

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO SEKTÖRÜ EĞİMLERİNE
DAYALI PERFORMANS KRİTERLERİNİN BELİRLENMESİ
VE KARŞILAŞTIRILMASI**

HAYRETTİN SELİM ARUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2018

**SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO SEKTÖRÜ EĞİLİMLERİNE
DAYALI PERFORMANS KRİTERLERİNİN BELİRLENMESİ
VE KARŞILAŞTIRILMASI**

**DETERMINATION AND COMPARISON OF PERFORMANCE
CRITERIA BASED ON SUSTAINABLE CEMENT SECTOR
TRENDS**

HAYRETTİN SELİM ARUN

Başkent Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

“SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO SEKTÖRÜ EĞİLİMLERİNE DAYALI PERFORMANS KRİTERLERİNİN BELİRLENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 03/05/2018 tarihinde **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

BAŞKAN (DANIŞMAN) : Prof. Dr. Birol KILKIŞ

ÜYE : Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Levent ÇOLAK

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Özgür EROL

ÜYE : Dr. Şiir KILKIŞ

ONAY

18/05/2018

Prof. Dr. Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŐEKKÜR

Yazar, bu çalışmanın gerçekleőmesinde katkılarından dolayı, aőađıda adı geçen kişi ve kuruluőlara içtenlikle teőekkür eder.

Danıőmanım Prof. Dr. Birol KILKIŞ' a tez boyunca yaptığı katkılardan dolayı ve danıőmanlıđımı kabul ederek beni onore ettiği için,

Sayın Eş Danıőmanım Dr. Şiir KILKIŞ' a, Enerji Mühendisliğine anlam katarak çalışmanın sonuca ulaőtırılmasında, her daim yanımda olup, karőtılaőtılan güçlüklerin aőtılmasında her zaman yardımcı ve yol gösterici olduğu için,

Destekleri hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman sabırlı olan değerli eőtım Özlem Arun'a, canım oğlum Umur Efe Arun'a, kız kardeőtım Pelin Toktaőt'a.

Desteği ve güler yüzü ile her zaman yanımda olan Tülay Ersak'a teőekkürü borç bilirim.

İsmail Özersin anısına.

ÖZ

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO SEKTÖRÜ EĞİLİMLERİNE DAYALI PERFORMANS KRİTERLERİNİN BELİRLENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

Hayrettin Selim Arun
Başkent Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışmada; uluslararası alanda “Cement Sustainability Initiative (CSI)” girişimine üye olan, ayrıca “Global Reporting Initiative (GRI)” bünyesindeki “Sustainability Disclosure Database” veri tabanında yer alan çimento firmaları başta olmak üzere, çimento sektöründe uygulanan üretim yaklaşımları analiz edilmiştir. Analiz 1990 ve 2013 yılları için yapılmıştır. Kyoto protokolünün etkilerini, hedeflere ulaşmak için belirlenmiş olan kriterlerin, uygulamaların sonuçlarının ve farklı yaklaşımların karşılaştırmalı olarak analiz etmek amacıyla, çok kriterli endeksler geliştirilmiştir. Endeks iki ayrı değerlendirmeye göre oluşturulmuş olup, birinci endeks Enerji ve çevresel performans ayrımlarına göre yapılmıştır. İkinci endeks klinker fırın tiplerine göre yapılmış olup. Çıkan sonuçlar soğutma havasının geri kazanımının önemine işaret etmiş ve Akılcı Ekserji Yönetimi Modelinin uyarlanması ile en faydalı uygulamalara yön vereceği anlaşılmıştır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Enerji, çevre, sürdürülebilir çimento, çimento endeksi, CO₂ salımı, atık yakıt, çimento sektörü, akılcı, ekserji, klinker, fırın

Danışman: Prof. Dr. Birol KILKIŞ, Başkent Üniversitesi, Enerji Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İkinci Danışman: Dr. Şiir KILKIŞ, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

ABSTRACT

DETERMINATION AND COMPARISON OF PERFORMANCE CRITERIA BASED ON SUSTAINABLE CEMENT SECTOR TRENDS

Hayrettin Selim Arun

Baskent University Institute of Sciences

Energy Engineering Department

In this study, the production approaches applied by the cement producing companies which are members of the "Cement Sustainability Initiative" in the international scale and in the "Sustainability Disclosure Database" within the "Global Reporting Initiative" have been analyzed.

The analysis has been carried out for the years between 1990 and 2013. Multi-criteria indices were developed in order to competitively analyze the impacts of the Kyoto protocol, in terms of the criteria, that were set for achieving the objectives, the results of the applications and the different approaches. Two different indices were developed according to two separate evaluation headings. The first index is based energy and environmental performance. The second index was made according to clinker kiln types. The results have shown the importance of the heat recovery of cooling air and it has been understood that the adaptation of the Rational Exergy Management Model (REMM) will guide us to the most beneficial applications.

KEYWORDS: Energy, environment, sustainable cement, index, CO₂ emission, waste fuel, cement sector, rational, exergy, clinker, kiln, REMM

Supervisor: Prof. Dr. Birol KILKIŞ, Başkent University, Graduate Program in Energy Engineering

Second supervisor: Dr. Şiir KILKIŞ, The Scientific and Technological Research Council of Turkey

İÇİNDEKİLER LİSTESİ	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
ÇİZELGELER LİSTESİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
1 GİRİŞ	1
1.1 Çimento Nedir?	3
1.2 Çimento Nasıl Üretilir?	4
2 ÇİMENTO ÜRETİMİ PERFORMANS YAKLAŞIMLARIN İNCELENMESİ	7
3 CO2 SALIMININ AZALTILMASI ÇALIŞMALARI	12
4 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	14
5 METODOLOJİ	18
5.1 Veri Normalizasyon Yöntemleri	18
5.1.1 Min-Maks yöntemi	18
5.1.2 Standardizasyon (Z-Skoru)	19
5.1.3 Ondalık ölçekleme yöntemi.....	19
5.1.4 Medyan (ortanca) normalizasyonu.....	19
5.1.5 Sigmoid normalizasyonu	20
5.2 Verilerin Derlenmesi.....	20
6 ENERJİ VE ÇEVRESEL PERFORMANS HAM VERİLERİNE GÖRE ENDEKS OLUŞTURULMASI	24
6.1 1990 ve 2013 Yılı Enerji ve Çevresel Performans Endeks Boyut Toplamlarının Oluşturulması	24
6.2 Enerji ve Çevresel Performans Verileri Endeks Boyut Toplamlarının Karşılaştırılması	32
7 FIRIN TİPİNE GÖRE ENDEKS OLUŞTURULMASI	36
7.1 1990 ve 2013 Yılı Fırın Tipi Endeks Boyut Toplamlarının Oluşturulması	36
7.2 Fırın Tipi Endeks Boyut Toplamlarının Karşılaştırılması	42
8 KLİNKER FIRINI İÇİN “AKILCI EKSERJİ YÖNETİM MODELİ”	44
9 DÖRT FABRİKANIN ENDEKSLER ÜZERİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ	50
10 SONUÇ	57
KAYNAKLAR LİSTESİ	61

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Beş aşamalı ön ısıtıcılı ön kalsinasyonlu, kuru tip fırın modeli.....	6
Şekil 2.2	Ön Kalsinasyonlu Ön Isıtıcılı Kısa Kuru Fırında Bölüm Çıkış.....	7
Şekil 2.3	Atık ısı geri kazanım çevrim şeması.....	8
Şekil 6.1	1990 Yılı Endeks Boyut Toplamı Sıralaması.....	29
Şekil 6.2	2013 Yılı Endeks Boyut Toplamı Sıralaması.....	31
Şekil 6.3	1990 ve 2013 yılları arası endeks boyut toplamı karşılaştırması.....	34
Şekil 6.4	1990 ve 2013 yılları arası endeks boyut toplamı değişimi	35
Şekil 7.1	1990 endeks boyut toplamları üzerinden fırın tipi karşılaştırması.....	38
Şekil 7.2	2013 endeks boyut toplamları üzerinden fırın tipi karşılaştırması.....	41
Şekil 7.3	1990 - 2013 Fırın Tipleri Karşılaştırması.....	42
Şekil 8.1	Klinker fırını ekserji modeli sıcaklık ve bölge gösterimi.....	46
Şekil 8.2	Kuru tip, ön ısıtmalı, kalsinatörlü klinker fırını.....	46
Şekil 8.3	Kuru tip, ön ısıtmalı, kalsinatörsüz, soğutmadaki sıcak havayı kullanmayan klinker fırını.....	48
Şekil 8.4	Çimento üretim prosesi akış şeması.....	49
Şekil 9.1	Türkiye'deki çimento fabrikaları endeks karşılaştırması.....	53

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1	Çimento üretimi dünya sıralaması.....	4
Çizelge 2.1	Bölüm çıkış sıcaklıkları ve süreleri.....	7
Çizelge 2.2	Portland çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler..	9
Çizelge 2.3	Alternatif fosil yakıt kullanım oranları ve miktarları.....	10
Çizelge 3.1	CO ₂ salımı verileri.....	12
Çizelge 5.1	Enerji ve çevresel performans 1990 yılı ham verileri.....	21
Çizelge 5.2	Enerji ve çevresel performans 2013 yılı ham verileri.....	22
Çizelge 6.1	1990 yılı enerji ve çevresel performansa göre normalize edilecek veriler.....	24
Çizelge 6.2	1990 yılı enerji ve çevresel performansa göre değerlerin Min-Maks bulunması.....	24
Çizelge 6.3	1990 yılı enerji ve çevresel performansa göre endeks boyut toplamları.....	26
Çizelge 6.4	2013 yılı enerji ve çevresel performansa göre normalize edilecek veriler.....	28
Çizelge 6.5	2013 yılı enerji ve çevresel performansa göre değerlerin Min-Maks bulunması.....	28
Çizelge 6.6	2013 yılı enerji ve çevresel performansa göre endeks boyut toplamları.....	30
Çizelge 6.7	1990 ve 2013 yılları arası endeks boyut toplamı karşılaştırması.....	33
Çizelge 7.1	1990 yılı fırın tipine göre normalize edilecek veriler.....	36
Çizelge 7.2	1990 yılı fırın tipine göre değerlerin Min-Maks bulunması.....	37
Çizelge 7.3	1990 yılı fırın tipine göre endeks boyut toplamları.....	38
Çizelge 7.4	2013 yılı fırın tipine göre normalize edilecek veriler.....	39
Çizelge 7.5	2013 yılı fırın tipine göre değerlerin Min-Maks bulunması.....	40
Çizelge 7.6	2013 yılı fırın tipine göre endeks boyut toplamları.....	40
Çizelge 7.7	Fırın tiplerine göre 1990 ve 2013 yılı endeks karşılaştırma tablosu.....	41
Çizelge 8.1	Çizelge 1.2 den alınan sıcaklık değerlerine göre ψ_R hesaplamaları.....	47
Çizelge 9.1	Türkiye'deki çimento fabrikaları endeks verileri.....	51
Çizelge 9.2	Türkiye çimento fabrikaları normalize edilmiş endeks verileri.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

ψ_{R_i}	Arz ve talep ekserjilerini karşılaştırma parametresi
$\varepsilon_{talep(i)}$	Talep edilen birim ekserji, W/W
$\varepsilon_{arz(i)}$	Arz edilen ekserji, W/W
n	Sistem sayısı
$T_{referans}$	Referans sıcaklığı, K veya °C
T_0	Soğuma odası son sıcaklığı, K veya °C
T_{01}	Soğuma odası ilk sıcaklığı, K veya °C
η	Enerji verimliliği (Birinci yasa)
c	Enerji kaynağının birimsel CO ₂ içeriği, kgCO ₂ /kWh

KISALTMALAR

WHR	Atık Isı Değerlendirmesi
OPC	Sıradan Portland Çimentosu
PCC	Portland Composite Cements
REMM	Akılcı Ekserji Yönetim Modeli
CSI	Cement Sustainability Initiative
CIS	Commonwealth of Independent States
GNR	Getting the Numbers Right
LCTPI	Low Carbon Technology Partnership Initiative
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
IEA	International Energy Agency
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development

1 GİRİŞ

Dünyanın her yerinde en çok kullanılan insan yapısı malzemelerden birisi çimentodur. Sağlamlığı, esnekliği ve dayanımı tercih edilmesi için en önemli sebepler olmuştur. Sudan sonra kişi başına en çok tüketilen temel malzemelerden birisi de çimentodan üretilen beton olmuştur [1].

Dünyadaki çimento üreticileri, sektörün iklim sorununu çözmek için önemli bir rol oynayabileceğini kabul ediyor. Enerji tüketimi ve salım düzeylerini azaltma taahhüdünün bir parçası olarak, sektör de içeren önlemleri almaktadır. Bu önlemler; enerji verimliliği, alternatif yakıt kullanımı ve birlikte işleme dâhil diğer yakıt değişimi, klinker ikamesi, karbon yakalama ve depolamadır (CCS) [2].

Gelişmekte olan ülkelerin en önemli ihtiyaçlarından olan yapılaşma ve sanayileşmenin temel taşı çimentodur. Türkiye gelişme sürecinde çimento sanayi gittikçe gelişen ve güçlenen bir ülkedir. 2016 yılında Türkiye ekonomisi% 2,9 oranında büyümüştür. Bu dönemde inşaat sektörü %7,2 oranında büyümüştür. Çimento endüstrisi, cari açığı 2.8 milyar dolar, ihracat gelirleri 495 milyon dolar ve 2016 rakamlarına göre 18.000 kişiye doğrudan ve dolaylı istihdam sağlanmasıyla Türkiye ekonomisinde önemli bir yere sahiptir. 2016 yılında sanayi 76.9 Mt çimento üretti. 2015 yılı üretimi 72.8 Mt idi; bu durum çimento üretiminde% 5.6 artış olduğunu gösterdi [3].

Sanayi sektöründe, Türkiye yıllık 3.0 milyar dolar civarında bir enerji tasarruf potansiyeline sahiptir. Bu potansiyel sanayide yıllık yaklaşık 8.0 milyon TEP enerjiye veya sektörde 2007 yılındaki enerji tüketim seviyesinin yüzde 25'ine karşılık gelmektedir. Sanayide enerji yoğun endüstriyel alt sektörler hâkimdir. Enerji maliyetleri toplam üretim maliyetlerinin %20 ile 50 arasında bir oranını oluşturmaktadır. Demir-çelik sektörü %22 ile en büyük sınıai enerji tüketim payına sahiptir. Bu sektörü %19 ile metal dışı alt sektör (çimento, cam, seramik, tuğla) ve yaklaşık %3 ile bir başka enerji yoğun sanayi olan cam sektörü takip etmektedir [4].

Çimento üretiminin çok yoğun olduğu ülkemizde enerji kullanımı yoğun olan sektöre kurulum ve kullanım sırasında katkıda bulunmak amacı ile Enerji ve çevresel performans verileri endeksi üzerinden fırın tiplerinin avantajlarından yararlanılmasını incelemek üzere bir çalışma yapılması gereklidir. En başta

çimentonun ve çimentodan üretilen diğer malzemelerin farkları tespit edilmeli, sonrasında çimentonun üretim basamakları irdelenmelidir. Bu amaçla hazırlanan tezde, çimentonun performans yaklaşımları tartışılmış, enerji tüketimi ve CO₂ salınımlarının azaltma çalışmaları değerlendirilmiş, çalışmanın gerekliliğine vurgu yapılarak geniş bir literatür araştırması ile birlikte, metodolojide belirlenmiş endeks çalışmaları yapılmıştır. 2050 yılına kadar çimento üretiminin büyümesi bekleniyor yılda %1,2, ulaşan artış, 2050 yılında toplam üretimin 4400 Megaton a ulaşması bekleniyor. Bu da %72'lik bir artışa işaret ediyor [5].

Çimento sektöründe enerji yoğun süreçler belirlenerek süreçlerde enerji tüketiminin ve CO₂ salımlarının azaltılmasına yönelik olarak firmaların uyguladığı stratejiler ortaya konulmuştur. Uygulanan yaklaşımlar analiz edilmiştir.

Farklı yaklaşımların karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amacıyla, çok kriterli endeksler geliştirilmiştir. Girdi göstergeleri;

- Klinker üretimine kadar enerji tüketimi (klinker üretimi dâhil.) (kWh/t klinker)
- Çimento imalatı için harici güç tüketimi (kWh/t klinker)
- Termik enerji tüketimi (MJ/t klinker)
- Brüt CO₂ yayımı (kgCO₂/t klinker)
- Atık ısıdan üretilen toplam güç üretimi (MWh/yıl)
- Yakıt karışımının karbon yoğunluğu (CO₂/MJ)
- Toplam termik enerji harcaması (Fosil ve karışık atık yakıt) (Toplam enerji %)
- Toplam termik enerji harcaması (Biokütle) (Toplam enerji %)
- Toplam alternatif fosil yakıt (t)
- Toplam mineral birleşen katkısı (Çimento üretiminin %) olarak belirlendi [6].

Endeks sonuçları çimento firmalarının performansının artırılmasına katkı sağlayan enerji sistemi tasarımlarına yönelik değerlendirilmiştir. Türkiye de hizmet veren dört çimento fabrikasının göstergeleri üzerinden performans karşılaştırması ve öne çıkmasına sebep olan kriterlerin belirlenmesine takiben atık ısı değerlendirmesinin getireceği katkının değerlendirmesi yapılmıştır.

Yapılan literatür araştırmasının sonucunda;

- Yurt dışı çimento fabrikalarının tüm üretim kriterleri üzerinden hazırlanmış bir karşılaştırma endeksinin olmadığı görülmüştür.
- Türkiye'deki çimento fabrikalarının anahtar performans göstergelerinin diğer ülke verileri ile karşılaştırılmadığı görülmüştür.
- Atık ısının çimento fabrikaları için Akılcı Ekserji Yönetim Modeli üzerinden değerlendirilmediği görülmüştür.

Bu kapsamda bu çalışmada; enerji yoğun sektörler arasında yer alan çimento sektöründe enerji yoğun süreçler belirlenerek süreçlerde enerji tüketiminin ve CO₂ salımlarının azaltılmasına yönelik çimento sektöründe faaliyet gösteren önde gelen firmaların uyguladığı stratejiler ortaya konulmuştur. Uluslararası alanda Cement Sustainability Initiative (CSI) girişimine üye olan, ayrıca Global Reporting Initiative (GRI) bünyesindeki Sustainability Disclosure Database veri tabanında yer alan çimento firmaları başta olmak üzere, çimento sektöründe uygulanan yaklaşımlar analiz edilmiştir [6]. Farklı yaklaşımların karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amacıyla, çok kriterli endeks geliştirilmiştir. Girdi göstergeleri arasında enerji tüketimi, hammaddeler/ kireçtaşı/kil ve çıktı göstergeleri olarak CO₂ salımları ve üretilen klinker, çimento miktarı vb. yer alacaktır. Endeks sonuçları çimento firmalarının performansının artırılmasına katkı sağlayan enerji sistemi tasarımlarına yönelik değerlendirilmiştir. Atık ısının değerlendirilmesine yönelik olarak Akılcı Ekserji Yönetim Modeli (REMM) dikkate alınmıştır. Türkiye de hizmet veren dört çimento fabrikasının göstergeleri üzerinden performans karşılaştırması ve öne çıkmasına sebep olan kriterlerin belirlenmesine takiben atık ısı değerlendirmesinin getireceği katkının değerlendirilmesi yapılmıştır.

1.1 Çimento Nedir?

Çimento; ince, yumuşak, toz gibi olan ve ince kum ile kaba çakılı birbirine bağlayarak beton oluşturmak için kullanılan bir malzemedir. Çimento, hidrolik bağlayıcı olarak kullanılan yapıştırıcıdır. Su eklendiği zaman sertleşir.

Çimento herkes tarafında bilinmesine rağmen harç ve beton ile karıştırılır.

Harç; su, kumun ve çimentoğun belli bir oranlarda birbirine karıştırılmasıyla elde edilir. Yapılarda tuğlaların birbirine tutturulmasında, duvarların sıvanmasında kullanılır.

Beton; kum, çakıl, cüruf, kırılmış taş, çimento, su gibi maddelerden yapılan ve her türlü yapı işlerinde kullanılan bir karışımdır.

Çimento genel olarak hem harç hem de betonun yapı taşıdır.

Dünyada ilk on beş çimento üreticisi grubun sıralaması Çizelge 1.1 de verilmiştir.

Çizelge 1.1 Çimento üretimi dünya sıralaması [7].

Sıra	Firma/Gurup	Ülke	Kapasite (Mt/yıl)	Fabrika sayısı
1	Lafarge	Fransa	224	161
2	CNBM	Çin	221	-
3	Holcim	İsviçre	218	147
4	Anhui Conch	Çin	209	-
5	Jidong Development	Çin	130	43
6	Heidelberg Cement	Almanya	122	103
7	Sinoma	Çin	100	-
8	Cemex	Meksika	95	57
9	Shanshui	Çin	93	-
10	China Resources	Çin	74	17
11	Taiwan Cement Corp	Tayvan	71	-
12	Italcementi	İtalya	68	53
13	Votorantim	Brezilya	57	22
14	UltraTech	Hindistan	51	22
15	Buzzi	İtalya	45	39

1.2 Çimento Nasıl Üretilir?

Ocaklardan Ham Madde Çıkarılması; Çimento fabrikaları doğal olarak kullanılan; kalker, kireç taşı, marn malzemelerin yakınında kurulur. Bu malzemelerden; kalsiyum karbonat (CaCO_3) çıkarılmasında yararlanır. Çok az miktarlarda demir cevheri, boksit, kum ve kil gibi malzemeler ekstra, demir oksit (Fe_2O_3), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) sağlayarak istenilen klinkeri üretmekte kullanılır [9].

