

2023

me Teknoloji Yol Haritası – Çimento Sektörü, 2023



TÜBİTAK

YEŞİL BÜYÜME TEKNOLOJİ YOL HARİTASI ÇİMENTO SEKTÖRÜ

Versiyon: 12.05.2023

Görüşlerinizi ve sorularınızı politikalar@tubitak.gov.tr adresine e-postayla iletebilirsiniz.

İçindekiler

Kritik Ürün/Teknoloji 1.1.....	1
Klinker, çimento ve beton üretim süreçlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelik yerli teknolojik çözümlerin geliştirilmesi	1
Kritik Ürün/Teknoloji 1.2.....	8
Klinker ve çimento üretim proseslerinin verimliliğini artırarak karbon ayak izini azaltacak şekilde iyileştirilmelerine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi.....	8
Kritik Ürün/Teknoloji 2.1.....	24
Klinker üretim süreçlerinin iklim etkilerini en aza indirecek ve verimliliklerini artıracak iyileştirmelere yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi	24
Kritik Ürün/Teknoloji 2.2.....	29
Klinker üretim süreçlerinin iklim etkilerini en aza indirecek ve verimliliklerini artıracak iyileştirmelere yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi	29
Kritik Ürün/Teknoloji 3.1.....	48
Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin üretim sürecinde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik alternatif çimento türlerinin kullanımının yaygınlaştırılması için pilot uygulamalar ve teknolojilerin geliştirilmesi	48
Kritik Ürün/Teknoloji 3.2.....	52
Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin ve hammaddelerinin üretim ve bakım sürecinde endüstriyel kaynaklı atık ısı ve karbondioksit emisyonlarının kullanımı ve değerlendirilmesine yönelik çözümlerin geliştirilmesi.....	52
Kritik Ürün/Teknoloji 3.3.....	55
Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin üretim sürecinde çimento kullanımını azaltmaya ve dayanıklılığı/kalıcılığı artırmaya imkân sağlayacak malzeme ve süreçlerin geliştirilmesi.....	55
EK 1. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Gübre Danışma Grubu Üyeleri	85
EK 2. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Çimento Sektörel Odak Grubu Üyelerinin Bağlı Olduğu Kurumlar	85
Ek 3. Çalışmanın Yürütülmesinde Görevli Uzmanlar	87

- 1.1. Klinker, çimento ve beton üretim süreçlerinde **yenilenebilir enerji kaynaklarının** kullanılmasına yönelik yerli teknolojik çözümlerin geliştirilmesi
- 1.2. Klinker ve çimento üretim proseslerinin **verimliliğini artırarak karbon ayak izini azaltacak** şekilde iyileştirilmelerine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

1. Klinker, Çimento ve Beton Üretimine Yönelik Enerji Çözümleri



- 2.1. Klinker üretim süreçlerinin **iklim etkilerini en aza indirecek ve verimliliklerini artıracak** iyileştirmelere yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi
- 2.2. Klinker üretim süreçlerine entegre edilecek şekilde maliyet etkin **karbon dioksit yakalama, depolama ve kullanımına** yönelik teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulamaların gerçekleştirilmesi

2. Klinker Üretiminde İklim Etkilerinin Azaltılması ve Verimin Artırılması



- 3.1. Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin üretim sürecinde **karbon ayak izinin azaltılmasına** yönelik alternatif çimento türlerinin kullanımının yaygınlaştırılması için pilot uygulamalar ve teknolojilerin geliştirilmesi
- 3.2. Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin ve hammaddelerinin üretim ve bakım sürecinde endüstriyel kaynaklı **atık ısı ve karbondioksit emisyonlarının kullanımı ve değerlendirilmesine** yönelik çözümlerin geliştirilmesi
- 3.3. Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin üretim sürecinde **çimento kullanımını azaltmaya ve dayanıklılığı/kalıcılığı artırmaya** imkân sağlayacak malzeme ve süreçlerin geliştirilmesi

3. Beton ve Çimento Bağlayıcı Malzemelerin Üretimine İyileştirilmesi ve Yeni Süreçlerin Geliştirilmesi



Şekil 1. Çimento Sektörünün Yeşil Dönüşümü için Teknolojik İhtiyaçlar ve Çözümler

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Çimento Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyada THS	Türkiye'de THS	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
1. Klinker Üretimine Yönelik Enerji Çözümleri	1.1. Klinker üretim süreçlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelik yerli teknolojik çözümlerin geliştirilmesi	1.1.a. Yenilenebilir enerji (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle vb.) kaynaklarının, klinker, çimento ve beton üretim süreçlerine (termal prosesler, kırma, öğütme, taşıma araçları ve üniteleri) entegrasyonuna yönelik tasarımlar, uygulamaların ve ekipmanların geliştirilmesi	THS:9	THS:9	2026
	1.2 Klinker ve çimento üretim proseslerinin verimliliğini artırarak karbon ayak izini azaltacak şekilde iyileştirmelerine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi	1.2.a. Atık ısı geri kazanım yerli sistemlerinin geliştirilmesi ve pilot gösterimlerin gerçekleştirilmesi	THS:9	THS:9	2026
		1.2.b. Klinker üretimi sonrasında çimento üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak şekilde	THS:7	THS:7	2026

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Çimento Sektörü, 2023

		otonom üretim ve/veya dijital dönüşüme yönelik çözümlerin geliştirilmesi			
		1.2.c. Klinker üretimi sonrasında çimento üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak daha verimli malzemelerin, ekipmanların, yöntemlerin ve süreçlerin geliştirilmesi	THS:7	THS:7	2030
		1.2.d Çimento üretimi süreçlerinde ekipman kaynaklı kinetik, ısı vb. enerjilerin yeniden kullanılmasına yönelik çözüm önerilerinin geliştirilmesi	THS:3	THS:1	2035
2. Klinker Üretiminde İklim Etkilerinin Azaltılması ve Verimin Artırılması	2.1 Klinker üretim süreçlerinin iklim etkilerini en aza indirecek ve verimliliklerini artıracak iyileştirmelere yönelik teknolojilerin ve	2.1.a. Klinker üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak şekilde otonom üretim ve/veya dijital dönüşüme yönelik		THS:7	2026

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Çimento Sektörü, 2023

	uygulamaların geliştirilmesi	çözümlerin geliştirilmesi			
		2.1.b. Klinker üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak daha verimli malzemelerin, ekipmanların, yöntemlerin ve süreçlerin geliştirilmesi		THS:5-6	2030
		2.1.c. Alternatif yakıt kullanım oranlarının artırılması amacıyla sistemde gerekli iyileştirmelerin gerçekleştirilmesi		THS:6-7	2026
		2.1.d. Enerji tasarrufu sağlanması amacıyla klinker üretiminde pişme sıcaklığını düşürücü hammaddelerin ve yardımcı malzemelerin kullanılması ve doğru uygulamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi			2026
	2.2 Klinker üretim süreçlerine entegre edilecek şekilde maliyet etkin karbon	2.2.a. Kalsinasyon sonucu ortaya çıkan karbon dioksit için karbon yakalama,	THS:6-7	THS:6	2030-2035

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Çimento Sektörü, 2023

	dioksit yakalama, depolama ve kullanımına yönelik teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulamaların gerçekleştirilmesi	kullanım ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi			
3. Beton ve Çimento Bağlayıcı Malzemelerin Üretimine İyileştirilmesi ve Yeni Süreçlerin Geliştirilmesi	3.1 Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin üretim sürecinde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik alternatif çimento türlerinin kullanımının yaygınlaştırılması için pilot uygulamalar ve teknolojilerin geliştirilmesi	3.1.a Enerji tasarruflu, düşük karbonlu, farklı katkıları içeren çimento tiplerinin kompozisyon tasarımı ve pilot çalışmaları	THS:8	THS:8	2026-2030
	3.2 Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin ve hammaddelerinin üretim ve bakım sürecinde endüstriyel kaynaklı atık ısı ve karbondioksit emisyonlarının kullanımı ve değerlendirilmesine yönelik çözümlerin geliştirilmesi	3.2.a. Karbon dioksit ile kürlemeye yönelik endüstriyel çözümler üretilmesi	THS:8-9	THS:3-4	2030-2035
	3.3 Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin üretim	3.3.a. Klinker ve çimento üretim girdileri olarak farklı	THS:8-9	THS:4-6	2026

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Çimento Sektörü, 2023

	sürecinde çimento kullanımını azaltmaya ve dayanıklılığı/kalıcılığı artırmaya imkân sağlayacak malzeme ve süreçlerin geliştirilmesi	endüstriyel atıklara yönelik endüstriyel paylaşım analizinin gerçekleştirilmesi, değerlendirilebilecek olası atıkların saptanması ve kullanıma uygun hale getirilmesine yönelik ön işlemlerin geliştirilmesi, mevcut katkıların kullanım miktarlarının artırılması ve/veya alternatif çimento bileşenlerinin araştırılması ve geliştirilmesi			
		3.3.b. Çimentoya alternatif hammaddelerin yüksek oranda kullanımının çimento ve beton üretiminde kullanılmasına yönelik teknolojik çözümlerin geliştirilmesi, yaygın olarak kullanılmakta olan mineral katkıların yerine alternatif puzolan kaynaklarının araştırılması ve kullanılmasına	THS:4-6		2030

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Çimento Sektörü, 2023

		yönelik süreçlerin ve teknolojik çözümlerin geliştirilmesi			
		3.3.c. Çimento ve beton için sürdürülebilirliğe katkı sağlayan yeni nesil kimyasal katkıların geliştirilmesi ve yapının servis ömrü ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik özel betonlar tasarlanması	THS:8-9	THS:4-6	2035

Kritik Ürün/Teknoloji 1.1.

Klinker, çimento ve beton üretim süreçlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelik yerli teknolojik çözümlerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

1.1.a. Yenilenebilir enerji (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle vb.) kaynaklarının, klinker, çimento ve beton üretim süreçlerine (termal prosesler, kırma, öğütme, taşıma araçları ve üniteleri) entegrasyonuna yönelik tasarımlar, uygulamaların ve ekipmanların geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Dünya Bankası 2020 yılındaki raporunda “Sürdürülebilir Kalkınma Amacı 7 (Sürdürülebilir ve Temiz Enerji - Herkes için karşılanabilir, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişimi sağlamak)” doğrultusunda yenilenebilir enerji sağlayıcıları ve mineral/çimento üreticilerinin hayati rolünü vurgulamıştır. Bu raporda, Paris İklim Anlaşmasının gerekliliklerinin sağlanması için yenilenebilir enerjinin uygulanmasını öncelikli alan olarak belirtilmiş ve “Yeşil Geçiş” için çimento ve mineral sektörlerindeki yenilenebilir enerji uygulamalarının olmazsa olmaz oldukları vurgulanmıştır [1].

Bu vurgunun nedeni çimento üretiminde fosil yakıt kullanımından kaynaklı yüksek CO₂ salımıdır. %95’ten fazla klinker içeren Portland çimentosunda CO₂ salımı ton başına ortalama 800-850 kg’dır ve bu salımın %90’ı klinker üretim sürecinden kaynaklanmaktadır. Çimento üretimi, hammadde çıkarma ve kırma, öğütme, homojenizasyon, ön ısıtma, pişirme, yeniden öğütme ve taşıma süreçlerinden oluşmaktadır. Ön ısıtma, pişirme ve kamyonla taşıma süreçlerinde fosil yakıtlar ve alternatif yakıtlar, diğer süreçlerde elektrik kullanılmaktadır. Çimentonun ana bileşeni olan klinker üretimindeki ön ısıtma prosesi malzemeyi 900°C sıcaklığa ulaştıracak şekilde sıcak gaz sirkülasyonu ve siklonlar vasıtasıyla; pişirme prosesi ise malzemeyi yaklaşık 1450°C’de eriyik hale ulaştıracak şekilde döner fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Bir başka ifadeyle bir ton çimento üretmek için ortalama 3-3,5 GJ ısı enerjisi ve 100 kWh elektrik enerjisine, bir başka ifadeyle ısı enerjisinin yaklaşık 1/10’una ihtiyaç duyulmaktadır. Ön ısıtmada gerçekleşen kalsinasyon reaksiyonu sonucunda toplam CO₂ salımının %60’ı, ön ısıtma ve pişirme süreçlerinde fosil yakıtların yakılması sebebiyle toplam

CO₂ salımının yaklaşık %30'u ortaya çıkmaktadır. Kalan yaklaşık %10'luk CO₂ salımı, kullanılan elektriğin üretiminden ve taşımada kullanılan dizel araçlardan kaynaklanmaktadır. Beton üretimi ele alındığında ise, çimento, agrega ve beton transferinde kullanılan dizel araçlar ve tesisin tükettiği elektriğin üretiminde kullanılan fosil yakıtlar iki ana karbon salımı kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır.

Çimento endüstrisinin karbonsuzlaştırılması hedefiyle klinker, çimento ve betonun üretim, öğütme ve taşıma süreçlerinin fosil yakıtlar yerine yeşil yakıtlar veya yenilenebilir enerji kaynaklarıyla gerçekleştirilmesi ve karbon nötr taşıma araç ve ünitelerinin geliştirilmesi halinde 2050 karbon nötr hedefleri doğrultusunda, Portland çimentosu için ton çimento başına CO₂ salımında %17 mertebesinde azımsanmayacak bir kazanç elde edilebileceği öngörülmektedir [1]. Bu potansiyel, Paris İklim Anlaşması ve Yeşil Mutabakat çerçevesinde çimento endüstrisinin sıfır emisyon hedeflerini yakalamasında önemli bir rol oynayacaktır.

Herhangi bir tesise ait çimento üretim verileri ve harcama kalemleri incelendiğinde ihtiyaç duyulan enerji, elektrik ve ısısal enerji olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Elektrik enerjisi ele alındığında kırma ve öğütme işlemlerinin elektrik enerjisi tüketimindeki payının yaklaşık %50-60 mertebesinde olduğu anlaşılmaktadır [2]. Dolayısıyla, bu işlemlerde gerçekleştirilecek iyileştirmeler tesis ekonomisine önemli katkılar sağlayabilmektedir. Hammadde ve klinker öğütme süreçlerinde, agrega kırma süreçlerinde ve tesislerin işletilmesinde %100 yenilenebilir enerjinin kullanılması; tüm nakliye operasyonlarının yenilenebilir elektrik enerjisi kullanılan elektrikli araçlarla ve iş makineleriyle yürütülmesi bu alanda oluşan enerji kaynaklı karbon salımının sıfıra indirilmesini sağlayacaktır.

Yenilikçi öğütme teknolojilerinin geliştirilmesi bu konuda önemli unsurdur. Bu bağlamda son yıllarda üniversite-sanayi iş birliği ile yürütülen proje çalışmalarında geleneksel öğütme sistemi olan bilyeli değirmenlerin yerini alabilecek ya da beraber kullanıldığı zaman enerji tasarrufu sağlayabilecek alternatifler değerlendirilmiştir. Karıştırmalı değirmen teknolojisi bunlardan birisidir. Karıştırmalı değirmende öğütücü bilyalara enerji aktarımı dış haznenin dönmesi ile değil, değirmen içerisinde bulunan şaftın bilyeyi karıştırması neticesinde yapılmaktadır. Bu nedenle de 100 mikron altı ince boylarda yapılan öğütme işlemini daha verimli yapmaktadır. Bu teknoloji, minerallerin yaş ortamda öğütüldüğü bir sistemdir. Mineral bazlı malzemelerde küçük tane boyutlarında yapılan öğütme işleminde, karıştırmalı değirmen teknolojisinin geleneksel bilyeli değirmenlere nazaran %10-30 enerji tasarrufu sağladığı saptanmıştır [3]. Benzer yaklaşım çimento öğütme devrelerinin enerji tüketiminin azaltılmasında da kullanılabilir. Bu noktada, "karıştırmalı değirmen" kullanan üretim şemasının geliştirilmesi ile çimento sektörü karbon ayak izi de azaltılmış olacaktır. Halihazırda bu teknolojiyi kullanan bir çimento uygulaması olmamakla birlikte kullanılması durumunda fayda sağlayacağı aşikardır. Yürütülen bazı simülasyon çalışmalarında, çimento devresinde harcanan enerji miktarının %7-18 oranında azaltılabileceği raporlanmıştır [2].

Bir diğer kategori olan ısı enerjisi talebi ele alındığında ise klinker üretimindeki termal süreçleri ön ısıtma ve pişirme olarak ayrı ayrı değerlendirmek gerekir. Zira farklı süreç sıcaklıkları için farklı çözüm alternatifleri ortaya konulabilir. Klinker üretiminin ön ısıtma sürecinde malzeme 900°C sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu süreçteki sıcaklığın pişirme sürecine göre daha düşük olması nedeniyle sistemin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beslenmesi daha kısa vadede gerçekleştirilebilir. Kısa vadeli ekonomik çözüm olarak ön ısıtmada kullanılan tesisat üzerinde, biyokütle ve yeşil hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi için yanma rejimlerine uygun revizyonlar yapılarak bu yakıtlar kullanılabilir. Ancak mevcut sistemlerin revizyonları oldukça karmaşık işlemler olduğundan, konvansiyonel sistemlerin biyokütle ve hidrojen kullanımı için kapsamlı Ar-Ge çalışması ve yatırımlar yapılması gerekmektedir. Daha sürdürülebilir ancak maliyetli olabilecek çözüm ise ön ısıtıcıların (veya kalsinatörlerin) elektrikle veya yoğunlaştırılmış güneş enerjisiyle çalışan ısıtıcılara dönüştürülmesidir. Çimento klinkeri üretiminde hazırlanan hammadde karışımına farin denilmektedir. Burada konvansiyonel elektrikli fırınların revizyonu, yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin mevcut eriyik tuz uygulamalarının farin kalsinasyonu için kullanılacak şekilde revize edilmesi, kalsinasyon süreçlerine çözüm konusunda gelecek vadettirmektedir. Günümüzde birçok kullanım alanı olan elektrikli mikrodalga fırınlar ise güncel çalışmalarla laboratuvar ölçeğinde 2000°C sıcaklıklara ulaşabilmiştir [4]. Endüstriyel operasyon farklılıklarını göz önünde bulundurarak bu teknolojinin orta vadede farin kalsinasyonunda, uzun vadede klinker üretiminde kullanılabilmesi olasıdır. Elektrikle çalıştırılması ve konvansiyonel fırınların dönme hareketine engel oluşturmaması nedeniyle mikrodalga teknolojisi de gelecek vadeden çözümler arasında bulunmaktadır.

Pişirme sürecinde ön ısıtıcıdan gelen kalsine farin döner fırın içerisinde 1450°C sıcaklıkta ergitilir. Gerekli enerji alev boruları ile fırın içerisine beslenen yakıt sayesinde fırına uzanan çok yüksek sıcaklıktaki bir alev ile sağlanır. Orta vadedeki ekonomik çözüm, mevcut alev borularının revizyonu ve fırın içerisindeki yanma rejimlerinin optimizasyon çalışması ile biyokütle ve yeşil hidrojenin yakıt olarak kullanılmaya başlanmasıdır. Ancak bu çözüm, yüksek miktarda yeşil hidrojen üretimi ve bunun ekonomik olması gerekliliklerini, bir başka deyişle yeşil hidrojen üretimine, taşınmasına ve depolanmasına yönelik Ar-Ge ve yatırım gerekliliklerini beraberinde getirmektedir. Uzun vadeli, daha kapsamlı bir Ar-Ge çalışması ve yatırım gerektiren çözüm ise döner fırınların ark fırınlarına benzer şekilde elektrikli sistemlere dönüştürülmesi, indüksiyon fırını teknolojilerinin klinker üretiminde kullanılacak şekilde yeniden tasarlanması ve son olarak plazma ocaklarının klinker üretimine uygun olacak şekilde yeniden tasarlanmasıdır. Bu sistemlerin sürekli çalıştırılabilmesi yüksek miktarda elektrik enerjisi gerektireceğinden, güneş enerjisi veya rüzgâr enerjisi gibi doğrudan elektrik üreten yenilenebilir enerji tesislerinin sayısının artırılması bu çalışmalar için kritik öneme sahiptir. Ancak bu tesis ve teknolojilerin geliştirilerek yaygınlaştırılması tek başına yeterli değildir. Çimento fabrikaları ve beton santralleri gibi 24 saat çalışan tesislerde kesintisiz enerji

ihtiyacının karşılanabilmesi için yüksek kapasiteli piller (batarya) gibi enerji depolama çözümleri konusunda milli projelerin yapılması ve çıktılarının ticarileştirilmesi elzemdir.

Şekil 1.1'de görüldüğü üzere 2021 yılının aralık ayında Türkiye'de devrede olan santrallerin %53,7'sini yenilenebilir kaynaklardan elektrik üreten santraller oluşturmaktadır. Hidroelektrik santraller, Türkiye toplam elektrik kurulu gücünün %31,5'ini temsil ederken, rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinin toplam kurulu güçteki payları %18,5 seviyesinde gerçekleşmiştir [5].



Şekil 1.1. Aralık 2021 itibarıyla kurulu güç dağılımı [6]

Genel elektrik üretimi dağılımına bakıldığında zaman üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık olarak %50'sinin termik santrallerden elde edildiği görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin çimento sektöründe farklı öğütme, fırın sistemlerinde kullanılması konvansiyonel olarak üretilen elektrik ve diğer enerji kaynaklarının daha az kullanılmasına hem de karbon ayak izinin azalmasına yardımcı olacaktır.

Tablo 1.1 içerisinde yıllar içerisindeki elektrik üretim dağılımları yer almaktadır. Burada da görüldüğü üzere 2010 ile 2020 yılları arasında kömür, doğal gazdan elektrik üretimindeki kurulu gücün oranı toplam oran içerisinde azalma göstermektedir [6].

Tablo 1.1. 2010 ve 2020 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre Türkiye kurulu gücü (MW)

	Kömür	Sıvı Yakıtlar	Doğal Gaz	Yenilenebilir +Atık+Atık Isı	Çok Yakıtlı	Hidro-elektrik	Jeotermal	Rüzgâr	Güneş	Toplam
2010	11.950,3	1.593,3	13.302,1	107,2	5.325,6	15.831,2	94,2	1.320,2	-	49.524,1
%	24,13	3,22	26,86	0,22	10,75	31,97	0,19	2,67	-	100,00
2020	19.613,0	189,4	21.599,4	1.502,8	4.889,1	30.983,9	1.613,2	8.832,4	6.667,4	95.890,6
%	20,45	0,20	22,53	1,57	5,10	32,31	1,68	9,21	6,95	100,00

Günümüz küresel durumu baz alındığında gelinen noktada karbon ayak izi, karbon salımlarının azaltılması, var olan enerji kaynaklarının etkin kullanılması gibi konular acil eylem planı çerçevesinde değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, kırma ve öğütme işleminde enerji verimli öğütme teknolojisinin geliştirilmesinin yanı sıra, nakliye operasyonlarında da yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışan sistem ve teknolojilerin geliştirilmesi önemli katkı sağlayacak unsurlardır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

Birleşmiş Milletler, yenilenebilir enerji kaynakları olarak güneş enerjisini, rüzgâr enerjisini, jeotermal enerjiyi, su enerjisini, okyanus enerjisini, biyokütleyi listelemiştir. Bu enerji kaynaklarının fosil yakıtlara nazaran 3 kat daha fazla istihdam sağladıkları ve çok daha ucuz oldukları vurgulanmıştır [7]. Çimento endüstrisinde de bu enerji kaynaklarından bazılarının kullanıldığı bilinmektedir. Çimento fırınları üzerinde yapılan çalışmalarda gıda atıklarının biyokütle olarak kullanılması ve fosil yakıtın yerini alması hedeflenmiştir. Yürütülen simülasyonlarda ve deneysel çalışmalarda bunun mümkün olduğu saptanmıştır. Bu tür bir uygulama için gerekli olan işlem adımları; atık değerlendirme ve gıda atıklarından katı biyokütle üretimi hazırlığı olarak belirtilmiştir.

Hâlihazırda fırınlar için geliştirilen ve uygulama aşamasına geçilen bir teknolojinin değirmenler için de kurulabileceği düşünülmektedir. Özellikle kimi tesislerde enerji tüketimi optimal değerlere ulaşmıştır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan teknolojinin kullanılması ve mevcut teknolojilerdeki enerji talebinin yenilenebilir enerji sistemlerinden elde edilmesi darboğazın önüne geçecek ve ek fayda sağlayabilecektir.

Güncel bilgiler ışığında, öğütme ve kırma teknolojisi ne olursa olsun, yenilenebilir enerjinin kullanılabilir ve uygulanabilir olduğu söylenebilir. Ancak hem enerji verimli bir teknoloji kullanımı hem de yenilebilir enerjinin bu teknolojiye adapte edilmesi asıl faydanın ve “know-how”ın üretileceği kısım olarak göze çarpmaktadır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

THS		Teknoloji Konusu
Dünya	Türkiye	
9	9	Güneş enerji santrali entegre edilmiş çimento fabrikası
5	3	Yüksek sıcaklıklı termik güneş reaktörü kullanılarak kalsinasyon
4	3	Güneş enerjisinden klinker üretimi
5	3	Hidrojen yakıtı ile çimento üretimi
6-8	6-8	Biyokütle ile çimento üretimi
8-9	3-5	Elektrikli iş makinelerinin çimento üretiminde kullanılması

Avrupa ve Amerika başta olmak üzere, yenilenebilir elektrik enerjisi termal süreçlerin dışındaki üretim süreçleri için endüstriyel ölçekte kullanılmaktadır. Laboratuvar ölçekli döner fırınlar ve plazma ocakları ise ticari ürün olarak pazarda bulunabilmektedir. Bu alanda dünyada ve

Türkiye'deki teknoloji hazırlık seviyesi (THS) 3-4 arasındadır. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin kullanıldığı klinker üretim süreci ve kalsinasyona yönelik deneysel çalışmalar dünyada THS 5 seviyelerine ulaşmıştır [8].

Biyokütle ise alternatif yakıt olarak endüstride kullanılmaktadır. Özellikle Avrupa'da biyokütle tarımı için önemli yatırımlar yapılmaktadır. Bu alandaki teknoloji hazırlık seviyesi (THS) dünyada ve Türkiye'de 6-8 arasında olmakla birlikte ülkemizde yeterince yaygınlaşmamıştır. Dünyada elektrikli iş makineleri ve kamyonların sanayide kullanımı giderek artmaktadır. Bu nedenle THS'nin 8-9 arasında olduğu söylenebilir. Ülkemizde milli imkânlarla üretilen ticarileştirilmiş elektrikli kamyon bulunmamaktadır. Ancak benzer teknolojiye sahip TOGG otomobili örnek olarak alınacak olursa ülkemizin kısa zamanda hem çimento üretim süreçlerinde hem de beton santrallerindeki ihtiyacı karşılamak üzere 7-9 arasında bir THS'ye sahip olabileceği söylenebilir. Elektrikli iş makinesi kapsamında ise yalnızca "bobcat" olarak bilinen küçük kepçeler ülkemizde üretilmektedir. Ancak bu kepçelerin çimento ve beton sanayisine kayda değer bir kullanım alanı bulunmamaktadır. İş makineleri konusunda THS'nin 3-5 arasında olduğu söylenebilir.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

Coolbrook isimli Finlandiyalı firma Roto Dinamik Isıtıcı (RDH) teknolojisini kullanarak pilot ölçekli elektrikli döner fırını ticarileştirmeye hazırlandığını ve bazı uluslararası çimento fabrikalarıyla ürünün endüstriyel ölçekte uygulanabilmesi için Ar-Ge anlaşmaları imzaladıkları açıklandı.

Finlandiya'da teknik araştırma merkezi olarak bilinen VTT tarafından yönetilen Dekarbonat projesi kapsamında bir nakliye konteynerinin içine 8 m uzunluğunda bir pilot döner fırın inşa edilmiştir. Yaklaşık 25 kg/saat üretim kapasitesine sahip olan fırınla ilgili endüstriyel ölçeğe uyarlama ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır [9].

Alman çimento üreticisi HeidelbergCement'in İsveç'teki çimento fabrikası Cementa, 2019 yılında Slite tesisinde elektrikli çimento üretimi uygulamasına yönelik bir fizibilite çalışmasını tamamlamıştır. Bu çalışma kapsamında 2025'e kadar döner fırınlarda plazma ile ısı transferi yapılarak pilot ölçekte üretimin elektrikli hale dönüştürülmesi hedeflenmektedir [10].

Meksikalı çimento üreticisi Cemex, Synhelion ile birlikte yapmış olduğu çalışmada fosil yakıtlar yerine yüksek yoğunlaştırma oranına sahip ısı güneş kolektörü kullanarak klinker üretimini gerçekleştirmiştir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile ürettikleri yüksek yoğunluklu enerjiyi ısı aktarıcı gazı ısıtmak için kullanmışlar ve ısıtılmış gaz aracılığı ile klinker üretmişlerdir [11].

Heidelberg Grubunun İngiltere'deki Hanson UK'nin Lancashire'daki Ribblesdale tesisinde hidrojenin yakıt olarak kullanım denemesi gerçekleştirilmiştir. Bu projede İngiltere hükümeti fon sağlayıcısı olarak yer almıştır. Fırın sisteminin tamamı için hidrojenin yakıt olarak kullanılması

durumunda, kömür gibi fosil yakıtların kullanılmasına kıyasla, yalnızca Ribblesdale'de her yıl yaklaşık 180.000 ton CO₂ tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir [12].

Dünyada elektrikli iş makineleri üretimi konusunda Volvo ve Cat önemli bir yol kat etmiş ve makinelerini ticarileştirmiştir. Elektrikli kamyon konusunda ise 2025 yılına kadar Volvo, Tesla, Mercedes, Renault ve Ford araçlarını piyasa sürecektir [13].

D. Zaman ve Bütçe Tahminleri¹

Ar-Ge Konusu	Hedeflenen Süre	Tahmini Bütçe	THS
Elektrikli döner fırınların veya plazma ocaklarının laboratuvar ölçeğinde üretilmesi	Kısa Vade	3 Milyon TL	THS 4
Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinin çimento sektörüne entegrasyonu	Kısa Vade	3-5 Milyon TL	THS 4-5
Biyokütle ve yeşil hidrojen gibi yakıtların konvansiyonel fırınlarda yakıt olarak kullanılabilmesi için laboratuvar ölçekli nozul teknolojilerinin geliştirilmesi	Kısa Vade	2-3 Milyon TL	THS 4-5

¹ Genel piyasa koşullarına dayalı tahminlerdir. Döviz kuru 1€ =15.00 TL olarak hesaplanmıştır.

Kritik Ürün/Teknoloji 1.2.

Klinker ve çimento üretim proseslerinin verimliliğini artırarak karbon ayak izini azaltacak şekilde iyileştirilmelerine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

1.2.a. Atık ısı geri kazanım yerli sistemlerinin geliştirilmesi ve pilot gösterimlerin gerçekleştirilmesi

1.2.b. Klinker üretimi sonrasında çimento üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak şekilde otonom üretim ve/veya dijital dönüşüme yönelik çözümlerin geliştirilmesi

1.2.c. Klinker üretimi sonrasında çimento üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak daha verimli malzemelerin, ekipmanların, yöntemlerin ve süreçlerin geliştirilmesi

1.2.d Çimento üretimi süreçlerinde ekipman kaynaklı kinetik, ısı vb. enerjilerin yeniden kullanılmasına yönelik çözüm önerilerinin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Çimento sektöründe ocaklardan hammaddelerin çıkarılması ve fabrikada bulunan kırma ünitelerine kadar yapılan taşıma işlemleri esnasında mobil araçlar ve motorin gibi yakıtlar kullanılmaktadır. Kırma işlemi ile birlikte başlayan ve öğütme ile devam eden süreçte tüm taşıma ve operasyonel faaliyetlerde elektrik enerjisi kullanılmaktadır.

Kırma ünitelerine kadar olan operasyonlarda kullanılan motorin karbon emisyonu açısından oldukça yüksek değere sahiptir. Diğer taraftan fosil yakıt olması doğal kaynakların tüketimi açısından olumsuz etkiler olan bir yakıt türüdür.

Dizel yakıt, hammadde ocaklarındaki en önemli maliyet kalemi olduğu kadar önemli bir CO₂ emisyon kaynağıdır. Hammadde ocaklarında çalışan iş makinaları ortalama bir çimento fabrikası için üretim yaparken, bir yılda iki milyon litreden fazla dizel yakıt tüketmektedir. Bu çevresel etkinin yanı sıra akaryakıt ve bakım giderlerini azaltmak amacıyla mevcutta kullanılan akaryakıt tüketen araçların elektrifikasyonu çok önem taşımaktadır.

Çimento içeren beton, ağır basınç yüklerini taşıyabilmekte ve zorlu çevre koşullarına dayanabilmektedir. Bu özellikleri, betonun dünyada insan yapımı en yaygın kullanılan malzeme olmasına neden olmaktadır. Betona olan yüksek talep nedeniyle, 2020 yılında küresel olarak 4,3 Gton çimento üretildiği öngörülmektedir. Çimentonun üretimi için yoğun enerji kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır (bkz. Bölüm 1.1).

Çimento sektörü verimi ve kaliteyi en üst düzeye çıkarmaya çalışırken, emisyonları azaltarak operasyon maliyetlerini düşürmenin yollarını aramaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan bölgelerdeki çimento üretim şirketleri, üretim sürecinde iyileştirme eksikliği, manuel işleyle ilişkili yüksek maliyet ve yüksek zaman tüketimi çıktı süreci ile ilgili sorunlarla karşı karşıyadır. Bu nedenle, çeşitli yapay zekâ tabanlı yazılımlar, üreticilerin yüksek performanslı süreçlere olan ihtiyacı ele almasına yardımcı olur ve sürecin maksimum kullanılabilirliğini ve esnekliğini sunar [14]. Ayrıca, çimento sektöründe çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada hayati bir rol oynayabilir ve yalnızca emisyonları azaltma konusunda değil, aynı zamanda enerji optimizasyonu ve yönetimi konusunda da hayati bir rol oynayabilir [15].

BOYUT KÜÇÜLTME

Çimento üretiminde tüketilen toplam elektrik enerjisinin yaklaşık %50-60'ı kırma ve öğütme işlemlerine aittir. Bu nedenle, bu denli enerji yoğun birim işlemde en ufak iyileştirmenin getireceği ekonomik fayda bir o kadar önemli olacaktır. Boyut indirgeme işlemlerinde enerji verimliliğini arttırmanın farklı yolları bulunmaktadır. Uygun teknoloji seçimi ya da geliştirilmesi veya ek yatırımla yenilikçi teknoloji içeren devre tasarımının geliştirilmesi, üretim şemasının değiştirilmesi, halihazırdaki tesisin optimum çalışma şartlarının sağlanması, otomasyon süreçlerinin iyileştirilmesi bunlardan birkaçıdır.

