması ile çimento üretimi sonlandırılır. Çimento öğütüldükten sonra 90 mikron üzerindeki malzeme oranının ağırlıkça %10'dan daha düşük olması istenmektedir. Bu da öğütülmüş hammadde yüzey alanının  $3.500 \text{ cm}^2/\text{gr}$  üzerinde olmasını gerektirmektedir (Yıldız, 2010, s.251).

“Blaine”; 1 gr çimentodaki tanelerin  $\text{cm}^2$  birimi cinsinden toplam yüzey alanları olarak tanımlanmakta, çimentonun hava geçirgenliği ile ölçülmektedir. Öğütme boyutu düşüktüçe öğütülmüş malzemenin blaine değeri artmaktadır. Blaine değeri yüksek çimentoların mukavemetleri de yüksek olmaktadır (Yıldız, 2010, s.251).

Günümüzde kullanılan değirmen teknolojilerinde ana hedef yüksek enerji verimliliği ve ürün kalitesinin sağlanmasıdır. Çimento statik ve dinamik seperasyon sistemlerine sahip bilyalı, dik ve rulolu (roller pres) değirmenlerde öğütülmektedir.



**Görsel 2.4.** Çimento Değirmeni

**Kaynak:** *Yeğinoğlu, 2008, s.24*

Çimento üretiminde kullanılan katkı ve öğütme kolaylaştırıcı kimyasallar TS EN 197-1 standardında belirtilen oranlarda beslenerek kullanılmaktadır. Çimento tipleri sonraki bölümlerde bahsedileceği gibi içerdiği katkı oranı ve sağladığı dayanım değerine göre sınıflandırılmaktadır.

Ülkemizde çimento uluslararası geçerliliği olan ve Türk Standardı olarak yayınlanmış standartlara göre üretilmekte ve özellikleri söz konusu teknik dokümanlarda belirtilen test yöntemleri ile teyit edilmektedir.

Avrupa ülkelerinin çoğunluğu için geçerli olacak çimento standartlarının hazırlanmasına 1973 yılında Avrupa Standardizasyon Komitesi'nin teknik komitesi TC 51 ile başlanmıştır. Çeşitli Avrupa ülkelerinde çok sayıda çimento türünün yerel standartlara uygun olarak kullanılmakta olduğunu dikkate alan komite, genel çimentolar için hazırladığı TS EN 197-1 de çok sayıda çimento türüne yer vermiştir (Yeğinoğlu, 2008, s.34-37).

Genel çimentolar TS EN 197-1'de "CEM Çimentosu" olarak adlandırılmaktadır. CEM Çimentosu, hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonu

sonucu meydana gelen ve içindeki reaktif CaO ve reaktif SiO<sub>2</sub> toplamının kütlece en az %50 olması gereken çimentodur. Bileşimi Portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılardır (Yeğınobalı, 2008, s.34-37).

Standarda göre CEM Çimentoları, 27 alt çeşidi kapsayan 5 ana tiptir.

CEM I: Bu grupta klinkerin sadece kalsiyum sülfat ve minör bileşen olarak ağırlıkça en fazla % 0-5 arası mineral katkı ile öğütülmesi sonucunda Portland Çimentosu elde edilir.

CEM II: Bu grupta mineral katkı miktarı % 6-35 arasındadır. Katkı türüne bağlı olarak bu gruptaki çimentolar Portland Cürüflü, Portland Puzolanlı (trash) gibi isimler de almaktadır.

CEM III: Bu grupta Yüksek Fırın Cürüflü Çimentolar bulunur. Katkı miktarı % 36-95 arasındadır.

CEM IV: Bu grupta Puzolanik Çimentolar yer alır. Bunlarda cüruf veya kalker katkı maddesi olarak kullanılmaz. Katkı madde oranı puzolan ve uçucu kül katkıları ile birlikte % 11-55 arasında değişmektedir.

CEM V: Bu grupta Kompoze Çimentolar bulunur. Bunlara hem cüruf (%18-50) ve hem de puzolan ve uçucu kül (%18- 50) miktarı belirlenen sınırlar içerisinde değiştirilerek birlikte katılır, miktarları klinker oranı %20- 64 arasında kalacak şekilde ayarlanır.

Bunların haricinde gerek klinker üretimi sırasında, gerekse sonradan ilave edilen mineral katkılar sayesinde özel kullanım amaçlı olarak üretilmiş, TS EN 197-1 standardının kapsadığı 5 çeşit daha çimento bulunmaktadır (Yeğınobalı, 2008, s.34-37).

- Sülfatlara Dayanıklı Çimentolar: Trakalsiyum alüminat miktarı sınırlanmış (maksimum %5) olarak üretilen klinkerin kalsiyum sülfat ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir.

- Beyaz Portland Çimentosu: Özel nitelikli kil ile kireçtaşının birlikte pişirilmesiyle elde edilen beyaza yakın klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile birlikte öğütülmesiyle elde edilir.

- Harç Çimentosu: Dayanım gelişmesi için gerekli Portland Çimentosu Klinkeri içeren ince öğütülmüş, ilave bileşene ihtiyaç duyulmadan sadece kum ve su karıştırılarak duvar, sıva ve kaplama işlerinde kullanıma uygun harç yapımında kullanılan çimento tipidir.

- Yüksek Fırın Cürufu Katkılı, Düşük Erken Dayanımlı Çimentolar: Sınırlandırılmış hidrasyon ısısına sahip, yüksek fırın cürufu katkı ve erken dayanımı düşük olan çimentodur.

- Çok Düşük Hidrasyon Isılı Özel Çimentolar: Su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan, sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımı ve kararlılığını koruyan ve geliştiren, genel çimentoların hidrasyon reaksiyonlarına sahip bir çimentodur.

## **2.2. Çimento Sanayiinde Kontrol Altında Tutulan Çevresel Unsurlar**

54 Entegre çimento fabrikası ile dünya çimento üretiminde 4., Avrupa'da 1. sırada yer alan ülkemizde 2015 yılı verilerine göre çimento üretim kapasitesi 126.141.205 ton/yıl<sup>4</sup> olarak gerçekleşmiştir. Öğütme Paketleme Tesisleri ile birlikte toplam 71 adet Çimento Üretim Tesisi ülkenin farklı coğrafyalarında hizmet vermektedir.

Aşağıda çimento üretiminin önemli çevre boyutları ve kontrol altına tutulmasına yönelik teknik uygulamalar hakkında bilgiler verilmektedir.

### **2.2.1. Hava kirliliği**

- Toz Emisyonu

Çimento endüstrisinde üretim faaliyetleri esnasında meydana gelen toz emisyonları; hammadde istihracı yapılan ocak faaliyetleri, hammadde hazırlama, klinker üretimi ve çimento öğütme/paketleme işlemleri esnasında, söz konusu ünitelerde yer alan proses ve proses dışı kaynaklarda meydana gelmektedir.

Ocak faaliyetleri ve hammaddenin nakli esnasında oluşan toz emisyonları PM10 olarak tabir edilen, parçacık boyutu 10 µ ve altında olan toz partikülleridir. Yükleme ve

---

<sup>4</sup> <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=42> (Erişim Tarihi: 06.05.2016)

boşaltma işlemleri esnasında uygulanacak iptidai önlemler ile (pulverize su sistemleri, savurmadan yükleme, tesis içi yolların sulanması) önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Hammaddelerin öğütülmesi, klinker üretimi ve klinkerin öğütülerek son ürün haline getirildiği ünitelerde aşağıda tanımlanan teknolojiler kullanılarak, toz emisyonlarının azaltılması ve atmosfere salınan partikül madde miktarında önemli ölçüde indirgeme sağlanmaktadır.

Siklonlar; 5 µ'dan küçük boyutlarda toz zerreciklerinin önemli bir bölümü (% 60) tesisin farklı noktalarında işletmeye alınan siklonlar vasıtası ile tutulabilmektedir. Bu tür ekipmanlarda istenen minimum hız 10 ila 20 m/sn, basınç kaybı 50-150 mmH<sub>2</sub>O ve boyut oranı (yükseklik:çap) 3 ila 5 arasında olmalıdır (Alsop vd., 2005, s.113).

Elektrofiltreler çimento endüstrisinde her türlü tozsuzlaştırma faaliyeti için kullanılabilir. Gaz içindeki toz miktarını 50 ila 200 mg/m<sup>3</sup> oranından azaltabilen bu tür filtreler yerini, işletme kolaylığı ve performans nedenleri ile torbalı filtrelere bırakmaktadır (Kuleli, 2010, s.11-8)

Elektrostatik filtrelerin en önemli avantajı soğutma gibi üniteler sonrasında sistemi yüksek sıcaklıklarda terk eden gazın muhteva ettiği toz emisyonlarının bu yolla gaz içeriğinden ayrılmasına olanak vermesidir. Her ne kadar torbalı filtreler bünyesinde kullanılan malzemelerin gelişen teknoloji ile birlikte ısıya dayanımları artsa da döner fırın sonrasında klinkerin soğutulduğu ünitelerde elektrofiltre kullanımı kaçınılmazdır.

Torbalı filtreler; üretimde ve nakil hatlarının tozsuzlaştırılması amacı ile kullanılmaktadır. Filtreler, öğütülen hammadde veya klinkerin bir sonraki üniteye sevki, nakil hatlarında dökülüş şutlarının tozsuzlaştırılmasında kullanılmaktadır. Ünitenin türü ve yapısal özelliklerine göre farklı tip ve ebatlarda kullanılan torbalar, özellikle ısıya ve korozyona dayanıklı tekstil malzemelerinin özel yöntemler ile dokunması suretiyle üretilmektedir.

Toz tutma veriminin % 99,95 olduğu bu tip filtrelerde kullanılan polyester tipinde torbalar 150 °C'ye, poliamid filtre bezleri 230 °C'ye, cam elyafı filtre bezleri ise 280 °C'ye kadar dayanabilmektedir (Alsop vd., 2005, s.113).

Torbalı filtrelerde toz ihtiva eden gaz, filtre medyasında geçer ve toz kumaş yüzeyinde ince bir tabaka oluşturur. Tutunma işlemi devam ettikçe basınç düşüşünde

artış meydana gelir ve yeterli hava akışı sağlanamaz, bu durum filtre torbası yüzeyinin temizlenmesi gerektiği anlamına gelir ve sistem için belirlenen yöntem ile otomatik olarak filtre yüzeyi temizlenir; temizlik işlemi için aşağıda metodolojiler kullanılmaktadır.

- Torbaların sallanması
- Ters yönde hava geçirme
- Basıncılı hava kullanımı (genellikle tercih edilen yöntem)
- Ses dalgalarının kullanımı (Kuleli, 2010, s.11-19).

Kum yataklı filtreler; Elektrostatik filtrelerde gelişen teknoloji ve torbalı filtre kumaşlarının üretiminin yaygınlaşması nedeni ile kullanımı oldukça azalan bu tip filtreler, klinker soğutma ünitesi çıkış havasının temizlenmesi işlemleri için kullanılmaktadır. Genellikle 450 ° C civarında yüksek sıcaklıklarda kullanımı mümkün olsa da verimsiz çalışma koşulları nedeni ile kullanımı sınırlıdır. Bu tip filtrelerin yataklarında kullanılan kum taneciklerinin ortalama büyüklüğü 2 ila 5 mm arasında seçilmekte, ters hava akımı kullanılarak temizlenmesi sağlanmaktadır (Alsop vd., 2005, s. 114)

- NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub> Emisyonları

Çimento yarı mamulü klinkerin üretiminde azot oksit emisyonları yanma esnasında yakıt içindeki azot bileşiklerinin (yakıt NO<sub>x</sub>) ve yanma havasında azotun (termal NO<sub>x</sub>) yükseltgenmesi sonucu oluşmaktadır. Termal NO konsantrasyonu; kalış süresinin ve serbest oksijen konsantrasyonunun artışı ile eş zamanlı olarak yükselmektedir (Alsop vd., 2005, s. 114).

NO<sub>x</sub> emisyonu fırın operatörleri tarafından operasyonun kontrolü amacı ile kullanılabilir.

Ülkemizde yürürlükte olan mevzuat mevcut tesislerde 1.300 mg/Nm<sup>3</sup> olan NO<sub>x</sub> emisyonu limit değeri, atıkları alternatif yakıt olarak kullanan ve yeni kurulan çimento fabrikalarında 800 mg/Nm<sup>3</sup> olarak uygulanmaya başlanmıştır. Sınır değerinde yapılan indirim NO<sub>x</sub> emisyonlarının düşürülmesi için çeşitli indirgeme veya kontrol sistemlerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Çimento fabrikalarında NO<sub>x</sub>;

- Fazla havanın azaltılması,

- Birincil havanın azaltılması,
- Azot indirgeme sistemi kullanılması,
- Düşük NO<sub>x</sub> özellikli alev borusu kullanılması ile azaltılabilmektedir Kuleli, 2010, s.11-5).

Çimento tesislerinden kaynaklanan SO<sub>2</sub> emisyonları, toplam kükürt bileşikleri girdisine ve kullanılan prosesin tipine bağlı olup, miktarı hammaddelerin içindeki uçucu kükürt konsantrasyonu ve yakma prosesi tarafından belirlenmektedir. Potansiyel emisyonlar fırın sisteminde gerçekleşen kükürt dolaşımına bağlıdır. Fırın çıkış gazları içindeki SO<sub>2</sub>, klinkerin içindeki CaSO<sub>4</sub>, diğer kombine bileşikler ve toz gibi fırın sisteminin farklı unsurlarına bağlanmaktadır. Ancak, kükürdün büyük bir bölümü klinkerin bünyesi içine yerleşmekte veya proses tarafından sistemin dışına atılmaktadır (EU, 2010, s.64).

Döner fırınlarda kalsinasyonun gerçekleştiği proses, fırın çıkış gazları içinden SO<sub>2</sub>'yi tutmak için ideal koşulları sağlamaktadır. Ancak, SO<sub>2</sub> emisyonları fırın sisteminin çalışma koşullarının, örneğin döner fırındaki oksijen konsantrasyonunun, SO<sub>2</sub> tutması için optimize edilmemiş olduğu zamanlarda oluşabilir. Ayrıca, sıcaklık, nem içeriği, gazın alıkoyma süresi, gaz fazında oksitlerin konsantrasyonu, katı yüzey alanının varlığı, vb. gibi çeşitli faktörler reaksiyonun verimliliğini etkileyebilir. Kalsinasyon alanının aksine, oluşan SO<sub>2</sub>'nin % 40 ila 85'lik bölümü ön ısıtıcıda tekrar tutulur. Fırın çıkış gazlarının su buharı içeriği dışında, SO<sub>2</sub>'nin siklon ön ısıtıcıda CaCO<sub>3</sub> tarafından tutulmasını etkileyen en önemli parametreler ham gazın toz içeriği ve özellikle en üst siklon kademesindeki ham gazın oksijen konsantrasyonudur (EU, 2010, s.65-66).

Ülkemizde yürürlükte olan mevzuat nezdinde kükürt dioksit için sınır değer 300 mg/Nm<sup>3</sup> olup, ülke genelindeki çimento fabrikalarında ölçülen ortalama SO<sub>2</sub> değer 10 ila 20 mg/Nm<sup>3</sup> mertebesindedir (Kuleli, 2010, s.11-4).

- Ağır Metal Emisyonları

Hammadde ve yakıt içeriğinde ağır metal bileşiklerinin bulunduğu bilinmektedir. Bulduğu ortama göre konsantrasyon değerleri farklılık gösterebilmektedir. Bununla birlikte çimento sanayiinde alternatif yakıt olarak kullanılan atıkların bünyesinde yer alan ağır metaller emisyonlara etki edebilmektedir.



Metal bileşikleri uçuculuğuna ve oluşturduğu tuz bileşiklerine göre dört temel sınıfa ayrılmaktadır.

- Ateşe dayanıklı veya uçucu olmayan veya bu tür bileşikler içeren metaller, (Ba, Be, Cr, As, Ni, V, Al, Ti, Ca, Fe, Mn, Cu ve Ag)

Bu metaller klinker tarafından tümüyle absorbe edilmekte ve klinker ile birlikte dışarı atılmaktadır. Böylece fırın sistemi içinde dolaşıma girmez. Çıkış gazındaki tek emisyon toz yoluyla gerçekleşir ve bu nedenle miktarı toz çevrimine ve toz ayrıştırma etkinliğine bağlıdır. Sonuç olarak tespit edilen emisyon değerleri genelde çok düşüktür.

- Yarı uçucu olan veya bu tür bileşikler içeren metaller (Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K ve Na)

Bu metaller 700 ila 900 °C arasındaki sıcaklıklarda sülfatlar veya kloridler olarak yoğunlaşır ve iç dolaşım gerçekleşir. Bu yolla, fırının ön ısıtmaya tabi tutulmuş olan sisteminde birikmiş olan yarı uçucu elementler siklon ön ısıtıcıda tekrar çökelirler ve yüksek bir oranda ve neredeyse tümüyle klinkerin içinde kalırlar.

- Talyum: uçucu olan veya uçucu bileşiği olan metal

Talyum bileşikleri 450 ila 550 °C arasında, ve ısı eşanjörü olan fırınlarda, birikebilecekleri yer olan ön ısıtıcının üst alanında yoğunlaşır (iç sirkülasyon).

- Civa: uçucu olan veya uçucu bileşiği olan metal

Civa ve civa bileşikleri fırının ve ön ısıtıcının içindeki çoğu bölümden geçerler ve atık gazın ısısına bağlı olarak ham gaz tozu tarafından sadece kısmen adsorbe edilirler (EU, 2010, s.74).

Klinker pişirme prosesi sırasında metallerin davranış biçimi ve emisyon seviyesi; uçuculuğa, fırın içine giriş senaryosuna, atıklar veya tehlikeli atıklar kullanımına, hammadde ve yakıt içeriğindeki metalik elementlerin konsantrasyonlarına, prosesin türüne ve en önemlisi ana baca üzerindeki toz toplama sistemlerinin çökeltme verimliliğine bağlıdır.

Hammaddeler ve yakıtlar vasıtasıyla pişirme prosesine giren metaller, uçuculuklarına bağlı olarak ön ısıtıcının ve/veya döner fırının sıcak bölgelerinde kısmen

veya tamamen buharlaşabilir, gaz evresinde mevcut olan bileşenler ile reaksiyona girebilir ve fırın sisteminin daha soğuk bölümlerinde fırın besleme malzemeleri üzerinde yoğunlaşabilirler. Yakıtlardan kaynaklanan metaller ise, ilk olarak yanma gazlarına girer ancak fırının ve ön ısıtıcının alıkoyma kapasitesi sayesinde son derece küçük bir oranda yayılırlar. Klinker üretiminde hammadde:yakıt kütle oranı, yaklaşık 10:1 olduğundan, hammadde ile ilgili girdiler emisyonlar üzerinde belirleyici olmaktadır.

Üretimde uçucu olmayan metal bileşikleri prosesin içinde kalır ve çimento klinker bileşiminin (>% 99.9) bir parçası olarak fırından çıkar. Yarı uçucu metal bileşikleri, fırın sisteminin daha soğuk bölümlerinde hammadde üzerinde yoğunlaşmak üzere sinterleme sıcaklıklarında kısmen gaz evresine alınır. Bu durum fırın sisteminde fırın ve ön ısıtıcı ile sınırlı olan veya kurutma öğütme ünitesinde de yer alan bir dögüsel etkiye yol açar (iç dögüler). Metaller ön ısıtıcı alanında büyük ölçüde yoğunlaştığı takdirde, bunlar fırın yükü ile birlikte fırına geri döndürülecektir. Bu durum bir iç metal dögüsüne (fırın/ön ısıtıcı dögüsü) yol açar. Bu dögüsel etki, girdi ve çıktı arasında çimento klinkeri vasıtasıyla bir dengenin kurulduğu ve sürdürüldüğü noktaya kadar oluşur.