Kırma; Hammaddeler ocaklardan çıkarılarak kırıcılara getirilirler. Kırıcılarda 10cm den küçük parçalar haline getirilirler.

Malzeme Öğütülmesi; Kırmadan sonra, ham maddeler birlikte karıştırılır ve öğütülerek malzeme oluşturulur. Yüksek çimento kalitesi sağlanması için ham maddelerin ve sonradan gelen malzemelerin kimyası dikkatlice izlenir.

Ön Isıtma; fırından gelen sıcak gazlar farini, fırına girmeden evvel ön ısıtma işlemine tabi tutarlar. Ön ısıtıcı bir seri siklona sahiptir, bu siklonlar sayesinde malzeme akışının ters yönünde sıcak gaz akışı meydana gelir. Siklonlarda termal enerji farin malzemesinin ısıtılmasıyla geri kazanılır, işlemin verimliliği artırılır ve enerji için yakıt ihtiyacı düşer. Hammaddenin nemine ve atık ısı değerlendirme ihtiyacın bağlı olarak fırın 6 kademeli siklona sahip olabilir ve her kademedeki ısı geri kazanımı miktarı artar.

Ön Kalsinasyon; kalsinasyon kalkerin kirece dönüşme sürecidir. Modern kurulumlarda yüksek sıcaklıklı reaksiyonun bir kısmı da ön kalsinasyon da, ön ısıtıcının altında fırının üstünde yer alan yanma odasında ve fırının içerisinde gerçekleşir. Burada kalker bozularak üretim süresince ortaya çıkan CO₂ 'in %60'ını ortaya çıkarır. Diğer %40 yakıtın yanması ile ortaya çıkacaktır.

Döner fırında klinker üretimi; ön kalsine olmuş malzeme yaklaşık olarak 1000°C'lik sıcaklıkta fırına girer. Yakıt (kömür, Petro Kok, doğal gaz, mazot ve alternatif yakıtlar gibi) direk olarak dönen fırının içerisine malzemenin 1,450°C sıcaklığa ulaştığından emin olana dek 2000°C 'de ateşlenir.

Soğutma ve depolama; fırından gelen sıcak klinker büyük miktarda hava ile soğutulur. Soğutmada kullanılırken ısınan hava yanma havası olarak tekrar kullanılır. Soğutma klinkerin oluşmasında ana etmenlerden birisidir ve üretilen çimentonun performansından etkilidir. Bu işlemde yanma havası ön ısıtmalıdır bu yüzden sistemin ısı kaybı minimize olur. Klinker genellikle üretim yerinde öğütülerek çimentoya çevrilir, bazen de tren, kamyon vb. araçlarla öğütme tesislerine iletilir.

4-5% oranında alçı taşı klinkere son donma zamanını kontrol etmek için ilave edilir. Klinker ve alçı taşı gri çimento ya da genel adıyla Ordinary Portland Cement (OPC) olarak ya da başka minerallerin ilavesi ile farklı isimler alarak öğütülür. (Mesela; Portland Composite Cements (PCC)). Geleneksel olarak bilyeli değirmenler öğütmede kullanılır bununla beraber yeni teknoloji olan roller presler ya da dik değirmenler (ya da kombinasyonları) bu iş için kullanılabilir.

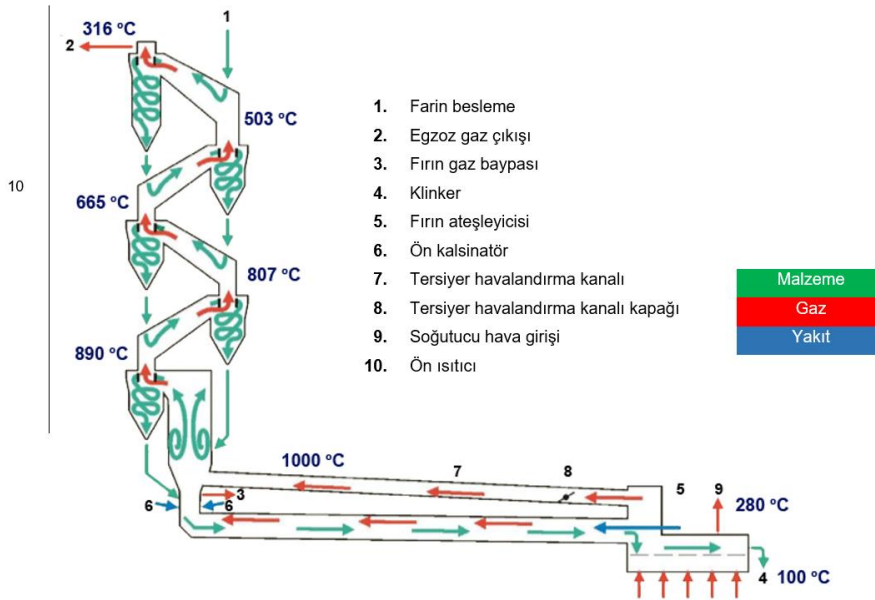
Karıştırma; çimento ayrıca başka son malzemeler olan cüruf, uçucu kül, kalkerde klinkerin yerini alacak şekilde karıştırılabilir. *Bu da genellikle CO₂ salımlarının düşürülmesinde kullanılan bir yöntemdir.* Temel amaç kullanılan klinker miktarını azaltmaktır.

Çimento silolarında depolama; en son ürün olan çimento homojenize edilerek çimento silolarından depolanır. Buradan paketleme ünitelerine (paketli çimento için) ya da silo bas ve diğer nakil araçlarına dağıtılır [8].

2 ÇİMENTO ÜRETİMİ PERFORMANS YAKLAŞIMLARIN İNCELENMESİ

- Fırın Tipi; çimento üretiminde teknolojik yaklaşımların incelenmesinde ortaya çıkan farklılıklar; ıslak, kuru ve yarı kuru yarı ıslak tip üretimin olduğu sistemler kullanılmaktadır.
- Islak tip fırın; ham madde çamuru doğrudan kurutma ve ön ısıtma bölümlerini içeren uzun, döner bir sistemin olduğu fırın tipidir.
- Kuru tip fırın; kuru hammadde karışımının siklonlardan oluşan bir ön ısıtıcı ve ön kalsinatörden geçtikten sonra pişirme işlemine alınan tip fırınlardır.
- Yarı ıslak fırın; çamur önce filtre preste suyu alınır, ön ısıtıcıdan geçirildikten sonra malzeme beslemesinin yapıldığı tip fırınlardır.
- Yarı kuru fırın; Kuru hammadde su ile granül hale getirilir, ön ısıtıcıdan geçirildikten sonra malzeme beslemesinin yapıldığı tip fırındır.

Islak tip süreçlerde malzeme neminin alınması için enerji harcandığı için verimleri düşüktür. Kuru tip fırınlar artık sanayi standardı olarak alınmakta ıslak tip fırınlar kullanılmamaktadır. Yaş tip fırınlardan kuruya geçiş sırasında fırın boyları kısalmış, kapasiteler artmıştır. Şekil 2.1 de kuru tip fırın, ön ısıtıcı, ön kalsinatör sisteminin parçalarını ve genel çalışma prensibi gösterilmiştir.



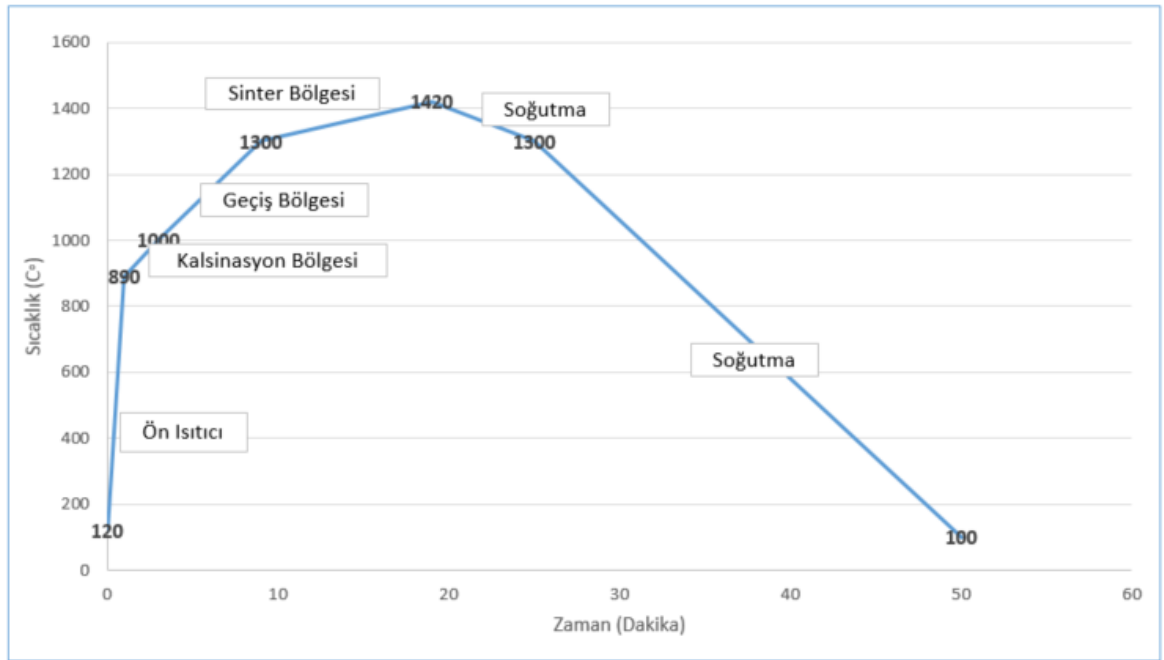
Şekil 2.1 Beş aşamalı ön ısıtıcılı ön kalsinasyonlu, kuru tip fırın modeli [10].

Ön ısıtıcı; kalsinasyonun tepkimelerin başlatıldığı malzemenin (farin) ısıtıldığı kısım. Eski tip fırınlarda elek şeklinde olan kurutucuların yerine geçen sistem. Farini sıcak fırın gazları ile siklon hareketi ile askıda tutup ısıtın sistemdir. Siklon kulesi olarak bilinir. Çimento fabrikalarının en yüksek noktasıdır.

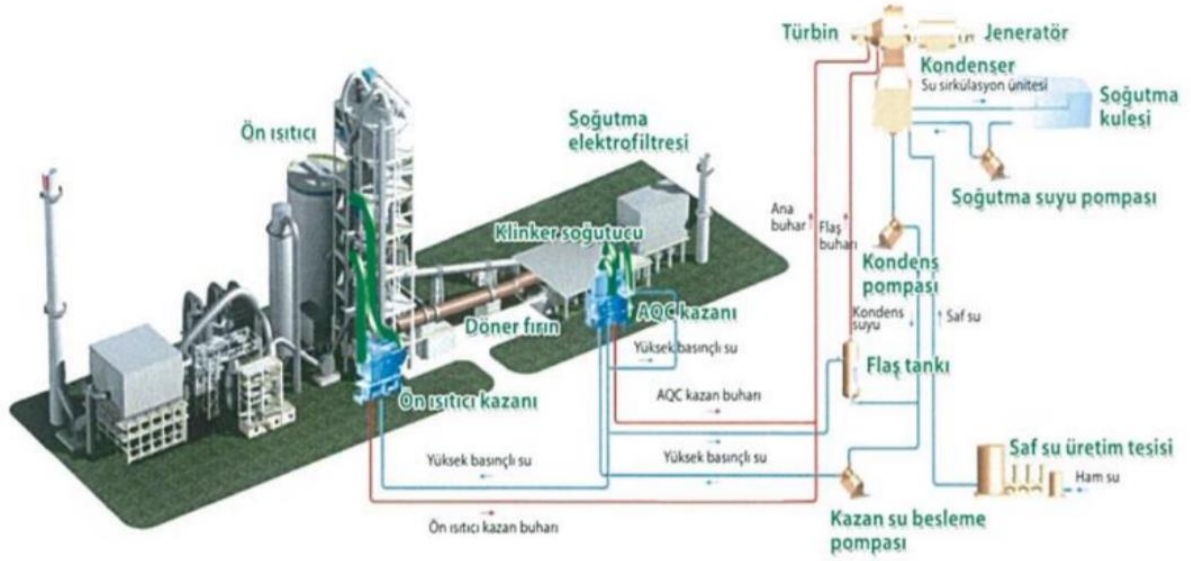
Ön kalsinatör; tersiyer havalandırma kanalı yardımı ile soğutucudan gelen yüksek sıcaklıktaki havanın fırının baş tarafına beslenmesi ile ön kalsinasyonun başlamasına sebep olan alandır. Bazı durumlarda yanmanın artması için toz kömür de beslenebilir[10].

Çizelge 2.1 Bölüm çıkış sıcaklıkları ve süreleri.

Malzeme Çıkış Zamanı (Dakika)	Bölge Çıkış Sıcaklıkları (C°)	Klinker Üretiminde Çıktığı Bölge
-	120	Elektro Filtre
1	890	Ön Isıtıcı
3	1000	Kalsinasyon Bölgesi
9	1300	Geçiş Bölgesi
19	1420	Sinter Bölgesi
25	1300	Soğutma Başlangıcı
50	100	Soğutma Bitişi



Şekil 2.2 Ön Kalsinasyonlu Ön Isıtıcı Kısa Kuru Fırında Bölüm Çıkış Sıcaklıkları.



Şekil 2.3 Atık ısı geri kazanım çevrim şeması [11].

Çimento fabrikalarında atık ısı miktarı çok fazladır. Şekil 2.2 ve Çizelge 2.2 karşılaştırıldığında Ön ısıtıcı da yaklaşık 890°C, soğutucunun ilk başlangıç noktasında da 1000°C sıcaklık kullanıma açıktır.

Oluşturulan basınçlı su sistemi ön ısıtıcı ve soğutmada yapılan kazanlardan geçirilerek su buharı elde edilir. Elde edilen su buharı türbin, jeneratör, kondenser sisteminden geçilerek elektrik enerjisi elde edilir [11]. Elektrik enerji özellikle kırıcı, farin değirmeni ve kömür değirmeni gibi yüksek elektrik enerjisi ihtiyacı duyan alanlarda kullanılır.

Katkılı çimentoların olumlu etkileri;

Geleneksel Portland çimentosunun içinde klinker dışında yalnızca maksimum %5 alçı bulunmaktadır. Olabilecek diğer çimento birleşenleri içinde gerek öğütürken, gerek pişerken en büyük enerji harcanan ve CO₂ salımına sebep olan klinker yerine demir çelik sanayinin atığı olan cüruf da çok iyi çimentolaşabilir malzemedir. Cüruf klinker üretiminde kullanıldığı zaman zaten pişmiş malzeme olduğu için payına düşen pişirme enerjisi sıfır olur. Benzer malzemeler; traslı, uçucu küllü, kalkerli çimentoların hepsi Avrupa standartlarına uygun çimentolardır. Çizelge 2.2 de 2013 yılında ülke ve kıtalara göre kullanılan yüzde katkı malzemeleri bulabilirsiniz [6].

Çizelge 2.2 Çimento üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler [6].

Mineral	Alçı Taşı	Kalker	Cüruf	Uçucu kül	Volkanik taş	Diğerleri
Birim	Çimentoda % miktarı	Çimentoda % miktarı	Çimentoda % miktarı	Çimentoda % miktarı	Çimentoda % miktarı	Çimentoda % miktarı
Avrupa	4%	7%	8%	3%	1%	2%
Kuzey Amerika	4%	3%	0%	0%	0%	0%
CIS	5%	1%	11%	0%	2%	0%
Merkez Amerika	4%	10%	0%	1%	10%	2%
Brezilya	3%	7%	13%	3%	3%	1%
Güney Amerika	5%	13%	4%	0%	8%	1%
Çin	5%	9%	6%	4%	0%	1%
Hindistan	4%	1%	6%	18%	0%	0%
Afrika	5%	13%	1%	1%	2%	1%
Orta Doğu	4%	0%	0%	0%	0%	0%
Asya	4%	8%	3%	1%	3%	0%

İkincil yakıtların olumlu etkileri;

Çimento üretiminde en büyük maliyet enerjidir. Enerji kaleminin içerisindeki en büyük parçada yakıta aittir. Fırınına ateşlenmesi için fueloil ya da doğal gaz sonrası pişirme içinde toz kömür kullanılır. Fosil yakıtlar olarak adlandırılan bu grubun maliyeti yüksektir. Fosil yakıtlar yerine ısı değeri yüksek atıkların kısmen ya da tamamen kullanıldığı durumlarda hem enerji maliyeti önemli derecede düşecek hem de fosil yakıt kullanımından dolayı şirketlere kesilen “karbon vergisi”, “çevre kirletici gibi bazı masraflardan da elimine edilmiş olacaktır. Fosil yakıtların ikame oranına dikkat edilerek yakılacak atıklar ayrıştırılır ve ürüne etkileri yapılan testlerle kontrol altında tutulur. Atıkların çimento üretiminde kullanılmasının bir diğer yararı da atıkları yok ederek çevre konusunda paydaşlarına sağladığı katkıdır. Çimento endüstrisi, atıkları alternatif bir enerji ve mineral kaynağı olarak kullanmakla birlikte aynı zamanda kendi yakıtla ilişkili yayılımın bir kısmını azaltarak etkin verimli bir çözüm sunabilmektedir.

Çizelge 2.3 2013 yılı alternatif fosil yakıt kullanım oranları ve miktarları [6].

Alternatif Fosil Yakıt	Termik Enerji Tüketimi	Toplam termik enerji harcaması	Toplam termik enerji harcaması (Biokütle)	Toplam termik enerji harcaması (Fosil yakıt)	Toplam Alternatif fosil yakıt tüketimi	Toplam Biokütle yakıtlar
Birim	MJ / t klinker	% toplam enerji	% toplam enerji	% toplam enerji	t alternatif fosil yakıt	t biokütle
Avrupa	3.692	25%	13%	61%	8.452.106	2.135.690
Kuzey Amerika	3.783	11%	4%	85%	1.572.707	325.977
CIS	4.718	2%	0%	98%	73.888	1.955
Merkez Amerika	3.615	12%	3%	85%	825.194	103.756
Brezilya	3.558	8%	10%	82%	661.055	564.647
Güney Amerika	3.592	6%	3%	91%	267.129	134.489
Çin	3.274	1%	0%	99%	306.405	150.884
Hindistan	3.042	2%	1%	98%	237.442	102.893
Afrika	3.724	3%	3%	94%	288.919	339.727
Orta Doğu	3.364	2%	1%	97%	116.624	69.970
Asya	3.329	8%	7%	85%	1.791.417	2.077.175

Çizelge 2.3'e bakıldığı zaman ikincil yakıt kullanım oranının Avrupa da çok yüksek olduğu ve yaklaşık olarak yakıtın %39'nun karışık atık ve biokütle den elde edildiği görülmüştür.

3 CO₂ SALIMININ AZALTILMASI ÇALIŞMALARI

Çimento üretiminde ortaya çıkan kirletme türleri; katı atıklar, sıvı atıklar, gürültü, gaz yayılı ve toz olmakla birlikte gaz yayılımı konusunda en sıkıntılı çıktı CO₂'dir. Küresel ısınmaya sebep olan sera gazları dünyanın başlıca sorunudur. Kısaca karbon gazı salımı olarak adlandırılan CO₂ salımı başta Avrupa Birliği ülkeleri olarak hem vergilendirilmekten hem de uyumsuzluk durumunda ağır cezalara tabi tutulmaktadır.

LCTPI çimentosu, Almanya'nın toplam CO₂ salınımı ile yaklaşık 2030 yılına kadar 1 G ton CO₂'nin azalmasını sağlayacak.

Otuz yıl önce çimento şirketleri, atığı hammadde ve enerji kaynağı olarak görmeye başladı. Bugün, çimento endüstrisi birçok ülkenin atık yönetimi uygulamalarına önemli katkı sağlamaktadır. Çöp fırınlarının ısıtılmasına alternatif bir yakıt olarak atıkların sorumlu bir şekilde kullanılması, sektörün fosil yakıt tüketimini düşürmekte ve bu da küresel çimento üretiminin çevresel ayak izini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Çimento imalatı sektörü, insan kaynaklı CO₂ salımlarının %5'inden fazlasının sorumlusudur. Bu, iki ana bölümden oluşur:

- Kireçtaşı, marn veya tebeşirden gelen kalsiyum karbonatın (CaCO₃), Kireç (CaO) 'ya dönüştürülmesi ile ilgili kimyasal reaksiyon CO₂ salımı sağlayan kalsinasyon işleminin kendisi. Yayılan yaklaşık% 60'ı CO₂, sürecin kendisinden geliyor.
- Enerji kirecin klinkere dönüştürülmesini ve kirecinin çeşitli yakıt türlerinin yakılması yoluyla çimento fırınının içindeki 1450°C sıcaklığında muhafaza edilmesi için gerekli: - Yayılan CO₂'nin yaklaşık% 40'ı yakıtla yakılarak gelir.

Çimento üretiminde CO₂:

- Ham maddenin kalsinasyonundan (de karbonizasyon)
- Fırın ve kurutucularda kullanılan yakıtın içindeki karbondan
- Üretimde kullanılan elektriğin termik santrallerde üretilmesinden salınır.

Yapılması gereken iyileştirmeler;

- Başta özgül ısı tüketimini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak
- Çimento üretimi sırasında üretime giren katkıları artırmak

- Fosil yakıt kullanımının yanında atıklardan üretilen ikincil yakıtların kullanımını sağlamak ile olur. [13].

Çizelge 3.1 2013 yılı CO₂ Salım verileri [6].

