



TÜRKÇİMENTO

**ÇİMENTO VE
YENİ NESİL ENERJİ
KAYNAKLARI**

TÜRKÇİMENTO
2022

Hazırlayanlar:

Serkan Türk, TÜRKÇİMENTO AR-GE Enstitüsü Müdürü
Yasin Engin, TÜRKÇİMENTO Danışmanı

Bu kitabın yayın ve dağıtım hakkı TÜRKÇİMENTO'ya aittir. Tamamı veya herhangi bir bölümü TÜRKÇİMENTO'nun yazılı izni olmadan fotokopi dahil mekanik ve elektronik ortamda transfer edilemez, çoğaltılamaz ve dağıtılamaz.



İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	1
2. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE ENERJİ	3
2.1. Enerji Kaynakları	3
2.2. Dünyada Enerji	4
2.3. Türkiye'de Enerji	8
2.4. Enerjinin Geleceği	10
3. ÇİMENTO SEKTÖRÜ VE ENERJİ	12
3.1. Türkiye Çimento Sektörü Profili	12
3.2. Çimento Sektöründe Enerji Tüketimi	12
3.3. Çimento Sektöründe Enerji Verimliliği	14
3.4. Çimento Üretiminde Sıfır Karbonlu Yakıtlara Geçiş	17
3.5. Çimento Sektöründe Elektrifikasyon	20
3.5.1. Plazma Teknolojisi	21
3.5.2. Elektromanyetik Isıtma	21
3.5.2.1. İndüksiyon Isıtma	21
3.5.2.2. Mikrodalga Isıtma	21
3.5.2.3. Dirençli Elektrikli Isıtma	23
3.5.3. Elektrifikasyonun Faydaları ve Zorlukları	23
4. YENİ NESİL ENERJİ	24
4.1. Güneş Enerjisi	24
4.1.1. Fotovoltaik Güneş Enerjisi	24
4.1.2. Konsantre (Yoğunlaştırılmış) Güneş Enerjisi	25
4.2. Hidrojen Enerjisi	28
4.3. Rüzgâr Enerjisi	29
4.4. Jeotermal Enerjisi	30
4.5. Dalga Enerjisi	31
KAYNAKLAR	33

1. GİRİŞ

Dünyanın belki de en çok bilinen formülü olan “ $E=mc^2$ ”yi bulan ünlü bilim adamı Albert Einstein, “Her şey enerjidir ve her şey yalnızca bundan ibarettir” demektedir. Enerji, insanlık tarihinin gelişiminde kritik bir rol üstlenmiş ve önemi giderek artmaya devam etmektedir.

Latince “energeia” kelimesinden türetilen enerji kelimesi, ilk olarak Aristoteles’in MÖ 4. yüzyıldaki çalışmalarında geçmektedir. Aristoteles, Metafizik isimli eserinde bu kelimeyi eylem, varlık, oluş anlamında kullanmıştır.

İlk enerji kaynağı gün boyunca ısı ve ışık sağlayan güneştir. Daha sonra, muhtemelen yıldırım çarpmasıyla ateş keşfedilmiş ve böylece insanlık tarihini değiştiren bir ısı ve ışık kaynağı üretilmiştir.

Binlerce yıl sonra rüzgârdan yararlanılabileceği keşfedilmiş ve ilk olarak ulaşım için yelkenli deniz araçlarında rüzgâr bir enerji olarak kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra tahıl öğütmek ve su çarklarını döndürmek için yel değirmenleri kullanılmaya başlanmıştır.

Tarih boyunca enerjiyi kullanarak birçok keşif yapılmıştır. 1850’den önce odun, saman ve kuru gübre; ısıtma, yemek pişirme ve demiryolu taşımacılığında buhar motorlarını çalıştırmak için buhar üretiminde ana yakıt kaynağı olmuştur.

Odundan kömüre, ardından petrol ve gaza dönüşümün ardından gelecekte petrol ve gazdan yeni nesil enerjiye doğru üçüncü büyük dönüşüm gerçekleşecektir. Aslında bu dönüşüm şimdiden başlamıştır. İlkel insanlar ateşi kullanmaya başladığından beri; enerji, insanın hayatta kalması için temel bir kaynak haline gelmiştir. Kolay erişilebilir odun; ilkel insanların hayatta kalması için ısıtma, pişirme ve diğer temel ihtiyaçlarını karşılamıştır. Madencilikteki teknolojik gelişmelerle birlikte daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan kömür yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

1698’de Thomas Savery, Savery Steam Pump adlı ilk ticari buharla çalışan cihazı; 1700’lerin ortalarında Thomas Newcomen ve James Watt buhar makinesini icat etmiştir. Buharlı motorlar daha sonra lokomotiflere, fabrikalara ve çiftliklere güç sağlamıştır. İskoç mühendis William Murdoch, 1792’de gazlı aydınlatmayı icat etmiş ve Britanya’daki şehirlerde bu gaz lambaları aydınlatma için kullanılmaya başlamıştır.

1875’te Fransızlar dünyanın kömürle çalışan ilk elektrik santralini kurmuştur. İnsan uygarlığının ilerlemesi kömür endüstrisinin gelişimini hızlandırmış ve kömür ilk kez odunu geçerek 1780’lerde birincil enerji karışımında en büyük payı almıştır. Bu, odundan kömüre ilk dönüşümdür.

1886’da Daimler, verimli enerji kaynakları olarak petrol ve gaz talebinde büyük bir artışı teşvik eden içten yanmalı motoru icat etmiştir. Jeolojideki ilerleme, sondaj ve arıtma teknolojileri petrol ve gaz üretiminin önemli ölçüde artmasına neden olmuştur. Buna göre, birincil enerji karışımında petrol ve gazın payı 1965’te hızla %50’nin üzerine çıkmıştır. Bu enerji kaynakları, dünyanın en büyük enerji kaynağı olan kömürün yerini almış ve kömürden petrol ve gaza ikinci dönüşüm kaydedilmiştir.

Ekonomik ve sosyal açıdan enerji talebindeki sürekli artış ve düşük karbona duyarlı toplumun ortaya çıkmasıyla birlikte, geleneksel fosil yakıttan fosil olmayan yenilenebilir

enerjiye üçüncü büyük dönüşüm kaçınılmaz hale gelmiştir. Son yıllarda kömür, petrol ve diğer yüksek karbonlu enerji kaynaklarının kullanımından kaynaklanan ekolojik ve çevresel sorunlar giderek daha fazla öne çıkmaktadır.

Günümüzde küresel enerjinin %70'i fosil yakıtlardan elde edilmektedir [1]. Güneş, rüzgâr, jeotermal, hidroelektrik, biyokütle, hidrojen ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmada kritik rol üstlenmektedir.

Çimento ve Enerji

Çimentonun son yüzyılda uygarlığımızın ilerlemesinde çok büyük etkisi olmuştur [2]. Bu eşsiz mineral bağlayıcı, suyla temas ettiğinde taş benzeri sert bir malzeme oluşumu ile sonuçlanan bir dizi karmaşık fizikokimyasal reaksiyona sahiptir. Bu reaksiyon, harç (su ve kumla karıştırılmış çimento) ve beton (suyla karıştırılmış çimento, kum ve agrega) üretimine izin vermektedir [3]. 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 [4]. Betona olan yüksek talep nedeniyle, 2020 yılında küresel olarak 4,3 Gton çimento üretildiği öngörülmektedir [5].

Çimento üretimini çok kısa bir şekilde tarif etmek gerekirse “enerji yoğun” olarak tanımlamak yerinde olacaktır. Bir ton çimento üretmek için ortalama 3-3,5 GJ ısı enerjisi ve 100kWh elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Prosesin kendine has özellikleri ve yüksek miktarda enerjiye gereksinim duyması bir başka fenomen olan “karbon ayak izini” öne çıkarmaktadır.

Portland çimentosu (PÇ) üretimi sırasında salınan CO₂ miktarının güçlü bir çevresel etkisi vardır. Bir ton klinker üretiminde yaklaşık 0,83 ton; bir ton çimento üretimi için ise yaklaşık 0,54 ton CO₂ salınmaktadır [6]. Bu miktardaki salım, çimento endüstrisini toplam antropojenik sera gazlarının %5 ila %8'inden sorumlu hale getirmektedir [7, 8]. Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının iki ana kaynağı bulunmaktadır [9]:

- 550°C'nin üzerinde kireçtaşının (CaCO₃) CaO ve CO₂'ye ayrışması (çimento üretimi toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %60 ila %65'i),
- Çimento fırını ve kalsinatörü ısıtmak için kullanılan fosil yakıt kullanımı (çimento üretimi toplam CO₂ emisyonlarının geri kalan %35 ila %40'ı)

Çimento üretiminde CO₂ emisyonlarının azaltılması için çalışılan yöntemler beş ana başlık altında toplanmaktadır [10]:

1. Çimentomsu malzemeler (cementitious materials) kullanımı ile klinker/çimento oranının azaltılması,
2. Klinker üretiminde biyokütle içeren alternatif yakıtların kullanılması,
3. Düşük CO₂ emisyonlu alternatif klinker teknolojilerinin geliştirilmesi,
4. Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojilerinin kullanılması,
5. Yenilenebilir enerji ile üretilen elektrik kullanımı ve klinker üretim sürecinin elektrifikasyonu.

2. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE ENERJİ

2.1. Enerji Kaynakları

Enerji kaynakları tüketilebilirlik durumuna göre iki sınıfa ayrılır:

Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, hidroelektrik ve dalga enerjilerini kapsayan yenilenebilir enerji kaynakları; enerji olarak tüketilmelerinden önce kendilerini yenileyebilme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle çevresel etkileri çok düşüktür.

Yenilenemeyen Enerji Kaynakları: Enerji olarak tüketildikleri takdirde ömrünü tamamlayan yani yalnız bir kez kullanılabilen kaynaklardır. Günümüzde en çok kullanılan yenilenemeyen enerji kaynakları kömür, petrol, uranyum, toryum ve doğal gazdır. Tüm dünya yenilenemeyen enerjiler için yeni kaynak arayışlarına sürekli devam etmektedir. Halen denizlerde sıklıkla petrol ve doğal gaz kaynakları aranmakta ve keşfedilmektedir. Ancak giderek artan temiz ve yenilenebilir enerji talebi, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve temin etmede artan maliyetler gelecekte yenilenemeyen enerji kaynaklarının birincil enerji kaynağı olmayacağını göstermektedir.

Yenilenebilir enerji, yerli kaynaklardan üretilmesi nedeniyle çoğunlukla ülkelerin enerji ithalatının azalmasına neden olmaktadır. Örneğin Türkiye birincil enerji kaynaklarında yaklaşık %70 oranında dışa bağımlıdır. Bu oran doğalgazda %99'dur [11].



Şekil 1. Yenilenebilir enerji kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları başlıca “güneş”, “rüzgâr”, “jeotermal”, “hidroelektrik”, “biyokütle”, “dalga” ve “hidrojen” enerjileri olarak gruplandırılmaktadır. Güneşin bu enerji çeşitlerinin büyük bir bölümünün ana kaynağı olduğu ve bunlara dolaylı veya dolaysız etkisinin bulunduğu söylenebilir. Hatta fosil yakıt olarak bilinen kömür, petrol ve doğalgaz da esasında güneş enerjisinin şekil değiştirmiş halleridir. Bu nedenlerden dolayı güneşi, dünyanın en önemli enerji kaynağı olarak tanımlamak mümkündür. Tablo 1’de yenilenebilir enerjiler ve bu enerjilerin kaynakları belirtilmektedir.

Tablo 1. Yenilenebilir enerjiler ve kaynakları [12]

Yenilenebilir Enerji	Yenilenebilir Enerji
Güneş Enerjisi	Güneş
Rüzgâr Enerjisi	Rüzgâr
Jeotermal Enerji	Yer Altı Suları
Hidroelektrik Enerjisi	Nehir ve Akarsular
Biyokütle Enerjisi	Biyolojik Atıklar
Dalga Enerjisi	Deniz ve Okyanuslar
Hidrojen Enerjisi	Su ve Hidroksitler

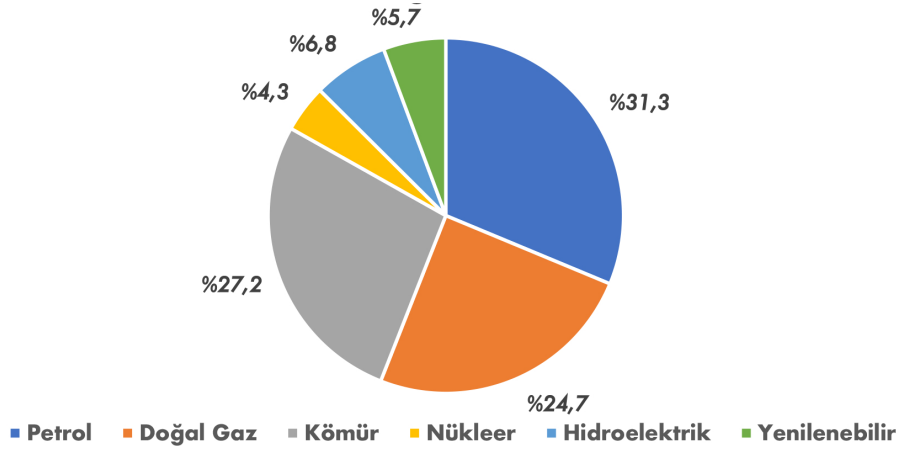
Tablo 2’de enerji kaynaklarının türü, emisyon seviyeleri, kurulumları ve çalışmaları için gerekli arazi kullanımları kıyaslanmaktadır. Kömür, doğal gaz, petrol gibi fosil yakıtların emisyon seviyesi oldukça yüksektir. Yenilenebilir enerjilerde ise emisyon oldukça düşüktür.

Tablo 2. Enerji kaynaklarının kıyaslaması [13]

Enerji Kaynağı	Fosil Yakıt	Alternatif Yakıt	Yenilenebilir Enerji	Emisyon Seviyesi	Arazi Kullanımı
Biyokütle	✗	✓	✓	☁☁☁	🌲🌲🌲🌲🌲
Kömür	✓	✗	✗	☁☁☁☁☁	🌲🌲🌲
Hidroelektrik	✗	✓	✓	☁	🌲🌲🌲
Doğal Gaz	✓	✗	✗	☁☁☁	🌲
Nükleer	✗	✓	✗	☁	🌲
Petrol	✓	✗	✗	☁☁☁☁	🌲🌲
Güneş	✗	✓	✓	☁	🌲🌲
Rüzgar	✗	✓	✓	☁	🌲

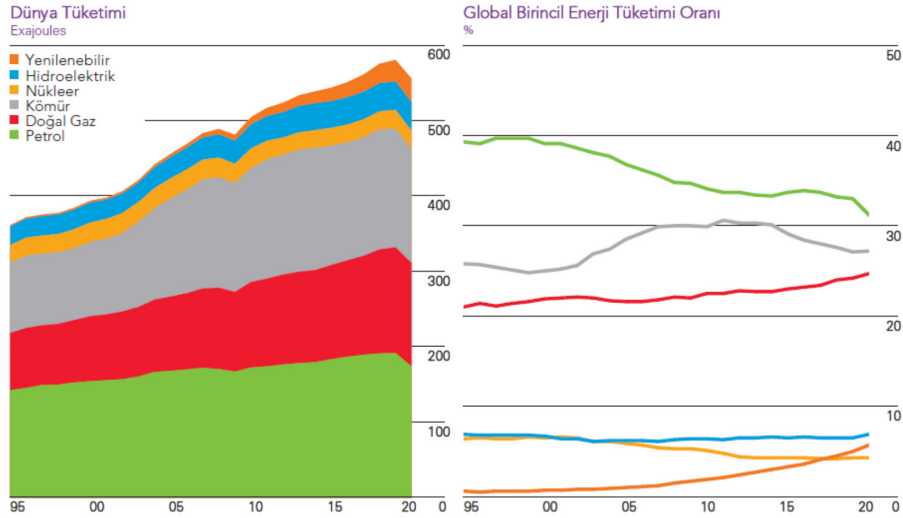
2.2. Dünyada Enerji

Şekil 2’de görüldüğü üzere 2020 yılında dünyada birincil enerji kaynağı olarak %31,3’lük oranla petrol ilk sırada yer almaktadır. Petrolü sırasıyla kömür, doğal gaz, hidroelektrik, yenilenebilir enerji ve nükleer enerji takip etmektedir [1].



