

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO SEKTÖRÜ ENDEKSİ

NİLÜFER SALBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2016

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO SEKTÖRÜ ENDEKSİ

SUSTAINABLE CEMENT SECTOR INDEX

NİLÜFER SALBAŞ

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2016

“SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO SEKTÖRÜ ENDEKSİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 20/01/2016 tarihinde, **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan (Danışman) : Prof. Dr. Birol KILKIŞ

Üye : Prof. Dr. Adem ACIR

Üye : Yrd. Doç. Özgür EROL

ONAY

..../01/2016

Prof. Dr. Emin AKATA
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 onure ettiği için,

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

Destekleri hiçbir zaman esirgemeyen değerli eőtme ve anneme,

Babam Madenci Mehmet SALBAŞ anısına,

ÖZ

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO ENDEKSİ

Nilüfer SALBAŞ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Çimento sanayisi 58.681.660 ton CO₂/yıl miktarında CO₂ salımı ile yüksek ve elektrik tüketimi toplam 7.606.989 MWh ile enerji yoğun bir sektör olmakla birlikte, Türkiye ekonomisine katkısı yadsınamaz durumdadır. Ülkemizdeki çimento fabrikalarının tamamını kapsayan detaylı çalışmalar literatürde yer almamaktadır. Bu çalışma ile Türkiye’de 2014 yılında aktif olarak faaliyet gösteren 49 adet entegre çimento fabrikası irdelenmiş, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü’ne iletmış oldukları enerji, üretim ve CO₂ salım verileri dikkate alınarak sürdürülebilir çimento sektörüne yönelik endeks oluşturulması amaçlanmıştır.

Çalışmada üç farklı boyut olarak enerji, çevre ve ekonomi kapsamında oluşturulan 15 adet alt gösterge tanımlanmış, Sürdürülebilir Çimento Sektörü Endeksi oluşturulmuştur. Kompozit endeks yöntemiyle farklı ölçüm birimlerine sahip veriler (kWh / ton klinker, kWh / ton çimento, Ton CO₂, %, TL gibi) kullanılmıştır. Aynı gösterge setindeki değerler setin en yüksek ve en düşük değerlerine göre 1-0 arasında normalize edilmiştir. Göstergeler en yüksek ve en düşük değerler arasında normalize edilirken göstergenin kapsamına göre iki farklı durum oluşmaktadır. Bu nedenle yüksek değerlerin tercih edildiği durumlar (örn. Salım tasarrufu, ekonomik kazanç) ve düşük değerlerin tercih edildiği durumlar (örn. enerji yoğunluğu, CO₂ salımı yoğunluğu) için ilgili denklemler kullanılmıştır.

Normalize edilen verilerle belirlenen boyutlar, alt göstergeler ve üç boyutun birarada değerlendirilmeleri yapılarak fabrika bazında sıralamalar ortaya konmuştur. Boyutlara farklı ağırlıklar verilerek sıralamaların değişimi incelenmiştir. En iyi uygulamalar üzerinden, özgül enerji yoğunluğunun düşürülebileceği, doğrudan ve dolaylı CO₂ salımlarının azaltılması, atıkların bertarafı ve ekonomiye katkı sağlayacak büyük boyutta öneriler dile getirilerek ideal çimento fabrikası için

öneriler geliştirilmiştir. Sektörde uygulamaya yeni başlanan atık ısıdan geri kazanım ve kullanım oranı düşük olsa da ikincil (atık) yakıt kullanımının olumlu etkileri, yapılan endeks çalışmasıyla bu iki uygulamayı gerçekleştiren fabrikaların sıralamalardaki durumlarıyla ortaya konmuştur.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Enerji, çevre, sürdürülebilir çimento endeksi, kompozit endeks, CO₂ salımı, atık yakıt, çimento sektörü

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

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

ABSTRACT

It is evident that the cement industry has an important contribution to the Turkish economy while having a CO₂ emission level of 58.681.660 tonnes CO₂/year and being an energy intensive industry with an electric consumption of 7.606.989 MWh. In contrast, there is an absence of detailed studies in the literature covering the entire cement plants in Turkey. In this study, 49 integrated cement plants which were active in 2014 are analyzed, and it is intended to form an index dedicated to a sustainable cement sector based on the energy, production and CO₂ emissions data presented to the General Directorate of Renewable Energy.

In the study, 15 sub-groups covering 3 dimensions as energy, environment and economics have been identified and a Sustainable Cement Sector Index has been developed. Various measurement units (kWh / ton clinker, kWh / ton cement, Tonne CO₂, %, TL etc.) have been utilised and a composite index method has been applied. The data in the same data set are normalised between 1 – 0 as per the lowest and the highest values. Two conditions occur while normalising the data between the lowest and the highest values. Therefore, respective equations are used in the cases where high values (emission lowering, economical benefits etc.) or low values are preferred (energy intensity, emission intensity etc.).

The plants are evaluated with the normalised data identified per dimension, sub-indicators and the three dimensions together. The change of the order of the plants with the changes in the various weights are analyzed. Via the best available techniques, suggestions for the ideal cement plant have been developed under emissions lowering, decreasing the specific energy intensity, co-generation of the wastes, decreasing the direct and indirect CO₂ emissions and contribution to the economics scope. The positive effects of waste heat recovery, which have recently been started to be utilised in the sector, and the use of secondary fuels while in a lower extent are put forth while the order of the plants that realize both of these applications in their facilities are investigated.

KEYWORDS: Energy, environment, sustainable cement index, composite index, CO₂ emission, waste fuel, cement sector

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

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

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

ÖZ	i
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Konunun Önemi	1
1.1.1 Çimento üretim süreci	4
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	9
3. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ VE AMACI	15
4. YÖNTEM VE UYGULAMA	16
4.1. Metodoloji ve Adımlar	16
4.1.1 Veri toplama.....	17
4.1.2 Boyut belirleme ve endeks oluşturma.....	19
4.1.3 Ağırlıklandırma ile sonuçların karşılaştırılması	29
4.2 Endeks Uygulaması	31
4.2.1 Enerji boyutunda verilerin derlenmesi	31
4.2.2 Çevre boyutunda verilerin derlenmesi	34
4.2.3 Ekonomi boyutunda verilerin derlenmesi.....	36
4.2.4 Enerji boyutunda verilerin normalize edilmesi	38
4.2.5 Çevre boyutunda verilerin normalize edilmesi	40
4.2.6. Ekonomi boyutunda verilerin normalize edilmesi.....	43
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	46
5.1 Endeks Sonuçlarının Değerlendirilmesi	46
5.2 Endeks Sonuçlarının Farklı Boyut Ağırlıklandırma Uygulamaları	51
5.3 Ağırlıklandırma Sonuçlarının Değerlendirilmesi	53
5.4 Endeks Sonuçlarına Göre Enerji Sistemlerinde Öneriler.....	55
KAYNAKLAR LİSTESİ.....	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Çimento İşlemi	5
Şekil1.2 2014 Yılı Toplam CO ₂ Salımı.....	7
Şekil 2.1 Partikül sıcaklıkları - siklon içerisinde hesaplanan CO ₂ - siklon içindeki kalsinasyon-siklon içindeki mutlak basıncın 3D görüntüsü	10
Şekil 2.2 CO ₂ salımı azaltım senaryoları	11
Şekil 2.3 ECSC, GAINS Modeli ve ArcGIS' in birlikte kullanılması ile sağlanan faydaların değerlendirilmesi.....	13
Şekil 4.1 Yöntem Akış Şeması.....	16
Şekil 4.2 Türkiye'de bulunan çimento fabrikaları	18
Şekil 4.3 Sürdürülebilirlik.....	19
Şekil 4.4 Birincil Elektrik Enerjisi Tüketimi Dağılımı	20
Şekil 4.5. İkincil Yakıt Dağılımı.....	22
Şekil 4.6 Elektrik Tarifeleri.....	24
Şekil 4.7 Kırma-Harmanlama Özgül Enerji Tüketim Yoğunluğu	24
Şekil 4.8 Farin Öğütme Özgül Enerji Tüketim Yoğunluğu.....	25
Şekil 4.9 Klinker Pişirme Özgül Enerji Tüketim Yoğunluğu.....	25
Şekil 4.10 Çimento Öğütme Özgül Enerji Tüketim Yoğunluğu.....	26
Şekil 4.11 Direkt CO ₂ Salımı	27
Şekil 4.12 Birincil Yakıt Tüketimi Dağılımı	27
Şekil 4.13 Yakıt Kaynaklı Direkt CO ₂ Salımı.....	28
Şekil 4.14 Puant Elektrik Yük Dağılımı	29
Şekil 4.15 Gösterge No 1.1	38
Şekil 4.16 Gösterge No 1.2	39
Şekil 4.17 Gösterge No 1.3.....	39
Şekil 4.18 Gösterge No 1.4.....	40
Şekil 4.19 Gösterge No 2.1	41
Şekil 4.20 Gösterge No 2.2	41
Şekil 4.21 Gösterge No 2.3.....	42
Şekil 4.22 Gösterge No 2.4.....	42
Şekil 4.23 Gösterge No 3.1	43
Şekil 4.24 Gösterge No 3.2	44
Şekil 4.25 Gösterge No 3.3.....	44
Şekil 4.26 Gösterge No 3.4.....	45
Şekil 5.1 Enerji Boyutunun Gösterge Sonuçlarının Toplu Gösterimi.....	46
Şekil 5.2 Çevre Boyutunun Gösterge Sonuçlarının Toplu Gösterimi	47

Şekil 5.3 Ekonomi Boyutunun Gösterge Sonuçlarının Toplu Gösterimi	49
Şekil 5.4 Eşit Ağırlıklı Uygulama	51
Şekil 5.5 Enerji Ağırlıklı Uygulama	52
Şekil 5.6 Çevre Ağırlıklı Uygulama.....	52
Şekil 5.7 Ekonomi Ağırlıklı Uygulama	53
Şekil 5.8 Boyut Bazındaki İlk Sırada Yer Alan Fabrikaların Diğer Boyutlardaki Durumu ..	55
Şekil 5.9 Çimento Fabrikaları ve Katı Atık Kullanımı Düzenli Depolama Alanı Karşılaştırılması	57
Şekil 5.10 Su-buhar döngüsü ile ısı geri kazanım sistemi	59
Şekil 5.11 Organik Rankin Çevrimi (ORC) ile ısı geri kazanım sistemi	59

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Sanayi ve Bina Sektörlerindeki Enerji Verimliliği Potansiyelinin Özeti.....	2
Tablo 1.2. Enerji Verimliliği Önlemlerinin Ortalama Özgöl Isı ve Elektrik Tasarrufları ve Yatırım Maliyetleri	3
Tablo 1.3. 2014 Yılı Fosil Yakıt Kullanımı.....	6
Tablo 1.4. Çimento ve Klinker İhracat Durumu.....	8
Tablo 1.5. Çimento Sektörü İstihdam Durumu.....	8
Tablo 4.1 Enerji Boyutu Kapsamında Yer Alan Göstergeler	20
Tablo 4.2 Çevre Boyutu	21
Tablo 4.3 Ekonomi Boyutu	22
Tablo 4.4 Çimento Sektörü Maliyet Kalemleri	22
Tablo 4.5 Enerji Boyutu Verileri.....	32
Tablo 4.5 Devam Enerji Boyutu Verileri....	33
Tablo 4.6 Çevre Boyutu Verileri	34
Tablo 4.6 Devam Çevre Boyutu Verileri	35
Tablo 4.7 Ekonomi Boyutu Verileri	36
Tablo 4.7 Devam Ekonomi Boyutu Verileri.....	37
Tablo 5.1 Enerji Boyutu.....	47
Tablo 5.2 Çevre Boyutu	48
Tablo 5.3 Ekonomi Boyutu	49
Tablo 5.4 Ağırlıklandırma Sonuçları	53
Tablo 5.6 Ağırlıklandırma Sonucundaki Fabrikaların Gösterge Bazında Sıralamaları.....	54
Tablo 5.7 Sürdürülebilir Çimento Endeksi Kapsamında Öneriler	61

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

CO ₂	karbondioksit
Kg	kilogram
kW	kilowatt
Maks	maksimum
Min	minimum
TEP	ton eşdeğer petrol

KISALTMALAR

ETKB	Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ORC	Organik Renkin Çevrimi
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
YEGM	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
WHR	Atık Isı Geri Kazanımı (Waste Heat Recovery)

1. GİRİŞ

1.1. Konunun Önemi

Çimento sektörü yoğun olarak enerji tüketerek ekonomik katkı sağlayan ağır sanayi dalıdır. Kullanılan enerjinin büyük bölümü fosil kaynaklı olduğundan çimento sanayinin CO₂ salımında ve sera gazlarının artışında, dolayısıyla ile küresel ısınmada payı önemlidir. Yapılan karşılaştırmalara göre çimento sektörü tek bir sektör olarak dünya CO₂ salımlarının %5'ini oluşturmaktadır. Ayrıca, 2006 ve 2050 yılları arasında CO₂ salımlarında yıllık bazda %2,5 artış göstermesi beklenmektedir. Toplamda çimento sektörünün CO₂ salımlarının 2050 yılında 3.7-4.4 milyar ton olması beklenmektedir. [1]

Ülkemiz çimento sektöründe, çimento üretim maliyeti içerisinde enerjinin payı %60-70'ler civarındadır. Çimento Sanayi 2011 yılındaki 5,3 milyon TEP tüketim miktarıyla toplam sanayi enerji tüketiminden yüzde %17,5 pay almış ve demir çelik sektöründen sonra en çok enerji tüketen ikinci sanayi olmuştur. [2] Enerji, çimento fabrikalarında başlıca yakıt enerjisi ve elektrik enerjisi olarak kullanılır. Toplam enerji tüketiminde yakıtın payı %88-90, elektriğin payı ise %10-12 kadardır. [3]

Sanayi sektöründe, Türkiye yıllık 3.0 milyar ABD\$ 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 hakimdir. Enerji maliyetleri toplam üretim maliyetlerinin yüzde 20 ile 50 arasında bir oranını oluşturmaktadır. Demir-çelik sektörü yüzde 22 ile en büyük sınıai enerji tüketim payına sahiptir. Bu sektörü yüzde 19 ile metal dışı alt sektör (çimento, cam, seramik, tuğla) ve yaklaşık yüzde 3 ile bir başka enerji yoğun sanayi olan cam alt sektörü takip etmektedir. (Tablo 1.1)

Tablo 1.1 Sanayi ve Bina Sektörlerindeki Enerji Verimliliği Potansiyelinin Özeti [4]

	Tasarruf Potansiyeli, %		Tasarruf Potansiyeli, '000 TEP/yıl
	Elektrik	Yakıt	
Sanayi	%25		8.015
Demir-Çelik	21	19	1.402
Çimento	25	29	1.124
Cam	10	34	261
Kağıt	22	21	206
Tekstil	57	30	1.097
Gıda	18	32	891
Kimyasal	18	64	2.283
Diğer	yok	yok	729
Bina	%30		7.160
Konut	29	46	5.655
Kamu ve Ticari	29	20	1.505
Toplam	%27		15.152

Not: $TEP = \frac{\text{Tüketim miktarı (verilen birimde)} \times \text{Isıl değer}}{10.000.000}$

Düşük enerji verimliliği işletmeler için yüksek maliyet anlamına gelir, dolayısıyla enerji verimliliğinde sağlanacak iyileşmeler Türkiye sanayisinin küresel ekonomide rekabetçiliğini koruyabilmesi için temel bir gerekliliktir. Verimsiz enerji kullanımı aynı zamanda daha fazla kamu enerji harcaması ve ulusal bütçeden enerji harcamaları için daha fazla pay aktarılması anlamına gelmektedir. 2008 yılında enerji ithalatı toplam 48 milyar ABD\$'na ulaşmıştır.

Türkiye'de Enerji Tasarrufu Potansiyelini Kullanmak (Ocak 2011) ismiyle Dünya Bankası tarafından hazırlanan raporda çimento sektöründe 19 son kullanıcıya (şirket) yapılan anket sonucunda Tablo 1.2' deki sonuçlar ortaya çıkmıştır. [4] Tablo 1.2' de farin hazırlama ile ilgili önlemler başlığı altında bilyalı değirmenler yerine ezici pres ve valsli dik değirmen kullanımı ile 4.55 kWh/ton elektrik, klinker üretimi ile ilgili önlemlerde ön ısıtıcı, ön kalsinatörlü fırınlar ile yaş prosesten kuru prosese dönüşüm 2.8 GJ/ton özgül ısı, çimento öğütme ile ilgili önlemler

başlığında da bilyeli değirmenden horomile dönüşüm ile 27 kWh/ton elektrik tasarrufuna sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1.2 Enerji Verimliliği Önlemlerinin Ortalama Özgül Isı ve Elektrik Tasarrufları ve Yatırım Maliyetleri [4]

Önem	Özgül Isı Tasarrufu (GJ/ton)	Özgül Elektrik Tasarrufu (kWh/ton)	Özgül Yatırım Maliyeti (ABD\$/tonkapasite)
Farin Hazırlama ile ilgili Önlemler			
Verimli Nakil Sistemlerinin Kullanımı	0	2.25	6.61
Verimli Farin Homojenizasyon Sisteminin Kullanımı	0	1.79	8.16
Sürekli Homojenizasyon Sisteminin Kullanımı	0	0.5	3
Ezici Pres ve Valsli Değirmen Kullanımı	0	4.55	11.68
Yüksek Verimli Separatör Kullanımı	0	1.75	4.41
Klinker Üretimi ile ilgili Önlemler			
Fırın Yakma Sistemi iyileştirmeleri	0.052	0	1.21
Fırın Yüzeyi Isı Kayıplarının Azaltılması	0.15	0	0.31
Atık Yakıtların Kullanımı(%3 atık.%6atık ve %12 atık alternatifleri ile)	0.10	0	1.23
	0.21	0	1.23
	0.42	0	1.23
Modern Izgaralı Soğutuculara Dönüşüm	0.3	-3	0.74
Elektrik Üretimi için Isı Geri Kazanımı(sadece yaş proseste uzun fırınlar için)	0	20	
Ön Isıtıcı, Ön Kalsinatörlü Fırınlar ile Yaş Prosesten Kuru Proseste Dönüşüm	2.8	-10	92.59
Kuru Proseste Çok Kademeli Siklon Tipi Ön Isıtıcılara Dönüşüm	0.9	0	24.69

Tablo 1.2 Devam Enerji Verimliliği Önlemlerinin Ortalama Özgül Isı ve Elektrik Tasarrufları ve Yatırım Maliyetleri [4]

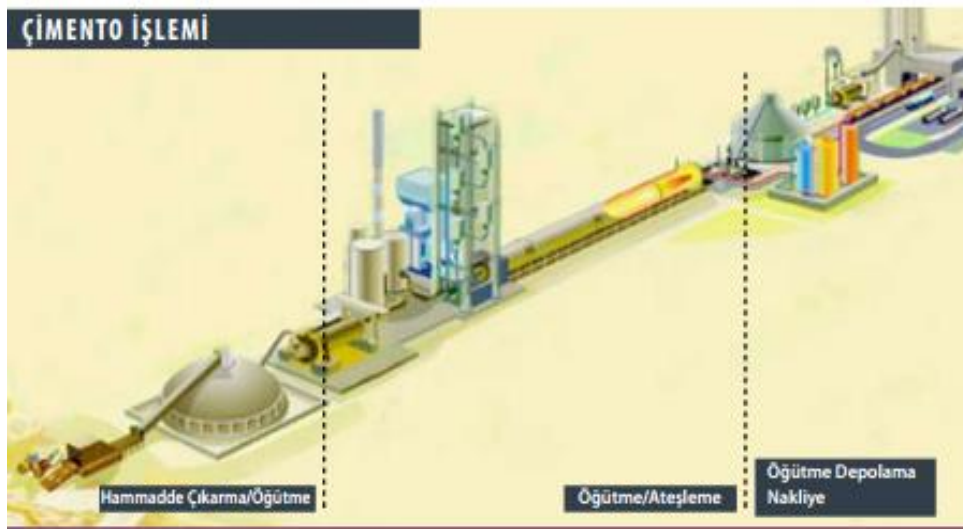
Önlem	Özgül Isı Tasarrufu (GJ/ton)	Özgül Elektrik Tasarrufu (kWh/ton)	Özgül Yatırım Maliyeti (ABD\$/tonkapasite)
Çimento Öğütme ile ilgili Önlemler			
Verimli Nakil Sistemlerinin Kullanımı	0	2	3.70
Bilyeli Değirmenden Önce Ezici Pres Ön Öğütücüsünün Kullanımı	0	8	3.09
Bilyeli Değirmenden Horomile Dönüşüm	0	27	4.94
Yüksek Verimli Separatör Kullanımı	0	2.5	2.78
Değirmen İç Donanımlarının İyileştirilmesi	0	2	0.86
Genel Enerji Tasarrufu Önlemleri			
Önleyici Bakım(Yalıtım, basınçlı hava kayıplarının azaltılması, önleyici bakım,vs)	0.05	3	0.12
Proses Kontrolü ve Enerji Yönetimi	0.2	4	1.85
Yüksek Verimli Motor Kullanımı	0	1	0.25
Değişken Hızlı Tahrik Ünitesine Sahip Fan Kullanımı	0	4	0.12

1.1.1 Çimento üretim süreci

Çimento sektöründeki enerji verimlilik potansiyelinin değerlendirilmesi için çimento üretim sürecinin ortaya konulması önemlidir. Şekil 1.1' de çimento işleminin hammadde çıkarma/öğütme, öğütme/ateşleme ve öğütme/depolama, nakliye olmak üzere üç aşamadan oluştuğu belirtilmektedir.

Çimentonun ana bileşeni klinkerdir. Klinker kireçtaşı ve kil gibi hammaddelerin öğütülüp homojenize edilerek döner fırınlarda beslenmesi ile üretilmektedir. Öğütme bir sonraki kimyasal tepkimeleri (fırında pişirme) kolaylaştırmak için yapılan bir yüzey artırma işlemidir. Bu süreç içinde malzemeler cm (10^{-2} m) boyutundan mikron boyutlarına (10^{-6}) öğütülürler.

Klinker pişirme yeni bileşenlerin oluşması için gereken 1450°C'lik malzeme sıcaklığında gerçekleşmektedir. Klinker, temel olarak kalsiyum, silisyum, alüminyum ve demir oksitlerden oluşmaktadır. Bir sonraki aşama, çimento öğütme değirmeninde gerçekleşmektedir. Alçı ve diğer malzemeler (yüksek fırın cürufu, uçucu kömür külü, doğal puzolan, kireç taşı vb.) klinkere eklenmektedir. Bütün bileşenler ince ve homojen bir toz, yani çimento oluşuna kadar öğütülmektedir.