CO ₂ Yayılımı	Toplam Brüt CO ₂ Salımı	Brüt CO ₂ Salımı	Toplam Net CO ₂ salımı	Yakıt Karışımının Karbon Yoğunluğu
Birim	t CO ₂	kgCO ₂ / t Klinker	t CO ₂	CO ₂ /MJ
Avrupa	109.169.770	830	98.485.205	71
Kuzey Amerika	46.615.997	876	44.810.164	88
CIS	14.806.739	903	14.661.971	85
Merkez Amerika	23.858.575	864	22.758.041	90
Brezilya	31.618.393	863	30.612.349	96
Güney Amerika	18.102.449	819	17.704.611	79
Çin	63.141.200	850	62.828.020	79
Hindistan	66.005.843	824	65.567.196	95
Afrika	41.295.692	806	40.802.087	90
Orta Doğu	28.400.478	851	28.042.958	88
Asya	103.229.588	837	100.620.549	77

Çizelge 3.1'e bakıldığı zaman teknolojik olarak yetersiz olan ülkelerin klinker ve dolayısı ile çimento üretimlerindeki CO₂ salımı yüksek olmaktadır. Brüt CO₂ Yayımı verilerinde en yüksek 903 kgCO₂/ton klinker ile CIS ülkeleri başı çekmektedir. CIS ülkelerinin tamamında eski ıslak ve şaftlı tip fırın teknolojisi kullanılmaktadır. Türkiye deki fabrikalarda bu değer 1000 kgCO₂/ton klinkerden yüksektir.

4 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde çimento sektöründe enerji, ekserji ve CO₂ salımı üzerinden yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir.

Schneider vd. uygun materyallerin bölgesel mevcudiyetinin sınırlı olduğunu. Yeni malzemelerin gelecekte çimento unsurları olarak rol oynayabileceğini, Portland çimento klinkerinin ne ölçüde yerini alabilecekleri konusunu araştırmışlardır [12].

Supino vd. Avrupa çimento endüstrisinde sürdürülebilirlik için en iyi uygulamaları gözden geçirmişler. Zorlukların, verimliliği arttırmak, alternatif kaynaklar ve yakıtları kullanmak olduğunu, İtalyan ve Alman çimento endüstrilerinin farklı geliştiğini görmüşlerdir [13].

Mikulčić vd. çimento sektörünün küresel sera gazı yayılımlarının payı önemli olduğunu, daha temiz ve daha enerji verimli çimento üretimi giderek aranan bir özellik olduğunu, diğer sanayilerin yan ürünleri gibi alternatif yakıtlar ve hammaddelerin kullanıldığını görmüşler. Çimento üretim ünitelerinin tasarımı ve işletimini sayısal simülasyon ile incelemişlerdir [14].

Van Ruijven vd. çalışmalarında, çelik ve çimento endüstrileri için küresel bir simülasyon modeli sunmuşlar, küresel çelik ve çimento taleplerinin hızla arttığını görmüşler, temel senaryoda, üretim yavaş yavaş daha verimli teknolojilere doğru kaydığını anlamışlar ve iklim politikası, düşük karbonlu teknolojilerin alımını hızlandırdığını yorumlamışlardır. Carbon Capture and Sequestration (CCS) - Karbon Yakalama ve Ayırıştırmanın büyük salım azaltmalarına ulaşmak için önemli bir teknoloji olduğunu incelemişlerdir [15].

Hasanbeigi vd. süreç açıklaması, enerji tasarrufu, çevresel ve diğer faydalar, maliyetler, ticari duruma getirme durumu ve çimento endüstrisinin enerji kullanımını ve CO₂ yayınımlarının azaltmak için ortaya çıkan teknolojiler için referanslar hakkında mevcut bilgileri derlemek için ilk çalışmayı yapmışlardır. Her ne kadar dünya çapında yapılan çalışmalar çimento endüstrisi çeşitli sektörlerde özel enerji verimliliği teknolojilerini tanımlamış olsa da, gelişmekte olan veya gelişmiş enerji verimliliği ve düşük karbonlu teknolojiler konusunda bilgi az ve / veya dağınıktır. Bu çalışma, mühendisler, araştırmacılar, yatırımcılar, çimento şirketleri, politikacılar ve

diğer ilgili taraflara bu teknolojiler hakkında iyi yapılandırılmış bir veri tabanına kolay erişim olanağı sağlamak amacıyla çimento endüstrisi için on sekiz yeni teknoloji hakkında mevcut bilgileri birleştirmektedir [16].

Utlu vd. çimento üretiminin dünyadaki en enerji yoğun sanayilerinden biri olduğunu, hammadde hazırlığı yapmak için çimento fabrikalarında klinker ve döner fırınların yaygın olarak kullanıldığını görmüşlerdir. Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki bir çimento fabrikasında, hammadde hazırlama ünitesinin enerji ve ekserji analizini gerçek operasyon verilerini kullanarak gerçekleştirmektir. Teknik, enerji ve ekserji kullanımının analizinde, enerji politikalarının geliştirilmesinde ve enerji tasarrufu tedbirlerinin sağlanmasında yararlı bir araç olarak önerilmektedir [17].

Worrell vd. dünya ekonomisi doğrudan ve dolaylı olarak (tüketilen elektriğe göre) %80'in üzerinde enerji kullanımı olan küresel sera gazı yayınımların yaklaşık %37'sine katkıda bulunur. 2004 yılında 9.9 GtCO₂ olan toplam enerji ile ilgili yayınımlar 1971'den beri %65 oranında büyümüştür. Bununla birlikte, endüstri enerji verimliliğini neredeyse sürekli olarak son on yılda geliştirmiştir. Yakın gelecekte, enerji verimliliği potansiyel olarak sektörden sera gazı yayınımlarının azaltılması için en önemli ve uygun maliyetli araçtır. Bu çalışma 2030 yılına kadar enerji kullanımı ve sera gazı yayınımlarını azaltmak için endüstriyel enerji verimliliği teknolojilerinin ve politikalarının potansiyel katkısını tartışıyor [18].

Karellas vd. iki farklı WHR (atık ısı geri kazanım) yöntemini enerji ve ekserji olarak incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Bir su buharı Rankine döngüsü ve bir Organik Rankine Döngüsü (ORC). Parametrik bir çalışma su buhar teknolojisinin ORC'ye göre 310°C'den yüksek egzoz gazı sıcaklıklarında daha verimli olduğunu kanıtlamıştır. En etkin çözümün kısa bir ekonomik değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çimento sanayiindeki WHR tesisatları, elektrik tüketimlerinin azaltılmasında önemli katkıda bulunabilir ve böylece 5 yıla kadar bir geri ödeme süresi ile cazip bir yatırım olacağı gösterilmiştir [19].

Madloul vd. enerji tasarrufu, karbon dioksit salım indirimleri ve çimento endüstrisinde enerji verimliliğini artırmak için kullanılan çeşitli teknolojiler hakkında önceki çalışmalardan olan; hammadde hazırlama, klinker üretimi, ürünler ve

hammadde değişiklikleri, genel enerji verimliliği önlemleri ve son öğütme için enerji verimliliği önlemlerini araştırılmışlardır [20].

Katsiotti vd. bu araştırmada, Portland çimentosu üretiminde kullanılan altı adet ticari öğütme katkı maddesini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, herhangi bir katkı kullanılmadan referans bir numune de üretilmiştir. Öğütme yardımcılarının karakterizasyonu, Fourier transform kızıl ötesi spektroskopisi (FT-IR) ve gaz kromatografisi / kütle spektrometresi (GC / MS) ile gerçekleştirildi. Çimento karışımlarının tümü başlangıç ve son ayar zamanı, standart hamurun kıvamı, normal harç akışı ve 2, 7 ve 28 gün sonra basınç dayanımları açısından test edildi. Öğütölmüş çimento ile yapılan harçlar her yaşta ve daha yüksek ayar sürelerinde daha yüksek mukavemet gösterdi. Öte yandan, ticari öğütme katkılarına trietanolamin (TEA) varlığı, üretilen çimentoların mekanik özelliklerini etkilemedi ancak ayar sürelerini biraz azalttı olarak bulunmuştur [21].

Atmaca vd. farin değirmenini incelemiş ve birinci kanun ve ikinci kanun verimlilik değerlerini araştırmıştır. Farin değirmenini performans değerlendirmesi, öğütme işleminin enerji ve ekserji kayıplarını içerdiiğini göstermiştir. Ortam hava koşulları değirmen verimliliğini ve üretim kapasitesini etkilemiştir. Farin üretimi için özellikli enerji tüketimi belirlenmiştir [23]

Tan vd. bu çalışmada, çimento fabrikasında atık ısı geri kazanımı için üç seçenek ele alınmıştır, bunlar ikili basınçlı enerji üretim sistemi, sonradan yakma yakalama sistemi ve kombine sistemdir. Elektrik üretim sistemi modeli geliştirilmiştir. Teknik analiz, enerji üretim kapasitesi ve CO₂ tutma oranı açısından yapılmıştır. Üç sistemin performansını değerlendirmek için ekonomik değerlendirme yapılmıştır. Bu makaledeki ekonomik değerlendirme sonuçlarına dayanarak atık ısı kullanımı için en uygun seçenek seçilebilecektir [24].

Wang vd. Organik Rankine Döngüleri çimento üretim hattıyla bütünleştirmiştir. ORC'lerin çalışma sıvıları olarak beş organik sıvı kullanılmışlardır. Isıl, ekonomik ve gaz yayılım performansları analiz edilmiştir. ORC için en iyi sıvı olan R601, ısı kaynağı sıcaklığı 220°C olarak belirlenmiştir. ORC'lerin ekonomik ve doğalgazdan kaynaklanan salım azaltma performansları iyi olduğu bulunmuştur [25].

Touil vd. klinkerin kuru öğütme deneylerini, tork ölçümü ile donatılmış bir kesikli bilyalı değirmen kullanarak gerçekleştirdiler. Spesifik enerjinin işletme parametrelerine ve klinker ortamına bağlı olduğu buldular. Alçı ve puzolanik tuf gibi ilave bileşikler enerji verimliliğini arttırdığı gördüler. Başlangıçtaki kırılma oranının düşük olmasının enerji verimliliğini artırdığını anladılar. Başlangıçtaki maksimum kırılma oranını sağlayan koşullar, enerji tüketiminin artmasına neden olduğu anlaşılmıştır [26].

5 METODOLOJİ

Çimento üretimi sektöründe çok farklı boyutlardaki verileri aynı boyuta getirmek ve farklı boyutları birbiri ile toplanabilir hale getirmek için normalizasyon metotları incelenmiştir. Amaç toplanan endeks boyutlarından ayırt edilebilir sıralama yapmaktır.

Yapılan bir çalışmada, farklı birimlere sahip veriler söz konusu olduğunda hepsini aynı birime taşıma gerekliliği ortaya çıkabilir. Bunun için verilerin normalizasyonu yapılarak verilerin aynı birime ve aynı değer aralığına sahip olması sağlanır. Literatürde birçok normalizasyon yöntemi vardır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları min-maks yöntemi, standardizasyon (Z-skoru), ondalık ölçekleme, medyan (ortanca) normalizasyonu, Sigmoid normalizasyonudur. Çalışmanın ilerleyen kısımlarda bu normalizasyon yöntemlerinden bahsedilmiştir.

5.1 Veri Normalizasyon Yöntemleri

5.1.1 Min-Maks yöntemi

Bu teknik veriyi [0,1] aralığında ölçeklendirir. Öncelikle, veri setindeki en büyük değer (*maks*) ve en küçük değer (*min*) elde edilir. Daha sonra, eldeki verinin yüksek değeri tercih edildiği durumlarda (bir yapılandırıcının gücü, dayanıklılık gibi fayda tipi durumlarda) Eşitlik 5.1 kullanılarak normalizasyon yapılır.

$$N = \frac{D - \min}{\max - \min} \quad (5.1)$$

Eşitlik 5.1'de N normalize değeri ve D verinin değerini göstermektedir. Normalizasyon yapılırken eldeki verinin düşük değeri tercih edildiği durumlarda (yüzey pürüzlülüğü, sapma miktarı gibi zarar tipi durumlarda) ise Eşitlik 5.2 kullanılır.

$$N = \frac{D - \max}{\min - \max} \quad (5.2)$$

5.1.2 Standardizasyon (Z-Skoru)

Bu yöntemde veri setindeki değerler, bu değerlerin ortalamasına ve standart sapmasına göre normalize edilir. Veri setinin n tane değerden oluştuğu varsayımı altında $(D_i, i = 1, 2, \dots, n)$, değerlerin ortalaması Eşitlik 5.3'teki gibi hesaplanırken, değerlerin standart sapması da Eşitlik 5.4'teki gibi hesaplanır.

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (5.3)$$

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2} \quad (5.4)$$

Normalize değerler $(N_i, i = 1, 2, \dots, n)$, Eşitlik 5.5 kullanılarak hesaplanır.

$$N_i = \frac{D_i - \bar{D}}{S_D}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.5)$$

Bu yöntem, bir veri setinde en büyük ve en küçük değerler bilinmediğinde ve değişkenliğin fazla olmadığı durumlarda daha etkindir.

5.1.3 Ondalık ölçekleme yöntemi

Bu yöntemde, veri setindeki değerler $N = D/10^k$ formülü kullanılarak normalize edilir. Burada k , $\max(|N|) < 1$ eşitsizliğini sağlayan en küçük tam sayıdır. Bu yöntem, veri setinin en büyük değerinin değişmediği durumlarda etkin bir şekilde kullanılabilir.

5.1.4 Medyan (ortanca) normalizasyonu

Medyan, bir veri setinin tam orta noktasıdır. Merkezi eğilim ölçülerinden birisi olan medyan, Eşitlik 3.6'daki gibi hesaplanır:

$$\tilde{D} = \begin{cases} D_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}, & n \text{ tek sayı ise} \\ \frac{D_{\left(\frac{n}{2}\right)} + D_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2}, & n \text{ çift sayı ise} \end{cases} \quad (5.6)$$

Veri setindeki değerler $D_i, i = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere, Eşitlik 5.6'da $D_{(i)}$, i . sıra istatistiğini göstermektedir. Medyan normalizasyonu, Eşitlik 5.7 kullanılarak yapılmaktadır.

$$N_i = \frac{D_i}{\bar{D}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.7)$$

Medyan büyük değişkenliklerden ve uç değerlerden etkilenmediği için oldukça etkin bir yöntemdir.

5.1.5 Sigmoid normalizasyonu

Uygulanması en basit yöntemlerden birisidir ve Eşitlik 5.8 kullanılmaktadır [28].

$$N = \frac{1}{1 + e^D} \quad (5.8)$$

5.2 Verilerin Derlenmesi

Yapılan çalışmada izlenen adımları sırayla incelendiğinde; verilerin toplanması için “WBCSD Cement Sustainability Initiative Getting Numbers Right (GNR) Projects” kapsamında yayınlanan 2013 yılı yayılım raporuna göre 1990 ile 2013 yılları arasındaki verilerin kullanılmasına karar verilmiştir. Raporlamaların doğru yapılması ve rapora verilecek olan değerlerin doğru hesaplanması için oluşturulan kriterler tüm ülkelerce kabul görmüş ve bu kriterlere göre eş değer bilgiler aktarılmıştır. GNR, bireysel çimento fabrikalarındaki yayılım verilerine dayanan bir CO₂ ve enerji performansı bilgi sistemidir. Dünya genelinde klinker ve çimento üretiminin CO₂ ve enerji performansı hakkında temsili istatistiksel bilgiler geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışmada gruplandırma enerji ve çevresel performans verilerine göre yapılmıştır. Enerji ve çevresel performanslara göre alınan verilerin değerlendirilmesi 1990 ve 2013 yıllarına göre teknolojik ve ekonomik duruma göre ölçüt olarak kullanılmıştır. Daha sonra fabrikalara katkı verecek endeksin geliştirilmesi için fırın tipi ile bağlantılı başka bir endeks geliştirilmiş fırın tipi özelliklerinin performansa etkileri üzerinde tartışılmıştır. Fırın tiplerinin etkisi ve fırınların klinker üretme performanslarına etkiyen durumlar “Akılcı Ekserji Yönetim Modeli” ile açıklanmıştır.

Farklı yaklaşımların karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amacıyla, çok kriterli endeksler geliştirilmiştir. Endeks boyutu olarak;

- Klinker üretimi dâhil enerji tüketimi (kWh/t klinker) (DÜŞÜK)
- Çimento imalatı için harici güç tüketimi (kWh/t klinker) (DÜŞÜK)
- Termik enerji tüketimi (MJ/t klinker) (DÜŞÜK)
- Brüt CO₂ yayımı (kgCO₂/t klinker) (DÜŞÜK)
- Atık ısıdan üretilen toplam güç üretimi (MWh/yıl) (YÜKSEK)
- Yakıt karışımının karbon yoğunluğu (CO₂/MJ) (DÜŞÜK)
- Toplam termik enerji harcaması (Atık) (Toplam enerji %) (YÜKSEK)
- Toplam termik enerji harcaması (Biokütle) (Toplam enerji %) (YÜKSEK)
- Toplam alternatif fosil yakıt (t) (YÜKSEK)
- Toplam mineral birleşen katkısı (Çimento üretiminin %) (YÜKSEK) olarak belirlendi.

Bir diğer karşılaştırma yöntemi de fırın tiplerine göre yapıldı. Teknolojik olarak yapılan çalışmaların fabrika performanslarına etkisi tartışıldı. “Akılcı Ekserji Yönetimi Modeli” fırınların performanslarının açıklanmasında kullanıldı. Fırınların tipleri;

- Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu
- Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz
- Uzun Kuru tip, ön ısıtmalı
- Karışık tip
- Yarı kuru, yarı ıslak tip
- Islak şaftlı tip

Veriler hazırlanırken;

- Yakıtın kurutulması için kullanılan enerji dâhil edilmiştir.
- Çimento fabrikasında üretilen enerjinin CO₂ salımı göz önüne alınmamıştır.
- Ağırlıklı ortalama kullanılmıştır.
- Gri çimento için olan veriler kullanılmıştır.

Oluşturulan Çizelge 5.1 üzerinden çalışmalara başlandı.

Çizelge 5.1 Enerji ve çevresel performans 1990 yılı ham verileri [6].

SEÇİM				4		6		5		1		2			
1990 Yılı Verileri Endeks Boyutları	Üretilen Toplam Klinker Miktarı	Toplam Çimento Miktarı	Toplam Brüt CO2 salımı	Brüt CO2 salımı	Toplam Net CO2 salımı	Yakıt Kaşımının Karbon Yoğunluğu	Toplam Güç Üretimi	Atık Isıdan Üretilen Toplam Güç Üretimi	Çimento Fabrikası Güç Tüketimi	Klinker üretimine kadar toplam enerji tüketimi	Klinker üretimine kadar enerji tüketimi	Çimento imalatı için toplam harici güç tüketimi	Çimento imalatı için harici güç tüketimi	Toplam termik enerji harcaması (Fosil atık)	Toplam termik enerji harcaması (Biomass)
Birim	t klinker	t çimento	t CO2	kg CO2 / t klinker	t CO2	CO2/MJ	MWh/yıl	MWh/yıl	kWh / t çimento	MWh / yıl	kWh / t klinker	MWh / yıl	kWh / t çimento	GJ	GJ
Avrupa	186 000 000	232.721.978	171 000 000	907	170 000 000	80	581.435	42568	113	8.647.430	74	16.878.730	111	18.533.866	1.634.786
Kuzey Amerika	50 700 000	55.206.707	51 100 000	1010	50 000 000	93	2.798.697	0	145	4.613.069	84	8.324.798	127	9.729.913	157.419
CIS	23 700 000	28.212.359	22 500 000	948	22 500 000	75	57.891	0	119	1.174.149	81	2.217.250	123	-	-
Merkez Amerika	21 700 000	25.580.332	18 700 000	849	18 700 000	80	197.831	0	122	2.414.125	77	4.575.372	108	-	122.176
Brezilya	14 900 000	18.716.720	13 000 000	871	13 000 000	96	-	0	110	2.266.923	65	5.507.389	105	-	3.391.690
Güney Amerika	5 220 000	6.757.447	4 710 000	903	4 710 000	63	78.518	0	112	1.822.534	78	2.725.305	107	-	-
Çin	6 120 000	7.643.809	6 530 000	1070	6 530 000	91	131.874	1.571.774	90	4.614.167	69	6.529.303	89	-	-
Hindistan	14 900 000	18.137.912	14 800 000	932	14 800 000	96	8.781.908	306.217	75	5.741.061	65	3.314.374	80	2.350	-
Afrika	27 600 000	33.573.200	25 700 000	917	25 700 000	89	557.064	0	119	3.986.336	73	6.994.822	96	-	-
Orta Doğu	7 600 000	6.759.192	6 810 000	889	6 780 000	91	173	88.803	141	1.919.340	68	2.839.040	98	-	-
Asya	63 100 000	68.036.293	54 100 000	856	53 900 000	85	1.084.790	1.331.977	105	7.631.325	63	11.757.369	102	1.572.099	-

	3	7	8		9										10
Toplam termik enerji harcaması (Fosil yakıt)	Termik Enerji Tüketimi	Toplam termik enerji harcamasına atık yakıt yakılması oranı	Toplam termik enerji harcamasına Biokütle yakılması oranı	Toplam termik enerji harcaması Fosil yakıt yakılması oranı	Toplam Alternatif fosil yakıt tüketimi	Toplam Biomass yakıtlar	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Alçı taşı)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Kalker)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Cüruf)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Uçucu kül)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Volkanik taş)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Diğerleri)	Çimento katkısı olarak kullanılan toplam mineral birleşen (Cüruf)	Çimento katkısı olarak kullanılan toplam mineral birleşen (Uçucu kül ve volkanik taş)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler toplam yüzdesi
GJ	MJ / t klinker	% total energy	% total energy	% total energy	t alternative fossil fuels	t biomass	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements
748.612.864	4.053	2%	0%	97%	1.143.423	26.762	4%	2%	5%	2%	1%	6%	5%	2%	20%
242.847.292	4.962	4%	0%	96%	1.017.856	1.614	5%	1%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	7%
153.797.342	6.470	0%	0%	100%	-	-	4%	0%	11%	0%	0%	1%	11%	0%	16%
87.003.989	3.933	0%	0%	100%	-	6.854	5%	2%	0%	0%	6%	3%	0%	0%	16%
59.461.622	4.214	0%	5%	95%	92.020	302.606	3%	5%	7%	3%	0%	1%	7%	3%	19%
22.480.399	4.308	0%	0%	100%	-	-	4%	3%	0%	0%	8%	7%	0%	0%	22%
33.842.895	5.532	0%	0%	100%	-	-	3%	2%	9%	2%	0%	1%	9%	2%	17%
62.517.492	3.962	0%	0%	100%	62	-	2%	0%	0%	1%	0%	11%	0%	1%	14%
129.644.026	4.612	0%	0%	100%	-	-	3%	3%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	10%
30.633.710	3.973	0%	0%	100%	-	862	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%
212.947.815	3.396	1%	0%	99%	62.998	-	3%	1%	4%	0%	0%	0%	4%	0%	8%

Çizelge 5.2 Enerji ve çevresel performans 2013 yılı ham verileri [6].