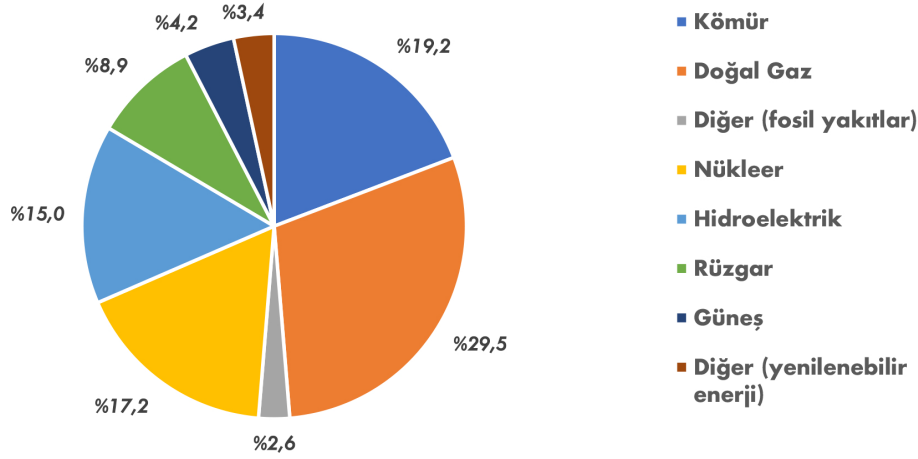
Şekil 2. Dünyada birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı [1]

Hidroelektrik dışında yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimindeki oranı sadece %5,7'dir. Bu oran oldukça düşük olsa da Şekil 3'te görüldüğü gibi 1995 yılından beri doğal gaz ile birlikte tüketim oranı artan iki enerji kaynağından birisidir. Tüketim oranı en çok azalan ise petroldür. 2000'li yılların başında artmaya başlayan kömür tüketimi son yıllarda düşüş göstermiştir [14].



Şekil 3. 1995-2020 yılları arasında birincil enerji kaynaklarının tüketim eğilimi [14]

Elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynakları incelendiğinde ise Şekil 4'te görüldüğü gibi %29,5'lik oranla doğal gaz ilk sırada yer almaktadır. Hemen ardından sırayla kömür, nükleer ve hidroelektrik gelmektedir. Yenilenebilir enerji olarak; %8,9'luk oranla rüzgâr enerjisi, %4,2'lik oranla güneş enerjisi ve %3,4'lük oranla diğer yenilenebilir enerji kaynakları yer almaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji tüketimindeki toplam payı %16,5'tir [15].



Şekil 4. Küresel elektrik üretim kaynaklarının dağılımı [1]

2021 Yenilenebilir Enerji Durum Raporuna göre, 2020 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarına en yüksek yatırımı yapan ilk 5 ülke Tablo 3'te görülmektedir. Türkiye; jeotermal enerji yatırımında ilk, hidroelektrik ve güneş (su ısıtma) enerjisinde ise ikinci sırada yerini almıştır. Fotovoltaik güneş, rüzgâr, hidroelektrik, konsantre (yoğunlaştırılmış) güneş ve güneş (su ısıtma) enerjilerinde ilk sırada yer alan Çin enerji yatırımlarında en çok öne çıkan ülke konumundadır [14].

Tablo 3. 2020 yılında yapılan yatırımlar, kapasite artışları ve üretime göre ilk 5 ülke [14]

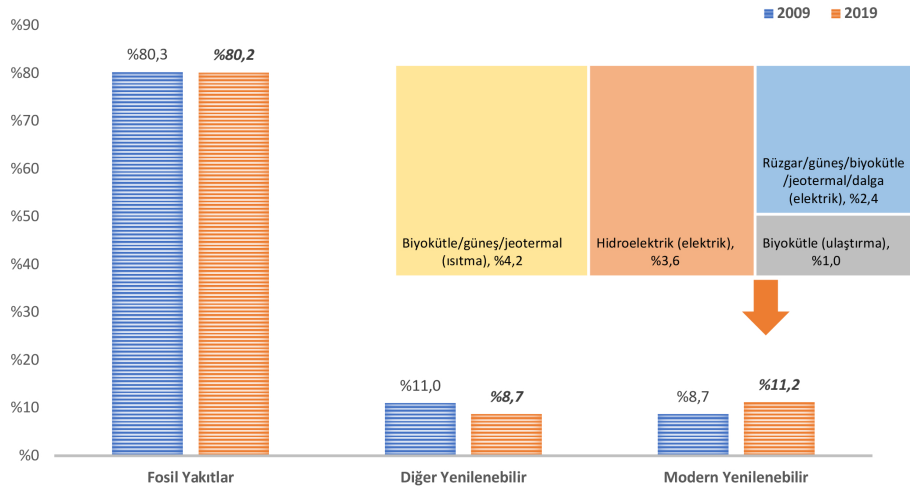
Enerji Kapasitesi	1	2	3	4	5
Fotovoltaik Güneş	Çin	ABD	Vietnam	Japonya	Almanya
Rüzgâr	Çin	ABD	Brezilya	Hollanda	İspanya
Hidroelektrik	Çin	Türkiye	Meksika	Hindistan	Angola
Jeotermal	Türkiye	ABD	Japonya	-	-
Konsantre Güneş	Çin	-	-	-	-
Güneş (su ısıtma)	Çin	Türkiye	Hindistan	Brezilya	ABD
Etanol Üretimi	ABD	Brezilya	Çin	Kanada	Hindistan
Biyodizel Üretimi	Endonezya	Brezilya	ABD	Almanya	Fransa

Tablo 4'te ise 2020 yılı itibarıyla yenilenebilir enerji kapasitesi açısından dünyadaki ilk 5 ülke belirtilmiştir. Enerji kaynakları güç (elektrik) ve ısı olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Güç kategorisinde jeotermal enerji kurulu kapasite açısından Türkiye 4. sırada yer almaktadır. Isı kategorisinde ise güneş ve jeotermal enerji kurulu kapasitesinde Türkiye 2. sırada yerini almıştır [14].

Tablo 4. 2020 yılında itibarıyla kapasite açısından ilk 5 ülke [14]

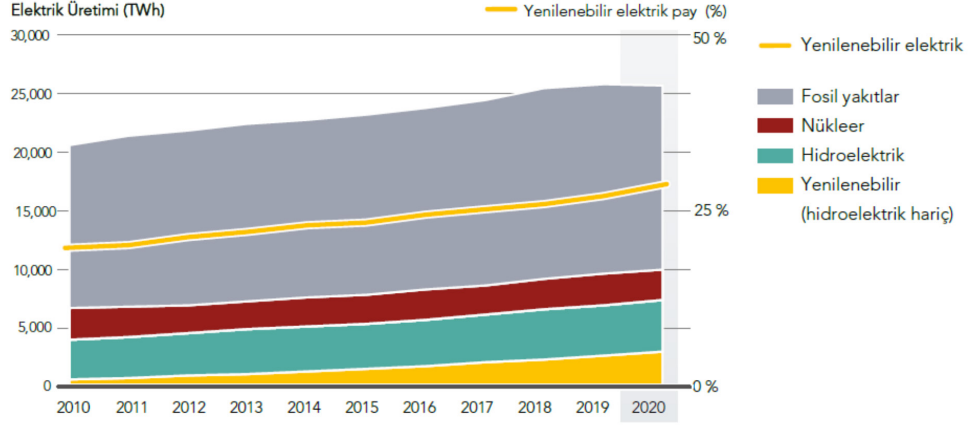
Enerji Kapasitesi	1	2	3	4	5
GÜÇ					
Yenilenebilir Enerji (hidroelektrik dahil)	Çin	ABD	Brezilya	Hindistan	Almanya
Yenilenebilir Enerji (hidroelektrik hariç)	Çin	ABD	Almanya	Hindistan	Japonya
Kili Başı Yenilenebilir Enerji (hidro hariç)	İzlanda	Danimarka	İsveç	Almanya	Avusturya
Biyo-enerji	Çin	Brezilya	ABD	Almanya	Hindistan
Jeotermal	ABD	Endonezya	Filipinler	Türkiye	Yeni Zelanda
Hidroelektrik	Çin	Brezilya	Kanada	ABD	Rusya
Fotovoltaik Güneş	Çin	ABD	Japonya	Almanya	Hindistan
Konsantre Güneş	İspanya	ABD	Çin	Fas	Güney Afrika
Rüzgâr	Çin	ABD	Almanya	Hindistan	İspanya
ISI					
Biyo-ısıtma (binalar)	ABD	Almanya	Fransa	İtalya	İsveç
Biyo-ısıtma (sanayi)	Brezilya	Hindistan	ABD	Finlandiya	İsveç
Güneş (su ısıtma)	Çin	Türkiye	Hindistan	Brezilya	ABD
Jeotermal	Çin	Türkiye	İzlanda	Japonya	Yeni Zelanda

Şekil 5'te 2009 ve 2019 yıllarındaki küresel toplam nihai enerji tüketiminde tahmini yenilenebilir enerji payı ve modern yenilenebilir enerjinin tahmini büyümesi belirtilmiştir. Fosil yakıtların nihai enerji talebindeki payı son yıllarda neredeyse hiç değişmemiştir.



Şekil 5. 2009 ve 2019 yıllarında toplam nihai enerji tüketiminde yenilenebilir enerji payı [14]

Şekil 6'da görüldüğü gibi 2010 yılından 2020 yılına kadar küresel elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin oranı sürekli artış göstermiştir.



Şekil 6. Kaynağa göre küresel elektrik üretimi ve yenilenebilir kaynakların payı, 2010-2020 [14]

2.3. Türkiye'de Enerji

Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) verilerine göre Tablo 5'te görüleceği üzere elektrik üretimi lisansı olan 1891 adet, ön lisansı olan 228 adet işletme bulunmaktadır. Toplam kurulu güçte en büyük payı hidroelektrik, daha sonra ise sırasıyla doğalgaz ve rüzgâr almaktadır. Yenilenebilir enerjiler içinde en çok lisansa sahip olan kaynaklar sırasıyla hidroelektrik, biyokütle, rüzgâr, jeotermal ve güneştir.

Tablo 5. 2021 yılı sonu itibarıyla elektrik piyasası ön lisans ve üretim lisansı dağılımı [16]

Kaynak Türü	Ön Lisans		Üretim Lisansı	
	Lisans Sayısı	Lisansa Derç Edilen Kurulu Güç (MWe)	Lisans Sayısı	Lisansa Derç Edilen Kurulu Güç (MWe)
Hidroelektrik	62	3.246,29	781	33.195,08
Rüzgâr	49	2.922,69	280	12.462,61
Jeotermal	11	313,76	65	1.827,63
Biyokütle	103	548,317	339	2.625,35
Güneş			37	1.468,81
İthal Kömür			15	12.754,80
Yerli Kömür	2	274,83	25	11.784,50
Kömür			16	1.235,17
Fuel-oil			21	992,506
Doğal Gaz			275	26.567,06
Uranyum			1	4.800,00
Diğer Termik	1	5,3	36	872,051
Genel Toplam	228	7.311,19	1.891	110.585,57

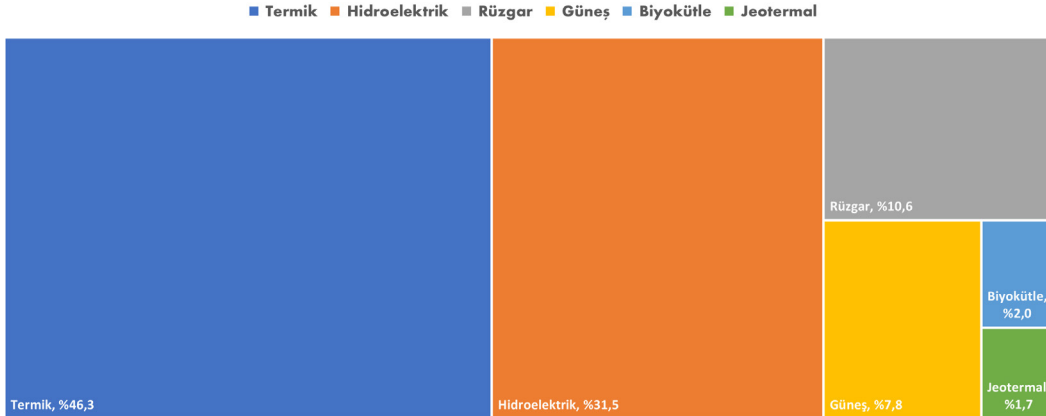
Tablo 6'da enerji kaynakları açısından toplam kurulu gücün ve toplam üretimlerin oranları belirtilmektedir.

Tablo 6. 2021 yılı sonu itibarıyla kaynak bazında kurulu güç ve üretim değerleri [16]

Kaynak Türü	Toplam Kurulu Güç* (Mw)	Oran (%)	Toplam Üretim* (Gwh)	Oran (%)
Hidroelektrik	31.492,58	31,55	55.695.231,65	16,8
Doğal Gaz	25.964,56	26,01	108.438.726,84	32,71
Rüzgâr	10.606,98	10,63	31.137.427,23	9,39
Linyit	10.119,92	10,14	43.400.430,26	13,09
İthal Kömür	8.993,80	9,01	54.888.840,62	16,56
Güneş	7.815,63	7,83	13.294.280,97	4,01
Jeotermal	1.676,17	1,68	10.770.879,81	3,25
Biyokütle	1.644,52	1,65	7.616.648,91	2,3
Taş Kömürü	840,77	0,84	3.539.791,50	1,07
Asfaltit	405	0,41	2.372.954,47	0,72
Fuel Oil	251,93	0,25	336.644,04	0,1
Nafta	4,74	0	0	0
LNG	1,95	0	0	0
Motorin	1,04	0	78,33	0
Toplam	99.819,57	100	331.491.934,64	100

*Lisanslı ve lisanssız santraller dâhil edilmiştir.

Şekil 7'de görüldüğü üzere 2021 yılının aralık ayında devrede olan santrallerin %53,7'sini yenilenebilir kaynaklardan elektrik üreten santraller oluşturmaktadır. Böylece yenilenebilir kaynakların oranı %53 seviyesinin üzerinde kalarak artmaya devam etmiştir. 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 [17].



Şekil 7. Aralık 2021 itibarıyla kurulu güç dağılımı [17]

Tablo 7’de 2010 ve 2020 yıllarında Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi belirtilmektedir.

Tablo 7. 2010 ve 2020 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre Türkiye kurulu gücü (MW) [18]

	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

2.4. Enerjinin Geleceği

2020’de ekonomiler COVID-19 karantinalarının ağırlığı altında ezilirken, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım son yirmi yılın en yüksek seviyesinde gerçekleşmiştir. Ayrıca, elektrikli araç satışları yeni rekorlar kırmıştır. Politikalar, teknoloji inovasyonu ve iklim değişikliğiyle mücadelenin artık acil bir konu olması sonucunda yeni bir enerji ekonomisi ortaya çıkmaktadır. Bu yeni enerji ekonomisinin ortaya çıkmasının sorunsuz olacağına dair hiçbir garanti yoktur, ancak yarının enerji ekonomisinin bugün sahip olduğumuzdan oldukça farklı olacağı çok açıktır [19].

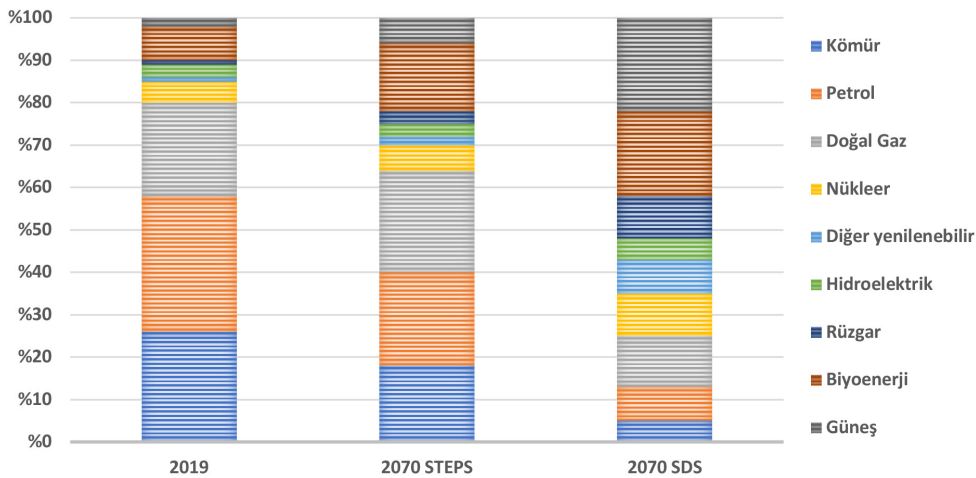
Elektrik, tüketicilerin hayatında her zamankinden daha merkezi bir rol oynamakta ve sayısı artan hanelerin yemek pişirme, aydınlatma, ısıtma ve soğutma gibi tüm günlük ihtiyaçları için güvendikleri enerji kaynağı olmayı vaat etmektedir. Elektriğin güvenilirliği ve satın alınabilirliği, insanların yaşamlarının ve refahının tüm yönleri için daha da kritik hale gelecektir. Elektriğin dünyanın nihai enerji tüketimindeki payı son yıllarda istikrarlı bir şekilde artmakta ve şu anda %20 seviyesinde bulunmaktadır. 2050 net sıfır senaryosunda elektrik enerjisinin, 2050 yılına kadar nihai enerji kullanımının yaklaşık %50’sini oluşturması beklenmektedir. Elektriğin yükselişi, enerji ile ilgili yatırım payında paralel bir artış gerektirmektedir. 2016’dan bu yana, enerji sektöründeki küresel yatırım, petrol ve gaz arzından sürekli olarak daha yüksek olmuştur [19].