Son yıllarda bilişim teknolojisi alanında yapılan atılımlar neticesinde daha hızlı veri işleyebilen bilgisayarlar geliştirilmiş ve yapay zekâ kullanımı ile süreç optimizasyonu konusu yaygınlaşmıştır. Bu bağlamda “makine öğrenmesi” ve “derin öğrenme” gibi kavramlar gelişmiş, artık insan öğretisi olmadan sensörlerden alınan ölçümlerin makinaya öğretilmesi sağlanmıştır. Makine öğrenmesi ve modelleme çalışmaları bir arada kullanılarak öğütme devrelerinin belirli değerler doğrultusunda otonom üretim yapması ve insan kaynaklı hataların önüne geçmesi ile, üretim hızının arttırılması mümkün olmaktadır. Artan üretim hızı, birim enerji tüketiminin azaltılmasını sağlamaktadır. Bu tür bir yaklaşım mineral/metal öğütme uygulamalarında son yıllarda daha da yaygınlaşmış olup çimento üretiminde uygulamasına rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu alanda yapılacak olan üniversite-sanayi çalışmaları sektörün neden olduğu karbon ayak izinin azaltılmasına katkıda bulunacaktır.

Yazılım gelişiminin ve otonom üretimin yanı sıra yenilikçi öğütme teknolojilerinin geliştirilmesi de bir diğer önemli unsurdur. Bu bağlamda son yıllarda üniversite-sanayi iş birliği ile yürütülen proje çalışmalarında geleneksel öğütme sistemi olan bilyalı değirmenlerin yerini alabilecek ya da beraber kullanıldığı zaman enerji tasarrufu sağlayabilecek alternatifler değerlendirilmiştir. Karıştırmalı değirmen teknolojisi bunlardan birisidir. Bu teknoloji minerallerin yaş ortamda öğütüldüğü bir sistemdir. Mineral uygulamalarında ince boylarda yapılan öğütme işleminde geleneksel bilyalı değirmenlere nazaran %30'a varan[3] enerji tasarrufu sağladığı saptanmıştır. Benzer yaklaşım çimento öğütme devrelerinin enerji tüketiminin azaltılmasında

da kullanılabilir. Bu noktada, “karıştırmalı değirmen” kullanan üretim şemasının geliştirilmesi ile çimento sektörü karbon ayak izi de azaltılmış olacaktır. Hâlihazırda bu teknolojiyi kullanan bir çimento uygulaması olmamakla birlikte kullanılması durumunda fayda sağlayacağı aşikârdır. Yürütülen bazı simülasyon çalışmalarında, çimento devresinde harcanan enerji miktarının %7-18 oranında azaltılabileceği raporlanmıştır [2].

ATIK ISI GERİ KAZANIMI (WASTE HEAT RECOVERY, WHR)

Başta çimento sektörü olmak üzere, demir-çelik ve cam sanayi gibi, ısıtmanın söz konusu olduğu proseslerde, genellikle üretilen ısının ancak belli bir bölümü, prosesin gerçekleşmesi için kullanılabilir. Kalan bölüm ise, değişik yollarla ve çoğunlukla da baca gazları vasıtasıyla atılmaktadır.

Çimento sektöründe fırın girişi öncesinde kademeli ön ısıtıcı kulelerden, fırın çıkışında da soğutma ünitesinden oluşan yeni nesil döner fırın sistemlerinde hem ön ısıtmadan hem de klinker soğutmadan baca yoluyla dışarıya atılan ısı elektriğe dönüştürülebilmektedir.

Klinker üretim sürecindeki yüksek ısıl prosesden kaynaklı gaz çıkış sıcaklığı, teknolojik yapılarına göre farklılaşmakla beraber ön ısıtıcı sonrasında 280°C–400°C arasında, klinker soğutma çıkışında da 300°C–350°C arasında değişen ve klinker üretim kapasitesine bağlı olarak artan debilerdeki atık sıcak gazlar, yüksek ısıl işlemdeki üretim sürecinde tekrar kullanılmadığından direkt olarak atmosfere atılmaktadır.

Basit bir yaklaşımla, çimento sektöründe ortalama 3000 ton/gün (4 kademeli ön ısıtıcılı ve ön-kalsinatörlü) klinker üretimine sahip bir klinker üretim hattından, kullanılan teknolojiye ve hammaddenin rutubetine bağlı olarak 3,0 ila 6,0 MW arasında bir elektrik enerjisi elde edebilmek mümkün olmaktadır. Fabrikaların enerji verimliliği şartlarına bağlı olarak, WHR ile elektrik üretimi 25 kWh/ton-klinker ile 45 kWh/ton-klinker arasındadır.

Bir çimento fabrikasının toplam elektrik ihtiyacının yaklaşık %25’ini karşılayabilen WHR tesisleri sayesinde satın alınan elektrik tüketimi azaltılmakta ve enerji üretiminde fosil yakıt kullanılmadığı için hem kaynaklar korunmakta hem de sera gazı emisyonları azaltılmaktadır.

KİNETİK ENERJİNİN KULLANIMI

Çimento fabrikalarında klinker ve çimento üretiminde farklı ekipmanlar ve makineler kullanılmaktadır. Bu ekipmanların kullanımının sırasında farklı kinetik hareketler bulunmaktadır; dönme veya kayar bantların tek yönlü hareketi gibi. Bununla birlikte kamyon, araba gibi motorlu taşıtlar tarafından kullanılan yollarda piezoelektrik sensörlerinin yollara yerleştirilmesi sayesinde buradaki hareket enerjisinden elektrik üretilmesi mümkündür. Bu sayede bu yolların kenarında bulunan sokak lambalarının elektriği üretilmiş olacaktır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

Çeşitli analiz ve optimizasyon teknikleri ile çimento devresi modellenmesinin yapılması ve otomasyon yazılımının geliştirilmesi

Bir çimento öğütme devresinde farklı mekanizmalara sahip ekipmanlar ve bu ekipmanların çalışma koşullarını ölçen, kontrol eden enstrümanlar/sensörler bulunmaktadır. Sistemi yürüten operatör, verilen talimatlar doğrultusunda, sensörlerden gelen veriler doğrultusunda devreyi kontrol eder ve bazı değişkenler ile oynamak sureti ile maksimum üretim hızını korur. Ancak şu da bilinmektedir ki insanın olduğu her noktada hata da olmaktadır. İnsan kaynaklı hataların en aza indirgenmesinin yolu da otonom üretimdir.

Otonom üretim ancak ve ancak uygun yazılımın gelişimi ile mümkün olabilmektedir. Bu noktada, devredeki ekipmanların farklı koşullardaki davranışlarının incelenerek model yapılarının geliştirilmesi, üretim hedefi doğrultusunda devrede farklılaştırılabilecek üretim değişkenlerinin tespiti, hangi değişkenlerin üretimde daha etkin olduklarının belirlenmesi gerekmektedir. Son yıllardaki teknolojik gelişmeler göstermiştir ki böyle bir yazılım için yapay zekâ teknikleri ve bu başlık altındaki “makine öğrenmesi” veya “derin öğrenme” teknikleri kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar aracılığı ile geliştirilen algoritmalar, doğrudan tesis verisini işleyerek öğrenmekte ve sonuç olarak değirmen gücünü, üretim inceliğini, değirmen doluluğunu belirtilen koşulları baz alarak tahmin edebilmektedir. Geliştirilen yazılım, yapılan tahmin ile üretim hedeflerini eşleştirecek prosese müdahale edilip edilmemesi gerektiğini tespit edilmekte ve bu doğrultuda oynamalar yapılabilmektedir. Amaç maksimum üretim hızını minimum üretim kazası ile sağlamaktır.

Klinker soğutma ve enerji geri kazanımı gibi çimento üretiminde kilit rol oynar. Klinker soğutma sistemleri, teknolojiye bağlı olarak çeşitli tiplerde olup ızgaralar (en yeni teknoloji), planet soğutucular (ıslak veya kuru uzun döner fırına bağlantı), şaftlar ve döner soğutuculardır [16]. Bu nedenle klinker soğutulması sırasındaki enerji geri kazanımını, performansını ve optimizasyon amaçlı bir tahmin modeli geliştirilmesi bir Ar-Ge konusu olarak araştırılması gerekmektedir.

Klinkerin öğütülebilirliğinde ve çimento performansında kimyasal ve mineralojik özellikler önemli rol oynamaktadır. Çimento proseslerinde öğütülebilirlik; çimentonun performansı, mineralojik ve kimyasal bileşiminin yanı sıra çimentonun inceliğine ve tane boyutu dağılımına bağlıdır [17]. Çimento endüstrilerinde, üretim prosesinde kullanılan elektrik enerjisinin %40'ı öğütmede harcanır [18]. Bu nedenle öğütme performansının optimizasyonu ve modellenmesi önemli bir Ar-Ge konusu olması gerekmektedir.

Bu teknik kullanılarak öğütme alanında geliştirilen bazı yazılımların üretim hızını arttırdığı ve enerji tüketimini azalttığı raporlanmıştır. Bu uygulamaların çoğu yaş, mineral öğütme alanında yapılmıştır. Buradan elde edilen bilgi birikiminin çimento endüstrine aktarılmasının sektörün gelişimi için önemli olacağı düşünülmektedir. Bu alanda yürütülecek Ar-Ge çalışmalarının özgün niteliğe sahip olacağı aşikardır.

Enerji verimli çimento öğütme teknolojisinin geliştirilmesi ve üretim şemasına entegre edilmesi

Son 10 yıllık teknolojik gelişim incelendiğinde (bilişim, yazılım ve veri işleme), değişim hızı adaptasyon sürecini negatif olarak etkileyici boyuttadır. Ancak yine de bu değişime hazır olmak ya da hazır olacak etmenlerin altyapısını kurmak bir gerekliliktir. Öğütme işleminde de bu gelişime istinaden farklı teknolojilerin kullanılması söz konusudur. Hangi uygulama için olursa olsun, öğütme işlemini kullanan bir proses bir diğeri için yol gösterici konumda yer alabilir. Örneğin, mineral ve metal öğütme uygulamaları bazı sorunlarını çözebilmek için farklı öğütme teknolojilerinden faydalanmıştır. Bunlardan bir tanesi “yatay karıştırmalı değirmen” teknolojisidir. Bu teknoloji yaş öğütücü olarak tasarlanmış ancak kuru öğütmedeki başarısı da laboratuvar ve pilot ölçekli testlerle kanıtlanmıştır. Bu teknoloji, bilyalı değirmenlerin yaptığı gibi öğütücü bilyayı belirli bir yüksekliğe kaldırmak yerine, içerisinde bulunan şaft yardımıyla değirmen haznesindeki boncukları yüksek hızda karıştırmakta ve malzeme ile çarpıtmaktadır. Böyle bir öğütme mekanizmasının da geleneksel bilyalı değirmenlere oranla daha enerji verimli olduğu bulunmuştur. Bu teknolojinin çimento üretim sürecinin farklı üretim şemalarında kullanılabileceği düşünülmektedir. Özellikle bilyalı değirmenden çıkan malzeme grubu içerisinde son ürün ya da son ürüne yakın tanelerin olduğu bilinmektedir. Enerji verimliliğini artırmak için buradaki malzeme grubunun öğütülmesi fayda sağlayabilecektir. Böyle bir şema, tüm devrenin enerji tüketimini azaltabilecektir. Bu tür bir araştırmanın pilot ölçekte başlayıp büyük ölçeğe aktarılması kritik öneme sahiptir.

Enerji değerinin yanı sıra ürün özelliklerindeki farklılık da göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla Ar-Ge kapsamında alınan ürünlerin, çimento ve beton dayanımlarındaki farklılıklarının da tespiti gerekmektedir. Üniversite ve sanayi ortaklığı ile yürütülecek böyle bir araştırma ile sorulara cevap vermek ve uygulanabilirliği tartışmak süreçten alınacak faydaların maksimize edilmesini sağlayacaktır.

WHR sistemleri şu an hali hazırda yakıtla klinker üretimi sırasında çıkan ısıların kullanılması ile elektrik üretilmesi üzerine tasarlanmış sistemlerdir. Dünyada ve Türkiye’de çimento fabrikaları tarafından kullanılmaktadırlar. Fakat klinker üretim süreçlerinde konvansiyonel yakıtların kullanımı yerine yenilikçi sistemlerin kullanılması ile ısı miktarında veya sıcaklıklarda değişiklikler olması durumunun göz önüne alınarak yeni dönüşüm sistemlerinin tasarlanması ile ısının yeniden kullanılması söz konusu olabilecektir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

THS		Teknoloji Konusu
Dünya	Türkiye	
7	7	Yerli üretim motorların kullanılacağı elektrikli kamyon projesi
7	7	Yeni nesil enerji verimli değirmenler kullanımı
9	9	Türbin teknolojisinin yerli olarak üretilmesi

3	-	Piezoelektrik sensör kullanımı ile otoyollardan elektrik üretimi
1	1	Plazma, mikrodalga gibi üretim tekniklerinin geliştirilmesi neticesinde oluşan atık ısıların kullanılması için çalışmaların yapılması

Dünya genelinde iş makinelerinin ve araçların elektrikli sistemlere dönüşümü oldukça hız kazanmıştır. Ülkemizde bulunan yerli ve yabancı teknoloji firmaları bu konuda birçok proje geliştirmiş ve altyapı olarak hazır duruma gelmiştir.

Öğütme teknolojileri açısından baktığımız zaman çimento sektöründe olmasa da farklı uygulamada kullanılmaktadır bu bakımdan teknoloji hazırlık seviyeleri TRL 7-9 arasında değerlendirilebilir (neredeyse hazır” ya da “teknolojik olarak uygulanabilir”).

WHR sistemleri için baktığımız zaman TRL 9 seviyesinde yer almaktadır. Ancak verimlilik ve geri çevrim sistemlerinin araştırılması gerekmektedir. Ayrıca WHR sistemlerinin türbin teknolojileri yerli teknoloji ile üretilmesi için de çalışmaların yapılması önem arz etmektedir.

Piezoelektrik sensörlerin yollara serilmesi ile araç hareketlerinden faydalanarak elektrik üretilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Yakıt yerine yeni üretim tekniklerinin kullanılması durumunda oluşacak ısının mevcut atık ısı sistemleri ile kullanılamaması durumunda yeni tip atık ısı sistemlerinin araştırmaları gerekecektir.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

Elektrikli araç dönüşüm projelerine en önemli örnek Nuh Çimento tarafından gerçekleştirilen projede karşımıza çıkmıştır. İki aşamalı olarak lansmanı yapılan projede ömrünü tamamlamış 30 yıllık iş makinesi ve kamyonların tekrar ekonomiye kazandırılarak bir 30 yıl daha ömrünü uzatması açısından döngüsel ekonomi çalışmalarına katkı sağlanmıştır. Bu katkının dışında karbon katsayısı yüksek olan motorlardan vazgeçilerek karbon katsayısı düşük olan elektrik kaynağına yönelinmiştir.

Başarılı ülke örnekleri açısından Nuh Çimentonun iki projesini değerlendirebiliriz.

1-İş Makinelerinde Elektrifikasyon Projesi

İki yıl süren mühendislik çalışmaları sonucunda biri 2018, ikisi 2019 ve ikisi 2020, dördü 2021, biri 2022 yılında olmak üzere marn ve kalker ocaklarında yüklemde çalışan 10 adet iş makinesinin elektrikliye çevrilmesi çalışmalarını tamamlanmıştır. Araçların emisyon salım oranları %24 ile %48 oranında azalmış olup 2020 yılında elektrikli makineler sayesinde 531 ton, 2021 yılında da 679 ton CO₂'in atmosfere salınması engellenmiştir.

Proje başlangıcındaki hedefler;

- Hammadde ocaklarında çalışan tüm iş makinelerinde dizel yakıt tüketimini tamamen ortadan kaldırmak

- Yıllardır süregelen ocak işletme alışkanlıklarını değiştirmeden elektrikli dönüşüm projesini gerçekleştirmek

Dönüşümü tamamlanan standart bir elektrikli iş makinesi üzerinde yer alan ekipmanlar; dizel motor yerine tahriki sağlayan ihtiyaç duyulan güç ve gerilim seviyelerinde bir elektrik motoru, altyapıdan gelen yüksek gerilimi makine üzerinde düşürmede yardımcı belirlenen güç ve gerilim seviyelerinde transformatör, transformatörün korumasını sağlayan belirlenen akım değerlerine sahip yüksek gerilim sigortaları, makinenin kule dönüşünü yapmasına olanak sağlayarak elektrik iletimine izin veren yüksek gerilim bilezikler ve bunlara bağlı ekipmanlar, makine üzerine gelen kabloyu toplamada kolaylık sağlayan kablo tamburu ve tamburun dönmesine izin vererek elektrik iletimini sağlayan bilezikler, bunlara bağlı ekipmanlar ve bu ekipmanların yönetimini sağlayan elektrik panosudur.

Dönüşümü tamamlanan elektrikli iş makinesinin, aynı marka model dizel iş makinesi ile performans ölçümleri yapılmış ve bunun sonucunda yükleme, boşaltma, yürüyüş gibi hızlarının aynı olduğu belirlenmiştir. Dönüşüm sonucunda hiçbir kayıp yaşanmamıştır.

2-“E-Dump Truck Retrofit” Projesi

2020 yılından itibaren hazırlık aşamasında olan projede, 2022 yılında imzalanan sözleşme ile birlikte Ocak ayı itibari ile mühendislik çalışmalarına başlanmıştır. Proje kapsamında maden ocak sahalarında dizel olarak kullanılan 8 adet “Euclid”, 2 adet “Hitachi” marka olmak üzere toplamda 10 adet 85-100 ton arası kaya kamyonlarının tamamını dizelden, bataryalı elektrikli araçlara dönüştürüp 2030 yılına kadar karbon emisyonunu işletmemizde sıfırlayarak hava kirliliğinin önüne geçmek öncelikli hedefimizdir. Bu hedef doğrultusunda ABB Türkiye ve Global ekibi ile teknik görüşmeler devam etmekte olup proje kapsamında ilk prototip aracın 2023 yılı ortalarında tamamlanıp sahada aktif hale gelmesi amaçlanmaktadır.

Dünyada ilk defa yapılan bir proje olması sebebi ile hem ülkemizde hem de uluslararası çevrelerde yakından takip edilen bir proje olmakla birlikte, ülkemiz açısından da bu projeye ev sahipliği ve önderlik yapan firmanın Türk firması olması büyük önem taşımaktadır. Bu bilinç ve vizyonla başlattığımız projenin sonucunda Nuh Çimento sıfır karbon hedefi doğrultusunda 10 adet bataryalı kaya kamyonu kazanmış olacaktır. Ancak projeyi beraber yürüten ve projeye katkı sağlayan paydaşlar denenmiş ve onaylanmış kaya kamyonlarından seri üretime geçebilecek ve şirketlerine büyük oranda kar ve katkı sağlayabileceklerdir.

Proje başlangıcındaki hedefler;

- Elektrikli damperi boş kamyonun, dizel halinde olduğu gibi boşaltma yerinden yükleme yerine kadar parkuru aynı sürede tamamlayabilmesi
- Elektrikli damperi dolu kamyonun, dizel halinde olduğu gibi yükleme yerinden boşaltma yerine kadar rejeneratif frenleme kullanarak parkuru aynı sürede tamamlayabilmesi,
- Şanzıman çıkartılarak yapılacak dönüşümde aynı performansı sergileyebilmek,

- Tüm kaya kamyonlarının elektrikliye dönüşümünü tamamlayarak ocak sahamızda sıfır karbon hedefine ulaşmak

Dönüşümü tamamlanan standart bir bataryalı kaya kamyonu üzerinde yer alan ekipmanlar; çıkartılan dizel motor ve şanzıman yerine ana tahriki sağlayan elektrik motoru, batarya sistemi, batarya yönetim sistemi, batarya soğutma sistemi, ana dönüştürücü, dönüştürücü soğutma sistemi, bağlantı kutusu, motor blower, hava kanalları ve hava filtresi, yağ pompası, yağ tankı, hidrolik pompa ve motorudur. Bunlara ek sistem alt yapısında batarya için hem AC şarj hem de DC hızlı şarj ünitesi kurulacaktır.

Mineral öğütmede kuru olarak çalıştırılan “yatay karıştırmalı değirmen” teknolojisi Fransa’da kalsit öğütme işleminde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu uygulamada en üst boyu 10µm olan ürün eldesi mümkün olmuştur. Bu uygulamanın geleneksel bilyalı değirmenin yerine seçilmesi anlamında önemlidir. Harcanan enerji değerine gizlilik maddesi gereği ulaşılamamaktadır.

Fransa’da başarılı uygulamanın ardından, Türkiye’de bulunan bir tesiste de yatay karıştırmalı değirmen işletilmeye başlanmıştır. Henüz 2022 yılında başlatılan operasyona dair veriler yine gizlilik gereği elde edilememektedir. Türkiye’de bulunan tesislerin genelde bilyalı değirmen kullandıkları ve son ürüne bağlı olarak 10 µm, 6 µm mertebesine öğütme yapmaları teknolojinin geleneksel sistemlere göre üstün olduğunun bir kanıtıdır.

Türkiye’de 2007-2013 yılları arasında yürütülen tez çalışmasında pilot ölçekte yatay karıştırmalı değirmen teknolojisi geliştirilmiş ve büyük ölçeğe hazır hale gelmiştir. Teknolojik hazırlık anlamında son aşama olan nihai uygulamaya hazır olduğunu belirtmek gerekir. Bu yönde yapılacak bir atılım endüstriye fayda getirecektir.

Yapay zekâ alanında da son yıllarda tesis uygulamalarının ve faydalarının arttığı örneklere rastlamak mümkündür. Özellikle yurtdışında sadece bu konuya odaklanan ve kontrol mekanizması içerisine dahil edecekleri sensörleri/ölçüm ekipmanlarını da geliştiren firmaların sayısı günden güne artmaktadır. Bu firmaların en büyük avantajı sanayi destekli olmaları ve gerçek verileri kullanarak derin öğrenme metodunu geliştirmeleridir. Bu noktada otonom üretim sağlayan öğütme devreleri yazılımları geliştirmekte ve üretimde harcanan elektrik enerjisi maliyetlerini düşürmektedirler. Mevcut teknikler incelendiğinde, BNN (birim numuneler/numune) ve RF (radyofrekans) yöntemlerinin sıklıkla kullanıldığı, modelleme işleminin yapıldığı ve kontrol stratejisinin bu bağlamda geliştirilerek enerji tüketiminin azaltılabildiği saptanmıştır. Teknolojik düzeyi Çimento Öğütme Devrelerine uygulanabilir durumdadır. Bu konuda Ar-Ge yapılması ve teknoloji transferinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

WHR sistemleri ile atık ısıdan elektrik üretilmesi hem Dünyada hem de Türkiye’de yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye’de WHR yatırımı yapan çimento fabrikası sayısı her geçen gün

artmaktadır. 2022 yılı itibari ile 16 fabrikada 25 hat ile toplam 141MW gücündedir. Bu rakam yaklaşık 570.000 hanenin günlük elektrik tüketimine karşılık gelmektedir. Özellikle Çin ve Japonya WHR teknolojisi olarak bu konuda başı çekmektedir. Türkiye’de kurulmuş olan teknolojilerin büyük kısmı bugün ülke imkanlarıyla yerli firmalar tarafından yapılabilmektedir. Bu konuda türbin teknolojileri henüz milli kaynaklarla yürütülemezse de özellikle kazan ve soğutma sistemleri tamamen yerli teknolojiler ile geliştirilebilir durumdadır. Bu konuda çok ciddi yerli firma yatırımları mevcuttur.

D. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

Arge Konusu	Hedeflenen Süre	Tahmini Bütçe	THS
Fosil yakıt kullanan araçların elektrikli motorlar ile değiştirilmesi (1 adet 30 yaşında 110 ton kapasiteli kamyon dönüşümü baz alınmıştır)	Orta Vade	1 Milyon Euro	THS 7
Yapay zekâ ile otonom üretim yapan çimento öğütme devresi altyapısının geliştirilmesi	Kısa Vade	250 bin USD	THS 7
Yeni değirmen teknolojisinin prototip üretimi	Kısa Vade	250 bin USD	THS 7
Yeni klinker üretim tekniklerinden çıkan atık ısının kullanılması	Kısa Vade	250 bin USD	THS 6-7
Kinetik hareketlerin enerji üretiminde kullanılması	Uzun Vade	500 bin USD	THS 6-7

E. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Bir Araya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

Türkiye’de iç piyasaya arz edilen çimentonun %45,7’si hazır beton sektörü, %36,7’si bayiler, %4,2’si müteahhitler, %3,7’si inşaat şirketleri, %3,7 prefabrik sektörü, %0,8’i kamu ve %5,3’ü diğer kullanıcılar tarafından kullanılmaktadır. Bu hususta çimento üreticileri, TÜBİTAK, akademisyenler ve çimento kullanan sektörler çeşitli teorik ve uygulamalı etkinlikler düzenlenerek bir araya getirilmelidir. Bu etkinliklerde alternatif çimento türlerinin performansı ile ilgili bilgilendirmenin yanı sıra çevresel etkiyle ilgili avantajları da paylaşılmalıdır. Hedeflenen teknolojik ilerlemelerin sağlanabilmesi adına klinker üretimi ve çimento üretimi için mevcut kırma, öğütme, taşıma, yüksek basınçlı hava ve benzeri ekipmanların enerji verimliliğinin artırılması ve/veya enerji verimli yeni ekipmanların tasarlanması, geliştirilmesi, modellenmesi, simülasyonu ve uygulama süreçlerinin optimizasyonu, yenilenebilir enerji sistemlerinin söz konusu proseslere entegrasyonu, kırma-küçültme-öğütme, kinetik enerjilerin kullanılması, karbon yakalama ve depolama tekniklerinin klinker-çimento üretimi ve beton kürelemede kullanılması, atık enerjinin kullanımı ve enerji optimizasyonu alanlarında uzman akademisyenlerin ve sektörün ilgili bileşenlerinde uzman mühendislerin koordinatörlüğünde kimya mühendisliği, malzeme ve metalurji mühendisliği, makine mühendisliği, maden mühendisliği, enerji mühendisliği, çevre mühendisliği, jeoloji mühendisliği, bilgisayar mühendisliği, inşaat mühendisliği, maden kaynakları ve uygulamalı mineraloji, malzeme

karakterizasyonu, atık yönetimi, beton teknolojileri, yapı kimyasalları, enerji sistemleri, atık yönetimi, kimyasal termodinamik, kimyasal prosesler gibi disiplinlerde uzman akademisyen ve mühendislerin bilgi birikimine dayalı projelerin yürütülmesi esastır. Bu noktada üniversiteler, araştırma enstitüleri, sektör firmaları ortak paydada buluşturulmalı ve endüstriyel paylaşım kurabilmek ve döngüsel ekonomiyi disiplinler arasına yayabilmek adına çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

F. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İş birliği Modeli ve Destek Mekanizması

Söz konusu teknolojilerin gerçekleştirilmesi noktasında teknolojinin Ar-Ge safhasından endüstriyel ölçekli üretimine kadar uzanan sürecin teknoloji hedefleri ve endüstriyel potansiyeli göz önünde bulundurularak tasniflenmesi önem arz etmektedir. Bu nokta ortaya konacak proje çalışmalarının ölçek odaklı aşamalandırılması, sağlanacak desteklerin bu ölçeklere göre düzenlenmesi, her bir ölçek için düşünülen proje çalışmalarının bulunduğu ölçekte hedeflenen ve mümkün olan seviyede teknolojik ürünü ortaya koyması zorunlu kılınmalıdır. Proje çalışmaları yalnızca bulunduğu ölçeği ve bu ölçeğin gerekliliklerini yerine getirmekle kalmayacak, aynı zamanda ölçeği bir üst seviyeye taşıyacak yeni proje çalışmalarının öngörülebilir ve gerçekçi bir projeksiyonunu ortaya koymalıdır.

Öte yandan söz konusu teknoloji için yürütülecek proje çalışmalarının çok farklı disiplinleri tek potada eritecek ve endüstriyel paylaşımların kurulmasını mümkün kılacak bir yapıda kurulması önem arz etmektedir. Klinker üretimi ve yenilenebilir enerji sistemleri üzerine odaklanacak projelerin kırıcı ve öğütücü sistemleri, yanma teknolojileri, enerji yönetimi, biyokütle, yeşil hidrojen, dizelden elektriğe dönüşüm konularına odaklanan farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi faydalı olacaktır. Mevcut kırma, öğütme, taşıma, yüksek basınçlı hava ve benzeri ekipmanların enerji verimliliğinin artırılması ve/veya enerji verimli yeni ekipmanların tasarlanması, geliştirilmesi, modellenmesi, simülasyonu ve uygulama süreçlerinin optimizasyonu, kırma-küçültme-öğütme ve kinetik enerjilerin kullanılması üzerine odaklanacak projelerin ise kırıcı ve öğütücü sistemleri, enerji yönetimi, dizelden elektriğe dönüşüm konularına odaklanan farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılarla yönetilmesi gerekmektedir.

Otonom üretimi, yapay zekâ kullanımı konularında klinker üretiminde önemli bilgi ve know-how seviyesinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu aşamada sektörde bu bilgi ve tecrübenin en hızlı ve yaygın bir şekilde kullanımı ve transferine yönelik paylaşım çalışmaları önem arz etmektedir. Özellikle yurt dışında geliştirilen yeni teknoloji ve yaklaşımların en hızlı şekilde yerel üretim tesislerinde uygulamaya geçmesi için bilgi aktarım mekanizmalarının oluşturulması gerekmektedir. Benzer paylaşımlı ilişkinin yapı malzemeleri, yapı kimyasalları,

kimyasal termodinamik, uygulamalı mineraloji gibi farklı disiplinler için kurulacak bir ortak çalışma platformu ile kurulması gerekmektedir.

Karbon yakalama, kullanım ve depolama üzerine odaklanacak projelerin ise yapı malzemeleri, yapı kimyasalları, kimyasal termodinamik, uygulamalı mineraloji gibi farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi faydalı olacaktır. Aynı zamanda farklı endüstrilerin de olası endüstriyel paylaşım fırsatlarını değerlendirebileceği ve geliştirebileceği ve farklı ölçeklerde proje iş birlikleri kurabileceği bir yapının oluşturulması gerekmektedir.

Üniversitelerde gerçekleştirilen yüksek lisans/doktora çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve Üniversite-Sanayi iş birliği destekleri arttırılmalıdır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önem arz edecektir. Uluslararası iş birlikleri ile önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Ayrıca, üniversitelerin İnşaat, Kimya, Jeoloji ve Maden Mühendislikleri bölümlerinde, konuyla ilgili dersler veren akademisyenlerin ders kapsamlarına çevre dostu katkılı çimentolarla ilgili bölümleri eklemesi, geleceğin mühendislerinin bugünün ve yarının anlayışı olan sıfır atık anlayışıyla yetişmesi açısından faydalı olacaktır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önem arz edecektir. Uluslararası iş birlikleri ile önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır. Destek mekanizmaları kapsamında proje desteklerinde ek destekler sağlanması, gerekse projelerin gerçek ölçekli olmasına yönelik, başarılı sonuçların ortaya konulduğu noktalarda sağlanacak ve devam projelerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılacak bir teşvik mekanizmasının oluşturulması faydalı olacaktır. Farkındalığı en yüksek oranda arttırmak için uygulamalı etkinlikler önem arz etmektedir. Uygulama ve etkinlik konseptlerini belirlemek üzere çimento endüstrisinde faaliyet gösteren Ar-Ge Merkezleri ve akademisyenler ile iş birliklerin kurulması faydalı olacaktır. Uygulamalı etkinlikler çimento fabrikaları bünyesinde önceden belirlenecek bölgelerde gerçekleştirilmesi yararlı bir yaklaşım olacaktır.

Destek mekanizmaları özelinde döngüsel ekonomi için artık bir zorunluluk olarak görülebilecek CCUS ve endüstriyel paylaşım kavramlarının gerek proje desteklerinde ek destekler sağlanması, gerekse projelerin ölçek büyütme potansiyellerine yönelik, başarılı sonuçların ortaya konulduğu noktalarda sağlanacak ve devam projelerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılacak bir teşvik mekanizmasının oluşturulması faydalı olacaktır. Bu noktada projeler için THS odaklı bir ek teşvik mekanizması oluşturularak proje boyunca veya proje sonrasında atlanacak her bir THS için ek teşvik sağlanması, nihai ürün niteliğinin yükseltilmesi noktasında yararlı bir yaklaşım olacaktır. Özel sektördeki kullanım için broşürler, videolar, eğitimler hazırlanmalı, çatı

kuruluşlar ve odalar vasıtasıyla özellikler bayiler, müteahhitler, inşaat şirketleri prefabrik sektörü ve akademisyenlerle iletişim kurularak sektörel bilinç artırılmalıdır. Çimentonun en büyük tüketicisi olan hazır beton tesislerinde alternatif çimento türlerinin kullanımını arttırmaya yönelik teşvik mekanizmaları kurulmalıdır.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Hedeflenen teknolojinin mümkün kılınması noktasında en önemli hususlardan biri kamunun mevzuat düzenlemeleri ile izleme, engelleme, teşvik etme olgularını sağlam bir zemine oturabilmesidir. Döngüsel ekonomiye geçişte en önemli faktör olan net sıfır karbon hedefleri doğrultusunda klinker ve çimento üretiminde yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu ve yaygınlaşması, farklı çimento türlerinin, çimento yerine kullanılacak malzeme teknolojilerinin ve kimyasal katkıların geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına mevcut mevzuatlarda söz konusu sistemlerin endüstriyel paylaşımlar çerçevesinde geliştirilmesini mümkün kılacak revizyonlar gerçekleştirilmelidir. Ayrıca karbon yakalama teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına atık yakımı ve inşaat ve yıkıntı atıklarının depolanması noktasında mevcut mevzuatlarda geri dönüşümü ve bu dönüşümü endüstriyel paylaşımlar çerçevesinde sağlamayı mümkün kılacak revizyonlar gerçekleştirilmelidir. Farklı çimento türlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına mevcut mevzuatların geri dönüşümü ve bu dönüşümü endüstriyel paylaşımlar çerçevesinde sağlamayı mümkün kılacak şekilde iyileştirilmesi ve teşviklerin verilmesi gerçekleştirilmelidir.

Dikkate alınması gereken bir diğer önemli husus ise ulusal karbon emisyon ticaret sisteminin kurularak proseslerde yapılacak olan iyileştirmelerden elde edilecek faydaların (karbon azaltımı) karbon kredilendirme süreci ile ödüllendirilerek teşvik edilmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda kamunun mevzuat düzenlemeleri ile izleme, engelleme, teşvik etme olgularını sağlam bir zemine oturması kaçınılmazdır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevcut mevzuatlar teknolojik ilerlemelerin sağlanması noktasında herhangi bir engel teşkil etmemesine rağmen yasal zorunluluklar ve teşvikler yoluyla gelişmelerin sağlanması noktasında revizyonlara ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada sınırda karbon ticareti esaslarının dikkate alınması, döngüsel ekonominin teşvik edilmesi, atıkların takibi ve geri dönüşümünün mümkün kılması, yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması ve endüstriyel paylaşımların kurulması ile ilgili düzenlemelerin ivedi bir biçimde mevzuatlarda yer alması ve ekonomik teşvik mekanizmalarının devreye sokulması gerekmektedir. Atık mevzuatının düzenli depolamayı kısıtlaması ve kontrollü atık toplama, arıtma ve alternatif yakıt üretiminin önünü daha fazla açacak şekilde düzenlenmesi halinde, fosil yakıtların alternatif yakıtlarla daha yüksek ikame oranları kolaylaştırılacaktır. Karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik alternatif çimento türlerinin kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik öncelikli faaliyet devlet

kurumlarının finanse ettiği veya yürüttüğü projelerin şartnamelerinde CEM I veya Portland çimento ifadelerinin kaldırılarak, erken dayanım, nihai dayanım ve priz süresi gibi performans tabanlı spesifikasyonları dikkate alınarak güncellenmesi kritik önem taşımaktadır.