Seçim				4		6		5			1		2		
2013 Yılı Verileri Endeks Boyutları	Üretilen Toplam Klinker Miktarı	Toplam Çimento Miktarı	Toplam Brüt CO2 salımı	Brüt CO2 salımı	Toplam Net CO2 salımı	Yakıt Karşımının Karbon Yoğunluğu	Toplam Güç Üretimi	Atık Isıdan Üretilen Toplam Güç Üretimi	Çimento Fabrikası Güç Tüketimi	Klinker üretimine kadar toplam enerji tüketimi	Klinker üretimine kadar enerji tüketimi	Çimento imalatı için toplam harici güç tüketimi	Çimento imalatı için harici güç tüketimi	Toplam termik enerji harcaması (Fosil atık)	Toplam termik enerji harcaması (Biomass)
Birim	t Clinker	t cement	t CO2	(kg CO2 / t clinker)	t CO2	CO2/MJ	MWh/year	MWh/year	kWh / t cement	MWh / year	kWh / t clinker	MWh / year	kWh / t cement	GJ	GJ
Avrupa	128 000 000	164.956.757	109.169.770	830	98.485.205	71	641038,18	46307	117	8.492.747	76	16.196.204	112	121.615.332	64.480.679
Kuzey Amerika	52 900 000	64.811.704	46.615.997	876	44.810.164	88	2776826,855	0	128	4.571.595	86	8.194.256	127	21.683.324	8.444.423
CIS	16 300 000	20.816.661	14.806.739	903	14.661.971	85	60103,975	0	119	1.331.962	81	2.429.696	120	1.698.997	31.344
Merkez Amerika	26 600 000	37.756.709	23.858.575	864	22.758.041	90	141648,5497	0	112	2.209.698	83	4.092.510	109	11.858.794	2.468.715
Brezilya	36 500 000	54.068.466	31.618.393	863	30.612.349	96	0	0	105	2.627.340	72	5.601.177	104	10.225.670	12.500.673
Güney Amerika	21 900 000	35.290.769	18.102.449	819	17.704.611	79	73305	0	103	1.698.638	77	2.556.125	103	4.922.480	2.017.884
Çin	74 100 000	95.609.279	63.141.200	850	62.828.020	79	154366,5282	1.862.228	93	5.005.697	68	7.048.170	88	1.772.856	1.140.240
Hindistan	77 500 000	112.580.915	66.005.843	824	65.567.196	95	7293931,335	21.176	83	5.112.724	64	3.235.426	81	3.693.424	1.637.438
Afrika	50 500 000	77.534.374	41.295.692	806	40.802.087	90	537137,993	0	94	3.710.520	72	6.603.064	95	5.827.552	5.974.612
Orta Doğu	32 100 000	42.162.273	28.400.478	851	28.042.958	88	173,293	152.516	103	2.302.828	69	3.678.430	103	2.376.413	1.021.661
Asya	123 000 000	155.690.948	103.229.588	837	100.620.549	77	908538,4427	1.500.318	102	7.736.977	63	11.980.773	100	5.827.552	5.974.612

	3	7	8		9										10
Toplam termik enerji harcaması (Fosil yakıt)	Termik Enerji Tüketimi	Toplam termik enerji harcamasına atık yakıt yakılması oranı	Toplam termik enerji harcamasına Biokütle yakılması oranı	Toplam termik enerji harcaması Fosil yakıt yakılması	Toplam Alternatif fosil yakıt tüketimi	Toplam Biomass yakıtlar	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Alçı taşı)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Kalker)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Cüruf)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Uçucu küll)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Volkanik taş)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler (Diğerleri)	Çimento katkısı olarak kullanılan toplam mineral birleşen (Cüruf)	Çimento katkısı olarak kullanılan toplam mineral birleşen (Uçucu küll ve volkanik taş)	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler toplam yüzdesi
GJ	MJ / t clinker	% total energy	% total energy	% total energy	t alternative fossil fuels	t biomass	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements	% volume of cements
302.440.310	3.692	25%	13%	61%	8.452.106	2.135.690	4%	7%	8%	3%	1%	2%	8%	3%	25%
171.963.255	3.783	11%	4%	85%	1.572.707	325.977	4%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%
75.837.952	4.718	2%	0%	98%	73.888	1.955	5%	1%	11%	0%	2%	0%	11%	0%	19%
86.528.757	3.615	12%	3%	85%	825.194	103.756	4%	10%	0%	1%	10%	2%	1%	0%	27%
106.960.083	3.558	8%	10%	82%	661.055	564.647	3%	7%	13%	3%	3%	1%	13%	3%	30%
72.862.976	3.592	6%	3%	91%	267.129	134.489	5%	13%	4%	0%	8%	1%	4%	0%	31%
239.735.848	3.274	1%	0%	99%	306.405	150.884	5%	9%	6%	4%	0%	1%	6%	4%	25%
238.474.263	3.042	2%	1%	98%	237.442	102.893	4%	1%	6%	18%	0%	0%	6%	18%	29%
180.005.428	3.724	3%	3%	94%	288.919	339.727	5%	13%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	23%
104.073.070	3.364	2%	1%	97%	116.624	69.970	4%						2%	1%	4%
180.005.428	3.329	8%	7%	85%	1.791.417	2.077.175	4%	8%	3%	1%	3%	0%	1%	1%	19%

6 ENERJİ VE ÇEVRESEL PERFORMANS HAM VERİLERİNE GÖRE ENDEKS OLUŞTURULMASI

Verilerin normalize edilmesi için 3. Bölümdeki Normalizasyon yöntemlerinden Min-Maks yöntemi kullanıldı. 1990, 2013 yılları için Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.4' ü oluşturmak için bir önceki bölümde (GRI) bünyesindeki "Sustainability Disclosure Database" veri tabanında oluşturulan Enerji ve çevresel performans verileri içeren Çizelge 5.1 ve 5.2'den yararlanılmıştır.

Min-Maks yönteminin şartlarından olan yüksek değerlerin tercih edildiği durumlar (maks) ve düşük değerlerin tercih edildiği durumlara (min) dikkat edilerek bir grup veri endeks oluşturulmak üzere seçilmiştir. Çizelge 6.2' de seçilen veriler Enerji ve çevresel performans değerleri sırlamasına göre en yüksek ve en düşük verileri belirlenmiştir.

6.1 1990 ve 2013 Yılı Enerji ve Çevresel Performans Endeks Boyut Toplamlarının Oluşturulması

1990 yılı verilerini oluşturmak için Çizelge 5.1 verileri içerisinde, seçmiş olduğumuz normalizasyon yöntemlerinden Min-Maks yönteminin gereği olarak endekse girmesini düşündüğümüz verilerin düşük değerlerinin mi yoksa yüksek değerlerinin mi endeks toplamına pozitif katkı sağlayacağını düşünerek verilerin uygun olanları seçildi. Toplamda endeks katkı sağlayacak on veri alındı bunların beş adedinin maksimum olması diğer beş adedinin de minimum olmasının olumlu katkı sağlayacağı düşünüldü. Klinker üretimi dâhil enerji tüketimi, çimento üretimi için harici güç tüketimi, termik enerji tüketimi, brüt CO₂ yayımı, yakıtı karışımının karbon yoğunluğu verilerinin minimum olması endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Atık ısıdan üretilen toplam güç üretimi, toplam termik enerji harcaması (fosil ve karışık atık yakıt), toplam termik enerji harcaması (biokütle), toplam alternatif fosil yakıt tüketimi, Portland çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler toplam yüzdesi verilerinin maksimum olmasının endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Minimum ve maksimum ayrımı yapıldı ve her bir veri sütununun minimum ve maksimumları bulunarak Çizelge 6.1 oluşturuldu.

Çizelge 6.1 üzerindeki veriler; Min-Maks normalizasyon yönteminin yüksek değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi için Eşitlik 5.1, düşük değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi

için Eşitlik 5.2 kullanılarak Çizelge 6.2 oluşturuldu. Çizelge 6.2 her bir coğrafi bölge için yüksek ve düşük değerlerin tercih edilmesine göre normalize edilmesi sonucu değerleri 0 ile 1 arasında yer alan endeks boyutları ve toplamı oluşturuldu. Oluşan coğrafi bölgelere göre Enerji ve çevresel performans endeks toplamaları 1990 yılı için sırlama yapılmasını sağladı.

Çizelge 6.1 1990 yılı enerji ve çevresel performans verilerine göre normalize edilecek veriler [6].

SEÇİM	MIN	MIN	MIN	MIN	MAX	Min	MAX	MAX	MAX	MAX
1990 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Klinker üretimine kadar enerji tüketimi (Klinker Üretimi Dahil)	Çimento imalatı için harici güç tüketimi	Termik enerji tüketimi	Bürüt CO2 Yayılımı	Atık Isıdan Üretilen Toplam Güç Üretimi	Yakıt Karışımının Karbon Yoğunluğu	Toplam termik enerji harcamasına atık yakılması oranı	Toplam termik enerji harcamasına Biokütle yakılması oranı	Toplam Alternatif fosil yakıt tüketimi	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral bileşenler toplam yüzdesi
Birim	kWh / t clinker	kWh / t cement	MJ / t clinker	kg CO2 / t clinker	MWh/yıl	CO2/MJ	Toplam Enerjiye %	Toplam Enerjiye %	t alternatif fosil yakıt	% volume of cements
Avrupa	74	111	4.053	907	42568	80	2%	0%	1.143.423	20%
Kuzey Amerika	84	127	4.962	1010	0	93	4%	0%	1.017.856	7%
CIS	81	123	6.470	948	0	75	0%	0%	-	16%
Merkez Amerika	77	108	3.933	849	0	80	0%	0%	-	16%
Brezilya	65	105	4.214	871	0	96	0%	5%	92.020	19%
Güney Amerika	78	107	4.308	903	0	63	0%	0%	-	22%
Çin	69	89	5.532	1070	1.571.774	91	0%	0%	-	17%
Hindistan	65	80	3.962	932	306.217	96	0%	0%	62	14%
Afrika	73	96	4.612	917	0	89	0%	0%	-	10%
Orta Doğu	68	98	3.973	889	88.803	91	0%	0%	-	5%
Asya	63	102	3.396	856	1.331.977	85	1%	0%	62.998	8%
MINİMUM DEĞER	63	80	3.396	849	-	63	0%	0%	0	5%
MAKSİMUM DEĞER	84	127	6.470	1.070	1.571.774	96	4%	5%	1.143.422,62	22%

Çizelge 6.2 1990 yılı enerji ve çevresel performansa verilerine göre değerlerin Min-Maks bulunması [6].

MIN - MAKS											
1990 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Klinker üretimine kadar enerji tüketimi (Klinker Üretimi Dahil)	Çimento imalatı için harici güç tüketimi	Termik enerji tüketimi	Bürüt CO2 Yayılımı	Atık Isıdan Üretilen Toplam Güç Üretimi	Yakıt Karışımının Karbon Yoğunluğu	Toplam termik enerji harcamasına atık yakılması oranı	Toplam termik enerji harcamasına Biokütle yakılması oranı	Toplam Alternatif fosil yakıt tüketimi	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral bileşenler toplam yüzdesi	Endeks Boyut Toplamı
Avrupa	0,5	0,3	0,8	0,7	0,0	0,5	0,6	0,0	1,0	0,9	5,4
Kuzey Amerika	0,0	0,0	0,5	0,3	0,0	0,1	1,0	0,0	0,9	0,1	2,9
CIS	0,1	0,1	0,0	0,6	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,6	2,0
Merkez Amerika	0,3	0,4	0,8	1,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,6	3,7
Brezilya	0,9	0,5	0,7	0,9	0,0	0,0	0,0	1,0	0,1	0,8	4,9
Güney Amerika	0,3	0,4	0,7	0,8	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	4,2
Çin	0,7	0,8	0,3	0,0	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,7	3,7
Hindistan	0,9	1,0	0,8	0,6	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	4,1
Afrika	0,5	0,7	0,6	0,7	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	3,0
Orta Doğu	0,8	0,6	0,8	0,8	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2
Asya	1,0	0,5	1,0	1,0	0,8	0,3	0,2	0,0	0,1	0,2	5,1

Çizelge 6.3 1990 yılı ülkelere göre endeks boyut toplamları.

Ülke/Bölge	Endeks Boyut Toplamı
Avrupa	5,4
Asya	5,1
Brezilya	4,9
Güney Amerika	4,2
Hindistan	4,1
Merkez Amerika	3,7
Çin	3,7
Orta Doğu	3,2
Afrika	3,0
Kuzey Amerika	2,9
CIS	2,0

Çizelge 6.3 1990 yılı coğrafi bölgelere göre enerji ve çevresel performans endeks toplamları sıralanması sonucunda oluştu. 1990 yılı endeksi üzerinde en çok puanı toplayan Avrupa; sadece alternatif fosil yakıt tüketimi (maks) en yüksek puanı almasına rağmen diğer diğer boyutlarda ortalamanın üzerinde aldığı puanlarla birinciliği aldı. Avrupa'nın Termik enerji tüketimi (min), mineral birleşenlerin kullanılması (maks) ve CO₂ yayımı (min) konusunda almış olduğu yüksek puanlar dikkat çekici idi.

Asya ikinciliği alırken; klinker üretimine kadar enerji tüketimi (min), termik enerji tüketimi (min), brüt CO₂ yayımı (min) boyutlarında 1990 yılı endeksinin en iyi sonuçlarını elde etti, atık ısıdan üretilen toplam güç (maks) boyutunun yüksek olması önemliydi.

Brezilya 1990 yılı endeks sırlamasındaki üçüncülüğündeki en önemli endeks boyutu toplam termik enerji harcaması (biokütle) (maks) ile oldu, mineral birleşenlerin kullanılması (maks) toplam 1990 yılı endkes puanına önemli katı sağladı. Brezilya 1990 yılı endeksinin biokütle harcaması konusunda boyut sahibi olan tek ülke oldu.

1990 yılı endeksi oluşturulurken; Hindistan'ın çimento imalatı için harici güç tüketimi (min), Çin'in atık ısıdan üretilen toplam güç (maks), Güney Amerika'nın yakıt karışımının karbon yoğunluğu (min) ve mineral birleşenlerin kullanılması (maks),

Çizelge 6.4 2013 yılı enerji ve çevresel performans verilerine göre normalize edilecek veriler.

SEÇİM	MIN	MIN	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX	MAX	MAX	MAX
2013 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Klinker üretimine kadar enerji tüketimi (Klinker Üretimi Dahil)	Çimento imalatı için harici güç tüketimi	Termik enerji tüketimi	Bürüt CO2 Yayılımı	Atık Isıdan Üretilen Toplam Güç Üretimi	Yakıt Karışımının Karbon Yoğunluğu	Toplam termik enerji harcamasına atık yakılması oranı	Toplam termik enerji harcamasına Biokütle yakılması oranı	Toplam Alternatif fosil yakıt tüketimi	Portland çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler toplam yüzdesi
Birim	kWh / t clinker	kWh / t cement	MJ / t clinker	kg CO2 / t clinker	MWh/yıl	CO2/MJ	Toplam Enerjiye %	Toplam Enerjiye %	t alternatif fosil yakıt	% volume of cements
Avrupa	76,00	112,00	3.692,00	830,00	46.307,00	70,68	25,32%	13,32%	8.452.105,60	25,00%
Kuzey Amerika	86,00	127,00	3.783,00	876,00	0,00	87,94	10,62%	4,20%	1.572.707,25	7,00%
CIS	81,00	120,00	4.718,00	903,00	0,00	84,61	2,21%	0,04%	73.888,39	19,00%
Merkez Amerika	83,00	109,00	3.615,00	864,00	0,00	89,89	12,16%	2,53%	825.193,51	27,00%
Brezilya	72,00	104,00	3.558,00	863,00	0,00	95,64	7,88%	9,64%	661.055,39	30,00%
Güney Amerika	77,00	103,00	3.592,00	819,00	0,00	79,16	6,24%	2,56%	267.129,22	31,00%
Çin	68,00	88,00	3.274,00	850,00	1.862.228,00	79,01	0,73%	0,47%	306.405,01	25,00%
Hindistan	64,00	81,00	3.042,00	824,00	21.176,00	94,98	1,57%	0,69%	237.441,57	29,00%
Afrika	72,00	95,00	3.724,00	806,00	0,00	90,40	3,10%	3,18%	288.919,44	23,00%
Orta Doğu	69,00	103,00	3.364,00	851,00	152.516,00	87,52	2,21%	0,95%	116.623,76	4,00%
Asya	63,00	100,00	3.329,00	837,00	1.500.318,00	77,41	7,99%	6,86%	1.791.417,26	19,00%
MINİMUM DEĞER	63,00	81,00	3.042,00	806,00	0,00	70,68	0,73%	0,04%	73.888,39	4,00%
MAKSİMUM DEĞER	86,00	127,00	4.718,00	903,00	1.862.228,00	95,64	25,32%	13,32%	8.452.105,60	31,00%

Çizelge 6.5 2013 yılı enerji ve çevresel performans verilerine göre değerlerin Min-Maks bulunması.

MIN - MAKS											
2013 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Klinker üretimine kadar enerji tüketimi (Klinker Üretimi Dahil)	Çimento imalatı için harici güç tüketimi	Termik enerji tüketimi	Bürüt CO2 Yayılımı	Atık Isıdan Üretilen Toplam Güç Üretimi	Yakıt Karışımının Karbon Yoğunluğu	Toplam termik enerji harcamasına atık yakılması oranı	Toplam termik enerji harcamasına Biokütle yakılması oranı	Toplam Alternatif fosil yakıt tüketimi	Portland çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler toplam yüzdesi	Endeks Boyut Toplamı
Avrupa	0,4	0,3	0,6	0,8	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	6,9
Kuzey Amerika	0,0	0,0	0,6	0,3	0,0	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1	2,1
CIS	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,4	0,1	0,0	0,0	0,6	1,4
Merkez Amerika	0,1	0,4	0,7	0,4	0,0	0,2	0,5	0,2	0,1	0,9	3,4
Brezilya	0,6	0,5	0,7	0,4	0,0	0,0	0,3	0,7	0,1	1,0	4,3
Güney Amerika	0,4	0,5	0,7	0,9	0,0	0,7	0,2	0,2	0,0	1,0	4,5
Çin	0,8	0,8	0,9	0,5	1,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,8	5,5
Hindistan	1,0	1,0	1,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	4,8
Afrika	0,6	0,7	0,6	1,0	0,0	0,2	0,1	0,2	0,0	0,7	4,2
Orta Doğu	0,7	0,5	0,8	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	3,1
Asya	1,0	0,6	0,8	0,7	0,8	0,7	0,3	0,5	0,2	0,6	6,2

Kuzey Amerika'nın fosil ve karışık atık toplam termik enerji harcaması (maks) 1990 yılı endeks boyutu birincilikleri önemli idi.

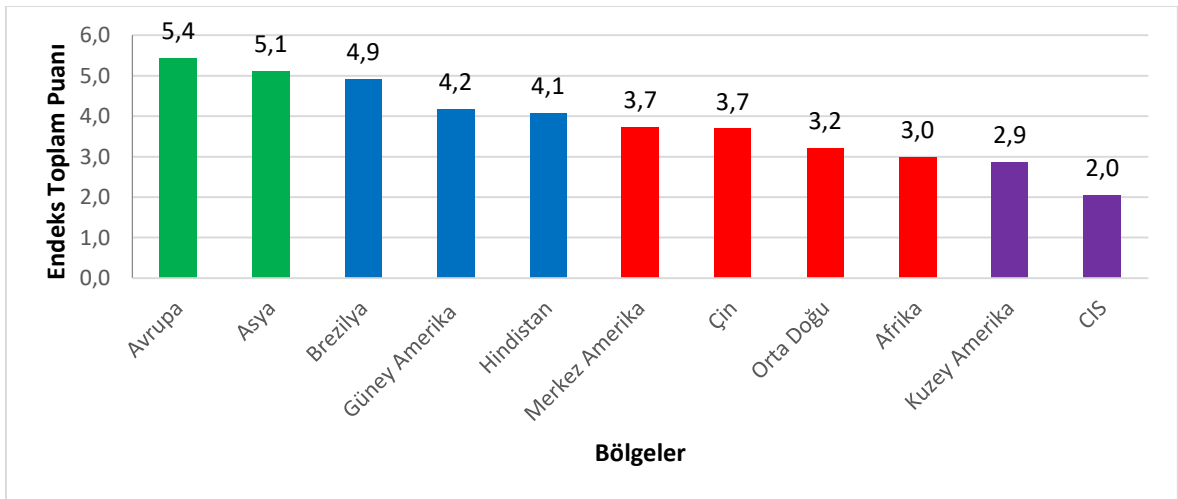
Şekil 6.1 de gösterilen 1990 yılı endeks boyut toplamı sıralaması grafiğinde verilmiş olan puanlar doğrultusunda derecelendirme yapıldı.