Enerji sektöründeki temiz teknolojiler, başlangıçta politika desteği nedeniyle ve daha sonra en uygun maliyetli oldukları için tüm dünyadaki tüketiciler için ilk tercih haline gelmiştir. Çoğu bölgede, güneş enerjisi veya rüzgâr, halihazırda mevcut olan en ucuz yeni elektrik üretimi kaynağını temsil etmektedir. Yeni enerji ekonomisinde temiz teknolojiye yönelik devasa pazar fırsatı, yatırım ve uluslararası rekabet için önemli bir yeni alan haline gelmekte; ülkeler ve şirketler küresel tedarik zincirlerinde iyi bir konuma sahip olmak için mücadele etmektedir. Dünya 2050 yılına kadar net sıfır emisyon yolunda ilerlerse; rüzgâr türbinleri, güneş panelleri, lityum iyon piller, elektrolizörler ve yakıt hücreleri üreticileri için yıllık pazar fırsatının on kat büyüerek 2050 yılına kadar 1,2 trilyon ABD dolarına ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu beş unsur tek başına günümüzün petrol endüstrisinden ve onunla bağlantılı gelirlerden daha büyük olacaktır [19].

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim kapasitesi, toplam enerji üretim kapasitesinin %30'udur. 2020 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç kapasitesi %7 oranında kayda değer bir yükseliş göstermiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecekteki yatırım tahminleri dikkate alındığında, dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına ait kurulu gücün, toplam enerji kaynaklarına ait kurulu güç içindeki payının 2025 yılında %38 seviyesine, 2030 yılına kadar ise %49 seviyesine ulaşması öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2000 yılındaki toplam kapasitesi 849 GW seviyesinde iken bu miktar 2020 yılında 2.888 GW seviyesine çıkmıştır. 2025 sonuna kadar toplam kapasitenin 3.978 GW seviyesine yükselmesi beklenmektedir. Bu tahminin gerçekleşmesi için yıllık ortalama 215 GW ek kapasite yatırımı yapılması gerekmektedir. 2021 yılında hidroelektrik enerjisinden elde edilen enerji miktarının toplam yenilenebilir enerji kaynaklarının %47'sini oluşturması beklenmektedir. Ancak hidroelektrik enerjisinin toplam içerisindeki payı giderek azalmakta ve payının bir kısmını rüzgâr, güneş ve biyoenerjiye bırakmaktadır. 2030 yılına doğru güneş enerjisinden elde edilen elektrik miktarının %78 oranında artması beklenmektedir. Bunun sonucunda güneş enerjisinin toplam yenilenebilir enerji kaynakları içindeki payı %23 düzeyine çıkacaktır [20].

Türkiye'de ise enerji yatırımlarında yenilenebilir enerji kaynaklı santrallerin ön planda olduğu görülmektedir. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklı santrallerin toplam kurulu güç içinde aldığı pay yıllar içinde giderek artmaktadır. Yenilenebilir enerji santrallerine ait kurulu gücün toplam kurulu güç içerisindeki payı 2019 yılında %49, 2020 yılında %51 iken 2021 yılında %53,7 olmuştur. On Birinci Kalkınma Planı'nda yenilenebilir kaynakların elektrik üretimindeki payının 2023 yılında %38,8'e yükseltilmesi hedeflenmektedir. 2021 yılının son ayında bu oran %33,2'dir. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik miktarının toplam üretime oranının %49'a ulaşması beklenmektedir [20].

Şekil 8'te Uluslararası Enerji Ajansının 2070 yılına kadar sürdürülebilir kalkınma senaryosu (SDS) ve belirtilen politikalar senaryosu (STEPS) kapsamında küresel birinci enerji talebindeki değişim öngörüsü belirtilmektedir.

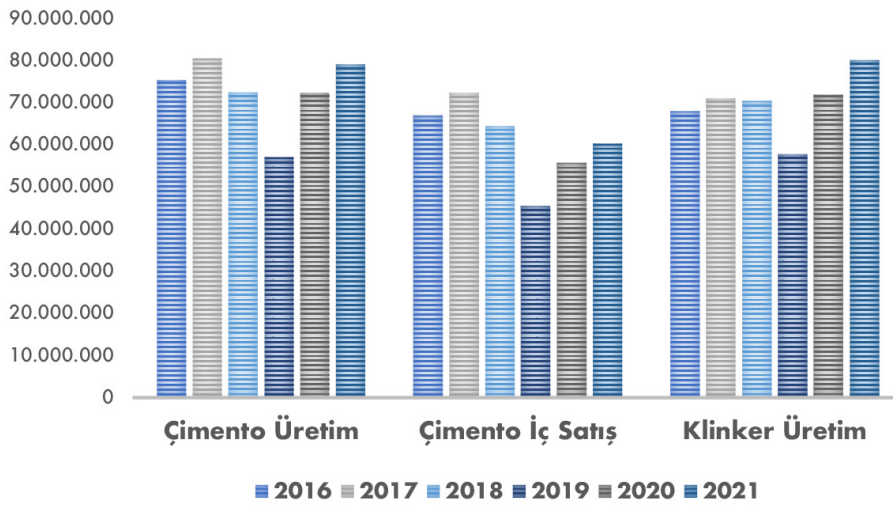


Şekil 8. Farklı senaryolara göre 2070 yılı birincil enerji talebinde enerji kaynaklarının oranı [21]

3. ÇİMENTO SEKTÖRÜ VE ENERJİ

3.1. Türkiye Çimento Sektörü Profili

Türkiye, çimento üretimi açısından dünyanın önde gelen ülkelerinden birisidir. TÜRKÇİMENTO üyelerinin verilerine göre 2021 yılında 78,9 milyon ton çimento üretimi ile Avrupa'da ilk sırada yer alan Türkiye, dünya genelinde ise ilk 10 ülkeden birisidir. Türk çimento sektörü son yıllarda çimento ihracatında da oldukça aktif olarak yer almaktadır. 2021 yılında 18,3 milyon ton çimento ve 12,5 milyon ton klinker ihracatı ile 1 milyar 256 milyon \$ gelir elde edilmiştir. Şekil 9'da yıllar bazında çimento üretimi, çimento iç satış ve klinker üretim değerleri görülmektedir [22].



Şekil 9. Yıllar bazında çimento üretimi, çimento iç satış ve klinker üretim (ton) [22]

2021 yılında çimento sektörünün klinker bazında kapasite kullanım oranı %84, kişi başı çimento tüketimi yaklaşık 741 kg'dır.

3.2. Çimento Sektöründe Enerji Tüketimi

Çimento, en yaygın kullanılan insan yapımı malzemelerden birisidir. Çimento üretimi; demir ve çelikten sonra ikinci en büyük endüstriyel sera gazı kaynağıdır. 2000 ve 2014 yılları arasında, küresel olarak 20. yüzyılın tamamından daha fazla çimento üretilmiştir.

Çimento sanayi, yüksek miktarda enerji ihtiyacı olan bir sanayidir. Çimento üretiminde kullanılan enerji, yakıt (ısıtma için) ve elektrik olarak iki şekilde kullanılmaktadır. Enerji verimliliği (termal ve elektrik) ekonomik ve teknolojik ihtiyaçlar tarafından yönlendirilen tüm iş kararlarının bir parçası olarak uzun yıllar boyunca çimento endüstrisi için bir öncelik olmuştur. Çimento üretiminde enerji bileşiminin %10-15'i elektrik, geri kalanını ise çeşitli yakıtlar oluşturmaktadır. Kuru bir proseste toplam elektrik tüketimi, ham madde hazırlama ve klinker üretimi (her biri %25) arasında eşit olarak ayrılmakta ve sonrasında %43'ü çimento öğütme işleminde, kalanı ise ham madde çıkarma, yakıt öğütme ve paketleme ile yükleme işlemlerinde kullanılmaktadır. Yakıtlar ise piro-proses (fırın), kalsinasyon ve ham madde kurutma işlemlerinde kullanılmaktadır [23].

Farklı fırın sistemleri ve fırın boyutları için gerekli olan fiili termal enerji tüketimi Tablo 8'de gösterilen aralıklar içindedir. Uygulamadan elde edilen deneyim; kuru proses kullanan, çok kademeli siklonlu ön ısıtıcıları ve prekalsinasyon fırınları olan tesislerin enerji tüketiminin yaklaşık 3000 MJ/ton klinkerle başladığını ve 3800 MJ/ton klinkerin üzerine çıkabildiğini (yıllık ortalama olarak) göstermektedir [24].

Tablo 8. Proseslerin özgül termal enerji talepleri [24]

Özgül termal enerji talebi (MJ/ton klinker)	Proses
3000-<4000	Kuru proses, çok kademeli (üç ila altı kademeli) siklonlu ön ısıtıcılar ve ön kalsinasyon fırınları için
3100-4200	Kuru proses, siklon ön ısıtıcılı döner fırınlar için
3300-5400	Yarı-kuru/ yarı-yaş prosesler (Lepol fırın) için
5000'e kadar	Kuru proses uzun fırınları için
5000-6400	Yaş proses uzun fırınları için
3100-6500 ve üstü	Şaft fırınlar için ve özel çimentoların üretimi için

Aşağıda belirtilenler parametreler çimento üretiminde özgül enerji tüketimini etkileyebilmektedir:

- Tesisin ebadı ve tasarımı
- üç ila altı siklon kademesi
- kalsinatör
- tersiyer hava
- değirmenin bileşik çalışması
- fırının uzunluk-çap oranı
- klinker soğutucusunun türü
- fırının iş yapma kapasitesi
- ham maddelerin ve yakıtların nem içeriği
- pişirilebilirlik gibi hammadde özellikleri
- yakıtların özgül kalorifik değeri
- klinkerin türü
- fırına beslenen malzemelerin ve yakıtların homojenizasyonu ve hassas ölçümü
- alev soğutma dahil olmak üzere proses kontrolünün optimizasyonu
- bypass oranı

En çok elektrik kullanılan ekipmanlar; değirmenler (son öğütme ve ham madde öğütme) ve egzoz fanları (fırın/farin değirmeni ve çimento değirmeni) olup, her ikisi birlikte toplam elektrik enerjisinin %80'den fazlasını tüketmektedirler. Elektrik enerji ihtiyacı 90 ila 150 kWh/ton çimento arasında değişmektedir [24].

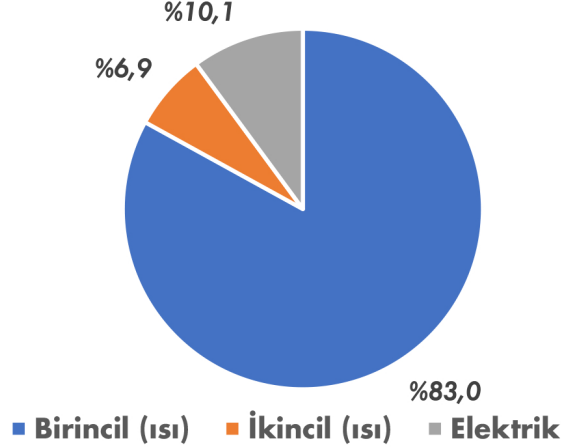
Tablo 9. Temel özelliklerine dayalı olarak öğütme tekniklerinin karşılaştırılması [24]

Öğütme prosesi	Enerji Tüketimi	Bakım İhtiyaçları	Kurutma Kapasitesi	İnce Öğütmeye Uygunluk
Bilyalı Değirmen	100%	Az	Ortalama	İyi
Gutbett valsli değirmen	%50 - %65	Az ila çok	Düşük ¹	Orta
Dikey valsli değirmen	%70 - %75	Ortalama	Yüksek	Orta

¹ Kalsifikatörde kurutma

2020 yılında Türk Çimento sektöründe; bir önceki yıla göre ithal kömür, yerli taş kömürü ve doğal gaz tüketiminde artış, yerli linyit ve LPG’de ise azalma görülmüştür. İthal kömür tüketimi %63,5 artarak 4.140.417 tona, yerli taş kömürü tüketimi %49,2 artarak 60.489 tona ve doğal gaz tüketimi %44,3 artarak 15.712.650 Sm³ değerine ulaşmıştır. Yerli linyit tüketimi %44,2 azalarak 395.416 tona ve LPG tüketimi ise %33,2 azalışla 197 tona gerilemiştir. Ayrıca, ikincil (atık) yakıt kullanımında geçtiğimiz yıla kıyasla %1,7’lik mütevazı bir düşüş meydana gelmiş ve yaklaşık %7,7 değerine gerilemiştir.

Şekil 10’da görüldüğü gibi çimento sektöründe enerji tüketimi %83 birincil yakıtlar, %6,9 ikincil yakıtlar ve %10,12 elektrik olarak dağılmaktadır [25].



Şekil 10. 2020 yılı çimento sektörü enerji tüketimi dağılımı [25]

3.3. Çimento Sektöründe Enerji Verimliliği

İyileştirme çalışmaları ve gelecekteki trendler

Yeni ekipmanlara yatırım yapılarak ve mevcut ekipmanlar iyileştirilerek güç tüketimini azaltmak için Avrupa’da son on yılda birçok sürekli iyileştirme çalışması yapılmıştır. Çimento fabrikaları, tesisin büyüklüğüne ve proses teknolojisine bağlı olarak 350 ila 1000 arasında ve hatta daha fazla çalışan motora (konveyörler, pompalar, küçük fanlar ve blower fanlar dahil) sahip olabilmektedir. Bu motorların değiştirilmesi veya giderek yaygınlaşan

değişken hız sürücülerinin uygulanması ile güçlendirilmesi, ileriye yönelik önemli bir adım atılmasını sağlamıştır.

Özgül enerji talebinin azaltılmasında daha önemli adımlar atılması için, bilyalı değirmenlerle yapılan çimento öğütme işleminden yüksek verimliliğe sahip valsli dik değirmenlere veya yüksek basınçlı öğütme valslerine geçmek gibi çok büyük güçlendirme işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Bu tür geliştirmeler için yapılan yatırım yüksektir. Dolayısıyla, bunlar çoğunlukla, piyasanın durumu ümit verici olduğunda veya ekipmanların hali hazırda çok eski olmaları halinde ve değiştirilmesi gerektiğinde gerçekleştirilmektedir.

Elektrik enerjisi tüketimi ayrıca ürün özelliklerine bağlıdır. Çimentonun dayanımı ne kadar yüksek olursa, genellikle o kadar ince öğütülmesi gerekir ve dolayısıyla değirmenlerde o kadar fazla enerji kullanılması gerekmektedir. Bu trend, ekipman verimliliği artmasına rağmen, elektrik enerjisi talebinin yükselmesine yol açabilmektedir.

Yüksek performanslı çimentoya yönelik mevcut piyasa talebi nedeniyle yüksek verimlilikle çalışan separatörler şimdilerde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Klinker pişirme işlemi ile ilgili olarak, termal verimliliği artıran tedbirler çoğu zaman daha fazla elektrik enerjisi gerektirmektedir. Örneğin, modern ızgaralı soğutucu tekniklerinin kullanılması, termal enerji kullanımında bir azalmaya neden olmakla birlikte, elektrik enerjisi tüketimini artırmaktadır.

Çevresel gereklilikler daha sıkı hale geldiğinde özgül güç tüketimi de normal olarak artmaktadır. Aslında, daha düşük toz emisyonu sınır değerleri, hangi teknolojinin uygulandığından bağımsız olarak toz ayırma işlemi için daha fazla güç gerektirmektedir. Diğer bileşenlerin (NO_x veya SO_x gibi) azaltılması için ek üniteler kurulmalıdır, bu da elektrik gerektirmektedir. Örneğin, NO_x azaltımı için seçimli katalitik indirgeme (SCR) teknolojisinin kullanılması, elektrik enerjisi talebinde 5 kWh/t klinker düzeyinde bir artışa neden olmaktadır [23].