Şekil 1.1 Çimento İşlemi [5]

Çimento fırını kaynaklı salımlar hammaddelerin fiziksel ve kimyasal reaksiyonları ve yakıtların yanmasından kaynaklanmaktadır. Bir çimento fırınından çıkan çıkış gazlarının ana bileşenleri, yanma havasından gelen azot, kalsinasyon ve yanmadan gelen CO₂, yanma süreci ve hammadde kaynaklı su ile ve fazla oksijendir. Çıkış gazları aynı zamanda az miktarda toz, klorür, florür, kükürtdioksit, NO_x, karbonmonoksit ve bununla beraber daha küçük miktarlarda organik bileşen ve ağır metalleri içermektedir. [5]

Fosil yakıt kullanımı yüksek bir sektör olduğundan enerji verimliliğine yönelik çalışmalar yüksek önem taşımaktadır. 2014 yılı verilerine göre çimento fabrikalarında kullanılan fosil yakıt miktarlarının dağılımı Tablo 1.3' de verilmektedir. Örneğin, kaynak dağılımı içerisinde en çok 11,05 milyon Sm³ doğal gaz kullanılmıştır. Şekil 1.2' de ilgili değerler yüzde olarak verilmekte olup proses kaynaklı CO₂ salımların %57,6'lık bir paya sahip olduğu görülmektedir. Bu veriler kullanılarak Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından hazırlanan

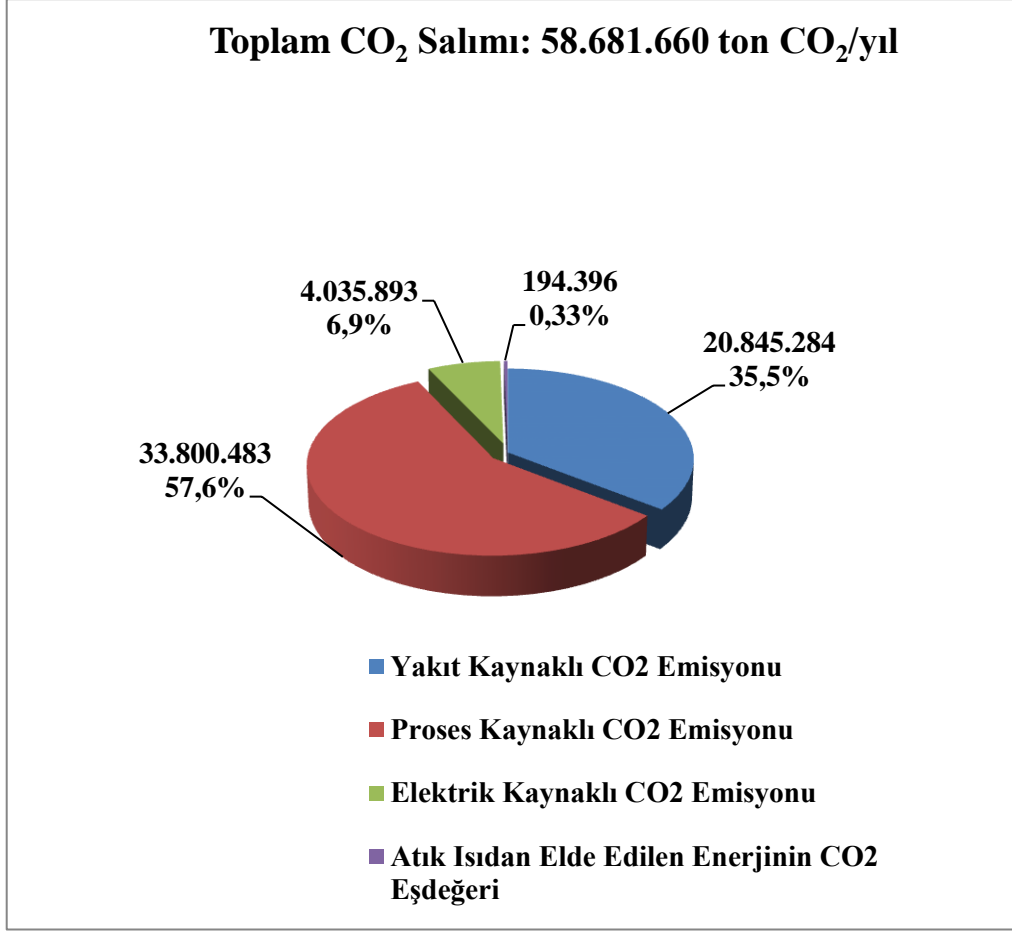
ve diğ er ilgili kaynaklar kapsamında referans alınan ton enerji baş ına CO₂ salım faktörleri kullanılarak CO₂ salımları hesaplanmıştır.

Tablo 1.3 2014 Yılı Fosil Yakıt Kullanımı [6]

Fosil Yakıt	Miktar	Kullanım %	Ton enerji baş ına CO ₂ salım faktörü (kg CO ₂ /GJ)	*CO ₂ Salım Miktarı (ton CO ₂)
Petrokok	3.287.994 (Ton)	51,6	92,0	11.113.419.028
Yerli Linyit	1.762.501 (Ton)	12,6	101,0	2.467.500.944
İthal Kömür	2.791.225 (Ton)	34,3	96,0	6.539.339
Yerli Taşkömürü	116.634 (Ton)	1,0	96,0	261.065
Fuel Oil	11.104 (Ton)	0,3	77,3	34.133
LPG	42 (Ton)	0,027	56,1	109
Doğ al Gaz	11.046.233 (Sm ³)	0,2	56,1	15.564

*IPCC (2006); WRI (2006) Chicago Climate Exchange: Greenhouse Gas Emission Factors For Direct Emission Sources [7]

Doğ al gazın CO₂ salım katsayısı düşük olmasına rağmen ortalama alt kalori değ eri 6000 kcal/Sm³ olması ile daha fazla tüketilmesine sebep olmaktadır. 7500 kcal/kg olan petrokok' un kullanılması hem fosil yakıt tüketiminin düş mesine hem de CO₂ salım yüzdesinin düşürülmesine sebep olmaktadır.



Şekil 1.2 2014 Yılı Toplam CO₂ Salımı [6]

İklim değişikliğinin etkisini azaltmak bir politika önceliğidir ve Hükümet'in bir taahhüdüdür. Kişi başına düşen sera gazı salımları hala düşük olmasına rağmen, Türkiye'deki toplam sera gazı salımları artış oranı Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) Ek-1 ülkeleri arasındaki en yüksek orandır. [8]

Tablo 1.4' de 2002 yılından 2014 yılına kadar çimento ve klinker ihracatının durumu gösterilmiştir. Ülkemizde çimento sektörünün ekonomiye katkısı yadsınamaz durumdadır.

Tablo 1.4 Çimento ve Klinker İhracat Durumu [9]

Yıl	Çimento İhracatı (ton)	Klinker İhracatı (ton)
2002	5.958.979	4.462.890
2003	7.362.923	3.041.468
2004	8.206.317	2.465.894
2005	7.737.666	2.785.711
2006	5.638.351	1.557.062
2007	6.619.842	1.558.063
2008	10.584.662	1.947.919
2009	14.027.538	3.594.517
2010	15.063.000	2.774.701
2011	11.061.092	2.421.496
2012	9.702.083	2.804.572
2013	9.627.438	2.182.592
2014	7.652.557	2.857.840

Tablo 1.5' de de çimento sektöründe çalışan sayıları yıllara bağlı olarak verilmektedir. İstihdam kaynağı olarak ülkemizin işsizlik durumu göz önüne alındığında, ekonomik boyutta da direkt ve endirekt istihdam yaratması nedeni ile çimento sektörü önem arz etmektedir.

Tablo 1.5 Çimento Sektörü İstihdam Durumu [9]

	Yönetici		Mühendis	Teknisyen	Tekniker	Memur	İşçi		Toplam
	Teknik	İdari					Düz	Kalifiye	
2002	336	322	336	368	79	1,163	1,688	2,960	7,252
2003	312	372	449	448	63	1,353	1,725	3,077	7,799
2004	354	348	339	419	62	1,625	1,245	4,006	8,398
2005	345	341	366	574	110	1,682	1,937	3,770	9,125
2006	297	353	409	531	54	1,287	1,838	3,869	8,638
2007	361	416	393	493	83	1,400	2,680	3,857	9,683
2008	394	407	450	542	55	1,397	2,435	4,605	10,285
2009	428	373	371	433	62	1,355	2,130	4,689	9,841
2010	434	336	419	416	56	1,325	2,950	4,138	10,074
2011	445	388	346	403	79	1,350	2,280	4,627	9,918
2012	464	387	433	428	75	1.398	2.923	4.217	10.325
2013	472	420	384	458	56	1.438	2.717	4.780	10.725
2014	511	474	465	433	94	1.429	2.607	5.322	11.335

2. LİTERATÜR TARAMASI

Enerji yoğun çimento sektöründe yürütülen bilimsel çalışmalar şu konuları kapsamıştır.

Aşama bazında, hammadde öğütme, klinker üretimi aşaması, çimento öğütme prosesi üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca, sektörde atık yakıt kullanımı, atık ısıdan geri kazanım projeleri içeren makalelerde incelenmiştir. Enerji etüdü yapılmış Tayvan' daki 7 adet fabrikanın verilerinin bulunduğu kaynak değerlendirilmiştir.

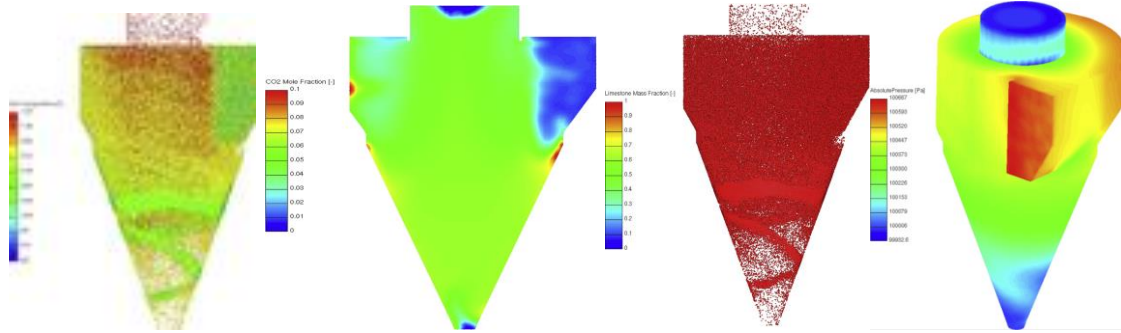
Çimentoda kullanılan bilyalı hammadde değirmeninde enerji tüketiminin azaltılması üzerinde inceleme yapılmıştır. [10] Özellikle hammaddenin nem oranının yarı yarıya düşüş olması ile sistemin I. ve II. Kanun verimleri %1,46 ve % 9,15 oranında artması sağlanmıştır. Değirmenin öğütme davranışını etkileyen, değirmen boyutu, bilya şarj oranı, şekil, sıcaklık, giren hammaddenin nemi, değirmen dönme hızı, ortam hava koşulları, sistemin periyodik bakım için duruşu, öğütmeyi arttırıcı ve yapışma problemini ortadan kaldırmak için kullanılan kimyasallar ve sistemin titreşim özellikleri bu parametrelerin bazıları olarak sunulmuştur. Titreşimin elektrik tüketimini, ısı transferi ve bakım süresini artırdığı ve değirmen standart üretim hızının bazen sistemde titreşim değerleri azaltmak için yarı yarıya azalttığı ortaya konmuştur. Bütün bu faktörler, sistemin spesifik enerji tüketimini etkilediği dile getirilmiştir.

Liu vd. (2015) tarafından enerji dönüşümü ve tüketimi karmaşık olan klinker üretim sürecinin ısı veriminin analitik modellenmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Hammadde ön ısıtma ve ayrışma, klinker kalsinasyonu ve klinker soğutma süreçlerinin enerji akış modelleri oluşturulmuştur. Termal verimliliğin en önemli aşamasının hammadde ön ısıtma ve ayrışma sürecinde olduğu gözlemlenmiştir. [11]

Touil vd. (2006) tarafından bilyalı değirmenin enerji verimliliği üzerine laboratuvar ortamında çalışmalar yapılmış ve enerji verimliliğini artırmak için uygulanması gereken parametreler ortaya konmuştur. 3500 cm²/g inceliğe öğütmek için maksimal enerji verimliliği sağlayabilmek adına optimum işletme değişkenleri belirlenmiştir. Bu değerlerin, d_B (bilya çapı)=24mm, N (dakikada devir sayısı) =

65 rpm, U (malzeme yükü) =0.75 ve J (bilya miktarı) = 0.38 olduğu sunulmuştur. [12]

Mikulčić vd. (2014) tarafından kalsinasyon işlemi çimento üretiminin toplam enerji verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olması nedeniyle siklonlar incelenmiş, gaz ve katı faz arasındaki ısı değişimi ortaya koymak için 3D simülasyon kullanılarak Şekil 2.1’ de gibi ortaya konmuştur. [13]



Şekil 2.1 Partikül sıcaklıkları - siklon içerisindeki hesaplanan CO₂- siklon içindeki kalsinasyon-siklon içindeki mutlak basıncın 3D görüntüsü [13]

Çimento üretiminde gerçekleşen termokimyasal işlem olan kalsinasyon reaksiyonu kireç taşınında bulunan kirecin CaO termal ayrışma ile CO₂ salımlarına dönüşme işlemidir. Mikulčić vd. (2014) tarafından CFD kodlu sayısal modelleme ile matematiksel denklemler ile akış alanını, sıcaklık alanını, gaz fazlı parçacıkların eylemlerini ve konsantrasyonunu simüle etmek için oluşturulmuştur. Kalsinasyon için etki eden sıcaklık, ayrışma basıncı, difüzyon ve gözenek verimliliği hesaba katılmıştır. Çalışmalar neticesinde uygulanan modellemenin doğruluğu ve fiziksel parametrelerin uygun olduğu belirlenmiştir. [14]

Yine çimento sektöründe enerji verimliliği çalışmalar kapsamında, çimento üretiminde kalsinasyon prosesinde kullanılan yakıt verimliliği ve kirletici emisyonlarının sayısal analizi yapılmıştır. [15]

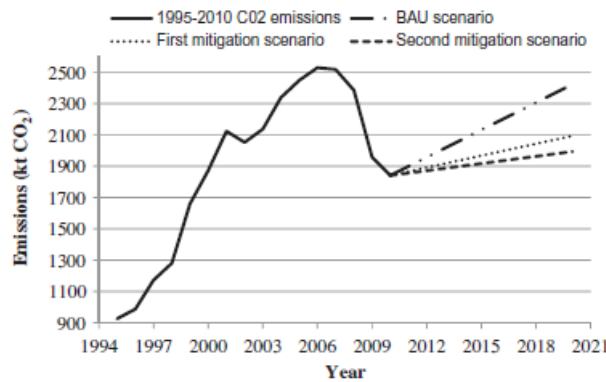
Diğer yandan, çimentoda hammadde kalsinasyonu CO₂ salımlarında en büyük kaynaktır. Bu amaçla Rahman vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada Aspen Plus programı ile ön ısıtmanın enerji verimliliğini ve atık yakıt kaynaklı salımın akış hızına etkisi incelenmiştir. Programla seçilen atık yakıt kullanımının CO₂ salımına ve enerji verimliliğine etkisi ortaya konmuştur. Uygulana modelde kullanılan kömür

ve farklı ikame oranlarında seçilen alternatif yakıtlar kullanılmıştır. CO₂ salımı ve enerji verimliliği açısından sırasıyla atık lastik, hava ile kurutulmuş RDF (atıktan türetilmiş yakıt) ve MBM (Et ve kemik unu) ile %25, %15 ve %5 oranlarında kömür kullanılmıştır. Atık lastik kullanıldığı %3 enerji verimliliği ve %2,5 CO₂ salımını azaltmıştır. MBM düşük kalorifik değere sahip olduğu için toplam termal enerji kaynağının %5' i kadar kullanılabilir. [16]

Takip eden çalışmalarda, çimento üretiminin, Avrupa Birliği'nde sanayi sektöründe en çok karbon salımına sebep olan sektörlerden biri olduğu, taahhütler doğrultusunda iklim değişikliği ile mücadelede karbon emisyonunu azaltmak için çimento üretimi dikkat çeken sektörlerden biri olduğu vurgulanmıştır.[17]

Üretim prosesi ve yanma kaynaklı CO₂ salımlarının yüksek olduğu ve makalede Makendon çimento fabrikasında CO₂ salımının azaltılması için alternatif yakıt kullanımı, daha verimli fırın sistemleri ve sentetik yakıtlar ele alınmıştır [17]

Diğer bir çalışmada Mikulčić vd. (2013) tarafından Hırvatistan'daki çimento fabrikaları üzerinden 2020 yılı CO₂ salımını düşürülmesi hedefleri için 3 farklı senaryo geliştirilerek çalışma yapılmıştır. Klinker azaltılarak katkı kullanılan çimentolar üretilmesi, fosil yakıtların yerine alternatif yakıtlar ve biyokütle kullanılması, enerji verimli çok kademeli ön ısıtıcı ile birlikte yakma teknolojileri konuları ele alınmıştır. Mevcut durum devam ettiği takdirde CO₂ salımının 582 kt artacağı şekilde 4' de de gösterilmiştir. İlk senaryoda 331 kt, ikinci senaryoda ise 429 kt CO₂ salımı azaltacağı öngörülmüştür. 3. senaryo için daha ayrıntılı çalışma yapılmasının gerektiği vurgulanmıştır. [18]



Şekil 2.2 CO₂ salımı azaltım senaryoları [18]

S. Karellas vd, 2013 tarafından çimento fabrikasında atık ısıdan elde edilecek elektrik gücünün 6MW olduğu kabul edilmiştir. İki farklı sistem üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. (buhar çevrimi- WHR ve izopentanlı ORC) enerji ve ekserji analizleri ile iki ısı geri kazanım sistemlerinin değerlendirilmesi yapılmış ve enerji verimliliği açısından buhar çevrimi % 23,58, ORC ise %17,56 olarak hesaplanmıştır. [19]

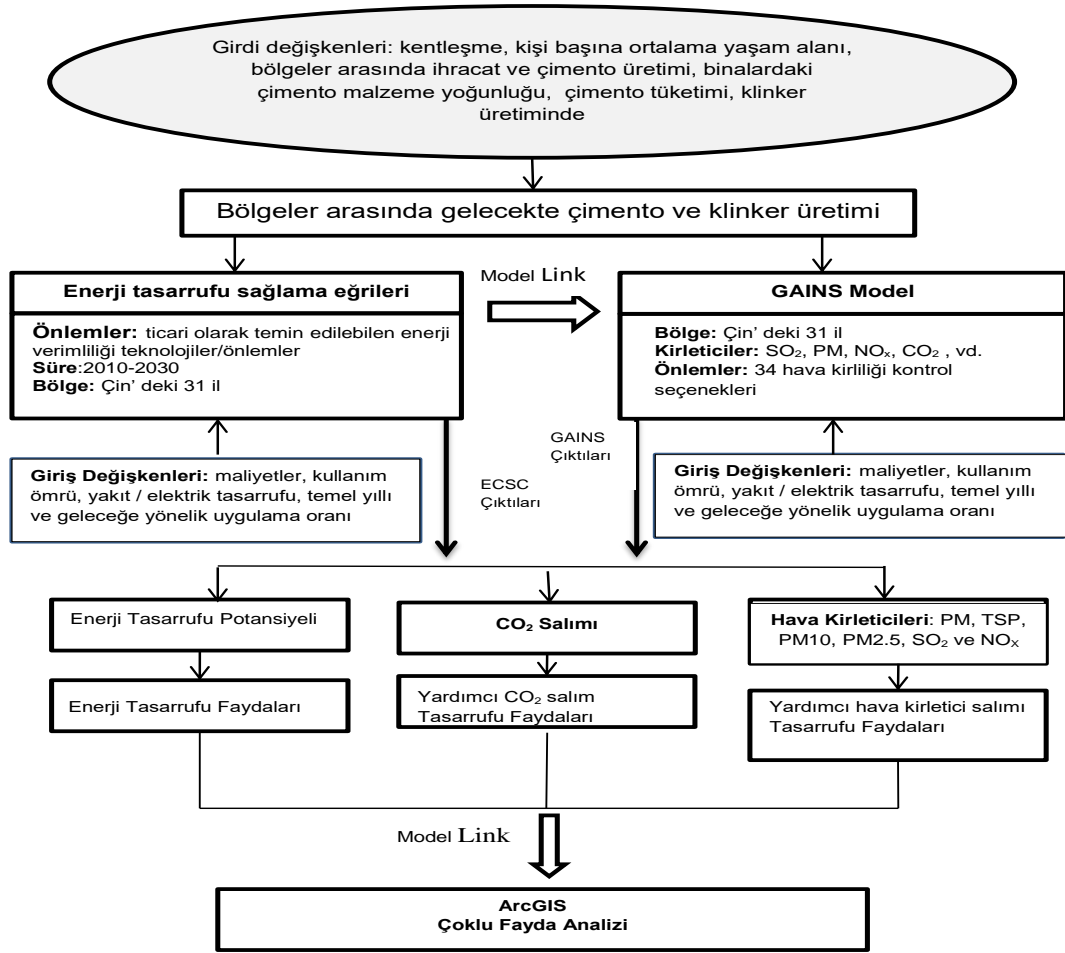
Avrupa ülkelerinin yanı sıra Asya ülkelerinde de çimento sektörüne yönelik bilimsel çalışmalar bulunmaktadır.

Çin' de bulunan çimento fabrikasında Organik Rankin Çevrimi (ORC) ile enerji tasarrufu ve CO₂ salımının azaltılması üzerine çalışma Wang vd. (2015) tarafından yapılmıştır. Fırın soğutma çıkışında bulunan 220 °C' lik atık ısı kaynağının 5 farklı sıvı (heksan, izoheksan, R601, R123 ve R245fa) kullanılarak ORC uygulanmış ve ekonomik performansı ve enerji tüketim verileri ile çevre etkileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, 4000 t/g çimento üretim hattında ORC ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. [20]

- 67,85,540-81,21,650 kWh elektrik üretimi, 2035-2036 ton kömür tasarrufu ve buna bağlı olarak 7743-9268 ton CO₂ salım tasarruf elde edilmiştir.
- % 0.62-0.74 CO₂, %3.83-4.59 SO₂ ve %1.36-1.63 NO_x oranlarında azalma sağlanmıştır.
- Geri dönüşüm süresi 2.74 - 3.42 yıl olarak hesaplanmıştır.
- Kullanılan 5 sıvı sayesinde %1.49-1.83 çevre etki yükünü, % 0.74-0.92 küresel ısınma potansiyelini, %2.34-2.84 asitleme potansiyelini, %0.96-1.22 ötrofikasyon potansiyelini, %2.38-2.89 insanlara toksit etkisi potansiyeli oranlarda azaltma sağlamıştır.
- En iyi ekonomik performansı ve salım oranlarında en yüksek düşüşü sağlayan R601 sıvısı olarak belirlenmiştir.

ORC' ler çimento sektöründe kullanımı artıkça ekonomik performansının da artacağı belirtilmiştir.

Çin’ de enerji tüketiminde 2. sırada yer alan çimento sanayisi toplam enerji tüketiminin %7’sini, toplam emisyonların %15 CO₂ salınımını, hava kirlleticilerden %21 PM, %4 SO₂ ve %10 NO_x oranlarında gerçekleştirmektedir. Zhang vd. (2015) tarafından yapılan çalışma kapsamında her bölgenin maliyet verimliliği ve teknik enerji tasarruf potansiyelinin tespit edilebilmesi için bölgesel enerji tasarrufu tedarik eğrileri (provincial energy conservation supply curves (ECSC)) elde edilmiştir. Aynı çalışmada hava kirleticilerinin hesaplanması için sera gazı ve hava kirliliği etkileşimleri ve sinerjileri modeli (Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS)) oluşturulmuştur. CO₂ ve hava kirleticilerinin salımlarının azaltılmasının konumsal boyutta ortaya konması için coğrafik bilgi sistemi uygulaması olan ArcGIS kullanılmıştır. (Şekil 2.3)



Şekil 2.3 ECSC, GAINS Modeli ve ArcGIS’ in birlikte kullanılması ile sağlanan faydaların değerlendirilmesi [21]

Çalışmada Fujian ve Hainan dışında Çin’de çimento üretiminin yarısının güney ve doğu sahillerinde gerçekleştirildiği görülmüştür. Çimento ve klinker üretimi, yakıt

yapısı, enerji yoğunluğuna bağlı olarak CO₂ ve hava kirleticileri ile enerji tüketimi bölgeler arasında değişiklik göstermektedir. Bunun ana sebebi çimento/klinker oranıdır. [21]

Tayvan'ın çimento sektöründe enerji tasarrufu durumu Sua vd. (2013) tarafından incelenmiştir. On-line Enerji Bildirgesi sistemleri ile enerji denetim sistemi ve enerji tasarrufu çalışmalarının etkileri ortaya konmuştur. Enerji denetim grubu tarafından Tayvan bulunan 7 çimento fabrikasını 2011 yılında denetlemiş, öneriler ve teknik hizmetler sunmuşlardır. Denetimler sonrasında 2571,6 MWh elektrik ve 1002,8 kilo litre ham petrol eşdeğerinde termal enerji tasarruf potansiyeli ortaya koymuşlardır. Toplam potansiyel enerji tasarrufu ile 122 hektar ormanın CO₂ absorbe etmesine karşılık gelecek olan 4560 t CO₂ salımı tasarrufu sağlanmış olacaktır.