Teknik Altyapılar

Teknik altyapı noktasında her ne kadar Ar-Ge çalışmaları gerçekleştiren kamu ve özel kuruluşların yanı sıra üniversitelerde laboratuvar ölçeğinde çalışmalar sürdürülse de teknolojilerin endüstriyellemesi adına yatırım ve destekler doğrultusunda THS'lerin yükseltilmesi hayati derecede önem arz etmektedir. Mevcut durumda önemli oranda teknik alt yapı ve tecrübe birikimi bulunmaktadır. Bu tecrübelerin, inovatif gelişmelerin ve know-how'un en hızlı şekilde ülkemize transferi için alt yapının oluşturulması önemlidir.

İnsan Kaynakları

Hedeflenen teknolojinin mümkün kılınması amacıyla Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirmek adına üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağının olduğu düşünülmektedir. Öte yandan söz konusu tekniklerin bilimin kolektif yapısı altında yurtdışında bulunan üniversiteler ve araştırma enstitüleri ile kurulacak iş birlikleri ile hızlı ve efektif bir biçimde geliştirilmesinin sağlanması büyük bir katkı sağlayacaktır.

Destek ve Teşvikler

Hedeflenen teknolojiler için küçük ölçekte Ar-Ge çalışmaları ile başlayıp endüstriyel ölçekli projelere dönüştürülmesi noktasında en önemli husus üniversite-sanayi iş birliklerinin kurulacağı proje çalışmalarının gerçekleştirilmesidir. Bu noktada destek sağlayıcı kuruluşların bilimsel gelişmeyi daha hızlı bir biçimde elde etmeyi mümkün kılacak destek ve teşvik mekanizmaları ortaya koymaları, patent desteklerini arttırmaları, katma değeri yüksek ürünlerin pazara sürülmesinde teşvik mekanizmalarını sıklaştırmaları önem arz etmektedir. Devlet destekli veya teşvikli akademi – sanayi iş birliklerinin kurulması, farkındalık, eğitim ve uygulama etkinliklerinin bu iş birlikleriyle planlanarak yürütülmesi, konuyla ilgili hızlı harekete geçilmesi ve ülke çapında uygulama yaygınlığının artırılması için büyük önem arz etmektedir.

Diğer

Çimento fabrikalarında enerji tüketiminin büyük çoğunluğu termal süreçlerde gerçekleşmektedir. Termal süreçlerin elektrikli sistemlerle yürütüldüğü bir gelecekte, bir çimento fabrikasının ihtiyaç duyacağı elektrik enerjisi ihtiyacı konvansiyonel fabrikalardan daha yüksek olacaktır. Bu elektrik enerjisi ihtiyacı potansiyel olarak yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanabilse dahi, 24 saat üretim gerçekleştiren çimento fabrikalarının, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi yıl boyunca 24 saat kesintisiz enerji üretemeyen santrallerden beslenebilmesi için enerji depolama sistemlerine duyacağı ihtiyaç kaçınılmazdır. Günümüz pil

teknolojilerinin, ağır sanayilerin enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz olduğu; yakın gelecekte de bu ihtiyacı karşılayamayacağı öngörülmektedir. Pillerde gerekli kapasite artışı teknolojik olarak sağlansa bile, mevcut rezerv verilerine göre bütün dünyada bu sistemleri hayata geçirebilecek yeterli miktarda lityum rezervi bulunmamaktadır.

İfade edilen nedenlerle ağır sanayilerin kesintisiz enerji ihtiyacını karşılamak için temiz enerji sınıfında değerlendirilen nükleer enerji konusunda yatırımlar yapılmalıdır. Dünyada 80 yıldır elektrik üretiminde kullanılmakta olan nükleer enerji (filyon) teknolojisi konusunda ülkemizi doğrudan ilgilendiren kritik gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmeler enerji üretim verimliliği düşük ve kirliliği yüksek olan uranyumun yerine daha verimli ve uranyuma göre çok daha az atık ortaya çıkmasına neden olan toryumun kullanımına yöneliktir. Türkiye dünyadaki toplam uranyum rezervinin %0,2'sine sahipken, toplam toryum rezervinin %5,9'una sahiptir. Bu açıdan Türkiye'nin enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kurulacak yenilenebilir enerji tesislerinin, orta ve uzun vadede toryum yakıtlı nükleer santraller ile desteklenmesi önem arz etmektedir [19].

Nükleer enerjiden elektrik üretimi konusunda çok daha yüksek verimlilikle çalışan ancak henüz teknolojik seviyesi laboratuvar aşamasında olan, geleceğin temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olma konusundaki en kuvvetli aday olan füzyon enerjisini göz ardı etmemek gerekir. Bu teknoloji üzerinde Çin ve ABD son yıllarda önemli aşamalar kaydetmiştir [20]. Henüz yeni sayılabilecek füzyon reaktörü teknolojilerinin araştırılması, bu alanda projelerin geliştirilmesi ve yatırımların yapılması, gelecekte ülkemizin enerji ihtiyacının oldukça önemli bir kısmının karşılanmasına ve bu enerjinin karbon nötr olarak elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

Birinci Bölüm Kaynakları

[1] “World Bank; IFC. 2020. Strengthening Sustainability in the Cement Industry. World Bank, Washington, DC. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/37140>
License: CC BY 3.0 IGO.”

[2] Altun, O. Benzer, H., Karahan, E, Zencirci, S., Toprak, A., 2020. The impacts of dry stirred milling application on quality and production rate of the cement grinding circuits, *Minerals Engineering* 155, 106478

[3] Shi, F., Morrison, R., Cervellin, A., Burns, F., Musa, F., 2009. Comparison of energy efficiency between ball mills and stirred mills in coarse grinding, *Minerals Engineering* 22, 673-680

[4] 1 Xu G, et all. (2003), Design and Construction of Insulation Configuration for Ultra-High-Temperature Microwave Processing of Ceramics, *Journal of the American Ceramic Society* 86.

[5] Türkçimento (2022), Çimento ve Yeni Nesil Enerji Kaynakları, https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/%C3%87imento_ve_Yeni_Nesil_Enerji_Kaynaklar.pdf

[6] <https://www.solarpaces.org/cemex-and-synhelion-ace-first-hot-solar-cement-trial/>

[7] Tsiliogiannis A., Tsiliyanni C., 2019. Renewable energy in cement manufacturing: A quantitative assessment of energy and environmental efficiency of food residue biofuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, Pages 568-586

[8] Oliveira, F. C., Fernandes, J. C., Galindo, J., Rodríguez, J., Canadas, I., Vermelhudo, V., ... & Rosa, L. G. (2019). Portland cement clinker production using concentrated solar energy—A proof-of-concept approach. *Solar Energy*, 183, 677-688.

[9] <https://www.decarbonate.fi/>

[10] Wilhelmsson, B., Kollberg, C., Larsson, J., Eriksson, J., & Eriksson, M. (2018). CemZero—A feasibility study evaluating ways to reach sustainable cement production via the use of electricity. *Vattenfall Cem.*

[11] Uratani, J. M., & Griffiths, S. (2023). A forward looking perspective on the cement and concrete industry: Implications of growth and development in the Global South. *Energy Research & Social Science*, 97, 102972.

[12] <https://www.ineoshydrogen.com/applications-of-hydrogen/hydrogen-heroes/hanson-uk>

[13] Statista (2022), Projections for the electric truck market volume worldwide between 2018 and 2026, <https://www.statista.com/statistics/1273761/electric-truck-worldwide-market-forecast/>

[14] “Global Artificial Intelligence in Cement Production Market,” accessed: November 9, 2022, <https://www.globalmarketestimates.com/market-report/global-artificial-intelligence-in-cement-production-market-3301>.

[15] “Q&A- AI in the Cement Industry - Cement industry solutions | ABB,” accessed: November 9, 2022, <https://new.abb.com/cement/abb-in-cement/q-a-ai-in-the-cement-industry>.

[16] Anthony I. Okoji et al., “Evaluating the thermodynamic efficiency of the cement grate clinker cooler process using artificial neural networks and ANFIS,” *Ain Shams Engineering Journal* 13/5 (September 1, 2022): 101704.

[17] G. Young, Mei Yang, “Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings,” *Construction and Building Materials* 197 (February 10, 2019): 152–156.

[18] “Klinker Nedir? Klinker Fazları ve Öğütme Parametreleri,” accessed: November 9, 2022, <https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/klinker-nedir-klinker-fazlari-ve-ogutme-parametreleri-arasindaki-iliski>.

[19] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Uranyum-Toryum.pdf>

[20] <https://www.scientificamerican.com/article/u-s-project-reaches-major-milestone-toward-practical-fusion-power>

Kritik Ürün/Teknoloji 2.1.

Klinker üretim süreçlerinin iklim etkilerini en aza indirecek ve verimliliklerini artıracak iyileştirmelere yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

2.1.a. Klinker üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak şekilde otonom üretim ve/veya dijital dönüşüme yönelik çözümlerin geliştirilmesi

2.1.b. Klinker üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak daha verimli malzemelerin, ekipmanların, yöntemlerin ve süreçlerin geliştirilmesi

2.1.c. Alternatif yakıt kullanım oranlarının artırılması amacıyla sistemde gerekli iyileştirmelerin gerçekleştirilmesi

2.1.d. Enerji tasarrufu sağlanması amacıyla klinker üretiminde pişme sıcaklığını düşürücü hammaddelerin ve yardımcı malzemelerin kullanılması ve doğru uygulamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve Sınırdaki Karbon vergisi kapsamında enerji yoğun sektörlerin başında gelen çimentoda Türk firmaları uyum sağlamak için yeşil yatırımları devreye alması zorunlu hale gelmiştir. Entegre online takip ve optimize yakıt yönetimi klinker üretimi performansını artırıcı potansiyele sahiptir. Klinker üretimi oldukça fazla enerji tüketimi gerektiren bir işlem olup, temel ve alternatif yakıtların karışımı hem çevre hem de proses maliyetleri üzerinde etkilidir. Proses içinde enerji maliyetlerinin toplamı, değişken maliyetlerin %65-85'ini oluşturabilir. Enerji çıkışını azaltmak için alternatif yakıt oranlarının artırılması ile alternatif yakıtlar kullanılarak yardımcı yanma noktaları oluşturulabilir.

Çimento sektöründe alternatif yakıtlar güçlü bir potansiyel olmasına rağmen üretimdeki termal enerjinin sadece %8'lik kısmına tekabül etmektedir. Artan alternatif yakıt oranları çimento sektörünün emisyonlarının azaltmada yardımcı olurken döngüsel ekonomi içinde atıkların çevre dostu bertarafını da sağlama potansiyeline sahiptir. Atıkların %95 oranında yakıtla dönüştürülebilmesi için teknolojik yatırımlara ve yeni ekipmanlara ihtiyaç vardır. En nihayetinde hidrojenin de alternatif bir enerji kaynağı olarak orta ve uzun vadede çözüme büyük bir katkı sağlaması beklenmektedir. Yapay zekâ ve otonom üretim teknolojileri çimento sektörüne

dekarbonizasyonda önemli araçlar ve kolaylıklar sağlama potansiyeline sahiptir. Nesnelerin interneti gibi yaklaşımlarla da enerji ve üretim verimliliği sağlanırken ürün karbon ayak izi de önemli oranda düşürülebilir. Yapay zekâ kullanımı yeni bir teknoloji değildir. Büyük verileri depolama ve işleme olanağına sahip daha hızlı bilgisayarların geliştirilmesi, yapay zekânın kullanımını hem mümkün hem de makul kılmıştır. Kendisi makine öğreniminin bir parçası olan derin öğrenme, büyük veriden öğrenme ve yapay sinir ağları (YSA) eğitimi sonrasında problem çözme için kullanılabilecek kalıpları aramak için çok katmanlı YSA'dan yararlanılmaktadır. Bulanık mantık ve model tahmini kontrol (MPC) gibi analitik yöntemler dâhil olmak üzere, bilgi tabanlı otomasyon da yapay zekanın bir parçasıdır.

Klinker üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak şekilde otonom üretim ve/veya dijital dönüşüme yönelik mevcut çözümlerin daha ileriye götürülerek yerel üretimin sağlanması önem arz etmektedir. Aynı şekilde klinker üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak daha verimli malzemelerin, ekipmanların, yöntemlerin ve süreçlerin geliştirilmesi gereklidir.

Alternatif yakıt kullanım oranlarının artırılması amacıyla sistemde gerekli iyileştirmelerin gerçekleştirilerek döngüsel ekonomiyi de hızlandıran ve karbon ayak izini en az indiren alternatif yakıtların kullanım oranlarının ve çeşitlerinin artırılması gereklidir.

Enerji tasarrufu sağlanması amacıyla klinker üretiminde pişme sıcaklığını düşürücü hammaddelerin ve yardımcı malzemelerin kullanılması ve doğru uygulamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi de sürece katkı sağlayacaktır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

Alternatif Yakıtlar ve Sıfır Yakıt Emisyonu Araştırması

Çevresel sürdürülebilirliğin her geçen gün daha fazla önem kazandığı günümüzde, klinker üretiminde alternatif yakıtların ve hammaddelerin kullanımını 2050 karbon nötr yolculuğunda ilk sıralarına koymak önemli bir adımdır. Sadece de-karbonizasyon için değil döngüsel ekonomiye olan katkısı ile alternatif yakıt ve hammadde kullanımı, sağladığı ekonomik faydanın yanı sıra CO₂ emisyonlarının azaltılması, doğal kaynakların korunması, kaynak ve enerji verimliliği, atık yönetimi gibi iklim değişikliğine dokunan birçok konuda da önemli parametrelerden birisi olacaktır. Alternatif yakıt olarak kullanıma uygun atıklar (ömrünü tamamlamış araç lastikleri, endüstriyel atık plastikler, kontamine atıklar, evsel arıtma çamuru, ağartma toprağı, atık yağ, sintine atıkları, belediye atıkları, talaş, odun atıkları, tekstil atıkları, kullanılmış çözücüler) ve özellikle biyokütle içeriği yüksek olanlar, öngörülebilir gelecekte de çimento fırını yakıt karışımının değerli bir parçası olmaya devam edecektir. Halihazırda çimento fabrikalarında alternatif yakıtların payını %95'e kadar artırmak için teknik bir sınırlama bulunmamaktadır. Pek çok ülkede çimento üreticileri, yakıtta geleneksel kömür ve petrokoktan alternatif yakıtlara geçiş için şimdiden önemli yatırımlar yapmışlardır. Bugün alternatif yakıtlar,

AB çimento endüstrisi yakıt karışımının %44'ünü oluşturmaktadır. Düşük karbonlu yol haritası doğrultusunda 2050 yılına kadar %60'a çıkarmak, yakıt kaynaklı CO₂ emisyonlarında %27'lik bir azalmaya yol açacaktır. Çimento üretiminde karbonsuzlaştırma için, enerjinin bir kısmını hem geleneksel hem de “yeni” karbon nötr veya sıfıra yakın emisyon kaynaklarından sağlamak gerekli olacaktır. Atık biyokütle, çimento sektörü için çözümün büyük bir parçasıdır. Ayrıca, klinker fırınındaki karbon yakalama teknolojileri ile birleştirildiğinde potansiyel olarak net sıfır karbon ayak izi sağlayacaktır. Çimento katkı maddeleri içinde doğal kaynak olarak kalker, alçı taşı, tras (puzolan) kullanılır. Doğal kaynak kullanma oranı yaklaşık %85'tir [21]. Çimento katkısı olarak kullanılan atık maddeler ağırlıklı olarak yüksek fırın cürufu, uçucu küldür. Atık maddelerin kullanılma oranı yaklaşık %15'tir (TÇMB İstatistikleri Kullanımı). Çimento üretiminde filtrelerde tutulan tozlar proses atığı olarak nitelendirilebilir. Bu tozlar tekrar sisteme beslenir ve/veya çimento katkı maddesi olarak kullanılır. Alternatif atıkların hammadde olarak kullanımına yönelik çalışmaların yoğunluğunun artması önem arz etmektedir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

THS		Teknoloji Konusu
Dünya	Türkiye	
8	7	Yapay zekâ ve bulanık mantık tabanlı otonom üretim sistemlerinin geliştirilmesi
8	7	Alternatif yakıt besleme sistemi, siklon modifikasyonu ve fırın prosesinde iyileştirmeler ile enerji tüketiminin azaltılması

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

Yapay zekâ çözüm sağlayıcıları, çimento fabrikası kontrol sistemlerindeki mevcut “devrimin” basitçe MPC ve sanal sensörlerle çalıştığını bildirmektedir. Almanya’nın Powitec Akıllı Teknolojileri, 2001 yılında kendi kendini uyarlayan MPC ve makine öğrenimini bir döner fırını, manuel etkileşim olmadan 24 saatten fazla tamamen bağımsız olarak çalıştırarak ilk kapsamlı kara kutu kontrolörü uygulamasını göstermiştir. Sistemin çekirdeği, ana brülör alevini ve serbest kirecin çevrimiçi tahminini analiz eden bir görüntü işleme kamerasıydı. 2002 yılına kadar çeşitli yapay zekâ bileşenleri kullanılmıştır. Uyarlanabilir MPC kullanılarak fırına ve kalsinatöre gelen dalgalı enerji girişi otomatik olarak ayarlandı. Bu günlerde yapay zekâ kullanımının öncüleri, çimento üreticileri Leube (Avusturya) ve Maerker Zement (Almanya) dir. Kısa süre sonra ABB, FLSmidth, Pavilion, KIMA Echtzeitsysteme ve Rockwell gibi şirketler benzer model tabanlı kontrolörlerle pazara girdi. Günümüzde birçok şirket bulanık mantık kontrolüne kullanmaya başlamıştır. 2008 yılında, KIMA Echtzeitsysteme (KIMA Process Control’ün önceki adı), Doğu ve Orta Avrupa’daki Holcim grup fabrikalarından bazılarında bilyalı değirmenler için (SMARTFILL dolun seviyesi ölçüm sistemi dâhil) 30 SMARTCONTROL paketi tedarik etme projesi hakkında bir makale yayınladı. Devreye alınmasının ardından ve daha sonra bu tesislerin düzenli çalışması sırasında, MILLMASTER’ın gelişimi Holcim

grubunda ve KİMA Proses Kontrolünde ayrı ayrı devam etti. Otomasyondaki yeni eğilimleri takip etmek için insan makine arayüzünün yeni tasarımları, programlama mantığı ve yeni yazılım modülleri geliştirildi.

Ülkemizde ise, Akçansa Çanakkale'deki üretim tesislerinde yapay zekâ uygulamalarının başarılı çıktıları bulunmaktadır. Çimento ve hazır beton üretiminde Marmara, Ege ve Karadeniz Bölgelerinde faaliyet gösteren Akçansa'nın İstanbul Büyükçekmece, Çanakkale Ezine ve Samsun'un Lâdik ilçesinde kurulu üç çimento fabrikası ile Ambarlı, Aliğa, Marmara Ereğlisi ve Yalova'da dört terminali bulunmaktadır. Çanakkale fabrikasındaki çimento üretimini otonom olarak gerçekleştirdiklerini 2030 yılı hedeflerine uyum için rotanın çizildiği Çanakkale fabrikasındaki döner fırınlarda ve değirmenlerde yapay zekâ ve bulanık mantık algoritmaları destekli, sensör verileri üzerinden insandan bağımsız yapılan operasyonlar ile çimento üretimi otonom olarak yapılmaktadır. Söz konusu Expert Sistem projesi ile ilk aşamada ürün kalitesinde iyileşme, %3 kapasite artışı, değişken giderlerde %1,2 düşüş ve elektrik tüketiminde 1,1 azalma sağlanmış ve bu alandaki yatırım ve çalışmaları 3 fabrikasını da kapsayacak şekilde genişletildiği görülmektedir. Türkiye'de konuyla ilgili uygulamalar yukarıda sunulmuştur.

Akçansa'nın Çanakkale Fabrikası'nda alternatif yakıt besleme sistemi projesi ve 1. hattaki siklon modifikasyon projesini devreye alınmış ve fırın prosesinde iyileştirmeler yaparak ısı ve elektrik enerjisi harcamalarını düşürülmüştür. Böylelikle, konvansiyonel enerji kaynaklarının kullanım oranını azaltılarak hem yenilenebilir kaynaklardan hem de fırın sıcaklıklarından kendi enerjilerini üretmek mümkün olmuştur. Bu sayede de 28.100 ton/yıl CO₂ emisyonunu azaltımı gerçekleşmiştir. 2021 yılında toplam 583 bin ton atık, klinker ve çimento üretiminde alternatif kaynak olarak kullanmıştır. Ayrıca Çanakkale fabrikasında elektriğin %20-22'sini kendi üretimi olarak gerçekleştirebilmiştir. Sürdürülebilirlik 2030 hedeflerimizde alternatif yakıt kullanımında %35, alternatif ham madde kullanımında %15 hedefleri de bulunmaktadır.

D. Zaman ve Bütçe Tahminleri¹

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

Ar-Ge ve Yenilik Konusu	Hedeflenen Süre	Tahmini Bütçe	THS
Klinker üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak şekilde otonom üretim ve/veya dijital dönüşüme yönelik çözümlerin üst seviyeye getirilmesi	Kısa Vade	3 Milyon TL	THS 7
Klinker üretim süreçlerinde iklim etkilerini en aza indirecek ve verimi artıracak daha verimli malzemelerin, ekipmanların, yöntemlerin ve süreçlerin geliştirilmesi	Orta Vade	5-15 Milyon TL	THS 5-6
Alternatif yakıt kullanım oranlarının artırılması amacıyla sistemde gerekli iyileştirmelerin gerçekleştirilmesi	Kısa Vade	2-3 Milyon TL	THS 6-7

Enerji tasarrufu sağlanması amacıyla klinker üretiminde pişme sıcaklığını düşürücü hammaddelerin ve yardımcı malzemelerin kullanılması ve doğru uygulamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi	Kısa vade	3-4 Milyon TL	THS 5-6
--	-----------	---------------	---------

Kritik Ürün/Teknoloji 2.2.

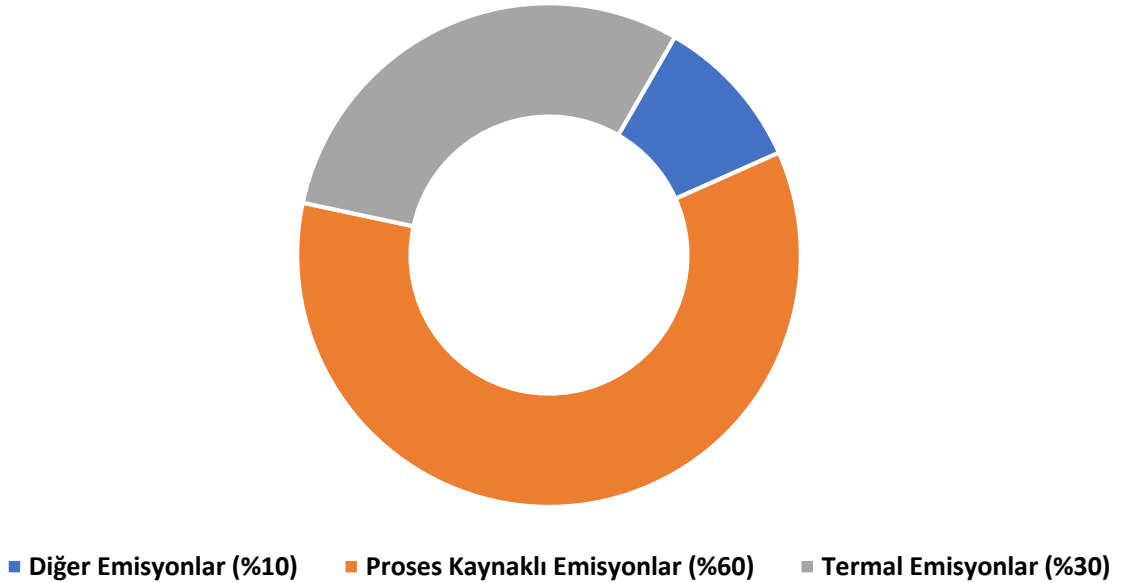
Klinker üretim süreçlerinin iklim etkilerini en aza indirecek ve verimliliklerini artıracak iyileştirmelere yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

Kalsinasyon sonucu ortaya çıkan karbon dioksit için karbon yakalama, kullanım ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

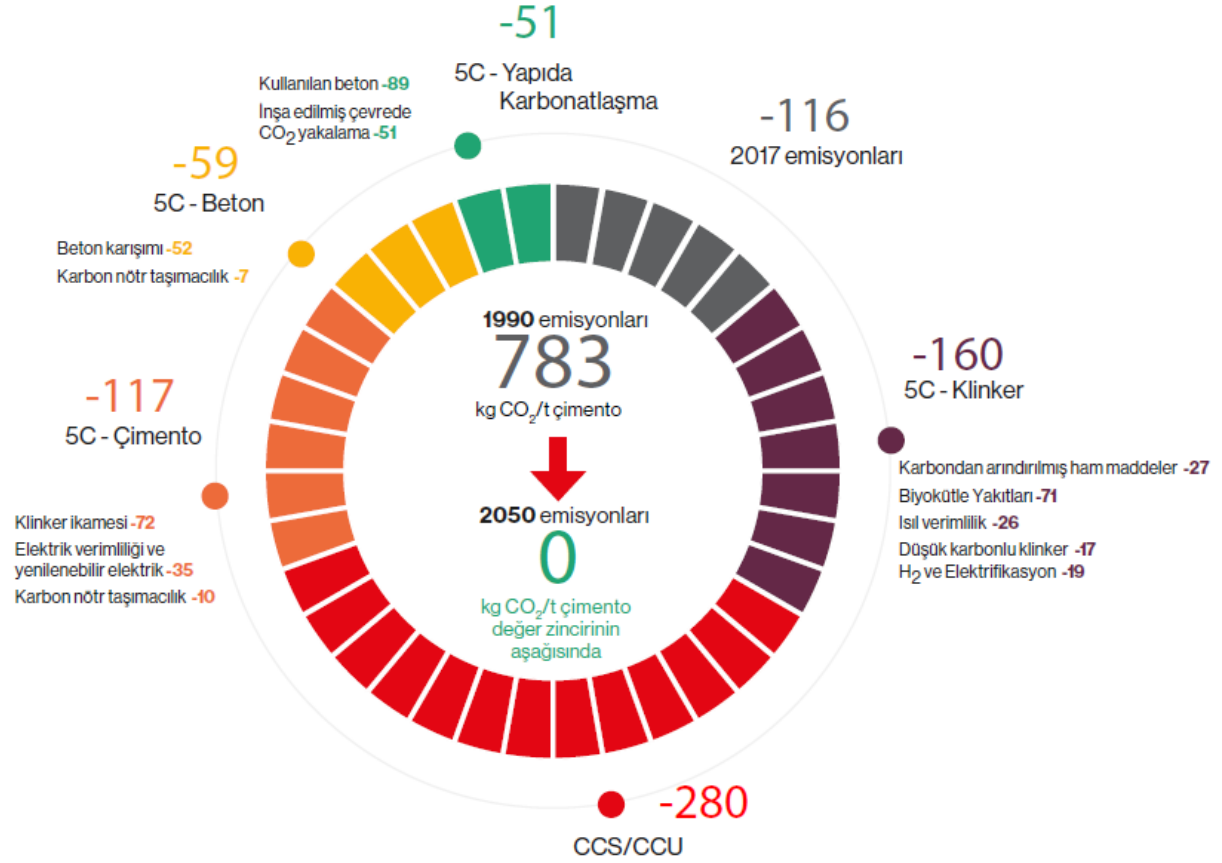
Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının iki ana kaynağı bulunmaktadır. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere çimento üretiminde açığa çıkan karbon emisyonlarının %60'ını kireçtaşının kalsinasyonu, %30'unu termal emisyonlar, %10'unu ise diğer emisyonlar oluşturmaktadır [22].



Şekil 2.1. Çimento üretiminde açığa çıkan karbon emisyonlarının kaynakları

Paris Antlaşması kapsamında yapılması gereken emisyon azaltımı konusunda çimento sektörü de kendi üzerine düşen görevleri yerine getirmek zorundadır. Bu bağlamda, çimento sektörünün “karbon azaltımı” konusunda kullanabileceği alternatif yöntemler mevcuttur. Türk

Çimento'nun da üyesi olduğu Avrupa Çimento Üreticileri Birliği (CEMBUREAU) tarafından hazırlanan bir raporda Şekil 2.2'de görüleceği üzere 2050 karbon nötr yol haritasında azaltım yöntemleri ve hedefleri belirtilmiştir. Bu azaltım yöntemleri içinde etki bakımından karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCS/CCU) öne çıkmaktadır [23].



Şekil 2.2. CEMBUREAU 2050 karbon nötr yol haritası azaltım yöntem ve hedefleri

Avrupa Yeşil Mutabakat Anlaşması'nda kabul edildiği gibi, döngüsel ekonomi ve karbon nötrlüğü iç içe geçmiş kavramlardır. Döngüsellik, çimento üretiminin bel kemiği olan klinkerden kaynaklanan emisyonları azaltmak için önem arz etmektedir. Bu noktada klinker üretimi sırasında yakalanan CO₂'in diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılabilme durumu gelecekte karbon nötrlüğüne ulaşabilmek adına birçok fırsatın önünü açmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

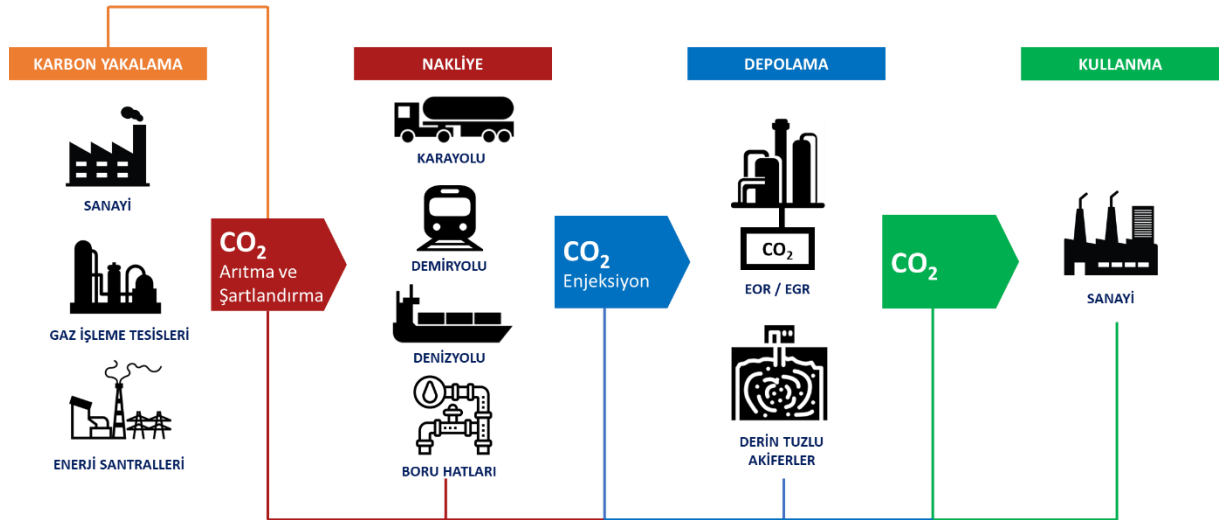
Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama (CCUS)

CCUS, çimento fabrikalarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak için kilit bir teknoloji olma özelliği taşımaktadır. Son yıllarda, reaktif ve membran yakalama tekniklerini optimize etmek için pilot ölçekte önemli araştırmalar yapılmıştır. Karbon yakalamayı daha verimli ve uygun maliyetli hale getirmek için gaz akışındaki CO₂'yi yoğunlaştırmanın yollarını bulmak için denemeler devam etmektedir (örn. Cleanker ve Catch4climate projeleri). Yakalanan CO₂ daha

sonra kalıcı olarak depolandığı jeolojik oluşumlara (boş gaz sahaları gibi) taşınabilir (örn. Norveç'te Heidelberg Cement tarafından işletilen Brevik tesisi). Diğer kalıcı CO₂ yakalama teknikleri, geri dönüştürülmüş beton agregaları ve minerallerin (olivin ve bazalt gibi) kullanımını içerir. Yakalanan CO₂, karbon nötr havacılık yakıtı gibi yeni ürünler oluşturmak için de kullanılabilir (WestKuste projesi).

Global CCS Enstitüsü tarafından yayınlanan 2020 CCS Küresel Durum Raporuna göre, faaliyette olan 26 tesis ile dünya çapında 65 ticari Karbon Yakalama ve Depolama tesisi bulunmaktadır. Bu tesisler toplamda yıllık yaklaşık 40 Mt CO₂ yakalayabilmekte ve depolayabilmektedir. Genel operasyonel CO₂ yakalama kapasitesi 2010'dan bu yana istikrarlı bir şekilde artmasına rağmen, karbon yakalamadaki faaliyet düzeyi 2011'den sonra azalmıştır. Bununla birlikte, 2015 Paris Anlaşması ile birlikte birçok hükümet daha güçlü iklim politikaları oluşturmuştur. 2017 yılından bu yana 30'dan fazla yeni entegre tesis duyurulmuştur. Sonuç olarak, açıklanan tüm projelerin tam olarak faaliyete geçmesi durumunda, toplam küresel CO₂ yakalama kapasitesi yılda yaklaşık 130 Mt'a yükselecektir [24].

İlk tesislerin çoğu, yakınlarda CO₂ depolama sahaları bulunan enerji üretim veya gaz işleme tesislerinden doğrudan kaynak yakalamak için geliştirilmiştir. Son zamanlarda, CO₂ için bir endüstriyel merkez olan hub kavramı (Şekil 2.3), tesis kümelerinden nakliye için CO₂'yi ayrıştırma, kurutma ve sıvılaştırma kabiliyeti nedeniyle popülerlik kazanmıştır. Merkez sistemi, uzun vadede CO₂'nin taşınması ve depolanması için birim maliyeti büyük ölçüde azaltabilirken altyapı inşa etmek için gerekli sermaye finansmanının teminini zorlaştırabilmektedir [25].