Enerji verimliliğini artırmanın diğer yolları

Yine de enerji verimliliğini daha da artırmak için çimento teknolojisini geliştirme potansiyeli bulunmaktadır. Kurulan ekipmanların verimliliğinin yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili olarak kullanılabilmesiyle ilişkili olarak üretim esnekliğine duyulan ilgi artmaktadır. Öğütme tesisleri gibi üretim tesislerinin de kolaylıkla çalıştırılabilir ve durdurulabilecek şekilde tasarlanmasıyla yenilenebilir enerjinin kullanımı en üst düzeye çıkarılabilecektir. Bu, mutlak enerji talebini azaltmayacak, hatta biraz artıracak; ancak elektrik üretiminden kaynaklanan dolaylı CO_2 emisyonlarını azaltacaktır.

Gelecek ile ilgili projeksiyon yapıldığında, karbon yakalama, depolama ve kullanma teknolojilerinin (CCSU) uygulanmasıyla üretim sürecinin kapsamlı olarak yeniden yapılandırılması gerekebilecektir. Bunlar endüstriyel ölçekte uygulanmaları halinde, yakalama ve sıvılaştırma işlemi nedeniyle, çimento üretimiyle ilişkili güç tüketiminin önemli ölçüde artmasına neden olan elektrik yoğun teknolojilerdir. Yanma sonrası teknolojilerin yanı sıra oksijen-yakıt gibi yakalama teknolojileri; bir hava ayırma ünitesinde oksijen üretilmesi, absorban maddelerin tekrar elde edilmeleri ve CO_2 'in ayrıştırılması, saflaştırılması ve sıkıştırılması için yüksek güç tüketimi gerektirecektir. Dolayısıyla karbon yakalama, güç tüketimini tesis düzeyinde %50 ila %120 oranında artıracaktır.

Yenilenebilir güç tüketimi

Çimento üretim prosesi, elektrik enerjisi için depolama kapasitelerinin gerekliliğini ortadan kaldırarak yenilenebilir kaynaklarla enerji arzının yönetimindeki dalgalanmaları düzeltebilir.

Geleneksel olarak çimento üreticileri, elektrik enerjisinin yoğun olarak kullanıldığı proseslerini çalışma saatleri ve süreleri ile alakalı olarak yerel şebeke operatörleri ile koordine etmektedirler. Bu çoğu zaman, ham madde ve çimento değirmenlerinin yalnızca, enerji talebi ve fiyatlarının daha düşük olduğu gece saatlerinde çalıştırılmasına yol açmaktadır.

Çimento fabrikasının talep tarafında, elektrik enerjisi yoğun prosesler olarak farin üretimi ve çimento üretimi için esnek bir öğütme yaklaşımı kullanılabilir. Ayrıca, silo ve üretim kapasiteleri yönetimi, bir aküye benzer şekilde ve fazla yenilenebilir enerjiden optimum şekilde yararlanmak için kullanılabilir. Elektrik enerjisi arzının yetersiz olduğu dönemlerde talebin azalması, fosil yakıtlardan elektrik üretimi ihtiyacını azaltabilir. Klinker üretiminin herhangi bir kesinti olmadan devam edebilmesi için, yenilenebilir enerjinin bol olduğu zamanlarda değirmenlerde maksimum miktarda malzeme öğütülebilmelidir.

Başlıca engeller; değirmen ve silo kapasitelerinin daha az verimli kullanımı ve tahmin dönemi ile puant yük sürelerinin, değirmenin çalıştırılması ve sürekli olarak işletimi için çok kısa olabilmektedir. Değirmenlerin açılıp kapatılması; enerji kayıplarını, ekipmanların aşınmasını, bakım ihtiyacını ve belirsiz ürün kalitesine sahip ürün miktarlarını arttırmaktadır.

Çimento endüstrisinde yerinde enerji üretimi

Özellikle gelişmekte olan piyasalarda bazı çimento üreticileri, şebeke dengesizliği durumunda enerji arzı sağlamak ve çimento üretiminde, özellikle öğütme ünitelerinde doğrudan yenilenebilir enerjiyi kullanmak için rüzgâr veya güneş enerjisi santrallerine yatırım yapmaktadırlar.

Klinker üretim sürecindeki yüksek ısı prosesinden kaynaklı gaz çıkış sıcaklığı, teknolojik yapılarına göre farklılaşmakla beraber ön ısıtıcı sonrasında 280°C-350°C arasında, klinker soğutma çıkışında da 250°C-300°C arasında değişen ve klinker üretim kapasitesine bağlı olarak artan debilerdeki atık sıcak gazlar, yüksek ısı işlemdeki üretim sürecinde tekrar kullanılmadığından direkt olarak atmosfere atılmaktadır. Klinker üretim sürecinde atıl olan bu sıcaklıktaki gazlar, klasik buhar teknolojisine dayalı elektrik enerjisi üretimi için önemli bir ısı kaynağı olmasından ötürü değerlendirilebilmektedir [23].

Çimento üretim prosesi gereği, bacalardan atmosfere atılan yüksek sıcaklıktaki gazların daha düşük sıcaklıklarda atılması ve bu sayede elektrik enerjisi elde edilmesi temeline sahip atık ısı geri kazanım tesislerinde bacalardan atılan ısı değeri yüksek olan atık gazın enerjisi kullanılarak kazanlarda buhar üretilmektedir. Üretilen buhar pompa yardımı ile kollektöre gönderilerek, buradan türbin döndürülmekte, jeneratörde elektrik enerjisi üretilmektedir. Sistemde kullanılan gazlar, ısı transferi amaçlı kullanılacağı için emisyon değerlerinde bir değişim olmamaktadır. Böylelikle atmosfere yüksek sıcaklıkta verilen gazların ısıları geri kazanılarak değerlendirilmekte, atmosfere düşük sıcaklıkta ve aynı özellikte gaz emisyonu verilmektedir.

Bir ısı geri kazanım kazanı ve bir türbin sistemi vasıtasıyla elektrik üretmek için atık ısı kısmen de geri kazanılabilmektedir. Seçilen prosese (buhar, amonyak, organik ve fırın teknolojisinin kullanımı) bağlı olarak, fırının çalışmasında değişiklikler olmaksızın

bu teknolojilerin kullanılmasıyla toplamda 8 ila 22 kWh/ton klinker veya bir çimento fabrikasının güç tüketiminin %16'sı kadarı üretilebilmektedir [23].

Bu teknolojilerin gelişmesini engelleyen temel kısıtlamalar, yatırım maliyetleri ve düşük sıcaklık seviyeleri ile sınırlanan verimlilikten kaynaklanmaktadır.

3.4. Çimento Üretiminde Sıfır Karbonlu Yakıtlara Geçiş

Birçok ülkede çimento üreticileri, geleneksel kömür ve petrol kokundan alternatif yakıtlara geçiş için yakıt konusunda halihazırda önemli ölçüde yatırım yapmış bulunmaktadır. Gerçekten de çimento endüstrisi hem malzeme geri dönüştürme hem de enerji geri kazanımının birleşimi (birlikte işleme olarak adlandırılır) yoluyla atıklardan elde edilen alternatif yakıtları kullanmaktadır. Günümüzde, atık biyokütle dahil alternatif yakıtlar, çimento endüstrisi yakıt bileşiminin %44'ünü oluşturmaktadır (Get the Numbers Right (GNR) Projesi 2016). CEMBUREAU Düşük Karbonlu Yol Haritası doğrultusunda, 2050 yılı itibarıyla bu oranın %60'a çıkarılması hedeflenmektedir. Bu sayede yakıt kaynaklı CO₂ emisyonlarında %27'lik bir azaltım sağlanabilecektir.

Çimento üretiminde yüksek karbonsuzlaştırma seviyelerinin elde edilebilmesi için fırın içindeki kimyasal reaksiyonların gerçekleştirilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan yanma enerjisinin bir kısmının hem geleneksel hem de yeni geliştirilen karbonsuz ya da sıfıra yakın emisyonlu kaynaklardan sağlanması gerekecektir.

Alternatif yakıtlar ve birlikte işleme

Birlikte işleme, termal bir süreçte atıklardan malzeme geri dönüşümü ve enerji geri kazanımının eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesidir. Bu işlem, enerji geri kazanımı ve malzeme geri dönüşümünü birleştirdiği için döngüsel ekonomi ilkelerine endüstriyel bir yanıt teşkil etmektedir. Çimento endüstrisi, atıkları yakıt olarak kullanarak enerji arz güvenliğine de katkıda bulunmaktadır. Çimento endüstrisinde, aşağıdakiler dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden dolayı prensip olarak geri dönüştürülemeyen atıklar kullanılmaktadır:

- Geri dönüşümü her zaman ekonomik açıdan uygun olmayabilir.
- Geri dönüşümlü ürüne yönelik yeterli bir pazar mevcut olmayabilir.
- Geri dönüşüm aslında ekolojik açıdan en iyi seçenek olmayabilir (örneğin, CO₂ ayak izini artırması nedeniyle)

Mevcut durumda, çimento fabrikalarında alternatif yakıtların payının %95'e kadar artırılmasına karşı teknik bir sınırlama yoktur. Bu seviyeye ulaşmak, büyük ölçüde, yeterli düzenleyici koşullarının varlığına ve uygulanmasına, atık akışlarının doğru bir şekilde ön işlemden geçirilmesine ve atık akışlarına erişim sağlamak için ekonomik olarak eşit şartların var olmasına bağlı olacaktır.

ECOFYS adlı firmanın Nisan 2017 tarihinde yayınlanan "AB çimento tesislerinde atıkların birlikte işlenmesine dair durum ve beklentiler" başlıklı araştırmasına göre, AB-28 ülkelerindeki alternatif yakıtların oranı %44'ten %60'a çıkartıldığı takdirde, atıktan enerji üretecek ilave santral yatırımı yapılmayarak, 12,2 milyar avroya kadar tasarruf elde edilecek ve yıllık 26,0 milyon ton CO₂ emisyonu önlenecektir [26].

Birlikte işlemenin başlıca itici güçleri; atıkların ayrı toplanmasına yönelik teşvikler, tüm AB Üye Devletlerinde çöp sahasında atık depolama yasağının uygulanması ve fırınlarda atık kullanımına yönelik izinlerin düzenlenmesine ilişkin bürokratik işlemlerin azaltılmasıdır.

Ayrıca, birlikte işleme ile ilgili potansiyel, söz konusu malzeme geri dönüşüm şeklinin ve bunun Avrupa'nın iddialı geri dönüşüm hedeflerine ulaşılması yönündeki katkısının kabul edildiği yasal ve düzenleyici tedbirlerle daha da artırılabilir.

Biyokütle

Çimento üretiminde kullanılan biyokütle, işleyen döngüsel ekonominin etkileyici bir örneğidir. Diğer işlemlerde ekonomik olarak geri dönüştürülemeyen biyokütle, çimento endüstrisinin benzersiz "birlikte işleme" işlemi kullanılarak geri dönüştürülebilmektedir. Önceden en az bir kere başka bir amaç için kullanılmış ve değer zincirinde en düşük noktaya ulaşmış olan atık biyokütlenin kullanımı, bu biyokütlenin enerji/mineral içeriğinin çimento ürünüde geri dönüştürülmesini sağlamakta ve değer zincirini etkili bir şekilde yeniden başlatmaktadır.

Atık biyokütle, öngörülebilir gelecekte çimento fırınında kullanılan yakıt karışımının değerli bir kısmı olmaya devam edecektir. Bununla birlikte, tüm fırın yanma ısısı talebi için biyokütle yakıtlarının kullanılmasının önünde teknik ve piyasa kısıtları bulunmaktadır.

Öncelikle ve en önemlisi, endüstriyel termal kullanımlara uygunluk açısından önemli belirsizlikler söz konusudur. Atık toplama alanının varlığı, iyileştirilmiş geri dönüşüm süreçleri, atıktan enerji üreten tesislerin talepleri ve kalite sorunları (örneğin, yapı kerestesi üzerindeki tutkallar ve koruyucular) dahil birtakım faktörler nedeniyle biyokütle yakıt kaynaklarının arzı sınırlıdır. Buna bağlı olarak biyokütle, çimento fırınları için yalnızca kısmi bir çözüm sağlamaktadır.

Örneğin kereste üretimi ve kullanımından elde edilen %100 biyokütle yakıtların avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Doğal odunlar, genellikle yüksek nem içeriğine sahip olduğundan geleneksel yakıtlardan daha düşük ısıl girdi sağlamaktadırlar. Ayrıca, yalnızca elektrik üretimi için üretilen odun yakıtlarının sürdürülebilirliğin güvenilirliği konusunda soru işaretleri bulunmaktadır.

Atık odunlar; boya, vernik, tutkal ve koruyucu maddeler ile işlem görmüş olmaları durumunda çevre açısından sorun teşkil edebilmektedir. İnşaat tedarik zincirine giren tutkallı odunlarda bir artış trendi vardır ve bunun, gelecekte atık bertarafı sorununun büyümesine neden olabileceği düşünülmektedir. İz elementlerin varlığı da yüksek ikame seviyelerinde sorun teşkil etmektedir.

Atık biyokütle, doğal ağaç bazlı biyokütle ve atık odun kullanımı ile ilgili sınırlamalara rağmen, biyokütle çimento sektörü için çözümün bir parçası olmaya devam edecektir. Ayrıca, çimento fırınındaki karbon yakalama teknolojileriyle birleştirildiğinde bu doğal enerji kaynaklarının, potansiyel olarak "net negatif" karbon ayak izi sağlayabileceğinin bilinmesi de önemlidir.

Kullanılmış lastikler, geri dönüştürülebilen, ancak geri dönüştürülmüş ürüne talebin yetersiz olduğu bir atık türü örneğidir. Lastiklerin önemli miktarda biyojenik karbon içerdiği (doğal kauçuk içeriği nedeniyle yaklaşık %27), dolayısıyla fosil yakıtlarla ilişkili CO₂ emisyonlarında doğrudan azalmaya yol açtığı unutulmamalıdır. Çimento üretim süreci, lastiğin özgün bileşenlerinden eş zamanlı olarak enerji geri kazanımı ve malzeme geri dönüşümü gerçekleştirilmesi imkânı sunmaktadır. Kullanılmış lastikler, yüksek ısıl değere sahip olduğundan çimento endüstrisi için ideal bir yakıt niteliği taşımaktadırlar. Aynı

zamanda, yüksek bir demir ve silika içeriğine sahip olmaları, malzeme geri dönüşümü açısından mükemmel bir özelliktir ve çimento endüstrisinin birincil ham madde tüketimini azaltmasına olanak sağlamaktadır.

Atık su arıtma çamuru da klinker üretim sürecinde hem alternatif yakıt hem de ham madde olarak kullanılabilir. Atık su arıtma çamuru, bir çimento fırınında işlemden geçirildiğinde, kömüre kıyasla nispeten yüksek net ısı değerine sahiptir. Çimento fırınlarında çamur kullanılması, atık su arıtma çamurunun güvenli ve çevreye duyarlı bir şekilde bertaraf edilmesi konusundaki soruna da çözüm sunabilmektedir. Fırındaki yüksek sıcaklık nedeniyle atık su arıtma çamurunun organik içeriği tamamen yok olurken, çamur mineralleri pişirme işleminden sonra klinkere bağlanmaktadır.

Elektrifikasyon

Elektrik şebekesi karbonsuzlaştıkça, yenilenebilir/düşük karbonlu elektrik, gelecekte fırın ısısının sağlanması için olası ancak teknik olarak zorlu bir fırsat sağlayabilir. Geleneksel yakıtlarla çalıştırıldığında çimento fırını sistemi, en az 1450°C sıcaklık gerektiren bir tepkimenin gerçekleşmesi için yaklaşık 2000°C sıcaklığa sahip bir alev kullanmaktadır. Fırına ilişkin önemli özellikler arasında alevin uzunluğu, sıcaklığı ve ısıyı ham maddelere nasıl aktardığı yer almaktadır.