Uygulanan enerji denetimi üzerine,

- Enerji denetimleri desteklenmeli ve uygulanmalı,
- Hükümet ve işletmelerin enerji verimliliği arttırmak ve sera gazı salımlarının azaltılması için yakın işbirliği yapmalı,
- Sera gazı salımının ve enerji tüketiminin azaltılması için hükümet tarafından teşviklerin sağlanması, yeni enerji tasarruf teknolojileri için indirimler yapılması,

sonuçlarını ortaya koymuşlardır. [22]

Dünya örneklerine kıyasla ülkemiz çimento sektörüne yönelik bilimsel çalışmalar görece daha azdır.

Ülkemizde ise Gaziantep' de bulunan bir çimento fabrikası incelenerek, döner fırının enerji tüketimine etki eden parametreler üzerine analizler yapılmıştır. [23] Termodinamiğin I. ve II. Kanunu üzerinden çalışma yapılmadan önce fırının verimi hesaplanmış ve enerji kaybı 12,5 MW olarak hesaplanmıştır. Fırının içerisindeki refrakter tipi değiştirilerek ve anazst katmanı ile birlikte kullanılmıştır. Bu kapsamda yapılan işlemler neticesinde tesisin 1 yıllık çalışması takip edilmiştir ve elde edilen sonuçlar şu şekilde ortaya konmuş, yıllık kömür kullanımı düşürülmüş, CO₂ salımı azalmış ve yanma verimi yükselmiştir.

3. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ VE AMACI

Literatür taramasından görüldüğü üzere, enerji yoğun ve karmaşık bir üretim prosesine sahip çimento sektörü ile ilgili yapılan çalışmaların ilgili proseslerin belirli bölümleri üzerine yoğunlaşarak enerji tasarrufu, optimizasyon, CO₂ salımlarının azaltılması gibi konularda çalışmalar yapılmıştır.

Bu nedenle literatürde bazı eksiklikler bulunmaktadır. Bu eksikliklerin aşağıdaki gibi ortaya konulması mümkündür.

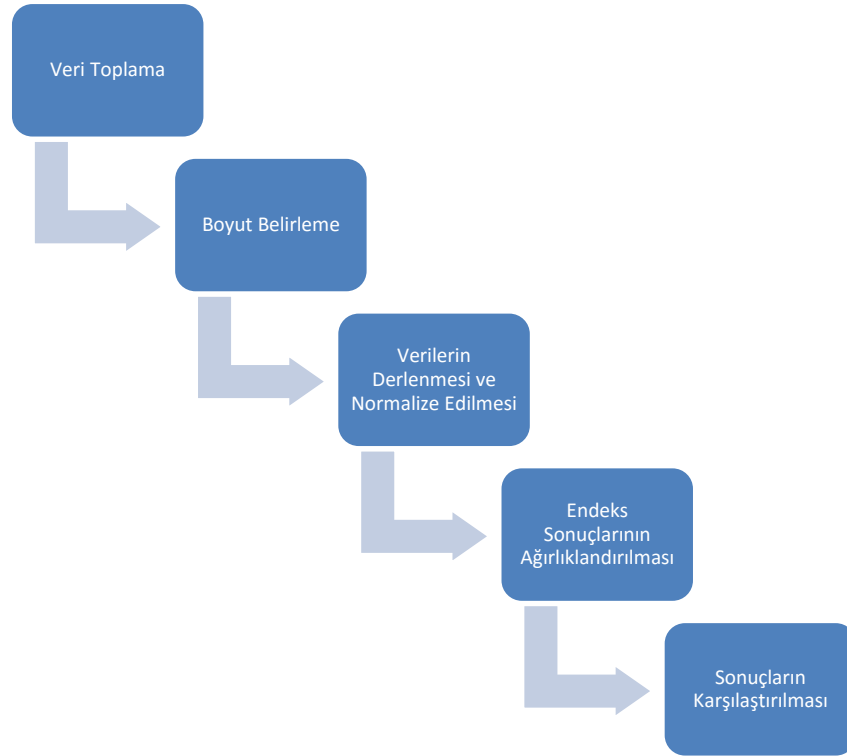
- Ülkemize ait tüm entegre çimento fabrikalarına ait bir çalışma mevcut değildir.
- Tüm proseslerin dikkate alındığı bir çalışma bulunmamaktadır.
- Hem enerji hem çevre hem de ekonomik boyutların bir arada olduğu çok-kriterli çalışmalar bulunmamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, ülkemizdeki çimento fabrikalarının dahil olduğu, enerji, çevre ve ekonomik boyutlarda incelenerek oluşturulacak çok-kriterli endeks çalışmaları ile **Sürdürülebilir Çimento Sektörü Endeksi** oluşturulması amaçlanmaktadır.

Endeks sonuçlarında elektrik tüketimi toplam 7.606.989 MWh ve 58.681.660 Ton CO₂/Yıl miktarında CO₂ salımı bulunan ülkemiz çimento sektöründe, tasarruf önerileri oluşturularak ortaya konacaktır.

4. YÖNTEM VE UYGULAMA

Araştırmanın odağını oluşturan Sürdürülebilir Çimento Sektörü Endeksi'nin geliştirilmesi için izlenen yöntem çeşitli adımlardan oluşmaktadır. Yöntemi oluşturan adımlar Şekil 4.1' de verildiği üzere süreçlere ait verilerin toplanması, boyutların ve alt göstergelerin belirlenmesi, verilerin derlenmesi ve kompozit yöntemiyle normalize edilmesi, gösterge bazında endeks sonuçlarının ağırlıklandırılması ve sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır.



Şekil 4.1 Yöntem Akış Şeması

4.1. Metodoloji ve Adımlar

Çalışmada farklı birimlere ait verilerin değerlendirilmesinin yapılabilmesi için normalize yöntemi kullanılarak kompozit endeks oluşturulmuştur. Aynı gösterge setindeki değerleri setin en yüksek ve en düşük değerlerine göre 1-0 arası normalize etmektedir. [24] Göstergeler en yüksek ve en düşük değerler arasında normalize edilirken göstergenin kapsamına göre iki farklı durum oluşabilmektedir. Bu nedenle yüksek değerlerin tercih edildiği durumlar (örn. verimlilik) ve düşük değerlerin tercih edildiği durumları (örn. çevre etkileri, salımlar) için iki farklı

denklem bulunmaktadır (Denklem (4.1) ve (4.2)). Verilerin normalize edilmesi açısından bu yöntem min-maks yöntemi olarak bilinmektedir.

Yüksek değerin tercih edildiği durumlar:

$$N = (D - Min) / (Maks - Min) \quad (4.1)$$

Düşük değerin tercih edildiği durumlar:

$$N = (D - Maks) / (Min - Maks) \quad (4.2)$$

Yukarıdaki denklemlerde N = normalize değer; D = toplanan verinin ham değeri; Min = veri setinin en düşük değeri ve $Maks$ = veri setinin en yüksek değeridir.

4.1.1 Veri toplama

Şekil 4.2' de siyah ve yeşil renklerle belirtilmiş Türkiye aktif halde bulunan 49 adet Entegre Çimento Fabrikasının 2014 yılında ait Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'ne vermiş olduğu verilerin kapsamı 6 temel göstergeden oluşmaktadır.

- Aşama bazında enerji tüketim,
- CO₂ salım,
- Fosil Yakıt Kullanım,
- Atık Yakıt Kullanım,
- Elektrik Enerjisi Kullanım (Gündüz-Puant-Gece),
- WHR İle Üretilen Enerji,

Fabrikalarda gerçekleşen miktarlarına ait veriler dikkate alınarak, tezin temelini oluşturan boyut ve süreçlerin belirlenmesini sağlamıştır.

49 fabrikaya ait isimlendirmeler gizlilik sebebiyle numaralarla tanımlanmıştır.



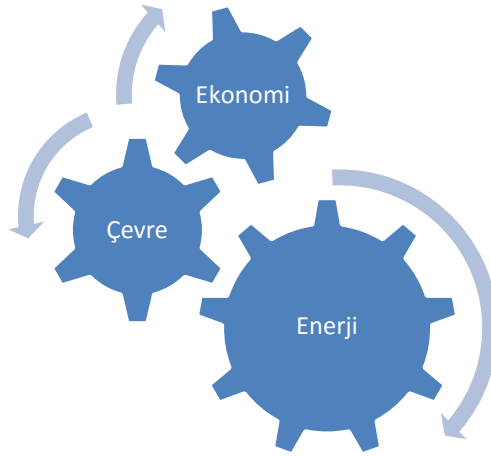
Şekil 4.2 Türkiye’de bulunan çimento fabrikaları [9]

4.1.2 Boyut belirleme ve endeks oluşturma

Çimento sektörü gerektirdiği işlemler nedeniyle enerji yoğun bir sektör olup, Dünyada tüketilen enerjinin %2' sinden fazlasını çimento sektörü tarafından tüketilmektedir. [3]

Sektörde, Şekil 1.2' de görüleceği üzere prosesten kaynaklı CO₂ salımı %57,6 ve fosil yakıt kaynaklı salım ise % 35,5'dir.

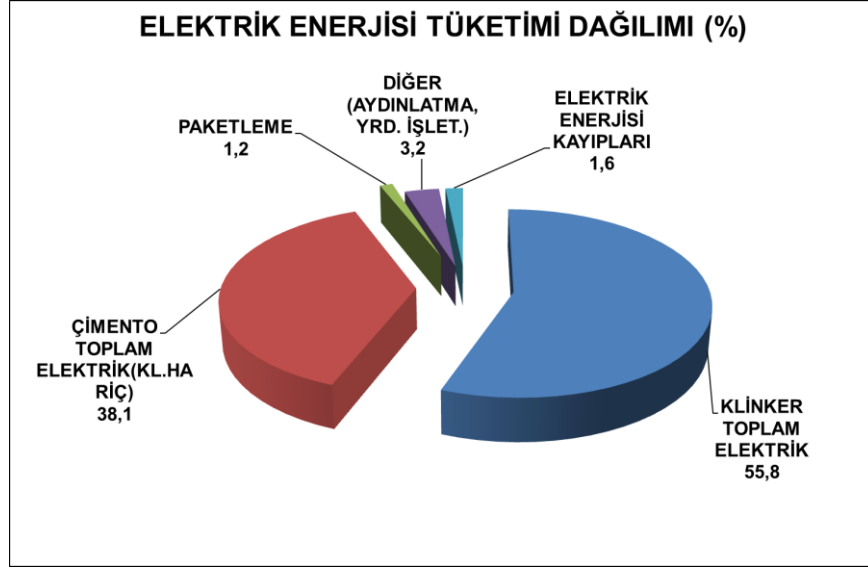
Türk çimento sektörünün 2012 sonu itibariyle üretim kapasitesi 108,4 milyon ton/yıl'a ulaşmış olup, Avrupa'da üretim ve ihracatta ilk sırada, dünyada ise ihracatçı ülkeler arasında ilk sırada yer almaktadır. 2012 yılında Türk çimento sektörü cirosu yaklaşık 3,2 milyar ABD Doları olarak hesaplanmaktadır. [2]



Şekil 4.3 Sürdürülebilirlik

Birbirinden bağımsız olamayan, sürdürülebilirlik için önem taşıyan Şekil 4.3' deki çark sistemi ile gösterilen, çimento üretiminde enerjinin yoğun olarak kullanıldığı, salımın gerçekteği süreçler ve ekonomik yapısı üzerine 3 boyut, tezin ana temasının göstermektedir. Çevre boyutunun içerisinde yer alan göstergelerde sağlık dahil olmak üzere toplum boyutu ile ortak etkiler olduğu için ayrıca toplum için bir gösterge oluşturulmamıştır. Herhangi birindeki iyi ya da kötü yöndeki değişim diğer göstergeleri de etkilemektedir. Örneğin kullanılan fosil yakıtın düşürülmesi ile ekonomik olarak iyi yönde ilerleme, çevre boyutunda CO₂ salımında düşüş ve enerji tüketimi açısından tasarruf sağlanması anlamına gelmektedir.

Boyutların altındaki göstergeler bütüncül olarak değerlendirilmiş ve toplam 15 adet gösterge üzerinde çalışma yapılmıştır. Göstergeler de boyutların temelleri oluşturmaktadır.



Şekil 4.4 Birincil Elektrik Enerjisi Tüketimi Dağılımı [6]

Şekil 4.4 ' de görüldüğü üzere çimento üretiminde enerjinin yoğun olarak kullanıldığı süreçler klinker ve çimento üretimidir. Hammadde kırma harmanlara farin öğütme, klinker pişirme ve çimento öğütme prosesleri dikkate alınarak enerji boyutu altındaki göstergeler tanımlanmıştır.

(Tablo 4.1) Enerji boyutundaki göstergelerin aşama bazında verilmesi önem taşımaktadır.

Tablo 4.1 Enerji Boyutu Kapsamda Yer Alan Göstergeler

No	Gösterge	Birim
1.1	Kırma-Harmanlama Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu	kWh / ton klinker
1.2	Farin Öğütme Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu	kWh / ton klinker
1.3	Klinker Pişirme Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu	kWh / ton klinker
1.4	Çimento Üretimi Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu	kWh / ton çimento

Enerji boyutunun yanı sıra sürdürülebilir çimento sektörü için önem taşıyan diğer bir boyut çevre boyutudur. Bu kapsamda, çimento üretiminde CO₂ salımı;

- a. Ham maddenin kalsiyasyonunda (direkt)
- b. Fırın ve kurutucularda kullanılan yakıtın içindeki karbondan (direkt)
- c. Üretimde kullanılan elektriğin termik santrallerde üretilmesinden (endirekt)

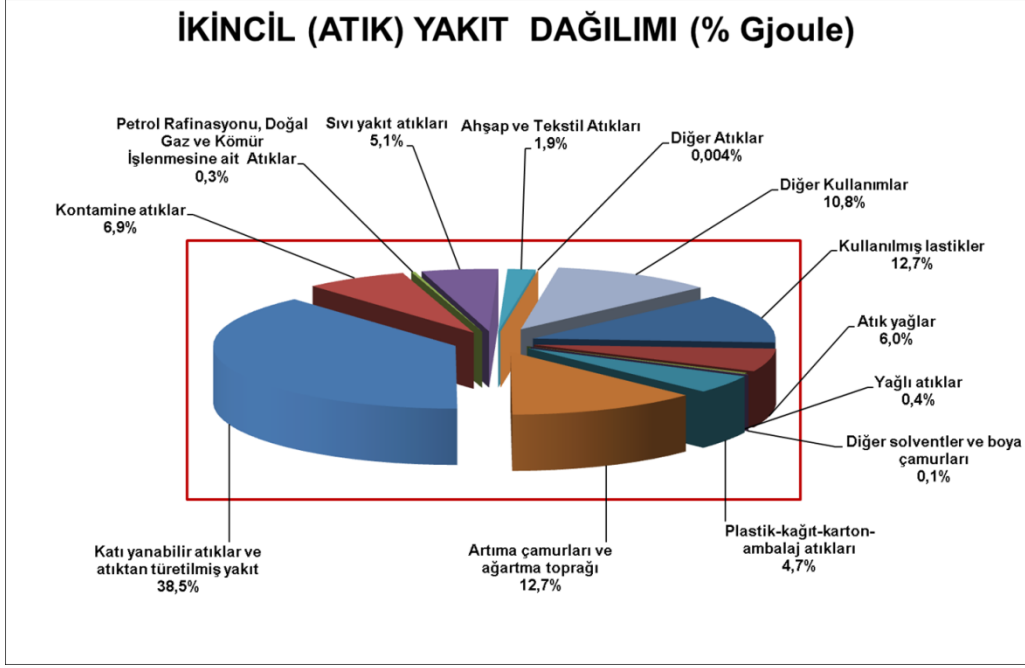
kaynaklanmaktadır. Sürdürülebilir Çimento Sektörü Endeksi'nin çevre boyutu kapsamında ele alınan göstergeler Tablo 4.2' de verilmiştir. Boyutu oluşturan göstergeler CO₂ salımlarını farklı açılardan ele alacak şekilde tasarlanmıştır.

Tablo 4.2 Çevre Boyutu

No	Gösterge	Birim
2.1	Çimento Üretimi Kaynaklı Doğrudan CO ₂ Salım Yoğunluğu	kg CO ₂ / ton klinker
2.2	Yakıt Kaynaklı Doğrudan CO ₂ Salım Yoğunluğu	kg CO ₂ / ton klinker
2.3	Atık Yakıt Kullanımına Dayalı CO ₂ Salım Tasarrufu	Ton CO ₂
2.4	Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı CO ₂ Salım Tasarrufu	Ton CO ₂

2.1 nolu gösterge yukarıdaki (a) maddesindeki, 2.2 nolu gösterge ile de (b) maddesindeki CO₂ salımı durumları incelenerek çevre boyutundaki göstergeler içerisinde ilk sıraları almışlardır. Şekil 1.2' de görüleceği üzere (c) maddesinde yer alan elektrik tüketimi kaynaklı indirekt CO₂ salımı %6,9 oranındadır. Diğer (a) ve (b) maddelerindeki oran (c) maddesine göre oldukça yüksektir.

Şekil 4.5' de çimento sektöründe kullanılan ikincil (atık) yakıt dağılımı gösterilmektedir. (b) maddesinde yer alan fosil yakıt kaynaklı CO₂ salımı ancak atık yakıt kullanılarak düşürülebileceği için bu kapsamda 2.3 no.lu gösterge ile atık yakıt kullanan ve kullanmayan fabrikaların durumları incelenmektedir.



Şekil 4.5 İkincil Yakıt Dağılımı [6]

Atık ısıdan geri kazanım sistemi olan fabrikaların ürettikleri elektrik enerjisi ile ne kadarlık CO₂ salım tasarrufu sağlandığı 2.4 no' lu gösterge ile ifade edilmiştir.

Sürdürülebilir Çimento Endeksi'nin ekonomi boyutu üçüncü boyutu oluşturmaktadır. Boyut kapsamında geliştirilen göstergeler Tablo 4.3' de verilmektedir.

Tablo 4.3. Ekonomi Boyutu

No	Gösterge	Birim
3.1	Toplam Fosil Yakıt Maliyeti	TL
3.2	Toplam Çimento Üretimi	Ton
3.3	Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı Ekonomik Kazanç	TL
3.4	Puant Kullanımı	%

Tablo 4.4 Çimento Sektörü Maliyet Kalemleri [25]

Türk Çimento Sektörü Sınai Maliyet Kalemleri	Ortalama Maliyet %
Hammadde ve Yardımcı Maddeler	9,6
Elektrik	21,1
Yakıt	38,0
İşçilik	9,4

Amortisman	7,0
Diğer Sabit Giderler	13,1
Diğer	1,8
Toplam	100,0

Tablo 4.4' de çimento sektöründe maliyet kalemlerinin içerisinde en büyük oran %38 ile yakıt maliyetidir. 2014 yılı içerisinde kullanılan fosil yakıt maliyetleri dikkate alınarak Ekonomi boyutunda 3.1 no'lu gösterge oluşturulmuştur.

Tezin giriş kısmındaki Tablo 1.4' de yıllara bağlı olarak çimento ve klinkerin ihracat miktarları verilmişti. Bu kapsamda kapasitesini en yüksek oranda kullanarak en çok çimento üretimi gerçekleştiren fabrikaların ekonomiye katkısından dolayı üçüncü bir gösterge oluşturulmuştur. Bu gösterge Tablo 4.3' de Toplam Çimento Üretimi olarak verilmiştir (Gösterge 3.2).

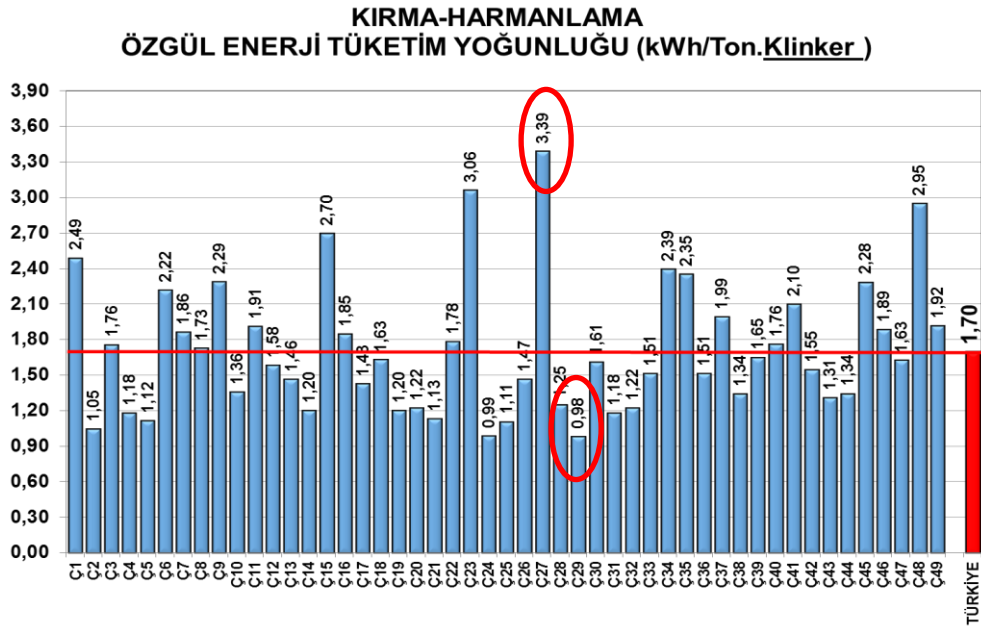
Klinker üretim sürecindeki yüksek ısıl prosesten kaynaklı gaz çıkış sıcaklığı, teknolojik yapılarına göre farklılaşmakla beraber ön ısıtıcı sonrasında 280 °C – 350 °C arasında, klinker soğutma çıkışında da 250 °C – 300 °C arasında değişen ve klinker üretim kapasitesine bağlı olarak artan debilerdeki atık sıcak gazlar, yüksek ısıl işlemdeki üretim sürecinde tekrar kullanılmadığından direkt olarak atmosfere atılmaktadır. WHR sistemi bulunan fabrikalar bu ısıdan faydalanarak elektrik üretmekte ve ekonomik kazanç sağlamaktadırlar. 3.3 nolu gösterge ile bu konudaki durum değerlendirmesi yapılmıştır.