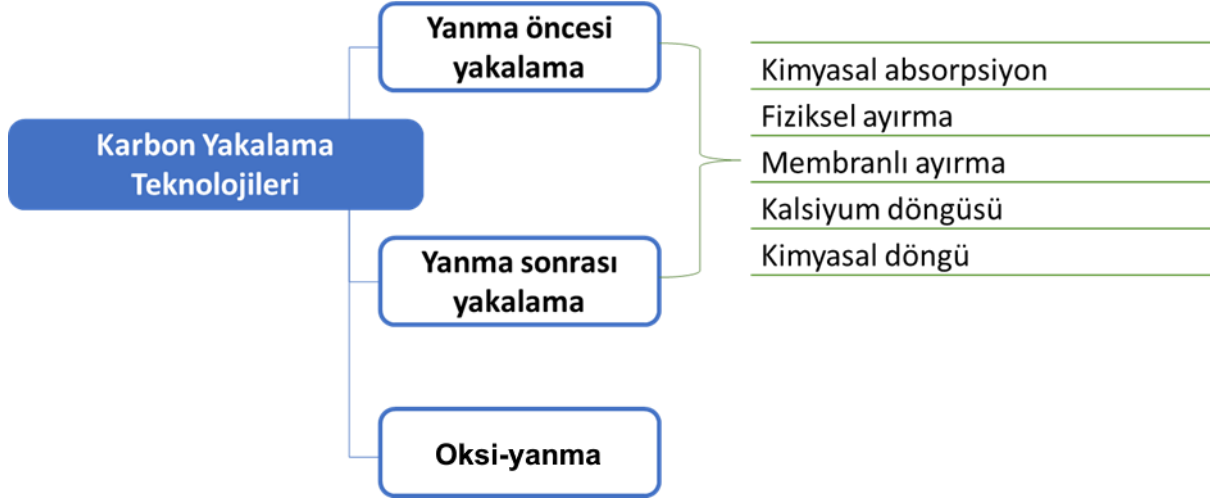


Şekil 2.3. Karbon yakalama, depolama ve kullanma konsepti

Karbon yakalama, önceden yakılmış hidrokarbon yakıtlardan veya yanma sonrası baca gazından CO₂'yi tutmak için çeşitli teknolojilerden oluşmaktadır. Teknolojiler, elektrik üretim tesislerinde, çimento ve çelik üretimi gibi ağır sanayi sektörlerinde ve toplu olarak küresel CO₂ emisyonlarının neredeyse %20'sini üreten kimyasal üretimde uygulanmaktadır. CO₂ ayrıca

amonyak, metanol ve doğalgaz için gaz işleme tesislerinde yakıt dönüşümü için tutulabilmektedir.

Bazı endüstriyel sektörlerde üretim teknolojisi sınırlaması nedeniyle, karbon emisyonu kaçınılmaz bir yan üründür ve emisyonlarını azaltmak için en etkili yöntem karbon yakalamadır. Karbon yakalama teknolojisinin uygulanması veya mevcut enerji santrallerinin güçlendirilmesi, net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için ekonomik olarak pratik bir yöntem haline gelmektedir [26].



Şekil 2.4. Karbon yakalama teknolojileri

Yıllık küresel CO₂ tüketimi 230 Mt civarındadır. 125 Mt tüketen gübre endüstrisi ve yılda yaklaşık 70 ila 80 Mt tüketen petrol ve gaz endüstrileri en büyük kullanıcılarıdır (Tablo 2.1). Açıkçası, CO₂ için mevcut piyasa talebi CCUS yoluyla artacak CO₂ kapasitesini karşılamaktan çok uzak görünmektedir. Bu nedenle özellikle enerji endüstrisi CO₂ kullanımı ve kalıcı depolama seçeneklerini genişletmenin yollarını araştırmaktadır. CO₂'nin açık denizdeki tükenmiş rezervuarlara enjekte edilmesi artan bir ilgi görmektedir. Karada ve özellikle açık denizde kullanım veya depolama için CO₂ taşımacılığı, küresel CO₂ azaltımı için kritik bir rol oynamaya devam edecektir [26].

Tablo 2.1. Karbon kullanım alanları

CO ₂ Kullanım Alanları	Kategori
Gıda	Kimyasal
Kimyasallar	
Plastikler	
Gelişmiş yakıt geri kazanımı	
Gübre	
Soğutucular	
Yangın süspansiyonu	
İnertleştirici maddeler	
Mineral karbonizasyon	Mineralizasyon

Yapı malzemeleri (CO ₂ ile kütleme)	
Biyolojik dönüşüm	Biyolojik

Daha önce de bahsedildiği üzere CO₂ amonyak, metanol ve doğalgaz tesislerinde yakıt dönüşümü için tutulabilmektedir. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tütün ve Alkol Dairesi Başkanlığı web sayfasından alınan bilgiye göre Türkiye’de piyasaya arz edilen ve metil alkol ve etil alkol miktarları aşağıdaki tablolarda yer almaktadır [27]:

Tablo 2.2. Metanol Sektörüne Ait Piyasa Arzı Bilgileri (01.01.2021-31.12.2021)

GTİP No	Ürün Alt Kategorisi	İç Piyasaya Arz			
		Üretimden* Litre	İthalattan Litre	Toplam Litre	İhracat Litre
2905.11.00.20.12	Teknik, Ambalajlı	1.038.231	0	1.038.231	0
2905.11.00.20.11	Teknik, Dökme	30.620	185.036	215.656	0
2905.11.00.10.12	Saf, Ambalajlı	0	398.823	398.823	7.785
2905.11.00.10.11	Saf, Dökme	0	912.623.850	912.623.850	0
	Toplam	1.068.851	913.207.709	914.276.560	7.785

* Yan ürün olarak elde edilmektedir.

Bu tablo, metanol dağıtım uygunluk belgesini haiz firmalarca Bakanlığımıza beyan edilen aylık satış raporu verilerinin derlenmesiyle hazırlanmıştır.

Tablo 2.3. Etil Alkol Sektörüne Ait Piyasa Arzı Bilgileri (01.01.2021-31.12.2021)

GTİP No	Ürün Alt Kategorisi	İç Piyasaya Arz			
		Üretimden mA Litre	İthalattan mA Litre	Toplam mA Litre	İhracat mA Litre
2207.10.00.90.12	Ambalajlı, Sentetik, Denatüre Edilmemiş	0	6.815	6.815	0
2207.10.00.10.12	Ambalajlı, Tarımsal Kökenli, Denatüre Edilmemiş	4.990.219	3.715.702	8.705.921	1.900
2207.20.00.10.14	Ambalajlı, Tarımsal Kökenli, Denatüre Edilmiş	22.320	3.653	25.973	0
2207.20.00.90.14	Ambalajlı, Sentetik, Denatüre Edilmiş	0	0	0	0
	Ambalajlı Toplam	5.012.539	3.726.170	8.738.709	1.900
2207.20.00.90.13	Dökme, Sentetik, Denatüre Edilmiş	0	31.929.342	31.929.342	275.006
2207.10.00.10.11	Dökme, Tarımsal Kökenli, Denatüre Edilmemiş	16.577.323	2.816.713	19.394.036	61.518
2207.20.00.10.13	Dökme, Tarımsal Kökenli, Denatüre Edilmiş	122.543.786	123.567.273	246.111.059	3.328.146
	Dökme Toplam	139.121.109	158.313.328	297.434.437	3.664.670
Genel Toplam		144.133.648	162.039.498	306.173.146	3.666.570

*Bu tablo, etil alkol dağıtım uygunluk belgesini haiz firmalarca Bakanlığımıza beyan edilen aylık satış raporu verilerinin derlenmesiyle hazırlanmıştır.

Türkiye Gıda ve İçecek Sanayii Dernekleri Federasyonu tarafından hazırlanan “2020 Dış Ticaret Verileri” raporuna göre 2020 yılı içerisinde Türkiye’ye en fazla ithal edilen 3 kalem arasında metanol yer almaktadır. Bunların isimleri ve ithalat hacmi aşağıda bulunmaktadır.

- Etilen glikol (318,5 milyon dolar),
- Asiklik glikoller (266,5 milyon dolar),
- Metanol (118,5 milyon dolar) olarak gerçekleşmiştir.

2020 yılında 2019 yılına göre etilen glikol ithalatı %6,6, metanol ithalatı %16,7 azalırken, asiklik glikoller ithalatı %1,4 artmıştır.

CCS için mevcut en son teknoloji, sulu amin çözeltileri kullanılarak CO₂ içeren baca gazlarından CO₂'nin yakalanması ve konsantrasyonu, CO₂'nin basınçlandırılması ve uygun

yeraltı jeolojik depolama alanlarına taşınması ve depolanmasından oluşur. Bu teknik büyük altyapı ve enerji ayak izlerini içerir ve şu anda ekonomik olarak uygun değildir.

Ülkemizde bulunan Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay hatları, Ege ve Akdeniz'deki aktif tektonizma, depolama potansiyeli taşıyan mevcut bölgelerin uzun vadede güvenli olmayacağını ortaya koymaktadır. Türkiye'de tektonizma açısından en güvenli sayılabilecek bölge Aksaray ve çevresidir. Burada Tuz Gölü havzası uygun bir depolama alanıdır. Ancak stratejik açıdan bu alanın doğal gaz depolama alanı olarak kullanılması daha kritiktir.

Bir başka açıdan, CO₂'nin depolanması uzun vadeli bir çözüm değildir ve sürdürülebilir sanayi anlayışı ile örtüşmemektedir. Dünya çapında döngüsel ekonomi yaklaşımıyla kimyasal olarak bağlanma veya ileri dönüşüm ile CO₂'nin ikincil veya alternatif hammadde şeklinde kullanımına olanak sağlayacak teknolojilere yatırım yapılması elzemdir.

Bu noktada, aynı anda katma değerli malzemeler üretirken, pahalı ve enerji yoğun bir CO₂ yakalama işlemine ihtiyaç duymadan doğrudan baca gazından uzun vadeli CO₂ depolanması sağlayabilmesi, Avrupa proses endüstrilerinin uluslararası rekabet gücünü artırırken aynı zamanda bu endüstrilerin CO₂ ayak izini de azaltacaktır. Her ne kadar CCUS kavramının çimento sektörüne entegrasyonu adına çalışmalar yürütülse de ulaşılması gereken hedeflerin ekonomik, uygulanabilir ve yaygınlaşabilir olması gerekmektedir.

Bu noktada hızlandırılmış karbonasyon, geri dönüştürülmüş beton ve yaygın çelik cürufunun işlenmesi için esas olarak pilot ölçeğe ulaşan yenilikçi bir teknolojidir. İnşaat için karbonatlı agrega üretimi üzerine çalışmalar yapılmış olsa da kısmen sektörün ham malzemeler yerine ikincil hammaddeleri kullanma konusundaki isteksizliği nedeniyle, karbonatlaşmanın endüstriyel düzeyde uygulanması, yalnızca birkaç başarılı proje ile henüz başlangıç aşamasındadır. Dolayısıyla inşaat malzemeleri olarak kullanılmak üzere endüstriyel ve kentsel atık akışlarının karbonatlanması için sağlam teknolojilerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda kalsinasyon işlemi sırasında baca gazından çıkan CO₂ yeni tekniklerle yakalanması, atık veya ikincil hammaddelere gömülmesi ve oluşan karbonatlı ürünlerin çimento üretiminde mineral katkı olarak veya karbonatlaşmış agrega olarak kullanılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bahse konu karbon yakalama teknolojilerinde CO₂'nin doğrudan endüstriyel baca gazından kullanılması ve bu CO₂'nin karbonatlı malzemelerde kalıcı olarak yakalanması için yürütülecek pilot çalışmalarda her biri CO₂'nin kayıpsız transferini mümkün kılacak boru sistemlerinin uyarlanması gerekmektedir. Baca gazının arıtma, konsantrasyon veya saflaştırma olmadan doğrudan kullanılması, CO₂ yakalama sürecini daha az maliyetli ve karmaşık hale getirir. CCUS zincirini tamamlamak için, CO₂'nin kalıcı olarak depolandığı karbonatlı atık malzemelerin daha sonrasında inşaat malzemelerinin bir bileşeni olarak kullanılması ise döngüsellüğün tam olarak sağlanmasını mümkün kılacaktır. Mineral bazlı atık malzemeler belediyeler tarafından dolgu malzemesi olarak kullanılmakta veya depolama sahalarına

atılmaktadır. Bu hususta belediyeler ve sanayiler ile iş birliği kurularak karbonatlaşma potansiyeli bulunan malzemelerin değerlendirilmeden önce karbonatlaşma proseslerinden geçirilmesi uygulaması başlatılabilir. Zira karbonatlaşma yöntemiyle çimento sektörünün emisyonlarının bertaraf edilebilme oranı, sirküle edilecek malzeme miktarıyla doğru orantılıdır. Hızlandırılmış karbonasyon, geri dönüştürülmüş beton, adi çelik ve paslanmaz çelik cürufu ve kentsel katı atıkların yakılması için esas olarak pilot ölçekte kullanılan yenilikçi bir teknolojidir. Fakat hala geliştirilmeye açık bir yöntem olma özelliği taşımaktadır ve bu bağlamda söz konusu teknolojilerin uygulanması noktasında olası hedefler aşağıda sıralanmaktadır:

- Kalsinasyon işlemi sırasında baca gazından çıkarılan CO₂'nin %15-20'ye kadar yakalanmalıdır.
- İnşaat uygulamalarında kullanılacak nihai ürünler için gerekli standartlar elde edilmelidir.
- Ürünlerdeki çelik cüruflarının stabilitesi artırılmalıdır (mevcutta %3'ten büyük hacim değişimini %0,5'in altına indirilmesi).
- İnşaat ve yıkıntı atıklarından geri dönüştürülmüş betonun mekanik mukavemetinin (+%20) artırılmalı ve gözeneklilik ve su emme indeksinin düşürülmelidir (-%25).
- Tüm atık akışlarının %40'ını depolama alanlarından yeni inşaat malzemelerine yönlendirilmelidir.

Karbon yakalama tekniğinde en önemli hususlardan biri önceden işleme tabi tutulmadan çimento ve atık yakma tesislerinin baca gazındaki CO₂'yi doğrudan kullanılması ve bu yolla sürecin maliyetinin ve karmaşıklığının azaltılmasıdır. Karbonatlaşma derecesi çok değişkendir ve karbonatlanacak malzemeye ve işlem süresine bağlıdır; atık betonun ince fraksiyonlarında %20'ye kadar ve hatta bazı cüruflarda yaklaşık %40'a kadar değişebilmektedir. Karbonatlaşma hızı birçok parametreye bağlıdır (örn. sıcaklık, nem içeriği, kalıntı bileşimi, basınç, CO₂ konsantrasyonu, partikül boyutu, mineralizasyon sistemi, malzemeyi işleme yöntemi, vb.), ancak koşullar kontrol edilirse, uygun reaktör teknolojisi birkaç dakika ila birkaç saat arasında makul bir karbonatlaşma derecesine ulaşabilir. Bu noktada reaktör sisteminin, güvenli bir biçimde doğrudan baca gazı alımını mümkün kılması, yüksek miktarlarda karbonatlaşmayı kısa sürede gerçekleştirebilmesi ve farklı atıkları işleyebilmek için uyarlanabilir bir yapıya sahip olması gerekmektedir.

Karbondiyoksit, absorpsiyon, adsorpsiyon, kimyasal döngü, membran gazı ayırma veya gaz hidrat teknolojileri dahil olmak üzere çeşitli teknolojiler kullanılarak doğrudan havadan veya endüstriyel bir kaynaktan (enerji santrali baca gazı gibi) yakalanabilir. Modern bir geleneksel elektrik santraline uygulanan CCS, atmosfere CO₂ emisyonlarını, CCS'siz bir tesise kıyasla yaklaşık %80-90 oranında azaltabilir. 2019 itibariyle dünyada 3,7'si jeolojik olarak depolanan yılda 31,5 milyon ton CO₂ yakalayan 17 faal CCS projesi bulunmaktadır. Çoğu elektrik santrali değil endüstriyeldir: Çimento, çelik üretimi ve gübre üretimi gibi endüstrilerin karbondan arındırılması zordur [28].

CCS, CO₂'yi yakalayan ve sıkıştıran bir enerji santralinde kullanılırsa, diğer sistem maliyetlerinin fosil yakıtlı enerji santralleri için üretilen watt-saat enerji başına maliyeti % 21-91 oranında artıracığı tahmin edilmektedir, ve özellikle de bir tecrit bölgesinden uzaksa teknolojinin mevcut tesislere uygulanması daha da pahalıdır. ^{Hata! Yer işareti tanımlanmamış.} En etkili olanı CO₂'nin, büyük fosil yakıt veya biyokütle enerji tesisleri, doğal gaz elektrik enerjisi üretim tesisleri, büyük CO₂ emisyonlu endüstriler, doğal gaz işleme, sentetik yakıt tesisleri ve fosil yakıt bazlı hidrojen üretim tesisleri gibi kaynaklarda yakalanmasıdır. Havadaki CO₂ konsantrasyonunun yanma kaynaklarına kıyasla çok daha düşük olması sebebiyle, önemli mühendislik zorluklarına rağmen havadan CO₂ çıkarmak da mümkündür.

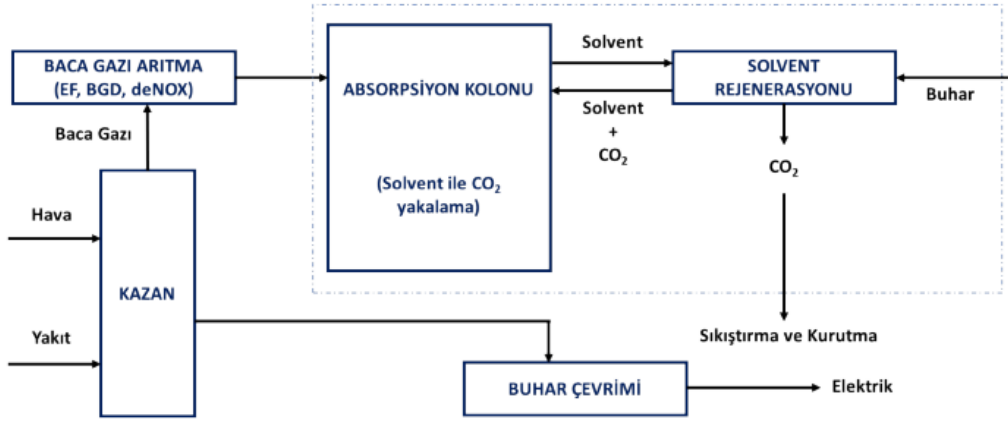
Fermantasyon yoluyla etanol üreten organizmalar, yeraltına pompalanabilen soğuk, esasen saf CO₂ üretir. Fermantasyon ağırlıkça etanolden biraz daha az CO₂ üretir. Karbon yakalama sistemleri incelendiğinde bunların “Yanma Sonrası Yakalama”, “Oksi-Yanmada Yakalama”, ve “Yanma Öncesi Yakalama” olmak üzere üç ana başlık altında toplandığı görülmektedir [29].

Yanma Sonrası Yakalama (Post-Combustion Capture)

Biyokütle veya fosil yakıtın yakılması ile üretilen baca gazlarından kirletici emisyonların (SO_x, NO_x vb.) ayrıştırılmasından sonra karbondioksit yakalama gerçekleştirilir. Yanma sonrasında oluşan baca gazları direkt atmosfere salınmadan önce CO₂, büyük oranda ayrıştırılmanın gerçekleştirileceği sistem içerisinden geçirilir. Şekil 2.5'te görüleceği üzere ilk olarak yakıt bir kazana enjekte edilir. Yakıt, hava ile etkileşime girerek yanma tepkimesi oluşturur. Sonucunda endüstriyel ısıtma veya enerji sektöründe kullanılacak ısı üretilmiş olur. Isının yanında çoğunluğu su, CO₂ ve azottan oluşan bir baca gazı üretilir. Bu baca gazı, kazandan emici kulenin zeminine doğru aktarılır. Kulede yükselen baca gazındaki CO₂, tepeden eklenen çözücü (solvent) ile etkileşime girerek bir çözelti oluşturur ve kulenin dibinden sıyırma kulesine geçer. Kalan baca gazı yukarıdan ayrılır ve atmosfere salınır. Sıyırma kulesindeki çözelti yaklaşık 120°C'ye ısıtılarak CO₂ ve çözücü ayrıştırılır. Daha sonra çözücü, kulenin altından tekrar kullanılmak üzere ayrılırken CO₂ kulenin tepesinden sıkıştırılıp depolanmak üzere tanklara aktarılır. Yanma sonrası CO₂ yakalama için bazı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar:

- Solvent (çözücü) ile yakalama,
- Sorbent ile yakalama,
- Membran ile yakalama yöntemleridir.

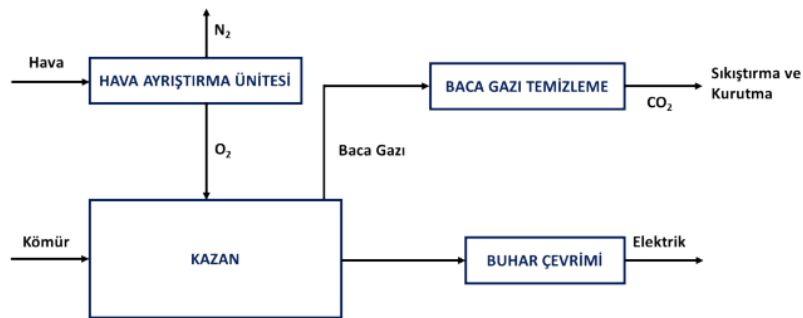
Bu yöntemlerden solvent ile (özellikle monoetanol amin) yakalama; maliyeti ve enerji tüketimi düşük, gelişmiş ve ticarileşmiş bir yöntemdir [30].



Şekil 2.5. Yanma sonrası yakalama yöntemi

Oksi-Yakıt Yanmada Yakalama (Oxy-Fuel Combustion Capture)

Oksi-yakıt yakalama, yakma işleminin normal hava yerine oksijence zengin hava ya da saf oksijen ile yakılarak baca gazındaki karbondioksit konsantrasyonunun artırılması esasına dayanmaktadır. Bundan dolayı sistemde hava ayrıştırma ünitesi yer almaktadır. Şekil 2.6'de belirtildiği gibi bu ünite yardımı ile hava içerisinde yüksek miktarda bulunan azot (yaklaşık olarak hacimce %79) ayrıştırılmakta ve yakıt azotun azaltıldığı bir atmosfer ortamında yakılmaktadır. Yakma havası içerisindeki azot ayrıştırıldığından azot oksitler oluşmamakta ve CO₂ açısından zengin baca gazı elde edilmektedir. Baca gazı içerisinde oluşan su buharı sıkıştırılarak ve soğutulmuş olarak ayrıştırılmaktadır. Bu yöntemin kullanımında düşük miktarda azot içeren baca gazı elde edildiği için CO₂ yakalama teknolojisinde enerji ve yatırım maliyetlerinin önemli derecede düşmesini ve CO₂ yakalama işleminin daha kolay yapılmasını sağlamaktadır.

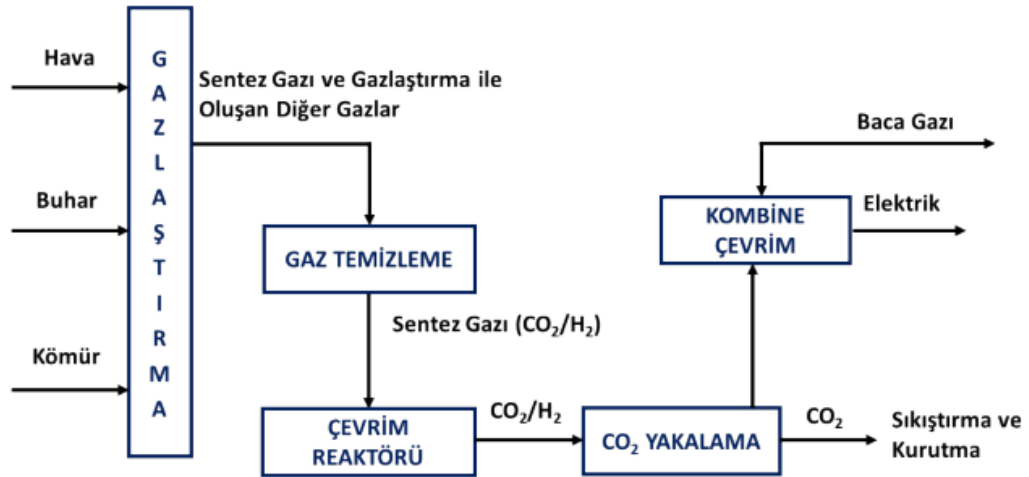


Şekil 2.6. Oksi-yakıt yanmada yakalama ^{Hata! Yer işareti tanımlanmamış.}

Bu teknolojiye, diğer teknolojilerden farklı olarak sis ve asit yağmurlarına neden olan NOx salımı çok daha düşüktür. Ayrıca karbonun yakalanması için yapıya herhangi bir kimyasal eklenmesine ihtiyaç duyulmamaktadır. CO₂'nin yaklaşık %100 kadarının tutulmasına imkân sunmaktadır; ancak yüklü miktarda sermaye yatırımı gerektirmektedir. Hava ayrıştırma ünitesi oldukça fazla enerji tüketmektedir ve teknolojinin eski santrallere montajı zor ve maliyetlidir.

Yanma Öncesi Yakalama (Pre-Combustion Capture)

Yanma öncesi yakalama tekniğinde yanma işlemi öncesinde katı yakıt, buhar ve oksijence zengin basınçlı bir ortamda ısıtılarak gaz yakıt formuna dönüştürülmektedir. Bu yakıt hidrojen ve karbonmonoksit bileşimli olup sentez gazı (syngas) olarak da adlandırılmaktadır. Bu teknikte karbon, sentez gazı yanmadan önce fiziksel veya kimyasal absorpsiyon yöntemleriyle ayrıştırılmakta ve depolanmaktadır. Kurulum için gerekli yatırımın fazla olması, her tesise uygulanamayışı ve eski santraller ile uyumsuz olması nedeniyle yakma sonrası yakalama yöntemi kadar yaygın değildir. Uygulama sürecinde ilk olarak hava ayrıştırma ünitesine hava girmekte ve burada oksijen neredeyse saf halde havadan ayrıştırılmaktadır. Daha sonra bu oksijen, Şekil 2.7'da görüleceği üzere yakıtın da eklendiği gazlaştırıcı tanka aktarılır ve burada çoğunluğu CO₂, CO, H₂, H₂O'dan oluşan bir sentez gazı (syngas) oluşmaktadır. Bu sentez gazı daha sonra çevrim reaktörüne aktarılır ve burada sisteme buhar eklenerek CO, CO₂ ve H₂'e dönüştürülmektedir. Daha sonra çevrim reaktöründeki CO₂ kimyasal emilim ile hidrojenlerden ayrıştırılmakta ve depolanmaktadır. Ayrıştırılmış hidrojenler de gaz türbinlerinde elektrik üretimi veya saf hidrojen ihtiyacı duyan kimyasal süreçlerde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile üretilen CO₂'nin yaklaşık %90'ı yakalanabilmektedir. Kurulum maliyetinin azaltılabilmesi için çevrim reaktörü sistemden çıkarılabilir; ancak bu yakalama verimliliğinde %18-30 düşüşe neden olur. Kullanılacağı tesise bağlı olarak enerji üretim verimliliğinde %20'ye kadar kayıp gözlemlenmektedir. Kurulumun tesisin kurulumuyla beraber yapılması gerekmektedir, sonradan montajı yapılamamaktadır.



Şekil 2.7. Yanma öncesi yakalama yöntemi^{Hata! Yer işareti tanımlanmamış.}

Özellikle kimi tesislerde enerji tüketimi optimal değerlere ulaşmıştır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan teknolojinin kullanılması darboğazın önüne geçecek ve ek fayda sağlayabilecektir.

Güncel bilgiler ışığında, öğütme ve kırma teknolojisi ne olursa olsun, yenilenebilir enerjinin kullanılabilir ve uygulanabilir olduğu söylenebilir. Ancak hem enerji verimli bir teknoloji kullanımı hem de yenilebilir enerjinin bu teknolojiye adapte edilmesi asıl faydanın ve know-how'ın üretileceği kısım olarak göze çarpmaktadır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

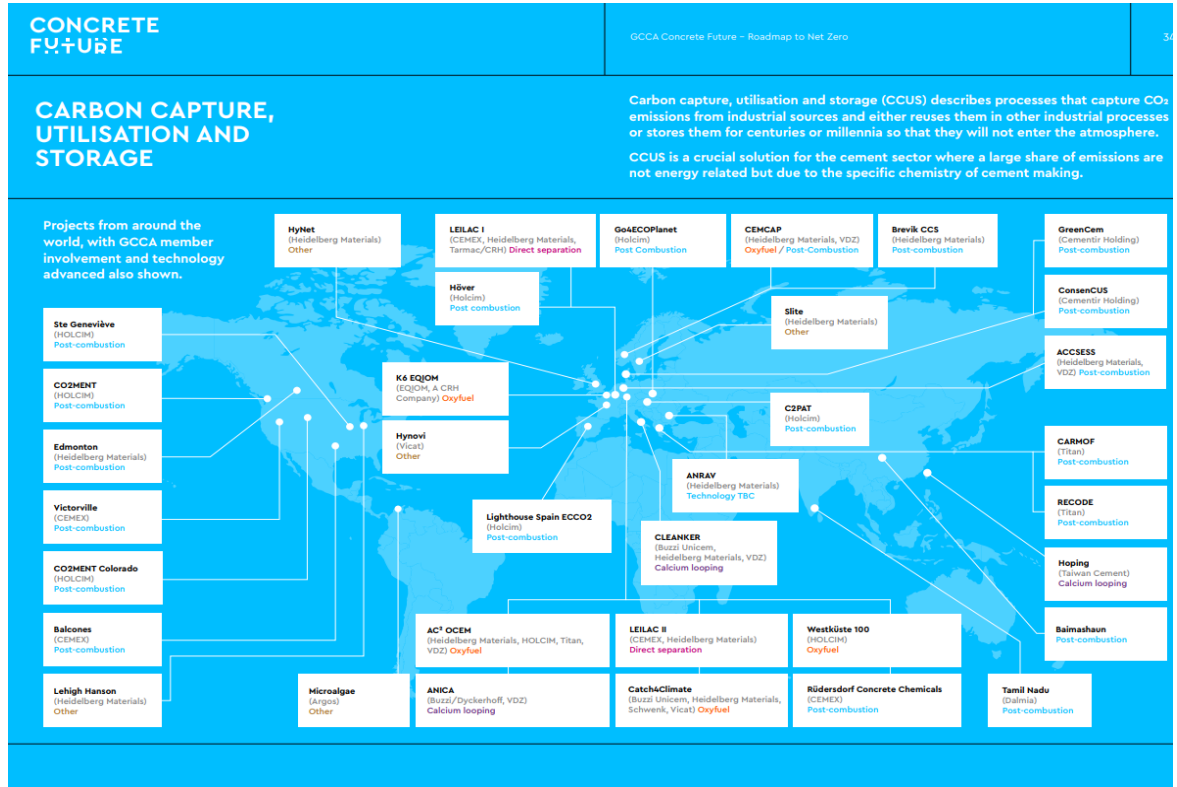
THS		Teknoloji Konusu
Dünya	Türkiye	
7	6	Mikroalglerin fotosentez kabiliyetleri sayesinde baca gazından karbon tutulması
6	-	Sıcak iklimlerde baca gazlarından CO ₂ yakalamak için alg kullanımı
7	-	Kalsiyum döngü prosesi kullanarak CO ₂ yakalama
7	-	Oksi-yanma teknolojisi
7	-	Endüstriyel ölçekte yeşil hidrojen ve karbonsuzlaştırma projesi, oksi-yanma ve yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

Kalsinasyon sonucu ortaya çıkan karbondioksit için yakalama, kullanım ve depolama hususunda dünyada ve Türkiye’de yürütülen projelere sınırlı sayıdadır. Özellikle dünya çapında söz konusu teknolojilerin geliştirilmesi adına önemli adımlar atılmış ve çeşitli projeler yürütülmüş ve yürütülmeye devam edilmektedir, fakat Türkiye özelinde çalışmalar sınırlıdır. Türkiye özelinde gerçekleştirilen çalışmalardan biri olan Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi tarafından yürütülen ve TÜBİTAK tarafından desteklenen Mikroalg Projesi kapsamında, Akçansa Çanakkale Çimento fabrikasında mikroalglerin fotosentez kabiliyetleri sayesinde baca gazından karbon tutulması konusunda çalışmalar yapılmaktadır [31].

Çin’de Anhui Conch Çimento Fabrikası, yıllık 50 bin kapasiteli amin sistemli karbon yakalama tesisini 2018 yılında devreye alarak kullanmaya başlamıştır. Yakaladığı karbon dioksidi kimya, ilaç ve gıda sektöründe kullanılmak üzere grubun diğer fabrikalarına göndermektedirler. Dünya genelinde ise HeidelbergCement tarafından yürütülen Leilac projesi, çimento ve kireç üretiminde kaçınılmaz CO₂ proses emisyonlarının ekonomik olarak azaltılmasını sağlamayı amaçlamış ve ek kimyasallar veya işlemler olmadan, kalsinasyon için dolaylı yoldan bir ısıtma yaklaşımı ile kullanım veya depolama için CO₂'yi verimli bir şekilde ayırmayı amaçlamıştır. Bir diğer proje olan ve Vicat tarafından yürütülen CIMENTALGUE, daha sıcak iklimlerde baca gazlarından CO₂ yakalamak için alg kullanımına odaklanmış ve ayrıca alglerin fırın için biyokütle yakıtı kaynağı olarak kullanılabilirliğini araştırmaktadır. West Coast University tarafından yürütülen bir proje olan WestKuste 100, yeşil metanol oluşturmak için Largerdorf Cement Works'te oksigaz yakma ve CO₂ yakalama üzerine odaklanmaktadır. Laboratory of

Energy and Environment of Piacenza – LEAP koordinatörlüğünde yürütülen Cleanker, %90'ın üzerinde bir CO₂ gazı akışı üretmek için oksigaz yanmasını (havanın oksijen ve geri dönüştürülmüş CO₂ ile değiştirilmesi) ve bu yolla CO₂ geri dönüşümüne odaklanmaktadır. HeidelbergCement'in yürüttüğü Catch4climate kapsamında Güney Almanya'da Mergelstetten'deki çimento fabrikasının tesislerinde yarı endüstriyel ölçekte bir oksigaz test tesisi kurulmuş ve bu tesiste CCU için CO₂ akışını yoğunlaştırmak adına çalışmalar yürütülmektedir. Fondazione Istituto Italiano di Tecnologia'un da dahil olduğu bir konsorsiyum tarafından yürütülen RECODE projesi kapsamında çimento endüstrisindeki bir döner fırının baca gazlarından çıkan CO₂'nin katma değerli kimyasallar (çimento formülasyonları için asit katkı maddeleri) ve malzemeler (beton dolgu maddesi olarak kullanılacak CaCO₃ nanoparçacıkları) üretmek için kullanmasına odaklanılmıştır. GCCA tarafından hazırlanan çimento sektörünün içerisinde yer aldığı karbon yakalama projelerinin isimleri ve partner olan çimento fabrikası aşağıdaki haritada yer almaktadır [32].