Teorik olarak karbonsuzlaştırılmış enerji, elektromanyetik olarak üretilen plazma yaratmak için kullanılabilir. Çimento üretiminde plazma teknolojisi kullanımının mevcut bir örneği bulunmamasıyla birlikte, atık arıtma sektöründe plazma teknolojisi örnekleri mevcuttur. İhtiyaç duyulan elektrik miktarı (ortalama bir fırın için yaklaşık 300MWe olarak tahmin edilmektedir), maliyeti ve mevcut durumda bu tür yeni bir fırının tasarımı için gerekli teknik bilgiler endüstri tarafından araştırılmaktadır [26].

Hidrojen

Karbondan tamamen arındırılmış bir gelecekte ve doğal gazın tam potansiyelinin henüz kullanılmadığı ve CO₂ emisyonlarında hala önemli tasarruflar sağlayabileceği göz önünde bulundurulduğunda, hidrojen, şebekedeki doğal gazın kısmen de olsa yerine konabilecek gazlardan biridir. Farklı üretim süreçlerinin çevresel verileri temelinde kategorize edilmiş olan çeşitli hidrojen türleri (mavi, gri, yeşil, turkuaz) bulunmaktadır. Yeşil hidrojen yenilenebilir elektrik kullanmaktadır ve potansiyel olarak, geleneksel yakıtlar ve biyokütle ile ilişkili olarak ortaya çıkan CO₂ emisyonlarına sebep olmadan çimento fırınında yanma yakıtı olarak kullanılabilir [26].

Bu elbette yeterli miktarda yenilenebilir enerjinin olmasına ve hem enerjiyi hem de endüstriyel varlıkları dönüştürmek için bununla bağlantılı çok büyük yatırımların yapılmasına bağlıdır. Yine de son yıllarda hidrojenin çimento üretim sürecinde kullanımına yönelik pilot ölçekte denemeler yapıldığı bilinmektedir. Hidrojen kullanımı; fırın sisteminin fiziksel özelliklerini, yakıtın kütleli akışlarını, sıcaklık profilini, ısı transferini ve tesisin güvenlik hususlarını etkileyebilmektedir. Bir çimento fırını sisteminde kısmi hidrojen kullanımına ilişkin olasılıkların belirlenmesi için daha fazla fizibilite çalışması yapılması gerekmektedir.

Yakıt Döngüsü

“Yakıt döngüsü”, yeni yakıtlar üretmek için yanma ürünlerinin kullanılmasını kısaca ifade etmek için kullanılan bir terimdir. CO₂ ve hidrojen kullanılarak metan/metanol üretilmesi

veya biyokütle veya biyosıvı üretmek amacıyla alg büyümesini teşvik etmek için CO₂ kullanılması gibi bu tür teknolojiler, çimento fırınına uyarlanacak karbon yakalama teknolojisi gerektirmektedir. Bu teknolojiler, karbonun yakıt olarak kullanılincaya kadar “geçici” olarak depolanmasını temsil etmektedir. Bir döngü sisteminde çalıştırıldıklarında bu CO₂ kullanım teknolojileri, çimento üretiminin döngüsel ekonomi açısından faydalarının ve çimento üretim işleminin çok yönlülüğünün ilginç ve ileri bir örneğini temsil etmektedir. Alg büyümesi konusu halihazırda çeşitli çimento şirketleri tarafından araştırılmakta ve küçük ölçekte projeler hayata geçirilmektedir [26].

3.5. Çimento Sektöründe Elektrifikasyon

Elektrifikasyon; fosil yakıtları (kömür, petrol ve doğal gaz) kullanan teknolojileri, enerji kaynağı olarak elektriği kullanan teknolojilerle değiştirme sürecini ifade etmektedir.

Elektriğin çimento üretimi için ısı girdisi olarak kullanılması, üretim proseslerinin 1450°C'ye kadar sıcaklıkları gerektirmesi nedeniyle büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Bunların gelişimi için bir vaka çalışması olmamasından dolayı, şimdiye kadar piyasada mevcut hiçbir çözüm bulunmamaktadır. Gerçek bir teknik engel olmamasına rağmen, gelecekte ısı üretimi için elektrik kullanılmasının önkoşulu, elektriğin %100 fosil yakıtsız üretilmesi ve uygun fiyattan satılmasıdır.

Üzerinde çalışılan olası teknolojiler şunlardır:

- Plazma: Plazma, bir gazın iyonize bir gaz oluşturmak için yeterli derecede ısıtılması halinde meydana gelen maddenin temel hallerinden biridir. 3000 ila 5000°C arasındaki sıcaklıklar elde edilebilmektedir. Bir ön ısıtıcıda ve ön kalsinasyon fırınında plazma jeneratörlerini kullanma konsepti şu anda başlıca teknoloji yoludur.
- Elektrik akımlı ısıtıcılar: Isı, genellikle bir kılıfla korunan dirençli bir elemandan akım geçirilerek üretilmektedir ve yüksek hızlı konveksiyonla gaz akışına aktarılmaktadır. Maksimum gaz çıkış sıcaklıklarının 1100°C - 1200°C olduğu bildirilmektedir.
- Mikrodalgayla ısıtma
- Rezistif elektrikli ısıtma
- İndüksiyon ısıtma

Güneş ve rüzgâr enerjisinin ve pil depolamanın maliyeti azaldıkça, sanayi elektrifikasyonunun yenilenebilir elektrik kaynağı ile birleştirilmesi endüstriyel karbonsuzlaştırma için potansiyel bir çözüm haline gelmiştir [27]. Çimento üretiminin elektrifikasyonu, mevcut yakma yöntemine göre daha uygulanabilir bir alternatif haline gelmiştir ve konvansiyonel yakıt kullanan fırınların aksine, elektrikli fırınlar atmosfere çok daha düşük CO₂, NO_x ve SO_x emisyonları salmaktadır. Ancak elektrikli fırınlar geleneksel fırınlara göre daha kısa ömürlü olabilmektedir [28]. Çimento endüstrisi %36 elektrifikasyon potansiyeline sahiptir. Bu da esas olarak kireçtaşının kalsinasyonunu dikkate alırken; klinker pişirmek için gerekli olan enerji, teknoloji geliştirmenin bu aşamasında elektriğe dönüştürülebilir olarak kabul edilmemektedir [29]. Ancak CemZero projesinin 2018 raporunda [30], plazma teknolojisi ile klinker üretiminin mümkün olabileceğinden bahsedilmektedir. CemZero projesi, Cementa ve Vattenfall iş birliğiyle İsveç'te yürütülmekte ve çimento üretim sürecinin tamamen veya kısmen elektrifikasyonu için farklı teknolojileri test etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmalar, elektrikli bir proseste çimento üretim maliyetlerinin günümüz teknolojisine

kıyasla iki katına çıktığını ancak radikal emisyon azaltımları için diğer teknolojik seçeneklerle karşılaştırıldığında rekabetçi olabileceğini göstermiştir [31].

Elektrikle çalışan bir kalsinasyon sürecine işaret eden bir başka proje de büyük bir şirketler konsorsiyumu tarafından geliştirilmekte olan ve 2023 yılına kadar tam olarak çalışır durumda bir tesisi hayata geçirmeyi öngören LEILAC'tır [32]. Bu proje, kalsinasyon aşamasından yüksek oranda CO₂ konsantre gaz akımının üretilmesi yoluyla CO₂ yakalama ve depolamanın fizibilitesini doğrudan bir ayırma perspektifiyle değerlendirmektedir. Bu teknoloji, fazla gücü yakalayabilir ve elektroliz yoluyla, bir bataryaya benzer şekilde çalışarak kireçtaşını sönmüş kirece dönüştürebilmektedir. Bu süreç zaten laboratuvar ölçeğinde test edilmiş ve daha büyük bir ölçekte uygulanması hedeflenmiştir [33].

3.5.1. Plazma Teknolojisi

Bu teknoloji 2000°C'nin üzerinde sıcaklıklar üretebilmektedir. Mevcut durumda çelik endüstrisinde atık arıtma amacıyla kullanılmaktadır [34]. Çimento endüstrisinde uygulanması, geri kazanılmış CO₂'yi plazma gazı olarak kullanmaya olanak sağlayacaktır [35]. Bu da karbonsuz çimento endüstrisi hedefine büyük bir katkı sunacaktır. Termal plazma kullanmanın en önemli dezavantajı, oda sıcaklığındaki mevcut fazları değiştirerek klinker performansını bozabilen reaksiyon ortamının aşırı ısınması ve ayrıca elektrotların kısa ömürlü olmasıdır [36]. Daha önce bahsedildiği gibi CemZero'nun laboratuvar ölçeğinde test ettiği teknolojilerden biri plazma kullanımudur. Plazma gazı bir ısı kaynağı olarak kullanılarak normal kalitede klinker üretmek mümkün olabilecektir. Bununla birlikte, daha büyük ölçekli bir test yapılmalıdır; çünkü bu teknolojinin kullanımıyla ilgili en büyük endişe döner fırında ısı transfer hızının nasıl korunması gerektiğidir [30].

3.5.2. Elektromanyetik Isıtma

Elektromanyetik dalgaları kullanan ısıtma teknolojileri, %90'a varan bir verimlilikle hızlı bir şekilde yüksek sıcaklıklar sağlayabilmektedir [37]. Bu teknolojilerin bazı örnekleri aşağıda belirtilmiştir:

3.5.2.1. İndüksiyon Isıtma

İndüksiyon ısıtma; elektriksel olarak iletken bir nesne değişen bir manyetik alana yerleştirildiğinde meydana gelmektedir. Malzeme önce bir yönde, sonra diğer yönde manyetize edildiğinde moleküller arasındaki sürtünme ısıya dönüştürülmektedir [38]. İndüksiyon fırınına soğutmak için su soğutmalı bobinler kullanılmaktadır. Bu teknoloji, kalsinatörün neredeyse anında ısıtılmasını veya soğutulmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, kalsinasyon için gerekli ısı, indüksiyon sistemi tarafından sağlanan ısıdan daha düşük olduğunda ürünün aşırı ısınma riski bulunmaktadır [39]. Bu tip teknoloji, yüksek sıcaklıklara hızlı bir şekilde ulaşabilmektedir ve metal ergitme için kullanılan indüksiyon fırınlarında uygulanmaktadır [40]. Ancak şu anda seramik malzemelerin işlenmesi için potansiyel bir çözüm olarak görülmemektedir [37].

3.5.2.2. Mikrodalga Isıtma

Kalsinasyon için gerekli ısı, malzemeye elektromanyetik dalgalar biçimindeki doğrudan enerjiyi aktararak bir radyasyon formu aracılığıyla mikrodalga ile iletilebilmektedir. 1160°C sıcaklığa ulaşan kalsinasyon işleminde mikrodalga fırın kullanımı araştırılmıştır [41]. Araştırmada, bu yöntemin geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında reaksiyon süresi,

enerji tüketimi ve kirletici gazların emisyonu açısından daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, bakır oksit ile kaplanmış refrakter seramik kullanımı, enerji tüketimini azaltmakta ve süreci iki kat daha hızlandırmaktadır. Mikrodalga ısıtma şu anda biyokütle ve yan ürünlerin dönüştürülmesinde ve ayrıca çoğunlukla laboratuvar ölçeğinde olmasına rağmen atık işlemede kullanılmaktadır [42]. Bu teknoloji, büyük hacimlerin hızlıca iç ısıtmasını sağlayabilse de büyük üretim ölçekleri, bu teknolojinin genel kullanımını engelleyen yüksek işletme maliyetlerine neden olmaktadır [37].

Geleneksel ısıtmada tüm ısı, malzemenin dış yüzeyinden içeriye doğru aktarılmalıdır. Mikrodalga ısıtma, enerjinin doğrudan malzemenin içerisine girebildiği için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Mikrodalgaların bu şekilde hacimsel ısıtmayı yapabilmesi için belirli koşulların sağlanması gerekmektedir. Mikrodalgalar yansıtılırsa veya malzemeye çok kolay nüfuz ederlerse ısı kayıpları meydana gelebilmektedir.

MAT (Microwave Assist Technology), aynı fırında geleneksel radyan ısı ve mikrodalga enerjisini aynı anda uygulayan, yüksek hacimli ürünün ısıtılmasına yardımcı olan bir yöntemdir. Mikrodalga termal aktivasyonunun, bir enerji transferi aracı olarak termal iletim bağımlılığını ortadan kaldırarak, kireçtaşını hedef alması ve doğrudan ısıtması beklenmektedir. Ortam ve fırın astarı gibi ürün olmayan malzemelerin ısıtılması için daha az enerji kaybı yaşanmaktadır. Bu teknoloji hem reaksiyon süresini hem de sıcaklığı azaltarak, enerji tüketimini daha da azaltarak kireç üretim hızını artırma potansiyeline sahiptir. Kireçtaşının hibrit mikrodalga teknolojisi ile kalsine edilmesinin tam ölçekli uygulanmasının, kireç endüstrisinde 7,3 TBTU/yıl ve çimento endüstrisinde 39 TBTU/yıl tasarruf sağlaması beklenmektedir [43].

Uygulama alanları arasında çelik üretimi, su arıtma, kâğıt fabrikaları, çevre uygulamaları, baca gazı kükürt giderme vb. yer almaktadır. En verimli döner fırınlar, daha büyük ön ısıtmalı ve yakıt tüketimi 4,5 MMBTU/ton kireç olan fırınlardır. En verimli dikey fırınlar ise, 3,02 MMBTU/ton kireç paralel akışlı rejeneratif (PFR) fırınlardır. Yakıt verimliliği, yakıtın yakıldığı döner fırının her iki ucundaki kayıpları en aza indirerek ve ısıyı geri kazanarak elde edilmiştir. Dikey fırın, yanma öncesi ve sonrası ısı geri kazanımı ile taş yataktaki yakıtı yakarken aynı şeyi yapmaktadır. Ek olarak, her iki teknoloji de refrakter seçimini ve tasarımını sürekli olarak geliştirerek, refrakter ile yalıtım yapılarak, hava sızıntısını en aza indirmek için contaları iyileştirerek ve yakıt verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için operasyonel kontrolü geliştirerek iyileştirilmiştir [43].

Konvansiyonel kalsinasyon proseslerinde radyan ısı, kömür veya gaz yakılarak veya elektrikli ısıtma elemanları vasıtasıyla uygulanmaktadır ve ürün yüzeyden içeriye doğru ısınmaktadır. Bu, uzun ısıtma ve bekleme süreleri gerektiren çok yavaş bir işlemdir. Doğrudan mikrodalga ısıtma, reaksiyonların ve difüzyonun daha kısa sürelerde ve daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesini sağlamaktadır. Doğrudan mikrodalga ile ısıtma; kireçtaşı, metal cevheri ve seramik tozları gibi minerallerdeki doğal olarak yavaş olan termal iletimin üstesinden gelmektedir. Mikrodalga gücü, geleneksel radyan ısının mikrodalgalarla (Mikrodalga Destek Teknolojisi veya MAT) birleşimiyle çözülen birçok teknik faktör nedeniyle henüz yüksek sıcaklıktaki endüstriyel işleme uygulanmamıştır [43].

Tablo 10. ABD çimento üretimi için MAT uygulaması için tahmini yıllık enerji ve CO₂ tasarrufları [43]

Üretim milyon ton çimento/yıl	MAT Enerji azaltımı (MMBtu/ton)	Enerji tasarrufu/yıl (TBtu)	Çevresel fayda CO ₂ (Mlb)	Yıllık tasarruf milyon \$
88	0.44	39	3,250	155

3.5.2.3. Dirençli Elektrikli Isıtma

Bu yaklaşımda metal bir yüzey, genellikle bir örtü ile korunan dirençli bir elemandan akım geçirilerek ısıtılmaktadır. Daha sonra farin ve dirençli ısıtıcı arasındaki doğrudan temasın teşvik edilmesi mümkünse, ısı ya yüksek hızlı konveksiyon yoluyla gazla ya da iletim yoluyla doğrudan malzemeye ya da kondüksiyon yoluyla aktarılabilir. Bu tip teknoloji cam eritme fırınlarında halihazırda kullanılmaktadır [44]. Tipik olarak, elektrikli cam fırınları dikey bir eritme işlemi kullanmaktadır [45]. Fırın sürekli olarak üst taraftan beslenir ve eriyen malzeme alttan fırını terk etmektedir. Bu tip fırınlar %87'ye varan verimlilik ve çok çeşitli yüksek sıcaklık prosesleri sağlayabilmektedir [37].