01/01/2014 Tarihinden İtibaren Uygulanacak Fonsuz Tarifeler										
Görevli tedarik şirketinden enerji alan iletim sistemi kullanıcıları tüketiciler										
1 NOLU	Sanayi									
	Tek Zamanlı	Gündüz	Puant	Gece						
	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh						
	18,1641	18,044	32,281	7,7753						
Dağıtım Sistemi Kullanıcıları										
2 NOLU	İletim şalt sahalarnın dağıtım şirketinin kullanımındaki OG baralarına özel hattı ile bağlı tek bir tüzel kişi durumundaki kullanıcılar									
	Görevli Tedarik Şirketinden Enerji Alan Tüketiciler					Özel tedarikçiden enerji alan tüketiciler için sistem kullanımı				
		Kapasite	Aktif Enerji							
		Güç Bedeli	Güç Apm Bedeli	Tek Zamanlı	Gündüz	Puant	Gece	Reaktif Enerji	Aktif Enerji	Reaktif Enerji
		kr/Ay/kW	kr/Ay/kW	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kVARh	kr/kWh	kr/kVARh
	Sanayi			20,8578	20,741	34,979	0	0	10,4690	10,0494
	Ticaretshane			24,8241	23,028	37,608	0	3	12,0653	10,0494
	Tarimsal Sulama			22,0103	20,747	36,995	0	3	12,4389	10,0494
3 NOLU	İletim şalt sahalarnın dağıtım şirketinin kullanımındaki OG baralarına dağıtım şirketi hattı ile bağlı tek bir tüzel kişi durumundaki kullanıcılar									
	Görevli Tedarik Şirketinden Enerji Alan Tüketiciler					Özel tedarikçiden enerji alan tüketiciler için sistem kullanımı				
		Kapasite	Aktif Enerji							
		Güç Bedeli	Güç Apm Bedeli	Tek Zamanlı	Gündüz	Puant	Gece	Reaktif Enerji	Aktif Enerji	Reaktif Enerji
		kr/Ay/kW	kr/Ay/kW	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kVARh	kr/kWh	kr/kVARh
	Sanayi	119,5958	239,1916	22,2424	22,123	36,363	5	9	11,8536	10,0494
	Ticaretshane									
	Tarimsal Sulama									

Şekil 4.6 Elektrik Tarifeleri [26]

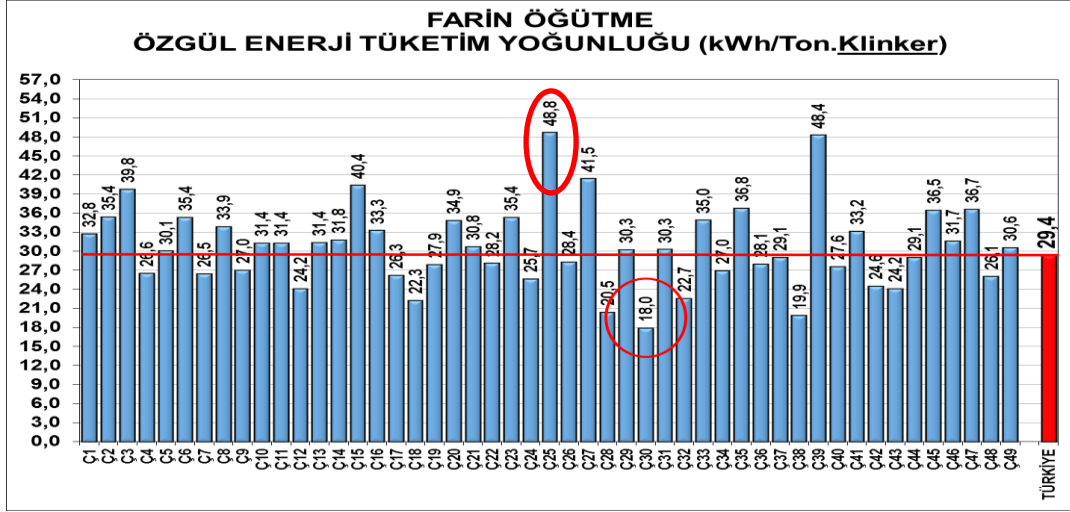
Şekil 4.6' da 2014 yılında sanayiye uygulanacak elektrik tarifeleri yer almaktadır. Kullanılan elektriğin kWh karşılıkları belirlenmiştir. Gündüz 18,04 kr/kWh, Puant 32,28 kr/kWh ve Gece 7,77 kr/kWh olarak belirlenmiştir. Çok zamanlı tarife uygulamasında Gündüz 06-17, Puant 17-22, Gece 22-06 saatleri arasındır.

Ekonomi boyutunun son göstergesi puant kullanımı olarak belirlenmiştir (Gösterge 3.4).



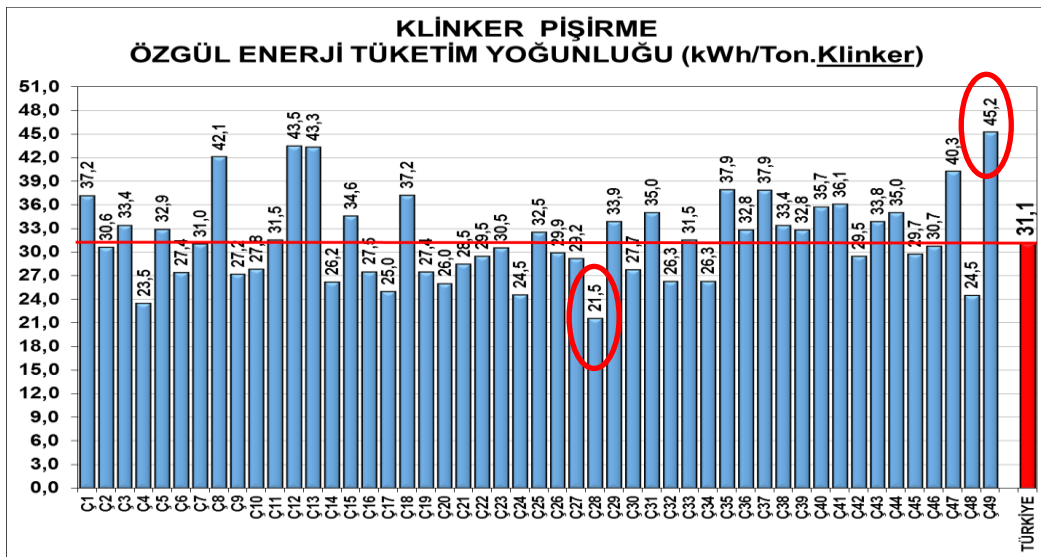
Şekil 4.7 Kırma-Harmanlama Özgül Enerji Tüketim Yoğunluğu

49 fabrikaya ait toplanan verilerde Kirma-Harmanlama sürecinde gerçekleşen özgül enerji tüketim yoğunluğu değerlendirildiğinde Türkiye ortalaması 1,70 kWh/Ton.Klinker olarak gerçekleşmiş iken, 27 no' lu fabrikanın bu süreçte en enerji tüketim yoğunluğu 3,39 kWh/Ton.Klinker ile en yüksek olan fabrika, bunun yanında 29 no' lu fabrikanın ise enerji tüketimi en düşük olan fabrika olduğu görülmektedir.



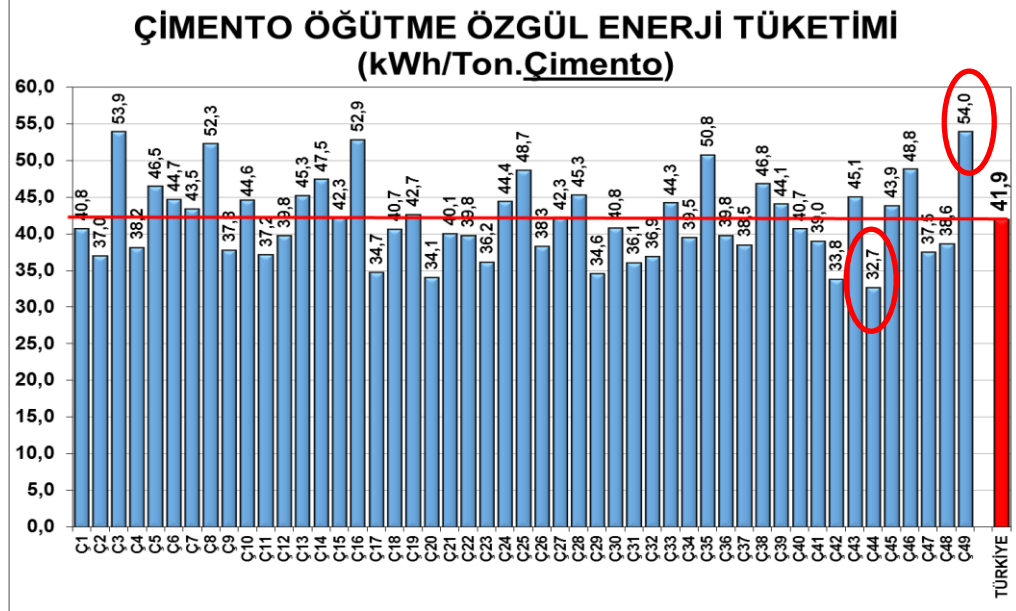
Şekil 4.8 Farin Öğütme Özgül Enerji Tüketim Yoğunluğu

Farin Öğütme sürecinde gerçekleşen özgül enerji tüketim yoğunluğu Türkiye ortalaması 29,4 kWh/Ton.Klinker olarak görülmektedir. 25 no' lu fabrikanın enerji tüketim yoğunluğu 48,8 kWh/Ton.Klinker ile en yüksek olan fabrika olup 30 no' lu fabrikada enerji tüketimi 18,0 kWh/Ton.Klinker en düşük olan fabrika olmuştur.



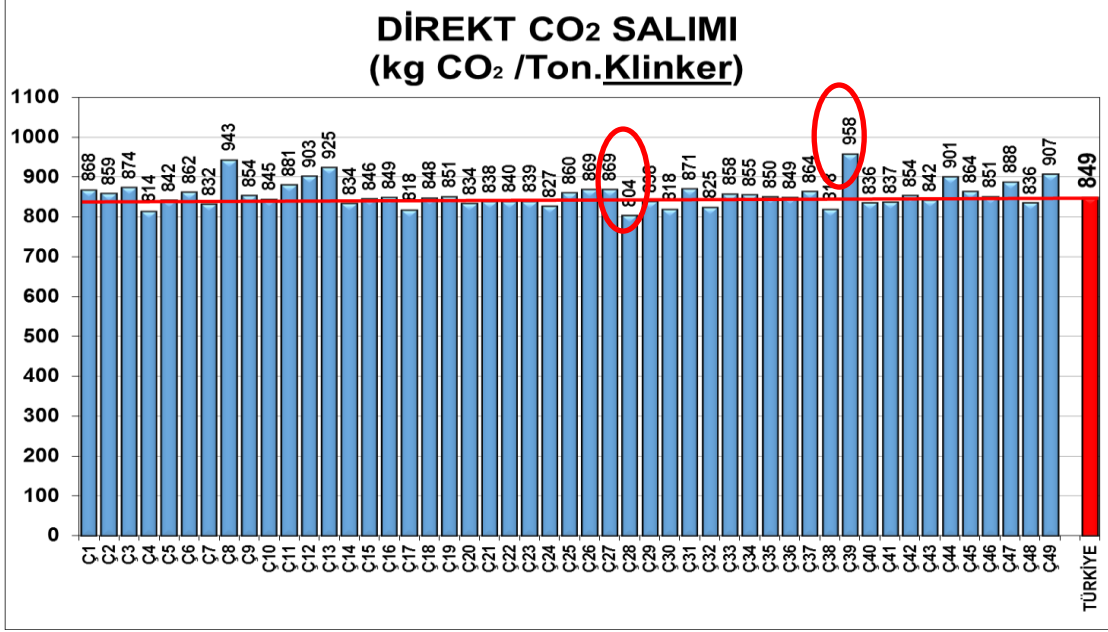
Şekil 4.9 Klinker Pişirme Özgül Enerji Tüketim Yoğunluğu

Klinker Pişirme sürecinde gerçekleşen özgül enerji tüketim yoğunluğu Türkiye ortalaması 31,1 kWh/Ton.Klinker olarak görülmektedir. 45,2 kWh/Ton.Klinker sonucu ile 49 no' lu fabrika en yüksek enerji tüketen fabrika olup, 21,5 kWh/Ton.Klinker ile 28 No' lu fabrika en düşük özgül enerji tüketim yoğunluğu olan fabrika olarak ön plana çıkmıştır.



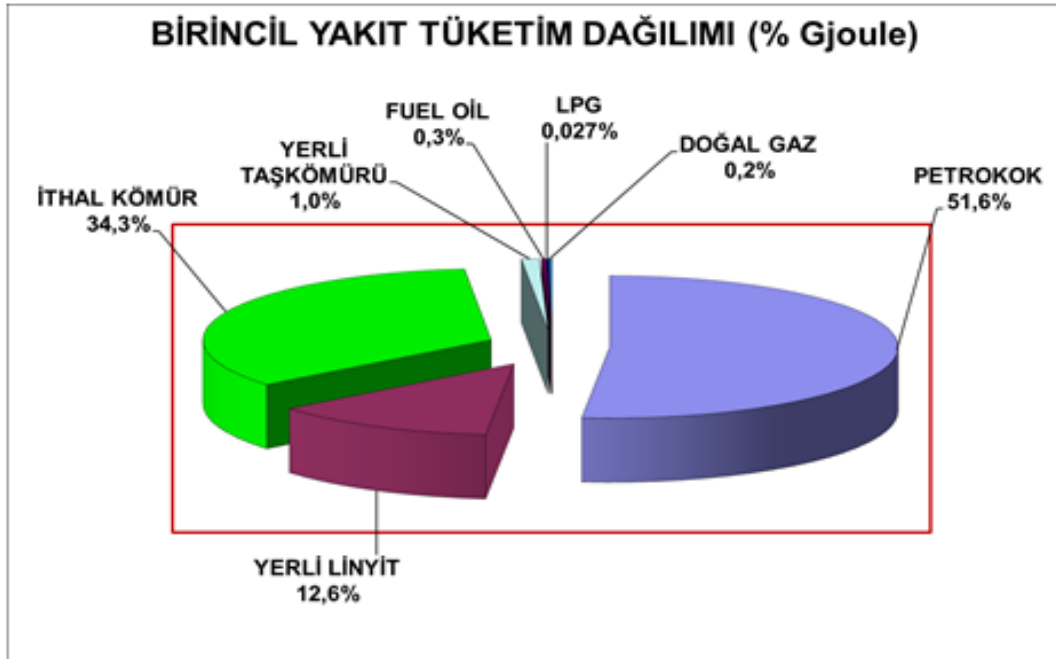
Şekil 4.10 Çimento Öğütme Özgül Enerji Tüketim Yoğunluğu

Şekil 4.10' da görüldüğü üzere çimento öğütme özgül enerji tüketim yoğunluğu 54,0 kWh/Ton.Çimento 49 no' lu fabrika en yüksek, 32,7 kWh/Ton.Çimento ile de 44 no'lu fabrika en düşük enerji tüketim yoğunluğuna sahip fabrikalardır. Türkiye ortalaması 41,9 kWh/Ton.Çimento' dur.

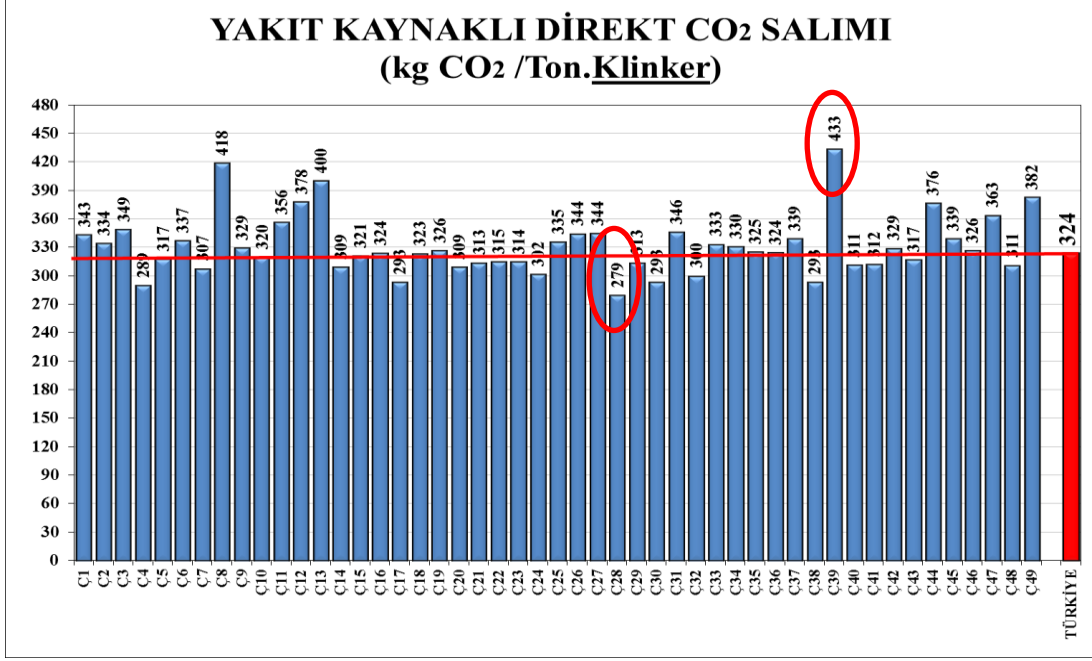


Şekil 4.11 Direkt CO₂ Salımı

Direkt CO₂ Salımı Türkiye ortalaması 849 kgCO₂/Ton.Klinker olarak görülmektedir. 958 kgCO₂/Ton.Klinker sonucu ile 39 no' lu fabrika en yüksek CO₂ salımı gerçekleştiren fabrika olup, 804 kgCO₂/Ton.Klinker ile 28 No' lu fabrika en düşük CO₂ salımı gerçekleştiren fabrika olarak ön plana çıkmıştır.



Şekil 4.12 Birincil Yakıt Tüketimi Dağılımı [6]

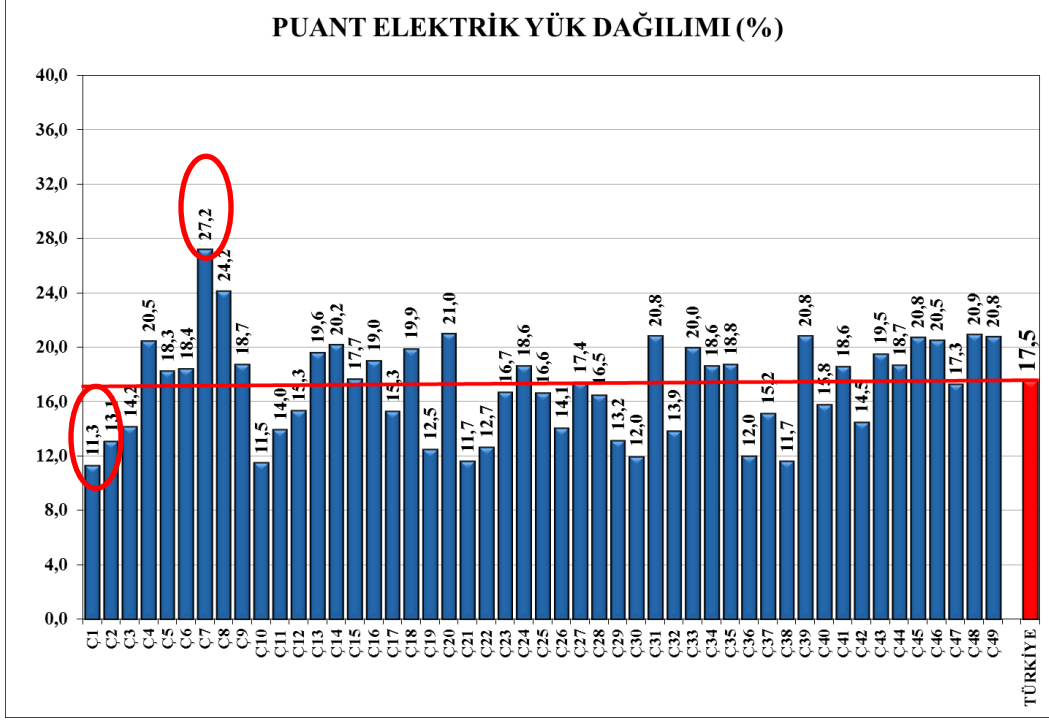


Şekil 4.13 Yakıt Kaynaklı Direkt CO₂ Salımı [6]

Şekil 4.12' de çimento sektöründe kullanılan fosil yakıt dağılımı gösterilmektedir. Buna bağlı olarak fabrika bazında kullanılan fosil yakıtlarına bağlı olarak CO₂ salım durumları Şekil 4.13' de gösterilmektedir. Yakıt Kaynaklı Direkt CO₂ Salımı değerlendirildiğinde Türkiye ortalaması 324 kgCO₂/Ton.Klinker olarak gerçekleşmiştir. 39 no' lu fabrikanın bu süreçte CO₂ salımı 433 kgCO₂/Ton.Klinker ile en yüksek olan fabrikadır, bunun yanında 28 no' lu fabrikada CO₂ salımı en düşük olan fabrika olarak görülmektedir.

YEGM tarafından yakıt kaynaklı CO₂ salımı şu şekilde hesaplanmaktadır; kullanılan yakıtların (fosil yakıtlar ve atık yakıtlar) kullanım miktarları ile ortalama alt kalori değerlerinin çarpılarak GJoule çevrilmektedir. Çıkan değer, CO₂ Emisyon katsayısı (kg CO₂/GJ) ile çarpılmaktadır. Bulunan toplam değerler fiili üretime bölünerek CO₂ salım miktarı hesaplanmaktadır. İleriye dönük çalışmalarda CO₂ salımlarının hesaplamasında ekserji tabanlı çalışmaların yapılması daha uygun olacaktır.

Elektrik tüketimi puant durumunda en yüksek fiyatlandırmaya tabi tutulmaktadır. Bu kapsamda puant aralığındaki saatlerde elektrik yük miktarı yüksek olan fabrikanın maliyetleri yüksek olmaktadır.



Şekil 4.14 Puant Elektrik Yük Dağılımı [6]

Bu kapsamda % 27,2 ile 7 no' lu fabrika en yüksek, 1 no' lu fabrika ise % 11,3 ile en düşük puant kullanımı gerçekleştiren fabrika olmuştur. Türkiye ortalaması da 17,5' dir.

4.1.3 Ağırlıklandırma ile sonuçların karşılaştırılması

Belirlenen göstergelere ait toplanan veri değerleri normalize edilerek üç boyut altındaki göstergelerin toplam değerleri Denklem 3'te ifade edilen Sürdürülebilir Çimento Endeksi (SÇE) olarak ortaya konulmuştur. Öncelikli olarak 3 boyut ayrı ayrı değerlendirilerek ön plana çıkan fabrikalar belirlenmiştir. Enerji, çevre ve ekonomi boyutları eşit ağırlıkla değerlendirilerek ilk 5 fabrika belirlenmiştir. Enerji boyutu ön plana çıkartılarak 0,5 çarpımı ile çevre ve ekonomi boyutu 0,25 çarpımı ile değerlendirilip sonuçlar dikkate alınmıştır.

Ön plana çevre ve ekonomi boyutları da çıkartılarak aynı yol izlenerek değerlendirilmiştir.

$$\sum SÇE = \alpha_1 \sum EN + \alpha_2 \sum ÇE + \alpha_3 \sum EK \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'te yer alan değişkenler Denklem 4.4-4.6'da verilmektedir.

$$\sum EN = EN_{1,1} + EN_{1,2} + EN_{1,3} + EN_{1,4} \quad (4.4)$$

Burada $\sum \mathbf{EN}$ enerji boyutunun toplamıdır.

Enerji boyutu toplamında yer alan göstergeler;

EN_{1.1}: Kırma-Harmanlama Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu

EN_{1.2}: Farin Öğütme Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu

EN_{1.3}: Klinker Pişirme Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu

EN_{1.4}: Çimento Üretimi Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu

$$\sum \mathbf{CE} = \mathbf{CE}_{2.1} + \mathbf{CE}_{2.2} + \mathbf{CE}_{2.3} + \mathbf{CE}_{2.4} \quad (4.5)$$

Burada $\sum \mathbf{CE}$ çevre boyutunun toplamıdır.

Çevre boyutu toplamında yer alan göstergeler;

CE_{2.1}: Çimento Üretimi Kaynaklı Doğrudan CO₂ Salım Yoğunluğu

CE_{2.2}: Yakıt Kaynaklı Doğrudan CO₂ Salım Yoğunluğu

CE_{2.3}: Atık Yakıt Kullanımına Dayalı CO₂ Salım Tasarrufu

CE_{2.4}: Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı CO₂ Salım Tasarrufu

$$\sum \mathbf{EK} = \mathbf{EK}_{3.1} + \mathbf{EK}_{3.2} + \mathbf{EK}_{3.3} + \mathbf{EK}_{3.4} \quad (4.6)$$

Burada $\sum \mathbf{EK}$ ekonomi boyutunun toplamıdır.

Ekonomi boyutu toplamında yer alan göstergeler;

EK_{3.1}: Toplam Fosil Yakıt Maliyeti

EK_{3.2}: Toplam Çimento Üretimi

EK_{3.3}: Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı Ekonomik Kazanç

EK_{3.4}: Puant Kullanımı

Denklem 4.3' de α_1 , α_2 ve α_3 ise boyut ağırlıklarıdır.

4.2 Endeks Uygulaması

4.2.1 Enerji boyutunda verilerin derlenmesi

Tez kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde, tüm boyutlarda ve göstergeler fabrika numaraları ve gösterge miktarlarına göre düzenlenmiş ve minimum ve maksimum değerler gösterge bazında belirlenmiştir. Tablo 4.5' de enerji boyutu kapsamında oluşturulan gösterge verileri bulunmaktadır.