Uçucu metal bileşikleri, fırının baca gazı ile salınmadıkları takdirde daha düşük sıcaklıklarda hammadde partikülleri üzerinde yoğunlaşır ve potansiyel olarak, iç veya dış dögü oluşturur. Özellikle Talyum ve civa ile bileşikleri kolaylıkla buharlaşır. Bunlar tümüyle klinker matrisi içinde tutulmazlar. Talyum ve bileşikleri 450 ila 500 °C derece arasındaki sıcaklıklarda siklon ön ısıtıcının üst bölgesinde yoğunlaşır. Bu nedenle fırın sistemine giren talyumun büyük bir bölümü ön ısıtıcıda alıkoyulur. Sonuç olarak, ön ısıtıcı, hammadde kurutma ve çıkış gazı arıtma arasında bir dögü oluşturulabilir. Talyumun emisyon seviyesi, dış dögünün konsantrasyon seviyesi ve toz toplayıcının toplama etkinliği ile belirlenir. Örneğin elektro filtre tozunun talyum konsantrasyonu, talyum dögüsünün konsantrasyon seviyesi için bir ölçüdür.

Diğer metal türlerine göre daha küçük ölçüde; kadmiyum, kurşun, selenyum ve bunların bileşikleri kolayca uçucu hale gelebilmektedir. Kalsinasyon besleme stoku ile reaksiyona girdikleri veya yanma odasının soğuk alanlarında ve ön ısıtıcıda çökelti haline geldikleri zaman uçucu metal bileşiklerin bir iç dögüsü oluşur. Toz ile birlikte

yoğunlaşmış uçucu bileşikler toz ayırıcılarda ayrılarak farine geri gönderildiğinde metaller bir dış döngü oluştururlar.

Çimento üretiminden kaynaklanan tozlar az miktarda arsenik (As), kadmiyum (Cd), cıva (Hg), kurşun (Pb), talyum (Tl) ve çinko (Zn) gibi metal bileşikler içerirler. Metal yüklü tozların ana kaynağı, ön ısıtıcılar, ön kalsinatörler, döner fırın ve klinker soğutucuların da dâhil olduğu fırın sistemidir. Metal konsantrasyonu besleme stokuna ve fırın sisteminin içindeki yeniden dolaşıma bağlıdır. Özellikle, kömür ve atık yakıtların kullanılması metallerin prosese girişini arttırabilir. Fırın sistemine giren metallerin değişik uçuculuğa sahip olmaları ve yüksek sıcaklık nedeniyle, çimento fırın sisteminde bulunan sıcak gazlar da gaz halinde metal bileşikler içerir. Denge araştırmaları, uçuculuğu yüksek olan elementlerin klinkerin içinde alıkonulma süresinin düşük olduğunu ve bunun sonucunda bu maddelerin fırın sisteminin içinde biriktiklerini göstermiştir (EU, 2010, s.75-76).

### **2.2.2. Su yönetimi**

Su üretim prosesi esnasında çeşitli aşamalarda kullanılır. Su; hammadde hazırlama, klinker pişirme ve gazların soğutulması gibi soğutma işlemlerinde ve çimento üretimi için uygulanan teknolojik proseslerde kullanılır. Yarı-kuru proseslerde su, kuru farinin pelet haline getirilmesi için kullanılmaktadır. Yaş proses kullanan tesislerde fırına beslenen klinker harcının hazırlanması için daha çok su kullanılmakta (üretilen çimentonun beher tonunda) , genel olarak ton başına 100-600 litre su tüketimi rapor edilmektedir. Ayrıca, özel uygulamalarda su klinkeri soğutmak için kullanılmakta, yaklaşık 5 m<sup>3</sup>/saat su tüketimi rapor edilmektedir. Çoğu durumda, tüketilen su içme suyu değildir (EU, 2010, s.44).

### **2.2.3. Gürültü kontrolü**

Gürültü çimento üretim prosesinin bölümleri olan hammadde hazırlama, döner fırın, yakıt hazırlama ve çimento öğütme ünitelerinde meydana gelmektedir. Bunun yanında hammaddenin sevki ve nakliyesi esnasında gürültü oluşumu söz konusu olabilmektedir

Çevresel gürültünün tesis içindeki en önemli kaynakları kurulu olan büyük makinalar, soğutma/proses/havalandırma için kullanılan fanlar ve basınçlı hava eldesi için kullanılan kompresörlerden kaynaklanabilmektedir.

Tesisler ulusal mevzuat uyarınca azaltım standartlarına uymakla yükümlü olup tesis içinde akustik ölçümler yapıp ve sonuçları değerlendirilmektedir. Çimento sektöründe gürültü emisyonlarını azaltmak için duvarlar, ağaçlar veya çalılar gibi doğal gürültü bariyerleri kullanılmaktadır. Tesisin yakınında konut alanlarının bulunması durumunda, fabrika alanında yeni binaların planlanması gürültü emisyonlarını azaltma zorunluluğu ile bağlantılıdır (EU, 2010, s.92).

Çimento fabrikalarında gürültü seviyelerini komşu çevreyi koruyacak düzeye indirmek için aşağıda belirtilen türde çeşitli gürültü azaltma önlemleri/teknikleri uygulanmaktadır.

#### **2.2.4. İklim değişikliği**

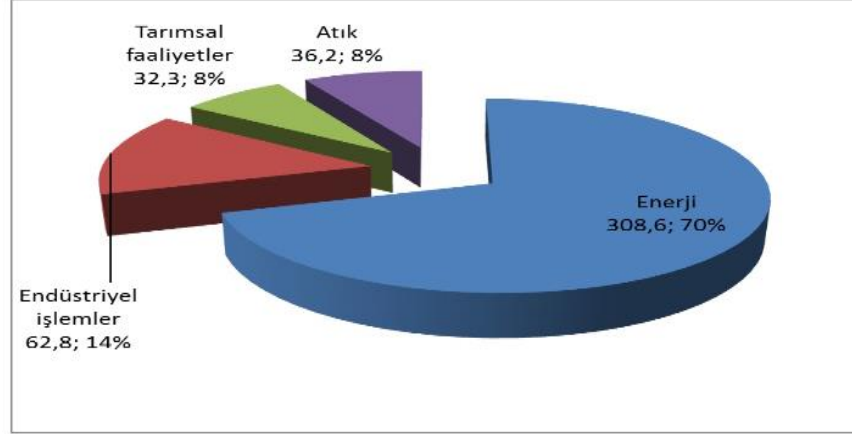
Yerküre, fosil yakıtların yanması, arazi kullanımı değişikliği ve ormansızlaştırma, sanayi üretimi gibi insan etkinlikleriyle atmosfere salınan sera gazlarının doğal sera etkisini kuvvetlendirmesi sonucunda ısınmaktadır. Farklı sera gazı emisyon (salım) senaryolarına dayanan iklim modelleri, gelecek yüzyıl için önemli iklim değişikliklerinin olacağını öngörmektedir (Türkeş, 2001, s.1)

Ülkemizde ve dünyada iklim değişikliğinin kaçınılmaz etkileri aşağıda sıralanmaktadır.

- Sıcaklık değişiklikleri
- Yağış değişiklikleri
- Su kaynakları
- Tarımsal üretim

Türkiye İstatistik Enstitüsünün verilerine göre 2012 yılında Türkiye için hesaplanan sera gazı emisyonu toplam miktarı 439,9 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeridir. Söz

konusu miktarın % 70,2'si enerji, 14,3'ü endüstriyel faaliyetler, % 8,2'si atık ve kalan %7,3'ü tarımsal faaliyetler sonucu oluştuğu tahmin edilmiştir<sup>5</sup>.



Şekil 2.4. 2012 Yılı Toplam Sera Gazı Emisyonlarının Dağılımı

**Kaynak:** <http://www.csb.gov.tr/projeler/iklim/>, Erişim Tarihi: 07.05.2016

Çimento Sektörü yukarıda verilen grafikte % 14,3 ile tanımlanmış sınai faaliyetler arasında yer almaktadır.

Çimento endüstrisi kaynaklı sera gazı emisyonları; klinker üretiminde kullanılan doğal hammaddelerin içeriğinde yer alan karbonat minerallerinden ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{CO}_3$ ) karbondioksitin ( $\text{CO}_2$ ) ısıl işlem sonucu uzaklaştırılması (dekarbonizasyon), ve ısıl işlemler için ihtiyaç duyulan sıcaklığın temin edilmesi amacı ile yakıtların yanması sonucu meydana gelmektedir. Klinker üretimi kaynaklı toplam emisyon miktarının % 60 ila 70'i kalsinasyon, % 30 ila 40'luk bölümü yakıtların yanması sonucu meydana geldiği bilinmektedir.

Yetkili otorite tarafından yayınlanan, sera gazlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanmasına ilişkin mevzuat, 2014 yılında yürürlüğe girmiş, ilk izleme planlarının sunulmasına müteakip emisyonların raporlanması için gerekli altyapı oluşturulmuştur. Mevzuatın uygulanmasında ana amaç oluşan sera gazı emisyonlarının miktarının belirlenmesi ve azaltım stratejilerinin/mekanizmalarının oluşturulmasıdır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığının çimento endüstrisi özelinde belirlemeyi öngördüğü azaltım

<sup>5</sup> <http://www.csb.gov.tr/projeler/iklim/> (Erişim Tarihi: 07.05.2016)

stratejileri arasında, alternatif enerji kaynaklarının kullanımı ve katkılı çimento üretiminin artırılarak klinker kullanım oranının düşürülmesidir.

### **2.2.5. Atık yönetimi**

Çimento fabrikaları üretim faaliyetleri sonucunda aşağıda türleri verilen atıkların oluşumuna neden olabilmektedir. Endüstri kendi atıklarını, bir sonra ki bölümde detayları verilen Çevre İzin ve Lisans Belgesine sahip olması halinde bünyelerinde veya diğer lisanslı tesislerde, lisansı bulunmaması ve/veya lisansı dışında atıkların tesis faaliyetleri sonucunda meydana gelmesi halinde diğer tesislere göndererek bertaraf edilmesini veya geri kazanılmasını sağlamaktadır.

- Atık Refrakter Tuğlalar
- Kontamine ambalaj ve atıklar
- Atık dişli/redüktör yağları
- Torbalı Filtre Bezleri
- Atık elektrik/elektronik ekipmanlar

Çimento sektöründe ayrıca paketli satış kaynaklı ambalaj atıkları piyasaya sürme işlemi sonrasında meydana gelmekte, yasal düzenlemelerle belirlenen kotalar çerçevesinde yetkili kuruluşlar tarafından toplanarak geri kazanılması sağlanmaktadır.

### **2.3. Çimento Sanayinde Atıkların Alternatif Yakıt Ve Hammadde Olarak Kullanımı**

Çimento endüstrisi, enerji yoğun bir sektördür. Klinker üretiminde spesifik enerji ihtiyacı 700 ila 900 kcal/kg arasında değişiklik göstermektedir. 2012 yılı için klinker spesifik enerjisinde dünya ortalaması 843 kcal/kg olarak gerçekleşmiş, 2012 yılında üretilen her ton çimento için de gerekli elektrik enerjisi 99.3 kWh olarak hesaplanmıştır (Atımtay, 2015, s.76)

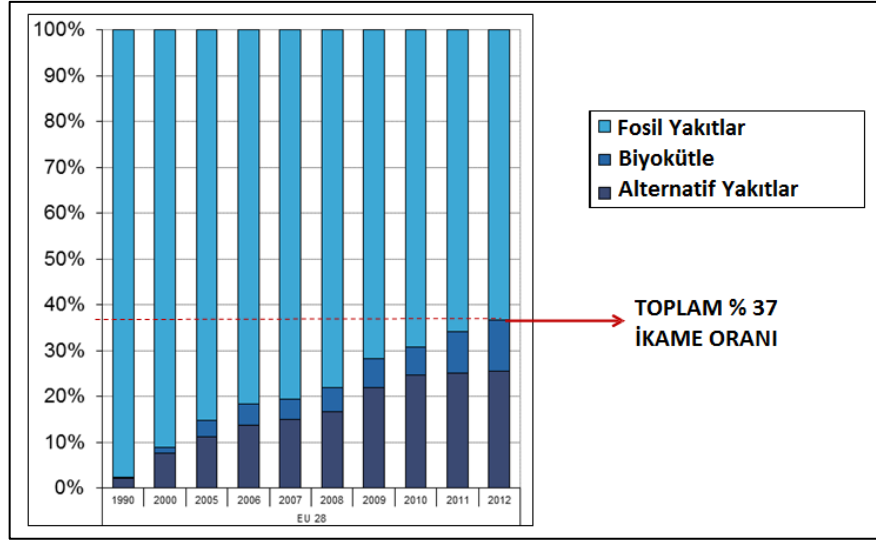
Klinkerin pişirilmesi esnasında gereksinim duyulan enerji döner fırında yüksek kalorili kömür veya petrol koku kullanılarak elde edilmektedir. Kullanılan kömürlerin kalori değerinin en az 4000-5000 kcal/kg olması beklenmektedir. Kalorifik değerinin yüksek olması (7000-8000 kcal/kg) nedeni ile petrol koku, çimento sektörü için ideal yakıt olarak görünmekte ve sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Atımtay, 2015, s.76).

Klinker pişirme işleminde kullanılan yakıtın toplam maliyet içinde yerinin % 30-40 mertebesinde seyretmesi çimento üreticilerinin enerji verimliliği yönünde yaptığı araştırma ve geliştirme çalışmalarına önemli ölçüde yön vermiştir. Yakıt ve yanma teknolojisi konusunda önemli oranda gelişme kaydeden çimento sektörü, alternatif enerji ve hammadde kaynakları konusunda da başarılı çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Atıkların ek yakıt olarak kullanılmasına yönelik yapılan yasal düzenlemelerin ardından ülkemizde bir çok çimento fabrikası alternatif yakıtları kullanmak üzere çalışma başlatmıştır. Öncelikli olarak, bünyesinde çevre ve insan sağlığı açısından zararlı birçok bileşik ve element bulunduran tehlikeli atıklara yoğunlaşan sektör, söz konusu atıkların ısı geri kazanım ile imha edilmesine öncülük etmiştir. Zaman içinde diğer atık türleri ile ilgili teknolojik çalışmalarını yaptığı yatırımlar ile hayata geçiren çimento sektörü, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından izin verilen birçok atığı bünyesinde alternatif yakıt olarak kullanabilmektedir.

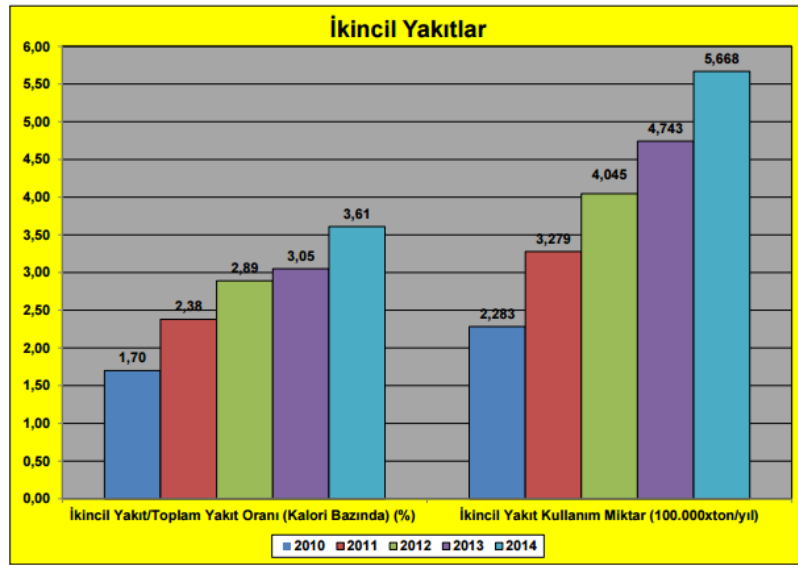
Alternatif yakıtların kullanımı için geliştirilen teknolojiler, aşağıda tür ve özellikleri verilen atıkların kullanımına olanak sağlamaktadır.

- Tehlikeli atıktan üretilen atıktan türetilmiş yakıt (ATY) (katı, homojen, 3.000 ila 4.000 kcal/kg kalorifik değere sahip işlenmiş atıklar)
- Evsel atıktan üretilen atıktan türetilmiş yakıt (ATY) (katı, homojen, 2.500 ila 3.500 kcal/kg kalorifik değere sahip, nem içeriği nispeten yüksek, evsel atıkların işlenmesi ile üretilmiş atıklar)
- Sıvı atıklar (uygun viskoziteye sahip, katı partikül barındırmayan, kalorifik değeri 5000 ila 8000 kcal/kg arasında geniş bir bantta seyreden sıvı atıklar)
- Ömrünü tamamlamış lastikler (4000 ila 5000 kcal/kg kalorifik değere sahip lastik atıkları bütün ve/veya parçalanmış halde fırın hattına beslenmektedir.)
- Evsel ve endüstriyel nitelikte arıtma çamurları (katı, su muhtevası kabul şartlarına göre değişken)



Şekil 2.5. 2012 yılında AB28 ülkelerinde kullanılan alternatif yakıtların toplam ısıl güce oranları

Kaynak: [wbcsdcement.org/GNR-2012/index.html](http://wbcsdcement.org/GNR-2012/index.html)



Şekil 2.6. 2010 - 2014 yılları arasında Türkiye’de alternatif yakıt ve hammadde kullanım oranları

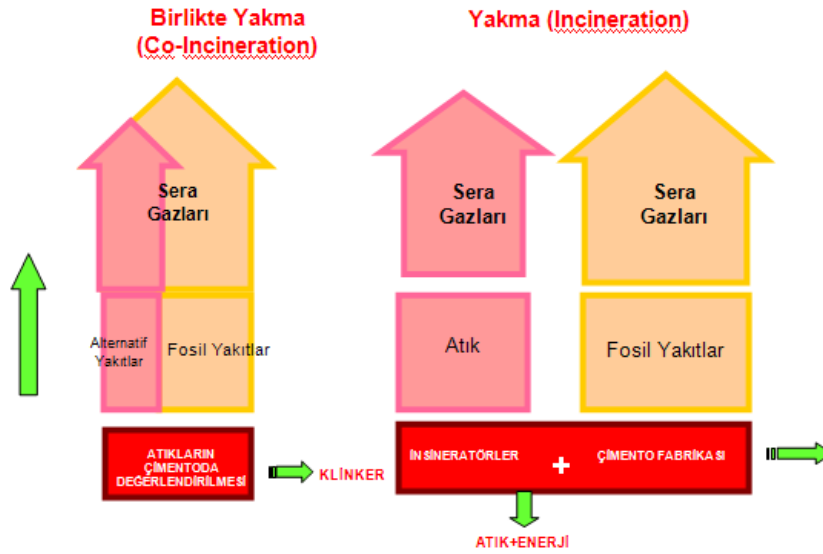
Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2014 Benchmark Çalışması

Avrupa Birliği ve ülkemiz mevzuatı uyarınca, tehlikeli atıkların yakılarak bertaraf edildiği tesislerde; atıklar en az 2 saniye süresince 850 C° (% 1’den fazla halojen ihtiva eden atıklar için 1100 C°) sıcaklığa maruz kalmalı, söz konusu teknik yeterlilik atıkların yakılması için süreklilik arz etmelidir (Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik, 2010). Ayrıca, Atıkları bertaraf amacı ile yakan tesislerde ilave önlem olarak ileri düzeyde baca gazı arıtma sistemleri bulunmalıdır.