3.5.3. Elektrifikasyonun Faydaları ve Zorlukları

Herhangi bir endüstrinin elektrifikasyonunun enerji ve çevre politikalarından büyük ölçüde etkilendiği dikkate alınmalıdır [34]. Sadece elektrifikasyon maliyeti değil, aynı zamanda elektrik fiyatları da rekabetçi olmalıdır. Ayrıca endüstri elektrifikasyonu, yalnızca elektrik talebini karşılamak için yenilenebilir üretim kapasitesi eklenirse sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır. Küresel yenilenebilir enerji üretim kapasitesi giderek artmaktadır ve 2050 yılına kadar elektriğin %80'den fazlasının yenilenebilir kaynaklardan geleceği tahmin edilmektedir [46]. Şu anda AB-27'de, çoğunluğu rüzgâr ve hidroelektrikten, küçük bir kısmı katı biyoyakıtlardan ve güneş enerjisinden gelen yenilenebilir kaynaklar halihazırda elektrik tüketiminin %34'ünü oluşturmaktadır [47]. Bu nedenle, yenilenebilir elektrik ve elektrikli ekipman fiyatları düşmeye devam ettikçe [27, 48], çimento endüstrisinin elektrifikasyonu CO₂ emisyonlarında yüksek bir azalma sağlamak için önemli bir seçenek olacaktır.

Geleneksel döner fırın teknolojilerine kıyasla elektrik ısıtmalı döner fırın teknolojisinin avantajları, dezavantajları ve zorlukları Tablo 11'de belirtilmiştir [49].

Tablo 11. Elektrik ısıtmalı döner fırın teknolojisinin avantajları, dezavantajları ve zorlukları [49]

Avantaj	Dezavantaj ve Zorluklar
Enerji ile ilgili emisyonun azaltılması	Fırın gazlarındaki yüksek CO ₂ kısmi basıncı nedeniyle daha yüksek sıcaklık gerekmektedir.
Fırın çıkış gazlarında CO ₂ 'nin yüksek kısmi basıncı nedeniyle CCUS teknolojilerinin (özellikle doğrudan yakalama) konuşlandırılmasının etkinleştirilmesi	Fırın kabuğundan daha fazla ısı kaybı
Sıcaklık profili ve işlemin kontrolü daha kolay	CO ₂ 'nin yüksek kısmi basıncı nedeniyle fırının daha soğuk bölgelerinde karbonatlaşma
Yakıt ve baca gazlarındaki kirliliklerden dolayı kireç ürününün kirlenmemesi	CO ₂ 'nin yüksek kısmi basıncı nedeniyle geliştirilmiş sinterleme
Çoklu sıcaklık bölgelerinin kontrol imkânı	
Baca gazlarının olmaması nedeniyle daha küçük ısı kayıpları	

4. YENİ NESİL ENERJİ

4.1. Güneş Enerjisi

4.1.1. Fotovoltaik Güneş Enerjisi

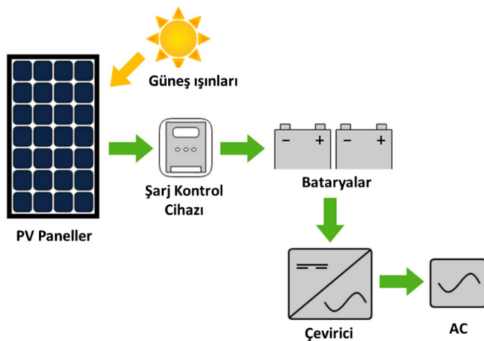
Fotovoltaik (PV) teknolojinin amacı, dönüşüm için bir ara yüz olmaksızın güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürmektir. Bu ekipmanın tasarımı basittir ve kullanımı kolaydır [50].

Fotovoltaik güneş enerji sisteminin en temel parçası hiç şüphesiz güneş panelleridir. Güneş ışınlarını bünyesindeki güneş hücreleri ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Paneller, güneş ışığından fotonların enerjisini emen yarı iletken malzemelerden oluşmaktadır. Bu yarı iletken malzemenin bir tarafı pozitif (P-tipi), diğer tarafı ise negatif (N-tipi) yarı iletkenidir [51]. Silikon, uygunluğu ve verimliliği nedeniyle yaygın olarak PV güneş pilleri yapmak için kullanılmaktadır.



Şekil 11. Güneş panelleri [52]

PV sisteminin prensibi, enerji ekleyerek elektronların bir yarı iletkende etkinleştirilmesidir. Yani, güneş ışığı enerjisinin eklenmesiyle, PV sisteminin elektronları aktive olur ve daha düşük bir enerji durumundan daha yüksek bir enerji durumuna geçer. Bu da yarı iletkende elektrik üretimine yol açmaktadır [53].



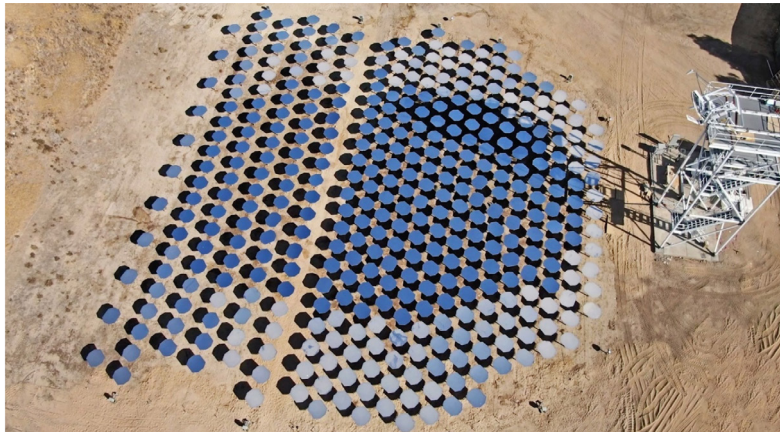
Şekil 12. PV sistemi

Güneş enerjisinden elektrik üretiminde kullanılan en yaygın yöntem olan fotovoltaik güneş enerji sistemi, sadece güneş panelinden ibaret değildir.

Sistem türüne bağlı olarak akü (batarya), şarj kontrol cihazı ve inverter (çevirici) gibi diğer sistem elemanları bulunmaktadır.

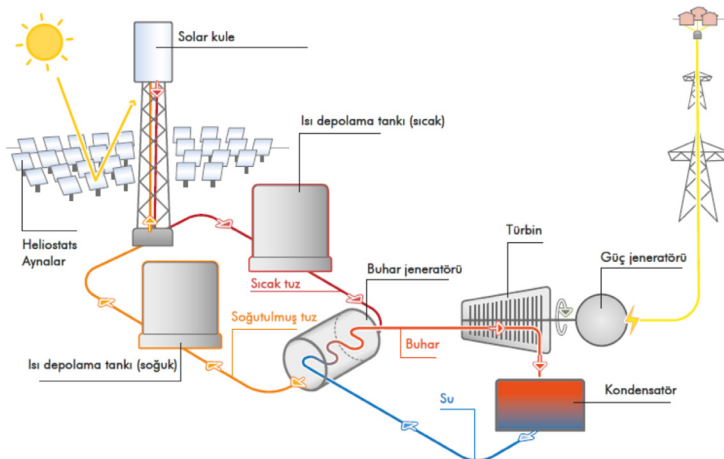
4.1.2. Konsantre (Yoğunlaştırılmış) Güneş Enerjisi

Bir güneş termik santrali, doğrudan güneş ışığını yoğunlaştırmak ve bunu ısıya dönüştürmek için aynalar kullanılmaktadır. Bu, kinetik enerjiyi elektriğe dönüştüren bir jeneratörü çalıştıran bir türbini çalıştırmak için buhar üretiminde kullanılmaktadır. Entegre ısı depolama sistemleri, gün boyunca güneş radyasyonunun yoğunluğundaki dalgalanmalardan bağımsız olarak, santralin tam olarak ihtiyaç duyulduğunda elektrik üretmesini mümkün kılmaktadır. Daha uzun süreli düşük ışınlama, fosil veya rejeneratif yakıtlar kullanılarak giderilebilmektedir. Buhar türbinleri yalnızca belirli bir minimum boyutun üzerinde ekonomik olarak çalıştırılabildiğinden, günümüzün güneş enerjisi santralleri 50 ila 200 megawatt aralığında nominal çıktılara sahiptir [54].



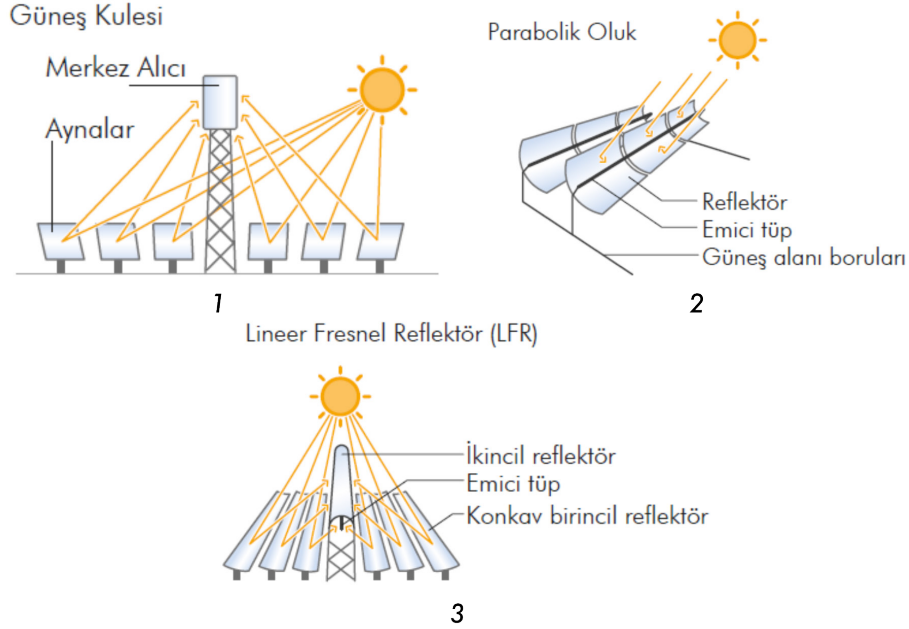
Şekil 13. Heliogen firmasına ait güneş santrali [55]

Buhar üretimi için gerekli olan yüksek sıcaklıkları elde etmek için, güneş radyasyonu güçlü bir şekilde konsantre edilmelidir. Bunun için sadece doğrudan güneş ışığı kullanılabilir. Güneş'in hareketini izleyen aynalar, Güneş'i bir odak noktasına veya odak çizgisine odaklamaktadır. Konsantrasyon ne kadar yüksek olursa, elde edilebilecek sıcaklıklar o kadar yüksek olmaktadır. Termodinamik yasalarına uygun olarak, daha yüksek sıcaklıklar, enerji santrali sürecinin verimliliğini artırmaktadır. Verimlilik ne kadar yüksek olursa, santralin istenen elektrik miktarını üretmesi için ihtiyaç duyduğu kolektör alanı o kadar küçük olmaktadır [54].



Şekil 14. Güneş termik santralinin çalışması [54]

Güneş alanındaki teknolojik zorluk, mümkün olan en düşük maliyetle rüzgâr ve sıcaklık dalgalanmaları gibi çevresel etkilere karşı gerekli optik hassasiyeti ve aynı anda sağlamlığı elde etmektir. Uygulamada, güneş radyasyonunun konsantrasyonu için üç farklı temel prensip kullanılır: güneş kulesi, parabolik oluk ve lineer Fresnel sistemleri [54].



Şekil 15. Güneş radyasyonunun konsantrasyonu için üç farklı temel prensip [54]

Özellikle enerji yoğun dört endüstri (demir ve çelik, alüminyum, kimyasallar ve petrokimya ile kireç ve çimento), 400°C'nin üzerindeki aralıkta yüksek sıcaklıklı ısı kullanmaktadır. Güneş kulesi sistemleri 1000°C'yi aşan sıcaklıklar üretebilir ve gerekli ısıyı ilgili prosese doğrudan konsantre radyasyon veya uygun ısı transfer ortamı yoluyla iletebilmektedir. Bu endüstrilerdeki uygulamalara yönelik teknolojiler, laboratuvar veya pilot tesis ölçeğinde henüz geliştirmenin erken bir aşamasındadır [54].

Hidrojen, enerji sektörünün dönüşümünde önemli bir rol oynayacaktır. Bir dizi sıvı yakıt ve amonyak gibi temel malzemelerin üretimi için başlangıç ürünü olduğu için, yakıt ve karbonsuz enerji taşıyıcısı olarak bir depolama ve taşıma ortamı olarak hizmet edebilmektedir. Bununla birlikte, hidrojen yalnızca sürece güç sağlamak için yenilenebilir biyokütle veya yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak sudan ayrılırsa sürdürülebilir olmaktadır [54].

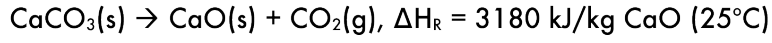
Çimento Sektöründe Konsantre Güneş Enerjisi Kullanımı

Bugün, yeni inşa edilen tüm çimento fabrikaları, son teknoloji siklon ön ısıtıcılı ve kalsinatörlü kuru proses tesisleridir [56].

Çimento üretim sürecinde iki önemli kimyasal reaksiyon vardır:

- Çimento farinin 900°C'de kalsinasyonu ve
- 1350°C-1500°C'de klinker üretmek için sinterlemedir [57].

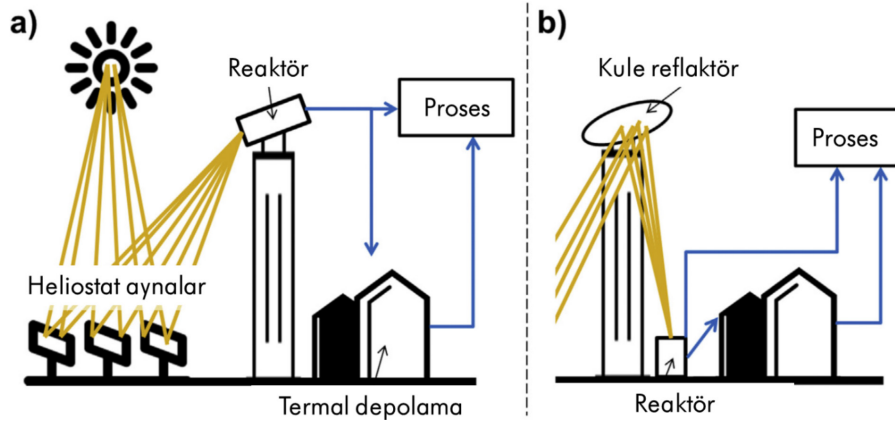
Bunlardan ilki, aşağıdaki reaksiyonun gerçekleştiği kalsinatörde gerçekleşir [58]:



Son zamanlarda CO₂ emisyon ticareti fiyatlarında 80 €/ton seviyesine geldiği göz önüne alındığında, güneş enerjisinin çimento üretim sürecine uygulanması giderek daha çekici hale gelmektedir. Güneş enerjisinin çimento fabrikasına uygulanması, ısının konsantre güneş enerjisi ile sağlandığı bir güneş reaktörü aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Böylece ısıtma amaçlı olarak kullanılan yakıttan tasarruf edilebilecektir. Güneş reaktörünün konumu ile ayırt edilen kalsinasyon adımının (Şekil 16) solarizasyonu için iki farklı proses tasarımı literatürde yer almaktadır [59-61]:

Güç Kulesi Santrali (Top of tower - TT): Güneş reaktörü bir kulenin üstüne yerleştirilir. Bu seçeneğin daha üstün olduğu kabul edilmektedir. Çünkü optik kayıplar, yek-odaklı sistem ile karşılaştırıldığında daha düşük olmaktadır.

Yek-Odaklı Güneş Enerjisi Santrali (Beam down - BD): Reaktör zemine yerleştirilir ve heliostat aynaları tarafından toplanan konsantre güneş akışı, bir kulenin tepesindeki parabolik bir reflektörden güneş reaktörüne kadar konsantre edilmekte ve yansıtılmaktadır. Güneş reaktörü, kolayca ham madde ile beslendiği ve bakımının yapıldığı yere yerleştirilebilir olduğundan, bu yaklaşım avantajlı olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, ek reflektör yoluyla güneş akışı kayıpları artmakta ve reflektör büyük bir ek yatırım gerektirmektedir.



Şekil 16. a) Güç kulesi ve b) yek-odaklı güneş enerjisi santrali tasarımı [62].

Solar kalsinasyon reaktörlerinin kullanımı için çeşitli teorik çalışmalar yapılmış ve prototip reaktörler inşa edilmiş ve incelenmiştir [59-61, 63-68].