Tablo 4.5 Enerji Boyutu Verileri

FABRİKALAR	ENERJİ BOYUTU			
	Kırma-Harmanlama Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu (kWh / ton klinker)	Farin Öğütme Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu (kWh / ton klinker)	Klinker Pişirme Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu (kWh / ton klinker)	Çimento Üretimi Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu (kWh / ton çimento)
Ç1	2,49	32,82	37,17	40,78
Ç2	1,05	35,45	30,58	37,02
Ç3	1,76	39,85	33,40	53,94
Ç4	1,18	26,59	23,47	38,18
Ç5	1,12	30,10	32,90	46,51
Ç6	2,22	35,40	27,36	44,71
Ç7	1,86	26,51	31,01	43,45
Ç8	1,73	33,94	42,11	52,30
Ç9	2,29	27,04	27,17	37,82
Ç10	1,36	31,37	27,84	44,62
Ç11	1,91	31,35	31,53	37,18
Ç12	1,58	24,17	43,50	39,77
Ç13	1,46	31,43	43,33	45,26
Ç14	1,2	31,82	26,19	47,45
Ç15	2,7	40,44	34,57	42,28
Ç16	1,85	33,32	27,50	52,86
Ç17	1,43	26,26	24,98	34,74
Ç18	1,63	22,29	37,20	40,65
Ç19	1,2	27,95	27,44	42,65
Ç20	1,22	34,90	26,00	34,07
Ç21	1,13	30,79	28,47	40,08
Ç22	1,78	28,17	29,47	39,79
Ç23	3,06	35,38	30,50	36,17
Ç24	0,99	25,71	24,53	44,42

Tablo 4.5 Devam Enerji Boyutu Verileri

Ç25	1,11	48,78	32,54	48,70
Ç26	1,47	28,36	29,87	38,31
Ç27	3,39	41,52	29,17	42,27
Ç28	1,25	20,48	21,55	45,33
Ç29	0,98	30,32	33,87	34,60
Ç30	1,61	17,97	27,74	40,83
Ç31	1,18	30,34	35,00	36,10
Ç32	1,22	22,65	26,28	36,89
Ç33	1,51	34,99	31,49	44,26
Ç34	2,39	27,03	26,29	39,50
Ç35	2,35	36,82	37,93	50,79
Ç36	1,51	28,05	32,79	39,79
Ç37	1,99	29,08	37,85	38,50
Ç38	1,34	19,93	33,36	46,85
Ç39	1,65	48,39	32,81	44,07
Ç40	1,76	27,62	35,74	40,73
Ç41	2,1	33,23	36,09	39,01
Ç42	1,55	24,60	29,47	33,83
Ç43	1,31	24,18	33,84	45,10
Ç44	1,34	29,11	34,99	32,67
Ç45	2,28	36,54	29,73	43,88
Ç46	1,89	31,70	30,72	48,83
Ç47	1,63	36,66	40,28	37,50
Ç48	2,95	26,11	24,49	38,65
Ç49	1,92	30,60	45,22	53,99
En Düşük Değer (Min)	0,98	17,97	21,55	32,67
En Yüksek Değer (Maks)	3,39	48,78	45,22	53,99

4.2.2 Çevre boyutunda verilerin derlenmesi

Tablo 4.6' da çevre boyutu kapsamında oluşturulan gösterge verileri bulunmaktadır.

Tablo 4.6 Çevre Boyutu Verileri

FABRİKALAR	ÇEVRE BOYUTU			
	Çimento Üretimi Kaynaklı Doğrudan CO2 Salım Yoğunluğu (kg CO2 / ton klinker)	Yakıt Kaynaklı Doğrudan CO2 Salım Yoğunluğu (kg CO2 / ton klinker)	Atık Yakıt Kullanımına Dayalı CO2 Salım Tasarrufu (Ton CO2)	Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı CO2 Salım Tasarrufu (Ton CO2)
Ç1	867,99	342,99	3597,75	0,00
Ç2	859,01	334,01	4044,53	0,00
Ç3	873,56	348,56	384,98	0,00
Ç4	814,48	289,48	3499,99	0,00
Ç5	842,17	317,17	16350,40	0,00
Ç6	861,83	336,83	0,00	0,00
Ç7	832,32	307,32	874,63	0,00
Ç8	943,43	418,43	0,00	0,00
Ç9	853,98	328,98	0,00	0,00
Ç10	844,64	319,64	0,00	0,00
Ç11	881,19	356,19	35274,01	19841,26
Ç12	902,61	377,61	409,77	27831,24
Ç13	924,53	399,53	0,00	0,00
Ç14	833,89	308,89	18291,18	54482,72
Ç15	846,01	321,01	15521,67	0,00
Ç16	848,55	323,55	79874,22	2927,48
Ç17	817,86	292,86	0,00	0,00
Ç18	847,95	322,95	77257,97	50653,06
Ç19	851,16	326,16	10812,93	0,00
Ç20	833,97	308,97	86192,44	0,00
Ç21	838,49	313,49	473,89	0,00
Ç22	839,54	314,54	21349,63	0,00
Ç23	839,48	314,48	74,16	0,00
Ç24	826,55	301,55	1354,25	0,00

Tablo 4.6 Devam Çevre Boyutu Verileri

Ç25	860,44	335,44	984,87	0,00
Ç26	868,96	343,96	0,00	0,00
Ç27	869,04	344,04	3776,16	0,00
Ç28	804,21	279,21	0,00	0,00
Ç29	838,49	313,49	38,68	0,00
Ç30	818,12	293,12	555,10	0,00
Ç31	870,55	345,55	79920,76	0,00
Ç32	824,72	299,72	0,00	0,00
Ç33	857,86	332,86	0,00	0,00
Ç34	855,41	330,41	3123,06	13764,92
Ç35	850,11	325,11	0,00	0,00
Ç36	849,15	324,15	0,00	0,00
Ç37	863,94	338,94	49130,72	0,00
Ç38	818,34	293,34	0,00	0,00
Ç39	958,27	433,27	0,00	0,00
Ç40	835,88	310,88	42132,89	0,00
Ç41	836,83	311,83	0,00	0,00
Ç42	853,68	328,68	3649,26	0,00
Ç43	841,63	316,63	0,00	0,00
Ç44	901,03	376,03	1702,84	0,00
Ç45	863,50	338,50	90092,86	0,00
Ç46	851,46	326,46	0,00	0,00
Ç47	888,31	363,31	1423,14	0,00
Ç48	835,56	310,56	0,00	0,00
Ç49	907,09	382,09	4675,86	24895,69
En Düşük Değer (Min)	804,21	279,21	0,00	0,00
En Yüksek Değer (Maks)	958,27	433,27	90092,86	54482,72

4.2.3 Ekonomi boyutunda verilerin derlenmesi

Ekonomi boyutu kapsamında oluşturulan gösterge verileri Tablo 4.7' de bulunmaktadır.

Tablo 4.7 Ekonomi Boyutu Verileri

FABRİKALAR	EKONOMİ BOYUTU			
	Toplam Fosil Yakıt Maliyeti (TL)	Toplam Çimento Üretimi (Ton)	Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı Ekonomik Kazanç (TL)	Puant Kullanımı (%)
Ç1	257.850.352	639760	0	11,33803432
Ç2	331.691.848	932334,00	0,00	13,11
Ç3	545.569.591	897834,00	0,00	14,18
Ç4	1.235.673.816	2128590,64	0,00	20,46
Ç5	912.391.771	1337106,00	0,00	18,27
Ç6	315.073.315	483000,00	0,00	18,43
Ç7	568.432.522	483655,00	0,00	27,21
Ç8	252.813.282	782747,00	0,00	24,16
Ç9	731.457.799	1359156,00	0,00	18,73
Ç10	462.987.132	781098,00	0,00	11,54
Ç11	670.469.356	1457873,00	37086,46	13,96
Ç12	999.600.414	1215170,00	52021,00	15,35
Ç13	376.346.252	457429,48	0,00	19,62
Ç14	2.638.902.783	3514300,00	101836,86	20,19
Ç15	1.185.730.939	1906199,50	0,00	17,68
Ç16	638.304.945	1660816,00	5471,93	19,03
Ç17	1.777.705.227	2495963,90	0,00	15,33
Ç18	2.756.771.682	3635678,00	94678,62	19,91
Ç19	1.000.299.492	1720880,00	0,00	12,51
Ç20	838.536.327	1641404,00	0,00	21,00
Ç21	862.779.897	1494982,00	0,00	11,66
Ç22	1.375.743.536	1720710,00	0,00	12,69
Ç23	556.078.985	893301,00	0,00	16,71
Ç24	708.792.359	1283259,68	0,00	18,63

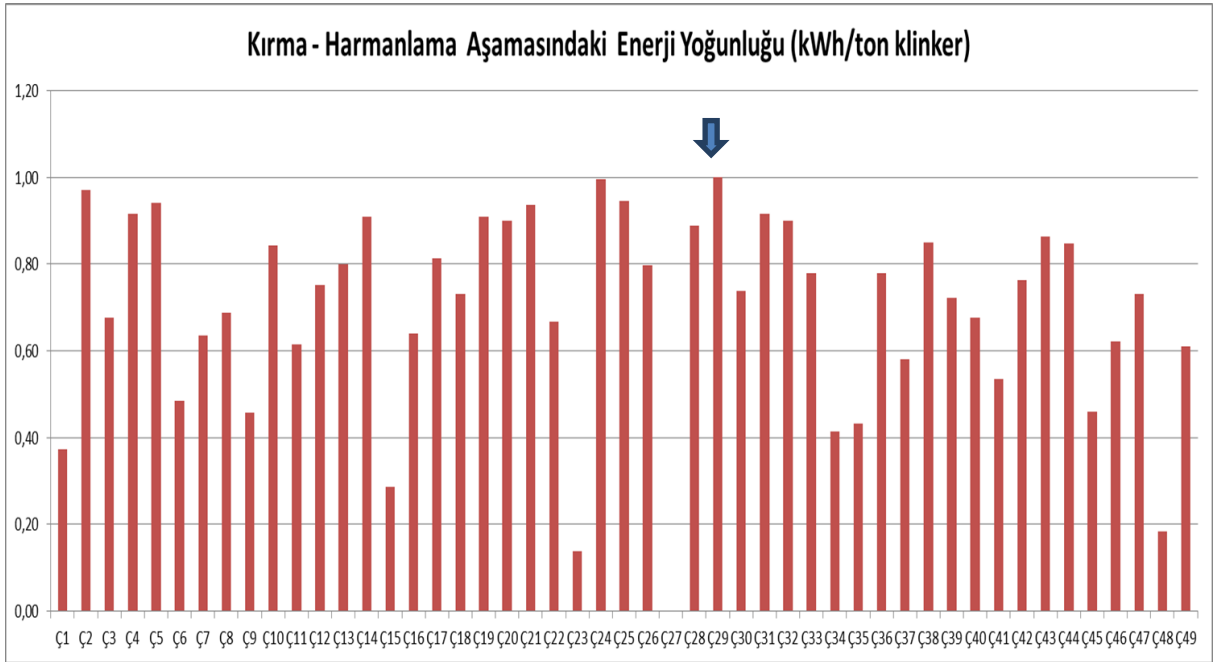
Tablo 4.7 Devam Ekonomi Boyutu Verileri

Ç25	452.051.811	800388,45	0,00	16,64
Ç26	601.698.809	901200,00	0,00	14,10
Ç27	530.451.797	1180656,00	0,00	17,40
Ç28	800.368.858	1231334,00	0,00	16,53
Ç29	330.368.823	761745,00	0,00	13,19
Ç30	555.210.307	858163,00	0,00	12,00
Ç31	845.141.859	1787000,00	0,00	20,83
Ç32	965.335.545	1404578,40	0,00	13,85
Ç33	1.321.974.802	1855492,00	0,00	20,00
Ç34	537.789.813	675591,63	25728,82	18,65
Ç35	862.371.852	1028429,00	0,00	18,77
Ç36	550.201.405	1007519,62	0,00	12,03
Ç37	783.359.456	1184687,00	0,00	15,17
Ç38	1.721.225.167	2564700,00	0,00	11,65
Ç39	412.860.542	501995,00	0,00	20,84
Ç40	551.881.217	1035400,00	0,00	15,80
Ç41	627.471.073	1096500,00	0,00	18,59
Ç42	962.589.615	1562000,00	0,00	14,51
Ç43	649.384.773	941538,00	0,00	19,53
Ç44	891.513.733	1018063,54	0,00	18,71
Ç45	1.264.314.385	2242904,00	0,00	20,75
Ç46	824.855.920	1076150,15	0,00	20,54
Ç47	249.082.661	422440,00	0,00	17,31
Ç48	1.917.663.770	4057507,00	0,00	20,94
Ç49	2.260.612.184	2325167,24	46534,00	20,78
En Düşük Değer (Min)	249082661,12	422440,00	0,00	11,34
En Yüksek Değer (Maks)	2756771682,08	4057507,00	101836,86	27,21

4.2.4 Enerji boyutunda verilerin normalize edilmesi

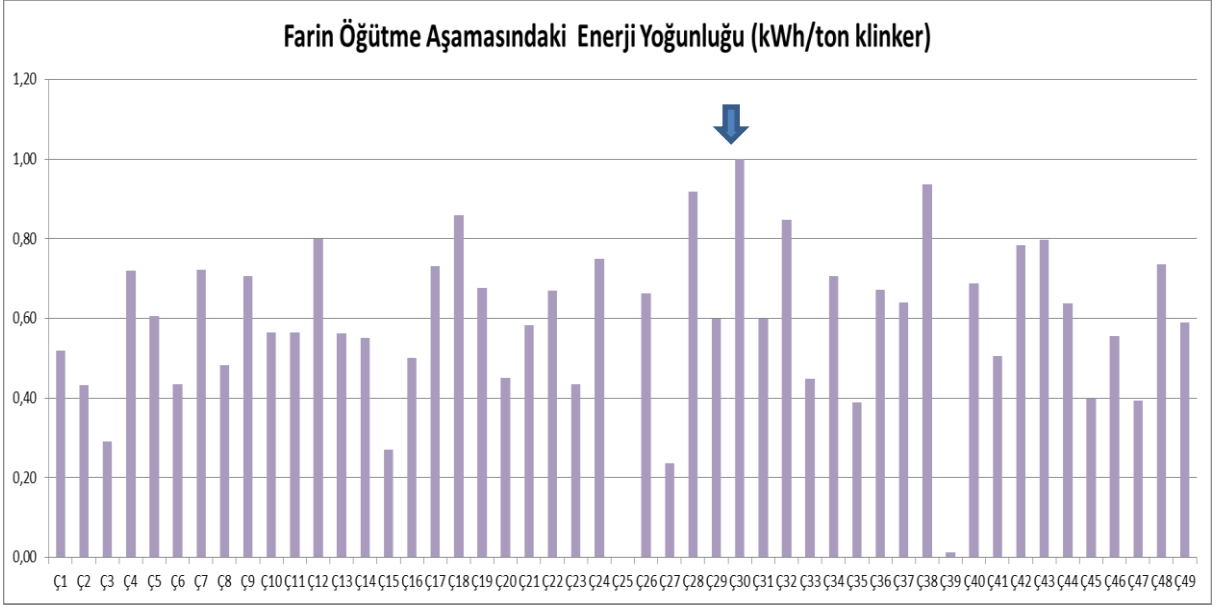
Belirlenen minimum ve maksimum değerler üzerinde (4.1) ve (4.2) no' lu denklemler kullanılarak tüm veriler normalize edilmiştir. Bu denklemler tüm verileri en küçük ve en büyük değer arasında sırasıyla 1 ve 0 (denklem 1) veya 0 ve 1 (denklem 2) arasında normalize etmektedir. Her iki denklemden birinin kullanılması ilgili göstergenin sürdürülebilirlik açısından daha yüksek ya da daha küçük değere sahip olmasının daha iyi bir performansa karşılık gelmesi bazında yapılan değerlendirmelere dayanmaktadır, örneğin;

Enerji boyutundaki göstergelerde enerji yoğunluğu en yüksek olan fabrika "0", en düşük olan fabrika ise "1" olacak şekilde (4.2) no' lu denklem kullanılarak düzenlenmiştir.



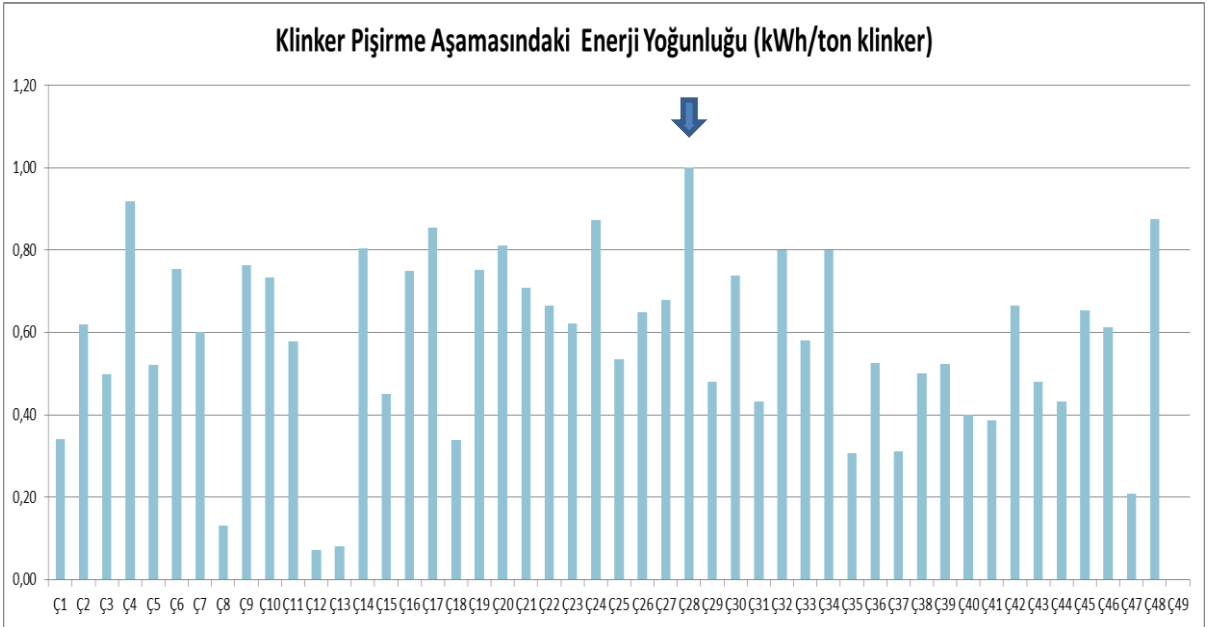
Şekil 4.15 Gösterge No 1.1

Kırma-Harmanlama aşamasındaki enerji yoğunluğu göstergesi kapsamında Şekil 4.15' de enerji yoğunluğu yüksek olan 27 nolu fabrika normalize edildikten sonra "0" olarak en küçük değere sahip olmuştur. En düşük değere sahip olan 29 nolu fabrika "1" değerini alarak en avantajlı fabrika olmuştur.



Şekil 4.16 Gösterge No 1.2

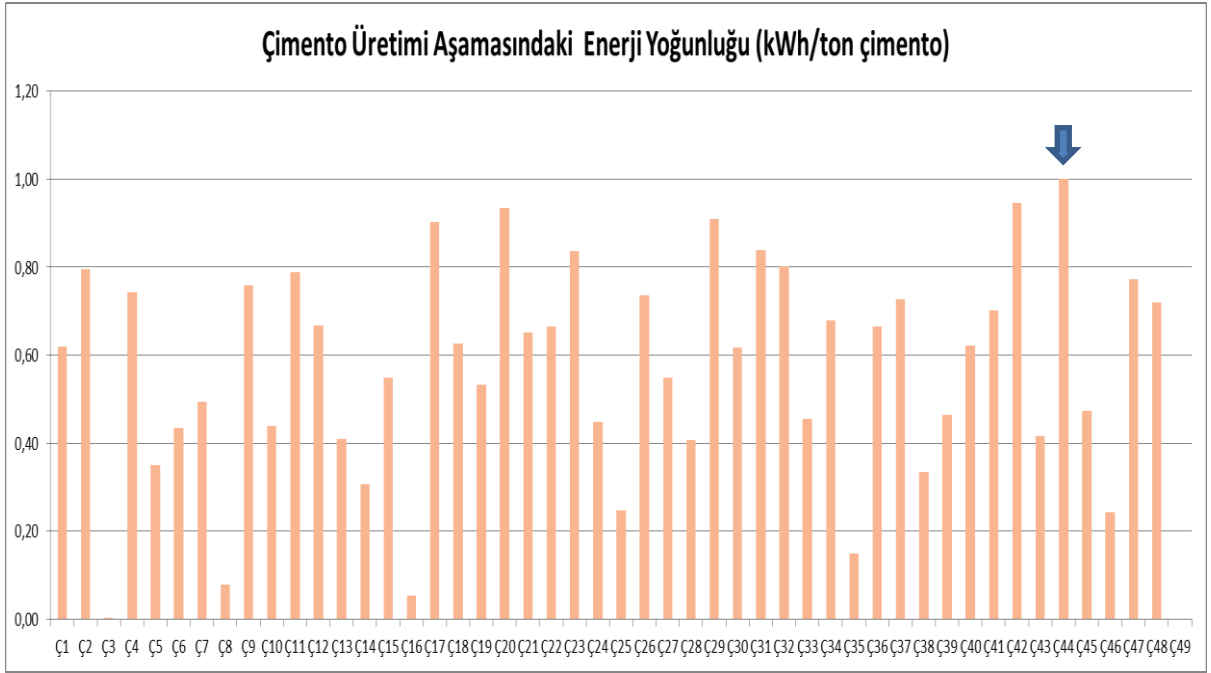
Farin Öğütme aşamasındaki enerji yoğunluğu göstergesi kapsamında Şekil 4.16’ da enerji yoğunluğu yüksek olan 25 nolu fabrika normalize edildikten sonra “0” olarak en küçük değere sahip olmuştur. En düşük değere sahip olan 30 nolu fabrika “1” değerini alarak en avantajlı fabrika olmuştur.



Şekil 4.17 Gösterge No 1.3

Klinker Pişirme aşamasındaki enerji yoğunluğu göstergesi kapsamında Şekil 4.17’ de enerji yoğunluğu yüksek olan 49 nolu fabrika normalize edildikten sonra “0”

olarak en küçük değere sahip olmuştur. En düşük değere sahip olan 28 nolu fabrika “1” değerini alarak en avantajlı fabrika olmuştur.

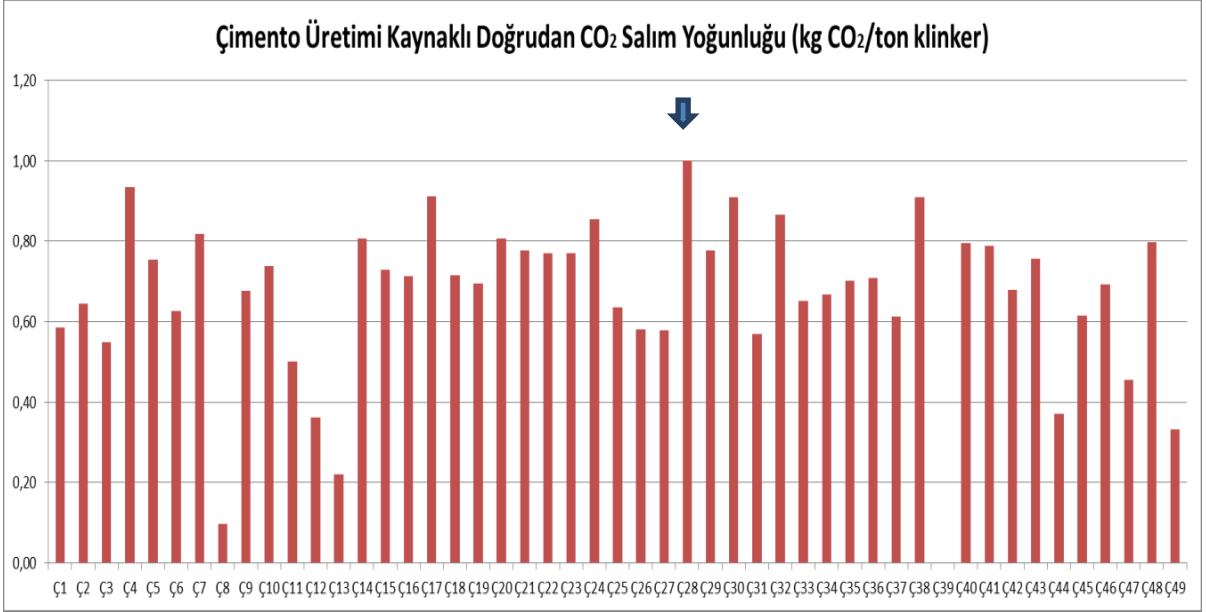


Şekil 4.18 Gösterge No 1.4

Çimento üretimi aşamasındaki enerji yoğunluğu göstergesi kapsamında Şekil 4.18’ de enerji yoğunluğu yüksek olan 49 nolu fabrika normalize edildikten sonra “0” olarak en küçük değere sahip olmuştur. En düşük değere sahip olan 44 nolu fabrika “1” değerini alarak en avantajlı fabrika olmuştur.