Klinker üretimi yapılan döner fırınlarda atıkların beslendiği noktada sıcaklığın 900 C° ile 1.400 C° arasında olup, proses gereği minimum kalış süresi ilgili yasal düzenlemede belirtilen sürenin üzerindedir. Fırın teknolojisi itibari ile klinker üretiminin bu özelliği atıkların alternatif yakıt olarak kullanılmasında çimento sektörünün önemli bir paydaş olmasına neden olmuştur.

Ülkemizde hakkında yürütülen çalışmalar hali hazırda süre gelen bir diğer önemli çevresel husus; sera gazlarının kontrolü ve azaltılmasına yönelik mevzuatın geliştirilmesidir. Aşağıda verilen grafikte çimento fabrikalarında atıkların ısı geri kazanım için kullanılması veya söz konusu atıkların yakma tesislerinde bertaraf edilmesi halinde meydana gelecek sera gazı emisyonları gösterilmektedir. Bu yönü ile incelendiğinde yakma teknolojisi ve ilave yakıt ihtiyacı nedeni ile çevresel olarak önemli etkilere neden olabilecek yakma tesisleri yerine çimento üretim tesislerinin atıkları alternatif yakıt olarak kullanması, ilave sera gazı yükünün oluşmasına engel olması hasebiyle ayrıca önem arz etmektedir.



Şekil 2.7. Alternatif yakıt kullanımının insinerasyon sistemlerine göre sera gazı emisyonlarına etkisi

**Kaynak:** Cembureau, 1997, s.10-15

Yanma sonrasında atık kaynaklı külün klinker içinde kalması, bazik malzemenin asidik gazları kolayca soğurması ve fırın sıcaklığında organik maddelerin tümünün karbondioksit'e dönüşmesi döner fırınların yakma sistemlerine göre sayılabilecek diğer önemli avantajlarıdır.

Atıkların ek yakıt olarak kullanıldığı çimento fabrikalarında ilgili mevzuat gereği tesise kabul edilecek atıklar, kabul işlemleri öncesi beyan edilen özelliklerinin karşılaştırılması amacı ile bir dizi analize tabi tutulur. Atığın muhteviyatı ve özelliklerinin tayini için yapılan; elementel analiz, kalorifik değer tespiti ve su tayini başlıca analiz türleri olup isteğe göre farklı çalışmalar, farklı cihazlarla endüstriyel ölçekli laboratuvarlarda yapılabilmektedir. Ayrıca atıkları ek yakıt ve/veya alternatif hammadde olarak kullanan çimento fabrikalarında düzenli olarak emisyon ölçümleri yapılmakta, toz ve gaz emisyonları kontrol altında tutulmaktadır.

Ülkemizde yürürlükte olan Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik (2010), Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (2009) ve Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği (2014) atıkları alternatif yakıt ve hammadde olarak kullanacak çimento fabrikaları tarafından uyulacak teknik düzenlemeleri bünyesinde ihtiva etmektedir.

#### **2.4. Alternatif Yakıt ve Hammadde Kullanımının Çimento Üretimi Kaynaklı Emisyonlara Etkisi**

Klinker Üretim sürecinde kullanılan döner fırınlardan kaynaklanan emisyonlar, hammaddelerin fiziksel ve kimyasal reaksiyonları ve yakıtların yanması sonucu oluşmaktadır. Döner fırından çıkan gazların ana bileşenleri, yanma havasından gelen azot, kalsinasyon ve CO<sub>2</sub>, yanma süreci ve hammadde kaynaklı su ile ve fazla oksijendir. Çıkış gazları aynı zamanda toz, klorür, florür, kükürtdioksit, NO<sub>x</sub>, karbonmonoksit ve bununla beraber daha az miktarlarda organik bileşen ve ağır metalleri içermektedir (CEMBUREAU, 1997, s. 10-15).

Çimento üretiminde fosil yakıtların kullanılması esnasında ortaya çıkan emisyonlara, alternatif yakıt kullanımının etkisi aşağıda açıklanmaktadır.

- Kükürt oksitler (SO<sub>x</sub>): Alternatif yakıtların toplam SO<sub>2</sub> emisyonları üzerinde etkisi yoktur.
- Azot oksitler (NO<sub>x</sub>): Alternatif yakıtlar daha yüksek NO<sub>x</sub> emisyonlarına yol açmazlar, bazı durumlarda NO<sub>x</sub> emisyonlarını düşürdüğü bilinmektedir.
- Toplam organik karbon (TOK): Alternatif yakıtlar ve toplam organik karbon emisyon seviyeleri arasında bir ilişki bulunmamaktadır.

- Poliklorürlü dibenzo-p-dioksinler ve poliklorürlü dibenzofuranlar (PCDD/PCDF): Alternatif yakıtlar kullanıldığında dioksin emisyonlarında önemli bir fark tespit edilmemiştir.

- Hidrojen klorür (HCl): HCl emisyonları kullanılan yakıttan bağımsız olarak değişiklik göstermektedir.

- Hidrojen florür (HF): Alternatif yakıtlar kullanılırken HF emisyonlarında limit değerlerin altında değişiklikler gözlenebilmektedir.

- Ağır metaller: Emisyonlar kullanılan yakıttan bağımsız olarak değişiklik göstermektedir. Ancak, neredeyse %100'ü ya çimento klinkeri matrisi ya da çimento fırını tozu içinde atmosfere verilmeyen bileşenler olarak kalmaktadır. Her iki durumda da alternatif yakıtlar, kullanılmadan önce ciddi bir kabul ve denetim prosedüründen geçirilmektedir.

- Toz: Her iki yakıt rejiminde ele alınan toz emisyonlarının arasında bir fark görülmemektedir. Alternatif yakıtların birlikte işlenmesiyle ilgili olarak tesisler, atık yakma fırınları ile aynı standartları karşılamaktadır.

## 2.5. Beton nedir? Nasıl Üretilir?

Beton (Fransızca: "le beton") çakıl, kum gibi "agrega" denilen maddelerin bir bağlayıcı madde ve su ile birleştirilmesinden meydana gelen yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır. Bağlayıcı madde de genellikle çimento kullanılır. Portland çimentolu betonda bağlayıcı, Portland çimentosu ve su karışımıdır. Asfalt ve diğer benzeri malzemeler de bağlayıcı olarak kullanılabilir; bu tür yapı malzemelerine "asfalt betonu" ve "polimer betonu" adı verilmektedir<sup>6</sup>.

Beton değişik şekil ve amaçlarla yaklaşık 5000 yıldan beri kullanılan yapı malzemesidir. Eski Mısırlılar kil harcını piramitlerin yapımında kullanmışlardır. Harç kireç taşının (CaCO<sub>3</sub>) ısıtılması ve karbondioksitin (CO<sub>2</sub>) çıkarılması ile elde edilmiştir. Elde edilen kireç, agrega ile karıştırılarak harç olarak kullanılmıştır.

---

<sup>6</sup> <http://www.thbb.org/teknik-bilgiler/> (Erişim Tarihi: 08.03.2012)

### 2.5.1. Çimento su ile karıştırılınca ne olur?

Çimentonun suyla oluşturduğu kimyasal değişimlerin tümüne hidratasyon denir. Bu süreç içinde önce plastik bir çimento macunu oluşur, bu zamanla sertleşip son biçimini alır (Kuleli, 2010, s.9-1)

Sertleşme iki aşamadır:

- Priz: Çimentonun suyla karışması sonunda oluşan macunun koyulaşması, bu karışıma biçim verilebilir, dayanımı çok azdır.
- Sertleşme: Macun giderek koyulaşıp sertleşmesi ve dayanım kazanması; Bu evrede hidratasyon ve hidroliz tepkimeleri gerçekleşmektedir.

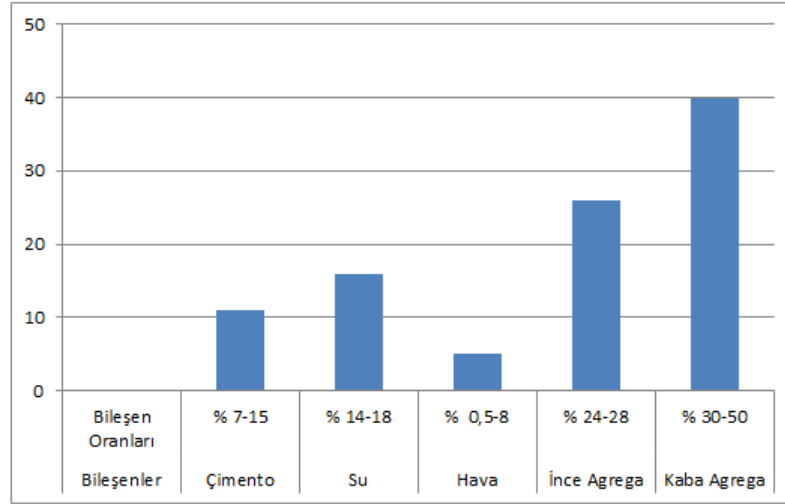
Hidratasyon sürecinin sonunda yüksek dayanıma sahip katılaşmış bir ürün elde edilmektedir. Hidratasyon tepkimeleri ısı vererek gerçekleşmektedir. Isı oluşumu birinci günde en üst seviyesine ulaşmakta, üçüncü gün sonunda azalmaktadır.

### 2.5.2. Beton üretimi

Beton için gerekli olan çimento ve agrega, ayrı sanayi dallarında hazırlanır. Son adım, karışımın hazırlanıp betonun kullanılmasıdır. Uygun karışım oranlarının seçilmesi; ekonomi, işlenebilme, mukavemet, dayanım ve görünüş gibi özelliklerin dengeli elde edilmesini sağlamaktadır. Karışım suyunun çimento miktarına oranı, beton dayanımına tesir eden en önemli etkidir. Diğer önemli etken de beton içindeki hava miktarıdır. Bu miktar normal betonda yaklaşık % 0,5-8 civarındadır. Bu iki etki beton kalitesinin kontrolünde en önemli iki faktörü teşkil etmektedir<sup>7</sup>. Aşağıdaki grafikte beton üretiminde kullanılan malzemelerin hacimsel oranları verilmektedir.

---

<sup>7</sup> <http://www.thbb.org/teknik-bilgiler/> (Erişim Tarihi: 08.03.2012)



**Şekil 2.8.** Beton üretiminde kullanılan malzemelerin hacimsel oranları

**Kaynak:** Özkul vd., 2004, s.28

Betonun dayanımı aşağıdaki parametrelere göre değişiklik göstermektedir (Kuleli, 2010, s.9-1)

- Çimentonun türü ve kalitesi,
- Su/Çimento oranı,
- Agregat türü (tür, irilik, biçim),
- Katkı türü (plastikleştirici, geciktirici.),
- Sıkıştırma ve kürlenme,
- Sıcaklık ve zaman

Hazır betonu, şantiyede elle ya da betoniyerle karıştırılarak hazırlanan betondan ayıran temel unsur, hazır betonun modern tesislerde, bilgisayar kontrolüyle üretilmesidir. Hazır beton kullanıcısının hazır betonda arayacağı nitelikler TS EN 206 Standardında tanımlanmaktadır.

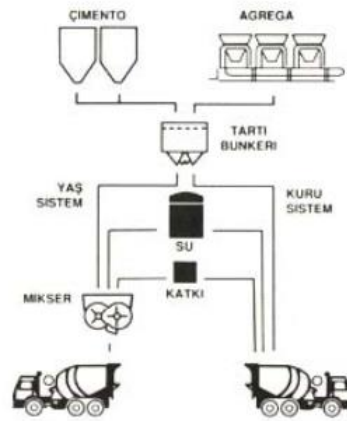
Hazır beton üretiminin su ölçme ve karıştırma işlemlerinin santralde veya transmikserde yapılmasına göre iki farklı şekli bulunmaktadır:

- Kuru Sistem
- Yaş Sistem

Kuru karışimli hazır beton, agregat ve çimentosu beton santralinde ölçülüp santralde veya transmikserde karıştırılan, suyu ve varsa kimyasal katkısı ise teslim

yerinde ölçülüp karıştırılarak ilave edilen hazır betondur. Kuru karışimli hazır betonda şantiyede karışıma verilen su miktarına (formülde öngörülenden daha fazla olmamasına) ve karıştırma süresine (homojen bir karışım için yeterli süre) özel itina gösterilmesi gerekmektedir.

Yaş karışimli hazır beton, su dâhil tüm bileşenleri beton santralinde ölçülen ve karıştırılan hazır betondur.



Şekil 2.9. Hazır beton üretimi

Kaynak: thbb.org

### 2.5.3. Beton karışım suyu

Beton karışım sularının genellikle “içilebilir” nitelikte olması istenmektedir. Ancak, içme suyu standartlarına uygun olmayan bazı suları da kullanarak iyi beton üretmek mümkündür. Uygun olmayan bir suyun karışımda kullanılması beton kalitesini olumsuz etkilemektedir. Çoğunlukla zaman içinde betonda dayanım gelişmesi en öncelikli dikkat edilecek husus olmakla birlikte, karışım suyunda kullanılacak safsızlıklar priz süresini, rötreyi, dayanımı da olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle fazla miktarda askıda katı madde, erimiş tuzlar veya diğer katkıları ve organik madde içeren suların karışım suyu olarak kullanımı tercih edilmemektedir (Özkul vd., 2004, s.28).

Beton üretiminde; geri dönen betondaki su, transmikser vb. araçların yıkanmasından kaynaklanan atıksu, sertleşmiş betonun basınçlı su ile işlenmesinde açığa çıkan su ve beton üretimi sırasında meydana gelen atıksular geri dönüşüm suyu olarak kullanılabilir (Özkul vd., 2004, s.30).

Geri kazanılacak sularda aşağıdaki hususlara bilhassa dikkat edilmelidir;

- Çimento hidratasyonuna etkisi izlenmelidir
- Yoğunluk taze su eklenerek azaltılmalıdır.
- İlave kirliliğe karşı önlem alınmalıdır.
- Yağ kontaminasyonundan uzak tutulmalıdır.
- Asit, deterjan ve tuzlardan uzak tutulmalıdır.
- Askıda katı maddeler nedeni ile sürekli karıştırılmalıdır.
- Klorür ve ince madde miktarı kontrol altında tutulmalıdır.

## **2.6. Beton üretiminde kontrol altında tutulan çevresel unsurlar**

Beton üretimi; üretiminde kullanılan hammaddelerin özellikleri ve sistemin olabildiğince basit unsurlar ile idamesi hasebiyle çevresel etkileri kontrol altında tutulabilir niteliktedir.

Beton üretiminde önemli çevre boyutlarından ilki, dozajlanan ve kullanılan hammaddelerin stoklanması esnasında meydana gelen toz emisyonudur. Beton üretiminde kullanılan çimento kapalı silolarda depolanmakta, malzemenin silo verilmesi esnasında fazla havanın silo üzerinden alınması maksadı ile filtreler kullanılmaktadır. Kullanılan filtreler ekonomik ömrünün tamamlanmasının ardından uygun bertaraf veya geri kazanım seçenekleri ile son işlem göreceği tesise gönderilmektedir.

Üretimde kullanılan agrega çimentodan farklı olarak geniş hacimli yarı kapalı ve/veya kapalı stok sahalarında depolanmaktadır. Malzemenin beslenmesi esnasında tozumanın engellenmesi için pulverize su sistemlerinin teçhiz edildiği bu tip alanlarda, iş makinası çalışmasının belirli kurallar dahilinde yapılması ilave toz oluşumunu engellemektedir.

Su yönetimi, beton üretim tesislerini ilgilendiren en önemli çevre boyutlarından biridir. Su kullanımının iyi yönetilmesi ve kullanım dolayısıyla çevrenin olumsuz yönde etkilenmemesi, tesisin çevresel yükünün en aza indirilmesi ve sürdürülebilir şekilde üretim yapılabilmesine olanak sağlamaktadır (Özkul vd., 2004, s.115).

Tesislerde üretimde kullanılan suyun yanında, transmikserlerin yıkanması, atık betondan agreganın yeniden kullanım amacı ile ayrılması ve saha temizliği amacı ile su

kullanılmaktadır. Kullanılan su sahada oluşturulan havuzlarda biriktirilmekte, üretilecek betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerine uygun olması halinde üretimde yeniden kullanılabilir.

Tesis içi atık yönetimi beton tesislerinde karşılaşılan bir diğer önemli çevre boyutudur. Tesis içinde özel olarak inşa edilen atık depolama alanları, uygun havuzlama ve tecrit seçenekleri ile atıkların tesis içinde yönetimi sağlanmaktadır.

## **2.7. Analiz Edilen Parametrelerin Toksikolojik Etkileri**

Analiz edilen parametrelerin içme suyu içeriğinde toksikolojik etkileri konusunda yapılan çalışmalar Dünya Sağlık Örgütü tarafından 2011 yılında yayınlanan İçme Suyu Kalitesi Rehberinin 4. Versiyonunda yer aldığı gibi aşağıda sıralanmaktadır.

### **2.7.1. Demir (Fe)**

Demir yer kabuğunda en bol bulunan elementlerden biridir. 0,5 ila 50 mg/l arası seviyelerde doğal kaynak sularında bulunabilmektedir. Demir, koagülasyon ve flokülasyon işlemlerinde kullanımının bir sonucu olarak içme suyu içeriğinde mevcut olabilmekte veya şebeke hatlarında çelik ve dökme demir borunun korozyonu sonucu tespit edilebilmektedir. Demir, özellikle demir (II) oksidasyon formunda, insan beslenmesinde önemli bir unsurdur. Demir için asgari gereksinim tahminlere göre yaklaşık 10-50 mg/gün arasında değişiklik göstermekte; ihtiyaç yaş, cinsiyet, fizyolojik durum ve demir biyoyararlanım aralığına bağlı olarak artmakta veya azalmaktadır.

1983 yılında, vücuda aşırı demir depolanmasına karşı bir önlem olarak, JECFA, 0,8 mg/kg vücut ağırlığına sahip PMTDI belirlemiştir. Bu, renklendirici maddeler olarak kullanılan demir oksitler hariç tüm kaynaklardan alınan demir için de geçerlidir. Demir takviyeleri, gebelik ve emzirme sırasında ya da belirli klinik gereksinimler için alınmaktadır. İçme suyunda %10'luk bir PMTDI dağılımı, yaklaşık 2 mg/l'lik bir değer verir ki bu değer sağlık için tehlike arz etmemektedir. Tat ve içme suyunun görünümü, genellikle, bu seviyenin altında etkilenecektir. İçme suyunda demirin kılavuz değeri önerilmemiştir.



### 2.7.2. Alüminyum (Al)

Alüminyum dünya üzerinde en çok bulunan elementlerden biridir ve yer kabuğunun yaklaşık % 8'ini oluşturmaktadır. Alüminyum tuzları su arıtma tesislerinin birçoğunda renk, bulanıklık ve organik madde giderimi için koagulant olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanımı arıtılmış suyun içeriğinde alüminyum konsantrasyonlarının tespit edilmesine yol açabilmektedir. Bazı durumlarda kalıntı derişimlerin fazla olması halinde renk ve bulanıklık problemlerine neden olabilmektedir. Bu tür sorunların ortaya çıkması içme ve kullanma suyu arıtma tesislerinde işlenmiş suyun kalitesi ve işletme parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Alüminyumun gıdalar ile alımı özellikle gıdalarda katkı maddesi olarak bu elementin kullanımı nedeni ile gerçekleşir. Alüminyumun diğer yollara nazaran su ile vücuda alınması toplam maruziyetin % 5'idir.