Bir araştırmada 3.000 ton/günlük bir klinker tesisini solarize etmenin ekonomik potansiyeli değerlendirilmiştir [66]. Bir güneş ve fosil kalsinatörü içeren bir hibrit süreç araştırılmıştır. Güneş ışınımının 2.000 kWh/m²a'nın üzerindeki seviyelere ulaştığı varsayılmış ve kalsinatör verimliliği %86'ya ayarlanmıştır. Termal depolama incelemeye dahil edilmemiştir. Çalışmanın sonuçları, geleneksel bir çimento fabrikasına kıyasla CO₂ emisyonlarının %9'unun ve tüm fosil yakıt girdilerinin %28'inin önlenebileceğini göstermektedir.

4.2. Hidrojen Enerjisi

İklim değişikliği açısından hidrojen kullanmanın yararı, kullanıldığında sıfır karbon yayan bir enerji taşıyıcısı olmasıdır. Bu toksik olmayan gaz, yakıtla dönüştürülebilmekte, taşınabilmekte ve depolanabilmektedir. Özellikle çelik ve çimento yapımı gibi üretim süreçlerinde yüksek yoğunluklu ısı üretmek için yakıt olarak kullanılabilir. Aynı zamanda, tipik olarak gübre üretimi için kullanılan amonyak gibi alanlarda bir ham madde girdisi olarak da kullanılabilir [69].

Gri hidrojen, toplam arzın (2020) ~%96'sını oluşturur. Tipik olarak doğal gazdan üretilir, bu da üretiminin en az 10 ton CO₂/ton H₂ karbon emisyonuna neden olduğu anlamına gelmektedir.

Mavi hidrojen tipik olarak Steam Metan Reforming (SMR) adı verilen bir işlemle üretilmektedir. Mavi hidrojen, doğal gazın metanından elde edilir ve karbon emisyonları yakalanmakta ve depolanmakta (boş gaz alanlarında) veya karbon yakalama ve depolama/kullanım (CCS/CCU) yoluyla yeniden kullanılmaktadır. Mavi hidrojen, 2-3 ton CO₂/ton H₂ emisyon üretir ve mevcut toplam hidrojen arzının ~%1'ini oluşturmaktadır.

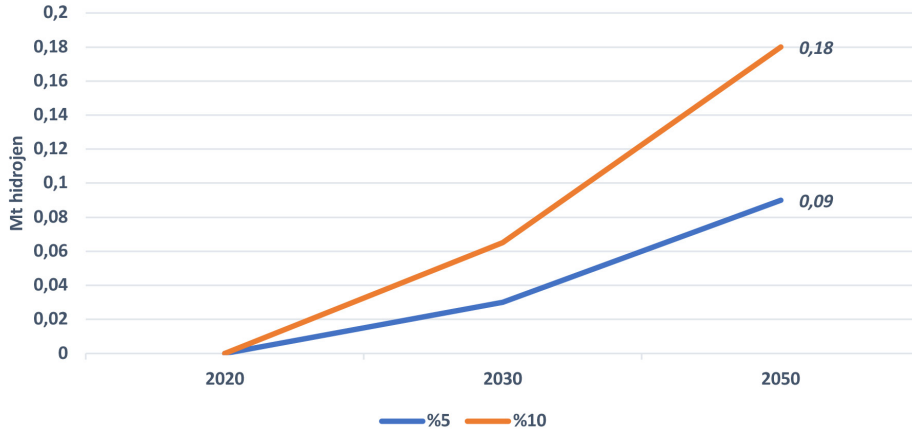
Yeşil hidrojen, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kullanılarak suyun elektrolizi yoluyla üretilmektedir. Yeşil hidrojeni ölçeklendirmek, yenilenebilir gücü elektroliz yoluyla hidrojene dönüştüren daha büyük ölçekli elektrolizör ekipmanının geliştirilmesini ve düşük karbonlu yenilenebilir üretim kapasitesinin artırılmasını gerektirmektedir. Yeşil hidrojen, toplam arzın <%1'ini oluşturur ve sıfır emisyonlu kabul edilmektedir.

Turkuaz hidrojen, piroliz ile metan içerisinde yer alan karbon katı karbona dönüştürülür. Katı karbon, gaz halindeki CO₂'den daha kolay depolanabilmektedir. Turkuaz hidrojen üretimi pilot aşamasındadır [70].

Bu enerji kaynağının dezavantajı ise hidrojen üretiminin karbon yoğunluğunun yöntemle göre değişmesidir. Günümüzün mevcut 70 Mt arzın yaklaşık %96'sı, çoğunlukla doğal gazdan üretilen gri hidrojendir. Gri hidrojen üretimi karbon yayar ve yılda 830 MtCO₂'den sorumludur. Bu miktar Endonezya ve Birleşik Krallık'ın yıllık CO₂ emisyonlarının toplamına eşittir. Daha düşük karbon yayan hidrojen formları (yeşil ve mavi), toplam arzın %4'ünden daha azını oluşturmaktadır [69].

Türk Çimento Sektöründe Hidrojen Enerjisi Potansiyeli

Türk çimento sektörü, yıllık yaklaşık 150 milyon ton üretim kapasitesine sahiptir ve dünyanın önde gelen çimento üreticilerinden bir tanesidir. Çimento üretiminin karbonsuzlaşması, sektörün uzun vadeli rekabetçiliği için önemli bir husustur. Demir çelik sektörü ile kıyaslandığında, Türkiye'de çimento sektörü coğrafi olarak çok daha yaygındır. Yaygın bir yeşil hidrojen üretim senaryosu izlendiğinde, bu durum avantaja dönüşebilecektir. Çimento sektörünün bölgesel olarak yaygın ve dağınık yapısı, bölgesel yeşil hidrojen gelişimini de uygulanabilir bir seçenek haline getirmektedir. Hidrojen talebinin gelişimi demir çelik ve çimento sektörlerinde benzer bir yol izleyebilecektir. Yapılan bir analizde yeşil hidrojen ikamesi, üretim süreçlerinde kömür kullanımının yerini alacak bir ham madde olarak kabul edilmiştir. Çimento sektörü için 2050'deki yeşil hidrojen talebi, Şekil 17'de görüleceği üzere H10 senaryosunda yıllık 0,18 Mt, H5 senaryosunda ise yıllık 0,09 Mt'a ulaşmaktadır [71].



Şekil 17. Türkiye'de çimento sektöründe hidrojen talebi öngörüsü [71]

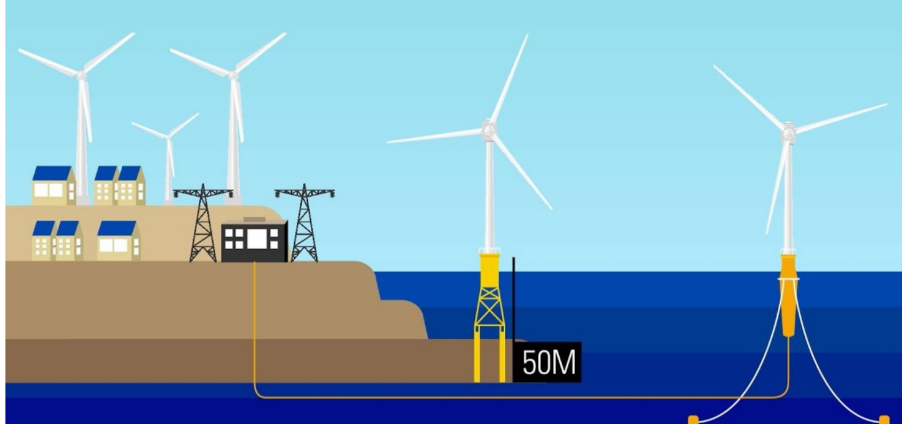
4.3. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr, alçak basınçla yüksek basınç bölgesi arasında yer değiştiren hava akımıdır ve daima yüksek basınç alanından alçak basınç alanına doğru hareket eder. Düzensiz ısıtma, atmosfer basıncında bir farka neden olur ve bu da havanın hareket etmesine neden olmaktadır. Hareket eden havanın (veya rüzgârın) kinetik enerjisi, rüzgâr türbinleri veya rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri ile elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Rüzgâr, türbin rotorunu dönmeye zorlar ve bir jeneratöre bağlı bir şaftı hareket ettirerek kinetik enerjiyi dönme enerjisine dönüştürmektedir. Böylece elektromanyetizma yoluyla elektrik enerjisi üretilmektedir.

Üretilen rüzgâr gücü, rotorun boyutları ve rüzgâr hızının küpü ile orantılıdır. Teorik olarak rüzgâr hızı iki katına çıktığında, rüzgâr gücü sekiz kat artmaktadır. Çıkış gücünün ana faktörleri rüzgâr hızı ve kanatların uzunluğudur. Rüzgâr üretiminin üç ana unsuru, türbin tipi (dikey/yatay eksen), kurulum özelliği (kara/deniz) ve şebeke bağlantısıdır [72].

Çoğu büyük rüzgâr türbini, üç kanatlı ve yatay eksenli türbinlerdir. Çoğu küçük rüzgâr türbini de yatay eksenlidir. Dikey eksenli türbinler için yenilikçi tasarımlar, özellikle Çin'de kentsel ortamlarda uygulanmaktadır. Kanatta ve rotorda %50-60 aerodinamik enerji kaybı, dişlide %4 mekanik kayıp ve jeneratörde ilave %6 elektromekanik kayıp ile rüzgâr enerjisi tesislerinde genel üretim verimliliği tipik olarak %30-40'tır [72].

Genel olarak, bir dizi rüzgâr türbini içeren bir elektrik üretim tesisine "rüzgâr çiftliği" denilmektedir. Rüzgâr çiftliğinin temel unsurları rüzgâr türbinleri, izleme tesisleri, trafo merkezleri ve iletim kablolarıdır. Açık denizdeyse, rüzgâr çiftliklerinin bakımı için liman tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Son zamanlarda özellikle Avrupa'da, açık deniz rüzgâr çiftlikleri, açık deniz rüzgârının kara rüzgârından daha hızlı ve daha istikrarlı olduğu fikrinden ilham alan destekleyici hükümet politikalarının bir sonucu olarak daha yüksek pazar payları kazanmaktadır. Bununla birlikte, açık deniz rüzgâr çiftliklerinin sermaye ve bakım maliyetleri, karadaki rüzgâr çiftliklerinden birkaç kat daha yüksektir. Kara ve deniz rüzgâr çiftlikleri arasındaki fark temel sistemlerindedir. Bir kara rüzgâr türbini beton bir temel üzerinde, açık deniz türbinlerinin temelleri ise suda (yüzer) veya deniz yatağında (sabit) bulunmaktadır [72].



Şekil 18. Kara ve açık deniz rüzgâr enerjisi santralleri [73]

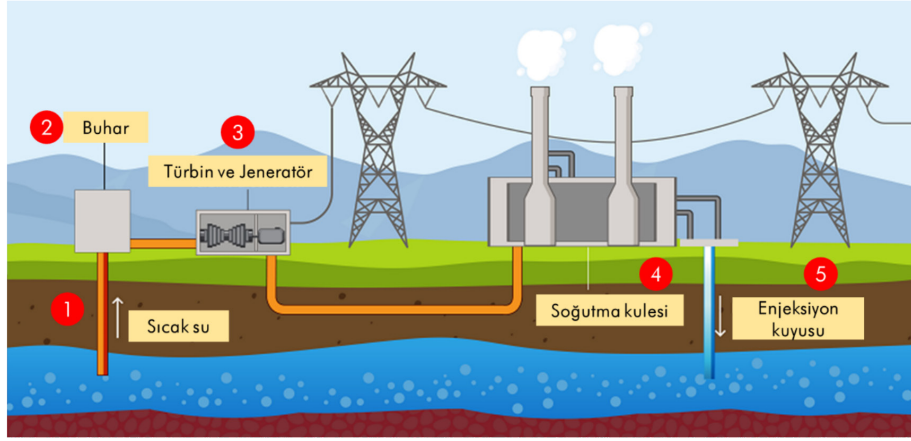
Yüzer temeller tipik olarak 50-60 metreyi aşan derinliklerde kullanılmaktadır, çünkü sabit tabanlı temellerin maliyeti daha derin sularda engelleyici hale gelmektedir. Yüzer yapılar şu anda deneme aşamasındadırlar. Açık deniz rüzgâr çiftlikleri, dalgalar ve deniz suyu gibi şiddetli deniz ortamının unsurlarına dayanacak şekilde tasarlanmaktadır. Türbine erişim gibi ek operasyonel gereksinimler ve bu nedenle bakım maliyetlerini düşürme çabaları kritik öneme sahiptir [72].

4.4. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, insanlık tarihi boyunca yenilenebilir ve önemli bir enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Kullanımı zaman içinde belirli aşamalardan geçmiştir. Jeotermal enerjinin milyarlarca yıl önce dünyanın oluşumundan beri var olduğu, bu nedenle de insanlık tarihinin en eski enerji üretim kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Aynı zamanda bu enerji kaynağının yenilenebilir olması jeotermal enerjinin potansiyelini ortaya koymaktadır. Arkeolojik araştırmalar, jeotermal enerjinin ilk kullanımının Paleolitik çağda olduğunu göstermektedir. Bu dönemde insanlar yemek yeme, banyo yapma gibi günlük ihtiyaçlarını karşılamak için jeotermal enerjiyi kullanmışlardır. Jeotermal enerjinin bu dönemde kullanılması genel olarak kişisel ihtiyaçları karşılama amacını taşımıştır [74].

Jeotermal enerji, insanoğlu için yer kabuğunun sunduğu en önemli enerji kaynaklarından bir tanesidir. Jeotermal enerji kaynaklarının doğasına bakıldığında, bu enerjinin yer altı sıcak akışkan kaynaklarından sağlandığı ve bu tür enerjinin kullanımının sıcaklık değerine göre değiştiği görülmektedir. Jeotermal enerji kaynağının doğası gereği sıcaklığı yüksekse ve teknoloji kullanımına imkân veriyorsa kaynak kullanımı daha fazla olmaktadır. Teknoloji geliştikçe, yer kabuğunun daha derinlerinde bulunan jeotermal enerji kaynaklarına erişim sağlandığı için jeotermal enerjinin kullanım düzeyi teknoloji ile ilişkili olmaktadır [74].

Birden fazla jeotermal enerji türü vardır; ancak hidrotermal enerji, elektrik üretmek için en yaygın kullanılan türüdür. Hidrotermal kaynakların iki ortak bileşeni vardır: su (hidro) ve ısı (termal). Hidrotermal kaynağın sıcaklığına bağlı olarak, ısı enerjisi elektrik üretmek veya ısıtmak için kullanılabilir [74].



Şekil 19. Jeotermal enerji santrali [75]

Düşük sıcaklık kaynakları: Düşük sıcaklıklarda (10°C-150°C) hidrotermal kaynaklar ısıtma için kullanılmaktadır. Bu düşük sıcaklıktaki jeotermal enerji; evleri ve binaları ısıtmak, mahsul yetiştirmek ve kereste, meyve ve sebze kurutmak için kullanılmaktadır.

Yüksek sıcaklık kaynakları: Yüksek sıcaklıklarda (150°C-370°C) hidrotermal kaynaklar elektrik üretmek için kullanılabilir. Bu yüksek sıcaklık kaynakları, kuru buhar kuyularından veya sıcak su kuyularından gelebilmektedir. Bu kaynaklar, kuyular açılarak ve buharı veya sıcak suyu yüzeye borulayarak kullanılabilir. Jeotermal kuyular birkaç kilometre derinliğindedir. Bir kuru buhar tesisinde, jeotermal rezervuardan gelen buhar, elektrik üretmek için doğrudan bir kuyudan bir türbin jeneratörüne iletilmektedir. Sıcak su tesisinde, sıcak suyun bir kısmı buhara dönüştürülmektedir. Buhar, tıpkı bir kuru buhar tesisi gibi bir türbin jeneratörüne güç sağlamaktadır. Buhar soğuduğunda yoğunlaşır ve tekrar tekrar kullanılmak üzere toprağa geri enjekte edilir.

Jeotermal enerji çevreye çok az zarar vermektedir. Diğer bir avantaj ise, jeotermal santrallerin çoğu enerji santrali gibi yakıt taşıma zorunluluğu olmamasıdır. Jeotermal santraller, yakıt kaynaklarının üstüne kurulmaktadır. Jeotermal enerji santralleri çöllerde, ekinlerin ortasında ve dağ ormanlarında inşa edilebilmektedirler. Jeotermal santraller, elektrik üretmek için yakıt yakmadıkları için neredeyse hiç emisyon üretmemektedirler.

