

**ENDÜSTRİYEL ENERJİ VERİMLİLİĞİ METODOLOJİSİ VE
ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE UYGULAMASI**

Şehnaz DALOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2007

ANKARA

Şehnaz DALOĞLU tarafından hazırlanan ENDÜSTRİYEL ENERJİ VERİMLİLİĞİ METODOLOJİSİ VE ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE UYGULAMASI adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. Ali DURMAZ

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :Prof. Dr. Ali DURMAZ

Üye : Prof. Dr. Güngör GÜNDÜZ

Üye : Doç. Dr. Mustafa YURDAKUL

Üye :Yrd.Doç.Dr. Mehmet ATAK

Üye : Yrd.Doç.Dr. Hüseyin TOPAL

Tarih :04.07.2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Şehnaz DALOĞLU

ENDÜSTRİYEL ENERJİ VERİMLİLİĞİ METODOLOJİSİ VE ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE UYGULAMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Şehnaz DALOĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2007

ÖZET

Türkiye günümüzde kullandığı toplam enerjinin %70'ini ithal yoluyla sağlamaktadır. Bu oranın önümüzdeki yıllarda daha da artması beklenmektedir. Toplam tüketimin içerisinde doğalgazın payı 2006 yılında %44,00 elektrik üretimindeki payı ise %43,73 olmuştur. Doğal gaz temininde ağırlıklı olarak tek kaynağa bağlı olunması, fiyatlarının aşırı biçimde artması ve doğal gaz ve petrolün bir politik baskı aracı olarak kullanılması sürecinin başlatılması, ülke güvenliği ve ekonomisi yönünden çok önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Enerji ve çevre sorunları bağlamında alınması gereken önlemlerin başında; enerji verimliliğinin artırılması çalışmaları, alışılmış başlıca enerji kaynakları olan linyit ve hidrolik enerji kullanım oranlarının artırılması, olabildiğince rüzgar, jeotermal, biyokütle ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek gerekmektedir. “En ucuz ve en temiz enerji tasarruf edilen enerjidir” özdeyişi enerji verimliliğinin önemini vurgulamaktadır. Bu çalışmada endüstriyel tesislerde enerji verimliliği çalışmaları ve uygulamalarıyla ilgili mühendislik yaklaşımları, teknik ve ekonomik analizleri vb. tüm faaliyetleri kapsayan genel metodoloji irdelenmiş, çimento fabrikası temelinde bireysel uygulama, çimento sektörü temelinde ise sektörel uygulama biçiminde ele alınmıştır. Bireysel uygulamada bir tesisteki enerji kullanım noktaları saptanıp, bunlarla ilgili enerji tasarruf potansiyelleri

bu potansiyelleri geri kazanımla ilgili yatırımlar belirlenir. Her bir noktada enerji tasarrufu ile ilgili yatırım tutarları, bunların yıllık amortisman giderleri belirlenir. Bu giderler o noktadaki yıllık enerji tasarrufunun getirisiyle karşılaştırılarak, her önlemin ekonomik yönden en uygun uygulama stratejisi belirlenir. Tüm tesis için belirlenen teknik ve ekonomik analizler ve uygulama stratejileri enerji tasarrufu sağlama eğrisi olarak isimlendirilen bir diyagramda toplanarak, öngörülen bir zaman dilimindeki tüm enerji verimliliği uygulama stratejileri oluşturulur. 2005-2020 dönemi için Türk çimento sektörünün enerji tasarrufu sağlama eğrileri oluşturulmuş, çeşitli senaryolar bağlamında sektörde yıllara göre önlemlerin dağılımı ve uygulama zamanları, yıllara göre birim ürün enerji tasarruf değerleri, birim enerji maliyetleri, özgül birincil enerji tüketimleri vb. veriler bu eğriler üzerinde gösterilmiştir. Sektörün 1990-2004 yılları arasında almış olduğu bazı rehabilitasyon ve enerji tasarrufu önlemleriyle, 1990 yılı referans alınarak 2004 yılı itibariyle toplam birincil enerji tüketiminde 12,9 PJ/yıl tasarruf sağlamıştır. Bunun parasal karşılığı 52,8 milyon \$/yıl'dır. Faiz oranının %12 olması durumunda özgül birincil enerji tüketimi 2004 yılında 4,12 GJ/t-çimento değerinden, 2020 yılında 3.03 GJ/t-çimento'ya azalmaktadır. Bu azalmanın gerçekleştirilebilmesi için 2010 yılında 309 milyon \$, 2020 yılında ise 434 milyon \$ yatırım yapılması gerektiği görülmüştür. Bu programın uygulanması durumunda çimento sektöründe 2004-2020 yılları arasında toplam 26,04 PJ birincil enerji tasarrufu sağlanabileceği, bunun ise parasal karşılığı 8,95 \$/GJ olacağı hesaplanmıştır.

Bilim Kodu :914.1.038
Anahtar Kelimeler :Enerji Verimliliği, Çimento Üretimi, Ekonomik Analiz
Sayfa adedi :129
Tez Yöneticisi :Prof. Dr. Ali DURMAZ

METHODOLOGY OF INDUSTRIAL ENERGY EFFICIENCY AND APPLICATION ON THE CEMENT SECTOR

(M. Sc. Thesis)

Şehnaz DALOĞLU

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2007

ABSTRACT

Nowadays, Turkey attains seventy percent of total energy by importing. It is believed that this percentage will rise in the next year. Natural gas rate was 44,00% percent and electricity generation rate was 43,73% in total consumption in 2006. The supply of natural gas predominantly based on single resource, the price rise exaggerated, natural gas and petroleum used as a means of political pressure, threatens country's security and economy. Some precautions must be taken for energy and environment concerns. These are energy efficiency increase studies and the increase of traditional energy sources such as lignite and hydro energy, and also renewable energy sources such as wind, geothermal, biomass and solar energy. The expression, " The cheapest and the best energy is saved energy" implies the importance of energy efficiency. In this study, engineering approaches which concerns energy efficiency studies and applications in industrial intuitions, technical and economic analysis etc. and all related work are explored. The studies were carried on a single cement plant, and extended to the entire field. In single plant based approach, the energy usage points in a plant and the related energy saving potentials and investment to the potential feed-back were determined. In addition, the amount of investment and their annual amortization expends related in energy saving were determined. The consumptions were compared with the annual energy saving

revenue at the appropriate point, and the economical precautions were determined by most appropriate execution strategies. The specified technical and economic analysis and application strategies for the plant were collected in a diagram which is named “energy saving supply curve”, and all energy efficiency execution strategies were composed in a forecasted period of time. The energy saving supply curve of Turkish cement industry was created for the period of 2005-2020. According to different scenarios, distributions of precautions in year and application times, primary product energy saving values, primary energy cost, specific primary energy consumption etc. and other values were plotted in there diagrams. With some rehabilitation and energy saving precautions between 1990-2004, as saving of 12,9 PJ/year was provided in primary energy consumption taking 1990 as a reference year. Its monetary equivalent is 52,8 million \$/year. The specific primary energy consumption reduces from 4,12 GJ/ton-cement in the year 2004 to 3,03 GJ/ton-cement in 2020 if the interest rate is %12. The required investment to realize this reduction is 309 million \$ in the 2010, and 434 million \$ in the year 2020. If this programme is carried out, 26,04 PJ total primary energy saving can be provided in cement sector between 2004-2020 years, and its monetary equivalent is 8,95 PJ/\$.

Science Code	: 914.1.038
Keywords	:Energy Efficiency, Cement Production, Economical Analysis
Page Number	:129
Adviser	:Prof. Dr. Ali DURMAZ

TEŞEKKÜR

Çalışmam değerli kişilerin yardım ve katkılarıyla gerçekleştirilmiştir. Başta çalışmamın her aşamasında değerli bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, çıkan problemlere çözümler bulan sayın tez danışmanım değerli insan Prof. Dr. Ali DURMAZ'a, yine benden yardımlarını esirgemeyen kıymetli arkadaşım Sayın Murat CÜRÜKSULU'ya, benden manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Meral DOĞANAY ve hayatım boyunca her konuda beni motive eden çok sevgili aileme, emeği geçen bölüm personeli ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ENDÜSTRİYEL ÜRETİMDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ	3
2.1. Enerji Verimliliğinin Temelleri ve Mühendislik Yaklaşımı	3
2.2. Üretim Sistemleri ve Girdiler	4
2.3. Üretim Sistem Yapısının Oluşturulması	7
2.3.1. Üretim sistemlerin teknik analizi	7
2.3.2. Üretim sistemlerin ekonomik analizi	9
2.3.3. Üretim sistemlerin çevresel analizi	12
3. ENERJİ ÜRETİMİ, İLETİMİ, DAĞITIMI VE KULLANIMINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ	15
Birincil Enerji Kaynakları	15
3.2. İkincil Enerji Türleri, Özellikleri, Uygulama Alanları	18
3.3. Enerji Dönüşüm Metodolojisi	21
3.4. Enerji Dönüşüm Sistemleri	23
3.4.1. Enerji dönüşüm sistemlerinin tasarımında mühendislik yaklaşımı	23
3.4.2. Enerji dönüşüm sistemi olarak termik santraller	23

Sayfa

4. ÇİMENTO SANAYİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ	34
4.1. Türk Çimento Sektörüne Genel Bakış	35
4.2. Çimento Üretimi Aşamaları	37
4.2.1. Hammadde (farin) sağlama sistemi.....	37
4.2.2. Hammadde hazırlama sistemi	40
4.2.3. Yakıt hazırlama sistemi.....	41
4.2.4. Klinker üretim yöntemleri ve pişirme sistemi.....	43
4.2.5. Klinker soğutma sistemi.....	47
4.2.6. Çimento öğütme sistemi.....	52
4.3. Çimento Sektörü Enerji Verimliliği Modelinin Oluşturulması.....	54
4.4. Çimento Sektöründe Enerji Verimliliğinin Artırılması Çalışmalarında Mühendislik Yaklaşımı	59
4.5. Çimento Sektöründe Enerji Verimliliğinin Artırılması Yöntemleri	60
4.5.1. Enerji tasarruf önlemleri	62
4.6. Önlemler İçin Modelde Kullanılan Özgül Tasarruflar ve Yatırımlar	74
4.7. Enerji Tasarrufu Sağlama Eğrisi ve Bulunması	78
4.8. Enerji Hesapları.....	87
4.8.1. Fiili üretim ve katkı oranları	87
4.8.2. Enerji hesapları	91
4.8.3. Enerji tasarrufu ile ilgili senaryolar	96
4.8.4. Maliyet hesapları.....	103
5. ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE MODELLEME SONUÇLARININ İRDELENMESİ	110
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	116

	Sayfa
KAYNAKLAR	118
EKLER.....	121
EK-1 Türkiye çimento sektörü için yapılan anket çalışması.	122
EK-2 Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi.	128
ÖZGEÇMİŞ	138

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Çimento ve klinker üretim miktarı ve artışları (ton).....	36
Çizelge 4.2. Çimento sektöründe 2004 yılında kullanılan yakıt karışımlarının ısı bazda ortalama kullanım oranları	42
Çizelge 4.3. Çimento sektöründe 2004 yılında kullanılan klinker hammadde- lerinin (farin) ortalama kullanım oranları	53
Çizelge 4.4. Çimento sektöründe 2004 yılında kullanılan katkı maddelerinin kullanım oranları	53
Çizelge 4.5. Model girdi ve çıktıları	57
Çizelge 4.6. Çimento sektörü ile ilgili enerji tasarruf önlemleri listesi	60
Çizelge 4.7. Bir döner fırında hesaplanan ve olması gereken buharlaşma değerleri	65
Çizelge 4.8. Çimento sektöründe kullanılan birincil birim enerji maliyetleri (KEM).....	74
Çizelge 4.9. Önlemlerin ortalama özgül ısı, elektrik tasarrufu, ortalama özgül yatırım değerleri ve uygulama oranları	75
Çizelge 4.10. Enerji tasarruf önlemlerinin tasarruf edilen birim enerji maliyetine (TEM) göre sıralaması	79
Çizelge 4.11. Yıllara göre klinker üretim kapasitesi, çimento öğütme kapasitesi, hammadde kapasitesi ve katkı oranı değerleri	87
Çizelge 4.12. Yıllara göre çimento üretimi, kapasitesi ve tesis yeterliliği.....	89
Çizelge 4.13. Yıllara göre klinker üretimi, kapasitesi ve tesis yeterliliği	90
Çizelge 4.14. Klinker ve çimento enerji hesapları	95
Çizelge 4.15. Katkı ve klinker oranları, özgül toplam birincil enerji tüketimi ve tüketimdeki azalma yüzdesi	96
Çizelge 4.16. Toplam elektrik tüketimi [kWh/T-çim]	98

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.17 Klinker özgül toplam birim enerji tüketimi senaryoları [GJbe/T-kli].....	100
Çizelge 4.18 Çimento için toplam BE Tüketimi [GJbe/T-çim]	102
Çizelge 4.19. Toplam yıllık enerji tüketimi (%12 faiz için) [PJ/yıl].	103
Çizelge 4.20. Yakılan yakıtın yakıt oranı, kalori sarfiyatı, ısıl değeri, özgül maliyeti, özgül yakıt maliyeti, toplam içindeki oranı	105
Çizelge 4.21. Özgül enerji maliyet değerleri	107
Çizelge 4.22 Yatırım değerleri.....	108
Çizelge 4.23. Toplam enerji maliyeti %12 ve %30 faiz oranı için	109

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Üretim sisteminin genel yapısı, ham ve işlenmiş girdileri ile ham ve işlenmiş çıktıları	6
Şekil 2.2. Ekonomik yönden en uygun santral sistem yapısının belirlenmesi	10
Şekil 2.3. Kar Kaşığı	12
Şekil 3.1. Yakıt türleri ve yakıtların enerji dönüşüm sistemi üzerinden ikincil enerjilere dönüşümü	15
Şekil 3.2. Fosil yakıtların oluşum süreci ve yanma türleri ve ilgili emisyonlar.	16
Şekil 3.3. Ham yakıt, ikincil enerji türleri ve ilgili emisyonlar	19
Şekil 3. 4. Enerji dönüşüm süreçleri ve enerji akım şemaları	20
Şekil 3.5. Yakıtın çeşitli enerji dönüşüm süreçleriyle yakıt türevsel ikincil enerjilere dönüşümü ve ilgili emisyonlar	21
Şekil 3.6. Basitleştirilmiş santral akım şeması	24
Şekil 3.7. Uygulamada görülen bir termik santralin karmaşık sistem yapısı	25
Şekil 3.8. Bir termik santralde enerji akış diyagramı ve başlıca enerji kayıpları	26
Şekil 3.9. Kazan enerji dengesi	28
Şekil 4.1. Çimento ve klinker üretim değerlerinin (ton) yıllara göre değişimi	36
Şekil 4.2. Bir entegre çimento fabrikasının alt sistemleri ve akış şeması	39
Şekil 4.3. Döner soğutucu	48
Şekil 4.4. Planet soğutucu.	49
Şekil 4.5. Shaft tipi soğutucu.	51
Şekil 4.6. Çimento sektöründe kullanılan katkı maddelerinin kullanım oranları	54
Şekil 4.7. Türkiye çimento sektörü için kümelenmiş bir enerji kullanım ve CO ₂ emisyon modeli	56