JECFA PTWI'dan (Gıda katkıları için Dünya Sağlık Örgütü ve Gıda ve Tarım Örgütü Uzman Heyetince belirlenmiş geçici izin verilebilir haftalık alım) elde edilen ve temel sağlık göstergesi olarak belirlenen en fazla konsantrasyon değerinin 0,9 mg/l olması tercih nedenidir. Bu yaklaşım içme suyunda ki PTWI'nin (geçici izin verilebilir haftalık alım) % 20'lik bölümünde ve 60 kg'lık bir yetişkinin günde 2 litre su içmesini temel almaktadır. Buna karşın belirlenen limit değer alüminyum tuzlarının derişimi pH, biyolojik olarak uygulanabilirlik ve beslenme koşulları nedeni ile belirli oranda belirsizlik yüzdesini bünyesinde ihtiva eder.

İçme ve kullanma suyu arıtımında alüminyumun koagulant olarak kullanımını yaygın ve verimli bir arıtma metodolojisi olarak tanımlanmaktadır. Alüminyum kullanımı nedeni ile oluşacak sağlık kaygıları (yani potansiyel nörotoksik etkiler) göz önüne alındığında, arıtılmış suda alüminyum seviyelerini en aza indirmek amacı ile içme suyu tesislerinde koagülasyon sürecinin optimizasyonu önem arz etmektedir.

Tesis sonrası şebekeye basılan arıtılmış su içeriğinde alüminyum konsantrasyonlarını en aza indirmek için bazı yöntemler kullanılabilir. Söz konusu metotlar, koagülasyon sürecinde optimum pH seviyesinin kullanılması, aşırı dozda alüminyum kullanımından kaçınılması, koagülantın dozajlanması esnasında iyi karıştırma, flokülasyon için optimum karıştırıcı hızının seçilmesi ve alüminyum floklarının verimli şekilde filtrasyonu olarak sıralanabilmektedir.

İyi çalışma koşulları altında, 0,1 mg/l ya da daha az alüminyum konsantrasyonunu, büyük su arıtma tesislerinde ulaşılabilir bir hedefdir. Küçük tesisler (örneğin 10.000'den daha az kişiye hizmet verenler), bu seviyeye ulaşmada bazı zorluklar yaşayabilmektedir. Bunun nedeni, küçük boyutlu tesisler operasyon dalgalanmaları daha az tolere edilebilmekte; ayrıca bu tür tesisler sınırlı kaynakları ve özel operasyonel sorunları çözmek için gerekli uzmanlığa sınırlı erişimleri nedeni ile sorunlar yaşayabilmektedir. Bu türde tesisler için, 0,2 mg/l ya da daha az miktarda konsantrasyon, arıtılmış su içinde bulunan alüminyum için uygun seviyedir.

Yukarıda işaret edildiği gibi, JECFA PTWI değerinin, 0,9 mg/l olması tercih edilir ki bu değer içme suyunda PTWI'nın % 20'lik dağılımına ve 60 kg'lık bir yetişkinin günde 2lt su içmesine göre belirlenmiştir. Buna karşın yukarıda belirtildiği gibi, içme suyu tesislerinde koagülasyon sürecinin optimizasyonuna bağlı olarak, alüminyumun koagülant olarak büyük su arıtma tesislerinde kullanımı halinde konsantrasyon seviyesi 0,1 mg/l, küçük tesislerde ise 0,2 mg/l altında olmalıdır. Ayrıca; mikrobiyal kontaminasyonu engellemek amacı ile koagülasyonun optimize edilmeli ve dağıtım şebekelerinde alüminyum flok birikiminin engellenmesi için arıtma tesisi çıkış suyunda tespit edilen kalıntı derişimin yukarıda verilen sınır değerleri aşmadığından emin olunmalıdır.

### **2.7.3. Bor (B)**

Bor bileşikleri, cam, sabun ve deterjanların üretiminde ve kimya endüstrisinde alev geciktirici olarak kullanılmaktadır. Bor doğal yollarla, öncelikle kayalar ve boratlar ve borosilikat içeren topraklardan özütlenmesi sonucu yer altı sularına geçmektedir. Yüzey sularının borat içeriği atıksu deşarjları sonucunda artabilmekte, ancak borat kullanımının önemli ölçüde azaltılması, atıksu deşarjlarındaki bor seviyelerinin düşmesine neden olmuştur.

Deney hayvanlarında borik asit veya boraksın kısa ve uzun süreli oral maruz kalınması sonucunda erkek üreme yolu toksisitesine neden olduğu saptanmıştır. Bu etki ile meydana gelen testiküler lezyonlar, yiyecek ya da içme suyu içinde borik asit ya da boraks verilen fare, sıçan ve köpeklerde gözlemlenmiştir. Gelişimsel toksisite, iri sıçanlar, fareler ve tavşanlarda deneysel olarak kanıtlanmıştır. Mutajenite deneyleri, çok sayıda negatif sonuç ile birlikte, borik asit ve boraksın genotoksik olmadıklarını

göstermektedir. Farelerde ve sıçanlarda uzun süreli çalışmalarda, borik asit ve boraks tümör insidansında hiçbir artışa neden olmamıştır.

#### **2.7.4. Çinko (Zn)**

Çinko hemen hemen tüm yiyecek ve içme sularında bulunan temel bir eser elementtir. Tuzlar ya da organik kompleksler halinde bulunur. Yüzey suları ve yeraltı çinko düzeyleri genelde 0,01 ve 0,05 mg/l aşmamasına rağmen, şebeke suyu konsantrasyonları borularda çinko alaşımı kullanılması sonucu çok daha yüksek olabilmektedir.

1982 yılında, JECFA 1,0 mg/kg-vücut ağırlığı arasında çinko için PMTDI önerilmiştir. Yetişkin erkekler için günlük gereksinim 15-20 mg/gün'dür. İnsanlar üzerinde yapılan son çalışmaları dikkate alarak, formal bir kılavuz değeri türetmek gerekli görülmemiştir. Bununla birlikte, 3 mg/l üzerinde çinko içeren içme suyu, tüketiciler için kabul edilebilir olmayabilmektedir.

#### **2.7.5. Kurşun (Pb)**

Kurşun kurşun-asit bataryaları, kaynak elektrodları ve alaşımların üretiminde kullanılmaktadır. Kurşun organokurşun, tetraetil ve tetrametil kurşun da detonasyon kesici ve benzinde yaygın biçimde kullanılmasına rağmen bir çok ülke kurşun kullanımında kısıtlamalar getirilmiştir. Benzin ve gıda işleme endüstrisi ile birlikte katkı maddesi olarak kurşunun azalan kullanımı nedeniyle, hava ve gıdada kurşun derişimi azalmaktadır. Bununla birlikte birçok ülkede, belirli kaynaklar olmadığı sürece kandaki kurşun düzeylerinin de düştüğü bilinmektedir. Kurşun doğal kaynaklardan olan çözünme sonucu şebeke suyunda nadiren bulunur; daha doğrusu, içme suyu içinde varlığını boruların kaynaklı parçaları ya da isale hatlarında kurşun içeren boruların aşındırıcı su etkilerine borçludur. Sıhhi tesisat sistemi için çözülmüş kurşun miktarı; pH, sıcaklık, su sertliği dâhil olmak üzere; yumuşak su, asidik su, suyun bekleme süresi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. İçme suyundaki serbest klor kalıntısı çözünmez kurşun ihtiva eden çökeltiler oluşturma eğilimindedir. Buna karşın kloramin kalıntıları, kurşun boru içinde daha fazla çözünür tortuları oluşturabilir.

Kurşuna maruz kalmak çeşitli nörolojik etkiler de dâhil olmak üzere, geniş bir yelpazede tanımlanabilir; ölüme sebebiyet verme (kardiyovasküler hastalıklar nedeni

ile), böbrek fonksiyon bozuklukları, hipertansiyon, olumsuz doğurganlık ve gebelik sonuçlarına da etki edebilmektedir. Çocuklarda sinir sistemi bozuklukları, genellikle diğer etkilerden daha düşüktür ve kanda bulunan kurşun derişimi ile ilişkilidir, veriler diğer sağlık etkilerinden nörolojik etkilerin daha fazla olduğunu göstermektedir. Çalışmalardan alınan sonuçlar diğer etkilerle daha fazla uyumludur. Yetişkinler için, kanda bulunan düşük kurşun düzeyi ile ilişkili başlıca etki sistolik kan basıncında kurşun bağlantılı artıştır. JECFA, nörogelişimsel ve sistolik kan basıncı üzerindeki etkilerin doz tepki analizi için uygun zemin sağladığı sonucuna varılmıştır. Doz tepki analizlerine dayanarak, JECFA, 25 µg/kg doz vücut ağırlığı oranında, daha önce oluşturulan PTWI, çocuklarda en az 3 zeka katsayısı (IQ) puanı azalma ile ilişkilendirildiği ve yetişkinlerde yaklaşık 3 mmHg (0,4 kPa) sistolik kan basıncında artışa neden olduğu tahminde bulunmaktadır. Bir popülasyon içindeki IQ ya da kan basıncı dağılımına bir kayma olarak bakıldığında bu değişiklikler önemlidir. JECFA bundan dolayı, PTWI'nın artık sağlığı koruyucu olarak kabul edilebilir olmadığı sonucuna varmış ve veri kullanımını geri çekmiştir. Çünkü doz yanıt analizleri, kurşunun eşik değerinin temel etkileri için bir gösterge sağlamamaktadır. JECFA, nörogelişimsel etkiler, fetüs, bebek ve çocukların kurşuna en duyarlı alt gruplar olduğunu yinelemektedir. Bu çalışmalar sonucunda kabul edilmesi gereken en önemli husus, içme suyundaki çoğu kurşun muhteviyatının binalardaki tesisattan kaynaklandığı ve çözümün, başta sıhhi tesisatlar olmak üzere çok zaman ve para gerektiren, kurşun içeren parçaların sökülmesi, kullanımda olan tüm tesisatın yenilenmesidir.

#### **2.7.6. Gümüş (Ag)**

Gümüş doğada, çözülmeyen ve devinimsiz oksitler, sülfürler ve bazı tuzlar formunda bulunur. Yeraltı suyu, yüzey suyu ve içme suyu içeriğinde genellikle 5 µg/l ve üzerinde konsantrasyonlarda bulunmuştur. Dezenfeksiyon işlemler için gümüş kullanılan arıtma tesislerinde çıkış suyu içeriğinde 50 µg/l üzerinde konsantrasyon değerleri bulunabilmektedir. Günlük alımın kişi başına yaklaşık 7 µg olduğu tahmin edilmektedir.

Gümüşün küçük bir yüzdesi vücut tarafından emilmektedir. İnsanlarda ve deney hayvanlarında alıkonum oranları % 0 ila % 10 arasında değişmektedir.

Gümüş aşırı olduğunun en belirgin göstergesi ise Arjiri'dir. Arjiri, gümüşün dokularda birikmesi sonucu cilt ve saç renginin solmasına neden olmaktadır. Arjiri için ağız yoluyla alınan NOAEL ömür boyunca 10 gramdır. Bu değere, laboratuvar hayvanlarında yapılan deneyler ve insan vakalarından elde edilen verilerin uzun vadede değerlendirilmesi sonucu ulaşılmıştır.

Gümüş derişimi içme suyunda 5 µg/l ve altında tespit edilmektedir. Bu değer içme suyu kalitesini etkilemeyecek derece düşüktür. Ayrıca bu değer arjiriye neden olmayacağı bilimsel olarak ispatlanmıştır. Özel durumlarda gümüş tuzları içme suyunun bakteriyolojik kalitesini korumak için kullanılabilir. 0,1 mg/l'ye kadar gümüş, sağlık riski olmaksızın bu gibi durumlarda tolere edilebilir. Bu konsantrasyonun yarısı 70 yıl içinde toplam doz olarak 10g insan NOAEL'i için verilir. İçme suyunda gümüş için sağlığa dayalı kılavuz değeri elde etmede hiçbir yeterli veri mevcut değildir.

#### **2.7.7. Bakır (Cu)**

Bakır, hem gerekli bir besin ögesidir hem de içme suyu kirleticisidir. Borular, vanalar ve bağlantı parçaları yapmak için kullanılır ve alaşımlarda ve kaplamalarda mevcuttur. Bakır sülfat pentahidrat kimi zaman su yüzeyine alg kontrolü için eklenir. İçme suyundaki bakır konsantrasyonlarının birincil kaynağı dâhili bakır sıhhi tesisat korozyonudur. Akan ya da tamamen temizlenen su seviyelerinde konsantrasyon düşük olma eğilimindedir; sabit ve kısmen akan sularda ise değişkenlik durumu daha fazla olabilmektedir (çoğunlukla 1 mg/l üzerinde). Arıtılmış su dağıtım sırasında bakır derişimi genellikle artış gösterir. Özellikle bir asidik pH değerine sahip sistemlerde veya alkali pH değeri yüksek olan karbonatlı sularda, dağıtım sisteminin korozyona uğraması bakır konsantrasyonunu arttıracaktır. Gelişen ülkelerde gıda ve su, bakıra maruziyetinin birincil kaynaklardır. Dağıtım sistemi, sabit veya kısmen akan su sarfiyatını önemli ölçüde artırır, özellikle musluk suyu ile sulandırılmış besinlerle beslenen bebekler için, alınan toplam günlük bakır miktarı artabilmektedir.

IPCS, yetişkinlerde, oral alımın kabul edilebilir bir aralığının üst sınırının belirsiz olduğu sonucuna varmıştır. Günlük maruziyetin en fazla 2 ya da 3 mg/gün olması beklenmektedir. Bu değerlendirme, sadece bakır ile kontamine olmuş içme suyunun gastrointestinal etkileri çalışmalarına dayanmaktadır. Deney hayvanlarında toksisite üzerine mevcut veriler, insanlar için uygun bir model hakkında belirsizlik

nedeniyle ağızdan alımın kabul edilebilir aralığının üst sınırının kurulmasında yardımcı olarak kabul edilmiştir. Bakırın gastrointestinal etkileri hakkında verilerin dikkatli bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Gastrointestinal sistem ile ilgili son çalışmalar, içme suyunda bakır etkileri için eşik değerleri ortaya koymuştur ancak hassas popülasyonlar üzerindeki bakırın uzun vadeli etkileri konusunda hala daha bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Bakırın homeostasis metabolik bozukluklara neden olduğu da bilinmektedir.

### **2.7.8. Krom (Cr)**

Krom yerkabuğuna geniş çapta dağılmaktadır. (+6) ve (+2) değerliklerinde mevcut olabilir. Genel olarak gıda alımının maruziyetin ana kaynağı olduğu görülmektedir.

Oral yoldan krom (III) verilen deney hayvanları üzerinde yapılan uzun süreli karsinojenite çalışmalarında, tümör oranında bir artış gözlemlendiği rapor edilmiştir. NTP çalışmasında ise yüksek dozlarda ve oral yolla kanserojenik etkiler göstermesine rağmen deney hayvanlarında, krom (VI), inhalasyon yoluyla alındığında kansere neden olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte yapılan bazı çalışmalarda, düşük dozlarda doz-yanıt ilişkisinde doğrusal olmayan bulgular tespit edilmiştir. Krom (VI) mide ve mide-bağırsak sisteminde krom (III)'e indirgenmektedir. Epidemiyolojik çalışmalarda, inhalasyon sonucu akciğer kanseri ile krom (VI)'ya maruziyet arasında bir ilişki bulunmuştur. IARC, Krom (VI)'yı Grup 1'de (insan kanserojen) ve krom (III)'ü Grup 3'de sınıflandırmıştır (İnsanlarda kanserojen olarak sınıflandırılmaz). Krom (VI) bileşikleri, genotoksisite çalışmasında aktif olup, krom (III) bileşikleri bu kapsam dahilinde değildir.

### **2.7.9. Sodyum (Na)**

Sodyum tuzları (örn., sodyum klorür), hemen hemen tüm gıda ürünleri (günlük maruz kalınan kaynağı) ve içme suyunda bulunmaktadır. İçme suyunda sodyum konsantrasyonları tipik olarak en az 20 mg / l olmasına rağmen, bu değer bazı coğrafyalarda aşılabilir. Havada sodyum tuzlarının seviyesi yiyecek veya su içinde bulunan değerlere göre düşüktür. Bazı su arıtma cihazlarının, içme suyu sodyum içeriğini önemli ölçüde etkileyebileceği bilinmektedir. Bazı su yumuşatıcıların içine sodyum önemli ölçüde eklenebilmektedir. İçme suyu ile sodyum arasında muhtemel

ilişki olduğu ve hipertansiyon oluşumuna ilişkin bir gösterge olduğu kesin olarak kanıtlanamamıştır. Bu nedenle, sağlığa dayalı hiçbir kılavuz değeri önerilmemektedir. Ancak, 200 mg/l'yi aşan konsantrasyonlar içme suyunun tadında problemlere neden olduğu bilinmektedir.

#### **2.7.10. Arsenik (As)**

Arsenik doğada genellikle (-3), (0), (+3) ve (+5) değerlikli sülfid, metal arsenid ve arsenat formunda bulunmaktadır. Suda ise (+5) değerlikli arsenat formunda bulunmakta, elementin anaerobik koşullarda (+3) değerlikli arsenit formuna dönüştüğü bilinmektedir. Doğal su kaynakları içeriğinde genellikle 1-2 µg/l'den daha az bulunmaktadır. Ancak, özellikle sülfid mineral yatakları ve volkanik kaya çökeltilerinden elde edile yeraltı sularında önemli miktarda tespit edilebilmektedir. Ayrıca, arsenik özellikle balık ve deniz kabukluları gibi gıda maddelerinde daha az toksik olduğu bilinen organik formunda bulunabilmektedir.

Arseniğe mesleki olarak maruz kalmanın dışında, kişisel maruziyetin en önemli yollarından biri de içme suyundan yapılan içecekler dâhil olmak üzere, gıda ve içme suyu yoluyla alınmasıdır. İçme suyunda arsenik konsantrasyonunun 10 µg/ml veya daha büyük olduğu durumlarda, vücuda alınan toplam arsenikte baskın rol içme suyunun olacaktır. Bununla birlikte içme suyu içeriği fazla olan çorba ve benzeri yemeklerin beslenme menüsü içinde önemli ölçüde yer alması kişisel maruziyetin miktarını artıracaktır.

Arseniğin insan metabolizması için gerekliliğine dair yeterli kanıt bulunmamaktadır. İnsanlarda akut toksisite etkisi olan arsenik bileşiklerinin ağırlıklı olarak vücuttan atılma hızının fonksiyonu ile ilişkilidir. Arsin; arsenitler, arsenatlar ve organik arsenik bileşiklerinin ardından en toksik olarak arsenik bileşiği olarak kabul edilmektedir. Arseniği çok yüksek konsantrasyonlarda ihtiva eden kuyu sularının kullanımı sonucunda akut arsenik zehirlenmesi vakaları bildirilmiştir (21,0 mg/l).

Kronik arsenisizm belirtileri dermal lezyonlarda dâhil olmak üzere, hiperpigmentasyon, hipopigmentasyon, periferik nöropati, cilt kanseri, mesane ve akciğer kanserleri ve periferik vasküler hastalıklar arsenikli içme suyu tüketen popülasyonlarda daha gözlemlendiği bilinmektedir. Dermal lezyonlar, yaklaşık 5 yıl asgari maruz kalma sürelerinden sonra meydana gelen ve en sık rastlanan

belirtidir. Kardiyovasküler sistem üzerine etkileri 7 yıl ortalama arsenikli suyu tüketen çocuklarda gözlemlenmiştir (Ortalama konsantrasyon 0,6 mg/l).