Şekil 2.5. Dünya genelinde CCUS üzerine odaklanan projeler ve partnerler

D. Zaman ve Bütçe Tahminleri¹

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

Arge Konusu	Hedeflenen Süre	Tahmini Bütçe	THS
Hızlandırılmış karbon yakalama için laboratuvar tipi karbonatlaştırma reaktörlerinin geliştirilmesi	Kısa Vade	500 bin USD\$	THS 4

Hızlandırılmış karbon yakalama için endüstriyel ölçekli karbonatlaştırma reaktörlerinin geliştirilmesi	Orta Vade	1 Milyon USD\$	THS 7
--	-----------	----------------	-------

E. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Bir Araya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

Türkiye’de iç piyasaya arz edilen çimentonun %45,7’si hazır beton sektörü, %36,7’si bayiler, %4,2’si müteahhitler, %3,7’si inşaat şirketleri, %3,7 prefabrik sektörü, %0,8’i kamu ve %5,3’ü diğer kullanıcılar tarafından kullanılmaktadır. Bu hususta çimento üreticileri, TÜBİTAK, akademisyenler ve çimento kullanan sektörler çeşitli teorik ve uygulamalı etkinlikler düzenlenerek bir araya getirilmelidir. Bu etkinliklerde alternatif çimento türlerinin performansı ile ilgili bilgilendirmenin yanı sıra çevresel etkiyle ilgili avantajları da paylaşılmalıdır. Hedeflenen teknolojik ilerlemelerin sağlanabilmesi adına klinker üretimi ve çimento üretimi için mevcut kırma, öğütme, taşıma, yüksek basınçlı hava ve benzeri ekipmanların enerji verimliliğinin artırılması ve/veya enerji verimli yeni ekipmanların tasarlanması, geliştirilmesi, modellenmesi, simülasyonu ve uygulama süreçlerinin optimizasyonu, yenilenebilir enerji sistemlerinin söz konusu proseslere entegrasyonu, kırma-küçültme-öğütme, kinetik enerjilerin kullanılması, karbon yakalama ve depolama tekniklerinin klinker-çimento üretimi ve beton kürelemede kullanılması, atık enerjinin kullanımı ve enerji optimizasyonu alanlarında uzman akademisyenlerin ve sektörün ilgili bileşenlerinde uzman mühendislerin koordinatörlüğünde kimya mühendisliği, malzeme ve metalurji mühendisliği, makine mühendisliği, maden mühendisliği, enerji mühendisliği, çevre mühendisliği, jeoloji mühendisliği, bilgisayar mühendisliği, inşaat mühendisliği, maden kaynakları ve uygulamalı mineraloji, malzeme karakterizasyonu, atık yönetimi, beton teknolojileri, yapı kimyasalları, enerji sistemleri, atık yönetimi, kimyasal termodinamik, kimyasal prosesler gibi disiplinlerde uzman akademisyen ve mühendislerin bilgi birikimine dayalı projelerin yürütülmesi esastır. Bu noktada üniversiteler, araştırma enstitüleri, sektör firmaları ortak paydada buluşturulmalı ve endüstriyel paylaşım kurabilmek ve döngüsel ekonomiyi disiplinler arasına yayabilmek adına çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

F. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İş birliği Modeli ve Destek Mekanizması

Söz konusu teknolojilerin gerçekleştirilmesi noktasında teknolojinin Ar-Ge safhasından endüstriyel ölçekli üretime kadar uzanan sürecin teknoloji hedefleri ve endüstriyel potansiyeli göz önünde bulundurularak tasniflenmesi önem arz etmektedir. Bu nokta ortaya konacak proje çalışmalarının ölçek odaklı aşamalandırılması, sağlanacak desteklerin bu ölçeklere göre düzenlenmesi, her bir ölçek için düşünülen proje çalışmalarının bulunduğu ölçekte hedeflenen ve mümkün olan seviyede teknolojik ürünü ortaya koyması zorunlu kılınmalıdır. Proje çalışmaları yalnızca bulunduğu ölçeği ve bu ölçeğin gerekliliklerini yerine

getirmekle kalmayacak, aynı zamanda ölçeği bir üst seviyeye taşıyacak yeni proje çalışmalarının öngörülebilir ve gerçekçi bir projeksiyonunu ortaya koymalıdır.

Öte yandan söz konusu teknoloji için yürütülecek proje çalışmalarının çok farklı disiplinleri tek potada eritecek ve endüstriyel paylaşımların kurulmasını mümkün kılacak bir yapıda kurulması önem arz etmektedir. Klinker üretimi ve yenilenebilir enerji sistemleri üzerine odaklanacak projelerin kırıcı ve öğütücü sistemleri, yanma teknolojileri, enerji yönetimi, biyokütle, yeşil hidrojen, dizelden elektriğe dönüşüm konularına odaklanan farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi faydalı olacaktır. Mevcut kırma, öğütme, taşıma, yüksek basınçlı hava ve benzeri ekipmanların enerji verimliliğinin artırılması ve/veya enerji verimli yeni ekipmanların tasarlanması, geliştirilmesi, modellenmesi, simülasyonu ve uygulama süreçlerinin optimizasyonu, kırma-küçültme-öğütme ve kinetik enerjilerin kullanılması üzerine odaklanacak projelerin ise kırıcı ve öğütücü sistemleri, enerji yönetimi, dizelden elektriğe dönüşüm konularına odaklanan farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılarla yönetilmesi gerekmektedir.

Otonom üretimi, yapay zekâ kullanımı konularında klinker üretiminde önemli bilgi ve know-how seviyesinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu aşamada sektörde bu bilgi ve tecrübenin en hızlı ve yaygın bir şekilde kullanımı ve transferine yönelik paylaşım çalışmaları önem arz etmektedir. Özellikle yurt dışında geliştirilen yeni teknoloji ve yaklaşımların en hızlı şekilde yerel üretim tesislerinde uygulamaya geçmesi için bilgi aktarım mekanizmalarının oluşturulması gerekmektedir. Benzer paylaşımlı ilişkinin yapı malzemeleri, yapı kimyasalları, kimyasal termodinamik, uygulamalı mineraloji gibi farklı disiplinler için kurulacak bir ortak çalışma platformu ile kurulması gerekmektedir.

Karbon yakalama, kullanım ve depolama üzerine odaklanacak projelerin ise yapı malzemeleri, yapı kimyasalları, kimyasal termodinamik, uygulamalı mineraloji gibi farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi faydalı olacaktır.

Alternatif çimento türlerinin geliştirilmesi üzerine odaklanacak projelerin yapı malzemeleri, yapı kimyasalları, kimyacılar gibi farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi ve endüstriyel paylaşımların kurulması faydalı olacaktır. Aynı zamanda farklı endüstrilerin de olası endüstriyel paylaşım fırsatlarını değerlendirebileceği ve geliştirebileceği ve farklı ölçeklerde proje iş birlikleri kurabileceği bir yapının oluşturulması gerekmektedir.

Üniversitelerde gerçekleştirilen yüksek lisans/doktora çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve Üniversite-Sanayi iş birliği destekleri arttırılmalıdır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önem arz edecektir. Uluslararası iş birlikleri ile

önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Ayrıca, üniversitelerin İnşaat, Kimya, Jeoloji ve Maden Mühendislikleri bölümlerinde, konuyla ilgili dersler veren akademisyenlerin ders kapsamlarına çevre dostu katkılı çimentolarla ilgili bölümleri eklemesi, geleceğin mühendislerinin bugünün ve yarının anlayışı olan sıfır atık anlayışıyla yetişmesi açısından faydalı olacaktır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önem arz edecektir. Uluslararası iş birlikleri ile önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır. Destek mekanizmaları kapsamında proje desteklerinde ek destekler sağlanması, gerekse projelerin gerçek ölçekli olmasına yönelik, başarılı sonuçların ortaya konulduğu noktalarda sağlanacak ve devam projelerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılacak bir teşvik mekanizmasının oluşturulması faydalı olacaktır. Farkındalığı en yüksek oranda arttırmak için uygulamalı etkinlikler önem arz etmektedir. Uygulama ve etkinlik konseptlerini belirlemek üzere çimento endüstrisinde faaliyet gösteren Ar-Ge Merkezleri ve akademisyenler ile iş birliklerinin kurulması faydalı olacaktır. Uygulamalı etkinlikler çimento fabrikaları bünyesinde önceden belirlenecek bölgelerde gerçekleştirilmesi yararlı bir yaklaşım olacaktır.

Destek mekanizmaları özelinde döngüsel ekonomi için artık bir zorunluluk olarak görülebilecek CCUS ve endüstriyel paylaşım kavramlarının gerek proje desteklerinde ek destekler sağlanması, gerekse projelerin ölçek büyütme potansiyellerine yönelik, başarılı sonuçların ortaya konulduğu noktalarda sağlanacak ve devam projelerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılacak bir teşvik mekanizmasının oluşturulması faydalı olacaktır. Bu noktada projeler için THS odaklı bir ek teşvik mekanizması oluşturularak proje boyunca veya proje sonrasında atlanacak her bir THS için ek teşvik sağlanması, nihai ürün niteliğinin yükseltilmesi noktasında yararlı bir yaklaşım olacaktır. Özel sektördeki kullanım için broşürler, videolar, eğitimler hazırlanmalı, çatı kuruluşlar ve odalar vasıtasıyla özellikler bayiler, müteahhitler, inşaat şirketleri prefabrik sektörü ve akademisyenlerle iletişim kurularak sektörel bilinç artırılmalıdır. Çimentonun en büyük tüketicisi olan hazır beton tesislerinde alternatif çimento türlerinin kullanımını arttırmaya yönelik teşvik mekanizmaları kurulmalıdır.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Hedeflenen teknolojinin mümkün kılınması noktasında en önemli hususlardan biri kamunun mevzuat düzenlemeleri ile izleme, engelleme, teşvik etme olgularını sağlam bir zemine oturabilmesidir. Döngüsel ekonomiye geçişte en önemli faktör olan net sıfır karbon hedefleri doğrultusunda klinker ve çimento üretiminde yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu ve yaygınlaşması, farklı çimento türlerinin, çimento yerine kullanılacak malzeme teknolojilerinin ve kimyasal katkıların geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına mevcut mevzuatlarda söz konusu

sistemlerin endüstriyel paylaşımlar çerçevesinde geliştirilmesini mümkün kılacak revizyonlar gerçekleştirilmelidir. Ayrıca karbon yakalama teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına atık yakımı ve inşaat ve yıkıntı atıklarının depolanması noktasında mevcut mevzuatlarda geri dönüşümü ve bu dönüşümü endüstriyel paylaşımlar çerçevesinde sağlamayı mümkün kılacak revizyonlar gerçekleştirilmelidir. Farklı çimento türlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına mevcut mevzuatların mevzuatlarda geri dönüşümü ve bu dönüşümü endüstriyel paylaşımlar çerçevesinde sağlamayı mümkün kılacak şekilde iyileştirilmesi ve teşviklerin verilmesi gerçekleştirilmelidir.

Dikkate alınması gereken bir diğer önemli husus ise ulusal karbon emisyon ticaret sisteminin kurularak proseslerde yapılacak olan iyileştirmelerden elde edilecek faydaların (karbon azaltımı) karbon kredilendirme süreci ile ödüllendirilerek teşvik edilmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda kamunun mevzuat düzenlemeleri ile izleme, engelleme, teşvik etme olgularını sağlam bir zemine oturması kaçınılmazdır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevcut mevzuatlar teknolojik ilerlemelerin sağlanması noktasında herhangi bir engel teşkil etmemesine rağmen yasal zorunluluklar ve teşvikler yoluyla gelişmelerin sağlanması noktasında revizyonlara ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada sınırda karbon ticareti esaslarının dikkate alınması, dögüsel ekonominin teşvik edilmesi, atıkların takibi ve geri dönüşümünün mümkün kılması, yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması ve endüstriyel paylaşımların kurulması ile ilgili düzenlemelerin ivedi bir biçimde mevzuatlarda yer alması ve ekonomik teşvik mekanizmalarının devreye sokulması gerekmektedir. Atık mevzuatının düzenli depolamayı kısıtlaması ve kontrollü atık toplama, arıtma ve alternatif yakıt üretiminin önünü daha fazla açacak şekilde düzenlenmesi halinde, fosil yakıtların alternatif yakıtlarla daha yüksek ikame oranları kolaylaştırılacaktır. Karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik alternatif çimento türlerinin kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik öncelikli faaliyet devlet kurumlarının finanse ettiği veya yürüttüğü projelerin şartnamelerinde CEM I veya Portland çimento ifadelerinin kaldırılarak, erken dayanım, nihai dayanım ve priz süresi gibi performans tabanlı spesifikasyonları dikkate alınarak güncellenmesi kritik önem taşımaktadır.

Teknik Altyapılar

Teknik altyapı noktasında her ne kadar Ar-Ge çalışmaları gerçekleştiren kamu ve özel kuruluşların yanı sıra üniversitelerde laboratuvar ölçeğinde çalışmalar sürdürülse de teknolojilerin endüstriyelleşmesi adına yatırım ve destekler doğrultusunda THS'lerin yükseltilmesi hayati derecede önem arz etmektedir. Mevcut durumda önemli oranda teknik alt yapı ve tecrübe birikimi bulunmaktadır. Bu tecrübelerin, inovatif gelişmelerin ve know-how'un en hızlı şekilde ülkemize transferi için alt yapının oluşturulması önemlidir.

İnsan Kaynakları

Hedeflenen teknolojinin mümkün kılınması amacıyla Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirmek adına üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağının olduğu düşünülmektedir. Öte yandan söz konusu tekniklerin bilimin kolektif yapısı altında yurtdışında bulunan üniversiteler ve araştırma enstitüleri ile kurulacak iş birlikleri ile hızlı ve efektif bir biçimde geliştirilmesinin sağlanması büyük bir katkı sağlayacaktır.

Destek ve Teşvikler

Hedeflenen teknolojiler için küçük ölçekte Ar-Ge çalışmaları ile başlayıp endüstriyel ölçekli projelere dönüştürülmesi noktasında en önemli husus üniversite-sanayi iş birliklerinin kurulacağı proje çalışmalarının gerçekleştirilmesidir. Bu noktada destek sağlayıcı kuruluşların bilimsel gelişmeyi daha hızlı bir biçimde elde etmeyi mümkün kılacak destek ve teşvik mekanizmaları ortaya koymaları, patent desteklerini arttırmaları, katma değeri yüksek ürünlerin pazara sürülmesinde teşvik mekanizmalarını sıklaştırmaları önem arz etmektedir. Devlet destekli veya teşvikli akademi – sanayi iş birliklerinin kurulması, farkındalık, eğitim ve uygulama etkinliklerinin bu iş birlikleriyle planlanarak yürütülmesi, konuyla ilgili hızlı harekete geçilmesi ve ülke çapında uygulama yaygınlığının artırılması için büyük önem arz etmektedir.

Diğer

Çimento fabrikalarında enerji tüketiminin büyük çoğunluğu termal süreçlerde gerçekleşmektedir. Termal süreçlerin elektrikli sistemlerle yürütüldüğü bir gelecekte, bir çimento fabrikasının ihtiyaç duyacağı elektrik enerjisi ihtiyacı konvansiyonel fabrikalardan daha yüksek olacaktır. Bu elektrik enerjisi ihtiyacı potansiyel olarak yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanabilse dahi, 24 saat üretim gerçekleştiren çimento fabrikalarının, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi yıl boyunca 24 saat kesintisiz enerji üretemeyen santrallerden beslenebilmesi için enerji depolama sistemlerine duyacağı ihtiyaç kaçınılmazdır. Günümüz pil teknolojilerinin, ağır sanayilerin enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz olduğu; yakın gelecekte de bu ihtiyacı karşılayamayacağı öngörülmektedir. Pillerde gerekli kapasite artışı teknolojik olarak sağlansa bile, mevcut rezerv verilerine göre bütün dünyada bu sistemleri hayata geçirebilecek yeterli miktarda lityum rezervi bulunmamaktadır.

İfade edilen nedenlerle ağır sanayilerin kesintisiz enerji ihtiyacını karşılamak için temiz enerji sınıfında değerlendirilen nükleer enerji konusunda yatırımlar yapılmalıdır. Dünyada 80 yıldır elektrik üretiminde kullanılmakta olan nükleer enerji (filyon) teknolojisi konusunda ülkemizi doğrudan ilgilendiren kritik gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmeler enerji üretim verimliliği düşük ve kirliliği yüksek olan uranyumun yerine daha verimli ve uranyuma göre çok daha az atık ortaya çıkmasına neden olan toryumun kullanımına yöneliktir. Türkiye dünyadaki toplam uranyum rezervinin %0,2'sine sahipken, toplam toryum rezervinin %5,9'una sahiptir. Bu açıdan

Türkiye'nin enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kurulacak yenilenebilir enerji tesislerinin, orta ve uzun vadede toryum yakıtlı nükleer santraller ile desteklenmesi önem arz etmektedir. Nükleer enerjiden elektrik üretimi konusunda çok daha yüksek verimlilikle çalışan ancak henüz teknolojik seviyesi laboratuvar aşamasında olan, geleceğin temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olma konusundaki en kuvvetli aday olan füzyon enerjisini göz ardı etmemek gerekir. Bu teknoloji üzerinde Çin ve ABD son yıllarda önemli aşamalar kaydetmiştir [20]. Henüz yeni sayılabilecek füzyon reaktörü teknolojilerinin araştırılması, bu alanda projelerin geliştirilmesi ve yatırımların yapılması, gelecekte ülkemizin enerji ihtiyacının oldukça önemli bir kısmının karşılanmasına ve bu enerjinin karbon nötr olarak elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

İkinci Bölüm Kaynakları

- [21] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Entegre Çevre İznine (Eçi) Tabi Çimento Üretim Tesislerinin Uyum Durumları ve Gerekliliklerinin Belirlenmesi Projesi Çimento Sanayi İçin Mevcut En İyi Teknikler (Met) Ulusal Kılavuzu, Mayıs 2016
- [22] Lehne, J., and Preston, F., 2018, Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs
- [23] Cementing the European Green Deal. Cembureau. 2020. https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf
- [24] Carbon Capture, Utilization and Storage. ABS. 2021. <https://absinfo.eagle.org/acton/media/16130/carbon-capture-whitepaper>
- [25] Technology Readiness and Costs of CCS. Global CCS Institute. 2021. www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/technology-readiness-andcosts-of-ccs/
- [26] Technology Scouting—Carbon Capture: From Today's to Novel Technologies. Concawe Review. 2021. Vol:29. No:2
- [27] <https://www.tarimorman.gov.tr/TADB/Menu/23/Alkol-Ve-Alkollu-Ickiler-Daire-Baskanligi>
- [28] <https://www.bunkerist.com/karbon-yakalama-ve-depolama/>
- [29] Carbon Dioxide Capture in Cement Industry, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Technical Report, 2008.
- [30] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı http://www.yegm.gov.tr/teknoloji/ccs_teknolojileri.aspx
- [31] Çimento Üretim Prosesinde Mikroalglerin CO2 Tutucu Olarak Kullanımı. Akçansa. https://www.imsad.org/files/fileman/Uploads/Documents/etkinlikler/Akcansa_Ismail_Gokal.pdf
- [32] <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2022/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW-2022.pdf>

Kritik Ürün/Teknoloji 3.1.

Beton ve çimento bağlayıcılı malzemelerin üretim sürecinde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik alternatif çimento türlerinin kullanımının yaygınlaştırılması için pilot uygulamalar ve teknolojilerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

Enerji tasarruflu, düşük karbonlu, farklı katkıları içeren çimento tiplerinin kompozisyon tasarımı ve pilot çalışmaları

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

TürkÇimento 2021 istatistiklerine göre Türkiye’de satılan çimentoların %56,4’ü CEM I sınıfı olan Portland çimentosu, %43,6’sı ise katkılı çimentolardan oluşmaktadır [33]. Portland çimentosunun en az %95’i klinker adı verilen termal proses ürününden oluşmaktadır. Bu nedenle çimento üretiminde mineral katkıların yardımıyla klinker faktörü düşük fakat performansı sabit olan katkılı çimentolar üretilmesi ve beton sektöründe yaygınlaştırılması büyük önem arz etmektedir. Ayrıca çimento üretimi, karbondan arındırılması en zor endüstriyel faaliyetlerinden biridir. Çimento üretimi sırasında salınan CO₂ miktarının çok güçlü bir çevresel etkisi vardır [34]. Çimento endüstrisi toplam sera gazlarının %5 ila %8’inden sorumludur [35]. Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının iki ana kaynağı vardır. Bunlardan birincisi CaCO₃, 550°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda CaO ve CO₂’ye ayrıştığı için kireçtaşının karbondan arındırılmasıdır. Bu süreç toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %50’sini temsil etmektedir [36]. İkinci olarak da çimento fırınına ısıtmak için fosil yakıt yakma işlemi toplam emisyonların yaklaşık %40 ’undan sorumludur [37]. Bu nedenle, 2030 Birleşmiş Milletler (BM) gündemi kapsamında çimento endüstrisinin giderek artan CO₂ emisyonu nedeniyle daha düşük ekolojik ayak izine sahip bağlayıcılar geliştirmesi hedeflenmektedir [38]. Kasım 2021’de Glasgow’da düzenlenen 26. BM İklim Değişikliği Taraflar Konferansı’ndan (COP26) çevresel sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği kontrolü gündemleriyle çimento endüstrisi bu temel tartışmada önemli bir oyuncu olduğu kanaatine varılmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA) yol haritası kapsamında 2050 yılına kadar küresel çimento endüstrisinden kaynaklanan toplam CO₂ emisyonlarının %24 oranında azaltılması hedeflenmektedir. ^{Hata! Yer işareti tanımlanmamış.} Bu nedenle, çimentonun en çok kullanıldığı yapısal beton uygulamalarında (C25 ve üzeri dayanım sınıfı betonlar), prefabrik beton üretiminde, çimento esaslı yapı elemanları üretiminde (beton parke, bordür, boru, bims blok vb.) karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik alternatif çimento türlerinin kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Düşük erken dayanım, yavaş dayanım

gelişimi, görece yüksek su ihtiyacı ve düşük işlenebilirlik, kür koşullarına karşı (sıcaklık ve nem) hassasiyet vb. unsurlar bu tür çimentoların kullanımını ve tercih edilirliliğini kısıtlayabilmektedir. Bu kısıtların giderilmesine yönelik teknolojilerin geliştirilmesine ve bu teknolojilerin kullanımının saha şartlarında gösterilmesini içeren pilot uygulamalara ihtiyaç bulunmaktadır. Hali hazırda yapısal beton uygulamaları, prefabrik beton, çimento esaslı yapı elemanları ve çimento esaslı yapı kimyasalları alanında çeşitli performans özellikleri nedeniyle genellikle klinker içeriği %80 ve üzerinde olan CEM I ve CEM II tipi çimentolar tercih edilmektedir. Yukarıda belirtilen kısıtlardan oluşan çekinceler nedeniyle çoğunlukla klinker içeriği daha düşük çimento tipleri kullanılmamaktadır. Bu nedenle, düşük karbon ayak izine sahip alternatif çimento tiplerinin yaygınlaşması gerekmektedir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

Küresel CO₂ emisyonlarına ilişkin artan endişeler nedeniyle, son yıllarda birçok farklı tipte alternatif çimentolar önerilmiştir. Alternatif çimento türlerine reaktif belit çimento (RBPC), Belit ferrit ye'elimite çimento (BYF), karbonatlı kalsiyum silikat çimento (CSC), magnezyum oksit çimento (RMC), Kalsiyum sülföalüminat-belit çimentosu (CSAB), Borlu aktif belit çimentosu vb. örnek verilebilir. RBPC, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla farinde daha düşük miktarlarda kireçtaşı ve ayrıca daha düşük klinkerleme sıcaklıkları gerektirir. Bu arada, RBPC ile yapılan beton kürlenirken daha az ısı üretir, bu da daha düşük büzülme ve çatlamaya karşı daha yüksek direncin yanı sıra yüksek ileri yaş dayanımları ile elde edilebilir [39]. Ayrıca, CO₂ emisyonlarını yaklaşık olarak %6 azaltabilir. BFY yavaş reaktivitesinden dolayı düşük mekanik dayanım gösterirler. Son yıllarda BFY çimentolarının dayanımına artırmaya yönelik çalışmalar yapılmış ve başarılı olmuştur [40]. BFY %15-20 oranında geleneksel Portland çimentosuna göre daha az CO₂ üretebildiği literatürden bilinmektedir [41]. Bu çimentodaki ana hidrasyon ürünü olan etrenjitin genleşmesi bazen çatlamaya neden olabilmektedir fakat bu genleşmenin çimentodaki fiziksel ve kimyasal faktörlerin değiştirilmesiyle kontrol edilebildiği son çalışmalarda gösterilmiştir [42]. CSC çimento, karbonatlaşma reaksiyonu üzerine sertleşen yeni geliştirilmiş bir bağlayıcıdır. Karbonatlaşmaya tabi tutulduğunda, CSC hamuru, kararlı karbonatlar biçiminde %17'ye kadar CO₂ depolayabilme kapasitesine sahiptir [43]. Düşük üretim sıcaklığı ve azaltılmış kireçtaşı gereksinimleri ile birlikte CO₂ depolama kapasitesi göz önüne alındığında, CSC betonunun toplam CO₂ ayak izinin geleneksel Portland çimentosuyla üretilen betonunkinden yaklaşık %70 daha az olduğu bildirilmiştir [44]. RMC, Portland çimentosuna göre daha düşük sıcaklıklarda (700-1000°C) üretilebilmektedir. MgO'nun bir dizi karbonat ve hidroksikarbonat oluşturmak için atmosferden CO₂'yi absorbe etme yeteneğine sahip olup hizmet ömürleri boyunca üretimleri sırasında saldıkları kadar CO₂ emebilme potansiyeline sahiptir. Bu özelliği hem akademik hem de ticari olarak ilginin artmasına neden olmuştur [45]. CSAB daha düşük enerji kullanımı ve üretim sırasında yayılan CO₂ nedeniyle

Portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif olarak tanıtılmaktadır. CSAB çimentosu, Portland çimentosu üretimi için kullanılan sıcaklıktan yaklaşık 200°C daha düşük olan ortalama 1250°C'deki sıcaklıkta üretilebilir [46]. Literatürdeki çimento türlerinden farklı olarak, karbon ayak izini azaltacak yeni çimento türlerinin geliştirilmesi kısa ve uzun vadede Ar-Ge çalışmaları yapılarak performanslarının belirlenmesi ve pilot uygulamalarının gerçekleştirilmesi çimento endüstrisinden kaynaklanan toplam CO₂ emisyonlarının azaltılmasında fayda sağlayacaktır. Ayrıca, alternatif çimento türlerinin özel uyumluluğa sahip kimyasal katkı malzemelerinin (su azaltıcı, priz hızlandırıcı, sertleşmeyi hızlandırıcı katkıları vb.) geliştirilmesi ve hem laboratuvar hem de saha koşullarındaki pilot uygulamalarda yapısal beton uygulamaları için test edilmesi önem arz etmektedir. Uzun vadeli olarak, alternatif çimento türleri ile üretilen çimento esaslı malzemelerin farklı iklim/ortam koşullarında (sıcaklık, nem, rüzgâr) dayanım gelişimi ve diğer performans özelliklerinin tespitine yönelik Ar-Ge çalışmaları ve pilot uygulamalar gerçekleştirilmesi CO₂ emisyonlarının azaltılmasında faydalı olacaktır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

THS		Teknoloji Konusu
Dünya	Türkiye	
7	-	Enerji tasarruflu ve düşük karbonlu rankinite klinkerleri çimentonun kompozisyon tasarımı ve pilot çalışması
8	8	Düşük karbonlu, farklı katkıları içeren çimentonun sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi ve pilot üretimi

Yüksek miktarlarda mineral katkı içeren karbon ayak izi düşük çimentoların üretiminin hem dünyada hem de ülkemizde gerçekleştirildiği bilinmektedir. Öte yandan bu tür çimentoların düşük erken dayanım, işlenebilirlik problemleri, priz süresindeki muhtemele gecikmeler vb. kısıtlardan dolayı kullanımlarının istenilen düzeyde yaygınlaşmamaktadır. Türkiye’de 2021 yılı verilerine göre iç satışların çimento tiplerine göre dağılımı Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Türkiye’de iç satışların çimento tiplerine göre dağılımı

Türkiye	
CEM I	%56,42
CEM II	%32,81
CEM III	%0,61
CEM IV	%8,45
CEM V	%1,30
Diğer	%0,42

Tablodan anlaşılacağı üzere 2021 yılı verilerine göre ülkemizde yaygın satış %56,42 ile CEM I tipi çimentoya, bir başka adıyla Portland çimentosuna aittir. Katkılı çimento satışı ise toplam %43,58’tür. Dünyada alternatif çimento türlerinin kullanımına dair gerçekleştirilen projelerde genel olarak farklı THS seviyelerine sahiptir. Ülkemizde karbon ayak izi düşük

alternatif çimentoların beton ve diğer çimento esaslı sistemlerde kullanımına yönelik THS 4-5 olan laboratuvar aşamasında projeler gerçekleştirildiği, bu tür çimentoların görece düşük erken dayanım ve yavaş dayanım gelişimi problemini çözmek üzere çeşitli teknolojik yaklaşımların (beton karışımlarında nano-taneciklerin kullanımı, sistemle özel uyumlu kimyasal katkıların seçilerek kullanımı, vb.) denendiği bilinmektedir. Dünyada karbon ayak izini azaltacak alternatif çimentolarla (LC3) ilgili projelerde THS 8'e kadar ulaşan ve son aşamaya yaklaşmış projeler olduğu bilinmektedir. Ülkemizde bu yöndeki projelerin çoğu THS 4-6 aralığında bulunmakta olup, endüstriyel üretim noktasına geldiğini duyuran (THS 8) bir çimento üreticisi bulunmaktadır.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

BYF çimentolarının endüstriyel ölçekte üretiminin fizibilitesi iki çimento fabrikasında gösterilmiştir [47]. Bu fabrikalarda yapılan ölçümlerde, %25 ile %30 arasında CO₂ tasarrufunu doğrulamıştır. Ayrıca BFY çimentosu farklı tiplerde betonlarda kullanılmıştır [48]. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar dayanım ve dayanıklılık açısından bu yeni karbon ayak izini azaltan çimentoların kullanım özelliklerinin geleneksel Portland çimentosuna çok yakın olduğunu gösterilmiştir. CSC çimentosu Solidia çimento olarak da bilinmektedir ve Solidia şirketi bu çimento ile ilgili birçok uluslararası kuruluş ve üniversitelerle çalışmalar yapmaktadır. RMC çimentosu Türkiye'de soral çimentosu olarak da bilinmektedir ve TS 1769 standardında özellikleri ve numune alma işlemleri tanımlanmıştır. Ayrıca Türkiye'de bir firma 2022 yılı içerisinde borlu çimento için sanayi ölçekli üretime geçilmeyi planlamaktadır. Oyak çimento Portland çimentosuna göre %50 daha az karbon emisyon değeri bulunan Alfacem'i üretmiştir ve bu çimento G uygunluk belgesi almıştır.

D. Zaman ve Bütçe Tahminleri¹

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

Arge Konusu	Hedeflenen Süre	Tahmini Bütçe	THS
Alternatif çimento türlerinin laboratuvar ölçeğinde üretilmesi	Kısa Vade	2 Milyon TL	THS 4
Alternatif çimento türlerinin endüstriyel ölçekli uygulamalarının gerçekleştirilmesi	Orta Vade	15 Milyon TL	THS 7

Kritik Ürün/Teknoloji 3.2.

Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin ve hammaddelerinin üretim ve bakım sürecinde endüstriyel kaynaklı atık ısı ve karbondioksit emisyonlarının kullanımı ve değerlendirilmesine yönelik çözümlerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

Karbon dioksit ile küremeye yönelik endüstriyel çözümler üretilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Karbon dioksit ile küremeye yönelik endüstriyel çözümler üretilmesi

Beton elemanların kontrollü basınç ve sıcaklık altında karbon dioksit difüzyonu ile kürlenmesi, hızlandırılmış kürlenmenin popüler yöntemlerinden biridir. İşlem, CO₂'nin betona yayılmasını ve karbonatlaşmaya uğramasını sağlar. Karbonatlaşma sonunda termodinamik olarak kararlı kalsiyum karbonat ürünleriyle sonuçlanır.

Dünyadaki yıllık CO₂ emisyonlarının %5-8'inin çimento üretimine bağlı olduğu tahmin edilmektedir [49]. Endüstri, 2050 yılına kadar emisyonları 2006 yılına oranla %50 azaltmak için çimento ve beton özelinde bir dizi yenilikçi yaklaşımı araştırmakta ve bazılarını uygulamaktadır [50]. Bununla birlikte, bu önlemlerin etkileri üzerindeki pratik sınırların, hedefe ulaşmanın zor olacağı anlamına geldiği açıktır [51].

En güncel uygulamalardan birisi ise beton üretiminde CO₂ kullanımudur. CO₂, adeta kimyasal katkı gibi bir beton bileşeni olarak beton üretiminde kullanılabilir. Hidrate olmuş çimentonun karbonatlaşma mekanizması 1970'lerden beri incelenmektedir. Çimentodaki ana kalsiyum silikat fazlarının su varlığında karbondioksit ile reaksiyona girdiği, kalsiyum karbonat ve kalsiyum silikat hidrat jeli oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çimento hamurunda bulunan kalsiyum hidroksit, yine ortamda su bulunduğunda, karbondioksit ile reaksiyona girmektedir.

Karbonatlaşma reaksiyonları ekzotermiktir. Çimento fazlarından gelen Ca⁺² iyonları, betona nüfus edip su içerisinde çözünen karbondioksitin oluşturduğu CO₃ iyonları ile etkileşime girmektedir. Ana kalsiyum silikat fazları için karbonatlaşma ısıları C₃S için 347 kJ/mol, C₂S için 184 kJ/mol ve Ca(OH)₂ için 74 kJ/mol'dür [52]. Kalsiyum silikatlar karbonatlaştığı zaman, oluşan CaCO₃'ün kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli ile karıştırıldığı anlaşılmaktadır [53].

Karbondioksitin olgunlaşmış beton mikro yapısı ile reaksiyonunun geleneksel olarak karbonatlaşmaya neden olduğu ve bunun sonucunda beton içindeki donatıda oluşan korozyon nedeniyle bir dayanıklılık sorunu meydana geleceği kabul edilmektedir. Buna karşılık, beton üretimine entegre edilen bir karbonatlaşma reaksiyonu, CO₂'yi betonda bulunan hidrasyon fazlarından ziyade yeni hidrate olmuş çimento ile reaksiyona sokmaktadır ve aynı etkilere

sahip değildir. Aksine, yeni karıştırılan betona gaz halinde CO₂ ilave edilmesi sayesinde karbonatlaşma reaksiyonu ürünlerinin yerinde oluşması beklenir, ayrıca nano ölçekli ve homojen olarak dağılır [54].

Karbon kür teknolojisi en basit şekilde karbondioksit gazının betona karıştırma esnasında ilave edilmesi olarak özetlenebilir. Bu sayede CO₂'in çimento ile reaksiyona girip nano-kristal CaCO₃ oluşturması sağlanır. Betona CO₂ ilave edilmesi beton performansında ve maliyetinde olumlu neticeler vermekten öte en büyük faydası çevreci bir üretime neden olmasıdır. Çimento üretimi başta olmak üzere beton üretiminde açığa çıkan CO₂ emisyonu bu sayede bir miktar düşürülebilmektedir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

THS		Teknoloji Konusu
Dünya	Türkiye	
9	-	CO ₂ ile beton kürleme
4	-	Biyokütle karbonizasyonu yoluyla atmosferik karbon giderme ve karbon tutma için potansiyellerin, yan etkilerin ve sinerji etkilerinin analizi
8	-	Karbon yakalama ve depolama ile biyoenerji

Söz konusu teknolojiler dahilinde dünyada THS seviyesi 4-5 ve 8-9 aralığında seyretmektedir. Ülkemizde bu yönde bir proje çalışması bulunmamaktadır.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

Karbon kür teknolojisi ABD ve Kanada’da etkin bir şekilde uygulanan Karbon kür (CarbonCure) sistemi kullanılarak betona hassas bir şekilde karbondioksit enjekte edilmesi sonucu betonun 28 günlük basınç dayanımında %10'luk bir artış görülmektedir. Karbon ile kür edilmiş ve çimento içeriği %7 azaltılmış betonun dayanım performansı karbondioksit içermeyen kontrol beton dayanımı ile eşdeğerdir.