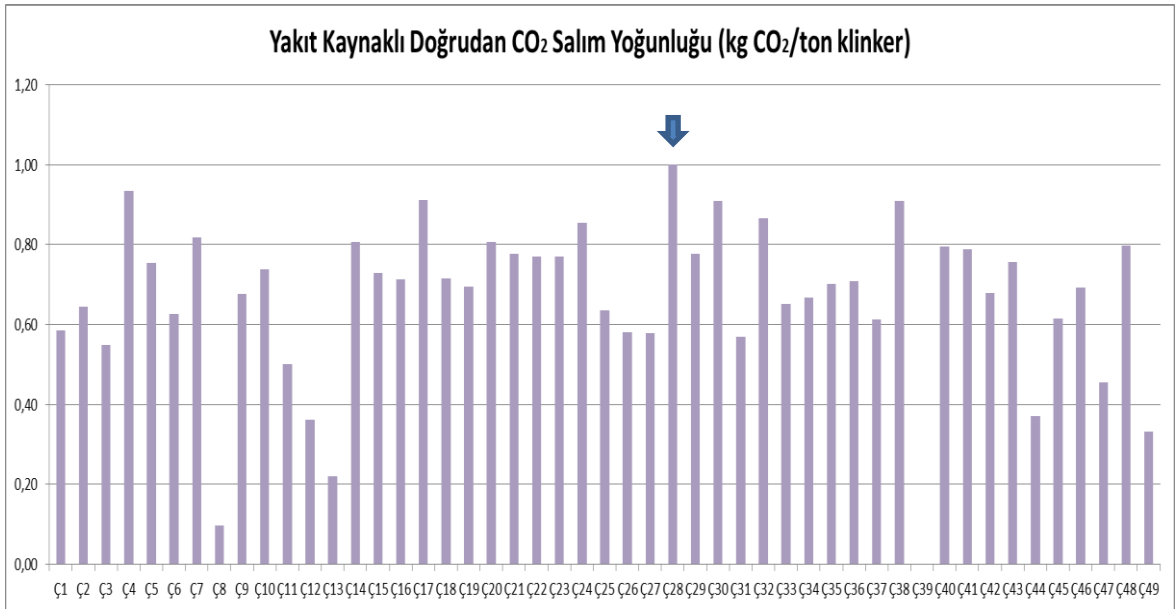
4.2.5 Çevre boyutunda verilerin normalize edilmesi

Çevre boyutunda yer alan Çimento Üretimi Kaynaklı ve Yakıt Kaynaklı Doğrudan CO₂ Salım Yoğunluğu göstergelerinde (4.2) no’ lu denklem kullanılarak salımı en yüksek fabrika “0”, en düşük olan fabrika “1” olarak, Atık Yakıt Kullanımına ve Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı CO₂ Salım Tasarrufu göstergelerinde de (4.1) nolu denklem ile tasarruf değeri en yüksek olan fabrika “1”, tasarruf miktarı en düşük olan fabrikada “0” olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.19 Gösterge No 2.1

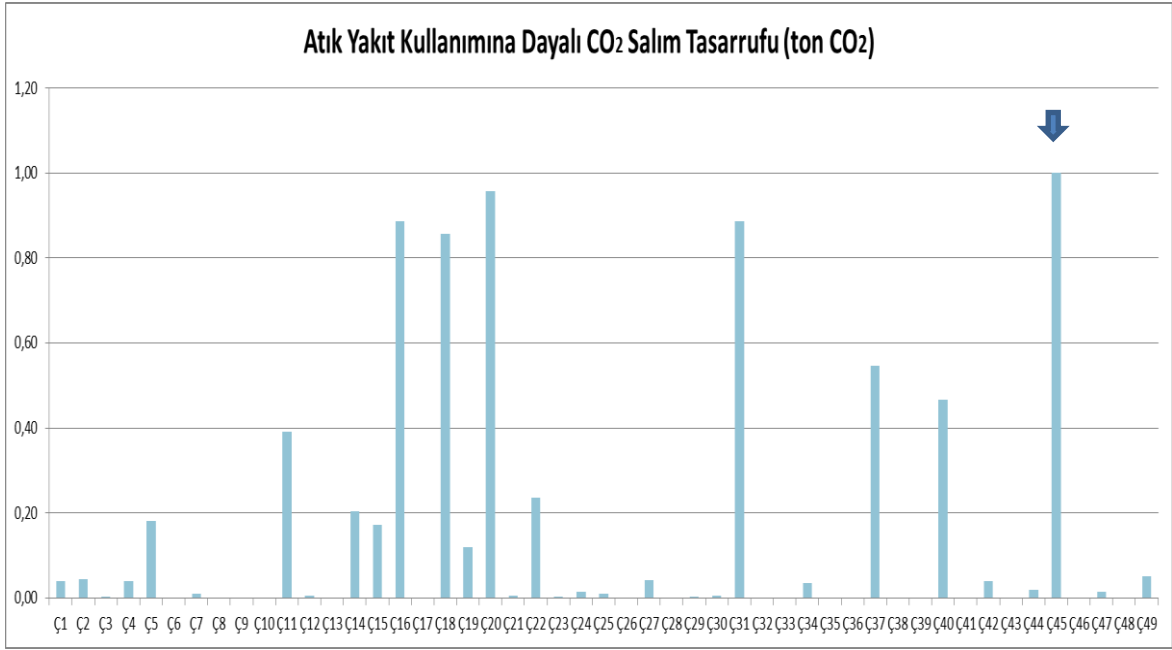
Çimento Üretimi Kaynaklı Doğrudan CO₂ Salım Yoğunluğu göstergesi kapsamında Tablo 4.19' da CO₂ Salım yoğunluğu yüksek olan 39 nolu fabrika normalize edildikten sonra "0" olarak en küçük değere sahip olmuştur. En düşük değere sahip olan 28 nolu fabrika "1" değerini alarak en avantajlı fabrika olmuştur.



Şekil 4.20 Gösterge No 2.2

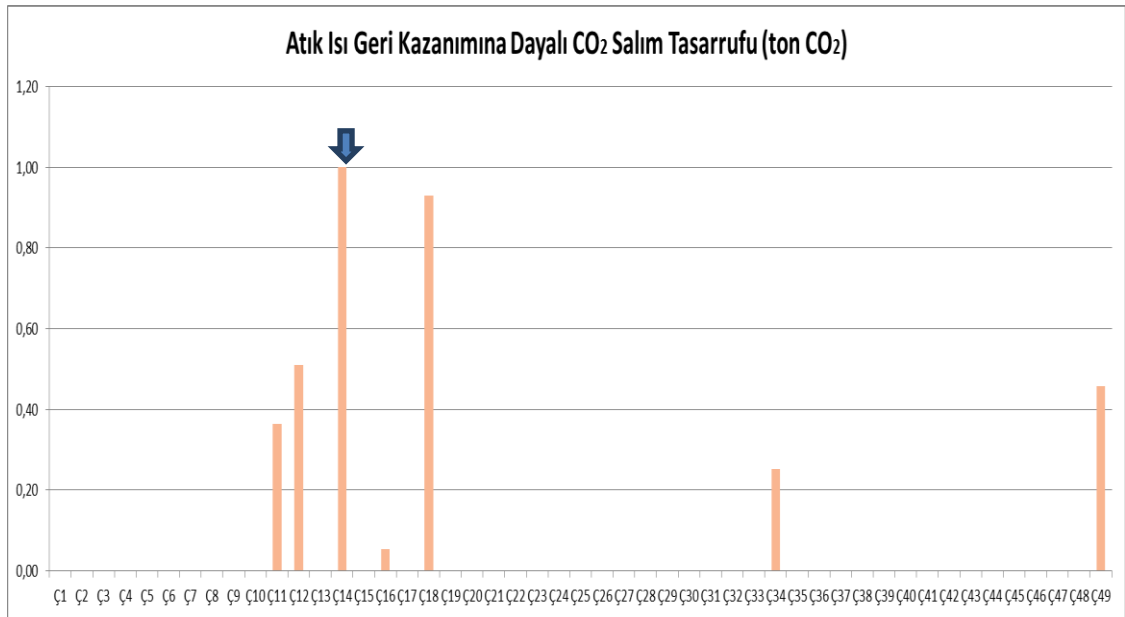
Yakıt Kaynaklı Doğrudan CO₂ Salım Yoğunluğu göstergesi kapsamında CO₂ Salım yoğunluğu yüksek olan 39 nolu fabrika normalize edildikten sonra "0" olarak

en küçük değere sahip olmuştur. En düşük değere sahip olan 28 nolu fabrika “1” değerini alarak en avantajlı fabrika olmuştur.



Şekil 4.21 Gösterge No 2.3

Atık Yakıt Kullanımına Dayalı CO₂ Salım Tasarrufu göstergesi kapsamında CO₂ Salım tasarrufu yüksek olan 45 nolu fabrika normalize edildikten sonra “1” olarak en büyük değere sahip olmuştur. Atık yakıt kullanmayan fabrikalar “0” değerini alarak en dezavantajlı fabrikalar olmuştur.

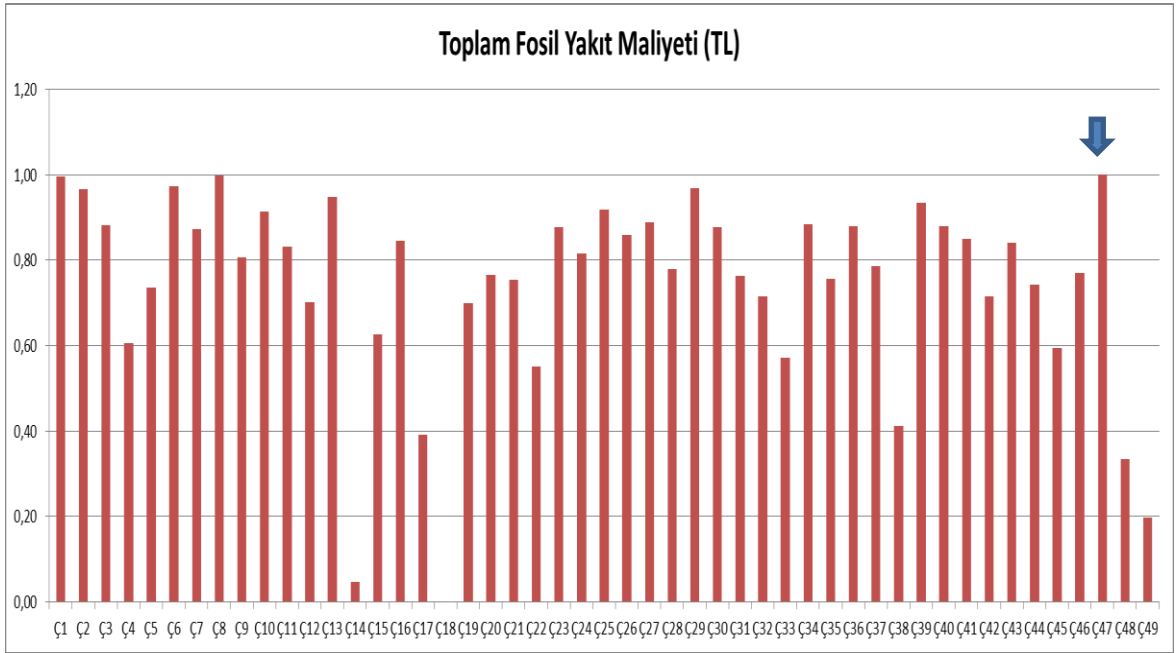


Şekil 4.22 Gösterge No 2.4

Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı CO₂ Salım Tasarrufu göstergesi kapsamında CO₂ Salım tasarrufu yüksek olan 14 nolu fabrika normalize edildikten sonra “1” olarak en büyük değere sahip olmuştur. Atık ısı geri kazanım sistemi olmayan fabrikalar “0” değerini alarak en dezavantajlı fabrikalar olmuştur.

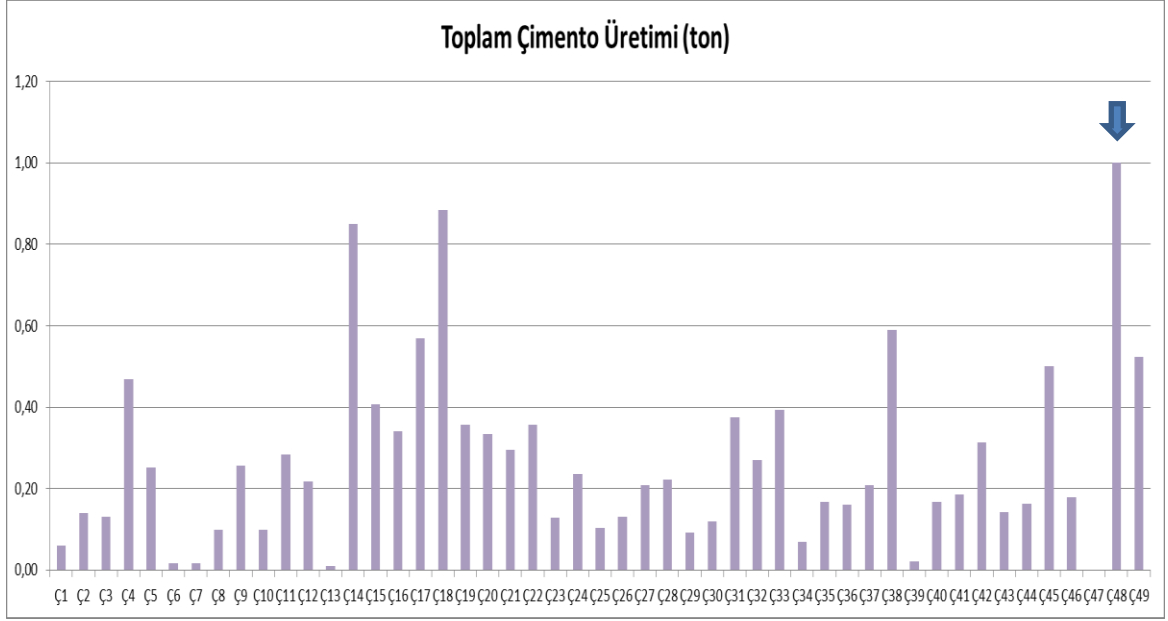
4.2.6. Ekonomi boyutunda verilerin normalize edilmesi

Ekonomi boyutunda ise; Toplam Fosil Yakıt Maliyeti ve Puant kullanımı göstergesinde (4.2), diğer iki göstergede de (4.1) no' lu denklem kullanılmıştır.



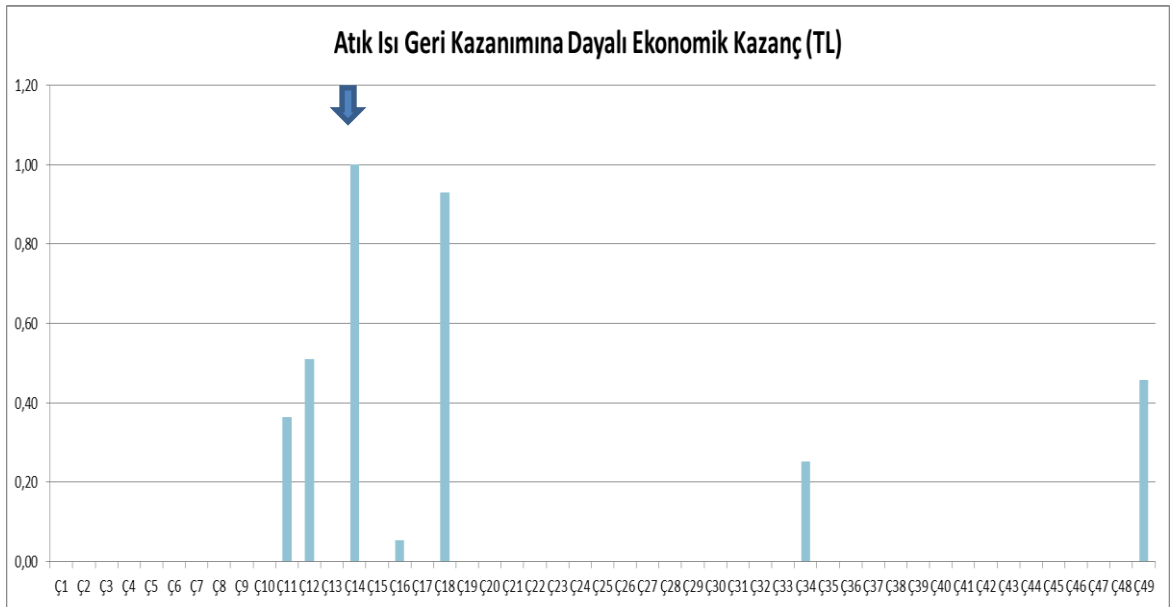
Şekil 4.23 Gösterge No 3.1

Toplam fosil yakıt maliyeti göstergesi kapsamında yakıt maliyeti yüksek olan 18 nolu fabrika normalize edildikten sonra “0” olarak en küçük değere sahip olmuştur. En düşük değere sahip olan 47 nolu fabrika “1” değerini alarak en avantajlı fabrika olmuştur.



Şekil 4.24 Gösterge No 3.2

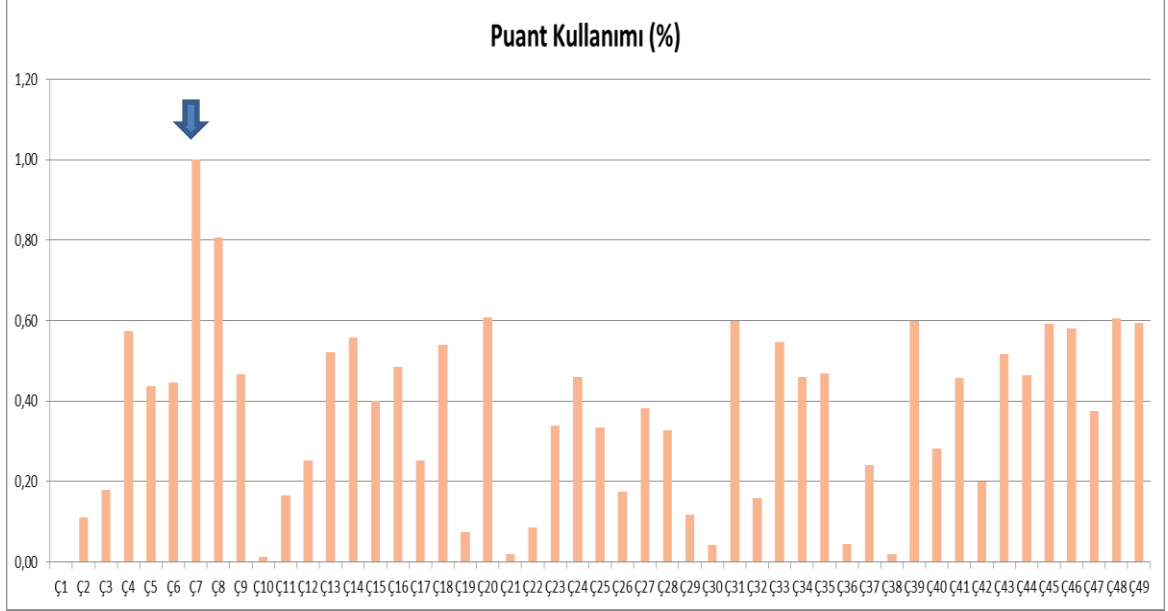
Toplam çimento üretimi göstergesi kapsamında çimento üretimi yüksek olan 48 nolu fabrika normalize edildikten sonra “1” alarak en büyük değere sahip olmuştur. Üretimi düşük olan 47 no lu fabrika “0” değerini alarak en dezavantajlı fabrika olmuştur.



Şekil 4.25 Gösterge No 3.3

Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı Ekonomik kazanç göstergesi kapsamında atık ısı geri kazanım sistemi olan fabrikaların içerisinde en çok elektrik üreten fabrikalardan 14 nolu fabrika normalize edildikten sonra “1” alarak en büyük

değere sahip olmuştur. Atık ısı geri kazanım sistemi olmayan ve bu kapsamda da ekonomik kazanç elde edemeyen fabrikalar “0” değerini alarak en dezavantajlı fabrikalar olmuştur.



Şekil 4.26 Gösterge No 3.4

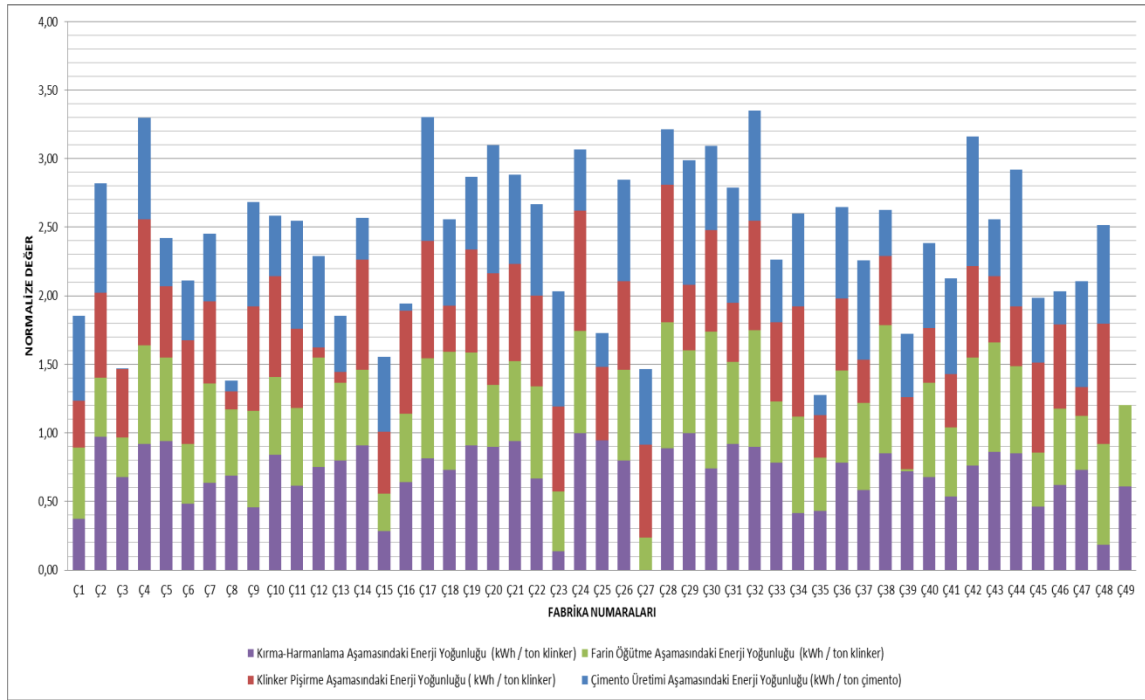
Puant kullanımı göstergesi kapsamında kullanımı yüksek olan 1 nolu fabrika normalize edildikten sonra “0” olarak en küçük değere sahip olmuştur. En düşük değere sahip olan 7 nolu fabrika “1” değerini alarak en avantajlı fabrika olmuştur.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

5.1 Endeks Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tez kapsamında yapılan Sürdürülebilir Çimento Sektörü Endeksi enerji (EN), çevre (ÇE) ve ekonomi (EK) boyutları bazında belirlenen göstergelerin normalize değerleri Denklem 4.4-4.6' de ortaya konmaktadır.

Enerji boyutuna ait göstergelerin normalize değerlerin toplamını ifade eden Denklem 4.4 kullanılarak bu boyutta yer alan gösterge sonuçları ayrı ayrı ve toplu olarak Şekil 5.1' de gösterilmektedir. Her bir gösterge veri setindeki verilere göre normalize edilmiştir.