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Çimento sektöründe enerji tasarruf önlemlerinin uygulanabilme oranları	76
Şekil 4.9. Çimento sektöründe enerji tasarrufu sağlama eğrisi (%12 faiz).....	83
Şekil 4.10. Çimento sektöründe enerji tasarrufu sağlama eğrisi (%30 faiz).....	84
Şekil 4.11 Kötümser senaryo için enerji tasarrufu sağlama eğrisi (%12 faiz).....	85
Şekil 4.12 Kötümser senaryo için enerji tasarrufu sağlama eğrisi (%30 faiz).....	86
Şekil 4.13. Yıllara göre çimento üretimi, kapasitesi ve tesis yeterliliği.....	89
Şekil 4.14. Yıllara göre klinker üretimi, kapasitesi ve tesis yeterliliği	91
Şekil 4.15. Toplam özgül elektrik tüketimi.....	98
Şekil 4.16. Klinker İçin Enerji Tüketimi.....	100
Şekil 4.17 Çimento için enerji tüketimi	102
Şekil 5.1. İncelenen senaryolar için Türkiye çimento sektöründe tüketilen toplam birincil enerjinin yıllara göre değişimi.....	111
Şekil 5.2. İncelenen senaryolar için Türkiye çimento sektöründe tüketilen toplam enerjinin maliyetinin yıllara göre değişimi	112
Şekil 5.3. İncelenen senaryolar için Türkiye çimento sektöründe özgül ısı tüketiminin yıllara göre değişimi	112
Şekil 5.4. İncelenen senaryolar için Türkiye çimento sektöründe özgül elektrik tüketiminin (klinker ve çimento) yıllara göre değişimi	113
Şekil 5.5. Türkiye çimento sektörünün özgül birincil enerji tüketiminin maliyetlere ve yıllara göre değişimi (Senaryo 3, %12 Faiz).....	114
Şekil 5.6. Türkiye çimento sektörünün özgül birincil enerji tüketiminin maliyetlere ve yıllara göre değişimi (Senaryo 3, %30 faiz).....	114

RESİMLERİN LİSTESİ

Resimler	Sayfa
Resim 4.1. Döner soğutucu dış ve iç görünüşü.....	48
Resim 4.2. Planet soğutucu	49
Resim 4.3. Izgaralı soğutucu.....	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
η	Sistem Verimi
η_H	Buhar Hat Verimi
$\eta_{IG\dot{C}}$	Isıl Güç Verimi
η_{IT}	İç Tüketim Verimi
η_J	Jeneratör Verimi
η_K	Kazan Verimi
η_M	Mekanik Verim
η_{TR}	Trafo Verimi
A	Birim Yakıt Başına Baca Gazı Kül Miktarı
C_{Kar}	Birim Ürün Başına Kar Miktarı
C_{Sat}	Birim Ürün Başına Satış Miktarı
cp_G	Basınçta Yanma Gazı Özgül Isısı
C_T	Toplam Üretim Maliyeti
C_Y	Birim Ürün Yakıt Gideri
CO	Baca Gazı Özgül CO Emisyonu Miktarı
F	Yıllık Faiz Oranı
F_Y	Yük Faktörünü
G_Y	Toplam Yakıt Maliyeti
$\bar{g}$	Ortalama Birim Yakıt Fiyatı
H_{CO}	CO Isıl Değeri
H_u	Yakıt Alt Isıl Değeri
K_B	Baca Gazı Duyulur Isı Kaybı
K_{CO}	Yanmamış CO Isıl Kaybı
K_{CH}	Yanmamış Hidrokarbonların Isıl Kaybı
K_{IA}	Izgara Altı Yanmamış Kömürü Isıl Kaybı

Simgeler**Açıklama**

K_i	Kazan İşletme Kaybı
K_{KK}	Kazan Kabuğu (yalıtımı ısı) Kaybı
H_{kok}	Kok Isıl Değeri
K_{UK}	Yanmamış Uçucu Kok, vb. Isıl Kayıpları
K_Y	Kazan Yanma Kaybı
M	Isıtma Yüzeyinden Geçen Debi
My	Yakıt Tüketimi
n_A	Amortisman Süresi
P_{GK}	Sistem Kurulu Gücü
Q_K	Kazan Isıl Kapasitesi
Q_Y	Toplam Üretim
T_B	Baca Gazı Kazan Çıkış Sıcaklığı
T_{KD}	Kazan Dairesi Sıcaklığı
UK	Toplam Yanmamış Kok Oranı
X_{Ti}	İşletme Vektörü
v_{GY}	Özgöl Yaş Yanma Gazı Miktarı
v_{Gkr}	Özgöl Kuru Yanma Gazı Miktarı
YK	Küldeki Yanmamış Kok Oranı

Kısaltmalar**Açıklama**

B	Buharlaştırıcı
BE	Birim Enerji
Çim.	Çimento
ÇKS	Çıktı Hazırlama Sistemi
<u>D</u>	Diğer Gamlar
EDS	Enerji Dönüşüm Sistemi
EMÇ	Elektromanyetik Çevrim
<u>Eni</u>	Enerji Gamı

Kısaltmalar**Açıklama****GHS**

Girdi Hazırlama Sistemi

H

Hammadde Gamı

HS

Hidrolik santral

İ

Personel Gamı

IGÇ

Isıl Güç Çevrimi

KÇ

Katkılı Çimento

KEM

Kullanılan Enerji Maliyeti

Kli.

Klinker

ÖET

Özgöl Birincil Enerji Tasarrufu

ÖIT

Özgöl Isı Tüketimi

ÖY

Özgöl Yatırım Tutarı

PÇ

Portlan Çimento

P_{el}

Elektrik Enerjisi

P_{me}

Mekanik Enerji

TEM

Tasarruf Edilen Birincil Enerji Maliyeti

TKK

Toplam Kurulu Kapasite

TS

Termik Santral

TY

Toplam Yatırım Maliyeti

TYA

Toplam Yıllık Amortisman,

TYÜ

Toplam Yıllık Enerji Üretimi

UO

Uygulanabilirlik Oranı

Ü

Ürün Gamı

Y

Yakıt Gamı

YA

Yıllık Amortisman Gideri

YAO

Yıllık Amortisman Oranı

YBO

Yıllık Bakım Onarım Maliyeti Değişimi

YET

Yıllık Birincil Enerji Tasarrufu

1. GİRİŞ

Türkiye, kalkınmakta olan ve nüfusu artan bir ülke olması nedeniyle enerji tüketimi hızla artmaktadır. Enerji verimliliği ilkelerine genelde uyulmaması bu tüketimi daha da artırmaktadır. Tüketilen bu enerjinin büyük bir bölümü, bilimsel enerji verimliliği uygulamalarıyla geri kazanılabilir. Enerji verimliliği diğer dar kapsamıyla enerji tasarrufunda, enerji sunumunda ve tüketiminde uygulanacak bazı önlemlerle sağlanabilir. Önemli olan, gerek duyulan üretim ve hizmetlerin istenildiği miktarda, nitelikte ve kesintisiz biçimde yerine getirilmesidir. Enerji verimliliği çalışmaları, ham enerjiden (yakıtlar) doğrudan kullanılabilen yakıt türevsel ikincil enerjilerinin üretiminde, bunların iletim-dağıtımında ve kullanımında olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilebilir. Enerji hammaddesi olan yakıtlar: fosil, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere üç grup altında toplanabilir. Yakıt türevsel ikincil enerjileri ise; teknik veya sentetik yakıtlar, ısı, mekanik ve elektrik enerjileri olmak üzere dört grup altında toplanabilir. Sentetik yakıtlar olarak: kok, rafineri katı, sıvı ve gaz ürünleri, hidrojen vb. örnek olarak verilebilir. Rafineri katı ürünleri: petrokok olarak da isimlendirilir ve çimento döner fırınlarında öncelikle kullanılmak istenen bir yakıttır.

Bu çalışmada, yoğun enerji tüketen bir endüstriyel sektör olan çimento sektörünün küresel ticaret koşullarında rekabet konumunu muhafaza edip, sürdürülebilmesi için çağdaş enerji verimliliği uygulamalarının metodolojisi, mühendislik yaklaşımları, teknolojileri ve uygulama yaklaşımları irdelenmektedir. Bunun içinde öncelikle çimento sektörünün kümesel bir modeli oluşturulup, bu modelle ilgili çimento sektörünün üretim özellikleri; yakıt, hammadde, katkı maddesi vb. girdisel karışımları, enerji kullanımı vb. verilerle enerji tasarrufu potansiyellerinin boyutları ve bu potansiyellerden yararlanma yöntemleri belirlenecektir. Bu potansiyel değerlerini belirlemek için matematiksel bir modelleme geliştirilmiş olup, bu matematiksel model ile 2004-2020 yılları için enerji tasarrufu sağlama eğrisi elde edilmektedir. Bununla beraber yaptığımız hesapları %12 ve %30 faiz için ve üç varsayım (senaryo) ile ele alıp, fayda-maliyet analizi yapılmaktadır. Bu kapsamda,

Bölüm 2’de endüstriyel üretimde enerji girdisinin önemi, enerji maliyetleri ile ilgili teknik, ekonomik ve çevresel analizler irdelenmektedir. Bölüm 3’te enerji dönüşümü ve enerji dönüşüm sistemleri genel olarak ele alınmaktadır. Bölüm 4’te ise çimento sektöründe, sektörel bazda veya fabrika temelinde enerji verimliliği çalışmaları ayrıntılı biçimde incelenmektedir.

2. ENDÜSTRİYEL ÜRETİMDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

2.1. Enerji Verimliliğinin Temelleri ve Mühendislik Yaklaşımı

Enerji yoğun endüstriyel üretim sistemlerinde üretim maliyetinin en aza indirilmesinin başlıca yolu, üretim sistemlerinde toplam enerji tüketiminin en aza indirilmesiyle mümkündür. Kullanılan enerjiler, yakıtlar ve yakıt türevsel ikincil enerjiler biçiminde olabilir. Enerji verimliliği, enerji hammaddesi olan yakıtların ikincil enerjiye dönüşümünde, ikincil enerjilerin iletiminde, dağıtımında ve kullanım aşamalarında sağlanmaya çalışılmalıdır. Yakıtlarda depolu bulunan kimyasal enerji, yanma süreciyle ısı enerjisine dönüşür. Isı enerjisi, iş potansiyeli (ekserji) ve anerjinin (ölü enerji) toplamından oluşur. Enerji verimliliğinin temel tanımı; yakıt ekserjisinden olabildiğince yararlanmaktır. Çimento fabrikaları, çelik fabrikaları, rafineriler, termik santraller vb. enerji yoğun üretim sistemleri 30-60 yıl gibi bir işletme ömrü esas alınarak tasarımlanır. Bu sistemlerin tasarım aşamasında o an geçerli yakıt fiyatları ve enerji verimliliği teknolojileri esas alındığından, bu sistemlerde ilerleyen yıllarda endüstriyel enerji verimliliği çalışmaları yaparak birim ürün toplam enerji tüketiminin en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu amaca yönelik rehabilitasyon ve inovasyon çalışmaları yapılmadığı sürece endüstriyel kuruluşun rekabet gücünü koruması ve sürdürülebilir bir üretimin gerçekleştirilmesi olanaksızdır. Bu üretim sistemleri, onlarca alt sistem, donanım ve birimlerden oluşur. Belli aralıklarla, bu sistemlerde tüm enerji kullanım yerleri ve alt sistemlerinde enerji ve kütle dengeleri çıkartılıp, enerji kullanım verimlerinin uluslar arası standartlarda en uygun üretim için ön görülen değerlerle karşılaştırılıp, geri kazanımı olanaklı enerji kayıplarının belirlenmesi gerekir. Çağdaş enerji verimliliği yaklaşımlarında termodinamiğin birinci yasası tarafından tanımlanan enerji dengesi değil, termodinamiğin ikinci yasasını yansıtan ekserji dengesi ele alınmalıdır. Uygun ekserji dengesinde prosese sunulan ısıнын ekserjisinin, prosesin gereksinim duyduğu ısı enerjisine eşitlenmesi gerekir. Örneğin; 100°C sıcaklık düzeyinde ısı gerektiren proses ısısının ekserjisi:0,2 anerjisi:0,8'dir. Bunun için yakılan yakıtın birim ısısının 1400°C'deki ekserjisi:0,82 anerjisi:0,18; kombine çevrim durumunda elektrik

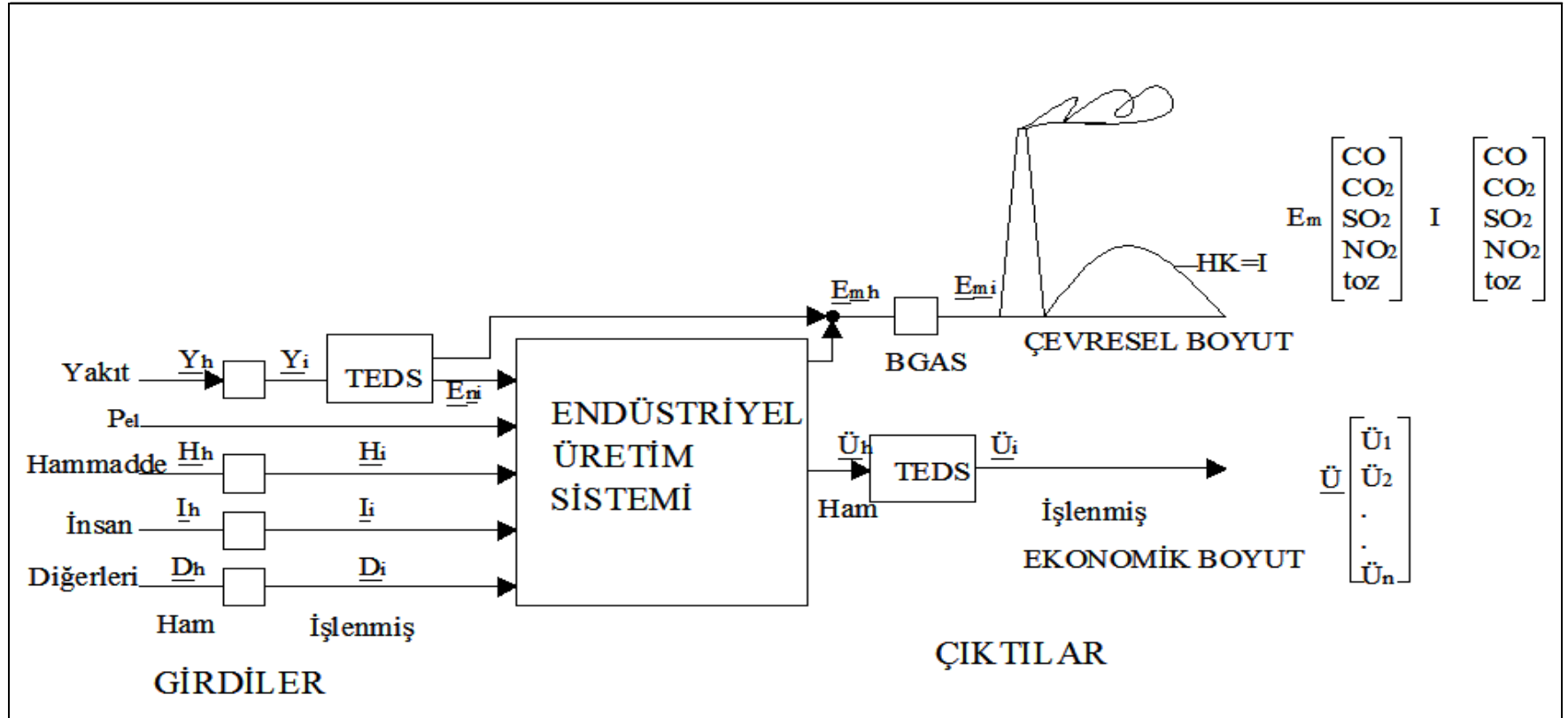
oranı:0,58, buhar çevrimi durumunda 0,44 dolayındadır. 100°C süreç ısısı sağlamak amacıyla yakılan yakıt ekserjisinin ancak %20'sinden yararlanabilmekte, ekserjinin %62'si kayıp olmaktadır. Günümüz teknolojisinde birim ısı başına kazanılabilecek %22-40 orandaki elektrikte ekserji kaybı olarak çevreye atılmaktadır. Enerjinin depolanamaması nedeniyle, ısı ve elektrik bileşik ısı-güç santrallerinde eş zamanlı olarak birlikte üretilip, kullanım yerlerinde birlikte tüketilmesi durumunda yakıt ekserjisinin tamamına yakınının kullanımı söz konusu olmaktadır. Enerji dönüşüm sistemlerinde ekserji analizleri Bölüm 3'te açıklanmıştır.