Çok sayıda epidemiyolojik çalışmada, içme suyu yoluyla arsenik alımıyla ilişkili kanser vakalarına neden olan sağlık riskleri incelenmiştir. Bununla birlikte, içme suyu yoluyla arsenik alımının yüksek seviyelerde olduğuna ve farklı türlerde kanser gelişimine neden olduğuna dair ciddi kanıtlar ortaya konmuştur. Kanserin oluşum mekanizması hakkında yapılan çalışmaların belirsizlikleri ve düşük alımlarda doz-yanıt eğrisinin şekli ile ilgili tartışmalar sürmektedir. Uluslararası Kimyasal Güvenlik Programı, içme suyunda arseniğe uzun süreli maruz kalma ile risklerin arttığı ve deri, akciğer, mesane ve böbrek kanseri ile ciltte meydana gelen değişikliklere (hiperkeratoz ve pigmentasyon değişiklikleri gibi) neden olduğu sonucuna varmıştır.

Maruziyet cevap ilişkisi ve yüksek riskler her bir nihai noktada bir çok çalışmada gözlemlenmiştir. Bu etkilerin üzerine en önemli çalışmalar Tayvan ve Çin'de yapılmıştır. Aynı zamanda diğer ülkelerde de popülasyonlar üzerindeki çalışmalardan elde edilen önemli kanıtlar bulunmaktadır. Akciğer ve mesane kanseri ile arsenik bağlantılı deri lezyonlarının artan risklerinin, 50 µg/l altındaki konsantrasyonlarda içme suyu alımı ile ilişkili olduğu bildirilmiştir. Uygun müdahaleler geliştirilmesi ve pratik müdahale politikalarının belirlenmesinde yardımcı olmak üzere, cilt lezyonlarının yanı sıra kanser için doz süresi yanıtını belirlemek için daha analitik epidemiyolojik çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

İnorganik arsenik bileşiklerinin, insanlarda kansere neden olduğu ispatlanmış ve hayvanlar üzerinde yapılan çalışmalarda kansere neden olduğuna dair sınırlı veri ortaya konmuştur. Bu özelliği hasebiyle arsenik IARC tarafından insanlarda kanserojen etkiye sahip olduğu gerekçesi ile Grup 1'de sınıflandırılmıştır. İç organlar ve deri kanserleriyle içme suyunda arsenik tüketimi arasındaki ilişki hakkında önemli bir veri tabanı olmasına rağmen, düşük konsantrasyonlarda gerçek riskler üzerinde önemli derecede belirsizlikler bulunmaktadır. Son dönemde yapılan bir değerlendirmede, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Araştırma Konseyi, "Arseniğin uygun etki mekanizmasının mevcut doğrusal etki şekli ya da doğrusal olmayan ekstrapolasyonu biyolojik temel oluşturmaz" sonucuna varılmıştır. İçme suyunda en fazla 10 µ/l konsantrasyonunda arseniğe maruz kalma sonucunda, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) nüfus dağılımı içinde yapılan araştırmalara göre; mesane ve akciğer kanserinde doğrusal



ekstrapolasyon kullanarak yapılan tahminlerde; sırasıyla, kadınlarda her 10.000 kişi için 12-18, erkekler bireylerde ise 10.000 kişide 23 ve 14 bu iki türde kansere rastlanabileceği bildirilmiştir. Bu tahmini riskler ile belirtilen gerçek sayıları, mevcut epidemiyolojik yöntemlerle tespit etmek çok zor olacaktır. Arsenik konsantrasyonlarında 50 µg/l üzerinde olan alanlarda yapılan bazı çalışmalarda, arsenik ile ilgili olumsuz etkiler tespit edilememiştir.

Arsenik içme suyu içeriğinde 1 ila 10 µg/l arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda özellikle nispeten küçük kaynaklarda, içme suyundan arsenik giderilmesinde pratik zorluklar göz önüne alındığında, 10 µg/l kılavuz değeri olarak geçici olarak belirlenmiştir. 10 µg/l geçici kılavuz değeri, daha önce 15 µg/kg vücut ağırlığı kadar bir JECFA PTWI tarafından desteklenmiştir. Ancak, JECFA son dönemde içme suyunda arsenik derişimleri yeniden değerlendirilerek mevcut PTWI epidemiyolojik çalışmalarda hesaplanan % 0.5'lik oranın (BMDL<sub>0,5</sub>), karşılaştırmalı doza bağlı alt güven sınırına yakın olduğundan, 10 µg/l sınır değerinin bu nedenle uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

#### **2.7.11. Kadmiyum (Cd)**

Kadmiyum çelik endüstrisinde ve plastik üretiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kadmiyum bileşikleri yaygın olarak batarya ve pillerde kullanılmaktadır. Kadmiyum, atık sular ve gübre kullanımı ile alıcı ortama verilmekle birlikte, hava emisyonları içinde bulunması kirletici vasfını artırmaktadır. İçme suyunun kirlenmesi galvanizli borularda çinkonun empüritesi, kaynaklı parçalar ve bağlantı elemanları nedeni ile oluşmaktadır. Gıdalar, kadmiyuma günlük olarak maruz kalmanın ana kaynağıdır. Günlük oral alım miktarı 10-35 µg'dır. Sigara içmek kadmiyuma maruz kalmanın önemli bir ek kaynağıdır.

Kadmiyumun bileşiklerinin emilimi, bileşiklerin çözünürlüğüne bağlıdır. Kadmiyum, öncelikle böbreklerde birikmektedir. İnsanlarda 10 ila 35 yıl gibi biyolojik yarılanma ömrüne sahiptir. Kadmiyumun, inhalasyon yoluyla kanserojendir ve IARC kadmiyumu ve kadmiyum bileşiklerini 2A Grubunda (İnsanlar için muhtemelen kanserojen) sınıflandırmıştır. Bununla birlikte, oral yoldan kanserojen olduğuna ve genotoksik olduğuna dair net bir kanıt yoktur. Böbrek kadmiyumun toksisitesi için ana hedef organdır.

Beslenme sırasında maruz kalınan miktarın günlük 0,8 mg/ kg vücut ağırlığı oranı ve ya ayda yaklaşık 25 µg/kg vücut ağırlığı oranı olduğu tespit edilmiştir. Kadmiyumun istisnai olarak uzun bir yarılanma ömrü nedeniyle, 7 µg/kg vücut ağırlığından önceki PTWI değeri geri çekilmiş ve 25 µg / kg vücut ağırlığı olan bir PTMI belirlenmiştir.

### 3. YÖNTEM

#### 3.1. Özütleme (Leaching) Test Yöntemleri

Alternatif yakıt ve/veya hammadde kullanılarak üretilen betonda özütleme karakteristiklerinin incelenmesinde kullanılan en yaygın metotlar aşağıda verildiği gibidir (de Groot vd., 1997, s.68).

- Kesikli Testler
- Tank Testleri
- Kolon Testleri

Kesikli Test veya uygunluk testi granüler özellikte malzemeye uygulanabilirliği, basitliği, sürecin hızlı ilerlemesi ve tekrarlanabilirlik özelliğinin iyi olması nedeni ile birçok ülkede yasal mevzuatın uygulanmasını öngördüğü test metodu olarak karşımıza çıkmaktadır. Kesikli düzenekle yapılan özütleme testlerinin bazıları X31-210 Fransa, DEV-S4 Almanya, NEN 7341 Hollanda, TVA İsviçre ve TCLP ABD olarak bilinmektedir (de Groot vd., 1997, s.68).

Son dönemde Amerikan Çevre Koruma Ajansının (EPA) tüm metotların ışığında oluşturduğu analiz yöntemleri özütleme testlerinde tercih edilmektedir.

Yukarıda belirtilen testlerin tümünde çevresel unsurlarla ilişkisi olan tüm elementlerin miktarlarının belirlenmesi ve mevcut standartlarla karşılaştırılması temel amaçtır. Bu yöntemlerin uygulanması sırasında birçok parametre irdelenmekte (sıvı/katı oranı, özütleyenin tipi ve pH'sı, malzeme inceliği, özütleme süresi, karıştırma hareketinin tipi vb.) sonuçlar her zaman birbiri ile karşılaştırılabilir nitelikte olmamaktadır (de Groot vd., 1997, s.68).

Tank Testleri genellikle beton gibi monolitik malzemelerde ve özütlemenin difüzyon süreci ile kontrol edildiği düzeneklerde kullanılmaktadır. Bu tür testlerde gözenek ve temas çözeltisi arasındaki konsantrasyon farkı ile malzemenin yoğunluğu veya gözenekliliği özütleme amacı ile kullanılan çözeltinin teorik özütleme hızını belirlemektedir (Thielen, Spanka ve Rechenberg,1996). Bu metotla yapılan testlerde, baskın özütleme mekanizmasının bulunması ve difüzyon katsayısının belirlenebilmesi için en az beş defa yenilenmek zorundadır (Hohberg vd., 1997, s.217-228). Betonun ekonomik ömrü süresince sergileyeceği özütleme davranışının belirlenebilmesi için Avrupa'da uygulanan tank testleri içinde en çok bilinen yöntem Hollanda Standardı NEN 7345'dir. Tank testleri için bilinen bir diğer yöntem ise Amerikan Çevre Koruma ajansının derlediği EPA-1315 Testi'dir.

Kolon veya perkolasyon (süzme) testleri, özütleyicinin sürekli ve kesikli olarak değiştiği yüzey koşullarında gerçekleşen testler olup, granüler yapıda malzemelerin kullanılması ile gerçekleştirilmektedir. Sonuçlar genellikle bu tür malzemelerin dolgu veya yol yapımında kullanılması ile ilgili gözetilen çevresel unsurlar dikkate alınarak değerlendirilmektedir (Hohberg vd., 1997, s.217-228).

Genellikle belirli bir hacmin kolon içinde belirli bir zaman aralığında granüler yapıda materyal üzerinden geçirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Sonuçların saha koşulları ile uyumlu olduğu yapılan deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır (Zhang, Blanchette ve Malhotra, 2001, 126-136).

Avrupa ülkelerinde laboratuvarlar arasında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda difüzyon testlerinin özütleme karakteristiklerinin belirlenmesinde en verimli ve uygulanabilir test olduğunu doğrulamaktadır (de Groot vd., 1997, s.68). Yazarlar bu tip çalışmalarda Hollanda Standadizasyon Enstitüsü tarafından yayınlanan NEN 7345 (monolitik örneklerde) ve NEN 7341 (kırılmış örneklerde) uygulanmasının daha uygun olacağı kanaatine varmışlardır. Son dönemde ise söz konusu Hollanda normlarına eşgüdüm içinde sonuçlar veren ve Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından yayınlanmış 1313, 1314, 1315 ve 1316 nolu metotların kullanılması önerilmektedir.

Çimento bazlı malzemelerin tüm çevresel ögeleri gözetecek şekilde kullanımı üzerine yapılan çalışmalarda, Van der Sloot (2002, s.181-186) betonun kullanım yerine ve türüne göre çeşitli özütleme metotlarının uygulanabileceğine dair çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarda çimento bazlı ürünlerin kullanım türlerine göre metotların seçilmesinin daha uygun olacağı bildirilmiştir.

Kullanım alanları dört ana sınıfta incelenebilmektedir. Bunlardan ilki betonun ekonomik ömrü süresince kullanıldığı yapılardır. Diğer kullanım alanları ise betonun geri dönüşümü, yeniden kullanımı ve deponi alanlarda dolgu malzemesi (bertaraf) olarak kullanılmasıdır.

Yukarıda tanımlanan kullanım alanlarına göre belirlenmiş metodolojiler aşağıda verilmektedir.

- Ekonomik ömrü süresince kullanımına ilişkin yapılacak çalışmalarda tank testinin kullanılması, içme ve kullanma suyunun temas çözeltisi olduğu süreçlerde

betonun özütleme karakteristiklerinin belirlenmesi için kullanılması önerilmektedir. Bu tip testlerde temas çözültisi olarak kullanılacak suyun türü önem arz etmektedir. Bu tip çalışmalarda yer altı suyu (kendi pH'sı ile), yüzey suları (nötral pH ile) ve deniz suyu kullanılabilir.

- Beton hafriyat atıklarının bağlayıcı agrega olarak kullanıldığı geri dönüşüm faaliyetlerinde tank özütleme testinin temas çözültisinin nötral pH'ya getirilmesi koşulu ile kullanılması uygun olacaktır.

- Beton hafriyat atıklarının yeniden kullanımı hakkında yürütülecek faaliyetlerde (yol zemini, dolgu malzemesi, yapılar için dolgu vb.) ve bertaraf senaryolarında, pH bağımlı ve kırılmış materyalin kullanıldığı perkolasyon (süzme) testleri önerilmektedir.

### **3.2. Uygulanacak Yöntemin Seçimi**

Ülkemizde üretilen çimentonun bir bölümü alternatif yakıt ve/veya hammadde kullanılarak imal edilmektedir. Çimento sanayi genel olarak kalorifik değeri yüksek atıkları alternatif yakıt, önce ki bölümlerde değinilen ve çimento üretiminde olmazsa olmaz dört temel oksiti bünyesinde ihtiva eden atıkları alternatif hammadde olarak kullanmaktadır.

Gelişme sürecinde olan ülkemizde çimentodan mamul beton genellikle altyapı ve üst yapı projelerinde kullanılmaktadır. Her ne kadar yasal düzenlemeler var olsa da hali hazırda inşaat ve hafriyat atıklarının geri dönüşüm, yeniden kullanım ve/veya bertaraf tesislerinde dolgu malzemesi olarak kullanımı tercih edilen yöntemler değildir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında ülkemizde alternatif yakıt ve/veya hammadde kullanılarak üretilen çimentodan mamul betonun özütleme karakteristiklerinin incelemesinde uygulanacak en uygun yöntemin Amerikan Çevre Koruma Ajansı tarafından yayınlanmış, Tank Testi esasına dayanan EPA Metot 1315 olacağı anlaşılmıştır.

Yöntem sıkıştırılmış veya monolitik numunelerin denetimli özütleme (özütleme/leaching) koşulları altında inorganik maddelerin salınım koşullarını belirlemek amacıyla geliştirilmiştir.

Metodoloji ayrıca beton veya stabilize edilmiş atıkların yada granüler malzemelerin sıkıştırılmasının ardından özütleme karakteristiklerinin belirlenmesi amacı ile de kullanılabilir.

Analizlerden elde edilen sonuçlar yardımı ile transfer sıvısına geçen inorganik maddelerin geçiş hızları ve numunenin kullanım ömür süresince salacağı madde miktarı hesaplanabilir.

Monolitik numunelerin geometrisi dikdörtgen (tuğlalar ya da fayanslar), küpler, plakalar veya silindirler olabilir. Deneyler sırasında hazırlanan numunelerin bir veya birden fazla yüzeyi özütleme sıvısına (eluat) maruz kalacaktır. Sıvı yüzey alanı oranı  $9 \pm 1 \text{ mL/cm}^2$ 'de muhafaza edilmiştir.

Monolitik numuneler askıya alınmış ya da tüm numune yüzeyinin en az %98'i eluata maruz kalmış özütleme (leaching) sıvısında tutulmuş ve eluatın büyük kısmı (herhangi bir çıplak yüzey ve tank duvarı arasında minimum 2 cm) ile numunenin temas halinde olmasına özen gösterilmiştir. Aşağıda prizma olarak hazırlanmış ikili numune ve numune tutucu görünmektedir.



**Görsel 3.1.** Numune ve numune tutucu

Deneylerde transfer sıvısı olarak yeraltı suyu, deniz suyu veya saf su da kullanılabilir. Deneyler süresince laboratuvar koşulları altında üretilmiş saf su eluat sıvısı olarak kullanılmıştır.

### **3.3. Yöntemin Özeti**

Bu yöntem kapsamında monolitik veya sıkıştırılmış numuneler metodun belirlediği süreler dahilinde özütlemeye (özütlemeing) tabi tutulmaktadır. Tank ve numune boyutları, örneklerin tamamen suya daldırılabilmesine olanak sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Numuneler yöntem tarafından belirlenen L/A (hacim/yüzey alanı) oranına göre hesaplanmış transfer sıvısı miktarı ile muamele edilmiştir. Özütleme sıvısı önceden belirlenmiş aralıklarla dokuz kez değiştirilmiştir. Her bir değişim sürecinde numuneler tutucuları ile birlikte tartılmış ve bulunan değerler kayıt altına alınmıştır. Ayrıca özütleme sıvısından alınan numunelerde pH, ORP (oksidasyon redüksiyon potansiyeli) ve sıcaklık ölçümleri yapılarak kayıt altına alınmıştır.

### **3.4. Girişimler**

Atmosfer gazlarının reaksiyonları eluatlarda ölçülmüş bileşenlerin yoğunluğunu etkileyebilmektedir. Örneğin, yüksek alkalın eluatlarla birlikte olan karbondioksit reaksiyonu ya da güçlü indirgeyici maddeler karbonat çöküntüsü ve eluat pH nötralizasyonu ile sonuçlanmaktadır. Özellikle yüksek alkalınli materyallerin testi sırasında özütleme tankları numunelerin atmosfer gazlarıyla etkileşimini en aza indirmek için hava geçirmeyecek şekilde tasarlanmıştır.

### **3.5. Ekipman ve Malzemeler**

EPA Metot 1315 tarafından belirlenen aralıklarda özütleme sıvısı örnekleme işlemleri için aşağıda açıklanan malzemeler kullanılmıştır.

#### **3.5.1. Numune tutucu**

Metot bünyesinde yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ya da yüksek ya da alçak pH'lı diğer bir dayanıklı materyal gibi bir inert maddeden yapılmış kafes ya da yapısal tutucu tavsiye edilmektedir. Deneyler sırasında 100 mm çapında yüksek veya alçak pH derecelerine dayanıklı PVC malzeme kullanılmıştır.

Numunenin dış yüzeyi eluata maruz kalacağından tutucu en az %98'ini kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Numune tutucu her iki numuneyi yukarıda belirtilen oranı aşmayacak şekilde (noktasal olarak) toplam 8 noktadan sabitlemiştir.

Eluatın büyük kısmı numuneyle temas halinde olabilmesi ve numunenin açık yüzeyinin özütleme sıvısının merkezinde olması için tutucu kütle transferinin geometrisine eşleşecek şekilde tasarlanmıştır. Numune tutucuları her bir özütleme sıvısı değişiminde kullanılan tankı ortalayacak şekilde yerleştirilmiştir.

### **3.5.2. Özütleme tankı**

Yüksek ve düşük pH dirençli bir malzemedan yapılmış düz kenarlı bir konteyner önerilmektedir. İnorganik türlerin hareketleri değerlendirilirken yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polikarbon'dan (PC), polipropilen'den (PP) ya da polivinil klorür'den (PVC) oluşan kavanoz veya kovalar tavsiye edilmektedir. Deneyler esnasında 15.000 cm<sup>3</sup> kapasiteli PP kovalar kullanılmıştır.

Özütleme tankı atmosferle gaz alışverişi olmadan uzun süre dayanması için hava almayacak şekilde kapatılması tavsiye edilmektedir. Her bir numune aralığında kova kapakları gaz alışverişine imkan vermeyecek şekilde kapatılmıştır.

Konteyner, hem katı numune hem de  $9 \pm 1$  mL /cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip bir sıvı yüzey alanı oranını (L/A) baz alan bir eluat hacmini içinde barındırabilecek hacimde seçilmiştir. İdeal olarak, tank L/A'nin tepe boşluğu toleransını en aza indirecek boyutta tasarlanmıştır.

Deneylerde her bir tank için iki beton numunesi hazırlanmıştır. Her bir numunenin toplam yüzey alanı 272 cm<sup>2</sup> olup, iki numune için sıvıya maruz kalan toplam alan 544 cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Bu durumda kullanılması gereken özütleme sıvısı miktarı en az 4.352 cm<sup>3</sup> veya en fazla 5.440 cm<sup>3</sup> olmalıdır. Her bir numune değişim aralığında 5.000 cm<sup>3</sup> özütleme sıvısı (eluat) kullanılmıştır.