Solidia Technologies ile ortaklığının bir parçası olarak Holcim, tescilli bir beton karışımı tasarımı ve CO₂ kullanan özel bir kürleme süreci ile birlikte geleneksel Portland Çimentosundan %70'e kadar daha düşük karbon ayak izine sahip bir beton oluşturan azaltılmış bir CO₂ çimentosu geliştirmiştir. Bu bağlamda su yerine CO₂ ile kürleme teknolojisinin yanı sıra, CO₂'yi betona hapsedilerek %50 daha düşük CO₂ ayak izi sağlanmaktadır. Teknolojiyi kullanan prekast şirketleri, çiçeklenme olmaması ve daha canlı renkler sayesinde beton ürünlerin estetiğinin iyileştiğini göstermiştir. Ayrıca, sadece 1 günden kısa sürede nihai beton dayanımına ulaşılması sayesinde maliyet düşüşü ve üretim kapasitesinde artış elde edilmiştir. Biyokütle ile birleştirildiğinde CCS'nin net negatif emisyonlara yol açması mümkündür. Birleşik Krallık'taki Drax elektrik santralindeki odun ateşlemeli bir üniteye karbon yakalama ve depolama (BECCS) ile biyoenerji denemesi 2019'da başladı; başarılı olursa, atmosferden

günde bir ton CO₂ çıkarabilir. Drax BECCS kapsamında, termik santralde, karbon yakalama ve depolama operasyonları dahilinde, ilk pilot tesis, C-Capture'ın CO₂ yakalama teknolojisini kullanarak 2019'da çalışmaya başlamış ve günde bir ton CO₂ yakalama kapasitesine sahiptir. İkinci pilot tesis, 2020'de Mitsubishi Heavy Industries'in teknolojisini kullanarak başlamış ve günde yaklaşık 300 kg CO₂ yakalamaktadır. Bu proje ile biyokütle ve CCS'den yenilenebilir elektrik üretimini gerçekleştirilerek, 2027 yılına kadar dünyanın ilk karbon nötr termik santrali olunması hedeflenmektedir.

CO₂'nin depolanması ya derin jeolojik oluşumlarda ya da mineral karbonatlar şeklinde düşünülmektedir. Pirojenik karbon yakalama ve depolama (PyCCS) da araştırılmaktadır. Derin okyanus depolaması, okyanusu asitlendirebileceği ihtimaliyle kullanılmaz. Jeolojik oluşumlar şu anda en umut verici tecrit bölgeleri olarak kabul edilmektedir. ABD Ulusal Enerji Teknolojisi Laboratuvarı (NETL), Kuzey Amerika'nın mevcut üretim oranlarında 900 yıldan fazla karbondioksit için yeterli depolama kapasitesine sahip olduğunu bildirdi. Genel bir sorun, denizaltı veya yer altı depolama güvenliği ile ilgili uzun vadeli tahminlerin çok zor ve belirsiz olması ve yine de bir miktar CO₂'nin atmosfere sızma riskinin olmasıdır.

D. Zaman ve Bütçe Tahminleri¹

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

Arge Konusu	Hedeflenen Süre	Tahmini Bütçe	THS
Biyokütle karbonizasyonu yoluyla atmosferik karbon giderme	Kısa Vade	250 bin USD\$	THS 4
Karbon yakalama ve depolama ile biyoenerji	Uzun vade	1 Milyon USD\$	THS 8

Kritik Ürün/Teknoloji 3.3.

Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerin üretim sürecinde çimento kullanımını azaltmaya ve dayanıklılığı/kalıcılığı artırmaya imkân sağlayacak malzeme ve süreçlerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

3.3.a. Klinker ve çimento üretim girdileri olarak farklı endüstriyel atıklara yönelik endüstriyel paylaşım analizinin gerçekleştirilmesi, değerlendirilebilecek olası atıkların saptanması ve kullanıma uygun hale getirilmesine yönelik ön işlemlerin geliştirilmesi, mevcut katkıların kullanım miktarlarının artırılması ve/veya alternatif çimento bileşenlerinin araştırılması ve geliştirilmesi

3.3.b. Çimentoya alternatif hammaddelerin yüksek oranda kullanımının çimento ve beton üretiminde kullanılmasına yönelik teknolojik çözümlerin geliştirilmesi, yaygın olarak kullanılmakta olan mineral katkıların yerine alternatif puzolan kaynaklarının araştırılması ve kullanılmasına yönelik süreçlerin ve teknolojik çözümlerin geliştirilmesi

3.3.c. Çimento ve beton için sürdürülebilirliğe katkı sağlayan yeni nesil kimyasal katkıların geliştirilmesi ve yapının servis ömrü ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik özel betonlar tasarlanması

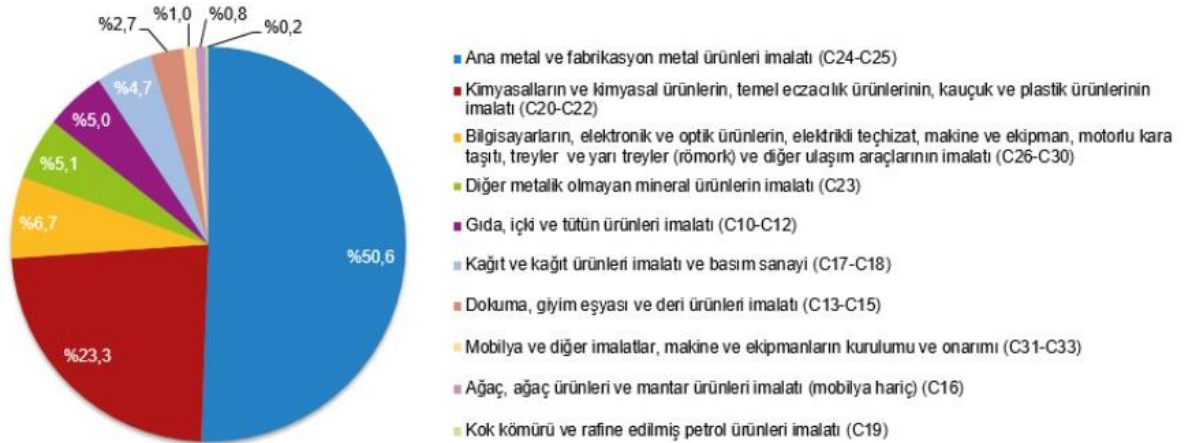
A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

3.3.a. Klinker ve çimento üretim girdileri olarak farklı endüstriyel atıklara yönelik endüstriyel paylaşım analizinin gerçekleştirilmesi, değerlendirilebilecek olası atıkların saptanması ve kullanıma uygun hale getirilmesine yönelik ön işlemlerin geliştirilmesi, mevcut katkıların kullanım miktarlarının artırılması ve/veya alternatif çimento bileşenlerinin araştırılması ve geliştirilmesi

Çimento üretiminde “Kategori 1” olarak tanımlanan doğrudan karbon emisyonunun iki kaynağı bulunmaktadır. Bunlardan ilki açığa çıkan emisyonun %50’sinden fazlasından sorumlu olan kireçtaşının yüksek sıcaklıkta karbon salınımına neden olduğu proses emisyonudur. Diğeri ise fırın reaksiyonları için gerekli sıcaklığa ulaşmak için yakılan yakıtlardan kaynaklanan termal emisyonudur. Yarı ürün klinker üretimine ait olan bu emisyonlar yaklaşık 800-850kg CO₂/ton klinker düzeyindedir.

Dünya nüfusunun sürekli artmasına paralel olarak artan tüketim talebi, sınırlı olan hammadde kaynaklarının hızla azalmaya başlamasına neden olmaktadır. Doğal kaynakların giderek azaldığı günümüzde endüstrilerde oluşan atıkların depolanması doğamızı ve yaşam ortamlarımızı ciddi oranda tehdit etmesinin yanı sıra oluşan sosyal ve ekonomik riskler ile ciddi çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Mevcut kaynakların daha ekonomik bir şekilde gerekliliğinin yanı sıra sürdürülebilir üretim artık çağımızda zorunluluktur. Çimento sektörü enerji ve hammadde tüketimi yoğun olan sektörlerden biridir. Çimento üretiminde ara ürün olan klinker üretimi için gerekli olan hammaddelerin üretimi, kalsinasyonu ve sinterleşmesi sırasında direkt ve/veya dolaylı karbondioksit salımları oluşmaktadır. Her türlü kaynağın tüketimi aynı zamanda enerji tüketimi anlamına gelmektedir. Hammaddelerin elde edilmesinden itibaren kaynakların verimli kullanılması bütüncül bir bakış ile bakılarak endüstriler arasında paylaşım ilişkileri kurulmasını gerektirmektedir. Klinker üretim prosesindeki yüksek sıcaklık diğer sektörlerden kaynaklı atıkların doğamız için istenmeyen içeriklerini bertarafına olanak sağlayabilir. Bu nedenle çimento sektörü endüstriyel paylaşım için kritik öneme sahiptir. Klinker üretimi sırasında homojen hammadde kullanımı prosesin sürekliliği verimliliği açısından çok önemlidir.

TÜİK verilerine göre 2020 yılında imalat sanayi kaynaklı, 4,59 milyon ton tehlikeli ve 19,27 milyon ton tehlikesiz olmak üzere toplam 23,86 milyon ton atık üretilmiş olup, toplam atığın %6'sı diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı sektörüne aittir [55]. İmalat sanayi kaynaklı atık oluşumunun sektörel bazda dağılımı Şekil 3.4'te verilmiştir.



Grafikteki rakamlar, yuvarlamadan dolayı toplamı vermeyebilir.

Şekil 3.4. 2020 Yılı İmalat Sanayi Atık Miktarlarının Dağılımı

Çimentonun en çok tüketildiği alanların başında gelen ve yapısal uygulamalarda kullanılan hazır beton üretiminde genellikle CEM I tipi ürünler tercih edilirken daha düşük klinker içerikli katkılı çimentolar bazı kısıtları nedeniyle yeterince yaygın kullanılamamaktadır. Çimento üretim sürecinde karbon ayak izinin azaltılmasında en çok öne çıkan yaklaşımlardan birisi olan çimentoların klinker içeriğinin mineral katkılarla azaltılmasının önünde bulunan kısıtların ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi için alternatif çimento mineral bileşenleri,

potansiyel endüstriyel atıklar, çimento üretimine özel kimyasal katkıları ile bunların üretimde kullanımına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır.

Çimento içerisindeki klinker miktarını azaltmak CO₂ emisyonları azaltmak için önem arz etmektedir. Bu noktada çimento üretimi sırasında klinkerin azalması CO₂'in azaltılması hedefine ulaşabilmek adına faydalı olacaktır.

Çimento sektöründe TS EN 197-1 standardına göre klinker dışında çimento bileşeni olarak hali hazırda ülkemizde sıklıkla kullanılan/kullanılabilen endüstriyel atıklar yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu küllerdir. Bunların dışında son yıllarda mermer endüstrisi atıklarının, inşaat yıkıntı atıklarının, atık yakma tesisi küllerinin (evsel atık yakma, tarımsal atık yakma vb.) çimento bileşeni olarak kullanımına yönelik çalışmaların ve kısıtlı sayıda uygulamanın olduğu bilinmektedir.

Çimento bağlayıcı yapı malzemelerinin uzun ömürlü olması büyük çevresel faydalar sağlamaktadır. Bu sayede gelecekteki çimento ihtiyacı makul seviyede tutulabilir. Dayanıklılığı düşük ürünler gelecekteki çimento ihtiyacının aşırı artmasına yol açmaktadır. Bu nedenle çimento bağlayıcı malzemelerde dayanıklılığının artırılması çok önemli faydalar sağlayacaktır.

3.3.b. Çimentoya alternatif hammaddelerin yüksek oranda kullanımının çimento ve beton üretiminde kullanılmasına yönelik teknolojik çözümlerin geliştirilmesi, yaygın olarak kullanılmakta olan mineral katkıların yerine alternatif puzolan kaynaklarının araştırılması ve kullanılmasına yönelik süreçlerin ve teknolojik çözümlerin geliştirilmesi

Türk Çimento istatistiklerine göre [55] 2021 yılında 2020 yılına kıyasla çimento üretimi %9,2 azalırken, üretimde alternatif hammadde kullanımı 1,6 milyon tondan 2,8 milyon tona yükselmiştir. Çimento hammaddesi olan doğal kireç taşı, marn ve kil gibi bileşenleri içeren belirli atıklar, çimento üretiminde alternatif hammadde olarak kullanılmakta olup madencilik atıkları, termik santrallerden çıkan uçucu küller, vitrifiye atıkları, ısıtma işlem atıkları ve inşaat atıkları bunlara örnek olarak verilebilir. Bünyesinde CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve SO₃ gibi bileşenler barındıran atıkların çimento endüstrisinde yüksek oranda kullanımının CO₂ emisyonlarını azaltmak açısından ihtiyaç olduğu bilinmektedir.

Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından hazırlanan Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberinde, Türkiye'de üretilen farklı dayanım sınıfındaki betonları ortalama reçeteleri belirtilmiştir [56]. Tablo 3.2'de görüleceği üzere 2020 yılında üretilen betonlarda ortalama 290,5 kg çimento, 22,7 kg uçucu kül ve 14,6 kg yüksek fırın cürufu kullanılmıştır.

Tablo 3.2. Türkiye'de üretilen farklı dayanım sınıfındaki betonları ortalama reçeteleri

Ortalama Beton Reçetesi

Bileşen	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	Ağırlıklı Ortalama
Ort. Çimento Miktarı (kg/m ³)	263,8	288,1	321,1	355,3	382,8	290,5
Ort. Uçucu Kül Miktarı (kg/m ³)	18,8	23,6	28,2	23,7	24,5	22,7
Ort. Cüruf Miktarı (kg/m ³)	11,2	14,7	16,8	19,6	27,6	14,6
Ort. İri Agregat Miktarı (kg/m ³)	871,0	877,3	883,6	898,0	912,6	878,0
Ort. İnce Agregat Miktarı (kg/m ³)	1019,6	1003,1	957,1	918,9	901,6	995,5
Ort. Su Miktarı (kg/m ³)	166,9	163,1	160,9	159,1	157,4	163,6
Ort. Kimyasal Katkı Miktarı (kg/m ³)	3,3	4,0	4,5	5,1	5,4	4,0
Ort. Birim Ağırlık (kg/m ³)	2354,6	2374,0	2372,2	2379,7	2411,9	2368,8

Beton ve diğer çimento bağlayıcılı malzemelerde çimento kullanımını azaltmaya ve dayanıklılığı artırmaya imkân sağladığı bilinen bazı teknik ve teknolojiler aşağıda sıralanmıştır:

- Karışımdaki Portland çimentosunun belirli miktarda mineral katkı malzemeleri (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, ham veya kalsine doğal puzolanlar vb.) ile ikame edilmesi,
- Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemelerinin yardımıyla belirli bir işlenebilirlik ve dayanım için gerekli su/çimento oranının ve çimento dozajının azaltılması,
- Karışım tasarımı üzerinde yapılan optimizasyon (agrega gradasyonu, agrega ve bağlayıcı malzemelerin bütüncül olarak tane boyut dağılımının ayarlanması yoluyla en yüksek doluluk oranlarına ulaşılması, en büyük agrega dane çapının mümkün olan en büyük değerde seçilmesiyle agrega yüzey alanının azalması),
- Yüksek oranda mineral katkı içeren betonların karakteristik basınç dayanımının 28 gün yerine daha ileri yaşlarda test edilmesi.

Yukarıda belirtilen yaklaşımlardan her biri beton ve diğer çimento bağlayıcılı malzemelerde çimento içeriğinin azaltılmasına belirli ölçüde katkı sağlamaktadır. Öte yandan her bir yönetsel yaklaşımın karışımların çimento içeriklerini azaltma potansiyeli belirli nedenlerle kısıtlanmaktadır. Çimento ikame malzemesi olarak kullanılan mineral katkıların fiziksel ve kimyasal özelliklerine, puzolanik aktivitelerine ve kullanım oranlarına bağlı olarak çimento esaslı ürünlerin taze ve sertleşmiş durumdaki özellikleri (işlenebilirlik, priz süresi, dayanım gelişim hızı, nihai dayanım vb.) olumsuz etkilenebilmektedir. Bu olumsuzluklardan bazıları çeşitli kimyasal katkıların kullanımıyla telafi edilebilmekte ise de özellikle yüksek mineral katkı ikame oranlarında kimyasal katkıların performansı yetersiz kalabilmekte veya ürün maliyetini oldukça yüksek noktalara çıkarabilmektedir. Ayrıca karışım tasarımı optimizasyonu için geleneksel yaklaşımların etkinliği yüksek miktarda mineral katkı içeren çimento esaslı malzemelerde çeşitli nedenlerle kısıtlı kalmaktadır. Dolayısıyla beton ve diğer çimento

bağlayıcı malzemelerde çimento içeriğinin azaltılması, dayanıklılığının artırılması için yukarıda belirtilen yöntemlerin mevcut durumlarına göre daha etkin hale getirilerek geliştirilmelerine, bunlar dışında yenilikçi malzeme ve süreçlere ihtiyaç bulunmaktadır.

Mineral katkıların beton ve çimento esaslı malzemelerde kullanımının yaygınlaşmasında bariyer teşkil eden hususlardan birisi mineral katkı malzemelerinin su ihtiyacı ve puzolanik aktivite başta olmak üzere karakteristik niteliklerindeki muhtemel zayıflıklardır. Yüksek su ihtiyacı ve erken yaşlarda yavaş ilerleyen puzolanik aktivite süreci mineral katkıların kullanıldığı çimento esaslı malzemelerin niteliklerini de zayıflatabilmektedir. Dolayısıyla mevcut durumda çimento esaslı malzemelerde kullanılmakta olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi mineral katılara alternatif oluşturacak, su ihtiyacı düşük, puzolanik aktivitesi yüksek, görece daha erken yaşlarda dayanım aktivitesi gösterebilen kısaca yüksek performanslı olarak tanımlanabilecek alternatif puzolan kaynaklarının araştırılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca bu alternatif puzolan kaynaklarından enerji, maliyet ve emisyon verimli süreçlerle elde edilecek yüksek performanslı alternatif çimento ikame malzemelerinin geliştirilmesi de ihtiyaç olarak göze çarpmaktadır. Söz konusu çimento alternatiflerinin yeterli miktarda ve homojenlikte temininin sağlanabilmesi de bir diğer dikkat edilmesi gereken husustur.

3.3.c. Çimento ve beton için sürdürülebilirliğe katkı sağlayan yeni nesil kimyasal katkıların geliştirilmesi ve yapının servis ömrü ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik özel betonlar tasarlanması

Bugün için klinkeri üretim teknolojisi ekolojik şartları zorlamaktadır. Enerji tüketimi ve doğal kaynak kullanımı çok fazladır ve karbondioksit emisyonu da bir hayli yüksektir. Bu sebeple, günümüzde de çalışmaları yoğun olarak devam eden mineral katılı çimento yaklaşımı ile çimento üretimi ekolojik olarak daha kabul edilebilir bir seviyeye gelmektedir. Bu yöntem; daha az klinker kullanımı, dayanıklılığın iyileştirilmesi ve atık malzemelerin kullanımı ile geri dönüşümün sağlanması gibi birçok fayda sağlamaktadır. Geleneksel mineral katılar; yüksek fırın cürufu, kalker, uçucu kül ve doğal puzolanlar gibi malzemelerdir. Her ton çimentoda gerçekleşecek CO₂ emisyonunun düşürülmesi için alternatif hammadde kullanımının sağlanması sürecinde mineral katkı maddelerinin yanı sıra çimento üretiminde ve beton mukavemetinde fayda sağlayan kimyasal katkıların da yoğun kullanımı gerekmektedir.

Klinkerin öğütülebilirliği, klinkerin öğütme kuvvetlerine karşı gösterdiği direnç ile ölçülür. Klinkerin öğütülmesi için gereken enerji miktarının tahmin edilmesinde, alınan incelik değeri önemli bir göstergedir ve öğütücü ile ilişkilidir. Öğütülebilirlik indeksi yüksek olan klinkerin dayanım değerleri de yüksek olmaktadır. Öğütme kolaylaştırıcı katkı formülasyonunda kullanılan kimyasallar genel olarak; modifiye edilen aminlerin organik / inorganik çözeltileri, alkanolamin ve tuzları ve polikarboksilat bazlı ürünler ve bunların karışımıdır. Gerek öğütme kolaylaştırıcılar gerekse klinker ve çimentonun durabilitesini, erken mukavemetini vb. bazı

önemli özelliklerin, geliştirmek için yeni nesil kimyasal katkılara ve bu alandaki araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Yüksek performanslı ve çok işlevli özel betonların geliştirilmesi yapı sektöründe sürdürülebilirlik açısından önemli bir konudur. Bu teknolojinin potansiyel faydaları arasında gelişmiş altyapıların güvenilirliği ve uzun ömürlülüğü, yapısal performans ve dayanıklılık, doğal tehlikelere ve titreşimlere karşı gelişmiş güvenlik ve bu altyapıların bakım/onarım maliyetlerinin azaltılması yer almaktadır. Halihazırda çimento yerine kullanılan bağlayıcıların önemli bir kısmının, betonun kapiler boşluklarını azaltmak ve kalsiyum hidroksiti bağlayarak, asit etkisi, sülfat etkisi, alkali agrega reaksiyonu gibi önemli dayanıklılık problemlerini sönmüleyerek betonun ve dolayısıyla yapının servis ömrünü uzattığı bilinmektedir. Bunlara ek olarak, betonun mikro çatlaklarının kendiliğinden iyileşme ajanları ile tamiri, su geçirimsizlik katkıları ile zararlı ajanların betonun içerisine girişinin azaltılması gibi yöntemlerin de kullanımları artmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

3.3.a. Klinker ve çimento üretim girdileri olarak farklı endüstriyel atıklara yönelik endüstriyel paylaşım analizinin gerçekleştirilmesi, değerlendirilebilecek olası atıkların saptanması ve kullanıma uygun hale getirilmesine yönelik ön işlemlerin geliştirilmesi, mevcut katkıların kullanım miktarlarının artırılması ve/veya alternatif çimento bileşenlerinin araştırılması ve geliştirilmesi

Klinker üretiminde en önemli CO₂ kaynağı, hammaddelerin kalsine edilmesinden kaynaklandığı için alternatif karbonsuz malzeme kaynaklarının kullanımı CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltma seçeneği olarak öngörülmektedir. Atık malzemeler ve endüstriyel paylaşımın güzel bir örneği olarak diğer endüstrilerden gelen yan ürünler kalker gibi bazı ürünlerin yerini almak için kullanılabilir. Bu alternatif hammaddelere örnek olarak yıkım atıklarından geri dönüştürülmüş çimento hamuru, hava soğutmalı cüruf ve atık kireç verilebilir. Bu alternatif hammaddelerin ve farklı endüstriyel atıkların potansiyel olarak kullanımının CEMBUREAU tarafından araştırıldığı bildirilmiştir. Sadece bu önlem ile CEMBUREAU proses CO₂ oranlarında 2030 yılına kadar %3,5, 2050 yılına kadar da %8 azalma hedeflemektedir [57].

Klinkerin ana hammaddesi kireçtaşı ve kildir. Demir cevheri, boksit, kum, vb. malzemeler, uygun klinker içeriği için gerekli olan kalsiyum silikat (C/S) dengesini sağlayabilmek amacı ile yardımcı hammaddeler olarak kullanılır. Kireçtaşı, kil ve diğer hammaddelerin öğütülüp homojenize edilerek farin adını alır. Klinker üretim sürecinde farin ön kalsinasyonun akabinde fırında sinterleşmesi tamamlanıp soğutulurak klinkere dönüşür. Klinker üretiminde alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik pek çok örnek bulunmaktadır. Bunların başında, çeşitli atıkların ve fosil yakıtların yakılması sonucu oluşan küllerin (uçucu kül, taban külü, dip külü, vb.) kullanımı gelmektedir. Entegre çimento fabrikaları çevre mevzuatına uygun olarak atıkların

bertarafını sağlayabilmektedirler. Çimento fabrikalarındaki döner fırının doğası gereği fırın içi sıcaklığı 1500°C'nin üzerine çıktığından atıktan türetilmiş yakıt (ATY) veya diğer alternatif yakıtlar atık kül veya zararlı emisyonlar üretmeksizin tamamen yok edilebilmektedir. Günümüzde, çeşitli ürünlerin üretimi sırasında elde edilen yan ürün veya atıkların klinker üretiminde alternatif hammadde olarak değerlendirilmesi için yapılan çalışmalara geliştirilerek devam edilmelidir. Klinker üretiminde bu tür malzemelerin kullanımını kısıtlayan rutubet, klor, alkali, kükürt v.b. içeriklerinin azaltılması için yöntemler geliştirilmelidir.

Farin içerisinde klinker fazlarının oluşmasını sağlayan kalsiyum (Ca), silikon (Si), alüminyum (Al) ve demir (Fe) içeren kireçtaşı, kil gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, eğer kireçtaşı ve kil içerisinde Al, Fe elementler yok ise düzeltici malzemeler kullanılır; silikon kaynağı için kum, alüminyum için boksit, demir için hematit, vb. Buradaki bütün malzemeler doğal hammadde kaynakları olup hepsi maden sahalarından çıkartılan malzemelerdir ve elde edilmesi için madencilik faaliyetlerinin yürütülmesi gerekmektedir (patlatma, delme, kazma çıkarma vb.). Farin içerisindeki ihtiyaç duyulan elementlerin farklı endüstriyel atıklardan sağlanması söz konusu olabilmektedir.

Hurdadan çelik üretimi sırasında ortaya çıkan elektrik ark cürufu veya pota cürufu içerisinde demir bulunmaktadır. Bakır işletmelerinde bakırın elde edilmesi sırasında ortaya çıkan bakır cüruflarının içeriğinde demir ve silikon bulunmaktadır. Tersanelerde gemi bakım ve onarım çalışmaları sırasında grit atıkları oluşmaktadır. Grit atıklarının içeriğinde Fe bulunmaktadır. Grit atıklarının kırılması, inceltmesi ile birlikte Fe kaynağı olarak kullanılabilir. Enerji üretim amacı ile katı yakıt kullanan santrallerde dip külü ve uçucu kül içeriğine bağlı olarak Ca, Al ve Si kaynağı olarak kullanılabilir.

Deprem kuşağında bulunan ülkemizin en önemli gerçeklerinden birisi de depreme uygun yapılmamış binalar ile yaşlı binalardır. Kentsel dönüşüm ile yenilenen binaların yıkımı sırasında binaların eski usullere göre yıkılmaları yerine akıllı seçici yıkım tekniklerinin kullanılması ve buradan çıkan geri dönüştürülemeyen uygun mineral kaynaklarının klinker üretiminde hammadde olarak kullanılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Yukarıda bahsi geçen malzemelerin klinker ve çimento üretiminde alternatif hammadde olarak kullanılmaları mümkün görülmektedir. Bu malzemelerin kullanımı sırasında dikkat edilmesi gereken husus bazılarının bünyelerinde bulunan metal parçalarıdır. Bu metal parçalar klinker üretimi sırasında döner fırın içerisinde birikim yaparak farklı problemlere neden olmalarıdır. Bu bakımdan bu türlü atık malzemelerin kullanımı öncesinde metal parçalardan arındırılması için içerisinde manyetik ayrıştırma (manyetik separasyon) işlemi yapılmaktadır. Bu işlem atık içerisinde manyetik metal (Fe (II) vb.) parçaları var ise belli oranlarda başarılı olmaktadır. Başka bir deyişle manyetik metallerin tamamı atık içerisinde alınamamaktadır.

Bu tarz atık malzemelerin kullanımı öncesinde metal parçalardan ayrıştırılabilmesi için manyetik ayrıştırma ve diğer metallerin içerisinden alınabilmesi için mevcut sistemlerin

geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca döner fırın içerisinde yükseltgen ortamın indirgen ortama dönmesine sebep olacak demir (II), mangan (II) gibi metallerin ön işlem ile yükseltgenmesinin araştırılması önem arz etmektedir.

Atıkların kullanılmasında dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ülkemizde 2017 yılında yürürlüğe giren “Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması Hakkında Yönetmelik (KKDİK)” kapsamında torbalı çimentolarda suda çözünen Krom VI miktarının 2 ppm altında olması gerekmektedir. Limit değerini üzerinde olması halinde krom indirgeyiciler kullanılarak miktarı azaltılmaktadır. Atıkların kullanılması ile birlikte çimento içerisindeki Krom VI miktarının artmaktadır. Bu bakımdan atıkların içerisindeki krom miktarının azaltılması veya çimento içerisindeki Krom VI’nın azaltılması için çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Bu bağlamda başlıca araştırma konuları:

- Alternatif hammaddelerin farin ve klinker süreçlerine beslenebilmesine yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi
- Klinker üretim girdileri olarak farklı endüstriyel atıklara yönelik endüstriyel paylaşım analizinin gerçekleştirilmesi, değerlendirilebilecek olası atıkların saptanması ve kullanıma uygun hale getirilmesine yönelik ön işlemlerin geliştirilmesi çalışmaları
- Klinker üretiminde kalsine/kısmi kalsine olmuş atık hammaddelerin kullanılmasına yönelik çözümlerin geliştirilmesi
- Mermer, seramik, inşaat ve yıkım gibi sektörlerin atıklarının klinker ve çimento üretiminde alternatif hammadde olarak kullanımına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi
- TS EN 197-1, TS EN 197-5 ve ASTM C 595 standartları içerisinde tanımlanan mineral katkıların dışında olan mineral katkıların çimento içerisinde kullanılması için farklı endüstriyel atıkların/yan ürünlerin kullanılması için çalışmaların yapılması önem arz etmektedir. Elektrik ark veya pota cürüfları, taban külleri, döküm kumu atıkları, alüminyum sanayi atıkları vb. bu atıkların kullanımı üzerine çalışmalar yapılırken sektör tarafından kullanılacak özelliklere getirilmesi için işlemlerinin yapılması ve uygunsuzluk yaratacak içeriklerin uzaklaştırılmasına yönelik çalışmalar
- Yüksek oranda katkılı, düşük klinker içerikli çimentoların üretilmesi
- Mevcut çimentolara alternatif çimentoların geliştirilmesi
- Mermer atıklarının klinker ve çimento üretiminde kullanımının araştırılması
- Yüksek performanslı ve görece düşük karbon salımlı mineral katkılı çimento üretiminde alternatif mineral katkıların kullanılmasının araştırılması
- Katkılı çimentoların kullanımının çimento bağlayıcılı ürünlerde fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine etkilerinin araştırılması
- Mevcut standartlarda bulunan yüksek katkılı düşük klinkerli çimentoların üretimini ve kullanımını artırmaya yol açacak bilimsel araştırmalar

- TS EN 197-1, TS EN 197-5 ve ASTM C 595 standartlarında tanımlanan çimento bileşenlerinin (Yüksek fırın cürufu, silis dumanı, ham veya kalsine edilmiş doğal puzolan, uçucu kül, pişmiş şist, kalker) kullanım miktarlarının çimento basınç dayanımında, su ihtiyacında, priz süreleri v.b. özelliklerde oluşacak muhtemel olumsuzlukların en aza indirilmesini sağlayacak teknolojik yenilikçi çalışmalar ve bu hammaddelere alternatif malzemelerin araştırılması önem arz etmektedir. Bu tür çimentoların performanslarının aynı şekilde kalması için incelik, beraber öğütme ayrı ayrı öğütme, su miktarı çalışmalarının yapılması, bunun yanı sıra farklı kimyasal katkıların kullanımı ve yeni kimyasal katkıların geliştirilmesi araştırmaları sayılabilir.

- Hangi sanayi atığının çimento üretiminde kullanılabileceğinin araştırılması, endüstriyel paylaşım analizinin gerçekleştirilmesi

- Atıkların özelliklerin belirlenmesi, klinker ve çimento üretimi için kabul edilebilirlik sınırlarının araştırılması. Atıkların bulunurluk, miktar, homojenlik ve lojistik koşulları açısından çimento üretiminde kullanıma uygunluğunun değerlendirilmesi. Ülke genelinde geri dönüştürülemeyen mineral yapıli atıkların envanter ve ulusal veri tabanı çalışmalarının gerçekleştirilmesi, bu atıkların çimento üretiminde kullanımına yönelik proseslerin ve uygulamaların geliştirilmesi; Refrakter atıkları, mermer tozu atıkları, atık dökümhane kumları ve filtre tozlarının çimento fabrikalarında kullanımına yönelik çalışmaların yapılması; Çimento ve beton üretiminde karbon ayak izinin azaltılması için özellikle işlem/kalsinasyon gerektirmeyen puzolanların (ponza, perlit ve tras gibi ülkemizde bol bulunan doğal puzolanların daha yüksek oranda kullanılmasına yönelik çalışmalar) kullanımı; Üretimde doğal alçıtaşı yerine termik santral atığı desülfojips vb. atıkların kullanımının araştırılması; Çimento üretimi için alternatif yüksek kalkerli endüstri atıklarının hammadde olarak kullanılmasının araştırılması (Bazı uçucu küller, yüksek fırın cürufları, atık mermer, geri dönüştürülmüş beton vb.); Yapım ve yıkım atıklarının çimento üretiminde öğütülerek mineral katkı olarak kullanılmasını sağlayan teknolojik çözümlerin geliştirilmesi ile ilgili araştırmalar.

- Elektrik ark veya pota cürufları, taban külleri, döküm kumu atıkları, alüminyum sanayi atıkları vb. atıkların fiziksel ve kimyasal özellikler açısından mevcut çimento standardında belirtilen nitelikleri sağlamaları; sağlamayanların uygun hale getirilmesi için yöntem geliştirmesi ve bu yöntemlerin ekonomik ve çevresel etkiler açısından uygunluğunun değerlendirilmesi yapılacak araştırmalar

- Atıklar ile üretilmiş klinker ve çimentoların kullanımının çimento bağlayıcılı ürünlerde fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine etkilerinin araştırılması

- Mevcut standartların inovatif çimento üretimine yönelik test yöntemlerinin ve kriterlerinin revizyonu hakkında öneri çalışmaları ile inşaat uygulamalarında kullanılacak diğer nihai ürünler için standartlarda gerekli olabilecek revizyonların araştırılması

- Atıkların kullanımının mevcut yasal mevzuat ve belgelendirme kriterleri açısından değerlendirilmesi

3.3.b. Çimentoya alternatif hammaddelerin yüksek oranda kullanımının çimento ve beton üretiminde kullanılmasına yönelik teknolojik çözümlerin geliştirilmesi, yaygın olarak kullanılmakta olan mineral katkıların yerine alternatif puzolan kaynaklarının araştırılması ve kullanılmasına yönelik süreçlerin ve teknolojik çözümlerin geliştirilmesi

Beton ve çimento esaslı malzemelerde yüksek miktarda mineral katkı kullanımında uçucu kül ve yüksek fırın cürufurlarına göre daha kısıtlı sayı ve kapsamda olmak üzere doğal puzolan kullanımına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Yüksek puzolanik aktivite performansına ve görece düşük su ihtiyacına sahip uygun doğal puzolanlar ile bunlarla özel uyumluluk gösteren süper akışkanlaştırıcı katkı malzemelerinin birlikte kullanımıyla, uçucu kül ve cürufurlar ile yapılan sistemlerle kıyaslanabilir niteliklere sahip yüksek mineral katkılı harç ve betonların elde edilebildiği bilinmektedir.