Endüstriyel enerji tasarrufu çalışmalarında, ilgili üretim sisteminin tüm girdileri, girdi hazırlama sistemleri, üretim süreçleri, çıktılar ve çıktı koşullandırma sistemleri enerji ve işletme ekonomisi yönünden incelenip enerji ve kütle ve kütle dengeleri çıkartılır. Tüm enerji kullanım yerleri, kullanılan enerji türleri, kullanım yük koşulları, enerji kullanan birimlerin özgül enerji tüketimleri vb. veriler ayrı ayrı belirlenir. Enerji kullanan sistemlere yanma, ısı performans, girdisel özelliklere bağlı işlevsel testler ve enerji verimliliği testleri yapılarak, bu sistem ve birimin güncel en iyi teknolojik sistem, enerji performansı ile karşılaştırılır. Yapılacak ekonomik analizler sonucunda mevcut birimin, yeni birimlerle değiştirilmesi durumunda oluşacak yıllık amortisman giderinin değişimle sağlanacak daha az yıllık enerji kullanımının yıllık parasal getirisi karşılaştırılarak, yeni sistemlere geçilip geçirilemeyeceği geçirilecekse nasıl ve ne zaman geçirileceği sistematik bir biçimde belirlenir. Bununla ilgili sistematik mühendislik yaklaşımı, çimento sektörü özelinde Bölüm 4'te ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir.

2.2.Üretim Sistemleri ve Girdileri

Bir endüstriyel üretim sisteminin genel yapısı, ham ve işlenmiş girdileri ile ham ve işlenmiş çıktıları şeklinde Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Böyle bir sistemin işlevi, ham girdilerin girdi hazırlama sistemleriyle (GHS), üretim sistem yapısı için uygun hale getirilip, bunların çeşitli ve karmaşık üretim süreçleriyle ham çıktılar biçimine dönüştürülmesi ve bu çıktıların alıcı (müşteri, çevre) memnuniyeti ve koşulları

içerisinde tüketicilere sunulmasıdır. Üretilen ürünler, sistemin ekonomik boyutunu; sistemden çevreye salınan atıklar ve emisyonlar ise sistemin çevresel boyutunu oluştururlar. Ürünlerin müşteri memnuniyetini sağlayacak biçimde ucuz, kaliteli ve süreklilikte olması istenir. Sistem bacalarından çevreye salınan, hava, toprak, su kirliliğine neden olan emisyonların, çevresel yönetmeliklerde verilen sınır değerleri altında olacak biçimde atmosfere salınması gerekir. Ürün gamı veya vektörü $\underline{U}$ ($U_1, U_2, \dots, U_n$) için gerekli girdi gamları veya vektörleri: yakıt vektörü $\underline{Y}$ ($Y_1, Y_2, \dots, Y_n$), hammadde ve ara madde vektörü $\underline{H}$ ($H_1, H_2, \dots, H_n$), çeşitli personel türlerinden oluşan insan vektörü $\underline{I}$ ($I_1, I_2, \dots, I_n$), diğer girdileri gösteren $\underline{D}$ ($D_1, D_2, \dots, D_n$) vektörlerinden oluşur. Bu girdi gamları, ilgili girdi hazırlama sistemleriyle sistem yapısı için uygun işlenmiş girdi vektörleri haline getirilir. Üretim için gerekli işlenmiş enerji vektörü $\underline{E}_{ni}$ (teknik yakıtlar; $\underline{Y}_T$, ısı, mekanik enerji, elektrik enerjisi) ya doğrudan dışardan yada elektrik enerjisi ulusal elektrik şebekesinden; teknik yakıtlar (kok, rafineri ürünleri, hidrojen vb.) ilgili üreticilerden; ısı, mekanik ve elektrik enerjisi ise doğrudan kuruluş içinde bulunan enerji dönüşüm sistemleri (kazan, fırın, içten yanmalı motorlar, elektrik motoru vb.) yardımıyla kuruluş içinde üretilerek temin edilir. Isı ve elektriğin sürekli birlikte kullanıldığı uygun yük koşullarında; kazan, içten yanmalı motor ve gaz türbini uygulamalı bileşik ısı güç santrallerinde, yakıt ekserjisinin tümünden yararlanılacak biçimde birlikte üretilir. Bu yaklaşımla, enerji verimliliği yönünden en uygun enerji üretilir ve enerji maliyetleri de minimuma düşürülebilir. Endüstriyel üretim sisteminden çıkan emisyonlar ve ürünler ‘ham çıktılar’ olarak görülebilir. Bu çıktılar, çıktı koşullandırma sistemleri (ÇKS, Şekil 2.1) yardımıyla, alıcıların istediği koşullara kavuşturulmuş olur. Bu bağlamda emisyonlar, baca gazı arıtma sistemleri (BGAS) uygulamasıyla yönetmelik koşullarını, ürünler ise paketlenme vb. uygulamalarla müşteri memnuniyetini sağlayacak hale getirilir ve müşteriye sunulur.



Şekil 2.1. Üretim sisteminin genel yapısı, ham ve işlenmiş girdileri ile ham ve işlenmiş çıktıları

Endüstriyel üretimin temel amacı üretimin tüm küresel koşullar altında sürdürülebilirliğinin sağlanmasıdır. Sürdürülebilir üretimle ilgili sektörlerin başlıca sorunu, piyasa koşullarındaki ürün kalitesi, piyasanın gerektirdiği ürün miktarı ve ürün maliyetidir. Bu çıktılar, sektörün ekonomik boyutunu oluşturur ve piyasa koşullarınca belirlenir. Küresel rekabet yönünden en önemli faktör, birim ürün maliyeti enerji payının (oranının) düşürülmesiyle fiyat yönünden piyasada kalabilmektir. Bu sağlanamazsa üretim tesisi satış yapamaz ve piyasa (müşteri) koşulları tarafından kapatılmaya zorlanır.

2.3. Üretim Sistem Yapısının Oluşturulması

Bir üretim sisteminin sistem yapısı; sistemle ilgili teknik, ekonomik ve çevresel koşulları tarafından belirlenir. Bu bağlamda üretim teknolojisinin, teknik, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla sürdürülebilir üretim için uygun olması, üretilen ürünlerin fiyat, kalite ve süreklilik yönünden müşteri memnuniyetini ve sistemden atmosfere salınan emisyonların yönetmelik koşullarını sağlaması gerekir. Bu nedenle herhangi bir üretim sisteminde, gerekli teknolojik koşulların, müşteri memnuniyetinin ve çevre mevzuatı koşullarının sağlanmaması durumunda üretim durabilir veya durdurulabilir. Bunun önlenmesi için, üretim sisteminin tasarımı, imalatı, işletilmesi, rehabilitasyonu ve inovasyonu aşamalarında ilgili teknik, ekonomik ve çevresel analizler yapıp gerekli önlemlerin alınması gerekir.

2.3.1. Üretim sistemlerin teknik analizi

Sürdürülebilir ürün ve enerji üretimi; ilgili üretim sistemlerinin, beş temel tasarım ve işletme kriterleri uyarınca oluşturulması gerekir. Bu kriterler:

- 1- Emniyet (security) kriteri
- 2- Güvenilirlik (reliability) kriteri
- 3- İşlerlik (availability) kriteri
- 4- Verimlilik (efficiency) kriteri
- 5- Çevresel uyum (environmental acceptability) kriteri

Sistemin, tüm işletme ömrü boyunca değişen enerji fiyatlarına ve küresel ekonomik koşullara uyum sağlayacak biçimde bu kriterler kapsamında işletilmesi ve sistem yapısının rekabet üstünlüğünü sağlayacak biçimde sürekli rehabilitasyon ve inovasyona tabi tutulması gerekir.

Emniyet kriteri, üretim sistemindeki alt sistem ve elemanların işletme ömrü boyunca insan ve çevreyi olumsuz yönde etkilemeyen hasarsız ve kazasız çalışmasıyla ilgili tasarım, üretim, işletme ve yedekleme koşullarının sağlanması kriteridir. Bu bağlamda üretim sistemindeki kritik noktalar önem sırasına göre belirlenip sürekli izlenmelidir [1].

Güvenilirlik kriteri, sanayi sistem dizinindeki alt elemanların tasarım aşamasında kendilerine verilen işlevleri, işletme ömrü boyunca uygun biçimde yerine getirebilmesi kriteridir. Bilgi işlemli güvenlik analizleri yapılarak kritik noktalar belirlenir. Bu noktalardaki güvenlik faktörlerinin artırılmasıyla ilgili tasarım ve işletme önlemleri alınır.

İşlerlik kriteri, sanayi sistem dizininin yönetsel ve işletmesel organizasyonunun uygun biçimde yapılarak sistem performansı ve üretimin planlandığı biçimde gerçekleştirilmesi kriteridir. Bu kriter, günümüz mühendislik çalışmalarının ve işletme ekonomisinin en önemli kriteridir ve tamamen düzgün işletme koşullarının sağlanmasıyla ilgili uygun yönetim, üretim ve bakım-onarım organizasyonlarının yapılmasına bağlıdır. Tüm teknolojik üstünlükleri taşıyan büyük harcamalarla kurulmuş bir sistemin ekonomikliği, doğrudan işlerlik faktörüne bağlıdır. İşlerlik (availability) analizi, günümüz enerji ve endüstri mühendisliğinin en güncel konusudur [3].

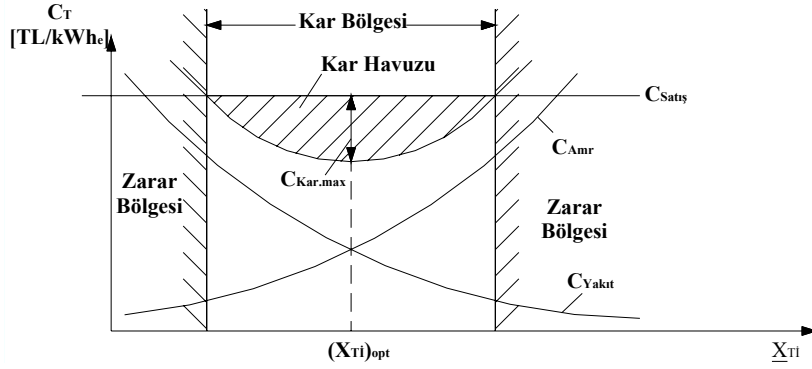
Verimlilik kriteri, girdilerin işletme ve çevre ekonomisi yönünden en uygun çıktılara (ürün) dönüştürülmesidir. Enerji bağlamında bu kriter, yakıt kimyasal eşdeğer ekserjisinin tümünün türevsel (ikincil) enerjilere üretim için gerekli ısı, mekanik ve elektrik enerjilerine dönüştürüp, üretim sistemine verilerek, üretimin en az yakıt

kullanımı ve atmosfere en az emisyon salınımıyla gerçekleştirilmesi biçiminde ifade edilebilir. Böylelikle enerji ve çevresel giderler en aza indirilmiş olur. Bileşik ısı güç santrali (BIGS) uygulaması olarak bilinen bu yaklaşım, maksimum enerji verimliliğinin sağlanmasında en etken yoldur.

Çevresel uyum kriteri, endüstriyel üretim süreçlerinde oluşan çevre kirleticisi atıkların (katı ve sıvı) ve emisyonların, ilgili çevresel yönetmeliklerde (hava, su, toprak, gürültü v.b.) öngörülen sınır değerlerin altında tutulmasıdır. ÇED raporu, emisyon, deşarj, gürültü vb. izin belgeleri uygulamalarıyla bu sistemlerin çalıştırılması, devlet garantisi altına alınmış olur [3].

2.3.2. Üretim sistemlerin ekonomik analizi

Üretim sistemlerinde temel amaç; sürekli, kaliteli ve ucuz üretimin sağlanmasıdır. Enerji dönüşüm ve üretim sistemlerinde uygulanan ekonomik analiz yaklaşımları, tüm üretim sistemleri için geçerlidir. Bu nedenle ekonomik analizler, enerji dönüşüm sistemleri esas alınarak incelenmiştir. Enerji üretim sisteminin sistem yapısı, birim enerji (ısı, elektrik) toplam üretim maliyetinin C_T 'in minimum olmasını sağlayan en uygun tasarım işletme vektörünün, $(X_{TI})_{opt}$, belirlenmesi, bunun sağladığı verilerin sistem tasarımı imalatı ve işletmesinde kullanılmasıdır. Maliyet optimizasyonu ile ilgili temel yaklaşım Şekil 2.2'de verilmiştir. Yakıt, yatırım ve sistem yapısıyla ilgili tüm veriler sistem tasarım ve işletme vektörü (X_{TI}) olarak isimlendirilir [3]. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere kâr havuzunun en derin noktasını belirleyen tasarım verileri $(X)_{opt}$ vektörünü gösterir. Bu vektör gereğince oluşturulan ve çalıştırılan işletmeler, en ekonomik işletmelerdir. $(X_{TI})_{opt}$ un konumu en başta dünya enerji (petrol) fiyatlarına bağlıdır ve artan petrol fiyatlarında sağa kayar.