Endeks Puanı ≥ 5 - Yeterli (yeşil)

$4,9 \geq$ Endeks Puanı ≥ 4 - Orta (mavi)

$3,9 \geq$ Endeks Puanı ≥ 3 - Düşük (kırmızı)

Endeks Puanı $\leq 2,9$ - Yetersiz (mor)



Şekil 6.1 1990 Yılı Endeks Boyut Toplamı Sıralaması.

5,4 toplam endeks puanı alan Avrupa ile 5.1 endeks puanı alan Asya, endeks kriterleri bazında “Yeterli” olarak değerlendirilerek yeşil renk ile gösterildi.

1990 yılı verileri ile 2013 yılı verilerini karşılaştırılarak Kyoto Protokolü kapsamında alınan kararların ülkeler üzerindeki yaptırım ve etkileri incelemek için 2013 yılı verilerini oluşturmak için Çizelge 5.2 verileri içerisinde, seçmiş olduğumuz, normalizasyon yöntemlerinden Min-Maks yönteminin gereği olarak endekse girmesini düşündüğümüz verilerin düşük mü yoksa yüksek endeks toplamına pozitif katkı sağlayacağını düşünerek verilerin uygun olanları seçildi. Toplamda endeks katkı sağlayacak on veri alındı bunların beş adedinin maksimum olması diğer beş adedinin de minimum olmasının olumlu katkı sağlayacağı düşünüldü. Klinker üretimi dâhil enerji tüketimi, çimento üretimi için harici güç tüketimi, termik enerji tüketimi,

brüt CO₂ yayımı, yakıtı karışımının karbon yoğunluğu verilerinin minimum olması endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Atık ısıdan üretilen toplam güç üretimi, toplam termik enerji harcaması (fosil ve karışık atık yakıt), toplam termik enerji harcaması (biokütle), toplam alternatif fosil yakıt tüketimi, Portland çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler toplam yüzdesi verilerinin maksimum olmasının endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Minimum ve maksimum ayrımı yapıldı ve her bir veri sütununun minimum ve maksimumları bulunarak Çizelge 6.4 oluşturuldu.

Çizelge 6.4 üzerindeki veriler; Min-Maks normalizasyon yönteminin yüksek değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi için Eşitlik 5.1, düşük değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi için Eşitlik 5.2 kullanılarak Çizelge 6.5 oluşturuldu. Çizelge 6.5 her bir Enerji ve çevresel performans verisi için yüksek ve düşük değerlerin tercih edilmesine göre normalize edilmesi sonucu değerleri 0 ile 1 arasında yer alan endeks boyutları ve toplamı oluşturuldu. Oluşan Enerji ve çevresel performans endeks toplamları 2013 yılı için sırlamasının Çizelge 6.6'da yapılmasını sağladı.

Çizelge 6.6 2013 ülkelere göre endeks boyut toplamları.

Ülke/Bölge	Endeks Boyut Toplamı
Avrupa	6,9
Asya	6,2
Çin	5,5
Hindistan	4,8
Güney Amerika	4,5
Brezilya	4,3
Afrika	4,2
Merkez Amerika	3,4
Orta Doğu	3,1
Kuzey Amerika	2,1
CIS	1,4

Çizelge 6.6 2013 yılı Enerji ve çevresel performans endeks toplamlarının sıralanması sonucunda oluştu. 2013 yılı endeksi üzerinde en çok puanı toplayan Avrupa; alternatif fosil yakıt tüketimi (maks), yakıt karışımının karbon yoğunluğu (min), toplam termik enerji harcaması (biokütle) (maks) ve (fosil ve karışık atık yakıt)

boyutlarında en yüksek puanlarla birinciliği aldı. Avrupa'nın Termik enerji tüketimi (min), mineral birleşenlerin kullanılması (maks) ve CO₂ yayımı (min) konusunda almış olduğu yüksek puanlar yine dikkat çekici idi.

Asya ikinciliği alırken; klinker üretimine kadar enerji tüketimi (min) boyutunda 2013 yılı endeksinin en iyi sonucunu elde etti, atık ısıdan üretilen toplam güç (maks) boyutunun yüksek olması yine önemliydi.

Brezilya 2013 yılı endeks sıralamasındaki yeri altıncılık oldu. 1990 yılı en önemli endeks boyutu toplam termik enerji harcaması (biokütle) (maks) birinciliğini Avrupa aldı. Toplamda kullanılan enerjiye biokütle kullanım oranı %2 artmasına rağmen Avrupa da ki oran %0 dan %12 ye çıkması Avrupa da Kyoto Protokolü kurallarına uyumun yüksekliğinin kanıtı oldu.

2013 yılı endeksi oluşturulurken; Çin çok yüksek bir iyileşme ile üçüncülüğe çıktı.

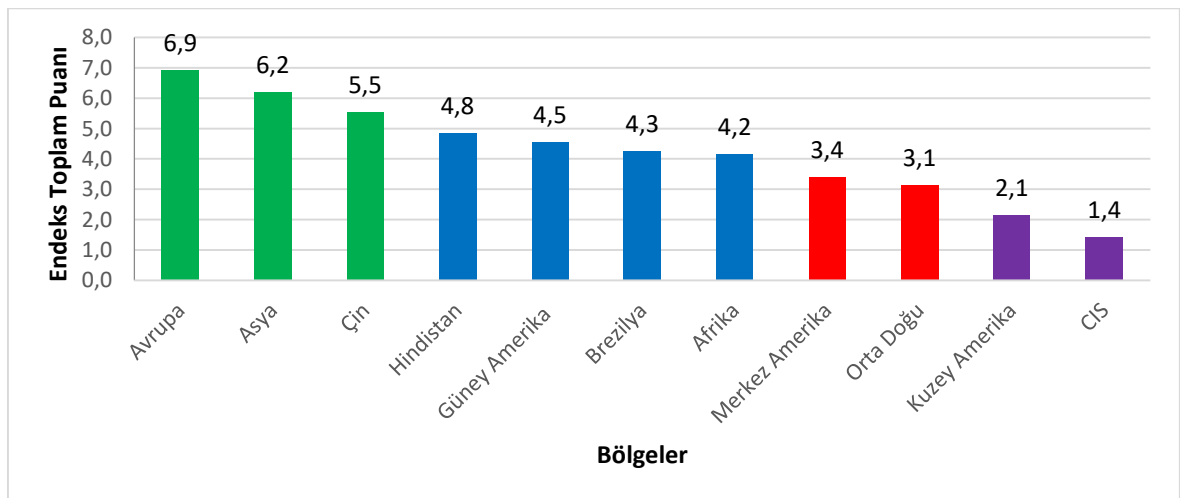
Şekil 6.2 de gösterilen 2013 yılı endeks boyut toplamı sıralaması grafiğinde verilmiş olan puanlar doğrultusunda derecelendirme yapıldı.

Endeks Puanı ≥ 5 - Yeterli (yeşil)

4,9 \geq Endeks Puanı ≥ 4 - Orta (mavi)

3,9 \geq Endeks Puanı ≥ 3 - Düşük (kırmızı)

Endeks Puanı $\leq 2,9$ - Yetersiz (mor)



Şekil 6.2 2013 Yılı Endeks Boyut Toplamı Sıralaması

6,9 toplam endeks puanı alan Avrupa, 6,2 endeks puanı alan Asya ve 5,5 endeks puanlı Çin, endeks kriterleri bazında “Yeterli” olarak değerlendirilerek yeşil renk ile gösterildi.

6.2 Enerji ve Çevresel Performans Verileri Endeks Boyut Toplamlarının Karşılaştırılması

Kyoto Protokolü, sera etkisi yaratan gazların salımlarını azaltmak üzere sanayileşmiş ülkelere çeşitli hedefler belirleyen uluslararası bir anlaşmadır. Sanayileşmiş ülkeler, 1990'daki salım oranlarını 2008-2012 yılları arasında yüzde 5 oranında azaltmayı taahhüt etmiş durumdadır. 1990 ile 2013 verilerini karşılaştırmak için ülkelerin/bölgelerin toplam endeks puanlarını Çizelge 6.7 üzerine toplayıp, değişim yüzdelerine bakıldı. Çizelge 6.7'ye göre endeks kriterleri üzerinden 1990 yılına göre ilerleme kaydederek 2013 yılında birinci ve ikinci sıradaki yerlerini koruyan Avrupa toplam termik enerji harcamalarında ve yakıt karbon yoğunluğunda iyileşmelerin önderliğinde %27 iyileşme görüldü, endekste iyileştirme sağlayan kriterler;

- Brüt CO₂ yayımı (kgCO₂/t klinker) (DÜŞÜK) – **İkinci**
- Yakıt karışımının karbon yoğunluğu (CO₂/MJ) (DÜŞÜK) - **Birinci**
- Toplam termik enerji harcaması (Fosil ve karışık atık yakıt) (Toplam enerji %) (YÜKSEK) - **Birinci**
- Toplam termik enerji harcaması (Biokütle) (Toplam enerji %) (YÜKSEK) - **Birinci**
- Toplam alternatif fosil yakıt (t) (YÜKSEK) - **Birinci**
- Toplam mineral birleşen katkısı (Çimento üretiminin %) (YÜKSEK) olarak belirlendi. – **Üçüncü**

Çizelge 6.5 üzerinden yapılan incelemelerde Avrupa'nın verilerinin incelendiğinde çimento sektörünün en büyük harcamalarından biri olan termik enerji harcaması konusunda yapılan çalışmaların fayda gösterdiği, özellikle biokütle, alternatif fosil yakıt ve atık yakma işlemlerinin öne çıktığı anlaşılmıştır.

Asya klinker üretimindeki enerji harcaması, brüt CO₂ yayımı iyileştirmeleri önderliğinde Çizelge 6.4'den %21lik iyileşme kaydetmiştir.

Şekil 6.4'e bakıldığı zaman endeks iyileşmesi konusunda Çin için ayrı bir değerlendirme yapmak faydalı olacaktır; 1990 yılına göre Çizelge 6.6'dan %49 iyileştirme ile kırmızı endeks kategorisinden birinci kategori olan yeşile gelişim sağlamıştır. Çizelge 6.5'ten gelişimi sağlayan 2013 yılı endeks kriterleri;

- Klinker üretimi dahil enerji tüketimi (kWh/t klinker) (DÜŞÜK) - **ikinci**
- Çimento imalatı için harici güç tüketimi (kWh/t klinker) (DÜŞÜK) - **ikinci**
- Termik enerji tüketimi (MJ/t klinker) (DÜŞÜK) – **ikinci**
- Brüt CO₂ yayımı (kgCO₂/t klinker) (DÜŞÜK) – **Beşinci (1990 yılında sıfır)**
- Atık ısıdan üretilen toplam güç üretimi (MWh/yıl) (YÜKSEK) - **Birinci**
- Yakıt karışımının karbon yoğunluğu (CO₂/MJ) (DÜŞÜK) – **ikinci**
- Toplam mineral birleşen katkısı (Çimento üretiminin %) (YÜKSEK) olarak belirlendi. – **Üçüncü**

Yine Şekil 6.5'e bakıldığı zaman endeks iyileşmesi konusunda Afrika yapılaşma ve sanayi çalışmalarındaki çabalarının çimento üretimi miktarına yansıdığı görülmüştür (77.534.374 t/yıl); 1990 yılına göre Çizelge 6.6'dan %41 iyileştirme ile kırmızı endeks kategorisi sonuculuğundan ikinci kategori olan maviye gelişim sağlamıştır.

Kyoto protokolüne uyma çabaları ülkeler/bölgeler üzerinde etkili olmuş. Özellikle Yakıt karbon yoğunluğu, CO₂ yayımı, alternatif fosil yakıt ve biokütle kullanımı konusunda mesafeler kat edilmiştir.

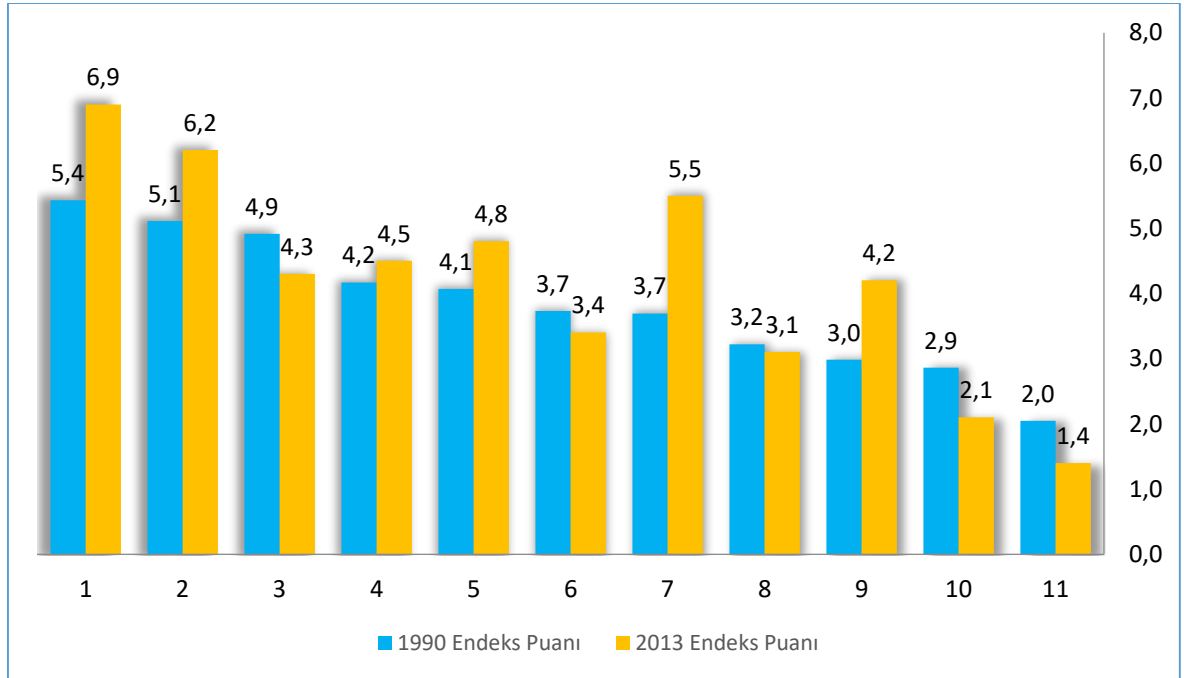
Çizelge 6.7 1990 ve 2013 Yılları Arası Endeks Boyut Toplamı Karşılaştırması.

Bölgeler	1990 Endeks Puanı	2013 Endeks Puanı	% Değişim
Avrupa	5,4	6,9	27
Asya	5,1	6,2	21
Brezilya	4,9	4,3	-12
Güney Amerika	4,2	4,5	8
Hindistan	4,1	4,8	18
Merkez Amerika	3,7	3,4	-9
Çin	3,7	5,5	49
Orta Doğu	3,2	3,1	-4
Afrika	3,0	4,2	41
Kuzey Amerika	2,9	2,1	-27
CIS	2,0	1,4	-32

Çizelge 6.6'da 1990 ve 2013 Yılları Arası Endeks Boyut Toplamı Karşılaştırmasını görsel olarak yapabilmek için Şekil 6.3 çizildi, aynı zamanda iki dönem arasında yüzdelik değişimde gösterilmiştir.

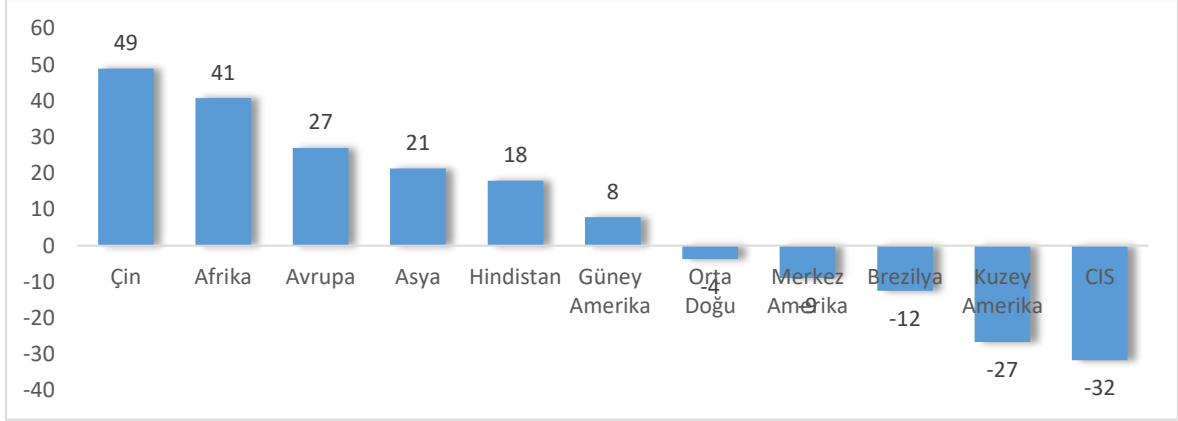
CIS ülkelerindeki çimento üretiminin çok eski teknolojilerle yapılması (ıslak tip, şaftlı fırın vb.) yapılması endeks üzerinde nerdeyse tüm kategorilerin en kötü sonuçlarını almasına neden olmuştur.

Kuzey Amerika da çimento üretimi teknolojik olarak 1990 yılından bu yana çok eski tip fırınlarda yapılmaya başlanmış ama geçen zaman içerisinde gittikçe modern yöntemler üzerinde yoğunlaşmıştır.



Şekil 6.3 1990 ve 2013 Yılları Arası Endeks Boyut Toplamı Karşılaştırması.

Çizelge 6.7 ve Şekil 6.4 üzerinden yapılan inceleme sonucunda çimentoyu çok üreten ve bu çalışmalardan para kazanan ülkelerin araştırma ve geliştirme faaliyetlerine önem vererek kanuni sorumluluklarını yerine getirdikleri, Kyoto protokolü kapsamında verdikleri taahhütleri yerine getirdikleri anlaşılmıştır.



Şekil 6.4 1990 ve 2013 Yılları Arası Endeks Boyut Toplamı Değişimi Sıralaması

Çin ve Afrika'nın daha çok iyileştirmeye ihtiyaç duyan teknolojilerinin değişimi Şekil 6.4. te net olarak görülmüştür.

7 FIRIN TİPİNE GÖRE ENDEKS OLUŞTURULMASI

Verilerin normalize edilmesi için 3. Bölümdeki Normalizasyon yöntemlerinden Min-Maks yöntemi kullanıldı. 1990, 2013 yılları için Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.4' ü oluşturmak için bir önceki bölümde (GRI) bünyesindeki "Sustainability Disclosure Database" veri tabanından yararlanılmıştır.

Min-Maks yönteminin şartlarından olan yüksek değer tercih edildiği durumlar (maks) ve düşük değer tercih edildiği durumlara (min) dikkat edilerek bir grup veri endeks oluşturulmak üzere seçilmiştir.

7.1 1990 ve 2013 Yılı Fırın Tipi Endeks Boyut Toplamlarının Oluşturulması

1990 yılı verilerini oluşturmak için Çizelge 7.1 verileri içerisinde, seçmiş olduğumuzu normalizasyon yöntemlerinden Min-Maks yönteminin gereği olarak endekse girmesini düşündüğümüz verilerin düşük değerlerinin mi yoksa yüksek değerlerinin mi endeks toplamına pozitif katkı sağlayacağını düşünerek verilerin uygun olanları seçildi.

Çizelge 7.1 1990 yılı fırın tipine göre normalize edilecek veriler [6].

Min/Maks		Maks			Min	Min
1990 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Toplam Klinker üretim miktarı	Toplam Klinker üretim miktarı	Toplam Brüt CO ₂ salımı	Toplam Brüt CO ₂ salımı	Brüt CO ₂ salımı	Termik enerji harcaması
Birim	t klinker	%	t klinker	%	kgCO ₂ / t klinker	MJ / t klinker
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu	127 000 000	0,37	110 000 000	0,35	868	3.620
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz	98 700 000	0,29	86 300 000	0,28	876	3.861
Uzun Kuru tip, ön ısıtmalı	21 200 000	0,06	20 400 000	0,07	962	4.490
Karışık tip	17 400 000	0,05	15 800 000	0,05		
Yarı kuru, yarı ıslak tip	27 600 000	0,08	25 100 000	0,08	914	4.002
Islak şaftlı tip	53 800 000	0,16	56 000 000	0,18	1050	6.341
Toplam	345 000 000	1	313 000 000	1,01	4670	22.315

Toplamda endeks katkı sağlayacak 3 veri alındı bunların bir adedinin maksimum olması diğer iki adedinin de minimum olmasının olumlu katkı sağlayacağı düşünüldü. Brüt CO₂ salımı ve termik enerji harcamasının düşük (min) olması endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Toplam klinker üretim miktarı yüksek (maks) olmasının endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Minimum ve maksimum ayrımı yapıldı ve her bir veri sütununun minimum ve maksimumları bulunarak Çizelge 7.2 oluşturuldu.

Çizelge 7.2 üzerindeki veriler; Min-Maks normalizasyon yönteminin yüksek değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi için Eşitlik 5.1, düşük değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi için Eşitlik 5.2 kullanılarak Çizelge 7.3 oluşturuldu. Çizelge 7.3 fırın tipleri için yüksek ve düşük değerlerin tercih edilmesine göre normalize edilmesi sonucu değerleri 0 ile 1 arasında yer alan endeks boyutları ve toplamı oluşturuldu. Oluşan fırın tipi endeks toplamları 1990 yılı için sırlama yapılmasını sağladı.