Yüksek miktarda mineral katkı malzemesi içeren çimento esaslı sistemlerin ortak özellikleri olarak göze çarpan ve kullanımlarının yaygınlaşması önünde kısıt teşkil eden bazı noktalar şöyle sıralanabilir:

- Görece düşük erken dayanım ve yavaş dayanım gelişimi
- Normal beton karışımlarına göre olumsuz kür koşullarına karşı (düşük sıcaklık ve nem, rüzgâr) daha fazla hassasiyet
- Mineral katkı kullanım oranıyla birlikte azalan işlenebilirliği telafi etmek üzere artan süperakışkanlaştırıcı kullanımının doğurduğu maliyet ve muhtemel priz gecikmeleri
- Mineral katkı kaynağı aynı olsa bile, katkının kendi içinde gösterdiği değişkenlikler

Yüksek miktarda mineral katkı malzemesi içeren çimento esaslı sistemlerin kullanımı ve yaygınlaşmasını kısıtlayan yukarıdaki problemlerin en aza indirilmesi veya giderilmesi yönünde yenilikçi araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmalarda yüksek miktarda mineral katkı ikamesi ile elde edilen beton ve çimento esaslı sistemlerin yapısal uygulamalarda kullanıma uygun olacak erken dayanıma (örneğin betonarme uygulamalarda bir günde kalıp sökmeye yetecek erken dayanım) sahip olmaları, görece düşük kür sıcaklıklarından geleneksel betonlara göre daha olumsuz ölçüde etkilenmemeleri, uygulamada problem doğurmayacak şekilde kabul edilebilir priz süresine sahip olmaları ve maliyet verimli olmaları, malzeme özelliklerindeki varyasyonlara karşı hassasiyetin azaltılmasının hedeflenmesi gerekmektedir.

Günümüzde ülkemizde en çok kullanılan mineral katkılar uçucu kül yüksek fırın cürufuru ve doğal puzolanlardır. Ülkemizin çoğu yerinde uçucu kül yaygın olarak bulunabilse bile her uçucu kül çimento üretimi için uygun olmadığı için alternatif mineral katkılara ihtiyaç duyulabilmektedir. Benzer şekilde yüksek fırın cürufunun özelliklerindeki varyasyonlar, uçucu kül kadar yaygın olmaması gibi sebeplerle yine alternatif mineral katkılar gerekli olabilmektedir.

Literatüre bakıldığında, çok değişik malzemelerin puzolan olarak kullanılabilirliğine dair çalışmalar görülebilmektedir. Ülkemizde büyük miktarda rezervi bulunan perlit, ponza, çeşitli

bölgelerde tüfler, bitkisel atıklara ait küller (pirinç kabuğu, fındık kabuğu vb.) ve başka birçok malzemenin puzolanik özellikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yurtdışı örneklerde özellikle yüksek fırın cürufunun yüksek oranlarda sektörde kullanımının çevreci beton üretimi için önemsendiği bilinmektedir.

Çimento katkı malzemelerinin bulunabilirliği, miktar, kalite ve çevre/sağlık ve güvenlik etkileri açısından kritik olmaya devam etmektedir. Karbonsuzlaştırma senaryolarından etkilenen yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve üçüncü taraf yan ürünlerinin bulunurluğunun azalması beklenmektedir. Ön normatif çalışmalar, testler ve standardizasyon süreci zaman alıcı işlemlerdir. Mevcut katkı malzemelerinin gelecekteki bulunabilirliği ve karbonsuzlaştırma bağlamından etkilenen endüstriyel proseslerdeki değişiklikler, çimento sektörünü, yeni çimento katkı malzemelerini belirlemek ve geliştirmek için net bir takvim ve esnek bir yaklaşımla çalışmalar yapmaya yöneltmektedir. Örneğin diğerlerinin yanı sıra kalsine edilmiş kil mineralleri umut vadeden bir adaydır ve devam eden araştırmaların, bunların performansı ve dayanıklılıkları hakkında kritik bilgiler sağlaması beklenmektedir. Düşük karbon bağlamıyla aynı şekilde, günümüzde daha az kullanılan bileşenlerden (silis dumanı veya pişmiş şist) benzer faydalar elde edilebilir, ancak bu bileşenler yalnızca yerel düzeyde bulunabilir. Diğer bir araştırma alanı, mekanik, dayanıklılık ve iş sağlığı ve güvenlik hususları üzerinde kapsamlı testler yapılarak, endüstriyel paylaşım bağlamında elektrik ark ocağı cürufları, boksit ve madencilik faaliyetlerinden gelen kalıntı ve atıklar gibi yeni katkı malzemelerinin dahil edilmesiyle ilgilidir. Hedeflenen araştırma, geliştirme ve inovasyon eylemleri, hidrolik veya puzolanik özelliklerin iyileştirilmesi gibi alternatif katkı malzemelerinin kullanılmasına olanak tanıyacak zorlukların ele alınmasında çok önemlidir. Uzun vadeli karbonsuzlaştırma senaryolarından veya kalsine edilmiş kil veya termal olarak aktive edilmiş minerallerin kullanımından etkilenmeyecek (en azından önemli düzeyde) olmaları nedeniyle kireçtaşı gibi hali hazırda bulunabilen bileşenler veya düşük tenörlü kiler gibi yeni mineral bileşenlerin kullanımı devam edebilir ve hatta yeni üç bileşenli çimentolarda kullanıldıkları takdirde artabilir [58].

3.3.c. Çimento ve beton için sürdürülebilirliğe katkı sağlayan yeni nesil kimyasal katkıların geliştirilmesi ve yapının servis ömrü ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik özel betonlar tasarlanması

Çimento kimyasal katkıları genel olarak öğütme kolaylaştırıcı, dayanım artırıcı ve priz hızlandırıcı veya geciktirici vb. olarak sınıflandırılabilir. Bu tür katkılar ile çimento bağlayıcısı içeren malzemelerde istenen özellikleri geliştirmek ana amaç ve hedeftir.

Çimento klinkerinin ve kireçtaşının öğütülmesinde tüketilen öğütme kolaylaştırıcılar, çimentonun incelik değerini yükseltmek ve aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılır. Çimento partiküllerinin öğütülmesi sırasında topaklanma ile birlikte tabakalaşma ve

sıvanma oluşmaktadır. Bu durum öğütücü verimini azaltır ve enerji tüketimini artırır. Taneciklerin aglomera (topaklanma) olmasını engellemek çimento üreticilerinin öncelikli tercihi olduğundan öğütme kolaylaştırıcılar oldukça önem taşır. Öğütme kolaylaştırıcılar, çimento taneciğini kaplar, monomoleküler tabaka oluşturur, klinkerinin öğütülmesi sırasında biriken yüzey yüklerini hızlı bir şekilde toplar ve nötralize ederek aglomerasyonu önler. Aglomerasyon eğilimi gösteren klinker partiküllerinin farklı sıcaklık ve basınç altında birbirlerine yapışması öğütme kolaylaştırıcılar ile engellenir.

Öğütme yardımcıları topaklaşmayı önlemenin yanında aşağıdaki özelliklerin de iyileşmesine yardımcı olmaktadır:

- Kaplama etkisi ile çimento partiküllerinde kısmi ya da tümüyle ayrıştırma etkisi oluşturur.
- İnce partiküllerin akışkanlığını arttırarak ayırma verimini artırır.
- Depolama silolarında ve taşıma araçlarında oluşan kekleşme problemini azaltır.
- Ürünün yoğunluğunu ve çimento kalitesini artırır.
- Öğütme prosesinde üretim kapasitesini artırır.

Klinker öğütülmesi önemli miktarda enerji tüketmektedir. CO₂ emisyonu azaltılması adına katkılı çimentoların geliştirilmesi ve kullanılmasının yaygınlaştırılması da önemli bir hedefdir. Bu tür çimentoların ise erken dayanımlarının arttırılması için genellikle daha ince öğütülmesi gereklidir. Gelecekte bu ihtiyacın daha da artması beklenmektedir. Bu nedenle öğütme kolaylaştırıcılara ihtiyacın artacağı bilinmektedir.

Çimento kimyasal katkıları optimizasyon sonucu ortaya çıkan formüllerden oluşmaktadır. Aynı anda öğütme, akışkanlık, topaklanma, kekleşme problemleri yanı sıra dayanım artışı sağlayacak özellikleri sağlamalıdır. Bu tür Ar-Ge çalışmalarında temel bilimlere de ihtiyaç duyulmaktadır, matematiksel modelleme, istatistik karışım deney yöntemleri ve farklı kimyasal yapıları geliştirilmesi disiplinler arası çalışmalara ihtiyacı açığa çıkarmaktadır. Yeni bakış açılarıyla öğütme inceliği ve mineral optimizasyonu maksimum faydayı sağlayacak sonuçlar vermektedir.

Bu kapsamda yapılması gereken çalışmalar:

- Yeni nesil kimyasal katkıları geliştirilmesi ve standartların yenilenmesi
- Kimyasal katkıların özelliklerinin araştırılması, çimento ile beton kimyasal katkılarının uyumu
- Kimyasal katkılı çimentoların kullanımının çimento bağlayıcılı ürünlerde fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine etkilerinin araştırılması
- Yüksek miktarlarda mineral bileşen kullanımında ortaya çıkabilen çimento su ihtiyacındaki artışın, çimento öğütme prosesinde kullanılacak kimyasal katkıları giderilmesi veya kısmen telafi edilmesine yönelik çalışmalar
- Su azaltıcı kimyasal katkı maddelerinin çimento üretimine dahil edilerek görece yüksek miktarda mineral katkılı çimentoların CEM I tipi çimentolara benzer su ihtiyacı, işlenebilirlik ve

reolojik özelliklere sahip olmasını sağlayacak kimyasal katkılara ve bu katkıları içeren çimentolara dair araştırma ve geliştirme çalışmaları

- Sürdürülebilirliğin sağlanması için üretim aşamasında katılacak katkıların karbon salımının azaltılması çalışmaları
- Farin değirmenlerinde yüksek öğütme kabiliyetine sahip yeni nesil öğütme kolaylaştırıcı kimyasal katkıların geliştirilmesi
- Katkıların kolay bulunabilen doğal hammadde kaynakları ile üretimine yönelik çalışmalar
- Yeni nesil kimyasal katkıların kullanımının mevcut yasal mevzuat ve belgelendirme kriterleri açısından değerlendirilmesi

Atık betonların agrega olarak betonda değerlendirilmesi, hem atık bir malzemenin tekrar kullanılması hem de yenilenemeyen doğal agrega kaynaklarının korunması sağlanabilir. Kentsel atıkların kayda değer bölümünü oluşturan inşaat ve yıkım atıklarının depolanması için gereken ve gün geçtikçe bulunması zorlaşan alana olan ihtiyaç azalabilir. Buna ilaveten, sürdürülebilir özel betonların tasarımında mineral katkıların yüksek oranlarda kullanılmasıyla toplam CO₂ emisyonu azalacaktır. Betona yapay veya biyolojik esaslı iyileştirme ajanları yerleştirilmesi ile tamir ve bakım masraflarının azaltılması ile de sürdürülebilirliğe katkısı olacaktır. Yapı malzemeleri alanında yapılan Ar-Ge çalışmalarının pek çoğu gibi sürdürülebilir beton üretimi konusunun beton tasarımı ile tamamlandığı düşünülebilir. Ancak, sürdürülebilirlikle ilgili sonuçların ölçülebilir olması önemlidir. Betonun karbonatlaşması ile karbon yakalama özelliğinin beşikten mezara döngüde dikkate alınması, sürdürülebilir çevre ve enerjiye katkı anlamında sayısal verilerin elde edilmesi önemlidir.

Nano malzemeler, ağırlıkça çimento yerine %0,01-%0,1 ikame edildiğinde dahi basınç dayanımını ciddi oranlarda arttırdığı için çimento gereksinimi azaltmakta ve dolayısıyla enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca nano malzemeler beton içerisinde ikame edilen geleneksel mineral ve kimyasal katkılardan farklı olarak hem iç hem de dış alan uygulamalarında birçok hasar tipine karşı etkilidir. Bu özellikleri ile servis ömrünü uzatan ve agresif çevre şartlarına maruz kalan özel beton uygulamaları için gittikçe önemi artmaktadır. Silisyum oksit, demir oksit, alüminyum oksit ve titanyum dioksit gibi nano parçacıklara göre üretim kolaylığı, daha az toksisite ve korozyon direnci gibi özellikleri nedeni ile grafen oksit ve grafen nano peletler ön plana çıkmaktadır. Yeşil sentez ile üretilen nanopartiküllerin betonda kullanımı çalışılacak konular arasındadır.

Beton ve çimento esaslı diğer sistemlerin gevrek davranışa sahip olmaları büyük dezavantaj iken, değişik ebatlarda çelik veya polimer esaslı lifler kullanılması bu sistemleri daha sünek hale getirmektedir. Ayrıca, lifler sayesinde çatlak kontrolü sağlanabilmektedir. Daha sünek olan ve çatlak genişliği az olan sistemlerin dış ortamlara ve darbelere karşı daha dirençli olduğu

yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır. Lifli sistemlerin kullanılmasıyla yapı elemanlarının servis ömrü ve sürdürülebilirliği artmakta, bakım masrafları azalmaktadır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

3.3.a. Klinker ve çimento üretim girdileri olarak farklı endüstriyel atıklara yönelik endüstriyel paylaşım analizinin gerçekleştirilmesi, değerlendirilebilecek olası atıkların saptanması ve kullanıma uygun hale getirilmesine yönelik ön işlemlerin geliştirilmesi, mevcut katkıların kullanım miktarlarının artırılması ve/veya alternatif çimento bileşenlerinin araştırılması ve geliştirilmesi

Dünya’da ve Türkiye’de katkılı çimentoların, endüstriyel atıkların değerlendirilmesi, kimyasal katkıların geliştirilmesi için önemli tecrübe mevcuttur. Dünyada kireçtaşı-kalsine kil içeren çimentolarla (LC3) ilgili projelerde THS 8’e kadar ulaşan ve son aşamaya yaklaşmış projeler olduğu bilinmektedir. Ülkemizde bu yöndeki projelerin çoğu THS 4-6 aralığında bulunmakta olup, endüstriyel üretim noktasına geldiğini duyuran (THS 8) bazı çimento ve beton üreticileri yanı sıra kimyasal katkı üreticileri bulunmaktadır (Oyak Çimento, Batıçim, Batıbeton, Plustechno).

Ülkemizde PLUSTECHNO firmasının üniversite sanayi iş birliği ile geliştirdiği yeni nesil çimento üretimi konusunda iki adet patenti bulunmaktadır. Standartların izin verdiği maksimum oranda mineral ve/veya atık kullanarak CEM I kalitesinde mineral katkılı çimento gruplarını elde edilebilmektedir. Ülkemizin bu konuda dünyadaki çalışmalarla aynı düzeyde olması bakımından önemlidir.

THS		Teknoloji Konusu
Dünya	Türkiye	
5	5	Atıkların çok yüksek oranda değerlendirilmesi
9	9	Kireç taşı-kalsine kil Oyak Çimento Düşük klinkerli çimento Schwenk (Almanya)
8	8	Yüksek performanslı mineral katkılı farklı çimentoların yenilikçi üretim yöntemiyle elde edilmesi (Plustechno)

3.3.b. Çimentoya alternatif hammaddelerin yüksek oranda kullanımının çimento ve beton üretiminde kullanılmasına yönelik teknolojik çözümlerin geliştirilmesi, yaygın olarak kullanılmakta olan mineral katkıların yerine alternatif puzolan kaynaklarının araştırılması ve kullanılmasına yönelik süreçlerin ve teknolojik çözümlerin geliştirilmesi

Mevcut durumda çimento esaslı malzemelerde kullanılmakta olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi çimentoya alternatif hammaddelerin yüksek oranda çimento üretiminde kullanımına yönelik çalışmaların sektörel ihtiyaçlar doğrultusunda yönlendirilmesine gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla araştırma merkezleri, üniversite ve sektörün ortak çalışmalarının THS 7-8’den başlayarak daha üst teknoloji hazırlık seviyelerinde sonlanması ve hızlıca ticarileşmesi mümkündür.

Mevcut durumda çimento esaslı malzemelerde kullanılmakta olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi mineral katkıların yerine alternatif olarak son yıllarda kalsine edilmiş doğal puzolanlar olarak kalsine killerin ön plana çıktığı görülmektedir. Yüksek maliyetli ve karmaşık üretim süreçleri gerektiren belirli sıcaklıkta kalsine edilmiş yüksek kaolinit minerali içerikli kaolinlerden elde edilen metakaolin yerine; enerji ve maliyet verimli, kaolinit ve diğer bazı kil minerallerini birlikte içeren killerin kalsinasyonu sonucu elde edilen kalsine killer alternatif puzolanik malzeme olarak gösterilmektedir. Kalsine killerin katkılı çimentolarda kullanımından ayrı olarak beton ve çimento esaslı malzemelerde ikame malzeme şeklinde kullanımlarıyla ilgili dünyadaki çalışmaların THS 4-6 seviyesinde olduğu bilinmektedir. Ülkemizde kalsine kil içeren katkılı çimentolarla ilgili çalışma ve deneme üretimleri olduğu bilinmekle birlikte, bundan ayrı olarak beton ve çimento esaslı malzemelerde ikame malzeme şeklinde kullanımlarına ilişkin çalışmalar oldukça kısıtlıdır.

THS		Teknoloji Konusu
Dünya	Türkiye	
8	5	Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar
9	9	Yüksek oranda mineral katkı içeren çevreci beton uygulamaları

3.3.c. Çimento ve beton için sürdürülebilirliğe katkı sağlayan yeni nesil kimyasal katkıların geliştirilmesi ve yapının servis ömrü ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik özel betonlar tasarlanması

Dünya’da ve Türkiye’de, kimyasal katkıların kullanılması ve geliştirilmesi için önemli tecrübe mevcuttur. Ancak bu alanda yeni ürünlerin geliştirilip kullanılması araştırmaya açık, devam eden bir süreçtir. Yabancı kimyasal üretici firmaların yanı sıra yerli kimyasal üretimi yapan firmalarda sektörde yaygın olarak faaliyet göstermektedir. Bu firmalar yurt içi ve dışı temin ettikleri kimyasalları, çeşitli endüstriyel atıkları işlemekte ve yeni ürünler üretmektedirler.

THS		Teknoloji Konusu
Dünya	Türkiye	
9	9	Kimyasal katkıların etkili şekilde kullanımı
8	4	Kendini iyileştiren beton
5	4	Grafen katkılı beton, yüksek oranda geri dönüşüm agregası kullanımı

Özel betonlarla ilgili olarak, kendiliğinden yerleşen beton gibi örnekler ticari olarak yaygın kullanımı bulunmakla birlikte saha uygulamaları için araştırılması gereken yeni beton tipleri ile ilgili araştırmalar genel olarak THS 4-6 seviyesindedir.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

3.3.a. Klinker ve çimento üretim girdileri olarak farklı endüstriyel atıklara yönelik endüstriyel paylaşım analizinin gerçekleştirilmesi, değerlendirilebilecek olası atıkların

saptanması ve kullanıma uygun hale getirilmesine yönelik ön işlemlerin geliştirilmesi, mevcut katkıların kullanım miktarlarının artırılması ve/veya alternatif çimento bileşenlerinin araştırılması ve geliştirilmesi

Yurt dışında özellikle Avrupa'da belediye çöplerinin ya da evsel atık su arıtma çamurlarının direkt klinker üretimi sırasında yakılarak kullanılması ve oluşan küllerin direkt olarak ürüne dönüşmesi sağlanmasının yanı sıra bu malzemelerin bağımsız tesislerde bertarafı sonucu atık olarak oluşan küllerde içeriklerine bağlı olarak kalsiyum ve silis kaynağı olarak kullanılmaktadır. Diğer sektörlerde oluşan cürufur, döküm kumları, taşlama kumları, arıtma çamurları, ağartma topraklarının silis kaynağı olarak sektörde kullanılması yaygındır. Gübre üretimi ve metalik cevher üretimleri sırasında oluşan florit, fosfojips gibi ürünler klinkerleşme sıcaklığını düşürmek amaçlı kullanılabilir.

Tüm bu malzemelerin klinker hammaddesi olarak kullanılabilmesi için malzemelerin içeriklerinin mümkün olduğunca doğal hammadde içeriklerine benzer olması; klinker üretiminde zararlı etkisi olan klor, alkali, kükürt, vb. içeriklerinin olmaması yanı sıra çevreye zarar vermeyecek bileşikler içermesi temel şarttır. Diğer sektörlerde atık olarak oluşan malzemelerin klinker hammaddesi olarak kullanılabilmesi için atığın fiziksel ve mekanik özelliklerinin mevcut klinker üretim ekipmanlarına uygun özellikte olması ya da yeni ekipmanların sisteme adapte edilmesi gerekir. Hammaddelerin rutubet içeriklerinin %10'unun altında olması klinker üretiminde enerji verimliliği açısından önemlidir. Diğer bir husus da atıkların depolanması ve bertarafı sırasında oluşabilecek kimyasal, biyolojik risklerinin yanı sıra kötü koku da sosyal çevrede ciddi sıkıntılara sebep olabilmektedir. Yukarıda sayılan problemlerden dolayı çoğu zaman diğer sektörlerde oluşan atık malzemelerin hammadde olarak kullanılması mümkün olamamaktadır. Atık envanterinin yapılarak fiziksel, kimyasal vb. tüm özellikleri araştırılmalı, miktarları belirlenmeli ve bu atıkların klinker üretiminde kullanılabilir özelliklerine sahip olması için ne tür işlemlerden geçirilmesi gerektiği, bu işlemlerin avantaj ve dezavantajları araştırılmalıdır.

En büyük CO₂ kaynağı, fırında hammaddelerin ve alternatif hammaddelerin kalsine edilmesinden geldiğinden, alternatif karbonsuz malzeme kaynaklarının kullanılması, CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltmak için bir seçenektir. Endüstriyel paylaşımın iyi bir örneği olarak diğer endüstrilerden gelen atık malzemeler ve yan ürünler, kireçtaşının yerini almak için kullanılabilir.

Son yıllarda çimento sektöründe klinker üretiminde kullanılan alternatif hammadde kullanımı giderek artmaktadır. En çok kullanılan alternatif hammaddeler; tersanelerde raspalama sonucu açığa çıkan grit malzemesi, döküm kumu, kazan dibi çamuru, kalsiyum karbit cürufu, cüruf atıkları, mermer tozu, beton atıkları, fosfojips, kömür külü, kalsit bitümlü şist ve benzeri Si, Ca, Fe ve Al kaynağı malzemelerdir. Atık olarak elde edilen çeşitli ürünlerin depolanması veya

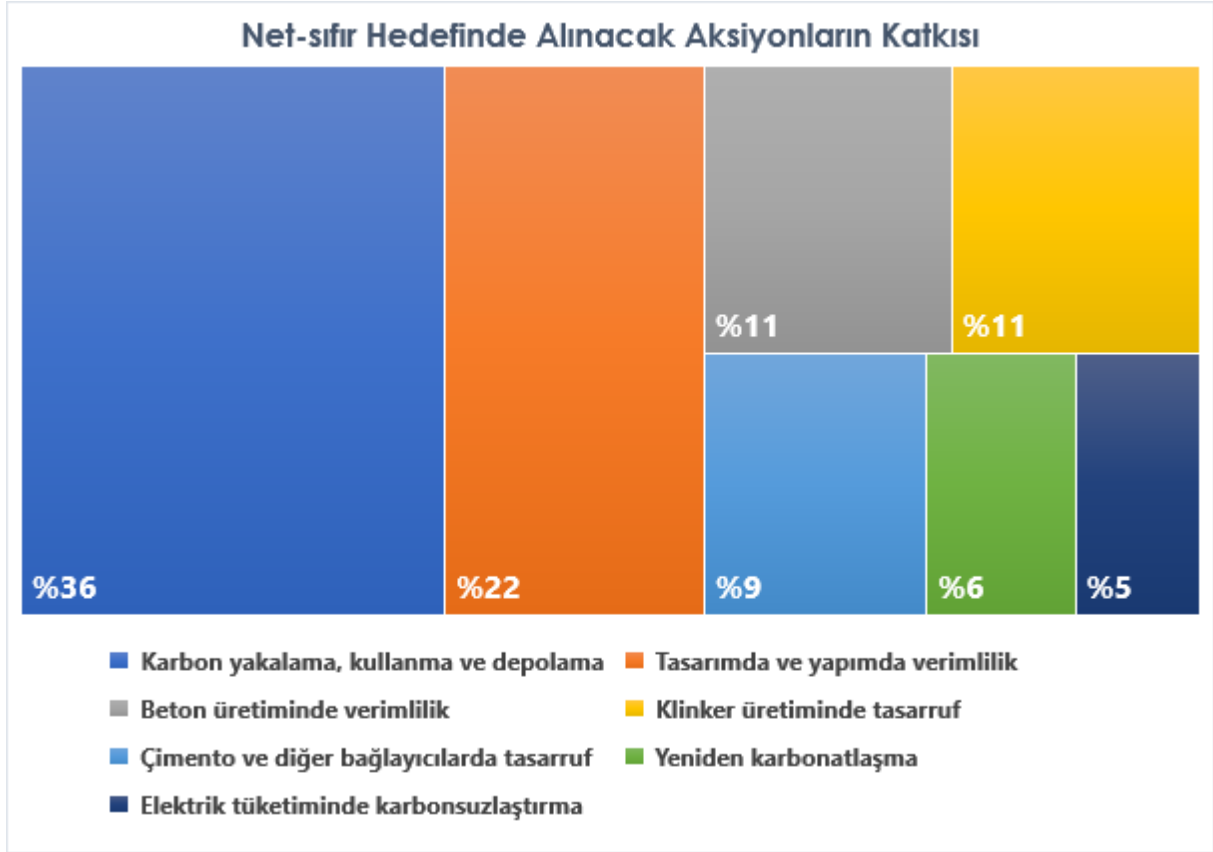
doğaya terk edilmesi çok büyük güçlükler yaratmakta, çevre kirliliği dâhil topluma çok büyük sorunlar getirmektedir.

Klinker üretiminde alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik örneklerin başında, çeşitli atıkların yakılması sonucu açığa çıkan uçucu kül ve taban külünün kullanımı gelmektedir. Yurt dışında özellikle belediye çöplerinin ya da evsel atık su arıtma çamurlarının yakılması sonucu oluşan küller bu amaçla kullanılmaktadır. Düşük oranlarda demir oksit ve silika ilavesi ile bu tür küllerin klinker üretiminde kullanımı mümkün olmaktadır.

Demir-çelik ve cam üretimi gibi çeşitli sanayi dallarında oluşan cüruf ve atık cam gibi çeşitli atıkların, kömür madenciliği atıklarının, şeker kamışı küspesi, zeytin çekirdeği unu, buğday samanı, odun kerestesi gibi çeşitli tarımsal atıkların kullanılması ile seramik ürünlerin üretildiği çalışmalar da mevcuttur.

Endüstriyel ve evsel tesislerde kurulu bulunan atık su arıtma ve/veya toz toplama ünitelerinde biriken katı atıkların (arıtma çamuru, filtre tozu vb.) da ham madde reçetesinde kullanılması ile önemli oranda katı atığın değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir. Ülkemizde de tesislerin içinde bulunan atık su arıtma tesislerinden temin edilen arıtma çamurlarının kullanıldığı uygulama örnekleri görülmekte olup, uluslararası çalışmalarda kentsel atık su arıtma tesisinden elde edilen çamurların da kullanıldığı uygulamalar mevcuttur.

Şekil 3.6'da görülen net sıfır yol haritasına göre düşük klinkerli katkı çimentolar hem şimdi hem de gelecekte kilit rol oynayacaktır. Düşük klinkerli çimentolar betonda gerekli performans koşullarını sağlamakla birlikte betonun karbon ayak izini de önemli ölçüde azaltmaktadır. Çimento fabrikasında veya hazır beton üretim santralinde, düşük karbon emisyonlu ve istenilen teknik performansa sahip beton üretmek için uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, öğütülmüş kireç taşı, doğal puzolanlar ve diğer malzemeler ilave edilmektedir. Bu ilave aynı zamanda klinker ikamesi olarak da adlandırılmaktadır. Dünya çapında uygun malzemelerin mevcudiyeti bölgesel olarak değiştiği gibi bu durum zamanla da değişebilmektedir. Örneğin kömürle çalışan elektrik santrallerinin kapanması sonucu uçucu kül arzı, demir-çelik üretiminde geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımının artması ile de öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu arzı azalmaktadır. Günümüzde ve gelecekte hem azalan uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu arzını telafi etmek hem de klinker bağlayıcı oranını daha da azaltmak için, diğer endüstriyel atıklar, tuğla ve seramik fabrikalarının atıkları, öğütülmüş kireç taşı, doğal puzolan, kalsine kil, pomza, perlit gibi diğer kaynakların kullanımının artması beklenmektedir.



Şekil 3.6. 2050 Net Sıfır Yol Haritasında yer alan net-sıfır emisyon hedefine yönelik kaldıraçlar [59]

Endüstriyel paylaşım tercihen birbirine fiziksel olarak yakın olup, normalde birbirlerinden bağımsız çalışan iki veya daha fazla endüstriyel işletmenin bir araya gelerek hem çevresel performansı hem de rekabet gücünü artıracak uzun süreli ortaklıklar kurması ve dayanışma içinde çalışması olarak tanımlanmaktadır. Endüstriyel paylaşım yaklaşımı ekonomik kalkınma, yeşil büyüme ve kaynak verimliliği çabaları için stratejik bir politika aracı olarak görülmektedir. Atık döküm kumları düzenli depolama sahalarında örtü tabakası olarak, çimento fabrikalarında ise klinker üretiminde kullanılmaktadır. Dökümhaneler ile düzenli depolama sahaları ve çimento fabrikaları arasındaki mesafelerden dolayı nakliye ücretleri, atık bertaraf maliyetleri ve çimento fabrikalarının sınırlı kapasiteleri nedeniyle atık döküm kumlarının olduğu yere yakın yerel çözümler içinde değerlendirilmesi, atıkların daha az taşınmasını ve yakın tesisler arasında endüstriyel paylaşım ilişkisinin kurulması gerekmektedir. Atık döküm kumlarının çimento klinkeri üretimi içinde %13,6, hazır beton üretiminde %10, %15 ve %20 ve asfalt üretiminde %8 ve %10 oranlarında kullanılabileceğine dair ulusal ve uluslararası yayınlar bulunmaktadır.

Dünyada çimento üretiminde klinker yerine ikame malzemesi olarak atık mermer tozu kullanımı ilk olarak Türkiye’de gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, atık mermer tozu (AMT) klinker yerine %10 oranına kadar çimento üretiminde kullanılmıştır. AMT katkılı çimento,

klinker, AMT ve alçıtaşı birlikte öğütülerek elde edilmiştir. Deney sonuçları, çimento üretiminde klinker yerine %10 AMT'nin ikame malzemesi olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Böylece çevre dostu çimento üretilebileceği, çimento üretim maliyetinin azaltılabileceği ve atığın çevreye verdiği zararın azaltılabileceği söylenebilir [60].

Ayrıca, endüstriyel paylaşım çalışmaları kapsamında, Seramik Araştırma Merkezi (SAM)'nin, yürüttüğü ve bu alanda örnek teşkil eden bir proje tamamlanmıştır. Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı (BEBKA) desteği ile yürütülen projede, Bilecik ve Eskişehir illeri civarında yoğunlaşmış durumdaki seramik tesislerinin arıtma keklerinin çimento sektöründe alternatif hammadde olarak değerlendirilmesi için mevcut durum analizi, firmalardan temin edilen atıkların karakterizasyonu ve çimento sektöründe kullanıma uygunluklarının tespiti, uygun kurutma tipinin belirlenmesi ve belirlenen kurutma sistemine ait fizibilite çalışmaları yapılmıştır. Projede, Eskişehir'de faaliyet gösteren bir çimento fabrikası da aktif olarak yer almıştır [61].

Türkiye'de bir çimento üreticisi tarafından inşaat kazılarında ortaya çıkan hafriyat kayaçları da artık alternatif hammadde olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulama dünya çapında bir "iyi uygulama örneği" olarak gösterilebilir. Aynı zamanda, Türkiye'de deprem açısından riskli görülen yapıların yenilenmesi amacıyla kentsel dönüşüm süreci devam etmektedir. Kentsel dönüşümle birlikte hem hafriyat kayaçları hem de inşaat atıklarının uygun fraksiyonları (tuğla vb.) çimento üretiminde önemli bir hammadde kaynağı olabilecektir.

Avrupa Atık Kataloğuna (2000/532/AT) göre inşaat ve yıkım atıkları geniş bir malzeme içeriğine sahiptir. Bu mineral içeriğiyle inşaat ve yıkım atıkları, geri dönüşüm uygulandığında doğal hammadde yerine kullanılabilme potansiyeline sahiptir. İnce öğütülmüş porselen, seramik içeriği bakımından çevre dostu bir yapıdadır. Bu türdeki malzemelerin Portland çimento ikamesi olarak sektörde kullanımı uzun zamandır bilinmektedir. Çimento içinde yardımcı bir yapıştırıcı görevi üstlenen seramik malzeme bu açıdan birçok muadiline (ör: uçucu kül) eşdeğer bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Yüksek mineral katkı (düşük klinker) içerikli ve erken dayanım sınıfında yer alan çimentolara başarılı örnekler; Oyak Çimento/Bolu Çimento Sanayii A.Ş.'nin arasında geliştirilen ve üretimi gerçekleştirilen en fazla %64 klinker CEM III/A (S) 42,5 R tipi çimento, Batıçim Batı Anadolu Çimento Sanayi'nin üretmiş olduğu CEM II/C (L-W) 42,5N çimentosu; Plustechno CEM I 42,5 R performansına göre yüksek performanslı ve maksimum mineral/lerin kullanıldığı farklı çimento sınıflarının üretimine yönelik üretim yöntemi konusunda tescilli patent sahibi ürünü örnek gösterilebilir.

Dünyadan karbon ayak izi düşük başarılı bir ürün örneği olarak Schwenk (Almanya) tarafından üretimi gerçekleştirilen ve en fazla %34 klinker içeriği ve 42,5 N dayanım sınıfına sahip CEM III/B 42,5 N tipi yüksek fırın cürufu çimento gösterilebilir.

Literatür araştırmalarında çeşitli mineral katkıların çeşitli yöntemler ile çimento üretiminde kullanıldığı yaygın olarak görülmektedir. Genel olarak bakıldığında çimento üretiminde mineral

katkı kullanımında her katkının ve her katkı kompozisyonunun birbiri ile uyumu, kısa ve uzun dönem mekanik, fiziksel ve durabilite performanslarının incelenmesi gerektiği görülmektedir. Türkiye dünyadaki araştırmacılar bugüne kadar atık malzemelerin çimento üretiminde kullanılmasına dair birçok başarılı araştırma yapmıştır. Bu çalışmaların arttırılmasına ihtiyaç vardır.