4.5. Dalga Enerjisi

Okyanuslar, farklı fenomenlere dağılmış muazzam bir enerji rezervini temsil etmektedir. Bunların arasında okyanuslarla ilgili ana enerji türleri deniz akıntıları, ozmotik tuzluluk, OTEC (Okyanus Termal Enerji Dönüşümünün kısaltması), gelgit ve deniz dalgasıdır. Tablo 12'de gösterildiği gibi deniz dalgaları ve deniz akıntıları en yüksek enerji potansiyeline sahiptir [76].

Tablo 12. Farklı dalga enerjisi kaynaklarının potansiyel kapasitesi ve enerji üretimi [76]

Okyanus Enerjisi	Kapasite (GW)	Potansiyel Üretim (TWh/yıl)
Gelgit	90	800
Deniz akıntıları	5000	50000
Ozmotik tuzluluk	20	2000
OTEC	1000	10000
Deniz dalgası	1000-9000	8000-80000

Dalga enerjisi, okyanus dalgalarındaki enerjinin elektriğe dönüştürülmesiyle üretilmektedir. Dalga enerjisini elektriğe dönüştürmek için geliştirilmekte ve denenmekte olan birçok farklı dalga enerjisi teknolojisi bulunmaktadır. Gelgit aralığı teknolojileri, yüksek ve düşük gelgitler arasındaki yükseklik farkının yarattığı potansiyel enerjiyi toplamaktadır. Gelgit akımı (veya akıntı) teknolojileri, gelgit alanlarına (deniz kıyıları gibi) giren ve çıkan akımların kinetik enerjisini yakalamaktadır. Gelgit akımı cihazları, rüzgâr türbinlerine benzer şekilde diziler halinde çalışmaktadırlar. Okyanus termal enerjisi, okyanusun yüzey suyu ile daha derin su arasındaki sıcaklık farkının enerjiye dönüştürülmesiyle üretilmektedir.

Dalga enerjisi dönüştürücüleri (WEC'ler), dalga gücünü kullanmak ve onu elektrik gücüne dönüştürmek için kullanılan makineler, cihazlar veya yöntemlerdir. Önce dalga enerjisi, çalışan akışkanlarda enerjiye dönüştürülür (çalışma akışkanları dalga enerjisi dönüştürücünün tipine göre farklıdır), daha sonra bu enerji bir motor veya türbin kullanılarak mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Son olarak, bu mekanik enerji, elektrik enerjisine bir jeneratör yardımı ile döndürülmektedir.



Şekil 20. Şili'de açık denizde konumlandırılmış bir dalga enerjisi dönüştürücüsü [77]

Daha önce de belirtildiği gibi, çeşitli dalga enerjisi dönüştürücü türleri bulunmaktadır. Bu WEC'ler kuruldukları yere göre kategorize edilebilmektedir. Genel olarak, dalga enerjisi dönüştürücüleri için Şekil 20'de gösterilen üç konum vardır [78, 79].

Kıyıda, su derinliğinin 10-15 metre ve maksimum dalga yüksekliğinin 7,8 metre olduğu kıyı bölgeleridir.

Kıyıya yakın, su derinliğinin 15-25 metre ve maksimum dalga yüksekliğinin 15,6 metre olduğu sığ su alanları anlamına gelmektedir.

Açık deniz, hem su derinliği hem de dalga yüksekliği için doğal bir sınırlamanın olmadığı derin su alanları anlamına gelir. Su derinliği her zaman 50 metreden fazladır ve dalga yüksekliği 30 metreyi geçebilmektedir.

Dalga gücü kıyılardan uzak alanlarda çok daha yoğundur. Çünkü dalgalar ve kıyı bölgesi yakınındaki deniz yatağı arasındaki etkileşim güç kaybına neden olmaktadır. Bununla birlikte, açık deniz sistemlerinin tasarlanması ve inşa edilmesi, sığ su ve kıyı tabanlı cihazlardan çok daha zordur.

Dalga enerjisi ayrıca kömür veya petrol gibi geleneksel fosil yakıtlardan elde edilen enerjiden daha az karbon emisyonu üretmektedir ve bu da onu daha çevre dostu bir seçenek haline getirmektedir.

Kaynaklar

1. BP Statistical Review of World Energy 2021. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.
2. Hewlett, P.C. Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th ed.; Butterworth Heinemann: Oxford, UK, 2003; ISBN 9780750662567.
3. Cembureau the European Cement Association. <https://cembureau.eu/cement-101/cement>.
4. Gagg, C.R. Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis. Eng. Fail. Anal. 2014, 40, 114-140
5. Cement IEA Paris. Available online: <https://www.iea.org/Reports/Cement> (accessed on 14 November 2021).
6. International Energy Agency. Technology Roadmap—Low-Carbon Transition in the Cement Industry; Technical Report; International Energy Agency: Paris, France, 2018.
7. Andrew, R.M. Global CO2 Emissions from Cement Production, 1928-2018. Earth Syst. Sci. Data 2019, 11, 1675-1710
8. Lehne, J., and Preston, F., 2018, Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs
9. Imbabi, M.S.; Carrigan, C.; McKenna, S. Trends and Developments in Green Cement and Concrete Technology. Int. J. Sustain. Built Environ. 2012, 1, 194-216
10. Aamar Danish, M.; Usama Salim, T.A. Trends and Developments in Green Cement "A Sustainable Approach". Sustain. Struct. Mater. 2019, 2, 45-60
11. TSKB 2021 Enerji Görünümü Raporu. <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2021.pdf>.
12. Karagöl, E.T., Kavaz, İ. Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji. SETA. 2017, Sayı.197
13. <https://world101.cfr.org/global-era-issues/climate-change/sources-energy-comparison>
14. Renewables 2021 Global Status Report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf.
15. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/shares-of-electricity-production-by-source-in-oecd-countries-2020>
16. EPDK 2021 Yılı Elektrik Piyasası Aralık Ayı Sektör Raporu
17. TSKB Aylık Enerji Raporu - Aralık 2021. <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-bulteni-aralik-2021.pdf>.
18. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
19. World Energy Outlook 2021. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
20. <https://home.kpmg/tr/tr/home/gorusler/2021/11/Enerji%20Sekt%C3%B6r%C3%BCn%C3%BCn%20Gelece%C4%9Fi.html>
21. IEA Energy Technology Perspectives 2020
22. <https://www.turkcimento.org.tr/tr/istatistikler/aylik-veriler>
23. Çimento Endüstrisine Elektrik Enerjisi Temini. https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/%C3%87imento_End%C3%BCstrisine_Elektrik_Enerjisi_Temini.pdf
24. Çimento Sanayi İçin Mevcut En İyi Teknikler (Met) Ulusal Kılavuzu. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ippc/icerikler/ulusal-met-kilavuzu-20180425132410.pdf>
25. 2020 Yılı Çimento Sektörü Kıyaslama Raporu. EVÇED Planlama ve Denetim Daire Başkanlığı.

26. Çimento Üretiminde Sıfır Karbonlu Yakıtlara Geçiş. https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/%C3%87imento_%C3%9Cretiminde_S%C4%B1f%C4%B1r_Karbonlu_Yak%C4%B1tlara_Ge%C3%A7i%C5%9F.pdf
27. Wei, M.; McMillan, C.A. Electrification of Industry: Potential, Challenges and Outlook. *Curr. Sustain. Renew. Energy Rep.* 2019, 6, 140-148.
28. Are Electric Furnaces the Future of Glass Manufacturing. Available online: <https://Mo-Sci.Com/Electric-Furnaces-Future-Glass-Manufacturing/> (accessed on 1 November 2021).
29. Madeddu, S.; Ueckerdt, F.; Pehl, M.; Peterseim, J.; Lord, M.; Kumar, K.A.; Krüger, C.; Luderer, G. The CO₂ Reduction Potential for the European Industry via Direct Electrification of Heat Supply (Power-to-Heat). *Environ. Res. Lett.* 2020, 15, 124004.
30. Wilhelmsson, B.; Kollberg, C.; Larsson, J.; Eriksson, J.; Eriksson, M. CemZero—A Feasibility Study Evaluating Ways to Reach Sustainable Cement Production via the Use of Electricity. *Vattenfall Cem.* 2018. <https://group.vattenfall.com/pressand-media/pressreleases/2019/vattenfall-and-cementa-take-the-next-step-towards-a-climate-neutral-cement>.
31. Cementa Aims for Zero Emissions with Vattenfall; Vattenfall Press Office: Solna, Sweden, 2018. <https://Group.Vattenfall.Com/Press-and-Media/Newsroom/2017/Cementa-Aims-for-Zero-Emissions-with-Vattenfall>.
32. Low Emissions Intensity Lime & Cement—LEILAC. <https://www.Project-Leilac.Eu/about-Leilac>.
33. Electrification Is Driving Sustainability in Cement and Mining. <https://Foresightdk.Com/Electrification-Is-Driving-Sustainability-in-Cement-and-Mining>.
34. Lechtenböhmer, S.; Nilsson, L.J.; Åhman, M.; Schneider, C. Decarbonising the Energy Intensive Basic Materials Industry through Electrification—Implications for Future EU Electricity Demand. *Energy* 2016, 115, 1623-1631.
35. Bogaerts, A.; Berthelot, A.; Heijkers, S.; Kolev, S.; Snoeckx, R.; Sun, S.; Trenchev, G.; van Laer, K.; Wang, W. CO₂ Conversion by Plasma Technology: Insights from Modeling the Plasma Chemistry and Plasma Reactor Design. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2017, 26, 063001.
36. Shuanghui, H.; Baowei, W.; Yijun, L. Syngas Production via Methane Steam Reforming with Oxygen: Plasma Reactors versus Chemical reactors. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2001, 34, 2798.
37. Lord, M. Electrifying Industry, 2018—Zero Carbon Industry Plan; Technical Report; Beyond Zero Emissions: Melbourne, VIC, Australia, 2018.
38. Induction Brazing. <https://Dw-Inductionheater.Com/Basic-Induction-Heating.HtmlInduc>.
39. Wheeler, M.B.R.; Buckham, J.A.; McBride, J.A. A Comparison of Various Calcination Process for Processing High-Level Radioactive Wastes; U.S Atomic Energy Commission: Idaho Falls, ID, USA, 1964.
40. Induction Furnace for Melting of Metal. <https://Termolit.Com/En/Induction-Furnace-for-Melting-of-Metal>.
41. Corrêa, B.H.B.C.; Neto, J.C.B.; França, A.B.; Cordeiro, A.C.C. New Process to Obtain Unslaked Lime through Microwave Hybrid Heating and Its Fluid Dynamics Computational Modeling. *J. Eng. Exact Sci.* 2021, 7, 12300-01.
42. Priecel, P.; Lopez-Sanchez, J.A. Advantages and Limitations of Microwave Reactors: From Chemical Synthesis to the Catalytic Valorization of Biobased Chemicals. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2019, 7, 3-21.
43. Energy Efficient Microwave Hybrid Processing of Lime for Cement, Steel, and Glass Industries. 2012. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy Inventions and Innovations. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc836864/m1/1/>

44. Seo, K.; Edgar, T.F.; Baldea, M. Optimal Demand Response Operation of Electric Boosting Glass Furnaces. *Appl. Energy* 2020, 269, 115077.
45. Technical Report All-Electric Melting Prospects for Glass Container Production. Glass WORLDWIDE FGM. 2020. <https://www.glassworldwide.co.uk/sites/default/files/afgm-articles/AFGM%20Horn%20article.pdf>.
46. EUR-Lex A European Strategic Long-Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0773>.
47. Eurostat, Statistic Explained Renewable Energy Statistics. https://Ec.Europa.Eu/Eurostat/Statistics-Explained/Index.Php?Title=Renewable_energy_statistics#Wind_and_water_provide_most_renewable_electricity.3B_solar_is_the_fastest-Growing_energy_source.
48. Roelofsen, O.; Somers, K.; Speelman, E.; Witteveen, M. Plugging in: What Electrification Can Do for Industry; Technical Report; McKinsey Company: New York, NY, USA, 2020.
49. Katajisto, O. Calcination of calcium carbonate based materials in electric heated rotary kiln. Master thesis. 2020. Tampere University.
50. Barker PP, Bing JM (2005) Advances in solar photovoltaic technology: an applications perspective, Conference Paper. In: Presented at IEEE Power Engineering Society Summer Meeting.
51. Khan KA, Paul S, Zobayer A, Hossain SS (2013) A Study on solar photovoltaic conversion. *International Journal of Scientific and Engineering Research* 4: 1-5.
52. https://static.dw.com/image/19344861_303.jpg
53. Green MA (2002) Photovoltaic principles. *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures* 14: 11-17.
54. Solar thermal power plants: Heat, electricity and fuels from concentrated solar power. German Aerospace Center (DLR) Institute of Solar Research. 2021.
55. <https://www.popularmechanics.com/science/green-tech/a29847655/heliogen-solar-heat-mirrors/>
56. EUJRC Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide, in JRC Reference Report. 2013. http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CLM_Published_def.pdf.
57. S. Sprung, Cement, in Ullmann's Encyclopedia Of Industrial Chemistry, 2008.
58. J.A.H. Oates, Lime And Limestone : Chemistry and Technology, Production and Uses, Wiley-VCH, Weinheim; New York, 1998.
59. A. Meier, N. Gremaud, A. Steinfeld, Economic evaluation of the industrial solar production of lime, *Energy Convers. Manag.* 46 (6) (2005) 905-926.
60. A. Meier, et al., Solar chemical reactor technology for industrial production of lime, *Sol. Energy* 80 (10) (2006) 1355e1362.
61. R.S. Gonzalez, G. Flamant, Technical and economic feasibility analysis of using concentrated solar thermal technology in the cement production process: hybrid approachda case study, *J. Sol. Energy Eng.* 136 (2) (2014), 025001.
62. R. Pitz-Paal, et al., Solar thermal power production, in: D. Stolten, V. Scherer (Eds.), *Transition to Renewable Energy Systems*, 2013.
63. G. Moumin, et al., Experimental And Theoretical Assessment Of a Solar Thermal Calcination Reactor, 04. Nov. 2016, 2. Workshop FT3 Gemeinsame Initiative Energiesystem 2050: Frankfurt am Main, Deutschland.

64. G. Flamant, et al., Experimental aspects of the thermochemical conversion of solar energy; Decarbonation of CaCO₃, Sol. Energy 24 (4) (1980) 385-395.
65. A. Steinfeld, A. Imhof, D. Mischler, Experimental investigation of an atmospheric-open cyclone solar reactor for solid-gas thermochemical reactions, J. Sol. Energy Eng. 114 (3) (1992) 171-174.
66. A. Imhof, Solar Cement Plants - an interesting challenge for business and science, ZKG Int. 53 (8) (2000) 448-457.
67. A. Meier, et al., Design and experimental investigation of a horizontal rotary reactor for the solar thermal production of lime, Energy 29 (5-6) (2004) 811-821.
68. S. Abanades, L. Andre, Design and demonstration of a high temperature solar-heated rotary tube reactor for continuous particles calcination, Appl. Energy 212 (2018) 1310e1320.
69. Hydrogen for the future: Delivering zero-carbon in heavy industry. HSBC Report. 2020.
70. Dünya Enerji Konseyi Türkiye Yeşil Hidrojen Raporu. World Energy Council. 2020
71. Türkiye'nin yeşil hidrojen üretim ve ihracat potansiyelinin teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi. Shura Enerji Dönüşüm Merkezi. 2021. <https://shura.org.tr/turkiyenin-yesil-hidrojen-uretim-ve-ihracat-potansiyelinin-teknik-ve-ekonomik-acidan-degerlendirilmesi>.
72. Wind Power Technology. IEA-ETSAP and IRENA© Technology Brief E07. 2016.
73. <https://www.tuvsud.com/tr-tr/kaynak-merkezi/tuv-sud-dergi/floating-windfarms>
74. Dincer, İ., Ozturk. M. Geothermal Energy Systems. Elsevier. 2021.
75. <https://www.greenesa.com/news/geothermal-energy-types-uses-advantages>
76. Cascajo, R.; García, E.; Quiles, E.; Correcher, A.; Morant, F. Integration of marine wave energy converters into seaports: A case study in the port of Valencia. Energies 2019, 12, 787.
77. <https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2021/04/pmo-5-e1619159797882.jpg>
78. WAVEROLLER, "Near-shore vs. off-shore," 2014.
79. L. Duckers, "Wave Energy," in Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. Oxford University Press, Oxford (2004).



TÜRKCİMENTO

Tepe Prime A Blok Kat: 18-19
Eskişehir Devlet Yolu
(Dumlupınar Bulvarı) 9. km
No: 266 06800 Ankara
T : 444 50 57 - F : 0 (312) 265 09 06-05
www.turkcimento.org.tr - info@turkcimento.org.tr

     /turkcimento