Şekil 2.2. Ekonomik yönden en uygun santral sistem yapısının belirlenmesi

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i = C_{Değ} + C_{sabit} = C_Y + C_{Amr} + C_{Diğ} \quad \left[\frac{TL}{kWh} \right] \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte $C_{Diğ}$, yakıt ve amortisman giderleri dışındaki bakım- onarım, personel, revizyon, sarf vb. kalemler olup, toplam maliyet içindeki değeri büyük sistemlerde küçüktür. C_{Amr} [TL/kWh]; birim ürün başına özgül amortisman gideri, C_Y [TL/kWh]; birim ürün yakıt gideri. C_Y ve C_{amr} 'nın minimum olması istenir.

Özgül birim ürün yakıt gideri

$$C_Y = \frac{G_Y}{Q_Y} = \frac{\bar{g}_Y}{\bar{Hu} \cdot \bar{\eta}} \quad \left[\frac{TL}{kWh} \right] \quad (2.2)$$

Burada ,

G_Y [TL/a] : toplam yakıt maliyeti,

Q_Y [kWh/a] : toplam üretim,

$\bar{g}$ [TL/kg] : ortalama birim yakıt fiyatı,

$\bar{Hu}$ [kWh_Y/kg]: ortalama yakıt alt ısı değeri,

$\bar{\eta}$ [kWh/kWh_Y]: sistem (kazan, termik santral vb.) verimidir.

Burada ısııl değeri (Hu) yüksek olan yakıtı en ucuz fiyatla (C_Y) satın alırsak, enerji dönüşüm verimini maksimize etmiş oluruz.

Sistemlerin işletme ve ekonomik analizleri ile ilgili olarak amortisman, ekonomik ve fiziksel olmak üzere üç tür ömür tanımlanır.

Amortisman ömrü, sisteme yapılan yatırım geri dönüş süresidir. Bu süre amortisman yöntemine (doğrusal, yavaşlatılmış, hızlandırılmış) göre değişir. Bu Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

$$C_{Amr} = \frac{TYA}{TY\ddot{U}} = \frac{P_{KG} \cdot \ddot{O}Y \cdot YAO}{TY\ddot{U}} \left[\frac{TL}{kWh} \right] \quad (2.3)$$

TYA [TL/a] : amortisman türüne bağlı toplam yıllık amortisman,

$TY\ddot{U}$ [kWh/a] : toplam yıllık enerji üretimini,

P_{KG} [kW] : sistem kurulu gücü,

$\ddot{O}Y$ [TL/kW] : özgül yatırım tutarını,

YAO [1/a] : yıllık amortisman oranını gösterir.

$$YAO = \frac{F(F+1)^{n_A}}{(F+1)^{n_A} - 1} \quad (2.4)$$

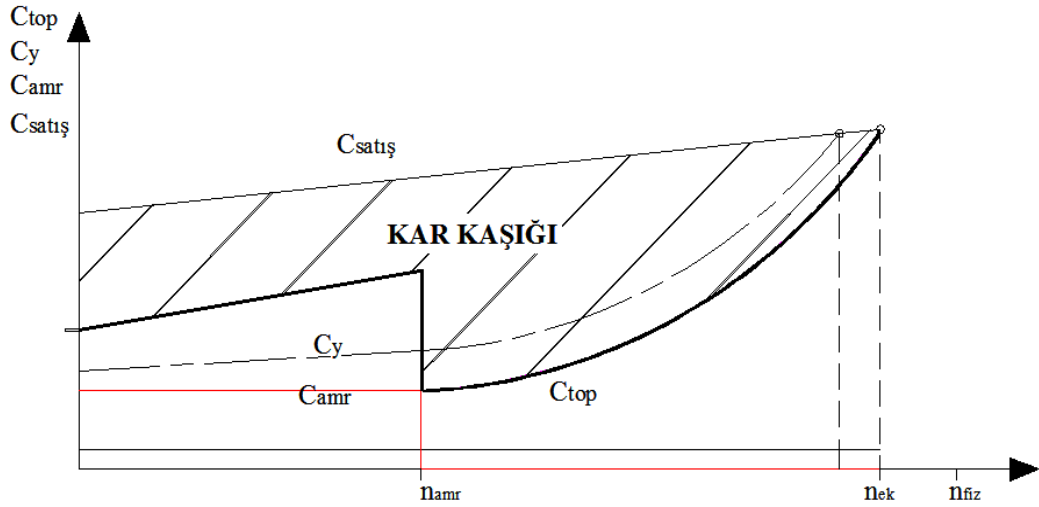
$$TY\ddot{U} = P_{KG} \cdot F_Y \cdot 8760 \left[\frac{kWh}{a} \right] \quad (2.5)$$

Burada, F [-]; yıllık faiz oranını, n_A [yıl]; amortisman süresini, F_Y [-]; sistemin yük faktörünü, 8760 [h/a]; yıllık saat süresini gösterir.

$$C_{Kar} = C_{sat} - C_T \left[\frac{TL}{kWh_e} \right] \quad (2.6)$$

$$C_T = C_Y + C_{amr} \left[\frac{TL}{kWh_e} \right] \quad (2.7)$$

Burada, C_{Kar} ; birim ürün başına elde edilen kar, C_{Sat} ; birim ürün başına elde edilen satış, X_{TI} ; tasarım işletme faktörüdür. $(X_{TI})_{opt} = C_{kar\,mx.}$ demektir. Ekonomik analizlerin başlıca amacı, herhangi bir enerji dönüşüm sistemi tasarımında, işletme ömrü boyunca sağlayacağı karın maksimum olacağı bir sistem yapısının oluşturulmasıdır. Bunun için, sistemde oluşan tüm maliyet kalemleri, birim enerji ürünü (ısı, elektrik) başına belirlenerek, birim enerji toplam maliyeti (C_T [TL/kWh]) hesaplanır ve satış fiyatından çıkarılarak, birim ürün başına kar belirlenir. Amaç karın maksimizasyonudur. İşletme ömrü boyunca sistemden sağlanan karların toplamı kar kaşığı biçiminde Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Kar kaşığı

2.3.3 Üretim sistemlerin çevresel analizi

Bir üretim sisteminde, çevresel çıktı koşullandırma bağlamında, en önemli sorun, baca gazı emisyonlarının (CO , SO_2 , NO_x ve CO_2 , partikül..vb.) değerlerinin mevcut yönetmelikler ve ileride yürürlüğe girecek yönetmelik (hava, su, toprak, gürültü vb.)

sınır değerlerinde çevreye salınımının sağlanmasıdır (Şekil 2.1). Bunlardan özellikle CO₂ küresel ısınmanın başlıca nedenidir.

Genelde tüm yakma sistemlerinde, emisyonlar, yakıttan kaynaklanan (CO₂, SO₂, NO_x, toz, ağır metaller vb.) ve yanmadan kaynaklanan (CO, NO_x, C_mH_n, uçucu kok, is, kurum vb.) olmak üzere iki grup altında toplanır. Enerjinin yoğun kullanıldığı sistemler için güncel olan emisyonlar, enerji verimliliğini azaltan CO, yanmamış uçucu kok, C_mH_n, is, kurum, yanma optimizasyonu konusudur. Yanma optimizasyonu ile bu emisyonlar, yönetmelikte öngörülen değerlere düşürülebilir.

Sera gazı emisyonlarının iklim sistemi üzerindeki olumsuz etkisini önlemek ve belli bir seviyede durdurmak amacıyla 21 Mart 1994 tarihinde yürürlüğe giren İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine bu güne kadar 187 ülke ile Avrupa Birliği taraf olmuştur. İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesini (İDÇS) içeren “Kyoto Protokolü” 11 Aralık 1997’de kabul edilmiştir. Türkiye, 24 Mayıs 2004 tarihinde “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine taraf olmuş, 2005 yılında da AB ile katılım ortaklığı müzakerelerine başlamıştır. Bu taraf olmayla şimdilik, çerçeve programında gelişmiş ülkeleri kapsayan 2. listeden çıkmış görünsek bile, AB Müktesebatını kabul etmemiz dolayısıyla gerçekte fiilen Kyoto Protokolü yükümlülüklerini yerine getirmekle karşı karşıya bulunmaktayız. Sürdürülebilir ekonomik kalkınmamızın ve uluslararası yükümlülüklerimizin gereği olarak tüm ekonomik sektörlerde, öncelikle de enerjinin yoğun olarak kullanıldığı çimento gibi sektörlerde enerji verimliliği artırılması ve çevresel korumaya yönelik çalışmaların ve gerekli rehabilitasyon uygulamalarının yapılması gerekmektedir [4].

Türkiye’nin, iklim değişikliği sözleşmesine taraf olmasıyla önümüzdeki yıllarda Kyoto Protokolü’nü kabul etmek ve bununla ilgili CO₂ salınım sınırlarına uymak zorunda kalacaktır. Bu bağlamda yoğun enerji tüketen çimento ve demir-çelik sektörlerinde enerji verimliliği çalışmaları ile CO₂ salınımı azalmış olacaktır. Aynı çalışmaların termik santraller için de yapılması gerekmektedir. Önümüzdeki yıllarda her sektördeki üretimin, mevcut en iyi teknoloji (Best Available Technology) ile

gerçekleştirilerek, bu teknoloji için gerekli yakıt tahsisleriyle karşı karşıya kalacaktır. Düşük enerji verimliliği sonunda gerekli üretimin, tahsisi ön görülen yakıtla gerçekleştirilmesi durumunda, kullanılan fazla yakıttan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının tonu başına “Karbon Vergisi” ödemek zorunda kalacaktır. Bu vergiden kurtulmak için tesislerin, rehabilitasyon çalışmalarıyla güncel verimliliğinin yükseltilmesi veya fazla yakıttan kaynaklanan CO₂’yi karşılayacak yenilenebilir enerji yatırımlarının (hidrolik santraller, biyokütle, rüzgar enerjisi vb.) gerçekleştirilebilmesi gerekir [5].

Karbon vergisi uygulamaları, Avrupa Birliği mevzuatına göre uygulama aşamasına gelmiştir.

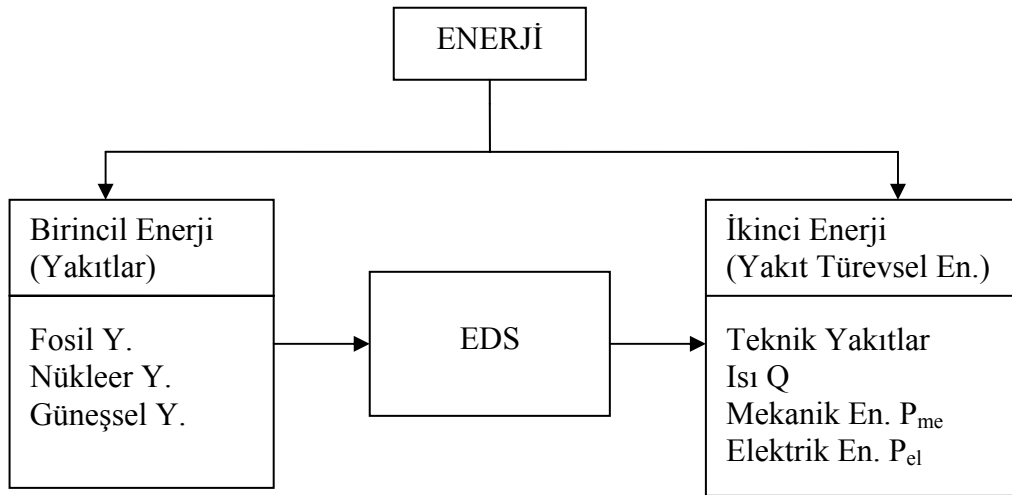
Çimento sektörü yoğun enerji kullanan ve yoğun CO₂ salan bir sektör olması sebebiyle karbon vergisinden kurtulabilmesi için mümkün olan tüm enerji verimlilik uygulamalarını kullanarak yakıt tüketimini ve CO₂ salınımını minimuma indirmek durumundadır.

3. ENERJİ ÜRETİMİ, İLETİMİ, DAĞITIMI VE KULLANIMINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Enerjinin doğrudan kullanılamayan biçimine; birincil enerji, ham enerji veya yakıt olarak isimlendirilir. Enerjinin doğrudan kullanılabilen biçimlerine ise ikincil enerji veya yakıt türevsel enerjiler olarak tanımlanır. Bu bölümde; birincil enerjiler ve bunların ikincil enerjiye dönüşümleri, dönüşüm sistemleri, dönüşüm verimleri ve dönüşüm performansları incelenmiştir.

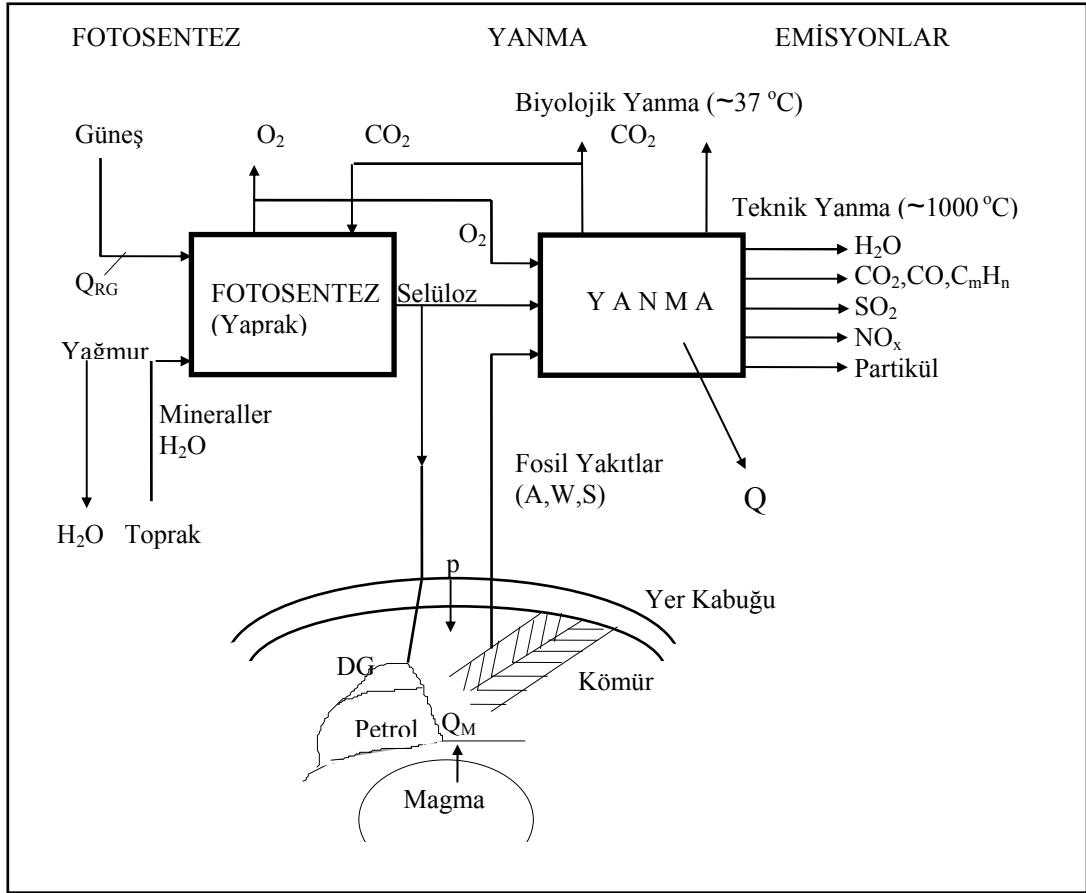
3.1. Birincil Enerji Kaynakları

Birincil enerji “ham enerji veya yakıt” olarak isimlendirilir. Yakıtlar: fosil, nükleer (çekirdeksel) ve güneşsel olmak üzere üç grup altında toplanır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Yakıt türleri ve yakıtların enerji dönüşüm sistemi üzerinden ikincil enerjilere dönüşümü

Fosil yakıtlar: organik fotosentez ve metabolik ürünlerin yüz binlerce yıl yer altında yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalarak, fosilleşme süreci sonunda oluşmuştur. Fosil yakıtlarda; kömür (katı), petrol (sıvı) ve doğalgaz diye üç gruba ayrılır. Fotosentez süreciyle fosil yakıtların oluşum mekanizması Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Fosil yakıtların oluşum süreci ve yanma türleri ve ilgili emisyonlar

Kömür, maliyet yönünden genelde en düşük, emisyonlar yönünden en olumsuz ve yakma yönünden en sorunlu yakıttır.