3.3.b. Çimentoya alternatif hammaddelerin yüksek oranda kullanımının çimento ve beton üretiminde kullanılmasına yönelik teknolojik çözümlerin geliştirilmesi, yaygın olarak kullanılmakta olan mineral katkıların yerine alternatif puzolan kaynaklarının araştırılması ve kullanılmasına yönelik süreçlerin ve teknolojik çözümlerin geliştirilmesi

Profesör Mehta tarafından Iravian tapınağının temel betonunda %57 oranında uçucu kül içeren çimentolu bağlayıcı kullanılmış, donatı ve derz içermeyen kütle betonda herhangi bir çatlamaya rastlanmamıştır. CO₂ emisyonlarını oldukça azaltan beton tasarımının 3 ve 7. günlerde eşdeğer betona göre basınç dayanımı daha düşük olup 28 gün ve sonrasında dayanım seviyelerinin istenilen mertebelerde olduğu bildirilmiştir [62]. Türkiye’de önemli projeler için geliştirilen beton tasarımları örneklenebilir. Betonsa tarafından Yavuz Sultan Selim Köprüsü ve 1915 Çanakkale Köprüsü projesi için özel olarak geliştirilen betonların üretiminde bağlayıcı olarak %65 öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve %35 oranında CEM I çimentosu kullanılmıştır. Osmangazi Köprüsünde Oyak Beton tarafından tasarlanan betonda yüksek oranda yüksek fırın cürufu içeren CEM III/B çimentosu kullanılmıştır. Bu mega projelerin dışında özellikle atıksu arıtma tesislerinde sülfata dayanıklılık için %30 üzerinde cüruf içeren beton tasarımlarına ve kütle beton uygulamalarında da yüksek oranda uçucu kül ve cüruf içeren beton tasarımlarına rastlanmaktadır. Bu proje için özel olarak üretilen üretilmiş, C₃A, MgO, alkali ve asitte çözünür klorür içeriği gibi özellikleri sınırlandırılmış çimentodur. Yine Betonsa tarafından üretilen %70’e kadar öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren temel, yol ve kaplama ve taşıyıcı amaçlarda üretimleri yapılan çevreci beton örneklenebilir.

Kalsine edilmiş killer, zeolit, biyokütle külü, bakır cürufu, alüminyum işleme atığı, mermer işleme atığı, pirinç kabuğu külü, sönmüş kireç atıkları ve kireç çamuru vs alternatif kaynaklar arasında sayılabilir. Türkiye’de cüruf atıkları, mermer tozu, beton santral atıkları, fosfojips vb ürünlerin çimento endüstrisinde alternatif hammadde olarak kullanılabilirliği çalışılmaktadır.

Türkiye’de alkali ile aktive edilmiş atık malzemelerin kullanımına yönelik laboratuvar ölçeğinde çalışmalar yürütülmektedir, yüksek fırın cürufu, metakaolin, uçucu kül, tuğla ve kiremit sektörü atıkları üzerinde bu alanda çalışmalar mevcuttur.

3.3.c. Çimento ve beton için sürdürülebilirliğe katkı sağlayan yeni nesil kimyasal katkıların geliştirilmesi ve yapının servis ömrü ve sürdürülebilirliğini arttırmaya yönelik özel betonlar tasarlanması

Çimento üretiminde öğütme prosesinde öğütme kolaylaştırıcı kimyasal katkıların kullanıldığı bilinmektedir. Öte yandan son yıllarda bazı öğütme kolaylaştırıcı kimyasal maddelerin aynı zamanda çimento su azaltıcı etkisi gösterebildiği, bazı su azaltıcı kimyasalların da aynı zamanda öğütme kolaylaştırıcı etkiye sahip olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır.

Çimentolar için kimyasal katkıların moleküler modelleme, simülasyon ve hesaplamalı yöntemler kullanılarak geliştirilmesine yönelik çalışmalara rastlanmaktadır. Bu tür yöntemlerin mineral katkılı çimento üretiminde kullanım için özel olarak tasarlanmış kimyasal katkıların geliştirilmesi açısından hızlı ve etkin çözümler sağlayabileceği öngörülmektedir. Yeni nesil, daha etkin katkılara özellikle düşük klinkerli, yüksek mineral katkılı çimentolarda ihtiyaç olacağı düşünülmektedir.

İngiltere’de 25 Mayıs 2021 tarihinde Manchester Üniversitesi ve Nationwide Engineering Group firması grafen katkılı betonu üreterek CONCRETENE adı ile Wiltshire’da grafenle geliştirilmiş 'beton' ile yeni bir spor salonunun zemin tasarımını yapmıştır. CONCRETENE ile çimentodan %30 tasarruf yaparken, tüm çelik takviyesini tasarımdan kaldırmıştır. Projelerin büyüklüğüne bağlı olarak, Nationwide Engineering firması; CONCRETENE’nin küresel bina endüstrisi tedarik zincirinde dünya çapında emisyonlarda %2 azalmaya sebep olması potansiyeli olduğunu tahmin ediyor. Hem Türkiye’nin önemli bir üretici hem de sürdürülebilir, servis ömrü daha uzun olan tasarımlarda nano malzeme/kompozit içeren özel beton tasarımlarının önem kazanacağı öngörülmektedir. Nanografi firması 30 Mart 2021 tarihinde Türkiye’de ilk grafen seri üretim tesisini açmıştır. Böylece grafen oksit ve grafen nano pelletin seri üretiminde önemli bir yol katedilmiştir. Önümüzdeki yıllarda ülkemizin önemli grafen, grafen oksit üreticilerinden bir olması öngörülmektedir. Bununla birlikte Türkiye’de grafen oksit veya grafen katkılı beton üreticisi bulunmamaktadır. Ancak, Türkiye’nin de önemli grafen oksit ve grafen üreticilerden biri olması nanoteknoloji ile özel beton tasarımını mümkün kılmaktadır. Materials for Life (M4L), Cardiff, Bath ve Cambridge Üniversiteleri tarafından kendi kendini onaran çimento esaslı inşaat malzemelerinin geliştirilmesini araştırmak için yürütülen EPSRC tarafından finanse edilen 3 yıllık araştırma projesi sonunda, Birleşik Krallık’ta kendi kendini iyileştiren betonun ilk saha denemesi gerçekleştirilmiştir. Deneme, A465 Heads of the Valleys Otoyolu yükseltme projesinin saha bileşimi içinde bir dizi kendi kendini iyileştiren teknoloji kullanılarak beş beton panelin yerinde inşa edilmesini içeriyordu. Dört kendi kendini iyileştirme tekniği hem bireysel olarak hem de birbirleriyle kombinasyon halinde kullanıldı. Bunlar: (i) Cambridge Üniversitesi tarafından endüstri ile iş birliği içinde geliştirilen, mineral iyileştirme ajanları içeren mikrokapsüllerin kullanımı, (ii) Bath Üniversitesi’nde geliştirilen uzmanlığı kullanarak bakteriyel iyileşme, (iii) şekil hafızalı polimer kullanımı çatlak kapatma için (SMP) tabanlı sistem ve (iv) bir vasküler akış ağı yoluyla bir mineral iyileştirme ajanının verilmesi. Bu amaçla deneme panelleri tasarımı, yapımı, test edilmesi ve izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede kendi kendini iyileştirme tekniklerinin gerçek bir şantiyede tam ölçekli yapılara dahil

etmek için üstesinden gelmesi gereken zorluklar, farklı tekniklerin yüklemeye tabi tutulduğunda panellerin davranışı üzerindeki etkisi ve oluşan çatlakları iyileştirmek için kullanılan teknikler son kullanıcılarla paylaşılmıştır.

Amerikan Çimento Üreticileri Birliği (PCA), betonda %30 oranda geri dönüşüm agregası kullanımının önemli problemler yaratmadığını ve sürdürülebilirliğe katkıda bulunduğunu belirterek, kullanımına ilişkin yönlendirmeler ile örnek bir beton tasarımı sunmuştur.

Türkiye’de kendiliğinden yerleşen beton, hafif beton, polimer ve çelik lifli beton gibi özel beton uygulamaları bilinmekle birlikte uygulamalarda artış beklenmektedir. Geri dönüşüm agregasının iyileştirilerek beton üretiminde kullanımının artırılmasına yönelik araştırma çalışmalarının sektöre yaygınlaştırılması beklenmektedir. Beton dayanımının numune almadan sensörlerle ölçümünü sağlayan Smart Beton, Akçansa tarafından geliştirilen bir projedir.

D. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

Arge Konusu	Hedeflenen Süre	Tahmini Bütçe	THS
Yapının servis ömrü ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik özel betonlar ve kimyasal katkıların geliştirilmesi	Orta-uzun vade	1 milyon USD\$	3-4
Yaygın olarak kullanılmakta olan mineral katkıların yerine alternatif puzolan kaynaklarının araştırılması ve kullanılmasına yönelik süreçlerin ve teknolojik çözümlerin geliştirilmesi	Orta vade	750 bin USD\$	5-6
Beton ve çimento bağlayıcı malzemelerde aynı performansı sağlayacak çimentoya alternatif hammaddelerin (yüksek fırın cürufu, uçucu kül vb) yüksek oranda kullanımına yönelik teknolojik çözümlerin geliştirilmesi	Kısa vade	500 bin USD\$	7-8
Atıkların yüksek oranda klinker ve çimento üretiminde kullanılması	Orta vade	1 milyon USD\$	7-8
Yeni nesil öğütme kolaylaştırıcıların ve kimyasal katkıların geliştirilmesi	Kısa vade	250 bin USD\$	5-6
Yeni nesil öğütme kolaylaştırıcıların ve kimyasal katkıların yaygın kullanımı	Orta vade	250 bin USD\$	7-8
Klinker optimizasyonu (Temel AR-GE)	Kısa vade	250 bin USD\$	2-3
Kimyasal katkı geliştirme (AR-GE /UR-GE)	Kısa vade	250 bin USD\$	5-6
Katkıların Çimento/beton uyumu saha geliştirmeleri	Kısa vade	250 bin USD\$	7-8

E. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Bir Araya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

Türkiye’de iç piyasaya arz edilen çimentonun %45,7’si hazır beton sektörü, %36,7’si bayiler, %4,2’si müteahhitler, %3,7’si inşaat şirketleri, %3,7 prefabrik sektörü, %0,8’i kamu ve %5,3’ü diğer kullanıcılar tarafından kullanılmaktadır. Bu hususta çimento üreticileri, TÜBİTAK, akademisyenler ve çimento kullanan sektörler çeşitli teorik ve uygulamalı etkinlikler düzenlenerek bir araya getirilmelidir. Bu etkinliklerde alternatif çimento türlerinin performansı ile ilgili bilgilendirmenin yanı sıra çevresel etkiyle ilgili avantajları da paylaşılmalıdır. Hedeflenen teknolojik ilerlemelerin sağlanabilmesi adına klinker üretimi ve çimento üretimi için mevcut kırma, öğütme, taşıma, yüksek basınçlı hava ve benzeri ekipmanların enerji verimliliğinin artırılması ve/veya enerji verimli yeni ekipmanların tasarlanması, geliştirilmesi, modellenmesi, simülasyonu ve uygulama süreçlerinin optimizasyonu, yenilenebilir enerji sistemlerinin söz konusu proseslere entegrasyonu, kırma-küçültme-öğütme, kinetik enerjilerin kullanılması, karbon yakalama ve depolama tekniklerinin klinker-çimento üretimi ve beton kürlemede kullanılması, atık enerjinin kullanımı ve enerji optimizasyonu alanlarında uzman akademisyenlerin ve sektörün ilgili bileşenlerinde uzman mühendislerin koordinatörlüğünde kimya mühendisliği, malzeme ve metalurji mühendisliği, makine mühendisliği, maden mühendisliği, enerji mühendisliği, çevre mühendisliği, jeoloji mühendisliği, bilgisayar mühendisliği, inşaat mühendisliği, maden kaynakları ve uygulamalı mineraloji, malzeme karakterizasyonu, atık yönetimi, beton teknolojileri, yapı kimyasalları, enerji sistemleri, atık yönetimi, kimyasal termodinamik, kimyasal prosesler gibi disiplinlerde uzman akademisyen ve mühendislerin bilgi birikimine dayalı projelerin yürütülmesi esastır. Bu noktada üniversiteler, araştırma enstitüleri, sektör firmaları ortak paydada buluşturulmalı ve endüstriyel paylaşım kurabilmek ve döngüsel ekonomiyi disiplinler arasına yayabilmek adına çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

F. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İş birliği Modeli ve Destek Mekanizması

Söz konusu teknolojilerin gerçekleştirilmesi noktasında teknolojinin Ar-Ge safhasından endüstriyel ölçekli üretimine kadar uzanan sürecin teknoloji hedefleri ve endüstrielleşme potansiyeli göz önünde bulundurularak tasniflenmesi önem arz etmektedir. Bu nokta ortaya konacak proje çalışmalarının ölçek odaklı aşamalandırılması, sağlanacak desteklerin bu ölçeklere göre düzenlenmesi, her bir ölçek için düşünülen proje çalışmalarının bulunduğu ölçekte hedeflenen ve mümkün olan seviyede teknolojik ürünü ortaya koyması zorunlu kılınmalıdır. Proje çalışmaları yalnızca bulunduğu ölçeği ve bu ölçeğin gerekliliklerini yerine getirmekle kalmayacak, aynı zamanda ölçeği bir üst seviyeye taşıyacak yeni proje çalışmalarının öngörülebilir ve gerçekçi bir projeksiyonunu ortaya koymalıdır.

Öte yandan söz konusu teknoloji için yürütülecek proje çalışmalarının çok farklı disiplinleri tek potada eritecek ve endüstriyel paylaşımların kurulmasını mümkün kılacak bir yapıda kurulması

önem arz etmektedir. Klinker üretimi ve yenilenebilir enerji sistemleri üzerine odaklanacak projelerin kırıcı ve öğütücü sistemleri, yanma teknolojileri, enerji yönetimi, biyokütle, yeşil hidrojen, dizelden elektriğe dönüşüm konularına odaklanan farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi faydalı olacaktır. Mevcut kırma, öğütme, taşıma, yüksek basınçlı hava ve benzeri ekipmanların enerji verimliliğinin artırılması ve/veya enerji verimli yeni ekipmanların tasarlanması, geliştirilmesi, modellenmesi, simülasyonu ve uygulama süreçlerinin optimizasyonu, kırma-küçültme-öğütme ve kinetik enerjilerin kullanılması üzerine odaklanacak projelerin ise kırıcı ve öğütücü sistemleri, enerji yönetimi, dizelden elektriğe dönüşüm konularına odaklanan farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılarla yönetilmesi gerekmektedir.

Otonom üretimi, yapay zekâ kullanımı konularında klinker üretiminde önemli bilgi ve know-how seviyesinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu aşamada sektörde bu bilgi ve tecrübenin en hızlı ve yaygın bir şekilde kullanımı ve transferine yönelik paylaşım çalışmaları önem arz etmektedir. Özellikle yurt dışında geliştirilen yeni teknoloji ve yaklaşımların en hızlı şekilde yerel üretim tesislerinde uygulamaya geçmesi için bilgi aktarım mekanizmalarının oluşturulması gerekmektedir. Benzer paylaşımlı ilişkinin yapı malzemeleri, yapı kimyasalları, kimyasal termodinamik, uygulamalı mineraloji gibi farklı disiplinler için kurulacak bir ortak çalışma platformu ile kurulması gerekmektedir.

Karbon yakalama, kullanım ve depolama üzerine odaklanacak projelerin ise yapı malzemeleri, yapı kimyasalları, kimyasal termodinamik, uygulamalı mineraloji gibi farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi faydalı olacaktır.

Alternatif çimento türlerinin geliştirilmesi üzerine odaklanacak projelerin yapı malzemeleri, yapı kimyasalları, kimyacılar gibi farklı disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi ve endüstriyel paylaşımların kurulması faydalı olacaktır. Aynı zamanda farklı endüstrilerin de olası endüstriyel paylaşım fırsatlarını değerlendirebileceği ve geliştirebileceği ve farklı ölçeklerde proje iş birlikleri kurabileceği bir yapının oluşturulması gerekmektedir.

Üniversitelerde gerçekleştirilen yüksek lisans/doktora çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve Üniversite-Sanayi iş birliği destekleri artırılmalıdır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önem arz edecektir. Uluslararası iş birlikleri ile önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Ayrıca, üniversitelerin İnşaat, Kimya, Jeoloji ve Maden Mühendislikleri bölümlerinde, konuyla ilgili dersler veren akademisyenlerin ders kapsamlarına çevre dostu katkılı çimentolarla ilgili

bölümleri eklemesi, geleceğin mühendislerinin bugünün ve yarının anlayışı olan sıfır atık anlayışıyla yetişmesi açısından faydalı olacaktır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önem arz edecektir. Uluslararası iş birlikleri ile önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır. Destek mekanizmaları kapsamında proje desteklerinde ek destekler sağlanması, gerekse projelerin gerçek ölçekli olmasına yönelik, başarılı sonuçların ortaya konulduğu noktalarda sağlanacak ve devam projelerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılacak bir teşvik mekanizmasının oluşturulması faydalı olacaktır. Farkındalığı en yüksek oranda arttırmak için uygulamalı etkinlikler önem arz etmektedir. Uygulama ve etkinlik konseptlerini belirlemek üzere çimento endüstrisinde faaliyet gösteren Ar-Ge Merkezleri ve akademisyenler ile iş birliklerinin kurulması faydalı olacaktır. Uygulamalı etkinlikler çimento fabrikaları bünyesinde önceden belirlenecek bölgelerde gerçekleştirilmesi yararlı bir yaklaşım olacaktır.

Destek mekanizmaları özelinde dögüsel ekonomi için artık bir zorunluluk olarak görülebilecek CCUS ve endüstriyel paylaşım kavramlarının gerek proje desteklerinde ek destekler sağlanması, gerekse projelerin ölçek büyütme potansiyellerine yönelik, başarılı sonuçların ortaya konulduğu noktalarda sağlanacak ve devam projelerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılacak bir teşvik mekanizmasının oluşturulması faydalı olacaktır. Bu noktada projeler için THS odaklı bir ek teşvik mekanizması oluşturularak proje boyunca veya proje sonrasında atlanacak her bir THS için ek teşvik sağlanması, nihai ürün niteliğinin yükseltilmesi noktasında yararlı bir yaklaşım olacaktır. Özel sektördeki kullanım için broşürler, videolar, eğitimler hazırlanmalı, çatı kuruluşlar ve odalar vasıtasıyla özellikler bayiler, müteahhitler, inşaat şirketleri prefabrik sektörü ve akademisyenlerle iletişim kurularak sektörel bilinç arttırılmalıdır. Çimentonun en büyük tüketicisi olan hazır beton tesislerinde alternatif çimento türlerinin kullanımını arttırmaya yönelik teşvik mekanizmaları kurulmalıdır.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Hedeflenen teknolojinin mümkün kılınması noktasında en önemli hususlardan biri kamunun mevzuat düzenlemeleri ile izleme, engelleme, teşvik etme olgularını sağlam bir zemine oturtabilmesidir. Dögüsel ekonomiye geçişte en önemli faktör olan net sıfır karbon hedefleri doğrultusunda klinker ve çimento üretiminde yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu ve yaygınlaşması, farklı çimento türlerinin, çimento yerine kullanılacak malzeme teknolojilerinin ve kimyasal katkıların geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına mevcut mevzuatlarda söz konusu sistemlerin endüstriyel paylaşımlar çerçevesinde geliştirilmesini mümkün kılacak revizyonlar gerçekleştirilmelidir. Ayrıca karbon yakalama teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına atık yakımı ve inşaat ve yıkıntı atıklarının depolanması noktasında mevcut mevzuatlarda geri dönüşümü ve bu dönüşümü endüstriyel paylaşımlar çerçevesinde sağlamayı mümkün

kılacak revizyonlar gerçekleştirilmelidir. Farklı çimento türlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına mevcut mevzuatların mevzuatlarda geri dönüşümü ve bu dönüşümü endüstriyel paylaşımlar çerçevesinde sağlamayı mümkün kılacak şekilde iyileştirilmesi ve teşviklerin verilmesi gerçekleştirilmelidir.

Dikkate alınması gereken bir diğer önemli husus ise ulusal karbon emisyon ticaret sisteminin kurularak proseslerde yapılacak olan iyileştirmelerden elde edilecek faydaların (karbon azaltımı) karbon kredilendirme süreci ile ödüllendirilerek teşvik edilmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda kamunun mevzuat düzenlemeleri ile izleme, engelleme, teşvik etme olgularını sağlam bir zemine oturması kaçınılmazdır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevcut mevzuatlar teknolojik ilerlemelerin sağlanması noktasında herhangi bir engel teşkil etmemesine rağmen yasal zorunluluklar ve teşvikler yoluyla gelişmelerin sağlanması noktasında revizyonlara ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada sınırda karbon ticareti esaslarının dikkate alınması, döngüsel ekonominin teşvik edilmesi, atıkların takibi ve geri dönüşümünün mümkün kılması, yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması ve endüstriyel paylaşımların kurulması ile ilgili düzenlemelerin ivedi bir biçimde mevzuatlarda yer alması ve ekonomik teşvik mekanizmalarının devreye sokulması gerekmektedir. Atık mevzuatının düzenli depolamayı kısıtlaması ve kontrollü atık toplama, arıtma ve alternatif yakıt üretiminin önünü daha fazla açacak şekilde düzenlenmesi halinde, fosil yakıtların alternatif yakıtlarla daha yüksek ikame oranları kolaylaştırılacaktır. Karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik alternatif çimento türlerinin kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik öncelikli faaliyet devlet kurumlarının finanse ettiği veya yürüttüğü projelerin şartnamelerinde CEM I veya Portland çimento ifadelerinin kaldırılarak, erken dayanım, nihai dayanım ve priz süresi gibi performans tabanlı spesifikasyonları dikkate alınarak güncellenmesi kritik önem taşımaktadır.

Teknik Altyapılar

Teknik altyapı noktasında her ne kadar Ar-Ge çalışmaları gerçekleştiren kamu ve özel kuruluşların yanı sıra üniversitelerde laboratuvar ölçeğinde çalışmalar sürdürülse de teknolojilerin endüstriyellemesi adına yatırım ve destekler doğrultusunda THS'lerin yükseltilmesi hayati derecede önem arz etmektedir. Mevcut durumda önemli oranda teknik alt yapı ve tecrübe birikimi bulunmaktadır. Bu tecrübelerin, inovatif gelişmelerin ve know-how'un en hızlı şekilde ülkemize transferi için alt yapının oluşturulması önemlidir.

İnsan Kaynakları

Hedeflenen teknolojinin mümkün kılınması amacıyla Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirmek adına üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağının olduğu düşünülmektedir. Öte yandan söz konusu tekniklerin bilimin kolektif yapısı altında

yurtdışında bulunan üniversiteler ve araştırma enstitüleri ile kurulacak iş birlikleri ile hızlı ve efektif bir biçimde geliştirilmesinin sağlanması büyük bir katkı sağlayacaktır.

Destek ve Teşvikler

Hedeflenen teknolojiler için küçük ölçekte Ar-Ge çalışmaları ile başlayıp endüstriyel ölçekli projelere dönüştürülmesi noktasında en önemli husus üniversite-sanayi iş birliklerinin kurulacağı proje çalışmalarının gerçekleştirilmesidir. Bu noktada destek sağlayıcı kuruluşların bilimsel gelişmeyi daha hızlı bir biçimde elde etmeyi mümkün kılacak destek ve teşvik mekanizmaları ortaya koymaları, patent desteklerini arttırmaları, katma değeri yüksek ürünlerin pazara sürülmesinde teşvik mekanizmalarını sıklaştırmaları önem arz etmektedir. Devlet destekli veya teşvikli akademi – sanayi iş birliklerinin kurulması, farkındalık, eğitim ve uygulama etkinliklerinin bu iş birlikleriyle planlanarak yürütülmesi, konuyla ilgili hızlı harekete geçilmesi ve ülke çapında uygulama yaygınlığının artırılması için büyük önem arz etmektedir.

Diğer

Çimento fabrikalarında enerji tüketiminin büyük çoğunluğu termal süreçlerde gerçekleşmektedir. Termal süreçlerin elektrikli sistemlerle yürütüldüğü bir gelecekte, bir çimento fabrikasının ihtiyaç duyacağı elektrik enerjisi ihtiyacı konvansiyonel fabrikalardan daha yüksek olacaktır. Bu elektrik enerjisi ihtiyacı potansiyel olarak yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanabilse dahi, 24 saat üretim gerçekleştiren çimento fabrikalarının, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi yıl boyunca 24 saat kesintisiz enerji üretemeyen santrallerden beslenebilmesi için enerji depolama sistemlerine duyacağı ihtiyaç kaçınılmazdır. Günümüz pil teknolojilerinin, ağır sanayilerin enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz olduğu; yakın gelecekte de bu ihtiyacı karşılayamayacağı öngörülmektedir. Pillerde gerekli kapasite artışı teknolojik olarak sağlansa bile, mevcut rezerv verilerine göre bütün dünyada bu sistemleri hayata geçirebilecek yeterli miktarda lityum rezervi bulunmamaktadır.

İfade edilen nedenlerle ağır sanayilerin kesintisiz enerji ihtiyacını karşılamak için temiz enerji sınıfında değerlendirilen nükleer enerji konusunda yatırımlar yapılmalıdır. Dünyada 80 yıldır elektrik üretiminde kullanılmakta olan nükleer enerji (filyon) teknolojisi konusunda ülkemizi doğrudan ilgilendiren kritik gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmeler enerji üretim verimliliği düşük ve kirliliği yüksek olan uranyumun yerine daha verimli ve uranyuma göre çok daha az atık ortaya çıkmasına neden olan toryumun kullanımına yöneliktir. Türkiye dünyadaki toplam uranyum rezervinin %0,2'sine sahipken, toplam toryum rezervinin %5,9'una sahiptir. Bu açıdan Türkiye'nin enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kurulacak yenilenebilir enerji tesislerinin, orta ve uzun vadede toryum yakıtlı nükleer santraller ile desteklenmesi önem arz etmektedir. Nükleer enerjiden elektrik üretimi konusunda çok daha yüksek verimlilikle çalışan ancak henüz teknolojik seviyesi laboratuvar aşamasında olan, geleceğin temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olma konusundaki en kuvvetli aday olan füzyon enerjisini göz ardı etmemek gerekir.

Bu teknoloji üzerinde Çin ve ABD son yıllarda önemli aşamalar kaydetmiştir. Henüz yeni sayılabilecek füzyon reaktörü teknolojilerinin araştırılması, bu alanda projelerin geliştirilmesi ve yatırımların yapılması, gelecekte ülkemizin enerji ihtiyacının oldukça önemli bir kısmının karşılanmasına ve bu enerjinin karbon nötr olarak elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

Üçüncü Bölüm Kaynakları

[33] “Turkcimento-WEBCINS2021,” n.d., <https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/Yeni-WEBCINS2021.xls>.

[34] “International Energy Agency (IEA). Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry.,” 2018, https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Technology+Roadmap—Low-Carbon+Transition+in+the+Cement+Industry&author=International+Energy+Agency&publication_year=2018.

[35] Robbie M. Andrew, “Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018,” Earth System Science Data 11/4 (November 20, 2019): 1675–1710.

[36] Mohammed S. Imbabi et al., “Trends and developments in green cement and concrete technology,” International Journal of Sustainable Built Environment 1/2 (2012): 194–216.

[37] Mónica Antunes et al., “Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review,” Materials 2022, Vol. 15, Page 209 15/1 (December 28, 2021): 209.

[38] United Nations, “The Sustainable Development Agenda - United Nations Sustainable Development,” About, 2018, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/>.

[39] “Reactive belite-rich Portland cement (RBPC) : GCCA,” accessed: November 7, 2022, <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/alternative-binders/reactive-belite-rich-portland-cement-rbpc/>.

[40] Chen Li et al., “Eco-efficient Cementitious System Consisting of Belite-Ye’elimite-Ferrite Cement, Limestone Filler, and Silica Fume,” ACS Sustainable Chemistry and Engineering 7/8 (April 15, 2019): 7941–7950.

[41] Londono-Zuluaga et al., “Clinkering and hydration of belite-alite-ye’elimite cement,” Cement and Concrete Composites 80 (July 1, 2017): 333–341.

[42] Irvin A. Chen et al., “Understanding expansion in calcium sulfoaluminate–belite cements,” Cement and Concrete Research 42/1 (January 1, 2012): 51–60.

[43] Warda Ashraf et al., “Carbonation Reaction Kinetics, CO₂ Sequestration Capacity, and Microstructure of Hydraulic and Non-Hydraulic Cementitious Binders,” in Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (Las Vegas, USA, 2016), <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>.

[44] V. Meyer et al., “Solidia Cement an Example of Carbon Capture and Utilization,” Key Engineering Materials 761 (2018): 197–203.

[45] Sam A. Walling - John L. Provis, “Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future?,” Chemical Reviews 116/7 (April 27, 2016): 4170–4204.

[46] PK Mehta, Investigations on energy-saving cements, 1980.

[47] Loth et al., “Hydration of Belite-ye’elimite-Ferrite cements : thermodynamic modeling,” In 14th International congress on the chemistry of cement (ICCC), October (2015).

- [48] K. Quillin et al., “Project AETHER Testing the durability of a lower-CO2 alternative to Portland cement,” in 34th Annu. Cem. Concr. Sci. Conf., 2014
- [49] Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, Chatham House Report, 13 June 2018, <https://www.chathamhouse.org/publication/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>
- [50] IEA, Cement Technology Roadmap: Carbon Emissions Reductions up to 2050, OECD Publishing, 2009. http://www.oecd-ilibrary.org/energy/cement-technology-roadmap-carbon-emissions-reductions-up-to-2050_9789264088061-en
- [51] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta, E. Gartner, Cement and carbon emissions, Mater. Struct. 47 (2014) 1055e1065, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5>.
- [52] C.J. Goodbrake, J.F. Young, R.L. Berger, Reaction of beta-dicalcium silicate and tricalcium silicate with carbon dioxide and water vapor, J. Am. Ceram. Soc. 62 (1979) 168e171, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1979.tb19046.x>.
- [53] R.L. Berger, J.F. Young, K. Leung, Acceleration of hydration of calcium silicates by carbon-dioxide treatment, Nat. Phys. Sci. 240 (1972)16e18, <http://dx.doi.org/10.1038/physci240016a0>.
- [54] Monkman, S., MacDonald, M., Hooton, R. D., & Sandberg, P. (2016). Properties and durability of concrete produced using CO2 as an accelerating admixture. Cement and Concrete Composites, 74, 218-224.
- [55] TÜİK İmalat Sanayi Atık Göstergeleri 2020
- [56] <https://www.thbb.org/teknik-bilgiler/rehberler/hazir-beton-yasam-dongusu-rehberi/>
- [57] https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf
- [58] Alternatif Çimento Malzemelerinin Kullanımı ve Bulunurluğu Raporu, TÇMB çevirisi, CEMBUREAU, 2019
- [59] Düşük Karbon Hedefinde Düşük Klinkerli Çimentolar. (Yayınlanma aşamasında)
- [60] Aruntaş, H. Y., Gürü, M., Dayı, M., & Tekin, İ. (2010). Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. Materials & Design, 31(8), 4039-4042.
- [61] Rende, K., Çakmak, E. G., Doğan, T., & Karahan, Ş. İmalat Sanayinde Atıkların Alternatif Yakıt ve Hammadde Olarak Kullanımı: Diğer Metalik Olmayan Mineral Ürünlerin İmalatı Sektörü.
- [62] <https://himalayanacademy.com/monastery/temples/iraivan/mehta-speaks-on-fly-ash-concrete>

EK 1. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Çimento Danışma Grubu Üyeleri

No	Ad-Soyad	Kurum/Kuruluş
1	Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN (Moderatör)	Hacettepe Üniversitesi
2	Prof. Dr. Burak UZAL	Abdullah Gül Üniversitesi
3	Doç. Dr. Gürkan YILDIRIM	Hacettepe Üniversitesi
4	Prof. Dr. Halit YAZICI	Dokuz Eylül Üniversitesi
5	Prof. Dr. Harun TANYILDIZI	Fırat Üniversitesi
6	Prof. Dr. İskender GÖKALP	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
7	Prof. Dr. Nuri AZBAR	Ege Üniversitesi
8	Prof. Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR	Ege Üniversitesi
9	Doç. Dr. Tahir Kemal ERDEM	Marmara Üniversitesi
10	Prof. Dr. Tayfun UYGUNOĞLU	Afyon Kocatepe Üniversitesi
11	Doç. Dr. Barış ŞİMŞEK	Çankırı Karatekin Üniversitesi
12	Doç. Dr. Onur TAYLAN	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
13	Doç. Dr. Okay ALTUN	Hacettepe Üniversitesi
14	Serkan TÜRK	TÜRKÇİMENTO
15	Yasin YİĞİT	Nuh Çimento
16	Çağatay Alp ARSLAN	Baştaş Çimento
17	Emre Birinci	Akçansa Çimento
18	Gökhan GÜMÜŞ	Batıçim Batı Anadolu Çimento Sanayii A.Ş.

EK 2. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Çimento Sektörel Odak Grubu Üyelerinin Bağlı Olduğu Kurumlar

Moderatör: Serkan TÜRK - TÜRKÇİMENTO

No	Kurum/Kuruluş
1	Abdullah Gül Üniversitesi
2	Afyon Kocatepe Üniversitesi
3	Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.
4	Ak-Kim Kimya San A.Ş.
5	Baştaş Çimento
6	Batisöke Söke Çimento Sanayii
7	Bolu Çimento
8	Çimentaş
9	Çimko Çimento Ve Beton Sanayi Ve Ticaret
10	Çimsa Çimento Sanayi Ve Ticaret A.Ş
11	Çukurova Üniversitesi
12	Dokuz Eylül Üniversitesi
13	Ege Üniversitesi
14	Fırat Üniversitesi
15	Göлтаş Çimento Sanayi Ve Ticaret A.Ş.
16	HABAŞ
17	Hacettepe Üniversitesi
18	İstanbul Teknik Üniversitesi
19	KÇS Kahramanmaraş Çimento Beton Sanayi Ve Madencilik İşletmeleri
20	Limak Çimento Grubu
21	Medcem Madencilik Ve Yapı Malzemeleri Sanayi Ve Ticaret A.Ş.
22	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
23	Nuh Çimento Sanayi A.Ş.

24	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
25	OYAK Çimento Grubu
26	Plustechno Danışmanlık Ve Yapı Kimyasalları Sanayi Ticaret A.Ş.
27	Sönmez Çimento Yapı Ve Madencilik Sanayi Ve Ticaret A.Ş.
28	T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı - Sanayi Genel Müdürlüğü - Tekstil ve Ağaç Ürünleri Sanayi Daire Başkanlığı
29	TOBB
30	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
31	TÜRKÇİMENTO
32	Türkiye Müteahhitler Birliği
33	Vicat Grup
34	Votorantim Çimento

Ek 3. Çalışmanın Yürütülmesinde Görevli Uzmanlar

Ad Soyad	Kurum/Kuruluş
Hande ALPASLAN	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Daire Başkanı
Melis KOCATÜRK	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Müdür V.
Dr. Özlem DOĞAN	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Başuzmanı
Mehmet İmran AKSU	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Uzmanı
Büşra YILMAZ YANIK	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Uzmanı - Çimento TYH Koordinatörü