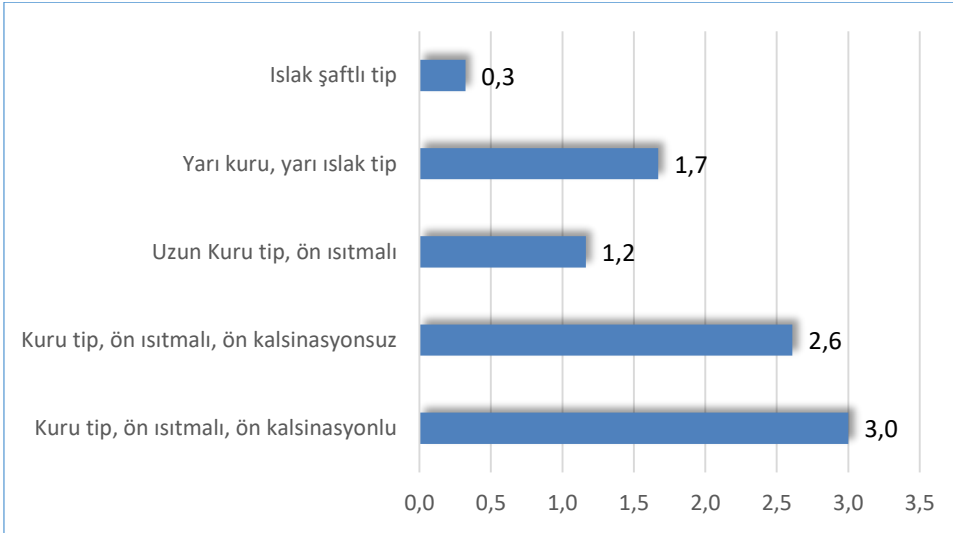
Çizelge 7.2 1990 yılı fırın tipine göre değerlerin Min-Maks bulunması.

1990 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Maks	Min	Min
	Toplam Klinker üretim miktarı	Brüt CO ₂ salımı	Termik enerji harcaması
	%	kgCO ₂ / t klinker	MJ / t klinker
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu	0,37	868	3.620
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz	0,29	876	3.861
Uzun Kuru tip, ön ısıtmalı	0,06	962	4.490
Yarı kuru, yarı ıslak tip	0,08	914	4.002
Islak şaftlı tip	0,16	1050	6.341
Min Value	0,06	868	3620
Max Value	0,37	1050	6341

Çizelge 7.3 1990 yılı fırın tipine göre endeks boyut toplamları.

MIN MAKS				Endeks Boyut Toplamı
1990 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Toplam Klinker üretim miktarı	Brüt CO ₂ salımı	Termik enerji harcaması	
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu	1,00	1,00	1,00	3,0
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz	0,74	0,96	0,91	2,6
Uzun Kuru tip, ön ısıtmalı	0,00	0,48	0,68	1,2
Yarı kuru, yarı ıslak tip	0,06	0,75	0,86	1,7
Islak şaftlı tip	0,32	0,00	0,00	0,3

Şekil 7.1 üzerinden grafiksel karşılaştırma ile görüldüğü gibi; kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu fırınlar, toplam klinker üretimi (maks), brüt CO₂ salımı (min) ve termik enerji harcaması (min) boyutları üzerinden bakıldığı zaman üç tam puan almıştır.



Şekil 7.1 1990 endeks boyut toplamları üzerinden fırın tipi karşılaştırılması

2013 yılı verilerini oluşturmak için Çizelge 7.4 verileri içerisinde, seçmiş olduğumuzu normalizasyon yöntemlerinden Min-Maks yönteminin gereği olarak endekse girmesini düşündüğümüz verilerin düşük değerlerinin mi yoksa yüksek değerlerinin mi endeks toplamına pozitif katkı sağlayacağını düşünerek verilerin

uygun olanları seçildi. Toplamda endeks katkı sağlayacak 3 veri alındı bunların bir adedinin maksimum olması diğer iki adedinin de minimum olmasının olumlu katkı sağlayacağı düşünüldü. Brüt CO₂ salımı ve termik enerji harcamasının düşük (min) olması endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Toplam klinker üretim miktarı yüksek (maks) olmasının endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Minimum ve maksimum ayrımı yapıldı ve her bir veri sütununun minimum ve maksimumları bulunarak Çizelge 7.5 oluşturuldu.

Çizelge 7.4. 2013 yılı fırın tipine göre normalize edilecek veriler [6].

Min/Maks		Maks			Min	Min
2013 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Toplam Klinker üretim miktarı	Toplam Klinker üretim miktarı	Toplam Brüt CO ₂ salımı	Toplam Brüt CO ₂ salımı	Brüt CO ₂ salımı	Termik enerji harcaması
Birim	t klinker	%	t klinker	%	(kg CO ₂ / t klinker)	MJ / t klinker
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu	367 000 000	0,74	304 000 000	0,73	832	3.365
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz	78 200 000	0,16	66 000 000	0,16	843	3.667
Uzun Kuru tip, ön ısıtmalı	12 000 000	0,02	10 200 000	0,03	841	3.684
Karışık tip	16 000 000	0,03	13 500 000	0,03	-	
Yarı kuru, yarı ıslak tip	9 460 000	0,02	8 020 000	0,02	855	3.943
Islak şaftlı tip	15 300 000	0,03	15 400 000	0,04	1.000	5.723
Total	498 000 000	1	417 000 000	1,01	4.371	20.382

Çizelge 7.5 üzerindeki veriler; Min-Maks normalizasyon yönteminin yüksek değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi için Eşitlik 5.1, düşük değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi için Eşitlik 5.2 kullanılarak Çizelge 7.6 oluşturuldu. Çizelge 7.6 fırın tipleri için yüksek ve düşük değerlerin tercih edilmesine göre normalize edilmesi sonucu değerleri 0 ile 1 arasında yer alan endeks boyutları ve toplamı oluşturuldu. Oluşan fırın tipi endeks toplamları 1990 yılı için sırlama yapılmasını sağladı.

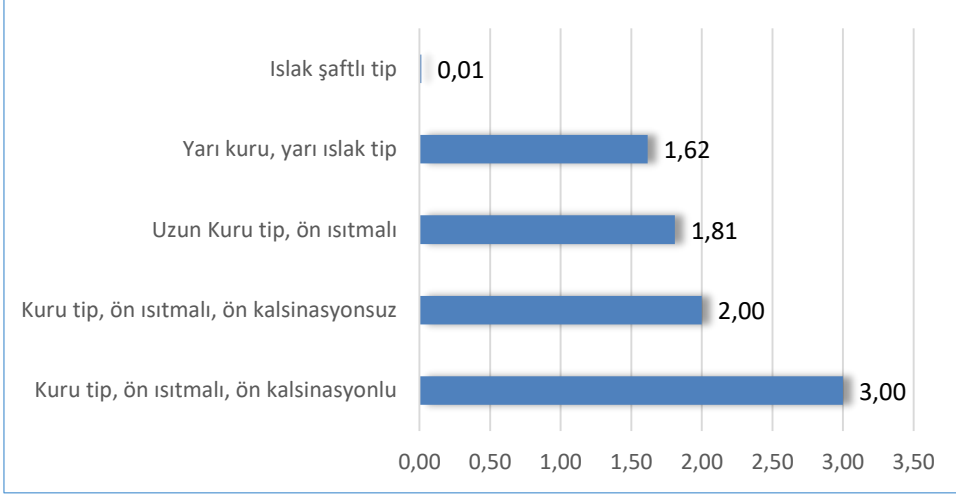
Çizelge 7.5 2013 yılı fırın tipine göre değerlerin Min-Maks bulunması.

2013 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Maks	Min	Min
	Toplam Klinker üretim miktarı	Brüt CO ₂ salımı	Termik enerji harcaması
	%	kgCO ₂ / t klinker	MJ / t klinker
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu	0,74	831,85	3364,53
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz	0,16	843,09	3666,92
Uzun Kuru tip, ön ısıtmalı	0,02	841,13	3684,37
Yarı kuru, yarı ıslak tip	0,02	855,21	3943,38
Islak şaftlı tip	0,03	1000,22	5722,83
Min Value	0,02	831,85	3364,53
Max Value	0,74	1000,22	5722,83

Çizelge 7.6 2013 yılı fırın tipine göre endeks boyut toplamları.

MIN MAKS				Endeks Boyut Toplamı
2013 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Toplam Klinker üretim miktarı	Brüt CO ₂ salımı	Termik enerji harcaması	
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu	1,00	1,00	1,00	3,00
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz	0,19	0,93	0,87	2,00
Uzun Kuru tip, ön ısıtmalı	0,00	0,94	0,86	1,81
Yarı kuru, yarı ıslak tip	0,00	0,86	0,75	1,62
Islak şaftlı tip	0,01	0,00	0,00	0,01

Şekil 7.2 üzerinden grafiksel karşılaştırma ile görüldüğü gibi; kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu fırınlar, toplam klinker üretimi (maks), brüt CO₂ salımı (min) ve termik enerji harcaması (min) boyutları üzerinden bakıldığı zaman üç tam puan almıştır.

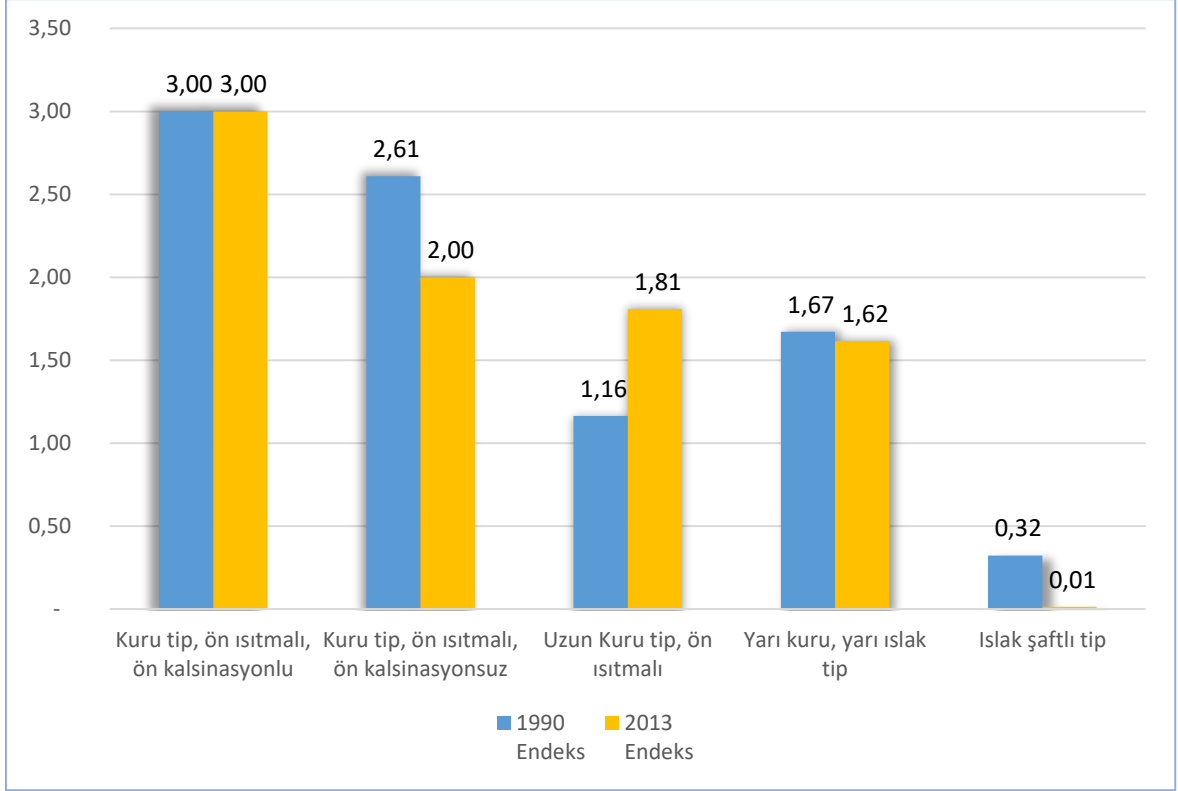


Şekil 7.2 2013 endeks boyut toplamları üzerinden fırın tipi karşılaştırması.

1990 yılı verisini içeren Çizelge 7.3 ve 2013 yılı verisini içeren Çizelge 7.6 dan alınan endeks toplamları ile Çizelge 7.7 oluşturuldu. Yıllar arasında % değişim belirlendi. Bu Çizelge aracılığı ile Şekil 7.3 oluşturuldu.

Çizelge 7.7 Fırın tiplerine göre 1990 ve 2013 yılı endeks karşılaştırma tablosu

Fırın Tipleri	1990 Endeks Toplamları	2013 Endeks Toplamları	% Değişim
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu	3,00	3,00	0,00
Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz	2,61	2,00	-23,38
Uzun Kuru tip, ön ısıtmalı	1,16	1,81	55,46
Yarı kuru, yarı ıslak tip	1,67	1,62	-3,32
Islak şaftlı tip	0,32	0,01	-95,69



Şekil 7.3 1990 - 2013 Fırın Tipleri Karşılaştırması

7.2 Fırın Tipi Endeks Boyut Toplamlarının Karşılaştırılması

1990 ve 2013 yıllarına ait endeks sonuçlarının karşılaştırıldığı Şekil 7.3 'e bakıldığı zaman;

Kuru tip, ön kalsinasyonlu, ön ısıtmalı tip fırınların endeks puanları en yüksek puan olan üç değerini almış ve değişmemiştir.

Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz tip fırınların endeks puanları %23 oranında düşmüştür. Fırınların soğutmadaki atık ısıyı değerlendirmesini sağlayan kalsinatörün önemi geçen zaman içerisinde daha da belirginleşmiştir. Kalsinasyonun tamamlanması için kalsinatörün kullanılması daha kolay kullanımlı kısa fırınların varlığını desteklemektedir.

Islak şaftlı tip fırınlar ise sıfır puan almış ve teknolojik olarak tercih edilmedikleri şeklinde yorumlanmıştır. Geçen zamanda %95 oranında fırın endeks puanı kaybetmişlerdir.

Kuru tip, ön ısıtmalı, uzun fırınların endeks puanında %55,46 bir artış olduğu görülmüştür. Kalsinatör olmasa dahi fırına beslenen soğutma havasının desteği ve

uzun, daha yavaş dönen fırınların kalsinasyonu sağlaması sayesinde performanslı hale gelmişlerdir.

Toplam Klinker üretim miktarı, brüt CO₂ Yayınımı, termik enerji harcamasının fırın tipleri üzerinden incelenmesi için oluşturulan endekste kuru tip, ön kalsinasyonlu, ön ısıtmalı tip olan fırınlar tam puan almıştır. Bu tam puanın 1990 ve 2013 verileri için de değişmemesi endeks üzerinde yapılacak olan karşılaştırmalı değerlendirmelerde, karşılaştırmaya girecek olan tesislerin eksikliklerini belirlemede ve öneride bulunmada kolaylık sağlayacaktır.

Çimento fabrikası yatırımlarından önce yapılan değerlendirmelerde mutlaka, kuru tip, ön kalsinasyonlu, ön kurutucu tipi yatırım araştırmaları yapılmalıdır.

Endeks üzerinden yapılan değerlendirmede Kuru tip, ön kalsinasyonlu ve ön ısıtmalı tip fırınların dünya genelinde tercih edildiği ve 2013 verilerine göre klinker üretiminin %74 nün bu tip fırınlar tarafından yapıldığı, kuru tip ön ısıtmalı fırınların klinker üretiminin %16 sına sahip olduğu görülmüştür.

CO₂ yayılımının endeks üzerindeki en başarılı fırın tipi yine kuru tip, ön kalsinasyonlu ve ön ısıtmalı tip fırınların olduğu görülmüştür (832 kgCO₂ / t klinker). Islak tip şaftlı fırınlara bakıldığı zam yüksek CO₂ yayılımı verilerine sahip oldukları görülmüştür (1000 kgCO₂ / t klinker).

Termik enerji harcaması ıslak tip şaftlı tip fırınlarda, kuru tip, ön kalsinasyonlu ve ön ısıtmalı tip fırınların yaklaşık iki katına yakın olarak gözlenmiştir.

8 KLİNKER FIRINI İÇİN “AKILCI EKSERJİ YÖNETİM MODELİ”

Akılcı Ekserji Yönetim Modeli; enerji taleplerini karşılayacak olan enerji kaynaklarının içindeki yararlı iş elde etme potansiyeli göz önüne alarak, enerji sistemi genelindeki CO₂ salımlarının azaltılması için öneriler sunmaktadır. Ekserji, temel olarak alınan bir referans çevre sıcaklığına ve Carnot çevrimine göre kaynakla uygulama(lar) arasındaki sıcaklık farklılıklarına göre, elektrik üretimi ya da ısıtma soğutma gibi yararlı işlerde değerlendirme potansiyelini gösteren bir tanımdır. Isıtma, soğutma ya da elektrik üretimi gibi farklı enerji ihtiyaçlarını karşılayacak enerji kaynaklarının ekserjisi ile talep edilen ekserjileri arasındaki dengeye bakarak daha uygun kaynaklara yönlendirilmesi israfın azaltılmasına böylece CO₂ salımlarının azaltılması sağlanmaktadır. Enerji kaynaklarının ekserjisi (ϵ_{arz}) ve enerji taleplerinin karşılanması için gerekli olan ekserji (ϵ_{talep}) kapsamında ekserji değerlerinin dengesiz karşılaştırılması için ψ_{R_i} parametresi önem taşımaktadır. Bu parametre Eşitlik 8.1’de gösterildiği gibi ekserji bir (i) sürecindeki talep ve arz arasındaki orana dayanmaktadır [27][28][29].

$$\psi_{R_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_{talep(i)}}{\sum_{i=1}^n \epsilon_{arz(i)}} \quad (8.1)$$

ψ_{R_i} parametresi değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup, ekserji taleplerinin yerine getirilmesi için kullanılan ekserji arzı bazında sırasıyla en düşük ve en uyumlu enerji kullanımlarını ifade etmektedir [27]. Eşitlik 8.1’e bakıldığı zaman bir adet sistem, bina ya da çimento fırını için $n=1$ değeri için çıkan değer üzerinden, birden fazla sistem içinde n değerinin farklı değerleri için düşünülür. Ekserji değerleri, enerji miktarının Carnot faktörü ile çarpımına eşittir. Carnot faktörü $T_{referans}$ sıcaklığına ve enerji kaynağının yanma sıcaklığı T_f ’a bağlıdır.

$$\text{Carnot faktörü} = (1 - T_{referans} / T_f) \quad (8.2)$$

Isıtma ve soğutma işlerinde kullanılacak olan yüksek enerji içeren doğal gaz kaynağı bu mantıkla bakıldığı zaman verimsiz olarak kullanılmaktadır. Doğalgazın ekserjisi (yaklaşık 0,86 W/W) ve toprak referans sıcaklığına göre düşünüldüğünde ψ_{R_i} parametresi değeri çok düşük çıkacaktır. Eşitlik 8.2 üzerinden Carnot faktörü için işlem yapıldığında T_f sıcaklığı doğalgazın yanma sıcaklığı için 2000K kabul edildiğinde, referans sıcaklığı toprak sıcaklığı olan 283K olarak alındığında (1-

(283K/2000K)) değer 0.86 olarak çıkar [30]. Aynı işlem oda sıcaklığı olan 298K üzerinden yapıldığı zaman (1-(283K/298K)) değer 0,05 olarak çıkar. ψ_{R_i} değerinin hesaplaması (0,05/0,86) sonucu çıkan değer 0,06 gibi çok düşük bir değerdir ve bu da doğal gazdaki yüksek potansiyel verimsiz olarak kullanılıyor demektir.

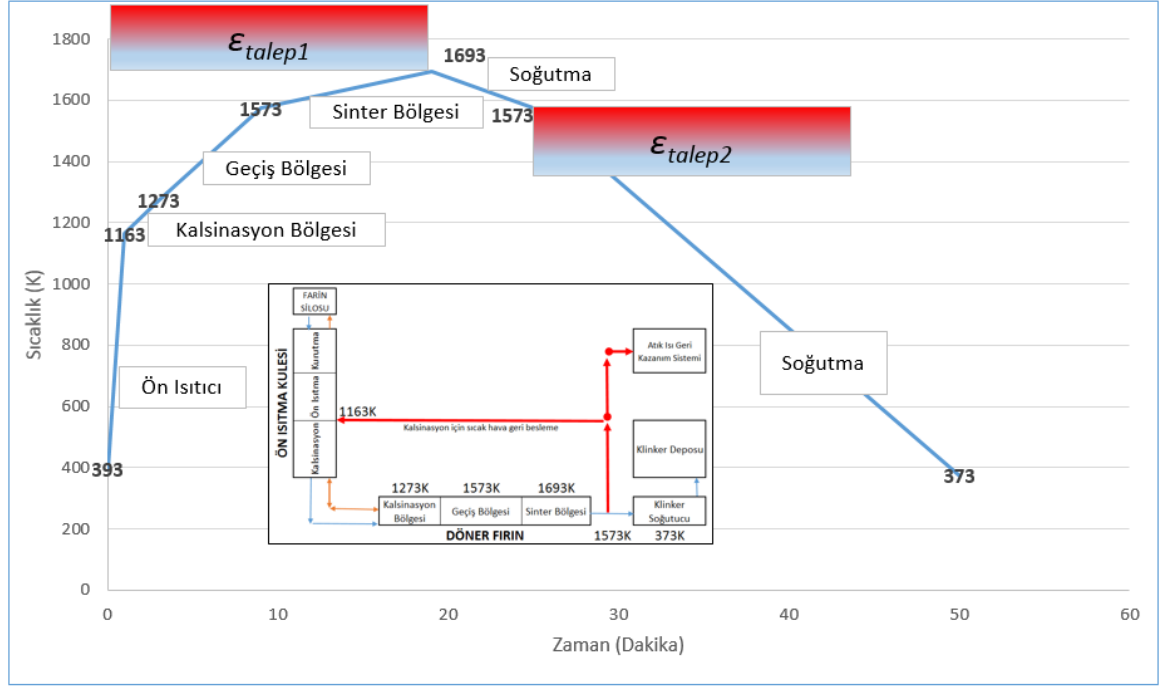
Akılcı ekserji Yönetim Model'inin en temel formülü Eşitlik 8.3'te verilmektedir. Bu formüle göre birden çok verimlilik ölçütü analitik olarak değerlendirilmektedir.

$$\sum CO_{2i} = \left(\left(\frac{c_i}{\eta_i} \right) + \left(\frac{c_j}{\eta_i} (1 - \psi_{R_i}) \right) \right) \cdot \sum_{i=1}^x P_i \quad (8.3)$$

Eşitlik 8.3 kullanılan belirli bir miktar P_i enerjisini sistem genelinde CO₂ salımlarını sistemler arası sınır koşulu ile ele almaktadır, bakıldığından hem doğrudan hem de (1- ψ_{R_i}) değerine bağlı olan dolaylı CO₂ salımlarını toplamaktadır. Bu değer, tüketilen enerji kaynağının ya da enerji kaynaklarının ortalama CO₂ içeriği olan c değerlerinin, kullanılan enerji teknolojisinin enerji verimliliği η değerlerinin ve analiz edilen boyut bazındaki enerji miktarının toplamı olan $\sum P_i$ değerinin bir fonksiyonudur. Eşitlik 8.3'de yer alan ψ_{R_i} değeri her ne kadar düşük ise, ilgili bina ya da bina sistemleri için toplam CO₂ salımları doğrudan CO₂ salımlarına göre daha fazladır. Böylece, enerji sistemi genelinde ek kaynak sarfiyatı ve CO₂ salımlarının azaltılması için ψ_{R_i} parametresinin mümkün olduğunca daha yüksek değerlere kavuşturulması bir gerekliliktir.