### **3.5.3. Özütleme düzeneği**

Aşağıda deney metodolojisine bağlı kalınarak oluşturulan düzenek hakkında bilgiler verilmiştir.

Numune tutucu: PVC Boru 100 mm, özel olarak hazırlanmıştır.





**Görsel 3.2.** Numune tutucu

Özütleme tankı: PP kova, 225 mm taban çapı, 260 mm kapak iç çapı, 235 mm yükseklik (Hesaplanan özütleme sıvısı miktarı 115 mm yüksekliğe ulaşmaktadır.)



**Görsel 3.3.** Özütleme sıvısı (elaut) değişimi

Filtreleme membranı – hidrofilik poliproilin ya da  $0.45 \mu$  boyutlu etkili porlu eşdeğer bir malzeme kullanılmıştır.



**Görsel 3.4.** Numune hazırlama (filtrasyon)

pH metre: Deneyler esnasında Thermo Orion Model 420 pH metre kullanılmıştır.



**Görsel 3.5.** pH ölçüm düzeneği

### 3.6. Reaktifler ve Standartlar

Deneyler esnasında özütleme sıvısı olarak saf su kullanılmıştır. Saf su deneylerin yapıldığı laboratuvar imkânları dâhilinde hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına etki edebilecek girişimlerin tespiti ve saf suyun fiziksel niteliklerinin kontrolü amacı ile kör numuneler alınmıştır. Asit ile yapılan şartlandırma sonrasında organik ve inorganik parametrelerin tayini maksadı ile uygun koşullarda saklanmıştır.

### **3.7. Numune Alma, Koruma ve Depolama**

Numuneler her bir özütleme süresinin ardından laboratuvar koşulları altında alınarak bir dizi ön işleme tabi tutulmuştur. 7 adet numune ve bir sonraki fazın kör numunesi ayrılarak pH, oksidasyon indirgeme potansiyeli (ORP), sıcaklık ve asit şartlandırması sonrası pH değeri ölçülüp kaydedilmiştir.

Numuneler her bir deney fazında; TS EN 196-2 Çimento Deney Yöntemleri Standardı kapsamında hazırlanan ve beton numunelerde dayanım testlerinin yapılmak üzere belirli sürelerde şartlandırıldığı odada, sabit sıcaklıkta 20 C° bekletilmiştir.

### **3.8. Kalite Kontrol**

Numunelerin hazırlanması ve EPA Metot 1315 kapsamında belirlenen 9 fazlık sürede deneylerin yapılması, TS EN ISO 9001 Kalite Yönetim Standardı Belgesi ve Ürün (Çimento) Uygunluk Belgesine sahip laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

### **3.9. Kalibrasyon ve Standardizasyon**

Yukarıda belirtilen laboratuvarın Kalite Yönetim Sistemi ve Ürün Uygunluk Belgeleri kapsamında ürün performansı TS EN 196 Serisi standartları ile kontrol altında tutulmaktadır. Söz konusu standartların gereğinin yerine getirilmesi amacı ile kullanılan laboratuvarında yapılan analizler belirli kalibrasyon ve doğrulama şartlarını sağlayacak cihazlar ile yapılmaktadır.

### **3.10. Deney Prosedürü**

Aşağıda numune hazırlama ve deneylerin yapılması esnasında uygulanan prosedürler verilmektedir.

#### **3.10.1. Monolitik numunelerin hazırlanması**

Monolitik materyalin temsili örneği materyal bileşenlerinin yerinde kalıplanmasıyla ya da maçalanmasıyla ya da daha büyük bir numuneden bir örnek kesilerek elde edilmelidir.

Monolitik numuneler TS 196-1 Standardı, Basınç Dayanım Testi kapsamında hazırlanan numuneler olup, standartta belirtilen ölçülerde dökülerek hazırlanmıştır.

Deneyler sırasında alternatif yakıtları yoğun olarak kullanan bir çimento fabrikasının ürünü kullanılmıştır. Deneyler esnasında kullanılan çimento numunesinin üretimi esnasında kullanılan ısı gücünün ortalama % 25,70'i alternatif yakıtlardan temin edilmiştir. Numunelerin alındığı tarihler en düşük kullanım oranı % 17, en yüksek kullanım oranı % 29,50 olarak kaydedilmiştir.

Monolitik numunenin geometrisi dikdörtgen (tuğla, fayans), küp ya da silindir seçilmelidir. Numunenler prizma olarak dökülmüştür. Yüzey alanı nedeni ile, uygun miktarda eluat sıvısında bekletilebilmesi için iki adet numune kullanılmıştır.

### 3.10.2. Eluat değişim süreleri

Yöntem içinde numunenin farklı aralıklar ile eluata maruz bırakılması nedeni ile yarı dinamik bir tank-özütme prosedürüdür. Her eluatın kimyasal değişimi ve katı maddeden olan kütle transferi kümülatif özütme zamanı fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Bu yöntem için özütme aralıkları listesi aşağıda gösterilmiştir.

**Tablo 3.1.** Numune Değişim Zaman Çizelgesi

| Zaman Aralığı Kodu | Zaman Aralığı (st) | Zaman Aralığı (gün) | Kümülatif Ekstraksiyon Süresi (gün) |
|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|
| T01                | 2.0 ± 0.25         |                     | 0.08                                |
| T02                | 23.0 ± 0.50        |                     | 1.0                                 |
| T03                | 23.0 ± 0.50        |                     | 2.0                                 |
| T04                | -                  | 5.0 ± 0.1           | 7.0                                 |
| T05                | -                  | 7.0 ± 0.1           | 14.0                                |
| T06                | -                  | 14.0 ± 0.1          | 28.0                                |
| T07                | -                  | 14.0 ± 0.1          | 42.0                                |
| T08                | -                  | 7.0 ± 0.1           | 49.0                                |
| T09                | -                  | 14.0 ± 0.1          | 63.0                                |

**Kaynak:** EPA Method 1315

#### 4. BULGULAR VE YORUM

Bu çalışma kapsamında çimento üretimi, çimento türleri, çimento üretiminde atıkların alternatif yakıt ve/veya hammadde olarak kullanılması, beton üretimi, alternatif yakıt ve/veya hammadde kullanılarak üretilen çimentodan mamul betonun özütleme karakteristikleri hakkında teknik bilgiler verilmektedir.

Çalışmanın büyük bölümünde atıkların alternatif yakıt kullandığı üretim prosesinden elde edilen numunelerin bir dizi özütleme sürecine tabi tutularak bünyesinde bulunan eser elementlerin özütleme karakteristikleri incelenmiştir.

Çalışma kapsamında toplanan numuneler Amerikan Çevre Koruma Ajansı EPA tarafından yayınlanan EPA Metot 1315, monolitik numunelerde özütleme karakteristiklerinin belirlenmesi amacı ile kullanılmıştır. Yöntem Hollanda mevzuatı kapsamında yayınlanan NEN 7345 ve Avrupa Standartları Komitesi (CEN) için geliştirilen CEN/TS 15863 referans alınarak geliştirilmiştir.

Çimentonun ağır metal özütleme karakteristikleri hakkında yayınlanan makale ve raporlar 1960'li yıllardan beri literatürde yerini almaktadır. Aşağıda analitik verilerin yer aldığı çalışmalardan kronolojik sıra dahilinde örnekler bulunmaktadır.

Rankers ve Hohberg (1991, s.201-208) uçucu kül ve bitümlü kömür kullanılarak yapılan beton harçlarda özütleme karakteristiklerini incelemişlerdir. İki bilim adamının yaptığı çalışmalarda kırılmış beton (< 10 mm) kullanılmış ve testler için Alman Standardı DEV S4 kullanılmıştır. Elde edilen verilerde analiz edilen ağır metallerin (Cr, Cu, Cd, Zn ve Pb) içme suyu standartlarında yer alan verilerle karşılaştırılması sonucu, tespit edilen konsantrasyonları ilgili standartlarda yer alan sınır değerlerin altında kaldığı tespit edilmiştir.

Colucci, Epstein ve Bartley (1993) fosil yakıt ve atıktan türetilmiş yakıt kullanılarak üretilen çimentodan mamul 40 beton numunesinde yaptığı araştırma sonucunda, değişik pH seviyelerinde ağır metal özütlemiştir. Yazarlar bu deneyler esnasında NSF/ANSI 61 standardını kullanmıştır. Söz konusu standart içme suyu ile teması bulunan ürünlerin insan sağlığı üzerine etkilerin araştırılmasında kullanılmakta olup, standart As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, Se, As, Be, Ni, Sb ve Th parametrelerinin analiz edildiği beton su boruları ve su tankları uygunluk testlerini de kapsamaktadır. Özütleme

karakteristiklerinin belirlendiği çalışmalar sonunda sadece Krom (Cr) elementinin az miktarda limit değerlerin üzerinde kaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın tespit edilen krom için fosil yakıt veya alternatif yakıt kullanılarak üretilen çimentodan mamul beton yapılardan hangisinde içme suyu standartlarına uygun olmadığına dair her hangi bir istatistiksel veri elde edilememiştir.

Germerau, Bollotte ve Defosse (1993) beş endüstriyel Portland çimentosunda, bununla birlikte laboratuvar şartlarında harici olarak toplam 1800 ppm Krom (Cr), Kadmiyum (Cd) ve Kurşun (Pb) katılarak hazırlanan imento ile özütleme karakteristiklerinin belirlendiği çalışmalar yapmıştır. Yazarlar EN 196-1 standardına göre hazırlanmış beton barlar üzerinde 6 saatten 9 aya kadar geçen sürelerde, içme suyu ve saf suyun özütleyici çözelti olarak kullanıldığı ve periyodik olarak değiştirildiği statik özütleme test metodunu kullanmışlardır. Bütün koşullarda, özütleyici konsantrasyonlarının tekrar eden daldırma süreçlerinde azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. İçme suyu ile temas eden örneklerin kullanıldığı deneysel süreçlerde, tespit edilen ağır metal (Fe, Mn, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn ve Tl) konsantrasyonlarının Avrupa Birliği'nde içme suyu hakkında yayınlamış direktiflerinde belirtilen maksimum konsantrasyon değerlerini aşmadığı tespit edilmiştir. Saf su kullanılarak yapılan çalışmalarda ztleyicilerin metal konsantrasyonları içme suyu kullanılarak yapılan deneylere göre yüksek olduğu ancak içme suyu standartlarında belirtilen limit değerleri aşmadığı tespit edilmiştir.

Kanare ve West (1993) farklı yakıtlar kullanılarak üretilen dört farklı tipte çimentodan mamul betonda ağır metal özütleme karakteristiklerini incelemiştir. Yazarlar  seride özütleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu deneyler sırasında özütleyici çözelti olarak asetik asit, saf su ve içme suyu kullanılmıştır. Deneyler TCLP ve ANSI/NSF 61 protokollerine göre gerçekleştirilmiştir. Deneyler süresince As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se, Ag, Sb, Be, Ni ve Tl parametreleri analiz edilmiştir. TCLP protokolünün saf su ve asetik asit kullanılarak uygulandığı deneylerde ağır metal konsantrasyonlarının karşılaştırılabilir sonuçlar verdiği ve krom (Cr) haricindeki parametrelerin limit değerlerin altında kaldığı tespit edilmiştir. İçme suyu ile yapılan testlerde ise krom parametresi de dahil olmak üzere izlenen tüm parametrelerin limit değerlerin altında kaldığı saptanmıştır.

van der Sloot, de Groot ve Hoede (1993, s.73) Portland ve Portland Katkılı Çimento (katkı olarak % 20-40 kömür uçucu külü kullanılmıştır) kullanılarak üretilen beton ve sıva ile eser elementlerin özütleme karakteristikleri hakkında çalışmalar yapmışlardır. Söz konusu çalışmalar kapsamında üretilen beton ve harcın su/çimento oranı 0,50 ila 0,64 arasında değişiklik göstermiştir. Beton numunelerde analizler Hollanda Standardı NEN 7345 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıva karışımları kullanılarak yapılan numuneler çeneli kırıcı kullanılarak boyut küçültme işlemine tabi tutulmuş ve üç fraksiyona ayrılmıştır (1,5 – 6,0 mm, 0,5 – 1,5 mm, 0 – 0,5 mm). Kırılan numuneler farklı katı-sıvı oranları ve temas süreleri gözetilerek, saf su ile muamele edilmiştir. Deneylede temas süresi 0,5, 5 ve 50 saat olarak seçilmiştir. Temas süresinin ardından tüm özütleme sıvılarının pH'sı ve içeriğinde bulunması muhtemel As, Br, Cr, Cu, Ga, Mo, Sb, Sr, W, Zn, Ca, Si, Mg, Na, K, Cl ve F elementleri analiz edilmiştir. Sonuç olarak, uçucu kül kullanılarak üretilen Portland katkılı çimentosundan mamul betonda saptanan değerlerin benzeri hiç bir katkı maddesi kullanılmadan üretilen ve kontrol için kullanılan Portland çimentosundan mamul betonda saptanan değerlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın uçucu kül kullanılarak yapılan deneylerde Molibden haricindeki tüm elementlerin özütleme karakteristikleri hakkında yayınlanmış Hollanda Yapı Malzemeleri Tüzüğünde belirtilen sınır değerleri aşmadığı tespit edilmiştir. Yazarlar çalışma neticesinde katkı maddesi olarak uçucu kül kullanımının çevresel açıdan kabul edilebilir seviyelerde olduğu sonucuna varmışlardır.

Sprung, Rechenberg ve Bachmann (1994, 369-386) sıradan Portland Çimentosu ile uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen çimentolardan mamul beton bloklarda krom, cıva ve talyum parametreleri için özütleme testleri gerçekleştirmiştir. Beton örnekler aynı miktarda çimento ve farklı miktarlarda su kullanılarak hazırlanmıştır (su/çimento oranı 0,5 ila 0,7 arasında değişiklik göstermiştir. Sıradan çimento kullanılarak üretilen beton numunelerinin bir bölümünde ağır metal içeriği arttırılmış su kullanılmıştır. Normal ve CO<sub>2</sub> ile zenginleştirilmiş içme suyu kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen analitik verilere göre normal ve katkılı çimentodan mamul beton örneklerinden özütlenen toplam krom miktarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. CO<sub>2</sub> ile zenginleştirilmiş içme suyunda yapılan deneylerde sonuçların diğer özütleyicilerin kullanıldığı deneylere benzerlik gösterdiği saptanmıştır. Yazarlara göre ilk yüzey yıkama etkisi hariç tutulmak üzere, ağır metal özütlemesi difüzyon

kontrollü bir proses olup beton içindeki metal konsantrasyonundan çok metal yapının yoğunluğuna bağlıdır. Yazarlar analiz edilen bütün numunelerde insan ve çevre sağlığına her hangi bir etkisi olmayacak konsantrasyon değerlerinin tespit edildiği sonucuna varmışlardır. Yazarlar aynı zamanda su hacmi yenilenmeyen bir rezervuarda çözünürlüğü en çok olan elementin (krom) bile ancak 2300 yılda içme suyu standartlarına göre tehlikelilik arz edecek boyutlara ulaşacağını saptamışlardır.

Coucke vd., (1997, s.38-46) tarafından yayınlanmış bir çalışmada beton boru kullanılan şebekelerde bazı organik bileşiklerin ve inorganik elementlerin özütleme karakteristiklerinin su kalitesine etkisini incelenmiş, çalışmaya ait özet Avrupa Çimento Üreticileri Birliği tarafından çeşitli makale ve dokümanlarda yayınlanmıştır. Monolitik numunelerin kullanıldığı tank testlerinde elde edilen verilere göre tespit edilen ağır metal konsantrasyonlarının ihmal edilebilir seviyelerde olduğunu ve bu değerlerin içme suyu standartlarına her hangi bir etkisinin olmayacağı kanısına varmışlardır. Yazarlara göre çimentonun hidrasyon sürecinde ağır metallerin kimyasal kararlılığı ve beton yapının yoğunluğu özütleme kapasitesinin belirlenmesinde en önemli faktörler olarak dikkat çekmektedir.

Schenider (1997) alternatif yakıt (kullanılmış lastik, atık yağ, atık ahşap, plastik ve atıktan türetilmiş yakıt) kullanılarak imal edilen çimento ile üretilmiş kırılmış beton numunelerinde DEV S4 metodu ile uygunluk testleri gerçekleştirmiş, analiz edilen tüm ağır metal parametrelerine ait (Hg, Cd, Tl, Cr, Pb, Zn) ait konsantrasyon değerlerinin yasa ve yönetmeliklerce belirlenmiş sınır değerlerin altında kaldığı sonucuna varmıştır.

Hillier vd., (1999, s.515-521) Portland çimentosundan imal edilmiş betonda toksik eser elementlerin özütleme karakteristikleri hakkında çalışma yapmıştır. Deneyler esnasında EN 196-1 standardında belirtilen normlara uygun olarak üretilen çimento kullanılarak hazırlanan her bir kenarı 100 mm ebatlarındaki beton küplerde iki farklı kürlenme metodu uygulanmıştır. Hollanda Tank Testi (NVN 5432) kullanılarak yapılan deneylerde maksimum özütleme için gereken 256 günlük sürenin ardından 28 gün süresince kürlenmiş Portland çimentosundan mamul beton küplerde tespit edilen toksik eser element miktarının limitlerin altında kaldığı tespit edilmiştir. Kürlenme süreci kısa tutulan (1 gün) beton numunelerinde ise küp yüzeylerinde tespit edilebilir nicelikte vanadyum olduğu tespit edilmiştir. Deney sonucunda numunelerde su/çimento



oranının vanadyumun özütleme potansiyeline önemli bir etkisinin olmadığı saptanmıştır.

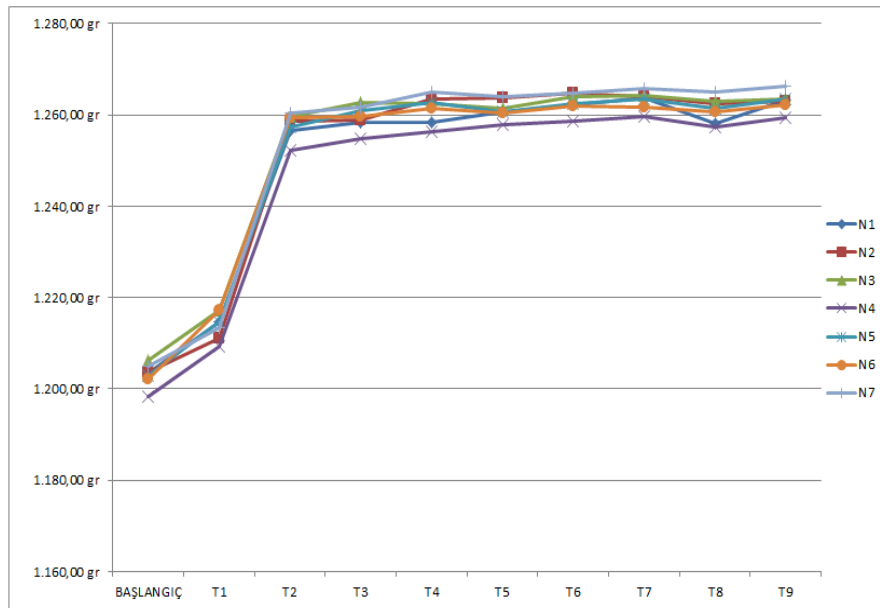
2001 yılında Belçika'da yollarda kullanılan betonlardaki özütleme karakteristikleri incelenmiş (Marion, Laneve ve de Grauw, 2003, s.5-24), incelemeye ilişkin veriler Avrupa Çimento Üreticileri birliği yayınlarında yer almıştır. Deneylede aynı koşullarda hazırlanmış Portland ve Portland Katkılı Çimentosu (yüksek fırın cürufu) kullanılarak hazırlanan monolitik beton (400 kg çimento/m<sup>3</sup> beton, su/çimento oranı yaklaşık 0,5) numuneler Hollanda Standardı NEN 7345 kullanılarak analiz edilmiştir. Eser element konsantrasyonları beton numunelerinde ve özütleyici çözeltide ICP-MS kullanılarak tayin edilmiştir. Deneylede As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn ve Se elementleri analiz edilmiş, sonuçta analiz edilen beton numunelerinde saptanan eser element konsantrasyonlarının Belçika sınırları içinde bulunan kirlenmemiş toprakta tespit edilen eser element konsantrasyonlarına yakın olduğu tespit edilmiştir. Saf su (de-iyonize) ile yapılan testlerde, özütleyici olarak mineralli su kullanılarak yapılan deneylerden daha yüksek oranlarda eser element tespit edilmiş olsa da piyasada satılan standart içme suyu kullanılarak yapılan deneylerde eser element konsantrasyonlarının her iki metotla saptanan değerlerden daha az olduğu kanısına varılmıştır. Yukarıdaki verilere ilaveten Portland çimentosu kullanılarak üretilen çimentoda krom parametresinin, yüksek fırın cürufunun katkı olarak kullanıldığı Portland çimentosundan mamul betonlarda ise antimon parametresinin özütleme eğilimlerinin yüksek olduğu, buna rağmen her iki çimentoda da özütleme karakteristikleri açısından belirgin bir fark gözlenememiştir. Çalışmalar sonucunda eser elementlerin toplam konsantrasyonları ile özütleyiciler içindeki eser element konsantrasyonları arasında sistematik bir korelasyon tespit edilememiştir.