Şekil 5.1 Enerji Boyutunun Gösterge Sonuçlarının Toplu Gösterimi

Boyutlardaki göstergelerde farklı fabrikalar ön plana çıkmıştır. Tablo 5.1 enerji boyutu içerisinde yer alan göstergeler bazında ön plana çıkan çimento fabrikalarını göstermektedir.

Tablo 5.1 Enerji Boyutu

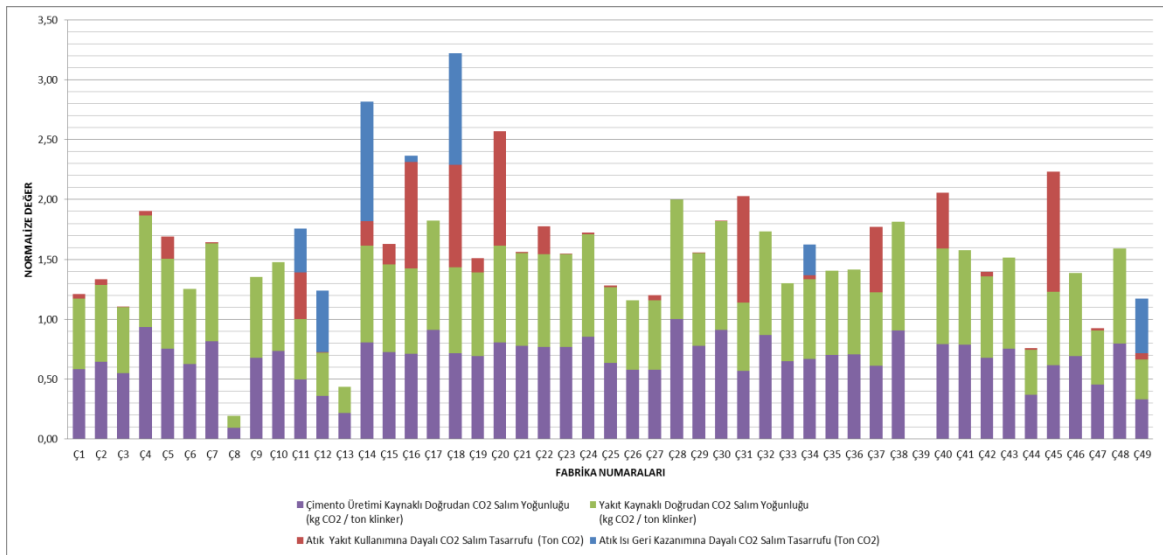
ENERJİ BOYUTU	No	Gösterge	Fabrika
	1.1	Kırma-Harmanlama Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu	Ç29
	1.2	Farin Öğütme Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu	Ç30
	1.3	Klinker Pişirme Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu	Ç28
	1.4	Çimento Üretimi Aşamasındaki Enerji Yoğunluğu	Ç44

1.2 nolu göstergede ön plana çıkan fabrikada kullanılan öğütme sistemi Valski Dik değirmendir. Aksine en düşük puan alan 25 no'lu fabrikada Bilyalı değirmen kullanıldığı görülmüştür.

1.3 no'lu klinker pişirme göstergesinde 30 no'lu fabrikada prekalsinasyonlu fırın sistemi kullanılmaktadır.

1.4 no'lu gösterge kapsamında çimento üretimi aşamasındaki enerji yoğunluğu kullanılan çimento öğütme değirmeni ile ilişkilidir. 49 no'lu fabrika bu göstergede en düşük puan almış olmasının sebebi kullanılan değirmenin sadece bilyalı değirmen kullanılmasıdır. 44 no' lu fabrika Bilyalı açık ve kapalı sistemlerin yanı sıra yoğunluğu Valsli dik değirmen kullanarak elde etmiştir.

Çevre boyutuna ait göstergelerin normalize değerlerinin toplamını ifade eden Denklem 4.5 kullanılarak elde edilen değerler Şekil 5.2'de verilmektedir.



Şekil 5.2 Çevre Boyutunun Gösterge Sonuçlarının Toplu Gösterimi

Tablo 5.2 çevre boyutu içerisinde yer alan göstergeler bazında ön plana çıkan çimento fabrikalarını göstermektedir.

Tablo 5.2 Çevre Boyutu

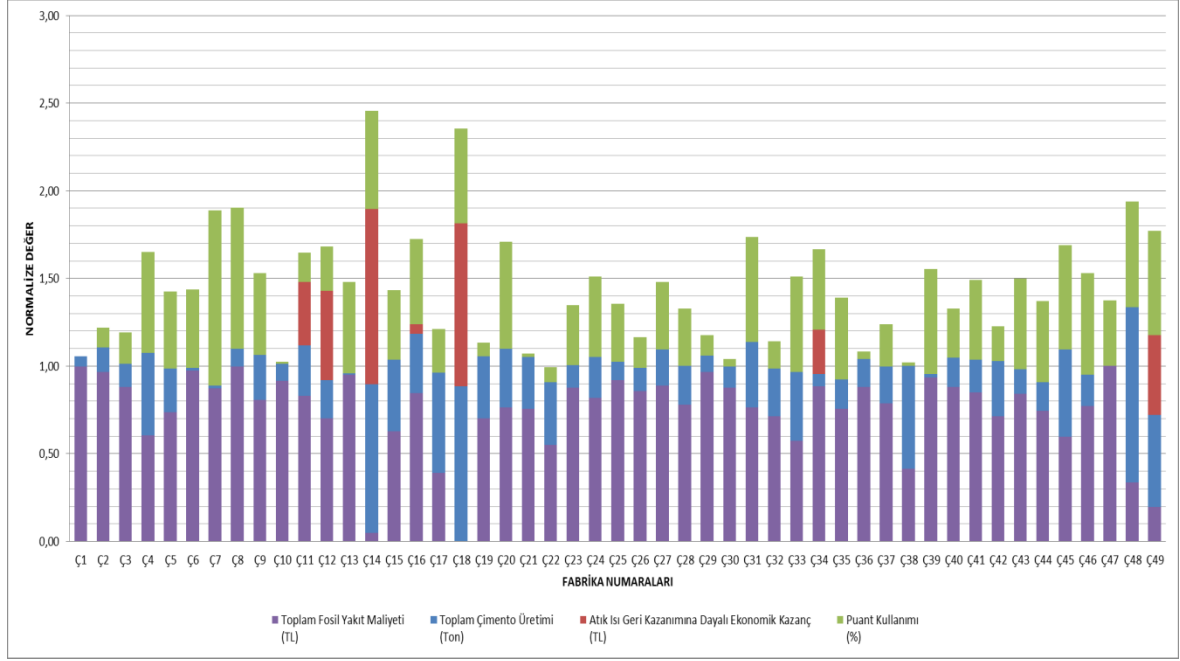
ÇEVRE BOYUTU	No	Gösterge	Fabrika
	2.1	Çimento Üretimi Kaynaklı Doğrudan CO ₂ Salım Yoğunluğu	Ç28
	2.2	Yakıt Kaynaklı Doğrudan CO ₂ Salım Yoğunluğu	Ç28
	2.3	Atık Yakıt Kullanımına Dayalı CO ₂ Salım Tasarrufu	Ç45
	2.4	Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı CO ₂ Salım Tasarrufu	Ç14

28 no' lu fabrikanın klinker için harcanan birincil ve ikincil enerji toplamı 709 kcal/kg klinker ve yakıttan kaynaklanan spesifik CO₂ miktarı 0,264 tonCO₂/ton klinker iken 39 no' lu fabrikanın klinker için harcanan birincil ve ikincil enerji toplamı 1113 kcal/kg klinker ve yakıttan kaynaklanan spesifik CO₂ miktarı 0,433 ton CO₂/ton klinker' dir.

2.3 no' lu göstergede 45 no' lu fabrika atık yakıt kullanan fabrikaların içerisinde kalorisi en yüksek olan atıkların kullanılması ve atık yakıt kullanımı en yüksek olan fabrika olması sayesinde ilk sırada yer almıştır.

2.4 no' lu göstergede WHR sistemi olan fabrikaların içerisinde elektrik üretimi en yüksek olan fabrika olması ile 14 no' lu fabrika ön plana çıkmıştır.

Ekonomi boyutuna ait göstergelerin normalize değerlerinin toplamını ifade eden Denklem 4.6 kullanılarak elde edilen değerler Şekil 5.3' de verilmiştir.



Şekil 5.3 Ekonomi Boyutunun Gösterge Sonuçlarının Toplu Gösterimi

Tablo 5.3 Ekonomi Boyutu

EKONOMİ BOYUTU	No	Gösterge	Fabrika
	3.1	Toplam Fosil Yakıt Maliyeti	Ç1, Ç8, Ç47
	3.2	Toplam Çimento Üretimi	Ç48
	3.3	Atık Isı Geri Kazanımına Dayalı Ekonomik Kazanç	Ç14
	3.4	Puant Kullanımı	Ç7

Tablo 5.3' de ekonomi boyutundaki göstergeler bazında ön plana çıkan çimento fabrikaları belirtilmiştir. 3.1 nolu gösterge sonuçları incelendiğinde en alt sıralarda yer alan fabrikaların ton başına maliyeti yüksek olan fuel oil kullanımının yüksek olduğu ve ayrıca diğer kullanılan fosil yakıt miktarlarının da diğer fabrikaların çok üzerinde olmasından dolayıdır. İlk sıralarda yer alan fabrikalar incelendiğinde LPG kullanım miktarları çok az olup, diğer kullanılan fosil yakıtların da toplam kullanımı çok düşüktür.

3.2 nolu ($EK_{3.2}$) gösterge kapsamında üretim kapasitesine yakın üretim yapan fabrika ilk sırayı almıştır.

3.3 nolu ($EK_{3.3}$) göstergede yine WHR sistemi olup en yüksek elektrik üretimi gerçekleştiren 14 nolu fabrika bu kapsamda da 2.4 nolu ($EK_{2.4}$) göstergede ön plana çıktığı gibi direkt olarak bu kapsamda da ilk sırayı almıştır.

3.4 nolu ($EK_{3.4}$) puant kullanımı göstergesinde puant zamanı içerisinde tüketilen enerjinin diğer 48 fabrikadan daha az kullandığı için 7 nolu fabrika avantajlı hale gelmiştir.

Boyut kapsamında değerlendirildiğinde ön plana çıkan fabrikalar farklılaşmıştır.

1-Enerji Boyutu; Ç32

2- Çevre Boyutu; Ç18

3- Ekonomi Boyutu; Ç14

Boyutlara ait göstergelerdeki fabrikaların durumu ve gösterge bazında değerlendirildiğinde, gösterge kapsamında 1. olamayan fabrikalar boyut kapsamında tüm göstergelerde belirli seviyede kalarak boyut bazında 1. sıraya yerleşmiştir. Enerji boyutunda yer alan göstergeler kapsamında 32 no' lu çimento fabrikası incelendiğinde 1.1 ($EN_{1.1}$), 1,2 ($EN_{1.2}$) ve 1.3 ($EN_{1.3}$) no' lu göstergelerde öne çıkan fabrikaların kullanmış oldukları sistemlerin tümünü kullandığı için boyut bazında dikkate alındığında ilk sıraya yerleşmiştir.

Çevre boyutunda göstergelerde ilk sıraya giremeyen 18 no'lu fabrika boyut bazında değerlendirildiğinde 1. sıraya yerleşmiştir. WHR sistemi olup elektrik üretimin, atık yakıt kullanımın yüksek olan fabrikalardan biri olması, klinker için harcanan birincil ve ikincil enerji toplamı 847 kcal/kg klinker ve yakıttan kaynaklanan spesifik CO₂ miktarı 0,322 tonCO₂/ton klinker olması 49 fabrikanın ortalaması olan 0,332' nin altında bir değere sahip olması ile boyut toplamında ilk sırayı almıştır.

Ekonomi boyutunda yer alan göstergelerde WHR sisteminin en yüksek oranda işleyen 14 no' lu fabrika, yıllık üretilen çimento miktarları yüksek, puant aralığında az elektrik tüketen fabrikaların arasında olması ve fosil yakıt kullanımı ve buna bağlı yakıt maliyetinin az olması sebebiyle toplam ekonomi boyutunda 1. sırada yer almıştır. Aynı fabrika atıktan yakıt kullanımı da bulunmaktadır.

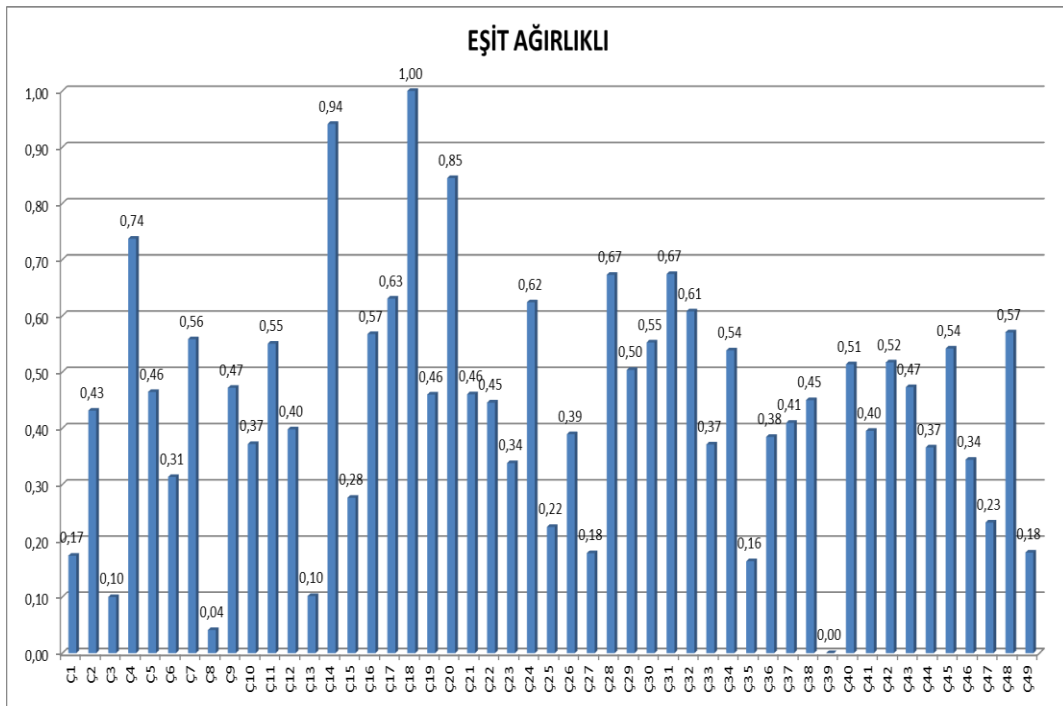
5.2 Endeks Sonuçlarının Farklı Boyut Ağırlıklandırma Uygulamaları

Eşit ağırlıklı uygulamada; enerji, çevre ve ekonomi boyutlarının katsayıları eşit olacak şekilde değerlendirilmiştir.

α_1 , α_2 ve α_3 : 0,33 olarak dikkate alınmıştır.

$$\sum S_{ÇE} = 0,33\sum EN + 0,33\sum ÇE + 0,33\sum EK \quad (5.1)$$

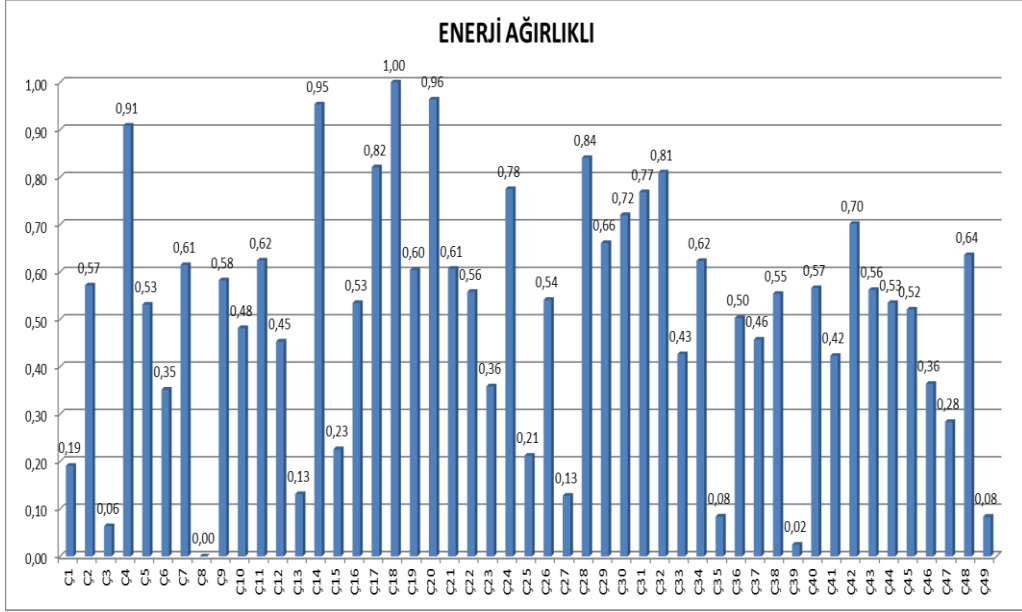
Şekil 5.4' de 5.1 no'lu denklem kullanılarak eşit ağırlıklı sürdürülebilir çimento endeksi sonucu verilmiştir.



Şekil 5.4. Eşit Ağırlıklı Uygulama

Enerji ağırlıklı uygulamada, enerji boyutundaki sonuçlar (α_1) “0,5”, çevre (α_2) ve ekonomi boyutları (α_3) “0,25” çarpanı ile hesaplanarak sonuçlar Şekil 5.5' de ortaya konmuştur.

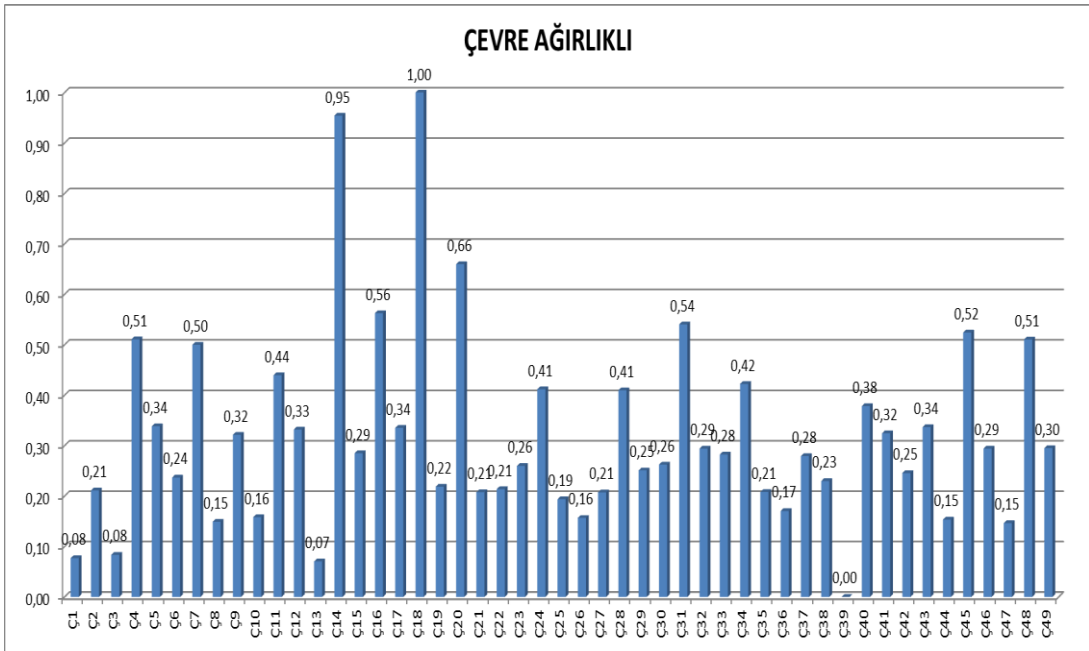
$$\sum S_{ÇE} = 0,5\sum EN + 0,25\sum ÇE + 0,25\sum EK \quad (5.2)$$



Şekil 5.5. Enerji Ağırlıklı Uygulama

Çevre ağırlıklı uygulamada, çevre (α_2) boyutundaki sonuçlar “0,5”, enerji (α_1) ve ekonomi (α_3) boyutları “0,25” çarpanı ile hesaplanarak Şekil 5.6’ da sonuçlar ortaya konmuştur.

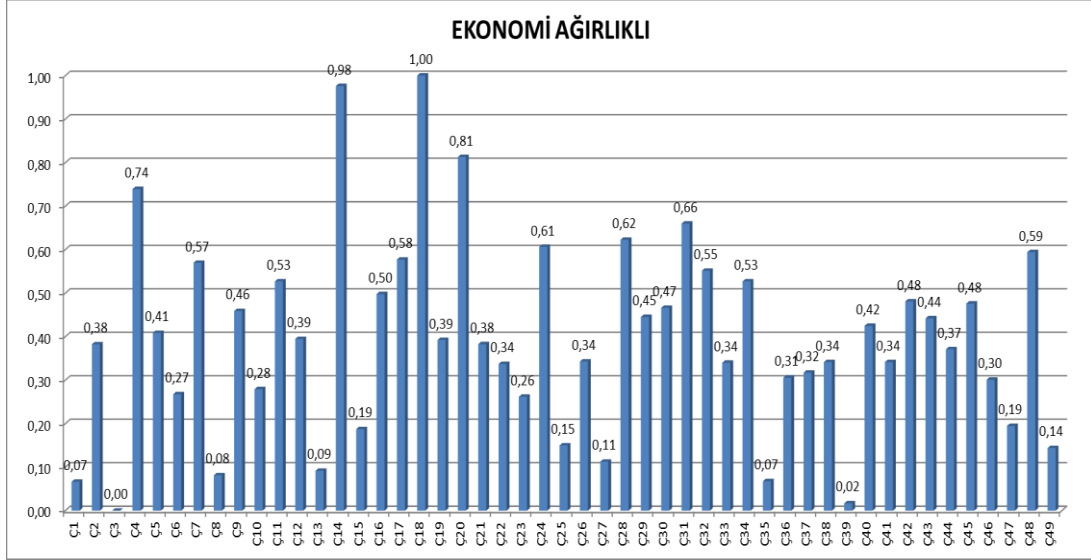
$$\Sigma S\check{C}E = 0,25\Sigma EN + 0,50\Sigma \check{C}E + 0,25\Sigma EK \quad (5.3)$$



Şekil 5.6 Çevre Ağırlıklı Uygulama

Ekonomi ağırlıklı uygulamada, ekonomi (α_3) boyutundaki sonuçlar “0,5”, enerji (α_1) ve çevre (α_2) boyutları “0,25” çarpanı ile hesaplanarak sonuçlar ortaya konmuştur. Şekil 5.7’ de ekonomi ağırlıklı sonuçlar gösterilmiştir.

$$\sum S_{\text{ÇE}} = 0,25\sum EN + 0,25\sum \text{ÇE} + 0,50\sum EK \quad (5.4)$$



Şekil 5.7 Ekonomi Ağırlıklı Uygulama

5.3 Ağırlıklandırma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ağırlıklandırma sonuçlarında tüm boyutların eşit ağırlıklı, enerji, çevre ve ekonomi ağırlıklı değerlendirilmeleri sonucu ilk beş sıraya yerleşen fabrikalar Tablo 5.4’ de sıralanmıştır.

Tablo 5.4 Ağırlıklandırma Sonuçları

	No	Fabrikalar		No	Fabrikalar
	EŞİT AĞIRLIKLI	1		Ç18	ENERJİ AĞIRLIKLI
2		Ç14	2	Ç20	
3		Ç20	3	Ç14	
4		Ç4	4	Ç4	
5		Ç31-28	5	Ç28	
ÇEVRE AĞIRLIKLI	1	Ç18	EKONOMİ AĞIRLIKLI	1	Ç18
	2	Ç14		2	Ç14
	3	Ç20		3	Ç20
	4	Ç16		4	Ç4
	5	Ç31		5	Ç31

Sıralamadaki fabrikalarda çok büyük değişiklikler gözlenmemiş olup, Ç18, Ç14, Ç20, Ç4 ve Ç31 no' lu fabrikaların değerli gösterge bazında ön plana çıkmıştır. Ağırlıklandırma sonucunda öne çıkan fabrikaların 15 gösterge içerisindeki sıralamaları Tablo 5.6' da gösterilmiştir. Sıralama durumlarına bakıldığında göstergelerin birçoğunda iyi durumda olan fabrikalar, ağırlıklandırma neticesinde de sıralamalarda üst sıralarda yer almışlardır. Özellikle WHR sistemi olup, atık yakıt kullanımı olan fabrikalar 2 boyutta da buna bağlı değerlendirmeler olduğu için sonuçlar bu şekilde gerçekleşmiştir. Örneğin 2.3 (ÇE_{2,3}), 2.4 (ÇE_{2,4}), 3.2 (EK_{3,2}) ve 3.3 (EK_{3,3}) no' lu göstergelerde ilk sıralarda yer almaları Ç18 ve Ç14 no' lu fabrikaların sıralamalardaki yerlerinde belirleyici olmuştur.