Ham petrol, doğrudan kullanılamaz, rafinerilerde damıtma süreçleri yardımıyla hem petrolden, sıvı, gaz ve katı petrol türevsel yakıtlar elde edilir. Bunlar teknik veya yapay yakıtlar türünden olup, sıvı türlere; fuel oil, gaz türleri ise; rafineri gazı (LPG vb.), katı türleri ise: petro kok olarak isimlendirilir. Sıvı yakıtlar genelde kazanlarda, gaz yakıtlar: konutsal ve endüstriyel ısı üretiminde, petro kok ise çimento sektörünün temel yakıtını oluşturur. Fuel-oil; 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı olmak üzere sınıflandırılır. 6no.lu fuel-oil genelde büyük kapasiteli kazanlarda, düşük numaralar ise konut vb. düşük kapasiteli kazanlarda yakılır.

Ham doğalgaz, doğalgaz arıtma tesislerinde yüksek karbonlu yaş (yoğuşabilen) bileşenlerinden ve diğer safsızlıkların arındırılarak, sadece kuru (yoğuşmayan) bileşenler biçiminde iletim boru hatlarıyla kullanım merkezlerine iletilir. Doğalgazın %95'ten fazlası metan (CH_4)dan, diğer kısımları ise etan, propan, bütan, heptandan oluşur. Doğalgaz, ara kompresör istasyonlarında basınçlandırma işlemlerinin uygulandığı yüksek basınç (80-200 bar) doğalgaz iletim boru hatlarıyla istenilen mesafelerde taşınabilir. Diğer bir taşıma yöntemi ise doğalgazın -163°C dolayında sıvılaştırılarak, kreyojenik tankerlerle kullanım yerine taşınırlar. Deniz suyu ısıyla gazlaştırılan doğalgaz gaz biçimine dönüştürülür, gaz depolarına veya doğrudan doğalgaz iletim hattına beslenir.

Nükleer yakıtlar; fisyon (çekirdek parçalanmalı, ağır izotoplar) ve füzyon (çekirdek kaynaşmalı, hafif izotoplar) diye iki gruba ayrılır. Fisyon yakıtlar; U^{235} ; doğrudan enerji üretiminde, U^{238} ve Th^{232} nükleer yakıt hammaddesi olup, önce ilgili nükleer süreçlerle nükleer teknik yakıtlar biçimine ($\text{U}^{238} \rightarrow \text{Pu}^{239}$ ve $\text{Th}^{232} \rightarrow \text{U}^{233}$) dönüştürülerek, doğrudan enerji üretiminde kullanılır. Füzyon yakıtlar; hafif izotoplar biçiminde olup, bazıları döteryum (H^2 , ağır Hidrojen), Tritiyum (H^3) ve Helyum (He^3) 'dur.

Güneş radyasyon enerjisi; güneşte meydana gelen; güneş H- füzyonu reaksiyonu sonucu yayılarak yeryüzüne ulaşan foton (elektromanyetik dalga) enerjisinden oluşur. Güneş ışıma enerjisi; fotosentez, küresel sıcaklık ve basınç değişim süreçleri sonucu bilinen; biyokütle, rüzgar, dalga, hidrolik vb. yenilenebilir enerji türlerine dönüşür. Güneş ışınının ısıya dönüşmesi ise, güneş fotonlarının (kütlesiz partiküller) siyah güneş toplaç yüzeylerinde soğurularak, kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşümü (soğurma süreci) ile oluşur.

3.2. İkincil Enerji Türleri , Özellikleri, Uygulama Alanları

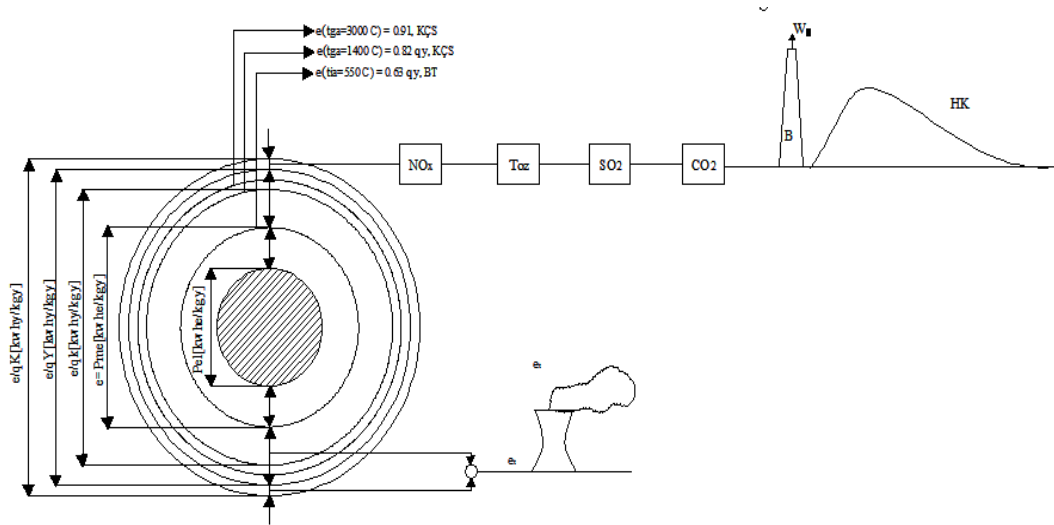
İkincil enerji, yakıtların enerji dönüşüm sistemleri tarafından doğrudan kullanılabilen biçimlerine dönüştürüldüğü enerji türleridir. Bunlar; teknik veya sentetik yakıtlar, ısı enerjisi, mekanik enerji ve elektrik enerjisidir. Yakıtın sıfırıncı mertebedeki çevrimsel türeviyle teknik yakıtlar elde edilir. Bunlara örnek olarak; fosil yakıtlardan kok, kömür gazları, hidrojen, sıvı yakıt üretimi; nükleer yakıtlardan U^{238} (uranyum)'den P^{239} (plütonyum), Th^{232} (toryum)'den U^{233} gibi doğada bulunmayan nükleer teknik yakıtların üretilmesi vb. verilebilir. Teknik yakıt üretim süreci; yakıtın sıfırsal türevinin alınması olarak adlandırılabilir. Yerkabuğuna ulaşan güneş radyasyon (ısıma) enerjisi de, güneşte oluşan hidrojen füzyonu (nükleer yanma) sonucunda oluşan, nükleer emisyonların uzayda kaldığı, temiz bir güneşsel teknik yakıt olarak kabul edilebilir. Fosil teknik yakıt üretim sistemleri, yakıt teknolojisi kapsamında işlenmektedir. Bu sistemlere örnek olarak da kok fabrikaları, kömür gazı ve briket fabrikaları, hidrojen üretim sistemleri, rafineriler verilebilir.

Teknik yakıt; enerji çevrim teknolojisi bağlamında ham yakıtın, sıfırıncı türevi $(\frac{d^0 Y}{dT^0})$, ısı; birinci türevi $(\frac{d^1 Y}{dT^1})$, mekanik enerji; ikinci türevi $(\frac{d^2 Y}{dT^2})$, elektrik ise üçüncü türevi $(\frac{d^3 Y}{dT^3})$ olarak tanımlanabilir [11].

Kömür, ham yakıt olarak alınırsa, sıfırıncı türev diğer bir anlatımla en dıştaki teknik yakıt, teknik yakıt bağlamında kok kömürü veya kömür gazı elde edilir. Bu bir eksik yanma sürecidir. Ham yakıtın veya teknik yakıtın yakılması ile ısı kabuğu uzaklaştırılır. Isı kabuğunun uzaklaştırılmasında emisyonlar açığa çıkar ve bacadan dışarıya atılır. Bu emisyonlar, fosil yakıtlarda fosil, nükleer yakıtlarda nükleer emisyon türündendir. Bacadan atılan başlıca emisyonlar (toz, SO_2 , NO_x , CO, CO_2 vb.) atmosferde dağılır ve aşağıya doğru yağarak hava kirliliğini oluşturur. Toprağa ulaşan hava kirlleticileri toprak kirliliğine, suya ulaşan kirleticiler su kirliliğine neden olurlar. Enerji dönüşüm sistemleri bacalarından atmosfere salınan emisyonların

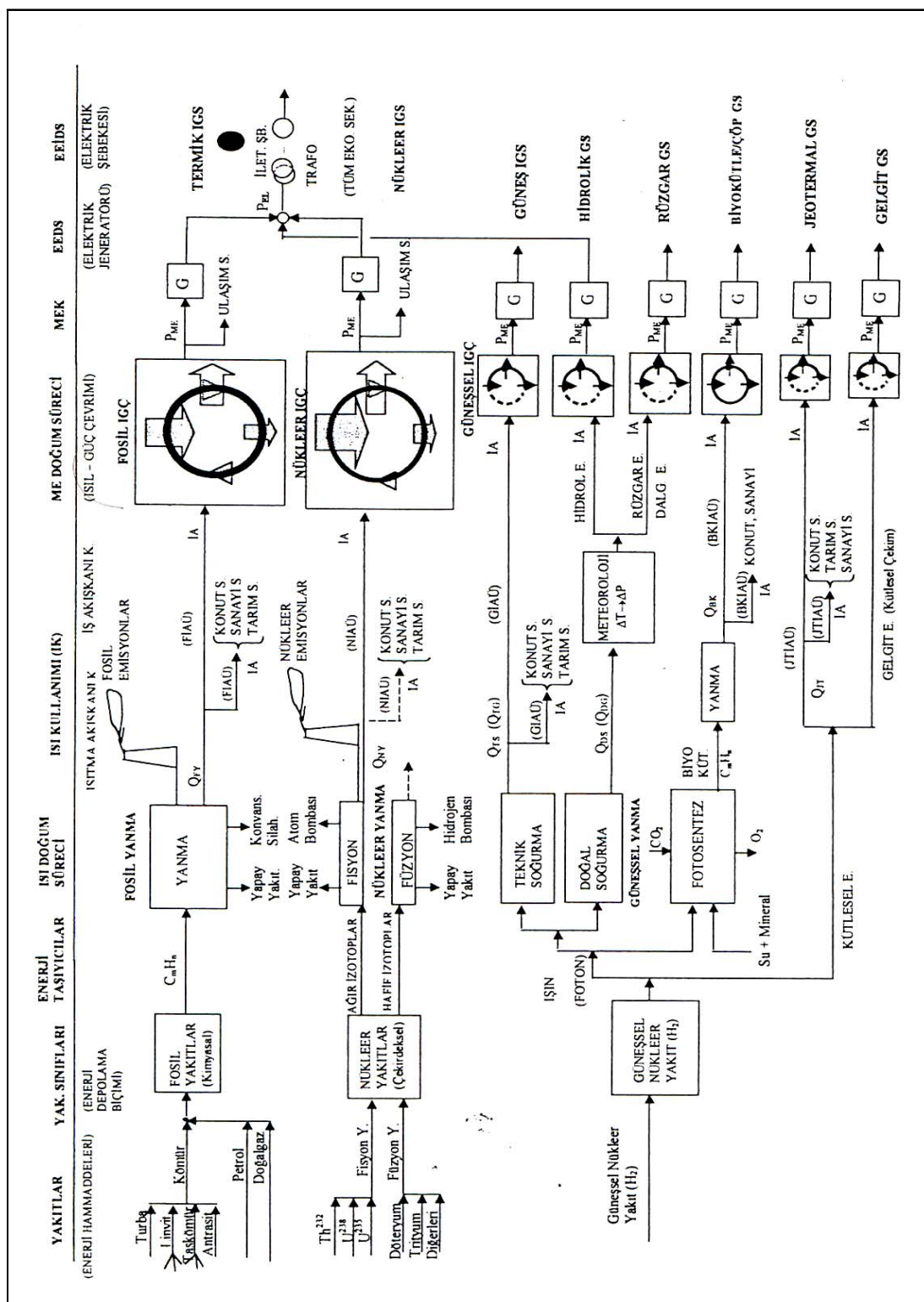
yarattığı hava, toprak, su kirliliklerinin yönetmeliklerle belirlenen sınır değerlerini aşmaması gerekmektedir (Şekil 3.3).

İş ve elektrik kabuklarının uzaklaştırılmasında veya ikincil ya da üçüncül türevsel işlemlerde sadece atık ısı emisyonları oluşur ve bunlar soğutma kulesi üzerinden atmosfere atılır. Ham yakıtın ikincil enerjiye dönüşümü ile ilgili ikincil enerji türleri (teknik yakıt, ısı, mekanik enerji, elektrik enerjisi), ilgili emisyon kabukları (teknik yakıt, ısı kabuğu, iş kabuğu, elektrik kabuğu), emisyonların atmosfere atılış biçimleri (baca, soğutma kulesi), kirlilik (hava, toprak, su) oluşum mekanizmaları Şekil 3.3'te gösterilmiştir [5]. Kömürü cevizle benzetirsek, en dıştaki yeşil kabuk ısı kabuğunu, sert kabuk iş kabuğunu, en içerde zar biçimindeki kabuk ise elektrik kabuğunu temsil eder. Cevizin içi ise elektriği gösterir.