Avrupa Çimento Üreticileri Birliği (CEMBUREAU, 1995, s.17) tarafından yayınlanan teknik dokümanlarda, İspanyada kurulu ve yakıt olarak petrokok ve alternatif yakıt (kullanılmış lastik ve hayvan atıkları) kullanan üç tesiste üretilen çimentoda ve bu çimentolar kullanılarak üretilen harç ve sıvalarda eser element içerikleri hakkında bilgiler yer almaktadır. Örnek alınan çimentolarda göze çarpan en önemli fark sırasıyla hayvan atıkları ve kullanılmış lastik kullanan fabrikalarda tespit edilen fosfor ve çinko içeriklerinin gözlenmesidir. NEN 7345 Standardı kullanılarak yapılan monolitik harç üzerine yapılan deneylerde sadece baryum ve vanadyum

parametrelerinin 64 gün sonunda tespit edilebilir değerlere ulaştığı saptanmıştır. Çimento kullanılarak yapılan bu üç deneyde özütlenme karakteristikleri üzerinde kayda değer bir fark tespit edilememiştir. Bununla birlikte örnek içindeki toplam eser element miktarı ile özütlenen eser element miktarı arasında her hangi bir ilişki olduğuna dair her hangi bir kanıt bulunamamıştır. Bu bilgiler ışığında yazarlar fosil yakıt ve alternatif yakıt kullanılarak üretilen çimentodan mamul beton örneklerden özütlenen eser element miktarlarının Avrupa Birliği İçme Suyu Direktifi tarafından belirlenmiş sınır değerlerin altından kaldığı sonucuna varmışlardır.

#### 4.1. Ölçüm ve Analizler

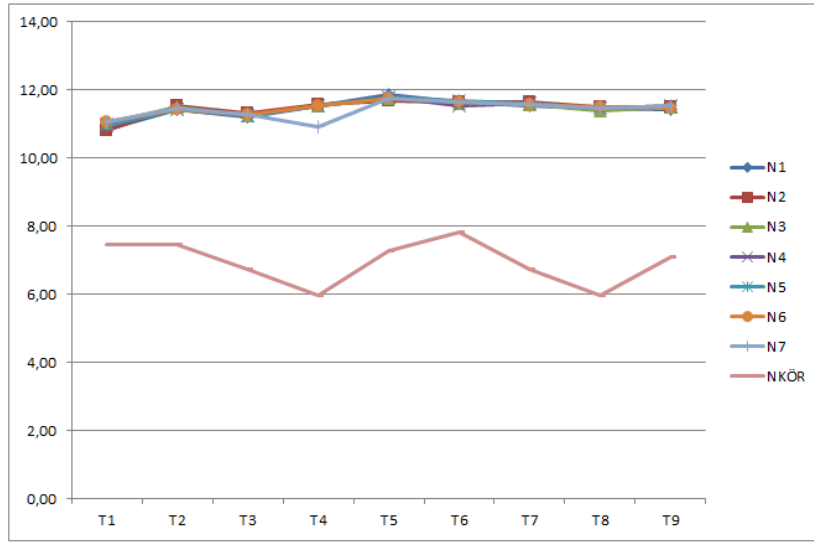
Aşağıda beton numunelerin özütlenme prosesi süresince ağırlıklarının değişimine ilişkin grafik gösterimi yer almaktadır. Grafikte görüldüğü üzere beton numunelerinin eluat sıvısının doygunluğa ulaşmasının ardından stabil değerler kaydedilmiştir.



Şekil 4.1. Özütlenme Aralıklarına Göre Numune Ağırlıklarında Değişim

Grafikte dikey eksende kaydedilen ağırlık değerleri, yatay eksende Yöntem 1315 kapsamında tayin edilmiş zaman aralıkları verilmiştir.

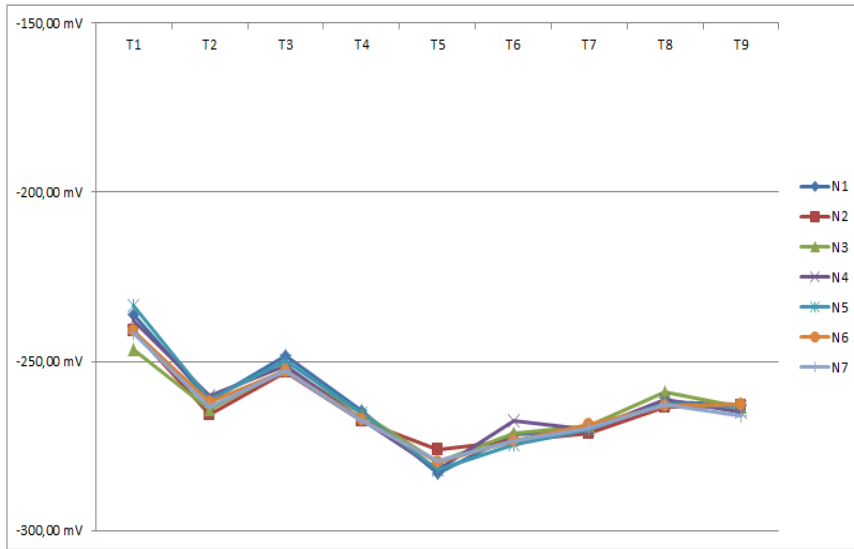
Aşağıdaki grafikte su numunelerinin her bir zaman aralığından sonra ölçülen pH değerleri verilmektedir. Eluat sıvısının belirlenen aralıklarda beton numunelerine maruziyeti sonrasında pH değeri önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Zira kör numunelerde tespit edilen pH değeri grafikte ayrıca gösterilmektedir.



**Şekil 4.2.** Özütleme Aralıklarına Göre Numune pH Değerlerindeki Değişim

Grafikte dikey eksenle kaydedilen pH değerleri, yatay eksenle EPA Metot 1315 kapsamında tayin edilmiş zaman aralıkları verilmiştir.

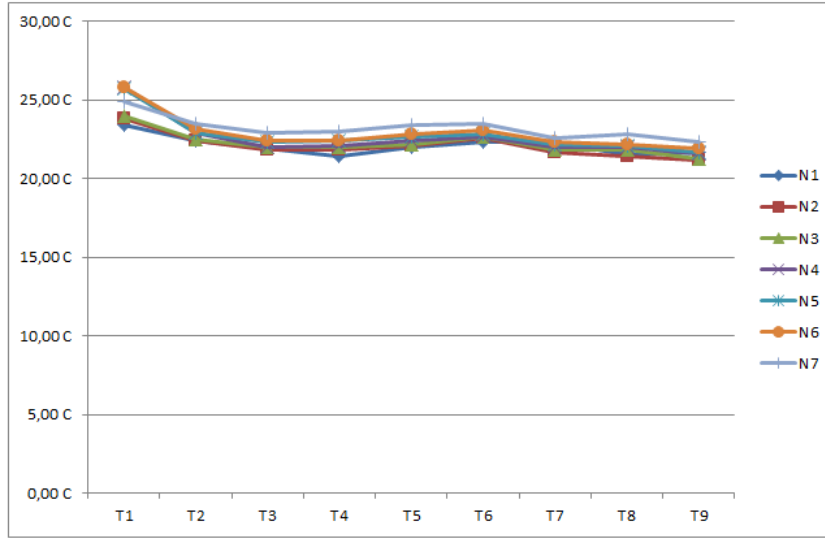
Aşağıdaki grafikte su numunelerinde tespit edilen oksidasyon indirgeme potansiyeli yer almaktadır.



**Şekil 4.3.** Özütleme Aralıklarına Göre Numune ORP Değerlerindeki Değişim

Grafikte dikey eksenle kaydedilen ORP değerleri, yatay eksenle Yöntem 1315 kapsamında tayin edilmiş zaman aralıkları verilmiştir. Zaman aralıklarına tespit edilen ORP değerlerinin birbirine uyumlu olduğu grafikte görülmektedir.

Aşağıdaki grafikte su numunelerinin asit şartlandırması esnasında ölçülüp kaydedilen sıcaklık değerleri verilmektedir.



Şekil 4.4. Özütleme Aralıklarına Göre Su Numunesi Sıcaklıklarındaki Değişim

Grafikte dikey ekseninde kaydedilen sıcaklık değerleri, yatay ekseninde Yöntem 1315 kapsamında tayin edilmiş zaman aralıkları verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere su numuneleri bekletildikleri ve önceki bölümde ortalama oda sıcaklığının verildiği alanda şartlandırmanın yapıldığı laboratuvara süratle alınmış, sıcaklık değerleri artış eğilimine girmeden şartlandırılarak muhafaza edilmiştir.

Numune işlemleri esnasında şartlandırma sonrasında ölçülen pH değerleri de ölçülüp kaydedilmiştir. Şartlandırılmış numunelerin ortalama pH değeri 2,34 olarak tespit edilmiş ve kayıt altına alınmıştır.

Yüzey alanı hesaplaması için, test numunesinin boyutları ölçüp kaydedilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelerin boyutları TS EN 196-1 kapsamında belirlendiği gibi; 40 mm, 40 mm ve 150 mm'dir. Her bir monolitik numunenin yüzey alanı  $272 \text{ cm}^2$ 'dir. Uygun eluat miktarının kullanılabilmesi için tek bir tutucu ile iki adet numune kullanılmıştır.

Numunenin başlangıç kütle değerleri hesaplanıp kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçlarına ilişkin tablo aşağıda verilmektedir.

**Tablo 4.5.** *Numune Ağırlıkları*

| NUMUNE AĞIRLIKLARI | N1          | N2          | N3          | N4          | N5          | N6          | N7          |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| BAŞLANGIÇ          | 1.203,43 gr | 1.203,60 gr | 1.206,15 gr | 1.198,34 gr | 1.203,05 gr | 1.202,06 gr | 1.205,04 gr |

Numunelerin ve tutucuların deneylere başlamadan önceki ağırlıkları ölçülüp, kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçlarına ilişkin değerler aşağıda verilmektedir. Numune kodları sırasıyla N harfi ve numara ile kodlanmıştır.

Bu yöntemin yürütülmesi için önerilen sıcaklık ( $20 \pm 2$  °C) oda sıcaklığıdır. Özütleme aralığı içinde elaut değişimleri TS EN 196-1 kapsamında deneylerin yapıldığı Numune Odasında gerçekleştirilmiştir. Standart gereği oda sıcaklığı  $20 \pm 2$  °C olmalıdır. Oda için sıcaklık sürekli ölçülüp, kaydedilmektedir. Numunelerin işlem gördüğü 63 gün süresince ortalama oda sıcaklığı 20,6 olarak ölçülüp kaydedilmiştir.

Temiz bir özütleme tankını gereken miktarda saf su ile, L/A of  $9 \pm 1$  mL/cm<sup>2</sup> baz alınarak doldurulmuştur. Deneyler esnasında çift tank ile çalışılmıştır. Bir numune için hazırlanan tank bir sonraki değişimde temizlenerek kullanılmıştır. Kullanılan eluat miktarı sabittir. 5.000 cm<sup>3</sup> eluat sıvısı her defasında ölçülerek değişim yapılmıştır.

Numuneler tutucuları ile birlikte merkezlenerek elaut sıvısına mümkün olan yüksek miktarda maruziyeti sağlanmıştır.

Numune tankları kapakları ile birlikte kullanılmıştır. Her hangi bir girişimin meydana gelmemesi için her eluat değişimi sonrası kapaklar kapatılarak hava teması kesilmiştir.

Özütleme süresi bittiğinde, numuneye tutucu dikkatlice tanktan çıkartılmış, yaklaşık 20 sn boyunca numunenin yüzeyindeki sıvı eluata boşaltılmıştır.

Numune ve tutucunun kütlesi ölçüp kaydedilmiştir. Sonuçlar aşağıda verildiği gibidir.

**Tablo 4.6. Özütleme Aralıklarına Göre Numune Ağırlıkları**

| NUMUNE AĞIRLIKLARI | N1          | N2          | N3          | N4          | N5          | N6          | N7          |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| BAŞLANGIÇ          | 1.203,43 gr | 1.203,60 gr | 1.206,15 gr | 1.198,34 gr | 1.203,05 gr | 1.202,06 gr | 1.205,04 gr |
| T1                 | 1.214,71 gr | 1.211,13 gr | 1.217,21 gr | 1.209,33 gr | 1.214,75 gr | 1.217,32 gr | 1.213,41 gr |
| T2                 | 1.256,53 gr | 1.258,73 gr | 1.259,71 gr | 1.252,33 gr | 1.257,26 gr | 1.259,29 gr | 1.260,31 gr |
| T3                 | 1.258,25 gr | 1.258,98 gr | 1.262,66 gr | 1.254,75 gr | 1.260,90 gr | 1.259,74 gr | 1.261,62 gr |
| T4                 | 1.258,25 gr | 1.263,36 gr | 1.262,58 gr | 1.256,43 gr | 1.262,80 gr | 1.261,33 gr | 1.264,90 gr |
| T5                 | 1.260,72 gr | 1.263,64 gr | 1.261,49 gr | 1.257,84 gr | 1.260,54 gr | 1.260,37 gr | 1.263,96 gr |
| T6                 | 1.262,21 gr | 1.624,64 gr | 1.263,88 gr | 1.258,70 gr | 1.262,37 gr | 1.262,01 gr | 1.264,73 gr |
| T7                 | 1.263,72 gr | 1.264,02 gr | 1.264,19 gr | 1.259,54 gr | 1.263,35 gr | 1.261,58 gr | 1.265,85 gr |
| T8                 | 1.258,08 gr | 1.262,39 gr | 1.262,90 gr | 1.257,35 gr | 1.261,42 gr | 1.260,65 gr | 1.265,12 gr |
| T9                 | 1.263,32 gr | 1.263,09 gr | 1.263,54 gr | 1.259,41 gr | 1.263,39 gr | 1.262,22 gr | 1.266,23 gr |

Numunelerin özütleme sürecinin gerçekleştirildiği laboratuvar imkanları dahilinde, eluatin pH ve oksidasyon redüksiyon potansiyeli ölçülüp kaydedilmiştir. Ölçüm Sonuçları aşağıda verilmektedir.

**Tablo 4.7. Özütleme Aralıklarına Göre Numune pH Değerleri**

| NUMUNE ZAMAN | N1    | N2    | N3    | N4    | N5    | N6    | N7    | NKÖR |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| T1           | 10,83 | 10,81 | 11,04 | 10,99 | 10,94 | 11,06 | 11,05 | 7,48 |
| T2           | 11,42 | 11,53 | 11,50 | 11,43 | 11,44 | 11,43 | 11,46 | 7,48 |
| T3           | 11,22 | 11,31 | 11,26 | 11,26 | 11,26 | 11,29 | 11,29 | 6,75 |
| T4           | 11,52 | 11,56 | 11,52 | 11,55 | 11,52 | 11,54 | 10,93 | 5,97 |
| T5           | 11,86 | 11,69 | 11,74 | 11,80 | 11,79 | 11,76 | 11,75 | 7,27 |
| T6           | 11,63 | 11,66 | 11,62 | 11,55 | 11,67 | 11,65 | 11,64 | 7,83 |
| T7           | 11,53 | 11,64 | 11,59 | 11,61 | 11,60 | 11,57 | 11,59 | 6,75 |
| T8           | 11,46 | 11,50 | 11,40 | 11,45 | 11,47 | 11,49 | 11,47 | 5,96 |
| T9           | 11,44 | 11,50 | 11,51 | 11,53 | 11,49 | 11,48 | 11,53 | 7,09 |

**Tablo 4.8.** *Özütleme Aralıklarına Göre Numune ORP Değerleri*

| NUMUNE<br>ORP | N1         | N2         | N3         | N4         | N5         | N6         | N7         | NKÖR     |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| T1            | -236,20 mV | -241,00 mV | -246,50 mV | -237,90 mV | -233,60 mV | -240,80 mV | -241,60 mV | 13,40 mV |
| T2            | -261,50 mV | -265,70 mV | -264,20 mV | -260,10 mV | -261,40 mV | -262,00 mV | -263,30 mV | 13,40 mV |
| T3            | -248,40 mV | -253,20 mV | -252,30 mV | -251,40 mV | -249,80 mV | -252,60 mV | -252,60 mV | 20,90 mV |
| T4            | -264,70 mV | -267,60 mV | -265,50 mV | -267,20 mV | -265,20 mV | -267,10 mV | -267,50 mV | 61,10 mV |
| T5            | -283,10 mV | -275,90 mV | -279,90 mV | -282,00 mV | -281,90 mV | -279,70 mV | -279,40 mV | 15,20 mV |
| T6            | -271,60 mV | -273,50 mV | -271,40 mV | -267,60 mV | -274,70 mV | -273,50 mV | -273,30 mV | 15,50 mV |
| T7            | -270,09 mV | -271,08 mV | -269,01 mV | -270,06 mV | -270,10 mV | -268,60 mV | -269,70 mV | 16,70 mV |
| T8            | -261,90 mV | -263,50 mV | -258,90 mV | -261,10 mV | -262,30 mV | -263,10 mV | -262,70 mV | 60,20 mV |
| T9            | -262,80 mV | -263,20 mV | -263,60 mV | -264,90 mV | -263,30 mV | -262,70 mV | -265,90 mV | -2,30 mV |

0.45-µm membrandan geri kalan eluat süzölmüş, kimyasal analizler için numuneler 1+1 nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) ile şartlandırılmıştır.

Numuneler nitrik asit ile şartlandırıldıktan sonra, + 4 sıcaklıkta tutulan soğutucularda deneyler için belirlenen toplam süre için muhafaza altına alınmıştır.

Numune alma ve toplama işlemi sonrasında uygun sıcaklık derecesinde nakledilen numuneler Atomik Adsorbsiyon ile analiz edilmiştir. Analizler kapsamında su numuneleri analize alınmıştır.

Analizler kapsamında demir (Fe), alüminyum (Al), bor (B), çinko (Zn), kurşun (Pb), gümüş (Ag), bakır (Cu), krom (Cr), sodyum (Na), arsenik (As) ve kadmiyum (Cd) elementleri analiz edilmiş, sonuçlar ulusal ve uluslararası standartlar ile karşılaştırılmıştır.