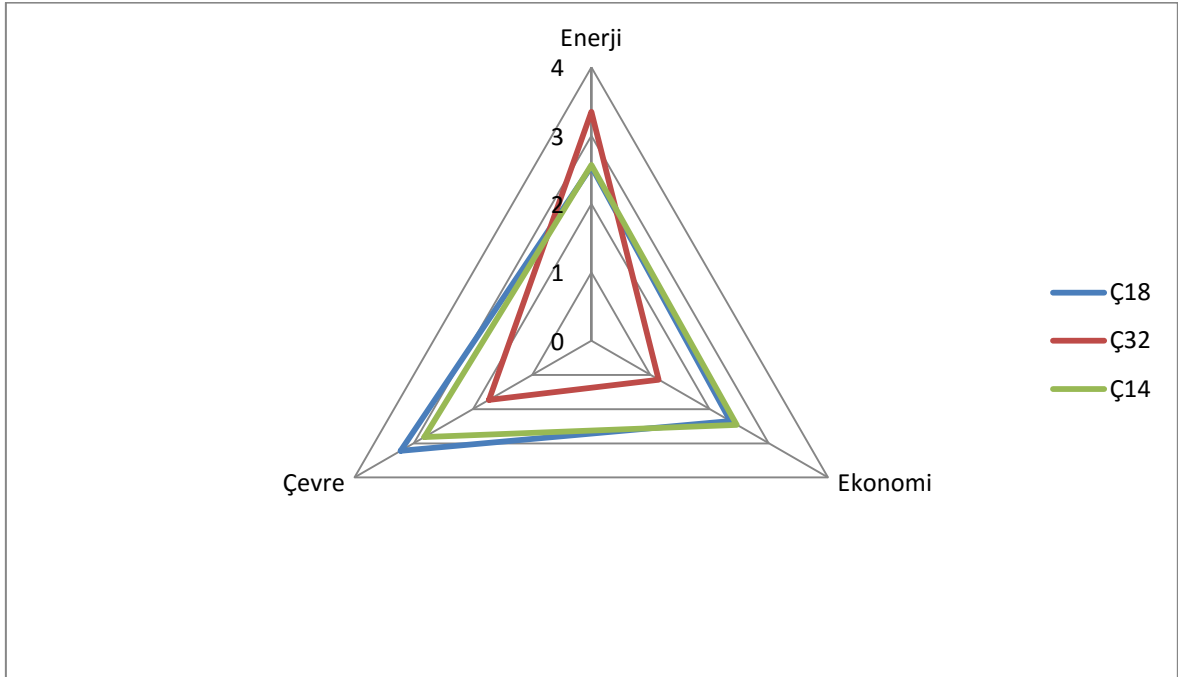
Tablo 5.6 Ağırlıklandırma Sonucundaki Fabrikaların Gösterge Bazında Sıralamaları

Gösterge No	Ç18	Ç14	Ç20	Ç4	Ç28	Ç31	Ç16
1.1	26	9	11	7	13	8	40
1.2	4	32	37	13	3	25	35
1.3	42	7	6	2	1	38	13
1.4	23	42	3	13	39	6	47
2.1	22	9	10	2	1	40	23
2.2	22	9	10	2	1	40	23
2.3	5	10	2	19	0	3	4
2.4	2	1	0	0	0	0	7
3.1	49	48	29	40	27	30	21
3.2	2	3	15	8	23	11	14
3.3	2	3	0	0	0	0	7
3.4	13	11	3	10	30	6	16

Gösterge bazında karşılaştırmaya ek olarak çimento fabrikası bazında Denklem 4.4-4.6'da verilen boyut toplamları bazında karşılaştırma yapılması da önemlidir.

Sırasıyla enerji, çevre ve ekonomi boyutunda ilk sırada yer alan 18, 32 ve 14 no' lu fabrikanın diğer boyutlardaki durumu Şekil 5.8' deki radar grafiğinde verilmiştir. 32 no' lu fabrika 15 gösterge bazında ön plana çıkmıyor ancak enerji boyutuna ait

göstergelerin genel olarak iyi performansa sahip olması nedeniyle enerji boyutu bazında ön plana çıkmaktadır.



Şekil 5.8 Boyut Bazındaki İlk Sırada Yer Alan Fabrikaların Diğer Boyutlardaki Durumu

Ç32 no' lu fabrika enerji boyutunda ilk sırada yer alsa da çevre ve ekonomi boyutunda aynı başarıyı gösterememiştir. WHR sisteminin bulunmaması, plant kullanımının yüksek olması ve atık yakıt kullanmaması 32 no' lu fabrikanın çevre ve ekonomi boyutunda ön plana çıkamamasına sebep olmuştur. Ancak Ç14 ve Ç18 no' lu fabrikalar çevre ve ekonomi boyutunda ilk sıralarda yer almalarının yanında enerji boyutunda da görece iyi performans göstermeleri sürdürülebilir çimento endeksi genelinde başarılı performans göstermelerini sağlamıştır. Endeks açısından her üç boyut bazında da dengeli olarak başarı gösterilmesi önemlidir.

5.4 Endeks Sonuçlarına Göre Enerji Sistemlerinde Öneriler

Boyut bazında ve alt göstergeler değerlendirildiğinde öne çıkan fabrikaların uyguladıkları sistemler incelenmiş olup değerlendirmeler şu şekildedir;

Kırma Harmanlama süreci bazında kullanılan kırıcıların yüksek kapasiteye sahip olup, tam randımanla çalışması gerekmektedir. Ayrıca, ham maddenin nemli olması sonucu malzemenin boyut küçültme işlemini engellemektedir. Bu kapsamda hammaddenin fabrikadan elde edilecek sıcak gazlarla kurutulması

kırma işleminin verimliliği artırılabilir. Özellikle literatür taramasında Atmaca vd., 2012 [10] ve Liu vd., 2015 [11] makalelerde bu konu üzerine ayrıntılı çalışmalar sunulmuştur.

Farin öğütme aşamasındaki özgül enerji yoğunluğunu düşürmenin, kullanılan değirmene bağlı olduğu görülmektedir. Bilyalı değirmenlere nazaran valsli dik değirmen kullanılması kullanılan enerji miktarının gözle görülür şekilde düşmesini sağlamaktadır. 1.2 (EK_{1.2}) No'lu gösterge bazında ilk sırada yer alan fabrikada Valskli Dik Değirmen kullanıldığı, en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan fabrikada ise bilyalı değirmenler kullanıldığı görülmüştür. Değirmen değiştirilmesi işlemi maliyetlerin yüksek olması sebebiyle, bilyalı değirmenlerin kullanılması durumunda Atmaca vd., 2012 [10] ve Touil vd., 2006 [12] tarafından yayınlanan makaleler enerji optimizasyonu üzerinde etkili çalışmalarını ortaya koymuşlardır.

Bilyalı değirmenle dik değirmen tesislerinin toplam güç tüketimleri karşılaştırıldığında farin öğüten dik değirmenlerin %10-15 daha az enerji tüketildiği görülmektedir. [3]

Klinker pişirme prosesinde prekalsinasyonlu sistem kullanılması ve üretim kapasitesine yakın üretim yapılması enerji verimliliği kapsamında önemlidir. Ayrıca yaş sistemlerden (lepol gibi) kuru sistemlere dönüş yapılması gerekmektedir.

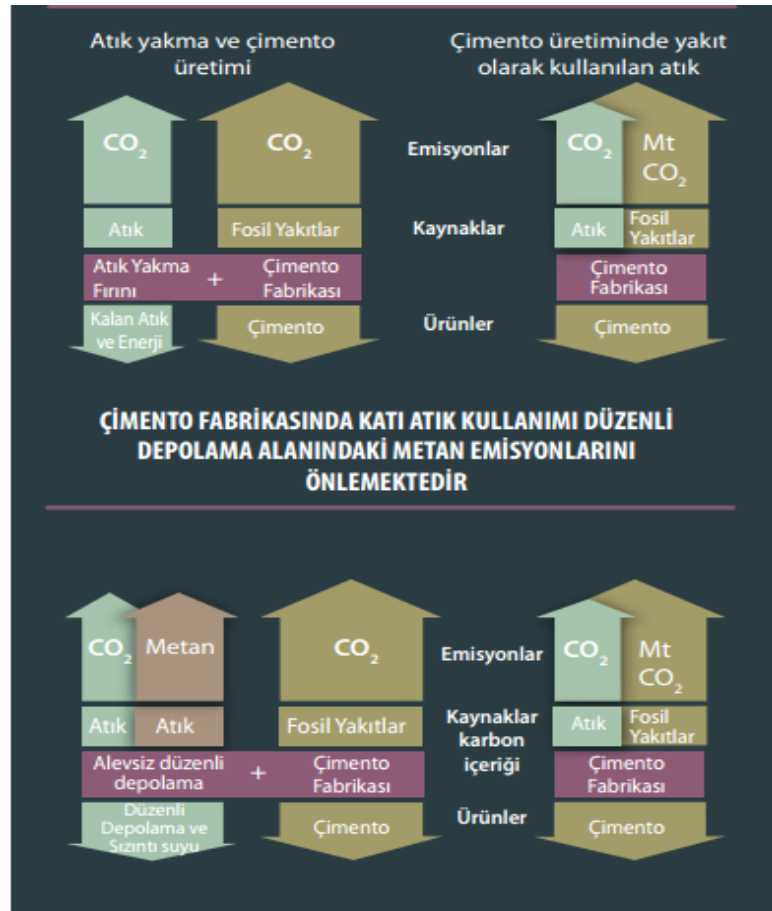
Çimento değirmeninde valsli dik değirmen ya da bilyalı roller pres (ön öğütücülü) kullanılmalıdır. Bilyalı değirmenlerde ölü ağırlık oranının valsli değirmenlere göre yüksek olması nedeni ile spesifik enerji tüketimi yüksektir.

Çimento üretimi doğrudan kaynaklı CO₂ salım yoğunluğu YEGM tarafından yapılan kıyaslama çalışmalarında birincil yakıt kaynaklı CO₂ Salım yoğunluğu, Atık Yakıt kullanımına bağlı CO₂ salım yoğunluğu ve kalsinasyon sonucu gerçekleşen CO₂ salım yoğunluğunun toplamı olarak değerlendirilmektedir.

Doğrudan kaynaklı CO₂ salımında en önemli indikatör pişirme için kcal/kg klinker ile klinker için spesifik CO₂ salınımı arasında doğrudan bağlantı bulunmaktadır. Örnek olarak 28 no' lu fabrikanın klinker için harcanan birincil ve ikincil enerji toplamı Türkiye ortalaması 848,8 kcal/kg klinker ve yakıttan kaynaklanan spesifik CO₂ miktarı 0,331 tonCO₂/ton klinker' dir.

Bu kapsamda değerlendirildiğinde, kullanılan fosil yakıt miktarının yüksek olması doğrudan CO₂ salımı ve yakıt kaynaklı CO₂ salımlarını yükseltmektedir. Kalsinasyondan gerçekleşen CO₂ salımına etki edilmesi çok mümkün değildir. Prosesin gerçekleşmesi için zorunlu olarak meydana gelmektedir.

Hollanda Uygulamalı Bilimsel Araştırmalar Kurumu (TNO) tarafından yapılan bir çalışma, çimento sanayinde atıkların alternatif yakıt ve hammadde olarak kullanılması ile atıkların tehlikeli atık yakma fırınlarında yakılması sonucu elektrik ve buhar geri kazanımı işlemlerini karşılaştırmıştır. Bu değerlendirme, farklı atık ve çevresel etki kategorilerinin (Yaşam döngüsü değerlendirmesi) tam bir yaşam döngüsünü dikkate almıştır. Çevresel etkilerin büyük bir çoğunluğu göz önüne alındığında, çimento sanayinde alternatif yakıt olarak sınavi atıkların kullanılmasının, bunların atık yakma fırınlarında işleminden geçirilmesinden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. [27]



Şekil 5.9 Çimento Fabrikaları ve Katı Atık Kullanımı Düzenli Depolama Alanı Karşılaştırılması [5]

Düzenli depolamadan gelen salımlar, CO₂ 'den 21 kat daha fazla küresel ısınma potansiyele sahip bir gaz olan metanı %60 oranında içermektedir. [5]

İkincil yakıt olarak çimento fabrikalarında kullanılan atıklar;

- Kullanılmış lastikler
- Atık yağlar
- Yağlı atıklar
- Diğer solventler ve boya çamurları
- Plastik-kağıt-karton-ambalaj atıkları
- Artıma çamurları ve ağartma toprağı
- Katı yanabilir atıklar ve atıktan türetilmiş yakıt
- Kontamine atıklar
- Petrol Rafinasyonu, Doğal Gaz ve Kömür İşlenmesine ait Atıklar
- Sıvı yakıt atıkları
- Ahşap ve Tekstil Atıkları

Göstergede öne çıkan fabrikalar yoğun bir şekilde ikincil yakıt kullanan fabrikalardır. Bu kapsamda ikincil yakıt kullanımı önemli bir yer tutmaktadır.

Fosil yakıt kullanımı yerine ikame edilecek atıkların kullanımı hem çevreye hem de insanlara büyük katkı sağlamaktadır.

Atık ısıdan geri kazanım (WHR) sistemi kurulu fabrikalar hem elektrik üretimi kapsamında ekonomi boyutunda, hem de CO₂ salım tasarrufu kapsamında avantaj sağlamaktadır.

Organik Rankin çevrimi ile 150 °C gibi düşük sıcaklıktaki atık ısıdan elektrik üretimi sağlanabilmektedir. Termodinamik performansı ile ilgili en uygun çalışma sıvısını seçilerek (düşük sıcaklıkta elektrik üretimine imkan sağlayan izopentan gibi) daha düşük kaynama noktasına sahip organik sıvılar kullanılarak elektrik üretilmektedir. Wang vd., 2015 [20] yılında yayınlanan makalede ORC'nin çimento fabrikasında uygulanarak etkilerini gösterilmiştir.

Yakıt kaynaklı CO₂ salımında önemli olan kullanılan yakıtların fosil yakıt olmasıdır. Salım katsayısı düşük olan LPG, fuel oil kullanılması durumunda salımın düşük olmasına, ancak yakıt kaynaklı maliyetin yükselmesine sebep olmaktadır.

Bu kapsamda da değerlendirildiğinde hem maliyet hem de CO₂ salım açısından petrokok, ve/veya ithal kömür kullanımı önerilmektedir. Hatta prosesi ve ürün kalitesini bozmamak koşulu ile yüksek kalorili atık yakıt kullanılarak fosil yakıt kullanımı düşürülmesi ve atık yakıt kullanımı ile CO₂ salım tasarrufu sağlanması amaçlanmaktadır. Alternatif yakıtların birlikte işlenmesi fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılmasının yanı sıra emisyonların azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır.

Fırın tüketiminden farin ve kömür değirmeni seçimi ve yeterli silo kapasitesi inşa edilerek enerji maliyetinin yüksek olduğu saatler (puant) bu ünitelerin durdurulması önerilmektedir. Ayrıca, yüksek kapasiteli değirmen seçimi ile bu ünitelerin arıza duruşları nedeniyle oluşan hammadde ve yakıt açığının ortadan kaldırılması sağlanacaktır.

Her ne kadar kırıcıların ve değirmenlerin ilk yatırım maliyetleri yüksek olmakla beraber, puant duruşları ile ve arıza durumları için ihtiyati rezerv oluşturmak açısından avantaj sağlayacaktır.

Tüm bunların dışında, çimento fabrikalarında yapılması önerilen sistemlerin yüksek finansman kaynakları gerektirse de fabrikalarda yapılan etütler sayesinde mevcut durumda yapılacak ufak değişiklikler ile enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Bunlardan elektrik sistemlerinde aşağıdaki öneriler gerçekleştirilmesi ile gözle görülür tasarruflar sağlanabilecektir.

Değişken Hız Sürücüsü (DHS) Yüküne göre alternatif akımın frekansını ve dolayısıyla motorun dönüş hızını ve elektrik gücünü kontrol ederek motoru uygun devirde tutan değişken hız sürücüleri ilave tasarruf sağlanabilmektedir.

Ekonomik ömrünü tamamlamış düşük verimli (EFF3) motorları yüksek verimli motor (EFF1) ile değiştirilmelidir. Yüksek verimli motorların düşürülmüş sargı ve sürtünme kayıpları azaltılmış olup, uzun gövdeden dolayı direnç kayıpları (I^2R) düşürülmüştür. [29]

Tablo 5.7’ de “**ideal**” çimento fabrikasının oluşturulmasına katkı sağlanması amacıyla öneriler özetlenmiştir.

Tablo 5.7 Sürdürülebilir Çimento Endeksi Kapsamında Öneriler

Öneri	Etkilenecek SÇE Göstergesi
Yüksek kapasiteli kırıcıların kullanılması ve kırılacak hammaddelerin nem oranlarının düşürülmesi	$EN_{1,1}$
Valsli dik değirmen kullanılması	$EN_{1,2}$
Yaş sistemlerden (lepol gibi) kuru sistemlere dönüş yapılması ve prekalsinasyonlu sistemlerin kullanılması	$EN_{1,3}$
Valsli dik değirmen ya da bilyalı değirmen kullanılacak ise roller pres (ön öğütücülü) eklenmeli	$EN_{1,4}$
Pişirme için gerekli kalorinin (kcal/kg) azaltılması için yakma sistemlerinin geliştirilmesi	$ÇE_{2,1}$
Yüksek kalorili fosil yakıt kullanılarak tüketiminin azaltılması	$ÇE_{2,2}$
İkincil (atık) yakıt kullanımının artırılması	$ÇE_{2,3}$
WHR sisteminin fabrikalarda yaygın hale getirilmesi, hatta daha düşük ısıdan faydalanılan ORC ile elektrik üretiminin sağlanması	$ÇE_{2,4}$
Kullanılan fosil yakıt miktarının düşürülmesi, atık yakıt kullanımının sağlanması ve artırılması	$EK_{3,1}$
Fabrikaların kapasitelerine yakın üretim yapması	$EK_{3,2}$
WHR sisteminin kurulması	$EK_{3,3}$
Elektrik tüketiminin Puant kullanımı yerine gece kullanımının sağlanması	$EK_{3,4}$

Çalıřma kapsamında gerçekleřtirilen öneriler dikkate alınarak imento sektöründe uygulandıđında enerji maliyetleri dūřurularak Avrupa' da ve dūnyada daha rekabetçi, salımların dūřurūlmesi ve atıkların bertarafı ile sektör çevreci olarak kūresel alanda da ūlkemiz hedeflerine katkı sađlayacaktır.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] RUBENSTEIN, Madeleine., State Of Planet, Earth Ensitute Columbia University, 2012.
- [2] TOBB, Türkiye Çimento ve Çimento Ürünleri Meclisi Sektör Raporu, 2012.
- [3] KULELİ, Ömer, Çimento Mühendisliği El Kitabı, 2010.
- [4] Dünya Bankası, Türkiye’de Enerji Tasarrufu Potansiyelini Kullanmak, 52210-TR, 2011.
- [5] Cembureau, Sustainable Cement Production, Co-Processing Of Alternative Fuels And Raw Materials In The European Cement Industry, 2009.
- [6] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, <http://www.eie.gov.tr/>
- [7] Birleşmiş Milletler, Türkiye beşinci ulusal iletişim teknik inceleme raporu FCCC/IDR.5/TUR, 2015.
- [8] IPCC, WRI (2006) Chicago Climate Exchange: Greenhouse Gas Emission Factors For Direct Emission Sources, 2006.
- [9] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, <http://www.tcma.org.tr/>
- [10] ATMACA, Adem, KANOGLU, Mehmet, Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry, Energy 42, s.261-269, 2012.
- [11] LIU, Z., WANG, Z., YUAN, M.Z., YU, H.B., Thermal efficiency modelling of the cement clinker manufacturing process, Journal of the Energy Institute 88,s.76–86, 2015
- [12] TOUIL, D., BELAADI, S., FRANCES, C., Energy efficiency of cement finish grinding in a dry batch ball mill, Cement and Concrete Research 36, s.416–421, 2006.
- [13] MIKULČIĆ, Hrvoje, VUJANOVIĆ, Milan, ASHHABB, Moh'd Sami, DUIĆ, Neven, Large eddy simulation of a two-phase reacting swirl flow inside a cement cyclone, Energy 75, s.89-96, 2014.
- [14] MIKULČIĆ, Hrvoje BERG, von Eberhard, VUJANOVIĆ, Milan; PRIESCHING, Peter; PERKOVIC,, Luka; TATSCHL, Reinhard, DUIĆ, Neven, Numerical

modelling of calcination reaction mechanism for cement production, *Chemical Engineering Science* 69,s.607–615, 2012.

- [15] MIKULČIĆ, Hrvoje, VUJANOVIĆ, Milan, von BERG, Eberhard, PRIESCHING, Peter; TATSCHL, Reinhard, DUIĆ, Neven, Numerical analysis of cement calciner fuel efficiency and pollutant emissions, *Clean Techn Environ Policy* 15,s.489–499, 2013.
- [16] RAHMAN, Azad, RASUL, M.G., KHAN, M.M.K., SHARMA, S., Aspen Plus Based Simulation for Energy Recovery from Waste to Utilize in Cement Plant Preheater Tower, *Energy Procedia* 61,s.922 – 927, 2014.
- [17] MIKULČIĆ, Hrvoje, VUJANOVIĆ, Milan, DUIĆ, Neven, Reducing the CO₂ emissions in Croatian cement industry, *Applied Energy* 101, s.41–48, 2013.
- [18] MIKULČIĆ, Hrvoje, VUJANOVIĆ, Milan, MARKOVSKA, Nataša, FILKOSKI, Risto V., BAN, Marko, DUIĆ, Neven, CO₂ Emission Reduction in the Cement Industry, *Energy* 45, s.464-473, 2012.
- [19] KARELLAS, S., LEONTARITIS, A.-D., PANOUSIS, G. BELLOS, E., KAKARAS, E., Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry, *Energy* 58,s.147-156, 2013.
- [20] WANG, Huarong, XU, Jinliang, YANG, Xufei, MIAO, Zheng, YU, Chao, Organic Rankine cycle saves energy and reduces gas emissions for cement production, *Energy* 86,s.59-73, 2015.
- [21] ZHANG, Shaohui, WORRELL, Ernst, CRIJNS, Wina, Graus Mapping and modeling multiple benefits of energy efficiency and emission mitigation in China's cement industry at the provincial level, *Applied Energy* 155,s.35–58, 2015.
- [22] SUA, Te-Li, CHANB, David Yih-Liang, HUNGC, Ching-Yuan, HONGA, Gui-Bing, The status of energy conservation in Taiwan's cement industry, *Energy Policy* 60,s.481-486, 2013.
- [23] ATMACA, Adem, YUMRUTAŞ, Recep, Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry, *Applied Thermal Engineering* 66,s.435-444, 2014.

- [24] OECD, Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide, 2008.
- [25] T.C. Bilim, Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü, Çimento Sektörü Raporu, 2014/1, 2014.
- [26] Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi,
<http://www.tedas.gov.tr/BilgiBankasi/Sayfalar/ElektrikTarifeleri.aspx>
- [27] TNO Science and Industry, LCA of thermal treatment of waste streams in cement clinker kilns in Belgium, I&T-A R 2007/036, 2007.
- [28] Japanese Business Alliance for Smart Energy Worldwide, List of Technologies and Products 2015, Kawasaki Heavy Industries Ltd, File No./F-24, Waste Heat Recovery System, <http://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/pdf/factory/F-24.pdf>
- [29] Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, <http://www.eie.gov.tr/>