Şekil 3.3. Ham yakıt, ikincil enerji türleri ve ilgili emisyonlar [5]

Yakıt türevsel ikincil enerjilerin sektörel kullanım yerleri ve biçimleri Şekil 3.4'te verilmiştir.

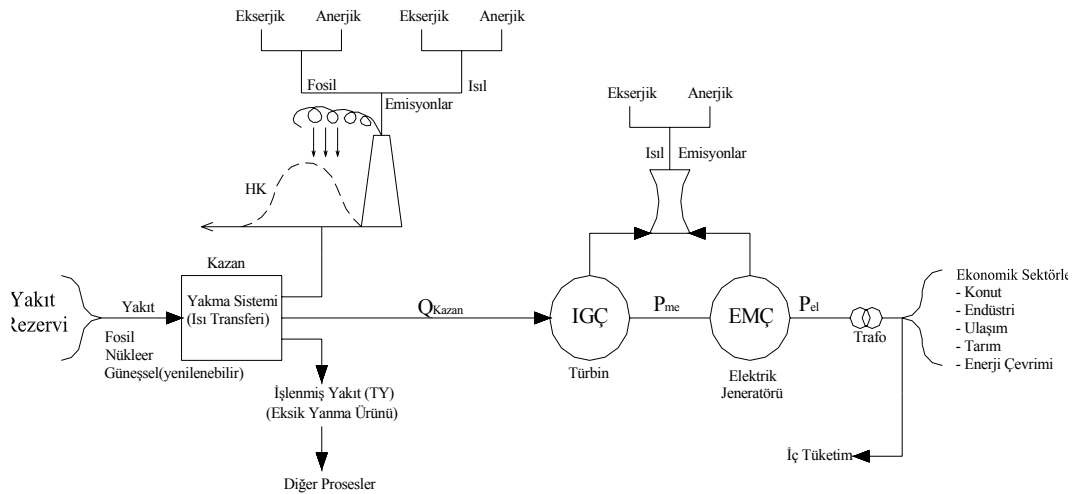


Şekil 3. 4. Enerji dönüşüm süreçleri ve enerji akım şemaları

3.3.Enerji Dönüşüm Metodolojisi

Ham yakıtlar; yanma sonucunda ısıya (Q); ısı, ısı ve güç çevrimleriyle (IGÇ) mekanik enerjiye (P_{me}); mekanik enerji, elektromanyetik çevrim (EMÇ) ile elektrik enerjisine (P_{el}) dönüştürülür. Bunlar özelliklerine göre ekonomik sektörlerde uygulanır (Şekil 3.4). Isı, öncelikle konut ısı ve endüstriyel ısı olarak konut ve sanayi de, mekanik enerji; öncelikle itki üretim aracı olarak ulaşım sektöründe ve çevrim sektöründe, elektrik enerjisi ise; sanayi başta olmak üzere tüm sektörlerde kullanılır.

Yakıtın ikincil enerji türlerine (teknik yakıt, ısı, mekanik enerji, elektrik enerjisi) dönüşümüyle ilgili enerji dönüşüm sistem zinciri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Yakıtın çeşitli enerji dönüşüm süreçleriyle yakıt türevsel ikincil enerjilere dönüşümü ve ilgili emisyonlar

Şekil 3.5'te birincil enerji dönüşüm sistemi, yakma sistemi olarak (yanma odası) veya genel anlamda iş akışkanı üretici (kazan) olarak tanımlanır. Eksik yanma ile, teknik yakıt üreteçler sıfır mertebe yakıtsal türev (d^0Y/dT^0) süreci olarak (yakıt teknolojisi) anılır ve yakıt teknolojileri kapsamına girer [5]. İş akışkanı üretici olan kazanda; yanma ve ısı/kütle aktarımı başlıca enerji dönüşüm süreçleridir. İş akışkanı; ısıtma akışkanı ve güç akışkanı olarak iki grup altında toplanabilir. Isıtma akışkanı

yanma odasından aldığı ısıyı ısı kullanıcılarına taşır. Güç akışkanı ise yanma odasında aldığı ısıyı ilgili ısıl güç çevriminin türbinine taşır. Teknik yakıt ve ısı üretim süreçlerinde yakıt türüne göre fosil veya nükleer emisyonlar oluşur, oluşan bu emisyonlar bacadan atmosfere salınır. Fosil emisyonlar kimyasal türden emisyonlardır. Bunlar enerji geri kazanımlı (ekserjik) veya enerji geri kazanımsız (anerjik) olmak üzere iki türden oluşur. Ekserjik fosil emisyonlara örnek olarak karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (C_mH_n), uçucu kok, is, kurum, vb.; anerjik emisyonlar için ise karbon dioksit (CO_2), su (H_2O), SO_2 , NO_x , toz, ağır metal vb. verilebilir. Nükleer emisyonlar içinde benzer bir sınıflama yapılabilir.

Enerji dönüşüm zincirinde ikincil enerji dönüşüm süreci, Isıl-Güç Çevrimidir (IGÇ) (Şekil 3.5). Bu sistemler, güç akışkanı ve çevrim yapısına göre buhar çevrimli (Rankine Termik Santral Çevrimi), gaz çevrimli (Brayton Gaz Türbini) ve gaz çevrimli içten yanmalı motor sistemleri (Otto, Diesel) gibi türlerden oluşmaktadır [6]. Gaz Türbini ve Termik Santral çevrimleri, sürekli ateşlemeli türden olmasına karşın, içten yanmalı motor çevrimleri kesikli ateşlemeli özelliktedir. Ayrıca gaz ve buhar çevrimlerinin birlikte kullanıldığı kombine çevrim sistemleri, ısı ve elektriğin birlikte üretildiği Bileşik Isıl-Güç (kojenerasyon) çevrimleri, kritik ve pahalı enerji dönemi olarak tanımlanan günümüz dünyasında öncelikli kullanılır hale gelmiştir. Isıl-Güç Çevrim sistemi, güç akışkanı üretim (kazan, yanma odası), güç akışkanı taşınım (buhar hattı), güç akışkanı genleşme (türbin, piston), atık ısı atma (soğutma kulesi), güç akışkanı dolaşım (besleme pompası, kompresör, piston) ve enerji geri besleme vb. alt ünitelerinden oluşan, tümleşik, döngüsel ve organize bir sistemdir. Isıl-Güç sistem verimi, bir organizasyon verimi olup, çevrimi oluşturan alt sistemlerin nicelik, nitelik ve konum yönünden bir sağ döngülü sistemin en uygun biçimde oluşturulmasıyla (yapısal ve parametrik optimizasyon) maksimize edilmesi gereken bir değerdir. Alt sistem üreticilerinin kendi sistemlerinin optimizasyonu ile uğraşmalarına karşın, bir organizasyon optimizasyonu olan Isıl-Güç Çevrim optimizasyonu, Termik Santral tasarımcısının sorumluluğundadır. Santral tasarımcısı, yakıt ve işletme koşullarını dikkate alarak birim ürün toplam üretim maliyetinin (yakıt + amortisman) minimum olacağı bir sistem yapısı belirler ve

sistem parametre optimizasyonu yapar. Ayrıca tasarımcı, çevrimi oluşturan alt sistemlerin (kazan, türbin, yoğuşturucu, soğutma kulesi, besleme pompası v.b.) tasarım verilerini oluşturarak ilgili alt sistem yapıcılara bu sistemleri ihale ederek yaptırır. Termik Santral tasarımında en etken verim, Isıl-Güç Çevrim verimidir. Enerji ekonomisi ve çevre kirliliği yönünden kazan verimi de önemli bir faktördür [7].

Enerji dönüşüm zincirindeki üçüncül enerji dönüşüm sistemi, elektromanyetik çevrimdir. Burada mekanik enerji, elektrik jeneratörü üzerinden elektrik enerjisine dönüşür. Üretilen elektrik enerjisi, elektrik trafolarında iletim için uygun gerilimlere dönüştürülerek ekonomik sektörlere iletilir ve sistemlerde dağıtılır. Uygun özelliklerdeki her bir kullanıcının kullanımına sunulur.

3.4. Enerji Dönüşüm Sistemleri

3.4.1. Enerji dönüşüm sistemlerinin tasarımında mühendislik yaklaşımı

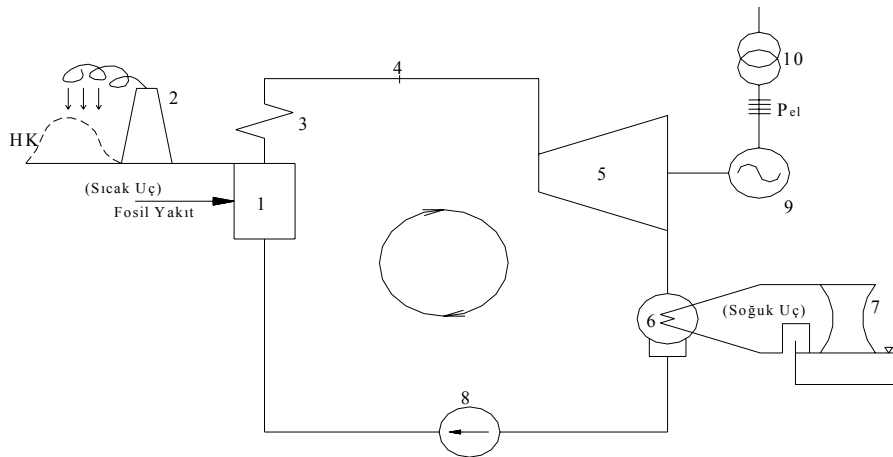
Enerji mühendisliğinin temel işlevi, doğrudan kullanılamayan birincil enerji kaynaklarının (yakıtlar), ekonomik sektörlerde doğrudan kullanılabilen işlenmiş veya ikincil enerji türlerine dönüştürülerek enerji ekonomisi ve çevresel yönden uygun biçimde sektörlerin hizmetine sunulmasıdır[8]. Enerji dönüşüm sistemlerinin tasarımı, tasarım optimizasyonu, imalatı, montajı, işletme ve kabul testlerinin yapılması, bu sistemlerin işletmesi, bakım ve onarımları gibi konular enerji mühendisliği kapsamında yer almaktadır.

3.4.2. Enerji dönüşüm sistemi olarak termik santraller

Fosil yakıtın elektriğe dönüştürüldüğü buhar çevrimli sistemler, termik santral olarak isimlendirilir. Ülkemizde bulunan termik santraller, linyit yakıtlı, taş kömür yakıtlı ve doğalgaz yakıtlı olmak üzere (kombine çevrim) türdendir. Türkiye’de 8 milyar ton dolayında linyit rezervi bulunmaktadır. Bunların tamamına yakınının alt ısı değeri

1500 kcal/kg.ın altında olan düşük kaliteli genç kömürler dış dünyadan işletme, tasarım vb. teknoloji geliştirmeye yönelik veri sağlanamayan yegane yakıt türüdür. İşletmede olan düşük kaliteli linyit yakan termik santrallerimiz, kömür kalitesindeki sürekli düşmeler sonucu, enerji dengeleri bozulan, yüksek enerji kayıplı ve yoğun emisyon yayan santrallerdir. Baca gazı arıtma sistemi tasarımı, kurulması ve işletilmesi; ilgili tesiste öncelikle yanma sorunlarının çözülmüş olmasını gerektirir. Baca gazı arıtma sistemleri tasarımı, yanma optimizasyonu yapılmış bir santralin sistem yapısı ve işletme verileri esas alınarak yapılır.

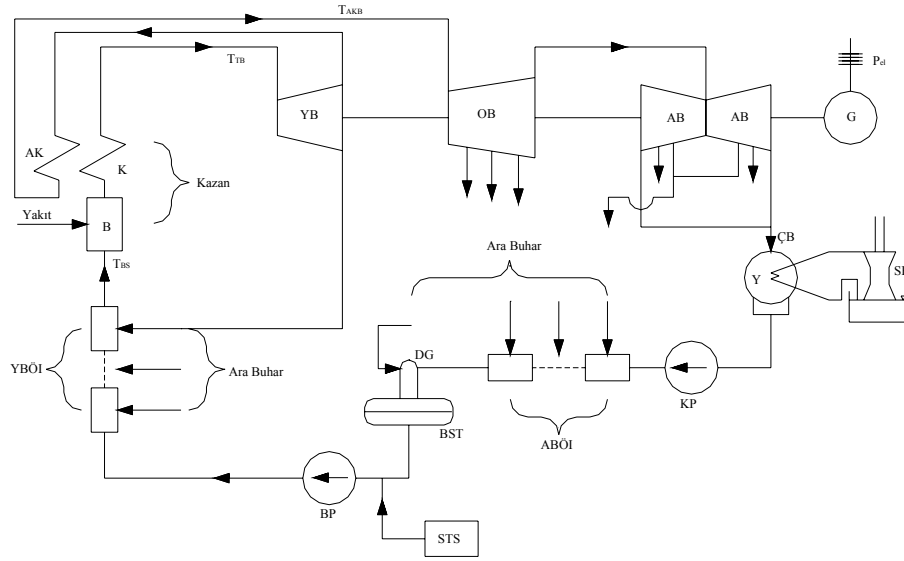
Burada basit bir Termik Santral sistem yapısı Şekil 3.6'da, uygulamada görülen karmaşık bir Termik Santral sistem yapısı ise Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.6. Basitleştirilmiş santral akım şeması [3]

- 1- Kazan, 2- Baca, 3- Kızdırıcı, 4- Buhar iletim hattı, 5- Türbin, 6- Yoğuşturucu, 7- Soğutma kulesi, 8- Besleme pompası, 9- Elektrik jeneratörü, 10- Trafo

Şekil 3.6'da bir termik santralin basitleştirilmiş akım şeması ve sistem yapısı gösterilmiştir. Kazan, sistemin sıcak ucunu; soğutma kulesi ise soğuk ucunu tanımlar. Sistem tasarım işlemleri soğuk uçtan başlanarak yürütülür.