Şartlandırılan su numunelerinde tespit edilen eser elementler ve makro element konsantrasyonları aşağıda verildiği gibidir. Konsantrasyon değerleri her bir parametre için EPA Metot 1315'te verilen özütleme sürelerinin numune değişim aralıklarına göre 63 günlük geometrik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

**Tablo 4.9.** Tespit Edilen Eser Element ve Makro Element Konsantrasyonları

| Parametre | Simge | N1       | N2       | N3       | N4       | N5       | N6       | N7       | Birimi |
|-----------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| Demir     | Fe    | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | µg/l   |
| Aluminyum | Al    | 371,0000 | 343,0000 | 241,0000 | 329,0000 | 405,0000 | 341,0000 | 683,0000 | µg/l   |
| Bor       | B     | 0,0130   | 0,0000   | 0,0290   | 0,0110   | 0,0270   | 0,0920   | 0,0140   | mg/l   |
| Kurşun    | Pb    | 0,0000   | 0,0000   | 0,0013   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | µg/l   |
| Bakır     | Cu    | 0,0002   | 0,0004   | 0,0003   | 0,0006   | 0,0004   | 0,0004   | 0,0005   | mg/l   |
| Krom      | Cr    | 151,0000 | 88,0000  | 55,0000  | 75,0000  | 33,0000  | 43,0000  | 132,0000 | µg/l   |
| Sodyum    | Na    | 45,0700  | 60,7700  | 53,3100  | 8,9700   | 4,1900   | 2,7300   | 6,0700   | mg/l   |
| Arsenik   | As    | 2,9000   | 7,1300   | 3,1800   | 6,1600   | 4,3400   | 4,3000   | 5,3700   | µg/l   |
| Kadmiyum  | Cd    | 0,0000   | 0,0790   | 0,0000   | 0,0000   | 0,4600   | 0,0760   | 0,0000   | µg/l   |
| Çinko     | Zn    | 0,0006   | 0,0004   | 0,0026   | 0,0004   | 0,0041   | 2,89E-05 | 0,0018   | mg/l   |
| Gümüş     | Ag    | 0,0033   | 0,0003   | 0,0003   | 0,0010   | 0,0005   | 6,06E-05 | 0,0004   | mg/l   |

Bir sonraki bölümde tespit edilen konsantrasyon değerlerinin kullanılan numunelerin yüzey alanlarına göre özütleme karakteristikleri değerlendirilecektir.

#### 4.2. Beton Numuneleri ile Elde Edilen Verilerin Şehir Şebekelerinde Kullanılan Su Deposu Boyutlarında Değerlendirilmesi

Çalışmanın 3. Bölümünde deneyler esnasında kullanılan beton numunelerinin boyutları hakkında bilgiler verilmiştir. Kullanılan numunelerin her bir özütleme periyodu için kullanılan 5.000 cm<sup>3</sup> (5 litre) eluat (özütleme) sıvısına maruz kalan toplam yüzey alanı 544 cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda aşağıdaki formülasyon kullanılarak tespit edilen eser elementlerin ve makro elementlerin birim alan başına kütlesi (mg/m<sup>2</sup> ve/veya µg/m<sup>2</sup>) hesaplanmıştır.

$$S_D = C * \frac{V_s}{A_s} * \frac{10.000 \text{ cm}^2}{m^2} \quad (4.1.)$$

Burada, S<sub>D</sub> birim alan başına özütlenen eser ve makro element kütlesi (mg/m<sup>2</sup> veya µg/m<sup>2</sup>), C su numunelerinde tespit edilen konsantrasyon değeri (mg/l veya µg/l), V<sub>s</sub> kullanılan özütleme sıvısı (leachant) hacmi (l) ve A<sub>s</sub> beton numune yüzey alanıdır (cm<sup>2</sup>).



Her bir beton numunesi için özütlenme periyotlarına göre yukarıda verilen formülasyonla hesaplanmış birim alan başına eser ve makro element kütleleri aşağıda verilmektedir.

**Tablo 4.10.** Birim Alan Başına Özütlenen Eser ve Makro Element Konsantrasyon Değerleri

| Parametre | Simge | N1       | N2       | N3       | N4       | N5       | N6       | N7       | Birimi            |
|-----------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|
| Demir     | Fe    | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | µg/m <sup>2</sup> |
| Aluminyum | Al    | 34098,61 | 31525,13 | 22150,31 | 30238,39 | 37223,55 | 31341,31 | 62774,53 | µg/m <sup>2</sup> |
| Bor       | B     | 1,1948   | 0,0000   | 2,6654   | 1,0110   | 2,4816   | 8,4557   | 1,2867   | mg/m <sup>2</sup> |
| Kurşun    | Pb    | 0,0000   | 0,0000   | 0,1195   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000   | µg/m <sup>2</sup> |
| Bakır     | Cu    | 0,0147   | 0,0322   | 0,0239   | 0,0506   | 0,0395   | 0,0368   | 0,0487   | mg/m <sup>2</sup> |
| Krom      | Cr    | 13878,41 | 8088,08  | 5055,05  | 6893,25  | 3033,03  | 3952,13  | 12132,12 | µg/m <sup>2</sup> |
| Sodyum    | Na    | 4142,38  | 5585,37  | 4899,72  | 824,43   | 385,10   | 250,91   | 557,89   | mg/m <sup>2</sup> |
| Arsenik   | As    | 266,5390 | 655,3183 | 292,2738 | 566,1656 | 398,8894 | 395,2130 | 493,5567 | µg/m <sup>2</sup> |
| Kadmiyum  | Cd    | 0,0000   | 7,2609   | 0,0000   | 0,0000   | 42,2786  | 6,9852   | 0,0000   | µg/m <sup>2</sup> |
| Çinko     | Zn    | 0,0551   | 0,0368   | 0,2390   | 0,0368   | 0,3768   | 0,0027   | 0,1654   | mg/m <sup>2</sup> |
| Gümüş     | Ag    | 0,3033   | 0,0276   | 0,0276   | 0,0919   | 0,0460   | 0,0056   | 0,0368   | mg/m <sup>2</sup> |

Yukarıda verilen formül yardımı ile hesaplanan konsantrasyon değerleri için özütlenme derişimleri, aşağıdaki formülasyon kullanılarak içme ve kullanma suyu betonarme depolarının hacimlerine simule edilmiştir.

$$C_D = S_D * \frac{A_{St}}{V_{St}} * \frac{m^3}{1000 l} \quad (4.2.)$$

Burada,  $C_D$  depo özütlenme (Leaching) konsantrasyonu (mg/l veya µg/l),  $S_D$  birim alan başına özütlenen eser element kütlesi (mg/m<sup>2</sup> veya µg/m<sup>2</sup>),  $A_{St}$  depoda suyun temas edeceği yüzey alanı (leachant) (m<sup>2</sup>) ve  $V_{St}$  depoda suyun temas edeceği alan için toplam hacimdir (m<sup>3</sup>).

Şehir şebekelerinde depolama hacimleri, şebekedeki saatlik ve günlük su tüketimi, yangın debisi, acil ihtiyaç ve su kaynağı verimindeki değişimin dengelenmesi gibi unsurlar göz önüne alınarak belirlenmektedir (İlbank, 2013, syf 31).

İçme ve kullanma suyu isale hatlarında kullanılan depolama haznelерinin hacimleri aşağıda verildiği biçimde sınıflandırılabilir (Karpuzcu, 2005, s. 227). Buna göre;

- Küçük hazneler;  $V < 500 \text{ m}^3$
- Orta büyüklükteki hazneler  $500 \leq V \leq 5000 \text{ m}^3$
- Büyük hazneler  $V > 5000 \text{ m}^3$

Yukarıda hazne hacimleri verilen su depolarından; depolanan hacme göre beton temas yüzeyi en yüksek olan (en kötü koşul) küçük hazneler için alınan örnek verilere göre;

500 m<sup>3</sup> suyu depolamaya uygun ( $V_{st}$ ) kübik betonarme depoda, suyun temas edeceği toplam yüzey alanı ( $A_{st}$ ) 315 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Söz konusu betonarme su deposu için özütleme konsantrasyonları Tablo 5.2.'de 17.02.2005 tarih, 25730 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe giren İnsani Tüketim Amaçlı sular Hakkında Yönetmelik, 03.11.1998 tarih, 98/83/EC sayılı Avrupa Birliği İçme Suyu Direktifi ve Dünya Sağlık Örgütü İçme Suyu Kalitesi Rehberinde (4ncü Versiyon) insani tüketim için belirlenmiş limit değerler ile karşılaştırılmıştır.

**Tablo 4.11.** 500 m<sup>3</sup> Hacimli Betonarme Su Deposu İçin Özütleme Konsantrasyon Değerlerinin İçme Suyu Referans Değerleri ile Karşılaştırılması

| Parametre | Simge | N1      | N2      | N3      | N4      | N5      | N6      | N7      | Birimi | İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik |        | EU İçme Suyu Direktifi 98/83/EC                 |        | Dünya Sağlık Örgütü İçme Suyu Kalitesi Rehberi V.4. |        |
|-----------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---|--------|---|--------|---|--------|
|           |       |         |         |         |         |         |         |         |        | İzin verilebilir en yüksek konsantrasyon değeri | Birimi | İzin verilebilir en yüksek konsantrasyon değeri | Birimi | İzin verilebilir en yüksek konsantrasyon değeri     | Birimi |
| Demir     | Fe    | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | µg/l   | 200   | µg/l   | 200   | µg/l   | 300   | µg/l   |
| Aluminyum | Al    | 21,4821 | 19,8608 | 13,9547 | 19,0502 | 23,4508 | 19,7450 | 39,5480 | µg/l   | 200   | µg/l   | 200   | µg/l   | 100   | µg/l   |
| Bor       | B     | 0,0008  | 0,0000  | 0,0017  | 0,0006  | 0,0016  | 0,0053  | 0,0008  | mg/l   | 1   | mg/l   | 1   | mg/l   | 2,4   | mg/l   |
| Kurşun    | Pb    | 0,0000  | 0,0000  | 0,0001  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | µg/l   | 10  | µg/l   | 10  | µg/l   | 10  | µg/l   |
| Bakır     | Cu    | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | mg/l   | 2   | mg/l   | 2   | mg/l   | 2   | mg/l   |
| Krom      | Cr    | 8,7434  | 5,0955  | 3,1847  | 4,3427  | 1,9108  | 2,4898  | 7,6432  | µg/l   | 50  | µg/l   | 50  | µg/l   | 50  | µg/l   |
| Sodyum    | Na    | 2,6097  | 3,5188  | 3,0868  | 0,5194  | 0,2426  | 0,1581  | 0,3515  | mg/l   | 200   | mg/l   | 200   | mg/l   | 50  | mg/l   |
| Arsenik   | As    | 0,1679  | 0,4129  | 0,1841  | 0,3567  | 0,2513  | 0,2490  | 0,3109  | µg/l   | 10  | µg/l   | 10  | µg/l   | 10  | µg/l   |
| Kadmiyum  | Cd    | 0,0000  | 0,0046  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0266  | 0,0044  | 0,0000  | µg/l   | 5   | µg/l   | 5   | µg/l   | 3   | µg/l   |
| Çinko     | Zn    | 0,0000  | 0,0000  | 0,0002  | 0,0000  | 0,0002  | 0,0000  | 0,0001  | mg/l   | -   | -      | -   | -      | 3   | mg/l   |
| Gümüş     | Ag    | 0,0002  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0001  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | mg/l   | -   | -      | -   | -      | 0,1   | mg/l   |

## 5. SONUÇ

EPA Metot 1315 kullanılarak hazırlanan 7 Set beton numunesi için 63 gün örnekleme süresi ile özütlenen eser element ve makro element konsantrasyonlarının; 500 m<sup>3</sup> hacimli betonarme su deposu için hesaplanan derişimleri; yukarıda verilen referans dokümanlarında içme suyu için belirtilen limit değerlerin altında kaldığı tespit edilmiştir.

Kullanılan su haznelerinin hacimleri ve dolayısıyla suyun temas ettiği yüzey alanının artması halinde özütlenen eser ve makro element miktarı azalacağından Tablo 5.2.'de verilen konsantrasyon değerleri düşecektir. Bununla birlikte temas süresinin (depolama süresi) azalması, özütlenen madde miktarının azalmasına neden olacaktır.

Deneyler esnasında kullanılan çimento ve beton numuneleri, çimento sektörü ısıll güç ikame oranı ortalamasının 5-6 katı mertebesinde alternatif yakıt kullanılan bir işletmeden alınmıştır. Çalışma nezdinde yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar ile alternatif yakıt kullanımının, bu tür yakıtları kullanan fabrikalarda üretilen çimentodan mamul betonla inşa edilen su depolarına olumsuz yönde bir etkisinin olmayacağını göstermektedir.

Artan enerji maliyetleri ve katkıll çimento üretimi ihtiyacının artması halinde uygulanacak yeni teknolojiler ile artacak ısıll güç ikame oranları ve katkı miktarları bu tür çalışmaların tekrar edilmesini ve özütleme karakteristiklerinin hakkında çalışma yapılmasını gerektirecektir.

## KAYNAKÇA

- Alsop A.P., Chen H., Chin-Fatt A., Jackura A.J., McCabe M.I., Tseng H., (2005). The Cement Plants Operations Handbook, David Hargreaves, International Cement Review, Dubai.
- Atımtay, A., (2014), Çimento Sektöründe Enerji Verimliliği, Alternatif Yakıt Kullanımı ve Emisyonların Kontrolü, Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi, 74.
- Cembureau, The European Cement Association, (1995), Use of non-ferrous slag in cement and the leaching behaviour of concrete in drinking water. *Special Publ. of The European Cement Association*, W. van Loo (ed.), 17.
- Cembureau, The European Cement Association, (1997), Alternative Fuels in Cement Manufacture. Technical and Environmental Review, 10-15.
- <http://www.csb.gov.tr/projeler/iklim/> (Erişim Tarihi: 07.05.2016)
- Colucci, M., Epstein, P., Bartley, B. (1993). A comparison of metal and organic concentrations in cement and clinker made with fossil fuel and cement and clinker made with waste derived fuels. *Emerging Technologies Symposium on Cement and Concrete, Portland Cement Association*, sempozyumunda sunulan bildiri. Chicago, USA.
- Coucke, D., Lessirard, L., Pollet, B., Soukatchoff, P., (1997). Impact of materials on water quality: in case of cementitious pipes. TSM, 5, 38-46.
- de Groot, G.J., Hohberg, I., Lapers, F.J.M., Van der Veen, A.M.MH., Wassing, W., Quevauviller, Ph., (1997). Development of a leaching method for the determination of the environmental quality of concrete. *Directorate General for Sciences, Research and Development of European Commission* tarafından yayınlanan rapor, EUR 17869 EN, Luxembourg, 68.
- EPA Method 1315 (2013), Mass transfer rates of constituents in monolithic or compacted granular materials using a semi-dynamic tank leaching procedure, American Environmental Protection Agency.

- European Commission, (2010), Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries, Brussels – Belgium.
- Germeneau, B., Bollotte, B., Defossé, C., (1993). Leaching of heavy metals by mortar bars in contact with drinking and deionised water. *Emerging Technologies Symposium on Cement and Concrete, Portland Cement Association* sempozyumunda yayınlanan bildiri, Chicago, USA.
- Hillier, S.R., Sangha, C.M., Plunkett, B.A., Walden, P.J., (1999). Long term leaching of toxic metals from Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 29, 515-521.
- Hohberg, I, de Groot, D.J., van der Veen, Wassing, W., (1997). Development of a leaching protocol for concrete. *In Waste Materials in Construction: Putting Theory in Practice, J.J.J.M. Goumans, G.J. Senden, H.A. van der Sloot, Eds., Elsevier, Amsterdam, 217-228.*
- İlbank İller Bankası Anonim Şirketi. (2013), İçme Suyu Tesisleri Etüt, Fizibilite ve Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartname, İlbank İller Bankası AŞ, Ankara.
- Kanare, H.M., West, P.B., (1993). Leachability of selected chemical elements from concrete. *Emerging Technologies Symposium on Cement and Concrete, Portland Cement Association, Chicago, USA.*
- Karpuzcu, M., (2005), Su Temini ve Çevre Sağlığı, İstanbul: Kubbealtı Neşriyatı.
- Kuleli, Ö., (2010), Çimento Mühendisliği El Kitabı, Ankara: TÇMB Yayınları.
- Marion, A.M., de Lanève, M., de Grauw, A., (2003). Study of the leaching behavior of lean concrete blocks: quantification of heavy metal content in the leached Tank Test. Research Centre for Scientific and Technical Cement Industry, CRIC 2001-2002 sayılı raporu, Brussels, Belgium, 3-21.
- Official Journal of the European Communities, (1998), Quality of the Water Intended for Human Consumption, European Union, Brussels – Belgium.

- Özkul H., Taşdemir M.A., Tokyay M., ve Uyan M., (2004), Meslek Liseleri için Her Yönüyle Beton, İstanbul, Türkiye Hazır Beton Birliği.
- Rankers R. H., Hohberg I., (1991). Leaching tests for concrete containing fly ash – evaluation and mechanism. *In Waste Materials in Construction*, J.J.J.R. Goumans, H.A. van der Sloot and Th. G. Aalbers, Eds., Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands, 201-208.
- Resmi Gazete. (2005), İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, Sağlık Bakanlığı, Ankara.
- Schneider, M., (1997). The environmental impact of co-combustion in cement kilns. *Workshop on Co- incineration of Waste* bildirisi, 1997.
- Sprung, S., Rechenberg, W., Bachmann, G., 1994. Environmental compatibility of cement and concrete. In *Environmental Aspects of Construction with Waste Maaterials*, J.J.J.M. Goumanns, H.A. van der Sloot and Th. G. Aalbers ( eds.). 369-386.
- <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=53> (Erişim tarihi: 15.03.2016).
- <http://www.thbb.org/teknik-bilgiler/> (Erişim Tarihi: 08.03.2012)
- Thielen, G., Spanka, G., Rechenberg, W., (1993). Leaching characteristics of cement bound materials containing organic substances inorganic trace elements. *Emerging Technologies Symposium on Cement and Concrete*, Portland Cement Association, sempozyum bildirisi Chicago, USA.
- Türkeş M. (2002), İklim Değişikliği: Türkiye - İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi İlişkileri ve İklim Değişikliği Politikaları, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, *Vizyon 2023: Bilim ve Teknoloji Stratejileri Teknoloji Öngörü Projesi, Çevre ve Sürdürülebilir Kalkınma Paneli Vizyon ve Öngörü Raporu*, Ankara.
- van der Sloot, H.A., de Groot, G.J., Hoede, D., (1993). Classification of Pulverised Coal Ash Part II. ing properties of concrete with pulverised coal fly ash as partial

cement replacement. ECN-C- 93-064 sayılı raporu, Netherlands Energy Research Foundation, the Netherlands, 73.

van der Sloot, H.A., (2000). Comparison of the characteristic leaching behaviour of cements using standard (EN 196-1) cement mortar and an assessment of their long-term environmental behaviour in construction products during service life and recycling. *Cement and Concrete Research*, 30, 1079-1096.

van der Sloot, H.A., (2002). Characterization of leaching behaviour of concrete mortars and of cement- stabilized wastes with different waste loading for long-term environmental assessment. *Waste Management*, 22, 181-186.

World Health Organization (2011), Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th Edition, World Health Organization, Geneva - Switzerland, 311-433.

Yeğınobalı, A., (2008), Çimento Yeni Bir Çağın Malzemesi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

Yıldız, N., (2010), Çimento Üretimi, Hammadde Üretimi-Kırma-Öğütme-Harmanlama-Klinker Üretimi-Çimento Üretimi-Sınıflandırma, Ertem Basım: Ankara.