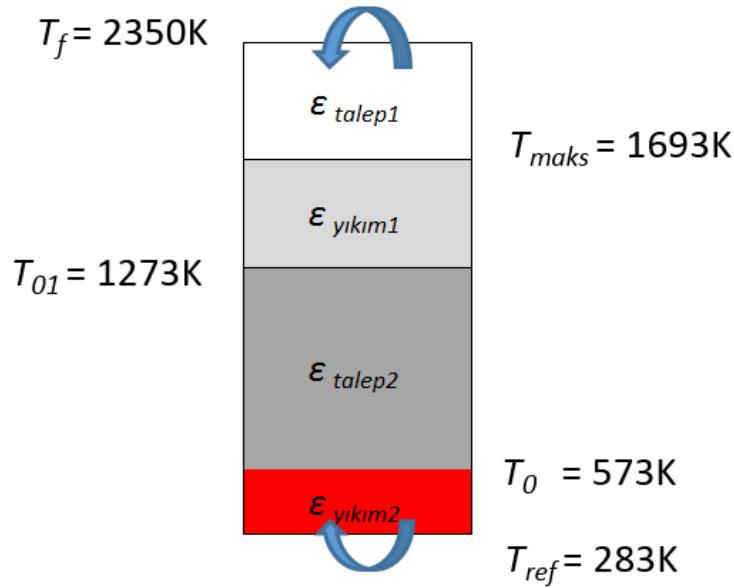
İlk olarak Şekil 8.1 üzerinde oluşturulan kuru tip, ön ısıtmalı ve kalsinatörlü klinker fırını modeli ile çalışma yapılmıştır. Klinker fırınının sinter bölgesinde çıktığı en yüksek sıcaklık değeri olan T_{maks} değeri olan 1693K, soğutmada aldığı T_0 değeri olan 333K ve ateşlemede kullanılan fueloil için ateşleme T_f sıcaklığı olan 2350K ile yapılan hesaplamalarda kullanılmıştır. Fırının ısıtma işlemi için kullanılan fueloil yakılarak brülör vasıtası ile fırına verildiği zaman ilk yanma sıcaklığı olan $T_f = 2350K$ 'e kadar çıkmaktadır, fırının en yüksek sıcaklığı olarak alınan $T_{maks} = 1693K$ sıcaklığı ile devam eden klinker pişirme işlemleri sırasında oluşan Carnot döngüsü ile ortaya $\epsilon_{yıkım1}$ yararlı kullanılmayan ekserji bölgesini ortaya çıkarmaktadır. İkinci yararlı kullanılmayan ekserji bölgesi klinkerin soğutmaya döküldüğü bölgede

klinkerin $T_0 = 573\text{K}$ sıcaklığı ile referans alınan $T_{ref} = 283\text{K}$ toprak sıcaklığı arasında oluşan yararlı kullanılmayan $\epsilon_{yıkım2}$ ekserjisidir.



Şekil 8.1 Klinker fırını ekserji modeli sıcaklık ve bölge gösterimi

Şekil 8.1 de klinker fırını ekserji modellerini yaratmak için gerekli olan sıcaklık bilgileri verilmiştir.



Şekil 8.2 Kuru tip, ön ısıtmalı, kalsinatörlü klinker fırını ekserji modeli

Eşitlik 8.1 de hem doğrudan hem de $(1-\psi_{R_i})$ değerine bağlı olan dolaylı CO₂ salımlarını toplamaktadır, Eşitlik 8.1’de yer alan ψ_{R_i} değeri her ne kadar düşükse kuru tip, ön ısıtmalı, kalsinatörlü fırın için toplam CO₂ salımları doğrudan CO₂ salımlarına görece daha fazladır. Böylece, enerji sistemi genelinde ek kaynak sarfiyatı ve CO₂ salımlarının azaltılması için ψ_{R_i} parametresinin mümkün olduğunca daha yüksek değerlere kavuşturulması mecburiyettir. ψ_{R_i} hesaplanması için Eşitlik 8.4 kullanılmıştır.

$$\psi_R = \frac{\varepsilon_{talep1} + \varepsilon_{talep2}}{\varepsilon_{arz}} \quad (8.4)$$

Eşitlik 8.4, Carnot çevirimleri üzerinden düşünüldüğünde Eşitlik 9.5 teki haline dönüşmüştür.

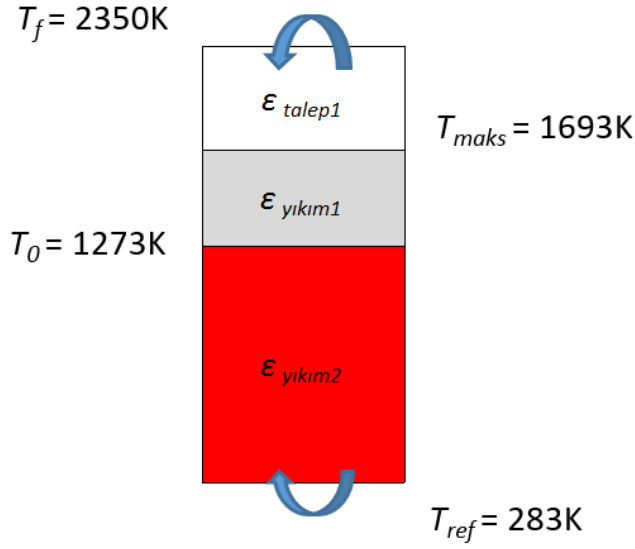
$$\psi_R = \frac{\left(1 - \frac{T_{maks}}{T_f}\right) + \left(1 - \frac{T_{01}}{T_0}\right)}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_f}\right)} \quad (8.5)$$

ψ_R değeri Eşitlik 8.5 üzerinden hesaplanması için Çizelge 1.2’de ki değerler kullanılmış ve Çizelge 8.1 deki değerler elde edilmiştir.

Klinker fırınımızda ön kalsinatör olmasaydı, fırın içine hava akışı geri yönlendirilmeseydi, çıkan sıcak hava sadece soğutmada kalsaydı, Akılcı Ekserji Yönetim modelinden çok uzak olurdu (Şekil 8.2) Yüksek Ekserji harcanmış olurdu. Eşitlik 8.5’in pay kısmının ikinci yarısı olan ε_{talep2} katkı sağlamayacaktır.

Çizelge 8.1. Çizelge 1.2 den alınan sıcaklık değerlerine göre ψ_R değişimi

T_{maks}	T_{maks}	T_f	T_{ref}	T_0	T_0	ψ_R	$(1-\psi_{R_i})$
C	K	K	K	C	K		
1420,00	1693	2350	283	300	573	0,89	0,11
1400,00	1673	2350	283	100	373	0,60	0,40
1200,00	1473	2350	283	100	373	0,70	0,30
1200,00	1473	2350	283	60	333	0,60	0,40

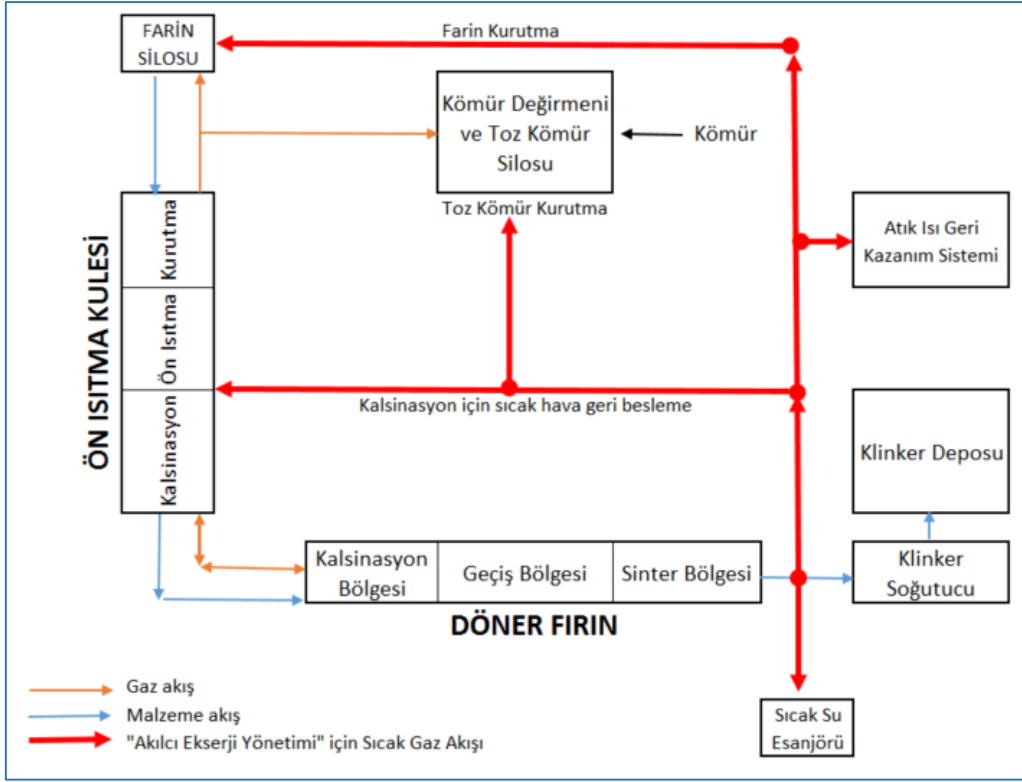


Şekil 8.3 Kuru tip, ön ısıtmalı, kalsinatörsüz soğutmadaki sıcak havayı kullanmayan klinker fırını ekserji modeli

Arz ve talep ekserjilerini karşılaştırma parametresi ψ_R değerini T_0 ve T_{max} sıcaklıklarının değişik değerleri için elde edilen $(1-\psi_{R_i})$ Bu bize en düşük CO₂ salınımının gerçekleştiği anda ekserji olarak en iyi değerleri elde etmemizi sağlamıştır.

Çizelge 8.1 deki değerler; fırını terk eden klinkerin sıcaklığının soğutmada kullanılan hava tarafından kazanılması ve bu sıcak havanın tekrar sisteme kazandırılması gerekir. Soğutmadan çıkan 100 birim havanın yaklaşık 50 birimi 1273K sıcaklık ile ön kalsinatöre beslenir. 3 birimi tekrar fırına beslenir, yaklaşık 2 birimi soğutmaya konulacak atık ısı geri kazanım (WHR) sistemleri ile değerlendirilir (ısıtma, sıcak su kullanımı vb.). Yaklaşık 573K olarak soğutmada kullanılacak olan sıcak hava en yüksek ψ_{R_i} değeri (0,89) üzerinde enerji sistemi genelinde ek kaynak sarfiyatı ve CO₂ salımlarının azaltılması sağlanacağı belirlendi.

Kapalı sistem olan çimento üretimi gaz, malzeme ve Akılcı ekserji için gaz akışı şeması Şekil 8.3 de görülebilir.



Şekil 8.4 Çimento üretim prosesi akış şeması

9 DÖRT FABRİKANIN ENDEKSLER ÜZERİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

Verilerin normalize edilmesi için 3. Bölümdeki Normalizasyon yöntemlerinden Min-Maks yöntemi kullanıldı. 1990, 2013 yılları için Çizelge 8.1'i oluşturmak için bir önceki bölümde (GRI) bünyesindeki "Sustainability Disclosure Database" veri tabanında oluşturulan Enerji ve çevresel performans verileri içeren Çizelge 5.1 ve 5.2'den yararlanılmıştır.

Min-Maks yönteminin şartlarından olan yüksek değer tercih edildiği durumlar (maks) ve düşük değer tercih edildiği durumlara (min) dikkat edilerek bir grup veri endeks oluşturulmak üzere seçilmiştir. Çizelge 5.2' de Enerji ve çevresel performans verileri üzerinden sırlamaya göre en yüksek ve en düşük verileri belirlenmiştir.

Türkiye çimento fabrikaları verilerini endeks üzerinde karşılaştırmak için Çizelge 5.1 verileri içerisinde ve Türkiye Çimento Sektörü Entegre Çimento Tesisleri Değerlendirme Programı veri tabanından [34] veriler seçildi. Seçmiş olduğumuz normalizasyon yöntemlerinden Min-Maks yönteminin gereği olarak endekse girmesini düşündüğümüz verilerin düşük değerlerinin mi yoksa yüksek değerlerinin mi endeks toplamına pozitif katkı sağlayacağını düşünerek verilerin uygun olanları seçildi. Toplamda endeks katkı sağlayacak on veri alındı bunların beş adedinin maksimum olması diğer beş adedinin de minimum olmasının olumlu katkı sağlayacağı düşünüldü. Klinker üretimi dâhil enerji tüketimi, çimento üretimi için harici güç tüketimi, termik enerji tüketimi, brüt CO₂ yayımı, yakıtı karışımının karbon yoğunluğu verilerinin minimum olması endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Atık ısıdan üretilen toplam güç üretimi, toplam termik enerji harcaması (fosil ve karışık atık yakıt), toplam termik enerji harcaması (biokütle), toplam alternatif fosil yakıt tüketimi, Portland çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler toplam yüzdesi verilerinin maksimum olmasının endekse fayda sağlayacağı anlaşıldı. Minimum ve maksimum ayrımı yapıldı ve her bir veri sütununun minimum ve maksimumları bulunarak Çizelge 9.1 oluşturuldu.

Çizelge 9.1 üzerindeki veriler; Min-Maks normalizasyon yönteminin yüksek değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi için Eşitlik 5.1, düşük değerlerin tercih edildiği değerlerin 0 ile 1 arasında normalize edilmesi için Eşitlik 5.2 kullanılarak Çizelge 9.2 oluşturuldu. Çizelge 9.2 her bir coğrafi bölge/ülke/fabrika için Enerji ve çevresel performans verilerinin yüksek ve düşük

değerlerin tercih edilmesine göre normalize edilmesi sonucu değerleri 0 ile 1 arasında yer alan endeks boyutları ve toplamı oluşturuldu. Oluşan Enerji ve çevresel performans endeks toplamları Türkiye çimento fabrikaları verilerini endeks üzerinde karşılaştırmak için veri oluşturdu.

Şekil 9.1 üzerinden yapılan değerlendirmede endeksin aldıkları puana göre renk kodları kullanıldı.

Endeks Puanı ≥ 5 - Yeterli (yeşil)

$4,9 \geq$ Endeks Puanı ≥ 4 - Orta (mavi)

$3,9 \geq$ Endeks Puanı ≥ 3 - Düşük (kırmızı)

Endeks Puanı $\leq 2,9$ - Yetersiz (mor)

ÇF4 (Çimento Fabrikası 4), Avrupa, Asya ve Çin endeksin yeşil bölgesinde çıkarak yeterli düzeyde oldular. Asıl değerlendirdiğimiz ÇF4'ün 5 puanlık performansını sağlayan kriterler; klinker üretimine kadar enerji tüketimi ile tam puan, termik enerji tüketimi ile tam puan, çimento imalatı için harici güç tüketimi ve toplam termik enerji harcaması (fosil ve karışık atık yakıt) olarak ortaya çıktı. ÇF4; ön ısıtmalı, kuru tip, ön kalsinasyonlu bir klinker fırını kullanmakta, enerji tüketimindeki azlık ve fosil karışık yakıt kullanması diğer fabrikalara göre fark yaramasını sağlıyor.

ÇF1 kırmızı grupta düşük endeks puanına sahip, ön ısıtmalı, kuru tip, ön kalsinasyonlu bir klinker fırını kullanmakta, termik enerji tüketiminde orta derece bir puan sahip diğer puanları hep alt grupta.

ÇF3 ve ÇF2 mor renkli yetersiz endeks puanına sahip bölümde yer aldılar. ÇF3, ön ısıtmalı, kuru tip, ön kalsinasyonlu olmasına ve atık ısı geri kazanım sistemine sahip olmasına rağmen düşük miktarda olması fabrikaya avantaj sağlamasına mani olmuştur. ÇF1, ön ısıtmalı, kuru tip fırına sahi olup, ön kalsinatörünün olmamasının dezavantajını yaşamaktadır.

Klinker üretimi tonu başına elektrik enerjisi tüketimi üzerinden yapılan değerlendirmede Enerji ve çevresel performans endeksi üzerinden gelen ülke ve

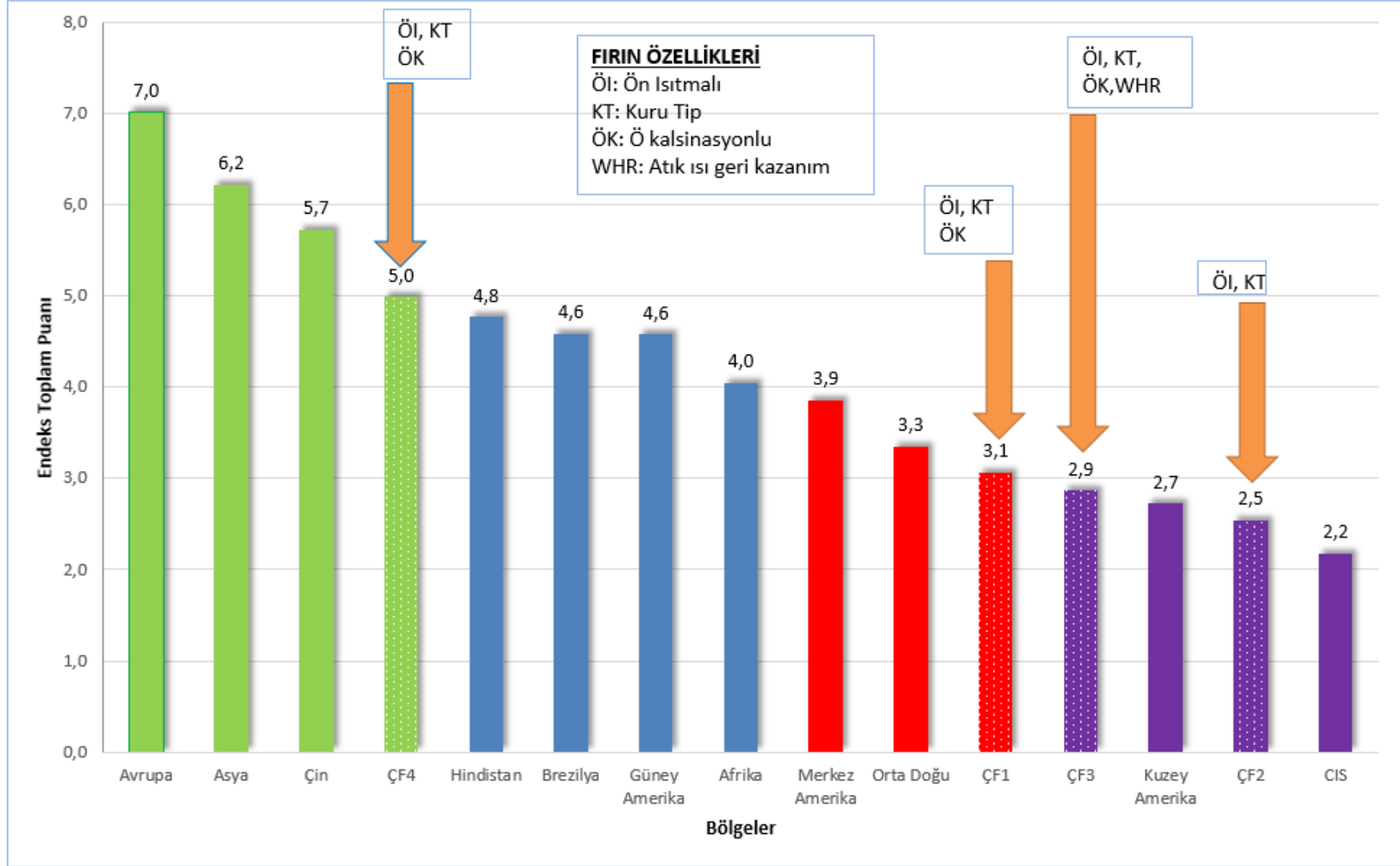
gruplar dâhil birinci en iyi değeri imento Fabrikası 4 almıştır (1,0). Diğer fabrikalar ortalamanın civarında değerler almışlardır.