Şekil 3.7. Uygulamada görülen bir termik santralin karmaşık sistem yapısı [3]

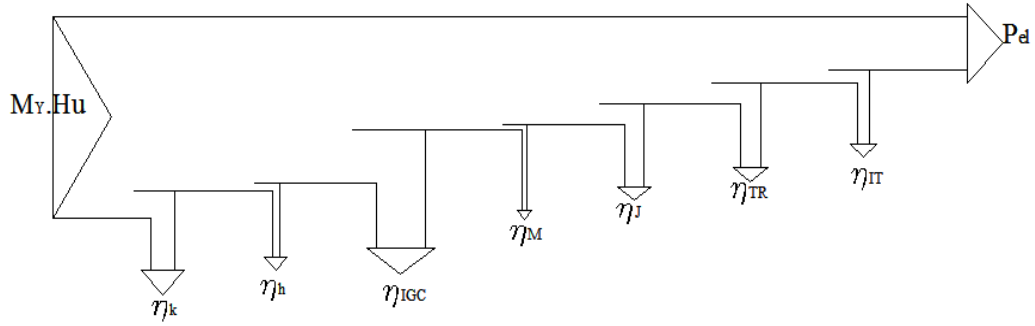
B: Buharlaştırıcı , K: Kızdırıcı , AK: Ara kızdırıcı , YB: Yüksek basınç türbini, OB: Orta basınç türbini , AB: Alçak basınç türbini , G: Elektrik jeneratörü, Y: Yoğuşturucu , SK: Soğutma kulesi , KP: Kondens pompası , ÇB: Çürük buhar, ABÖİ: Alçak basınç besleme suyu ön ısıtma sistemi , BST: Besleme suyu tankı, BP: Besleme suyu pompası , YBÖİ: Yüksek basınç besleme suyu ön ısıtma sistemi, DG: Degazör , T_{TB} : Taze buhar sıcaklığı , T_{BS} : Besleme suyu sıcaklığı, T_{AKB} : Ara kızdırılmış buhar sıcaklığı , STS : Su tasfiye sistemi

Şekil 3.7’de bir yandan türbin boyutlarının düşürülmesiyle yatırım maliyetinin azaltılması, diğer yandan kazandaki yakıt tüketiminin en aza indirilmesi nedeniyle santral veriminin artırılması için türbinlerden alınan ekserji içeriği, dolayısıyla elektriğe dönüşüm oranı düşük olan ara buharlarla besleme suyu ön ısıtma sistemlerinin kullanıldığı karmaşık bir termik santral sistem yapısı görülmektedir. Ayrıca bu sistemde korozyon yapıcı karbon dioksit (CO_2) ve oksijen (O_2), ara buhar ile degazörden atılarak sistem ömrü uzatılmaktadır [3].

Birim elektrik toplam üretim maliyetinin (yakıt, amortisman) minimum olacağı en uygun sistem dizininin alt sistem özelliklerinin tasarım ve işletme parametrelerinin belirlenmesi, santral tasarım optimizasyonu olarak tanımlanır.

Bir termik santralin yakıt ısısının elektriğe dönüşümündeki başlıca kayıplar ve bunun sonucunda oluşan verim Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bunlar kazan ısıl kaybı, buhar

hat kaybı, IGÇ (Rankine) kaybı, mekanik kayıp, jeneratör kaybı, trafo kaybı ve iç tüketimdir. Termik santral net verimi aşağıdaki biçimde yazılır (Şekil 3.8) [8].



Şekil 3.8. Bir termik santralde enerji akış diyagramı ve başlıca enerji kayıpları

$$\eta_{TSnet} = \frac{P_{el}}{M_Y * H_U} = \prod_{i=1}^n \eta_i = \eta_K * \eta_H * \eta_{IGÇ} * \eta_M * \eta_J * \eta_{TR} * \eta_{IT} \quad (3.1)$$

Eş. 3.1’de η_K kazan verimini, η_H buhar hat verimini, $\eta_{IGÇ}$ ısı güç ısı güç verimini, η_M mekanik verimi, η_J jeneratör verimini, η_{TR} trafo verimini ve η_{IT} iç tüketim verimini tanımlar. Burada en etken (en düşük ve enerji geri kazanım potansiyeli en yüksek) verim $\eta_{IGÇ}$ verimidir. Özgül ısı tüketiminin azaltılması için 7 alt verimden oluşan tümleşik termik santral net veriminin (η_{TS-net}) artırılması gerekir. Termik santral enerji verimliliği çalışması demek, bu alt verimlerin tümünün verimlerini artırmak için enerji kayıp yerlerinin, konumlarının, biçimlerinin, dağılımlarının, boyutlarının belirlenmesi gerekir.

Kazan Isıl Performans Hesapları

Kazan ısıl performansı, kazan ısıl kapasitesi $Q_K (MW_t) = f (M_B, P_B, T_B)$ ve kazan ısıl verimi η_K tarafından belirlenir. Kazan ısıl kapasitesi Q_K ve yük özellikleri kazan uygulama yeri, yük koşulları, buhar termodinamik özellikleri (debi, basınç, kızgın buhar, ara kızdırmalı buhar sıcaklıkları vb.), kazan türü vb. müşteri talepleri dikkate

alınarak tasarım öncesi belirlenir. Kazan ısı verimi (η_K) verilen kazan enerji akış diyagramı yardımıyla; dolaysız (direkt) ve dolaylı (indirekt) yöntemler kullanılarak belirlenir [2].

Kazan Isıl Veriminin Hesaplanması

Dolaysız (Direkt) Yöntem ile Kazan Isıl Veriminin Hesaplanması

Bu yöntemde, kazanda üretilen toplam ısı (Q_K), kazana verilen toplam ısıya (Q_Y+Q_{Diğer}) oranı olarak tanımlanır. Kazana verilen toplam ısı; yakıt ısısı Q_Y=M_Y·Hu ile diğer hava buhar vb. biçimde verilen ılılardan (Q_{Diğer}) oluşur. Bu ısı yakıt ısısına kıyasla ihmal edilebilecek boyuttadır. İş akışkanına aktarılan toplam ısı (Q_K); EKO'a aktarılan (Q_{EKO}), buharlaştırıcıya aktarılan (Q_B), kızdırıcıya aktarılan (Q_{Kız}) ve ara kızdırıcıya aktarılan (Q_{AK}) ısların toplamından oluşur [2].

Dolaysız yöntem ile kazan verimi aşağıdaki biçimde hesaplanır:

$$\eta_K = \frac{Q_{kazan}}{Q_Y + Q_{Diğer}} \cdot 100 \approx \frac{Q_{kazan}}{M_Y \cdot Hu} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.2)$$

Burada, Q_K [kWt]; kazan ısıl kapasitesi, η_K [kWh_t/kWh_y]; ısıl verimi, Hu [kWh_y/kg_y]; yakıt alt ısıl değeri, M_Y [kg/h]; yakıt tüketimi olarak tanımlanır.

Eş. 3.2'de görüldüğü gibi; dolaysız yöntemle kazan veriminin belirlenebilmesi için, kazana giren enerjilerin (yakıt ısısı, yakma havası, yakıt duyulur ısları, buhar vb. biçimde diğer sistemlerden kazana verilen ıslar) hesaplanabilmesi için yakıt, hava, yabancı buhar vb. akışkanların debilerinin sıcaklıklarının ve yakıt ısıl değerinin ölçülmesi gerekir. Diğer yönden kazan iş akışkanına aktarılan toplam kazan ısısının belirlenebilmesi için ısıtma yüzeylerinde (EKO, buharlaştırıcı, kızdırıcı, ara kızdırıcı, hava ön ısıtıcı) akışkan sıcaklık, basınç ve debilerinin ölçümlerle belirlenmesi

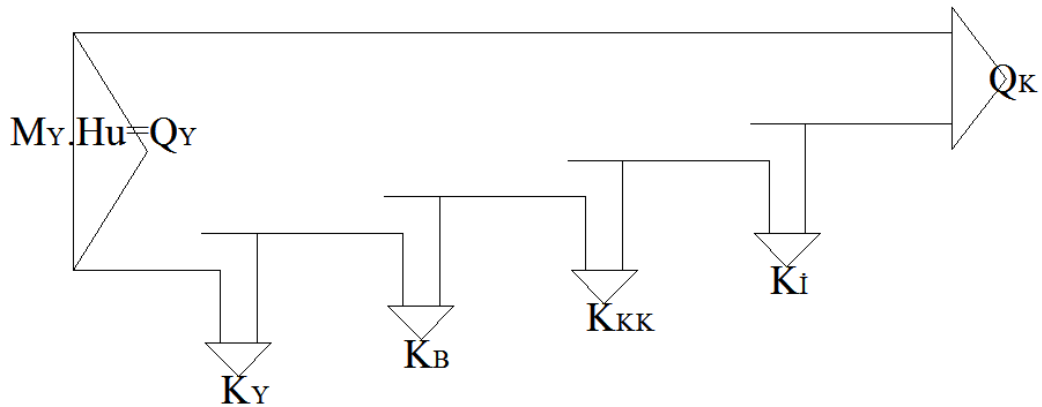
gerekir. Bu nedenle dolaysız yöntem mevcut kazanlarda ısıl performans testleri, kabul ve işletme testlerinde kullanılır. Bu yöntem mevcut olamayan kazanın tasarımı için uygun değildir.

Dolaylı (İndirekt) Yöntem ile Kazan Isıl Veriminin Hesaplanması

Bu yöntem; kazana verilen toplam ısıdan, kazandan çevreye olan toplam ısı kayıplarının çıkartılması yaklaşımına dayanır. Kazana verilen ısı %100 kabul edilirse, yüzdesel oranlarda hesaplanan kayıpların kazana verilen ısıdan çıkarılarak ısıl verim % olarak aşağıda verildiği gibi doğrudan elde edilir.

$$\eta_K = 100 - (K_Y + K_B + K_{KK} + K_I) \quad [\%] \quad (3.3)$$

Burada, K_Y [%]; kazan yanma kayıplarını, K_B [%]; baca gazı duyulur ısı kaybını, K_{KK} [%]; kazan kabuğu veya yalıtımı ısıl kaybını, K_I [%]; kazan işletme kaybını belirler (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Kazan enerji dengesi

Baca Gazı Duyulur Isı Kaybı (K_B)

Baca gazı duyulur ısı kaybı (K_B) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_B = \frac{v_{GY} \cdot c_{pG} \cdot (T_B - T_{KD})}{H_u} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.4)$$

Burada, v_{GY} [Nm^3 -yaş/kg-yakıt]; birim yakıt başına oluşan özgül yaş yanma gazı miktarını, c_{pG} [kcal/ Nm^3 -yaş]; sabit basınçta yanma gazı özgül ısısını, T_B [$^{\circ}\text{C}$]; baca gazı kazan çıkış sıcaklığı, T_{KD} [$^{\circ}\text{C}$]; kazan dairesi veya çevre sıcaklığını gösterir. Baca gazı duyulur ısı kaybının (K_B) belirlenebilmesi için öncelikle yanma hesaplarıyla özgül yaş yanma gazı miktarının (v_{GY}) belirlenmesini ve özgül ısısının (c_{pG}), yaş gaz bileşenlerinin söz konusu baca gazı sıcaklık bölgesindeki özgül ısılarının ağırlıklı olarak değerlendirilmesiyle hesaplanır. c_{pG} değerleri için literatürde Çizelge ve diyagramlar verilmiştir.

Kazan Kabuğu Duyulur Isı Kaybı (K_{KK})

Kazan dış yüzeylerinden çevreye olan ısı kayıpları kazan kabuğu veya kazan yalıtım ısı kayıpları olarak tanımlanır. Yalıtım kalitesine bağlı olarak bu kayıplar istenilen düzeye indirilebilir. Yalıtım ısı kayıpları kazan yüzeyinde yapılacak sıcaklık veya radyasyon ısı kayıp dağılımı ölçülerek taşınım ve ışıma hesapları yardımıyla hesaplanabilir. Kazan türü, kazan ısıl kapasitesi ve işletme koşullarına bağlı olarak tasarım için gerekli bu veriler literatürde verilen Tablolardan sağlanabilir veya tasarımcı tarafından tahmin edilir.

Kazan İşletme Isıl Kaybı (K_I)

Kazan işletme kaybı (K_I) çeşitli iş akışkanı aktarım organlarında ve borularda meydana gelen kaçaklar, blöf işlemi ve degazörde dışa atılan buhar vb. kaynaklanan ısı kayıplardır. Kazan türü, su kalitesi, kazan işletme koşullarına bağlı olarak bu

değerler değişir. Bunlarla ilgili literatürde verilen değerler kullanılabilir veya tasarımcı tarafından bu kayıp tahmin edilir.

Kazan Yanma Kaybı (K_Y)

Kazan yanma kayıpları K_Y aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_Y = K_{IA} + K_{CO} + K_{CH} + K_{UK} \quad (3.5)$$

Burada, K_{IA} [%]; ızgara altı yanmamış kömürü, K_{CO} [%]; baca gazının içerdiği yanmamış CO ısı kaybını, K_{CH} [%]; baca gazının içerdiği yanmamış hidrokarbonların ısı kaybını; K_{UK} [%]; baca gazının içerdiği yanmamış uçucu kok, is, kurum vb. ile ilgili ısı kayıpları tanımlar. Yanma kayıpları aşağıdaki gibi hesaplanır.

Izgara Altına Düşen Yanmamış Kömürden Kaynaklanan Yanma Isıl Kaybı (K_{IA}): Kömür türü kazan ve yakma sistemi işletme koşulları vb. parametrelere göre literatürde ızgara altı yanma kok kayıpları verilmektedir. Öngörülen yakma sistemi ile ilgili bu kayıplar literatürden elde edilir. Izgara altı yanmamış kömürün kok olduğu varsayılarak ısı kayıplar deneysel olarak aşağıdaki gibi belirlenir [9].

$$K_{IA} = \frac{A \cdot YK \cdot H_{kok}}{M_Y \cdot H_u} \cdot 100 = 2,68 \text{ [%]} \quad (3.6)$$

Burada; A [kg-kül/DS]; deney süresince ızgara altında toplanan kül (cüruf) miktarını, YK [kg-kok/kg-kül]; küldeki yanmamış kok oranını, H_{kok} [kcal/kg-kok]; kok ısı değerini, M_Y [kg-yakıt/DS]; deney süresince yakılan kömür miktarını, H_u [kcal/kg-yakıt]; kömürün alt ısı değerini tanımlar. Sıvı ve gaz yakıtlarda ızgara altı yanmamış yakıt kaybı söz konusu değildir.

Baca Gazının İçerdiği Uçucu Koktan Kaynaklanan Yanma Isıl Kaybı (K_{UK}); Burada, yanıcı özelliğe sahip partikül biçiminde baca gazında bulunan uçucu, kok, is, kurum vb. tümü uçucu kok altında tanımlanmıştır. Baca gazında yapılan partikül emisyon ölçümlerinde filtrede toplanan partiküller yakılarak ağırlık farkından uçucu kok miktarı belirlenebilir. Bu ısı kayıp aşağıdaki biçimde hesaplanabilir [3]

$$K_{UK} = \frac{A \cdot UK \cdot H_{kok}}{H_u} \cdot 100 = 0,27 [\%] \quad (3.7)$$

Burada, A [kg-uçucu kül/kg-yakıt]; birim yakıt başına baca gazının içerdiği kül miktarını, UK [kg-kok/kg-uçucu kül]; kg uçucu külün içerdiği toplam yanmamış kok oranını tanımlar.

Baca Gazının İçerdiği Yanmamış CO'ten Kaynaklanan Yanma Isıl Kaybı (K_{CO}): Baca gazı CO emisyon ölçümleriyle bulunan CO oranı kullanılarak yanmamış CO ısı kayıp aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_{CO} = \frac{v_{Gkr} \cdot CO \cdot H_{CO}}{H_u} \quad (3.8)$$

Burada, v_{Gkr} [Nm^3_{Gkr}/kg -yakıt]; özgül kuru yanma gazı miktarını, CO [Nm^3 -CO/ Nm^3_{Gkr}]; baca gazı özgül CO emisyonunu, H_{CO} [kcal/ Nm^3 -CO]; CO ısı değerini tanımlar. $H_{CO}=1020$ [kcal/ Nm^3 -CO] alınabilir. Eş. 3.8'de görüldüğü gibi bu ısı kaybın belirlenebilmesi için önce yanma hesaplarıyla, özgül kuru gaz miktarının (v_{Gkr}) hesaplanması gerekir.