Çizelge 9.1. Türkiye'deki çimento fabrikaları endeks verileri [6].

SEÇİM	MIN	MIN	MIN	MIN	MAKS	MIN	MAKS	MAKS	MAKS	MAKS
2013, Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Klinker üretimine kadar enerji tüketimi (Klinker Üretimi Dahil)	Çimento imalatı için harici güç tüketimi	Termik enerji tüketimi	Bürüt CO ₂ Yayımları	Atık Isıdan Üretilen Toplam Güç Üretimi	Yakıt Karışımının Karbon Yoğunluğu	Toplam termik enerji harcaması (Fosil ve karışık atık yakıt)	Toplam termik enerji harcaması (Biomass)	Toplam Alternatif fosil yakıt tüketimi	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler toplam yüzdesi
Birim	kWh / t klinker	kWh / t çimento	MJ / t klinker	kg CO ₂ / t klinker	MWh/yıl	CO ₂ /MJ	Toplam Enerjiye %	Toplam Enerjiye %	t alternatif fosil yakıt	% volume of cements
Avrupa	76,00	112,00	3.692,00	830,00	46.307,00	70,68	25,32%	13,32%	8.452.105,60	25,00%
Kuzey Amerika	86,00	127,00	3.783,00	876,00	0,00	87,94	10,62%	4,20%	1.572.707,25	7,00%
CIS	81,00	120,00	4.718,00	903,00	0,00	84,61	2,21%	0,04%	73.888,39	19,00%
Merkez Amerika	83,00	109,00	3.615,00	864,00	0,00	89,89	12,16%	2,53%	825.193,51	27,00%
Brezilya	72,00	104,00	3.558,00	863,00	0,00	95,64	7,88%	9,64%	661.055,39	30,00%
Güney Amerika	77,00	103,00	3.592,00	819,00	0,00	79,16	6,24%	2,56%	267.129,22	31,00%
Çin	68,00	88,00	3.274,00	850,00	1.862.228,00	79,01	0,73%	0,47%	306.405,01	25,00%
Hindistan	64,00	81,00	3.042,00	824,00	21.176,00	94,98	1,57%	0,69%	237.441,57	29,00%
Afrika	72,00	95,00	3.724,00	806,00	0,00	90,40	3,10%	3,18%	288.919,44	23,00%
Orta Doğu	69,00	103,00	3.364,00	851,00	152.516,00	87,52	2,21%	0,95%	116.623,76	4,00%
Asya	63,00	100,00	3.329,00	837,00	1.500.318,00	77,41	7,99%	6,86%	1.791.417,26	19,00%
ÇF1	76,30	102,90	3.596,87	1.211,00	0,00	80,00	10,60%	0,00%	444.228,00	15,00%
ÇF2	72,00	94,50	3.709,37	1.237,00	37.086,00	80,00	0,70%	0,00%	42.821,00	7,00%
ÇF3	72,90	101,90	3.736,40	1.216,00	0,00	80,00	0,20%	0,00%	48.618,00	21,00%
ÇF4	55,40	92,10	3.095,92	1.104,00	0,00	80,00	18,70%	0,00%	981.502,00	17,00%
MİNİMUM DEĞER	55,40	81,00	3.042,00	806,00	0,00	70,68	0,20%	0,00%	42.821,00	4,00%
MAKSİMUM DEĞER	86,00	127,00	4.718,00	1.237,00	1.862.228,00	95,64	25,32%	13,32%	8.452.105,60	31,00%

Çizelge 9.2. Türkiye çimento fabrikaları normalize edilmiş endeks verileri [6].

MIN - MAKS											
2013 Yılı Verileri Seçilen Endeks Boyutları	Klinker üretimine kadar enerji tüketimi (Klinker Üretimi Dahil)	Çimento imalatı için harici güç tüketimi	Termik enerji tüketimi	Bürüt CO₂ Yayılımı	Atık Isıdan Üretilen Toplam Güç Üretimi	Yakıt Karışımının Karbon Yoğunluğu	Toplam termik enerji harcaması (Fosil ve karışık atık yakıt)	Toplam termik enerji harcaması (Biomass)	Toplam Alternatif fosil yakıt tüketimi	Portlant çimentosu üretmek için kullanılan toplam mineral birleşenler toplam yüzdesi	Endeks Boyut Toplamı
Avrupa	0,3	0,3	0,6	0,9	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	7,0
Kuzey Amerika	0,0	0,0	0,6	0,8	0,0	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1	2,7
CIS	0,2	0,2	0,0	0,8	0,0	0,4	0,1	0,0	0,0	0,6	2,2
Merkez Amerika	0,1	0,4	0,7	0,9	0,0	0,2	0,5	0,2	0,1	0,9	3,9
Brezilya	0,5	0,5	0,7	0,9	0,0	0,0	0,3	0,7	0,1	1,0	4,6
Güney Amerika	0,3	0,5	0,7	1,0	0,0	0,7	0,2	0,2	0,0	1,0	4,6
Çin	0,6	0,8	0,9	0,9	1,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,8	5,7
Hindistan	0,7	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,9	4,8
Afrika	0,5	0,7	0,6	1,0	0,0	0,2	0,1	0,2	0,0	0,7	4,0
Orta Doğu	0,6	0,5	0,8	0,9	0,1	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	3,3
Asya	0,8	0,6	0,8	0,9	0,8	0,7	0,3	0,5	0,2	0,6	6,2
ÇF1	0,3	0,5	0,7	0,1	0,0	0,6	0,4	0,0	0,0	0,4	3,1
ÇF2	0,5	0,7	0,6	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,1	2,5
ÇF3	0,4	0,5	0,6	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,6	2,9
ÇF4	1,0	0,8	1,0	0,3	0,0	0,6	0,7	0,0	0,1	0,5	5,0



Şekil 9.1. Türkiye'deki dört çimento fabrikası (ÇF1, ÇF2, ÇF3, ÇF4) endeks karşılaştırması

Çimento imalatı için harici elektrik kullanımı sıralamasında endeks puanı olarak Hindistan birinci sırayı almıştır. Kurutma işlemleri, öğütme işlemleri için kullanılan elektrik enerjisi çimento fabrikalarında oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu değerlendirmede yine ÇF4 dört fabrika arasında en iyi değeri almıştır (0,8).

Ton klinker başına brüt ve net CO₂ yayılımların. Örneğin, 2006'da küresel ortalama brüt spesifik CO₂ yayılımını 866 kgCO₂/ton klinker olmuştur [2]. Endekse dâhil olan fabrikalara bakıldığı zaman ortalama CO₂ yayılımını yaklaşık 1200 kgCO₂/ton klinker civarındadır. Bu değer ıslak şaftlı tip fırınların sahip olduğu değerden (1000 kgCO₂/ton klinker) bile yüksektir.

10 SONUÇ

Bu çalışmada; uluslararası alanda “Cement Sustainability Initiative (CSI)” girişimine üye olan, ayrıca “Global Reporting Initiative (GRI)” bünyesindeki “Sustainability Disclosure Database” veri tabanında yer alan çimento firmaları başta olmak üzere, çimento sektöründe uygulanan üretim yaklaşımları analiz edilmiştir. Analiz 1990 ve 2013 yılları için yapılmıştır. Geçen sürede Kyoto protokolünün etkilerini, hedeflere ulaşmak için belirlenmiş olan kriterlerin, uygulamaların sonuçlarının ve farklı yaklaşımların karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amacıyla, çok kriterli endeksler geliştirilmiştir. Endeks iki ayrı değerlendirmeye göre oluşturulmuş olup, birinci endeks Enerji ve çevresel performans verilerinin ayrımlara göre yapılmıştır.

Bölge ve ülkelerin Enerji ve çevresel performans verileri ayrımında olan bu endeksin göstergeleri arasında;

- Klinker üretimine kadar enerji tüketimi (klinker üretimi dâhil.) (kWh/t klinker)
- Çimento imalatı için harici güç tüketimi (kWh/t klinker)
- Termik enerji tüketimi (MJ/t klinker)
- Toplam termik enerji harcaması (Fosil ve karışık atık yakıt) (Toplam enerji %)
- Toplam termik enerji harcaması (Biokütle) (Toplam enerji %)
- Toplam alternatif fosil yakıt (t)
- Toplam mineral birleşen katkısı (Çimento üretiminin %) olarak belirlendi
- Brüt CO₂ yayımı (kgCO₂/t klinker)
- Atık ısıdan üretilen toplam güç üretimi (MWh/yıl)
- Yakıt karışımının karbon yoğunluğu (CO₂/MJ) vardır.

On kriter üzerinden yapılan ölçeğin maksimum puanı normalizasyon yöntemi gereği on puan olmuştur. Geliştirilen ölçek üzerinden ayrıma gidilebilmesi için aşağıdaki puanlama ve renk kodu sistemi belirlenmiştir.

Endeks Puanı ≥ 5 - Yeterli (yeşil)

4,9 \geq Endeks Puanı ≥ 4 - Orta (mavi)

3,9 \geq Endeks Puanı ≥ 3 - Düşük (kırmızı)

Endeks Puanı $\leq 2,9$ - Yetersiz (mor)

Buna göre 5 puan üst seviyeden çok teknolojik şartların ve doğaya saygılı çimento üretiminin yeterliliğini içermektedir.

Enerji ve çevresel performans endeksinin sonuçlarına bakıldığında; Avrupa'nın verilerinin, çimento sektörünün en büyük girdilerinden biri olan termik enerji harcaması konusunda yapılan çalışmaların fayda gösterdiği, özellikle biokütle, alternatif fosil yakıt ve atık yakma işlemlerinin öne çıktığı ve çimento katkılarının sektörün değişmezi olduğu anlaşılmıştır. Asya klinker üretimindeki enerji harcaması, brüt CO₂ yayımı iyileştirmeleri önderliğinde %21lik iyileşme kaydetmiştir. 1990 ve 2013 yılları arasında endeks iyileşmesi konusunda Çin için ayrı bir değerlendirme yapmak faydalı olacaktır; 1990 yılına göre %49 iyileştirme ile kırmızı endeks kategorisinden birinci kategori olan yeşile gelişim sağlamıştır. Enerji ve çevresel performans endeksinin asıl amacı fabrikaların endeks üzerinden kendilerini karşılaştırarak, farklı yaklaşımdaki ülkelerin ya da bölgelerin sonuçlarını kendilerinininkiyle karşılaştırarak performans ve üretim politikalarına yön verme konusunda yardımcı olması konusunda aydınlatıcı olmasıdır. Enerji ve çevresel performans endeksinin denemesi Türkiye de yerleşik farklı özelliklere sahip dört çimento fabrikasının endeks üzerinden değerlendirmesi ile yapılmıştır. Endeks içerisinde yeşil bölgede yer alıp yeterli sınıfa çıkan bir fabrikamızın; içinde bulunduğu bölgenin eğilimleri ile benzerlik göstermesi ve kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu klinker fırını kullanıyor olması teknolojik olarak da doğru parametreleri kullandığını göstermiştir.

İkinci endeksin Enerji ve çevresel performans verileri haricinde teknolojik yönelim ve karşılaştırmalara yardımcı olması için klinker fırını tipi endeksi olmasına karar verildi. Fırın tipleri 1990 ve 2013 yılları arası olması yeniden eskiye teknolojik karşılaştırma yapılmasını sağlamıştır. Fırın tipleri;

- Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu,
- Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz,
- Uzun Kuru tip, ön ısıtmalı,
- Karışık tip,
- Yarı kuru, yarı ıslak tip,

- Islak şaftlı tip olarak belirlenmiş ve değerlendirilmiştir.

1990 ve 2013 yılları arası değerlendirmede kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonlu fırınların her iki yıl içinde tam puan alması teknolojik çimento fabrikası yatırımlarının yönünü belirlemiştir. Kuru tip, ön ısıtmalı, ön kalsinasyonsuz tip fırınların endeks puanları %23 oranında düşmüştür. Fırınların soğutmadaki atık ısıyı değerlendirmesini sağlayan kalsinatörün önemi geçen zaman içerisinde daha da belirginleşmiştir. Kalsinasyonun tamamlanması için kalsinatörün kullanılması daha kolay kullanımlı kısa fırınların varlığını desteklemektedir. Islak şaftlı tip fırınlar ise sıfır puan almış ve teknolojik olarak tercih edilmedikleri şeklinde yorumlanmıştır. Geçen zamanda %95 oranında fırın endeks puanı kaybetmişlerdir. Kuru tip, ön ısıtmalı, uzun fırınların endeks puanında %55,46 bir artış olduğu görülmüştür. Kalsinatör olmasa dahi fırına beslenen soğutma havasının desteği ve uzun, daha yavaş dönen fırınların kalsinasyonu sağlaması sayesinde performanslı hale gelmişlerdir.

Klinker fırını endeksi üzerinde yapılan çalışmalar atık ısının değerlendirmesi ve ekserji kaynaklarının doğru yönlendirilmesi gerekliliğini doğurmuştur. Akılcı Ekserji Yönetimi Modelinin klinker fırınının soğutması üzerinden çıkacak sıcak hava değerlendirmesinin önemini düşünölmüştür. Akılcı Ekserji Yönetim Modeli; enerji taleplerini karşılayacak olan enerji kaynaklarının içindeki yararlı potansiyeli göz önüne alarak, enerji sistemi genelindeki CO₂ salımlarının azaltılması için öneriler sunmaktadır. Ekserji, temel olarak alınan bir referans çevre sıcaklığının Carnot çevrimine göre kaynağın oluşan ısı farklılığına göre, elektrik üretimi ya da ısıtma soğutma işleri gibi enerji çalışmaları için kullanılabilir yararlı iş yapabilme potansiyelini ölçmektedir. Isıtma, soğutma ya da elektrik üretimi gibi farklı enerji ihtiyaçlarına karşılık verecek enerji kaynaklarının yararlı potansiyeli miktarına göre planlandığı zaman kaynakların daha uygun kaynaklara yönlendirilmesi israfın azaltılmasına böylece CO₂ salımlarının azaltılması sağlanmaktadır. Yapılan çalışma ile soğutmadan çıkan 100 birim havanın yaklaşık 50 birimi 1273K sıcaklık ile ön kalsinatöre beslenir. 3 birimi tekrar fırına beslenir, yaklaşık 2 birimi soğutmaya konulacak atık ısı geri kazanım (WHR) sistemleri ile değerlendirilir (ısıtma, sıcak su kullanımı vb.). Yaklaşık 573K olarak soğutmada kullanılacak olan sıcak hava en

yüksek ψ_{R_i} değeri (0,89) üzerinde enerji sistemi genelinde ek kaynak sarfiyatı ve CO₂ salımlarının azaltılması sağlanacağı belirlendi.

Çalışmada ortaya koyulan çevresel ve klinker fırını endeksleri ve Akıllı Ekserji Yönetimi Modelinin klinker fırınlarında daha ileriye götürülmesi için;

- Çimento Endüstrisi için CO₂ ve enerji kazanımları sağlam ve kanıtlanmış raporlama araçlarının kullanımı sayesinde uygulanabilir spesifik çözümleri belirlemek için şirketlere ve yetkililere ulaşarak öneriler sunulmalı endeksler firma ihtiyaç ve yönelimlerine göre şekillendirilmelidir.
- Çimento profesyonellerinin ihtiyaç ve görüşleri doğrultusunda kriterler değiştirilmeli yeni anahtar performans göstergelerinin fabrikalarda kayıt altına alınması ve endekslerde kullanılması sağlanmalıdır.

İleriye yönelik çalışmalar;

- Akılcı Akıllı Ekserji Yönetimi Modelinin klinker fırınlarında uygulaması haricinde yine sektöre ait yönetim ihtiyacı duyan farin değirmeni ve çimento değirmenlerinde modellemesi çalışmaları yapılabilir.
- Atık ısı geri kazanım çalışmaları için klinker soğutucu haricinde baca üzerinden alınacak ısının değerlendirilmesi çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Kuleli, Ömer, Çimento Mühendisliği El Kitabı, 2010
- [2] LCTPI, Low Carbon Technology Partnerships initiative, Cement Report, 2016
- [3] Cembureau, Activity Report, <https://cembureau.eu/media/1635/activity-report-2016.pdf>, 2016
- [4] Dünya Bankası, Türkiye’de Enerji Tasarrufu Potansiyelini Kullanmak, 52210-TR, 2011.
- [5] WBCSD-IEA Cement Roadmap, http://www.wbcscement.org/pdf/technology/WBCSD-IEA_Cement%20Roadmap.pdf, 2009
- [6] The Cement Sustainability Initiative, Cement Industry Energy and CO2 Performance “Getting the Numbers Right”, 2013
- [7] Çimento üretimi dünya sıralaması, Saunders, Amy, Top 75 Global Cement Companies, Global Cement Magazine, <http://www.globalcement.com/magazine/articles/822-top-75-globalcementcompany>, 2014
- [8] Türkiye Çimento Sektörü Entegre Çimento Tesisleri Değerlendirme Programı, TÇMB, 2014
- [9] WBCSD Cement Global Site, Cement Production, <https://www.wbcscement.org/index.php/about-cement/cement-production>, 2018
- [10] Ön Isıtıcı ve ön kalsinatör, Dry Kilns with Multistage Pre-heaters and Pre-calcination, <http://ietd.iipnetwork.org/content/dry-kilns-multistage-pre-heaters-and-pre-calcination>
- [11] WBCSD, CO2 and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry, <https://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/climate-protection/co-accounting-and-reporting-standard-for-the-cement-industry>, May 2011
- [12] Alpan, M. Edip ALPAN. Çimento Sektöründe Atık Isı Geri Kazanımı Sistemleri Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Enerji ve Tabii Kaynaklar Daimi Komitesi 2012

- [13] Schneider, Michael, M. Romer, M. Tschudin, and H. Bolio. "Sustainable cement production—present and future." *Cement and Concrete Research* 41, no. 7 (2011): 642-650.
- [14] Supino, Stefania, Ornella Malandrino, Mario Testa, and Daniela Sica. "Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences." *Journal of Cleaner Production* 112 (2016): 430-442.
- [15] Mikulčić, Hrvoje, Jiří Jaromír Klemeš, Milan Vujanović, Krzysztof Urbaniec, and Neven Duić. "Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process." *Journal of cleaner production* 136 (2016): 119-132.
- [16] Van Ruijven, Bas J., Detlef P. Van Vuuren, Willem Boskaljon, Maarten L. Neelis, Deger Saygin, and Martin K. Patel. "Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries." *Resources, Conservation and Recycling* 112 (2016): 15-36.
- [17] Hasanbeigi, Ali, Lynn Price, and Elina Lin. "Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, no. 8 (2012): 6220-6238.
- [18] Utlu, Zafer, Ziya Sogut, Arif Hepbasli, and Zuhul Oktay. "Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production." *Applied Thermal Engineering* 26, no. 17-18 (2006): 2479-2489.
- [19] Worrell, Ernst, Lenny Bernstein, Joyashree Roy, Lynn Price, and Jochen Harnisch. "Industrial energy efficiency and climate change mitigation." *Energy efficiency* 2, no. 2 (2009): 109.
- [20] Karellas, S., A-D. Leontaritis, G. Panousis, E. Bellos, and E. Kakaras. "Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry." *Energy* 58 (2013): 147-156.
- [21] Madloul, N. A., R. Saidur, N. A. Rahim, and M. Kamalisarvestani. "An overview of energy savings measures for cement industries." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19 (2013): 18-29.

- [22] Katsioti, M., P. E. Tsakiridis, P. Giannatos, Z. Tsibouki, and J. Marinos. "Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance." *Construction and Building Materials* 23, no. 5 (2009): 1954-1959.
- [23] Atmaca, Adem, and Mehmet Kanoglu. "Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry." *Energy* 42, no. 1 (2012): 261-269.
- [24] Tan, Yuting, Xun Li, Li Zhao, Hailong Li, Jinyue Yan, and Zhixin Yu. "Study on utilization of waste heat in cement plant." *Energy Procedia* 61 (2014): 455-458.
- [25] Wang, Huarong, Jinliang Xu, Xufei Yang, Zheng Miao, and Chao Yu. "Organic Rankine cycle saves energy and reduces gas emissions for cement production." *Energy* 86 (2015): 59-73.
- [26] Touil, Djamel, Salah Belaadi, and Christine Frances. "Energy efficiency of cement finish grinding in a dry batch ball mill." *Cement and Concrete Research* 36, no. 3 (2006): 416-421.
- [27] Kılış, Şiir. "Net-Sıfır Binalar Ve Kentler İçin Akılcı Ekserji Yönetim Modeli." http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/3a38902a513cb04_ek.pdf, 2013
- [28] Nayak, S. C., Misra, B. B., & Behera, H. S. (2014). Impact of data normalization on stock index forecasting. *Int. J. Comp. Inf. Syst. Ind. Manag. Appl*, 6, 357-369.
- [29] Kılış, Şiir. "A rational exergy management model to curb CO2 emissions in the exergy-aware built environments of the future." Doktora Tezi, KTH Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment (2011).
- [30] Kılış, B. ve Kılış, Ş. 2017. Düşük Ekserjili Binalarda Güneş ve Rüzgâr Enerjisi ile Birlikte Isı ve Güç Üretim Senaryoları, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve SODEX Fuarı, TESKON 2017, 19-22 Nisan 2017, Tesisat Mühendisliğinde Bütünleşik Performans, Cilt 1, Binalarda Enerji Performansı Sempozyumu Bildiriler Kitabı, MMO Yayın No: E/MMO/667-1, sayfa: 681-697, ISBN ISBN 978-605-01-1011-1, İzmir.
- [31] Çengel, Y. A. Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik. Literatür. Palme Yayıncılık (2013).