Kazan Yanma Verimi (η_Y)

Yukarda belirlenen çeşitli yanma kayıpları kullanılarak, kazan yanma verimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\eta_Y = 100 - (K_{IA} + K_{CO} + K_{CH} + K_{UK}) \text{ [%]} \quad (3.9)$$

Yeni bir kazan tasarımında; tasarım için esas alınan yakıt türü, yakma sistemi, kazan yapısı ve işletme koşulları göz önünde tutularak Eş. 3.9'de verilen yanma kayıpları ya doğrudan literatürden sağlanabilir veya yanma konusunda uzman bir kişi tarafından tahmin edilebilir.

Dolaylı yöntem ile kazan ısı verimi yanma verimi de kullanılarak aşağıdaki biçimde de ifade edilebilir:

$$\eta_K = \eta_Y - (K_B + K_{KK} + K_i) \text{ [%]} \quad (3.10)$$

Dolaysız ve Dolaylı Isıl Kazan Isıl Verim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Dolaysız (direkt) yöntem ile, ısı verimin belirlenmesi (Eş. 3.2) çeşitli debi, sıcaklık, basınç ölçümlerini gerektirdiğinden pahalı ve zahmetlidir. Günümüz enerji koşullarında kazan verimlerinin % 85 olduğu varsayılırsa, kazan enerji bütçesindeki ısıнын % 85'inin belirlenmesi işlevi direkt yöntemin, geriye kalan %15'lik kazan ısı kayıplarının belirlenmesi işlevi ise indirekt yöntemin kapsamına girmektedir. İndirekt yöntem ile kazan ısı verimi Eş. 3.3 uyarınca kazan ısı kayıpları kullanılarak hesaplanır. Bu ısı kayıplar, toplam kazan enerji bütçesinin %15'ini oluşturur. Her iki yöntemde de, kazan ısı veriminin hesaplanmasında kullanılan çeşitli parametrelerin belirlenmesinde %10'luk bir hata yapılma olasılığı varsayılırsa direkt yöntemde oluşabilecek toplam belirsizlik %8.5, indirekt yöntemde ise %1.5'tur. Buradan da indirekt yöntemin direkt yöntemle göre daha hassas, daha kolay ve uygulaması daha ucuzdur. Kazan tasarımı uygulamalarında indirekt yöntem esas alınır. Kazan garanti testlerinde direkt ve indirekt yöntem birlikte uygulanır.

Kazan Isıl Kapasitesinin Hesaplanması

Kazan ısıtma kapasitesi Q_K , kazanda iş akışkanına aktarılan toplam ısı miktarı olup, kazan debileri sıcaklıkları, basınçları, entalpileri dikkate alınarak mollier yardımı diyagramıyla aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_K = M_{EKO} \cdot q_{EKO} + M_B \cdot q_B + M_{KII} \cdot q_{KII} + M_{AK} \cdot q_{AK} \quad (5.12)$$

Burada, M [kg-iş akışkanı/s]; ilgili ısıtma yüzeyinden geçen debiyi, q [kJ/kg-iş akışkanı]= Δh [kJ-iş akışkanı/kg]; ilgili ısıtma yüzeyinde giriş çıkış arasındaki entalpi farkından belirlenen özgül ısıtma yüzeyi ısı yükünü tanımlar. Yakıt miktarı M_Y [kg/h]; yakıt alt ısı değeri H_u [kWh/kg-yakıt] ve kazan ısıtma verimi verilmiş ise kazan ısıtma kapasitesi, Q_K [kWt] aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_K = M_Y \cdot H_u \cdot \eta_K \quad (5.13)$$

4. ÇİMENTO SANAYİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Endüstriyel bir tesis olarak, bir çimento fabrikasında enerji verimliliği çimento üretiminin; hammadde sağlama ve hazırlamadan klinker üretimi, klinkere katkı maddeleri karıştırılıp çimento üretimine, üretilen çimentonun paketlenip veya dökme biçimde kullanım noktalarına ulaştırılıncaya kadar tüm enerji kullanım noktalarının belirlenmesi, bu noktalarda enerji kullanım verimliliğini optimum düzeye çıkaracak enerji kayıplarının günümüz ekonomik koşullarına göre minimuma indirilecek tüm önlemlerin alınmasını kapsar. Enerji verimliliği kapsamında başlıca proseslerde; örneğin yanma, buhar üretimi, ısıl güç çevrimleri, vb. enerji dengelerinin oluşturulması, enerji akış diyagramlarının belirlenmesi, bu diyagramlarda görünür hale getirilen enerji kayıplarının azaltılmasıyla ilgili korelasyonlar türetilmiş, bunların azaltılmasıyla ilgili mühendislik yaklaşımları daha önceki bölümlerde incelenmiştir. Bu yaklaşım, aynı biçimde klinker üretim prosesinde de uygulanmaktadır. Her proses çok sayıda elektrik motorları, fanlar, taşıma, ayrıştırma, homojenleştirme, dengeleme vb. birçok sayıda enerji kullanan birimlerden oluşur. Bu birimlerde enerji verimliliğinin sağlanması, bu birimleri üreten kuruluşların sorumluluğundadır. Enerji verimliliği ve çevre yasaları, ilgili yönetmelik ve standartlar yardımıyla bu birimlere enerji verimliliğinin artırılması yönünden zorunlu yükümler, yönlendirmeler ve özendirmeler getirilmektedir. Serbest piyasa kuralları içerisinde ve enerji fiyatlarının aşırı arttığı günümüzde, tüm endüstriyel kurumlarda olduğu gibi çimento fabrikalarında enerji verimliliğinin yüksek olduğu ekipman ve sistemlere yönelmektedir. Bu çalışmada, çimento sektöründe enerji verimliliği incelenmekte bunlarla ilgili fayda maliyet analizleri yapılmaktadır. Bir çimento fabrikasında önce üretim sistemi incelenmekte, buradaki enerji kullanım noktaları belirlenmekte, bu noktalarda enerji verimliliği yüksek uygulamalara geçmek için gerekli yatırım maliyetleri belirlenmektedir. Bu yeni yatırımının maliyeti belirlenmekte, bunun yıllık amortisman gideri ile enerji tüketiminin yıllık azalmasıdaki getiri karşılaştırılmakta, yıllık getirinin yıllık amortisman giderini karşılama oranına göre, bu önlemle ilgili ekonomik yönden en uygun önlem uygulama zamanı belirlenir. Bu uygulama bir tesiste enerji tasarruf eğrisinin

belirlenmesi olarak isimlendirilir. Bu çalışmada bireysel çimento fabrikalarından hareketle Türkiye'deki çimento sektörünün 1990-2020 yılları arasında enerji kullanım durumları, enerji verimliliği uygulama programları, sektörel enerji tasarrufu sağlama eğrileri biçiminde ele alınmış ve irdelenmiştir.

4.1. Türk Çimento Sektörüne Genel Bakış

Ülkemizde ilk çimento fabrikası 1912 yılında kurulmuş, Cumhuriyetle birlikte ülkemizde yeni fabrikalar devreye girmiş, karşılanamayan çimento açığı ithal yoluyla karşılanmıştır [4].

1950 sonrası özel sektörün çimento sektörüne daha yoğun olarak girmesi ve Türkiye Çimento Sanayii T.A.Ş.'nin kurulması ile Türk Çimento Sektörü hızlı bir gelişme göstermiştir. Çimento ithalatı 1963-1970 yıllarında ekonomideki gelişmelere göre değişen bir seyir izlemiştir. 1970 sonrası sektör, gerçek bir ihracatçı konumuna ulaşmıştır. 1978-1983 yılları arasında konut sektöründe görülen daralma büyük ölçüde üretim fazlası oluşmasına neden olmuş ve Türkiye bu yıllarda önemli ölçüde çimento ihraç eder hale gelmiştir [4].

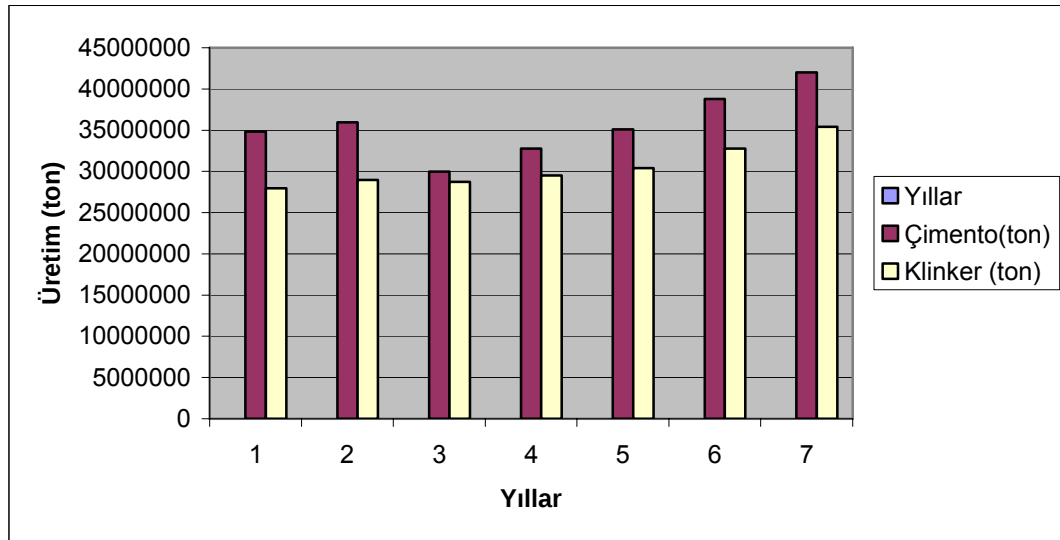
Türk Çimento Sektörü'nde özelleştirmenin başladığı 1989 öncesi, bir devlet kuruluşu olan Çitosan'ın elinde bulunan 21 fabrikanın daha sonra özelleştirilmesiyle devlet, çimento sektöründen tamamen çekilmiştir. Bunun yarattığı rekabet koşullarında çimento sektörü, dış dünyaya, çağdaş teknolojiye ve yabancı sermayeye açık hale gelmiştir. Enerji verimliliği ve çevresel koruma çalışmalarına yönelinerek AB ile uyumlaştırma çalışmalarına başlanmıştır. 2005 yılı itibariyle Türk Çimento Sektörü'nde 40 adet entegre çimento fabrikası, 18 adet öğütme paketleme tesisi olmak üzere toplam 58 çimento üretim tesisi faaliyette bulunmaktadır. Bu üretim tesislerinin 1990-2005 yılları için toplam çimento ve klinker üretim miktarı (ton) ve yüzdesel olarak artışı Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Faaliyette bulunan bu tesisler genelde, güncel işletme ekonomisi yönünden optimum koşulların sağlanabildiği kapasitenin altında bir kapasitede kurulmuştur. Klinker üretim

kapasitesi yıllık 1 milyon tonun üzerinde olan fabrikalar, büyük kapasiteli olarak tanımlanır. Ülkemizde bu kapasitelerde ancak 13 çimento fabrikası bulunmaktadır.

AB üyelik süreci uyumlaştırma çalışmaları ve rekabet koşulları, AB ülkelerinde uygulanmakta olan kapasite artırıcı ön kalsinasyon, yeni tür kömür değirmenleri, gelişmiş kömür ve hammadde homojenizasyonu, alternatif yakıt, katkı vb. uygulamaların, Türk Çimento Sektörü'nde de benzer biçimde uygulamaya konulmasına neden olmuştur. AB çimento sektörünün genelde en üstün tarafı, yoğun yatırım gerektiren otomasyon uygulamalarına geçmiş olmasıdır. Ülkemizde de çimento sektöründe benzer otomasyon çalışmaları, hızlı bir biçimde devam etmektedir. Çimento üretiminde katkı maddesi kullanımı oldukça yerleşmiş durumdadır.

Çizelge 4.1. Çimento ve klinker üretim miktarı ve artışları (ton) [10]

Yıllar	1990	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Çimento(ton)	34816734	35952515	29959054	32758049	35094768	38795797	42000000
Klinker (ton)	27965848	28950341	28746336	29498636	30418940	32778751	35400000
Çimento Artışı (%)		3,26	-16,67	9,34	7,13	10,55	8,26
Klinker Artışı (%)		3,52	-0,70	2,62	3,12	7,76	8,00



Şekil 4.1. Çimento ve klinker üretim değerlerinin (ton) yıllara göre değişimi

4.2. Çimento Üretimi Aşamaları

Tipik bir entegre çimento fabrikasının sistem yapısını gösteren akış ve bağlantı şeması, ilgili alt sistemleriyle birlikte Şekil 4.2’de basitleştirilmiş olarak gösterilmiştir. Bir çimento fabrikası aşağıdaki alt sistemlerden oluşur [11]:

- 1- Hammadde sağlama sistemi
- 2- Hammadde hazırlama sistemi
- 3- Yakıt hazırlama sistemi
- 4- Klinker pişirme sistemi
- 5- Klinker soğutma sistemi
- 6- Çimento öğütme sistemi

4.2.1. Hammadde (farin) sağlama sistemi

Taş ocaklarından çimento hammaddesi (farin) çıkarılır, bunların ana bileşeni kireç (CaCO_3) ve silistir. Bunları alüminyum ve demir oksitler takip eder. Daha az miktarda magnezyum ve alkali oksitler gibi diğer maddelerde bulunur. Kireç daha ziyade kalker ve marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan ortama girer. Silis (SiO_2) başlıca kaynak kildir. Bu hammaddeleri ana hammaddeler ve diğer hammaddeler diye ayırırsak;

Ana hammaddeler

Kalker: CaCO_3 oranı %90-100 arasında olan ve jeolojik yaşına göre sertliği değişen bir madendir. İçerisinde az da olsa MgCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_3 içerir.

Marn: CaCO_3 oranı %40-90 arasında ve kilin beraber çalışması ile oluşan bir maden olup doğada yaygındır. Çimento üretimi için ideal hammaddedir.

Kil: Alkali içeren alüminyum silikatlarından oluşur. CaCO_3 oranı %0-4 civarındadır.

Çimento hammaddeleri, ihtiva ettikleri CaCO_3 miktarına göre aşağıdaki gibi isimlendirilir.

<u>CaCO_3 oranı (%)</u>	<u>Hammadde adı</u>
96-100	Yüksek saflıkta kalker
90-96	Marnlı kalker
75-90	Kalkerli marn
40-75	Marn (Fe_2O_3 , SiO_2 kaynağı)
10-40	Killi marn
4-10	Marnlı kil
0-4	Kil (SiO_2 , Al_2O_3 taşıyıcı)

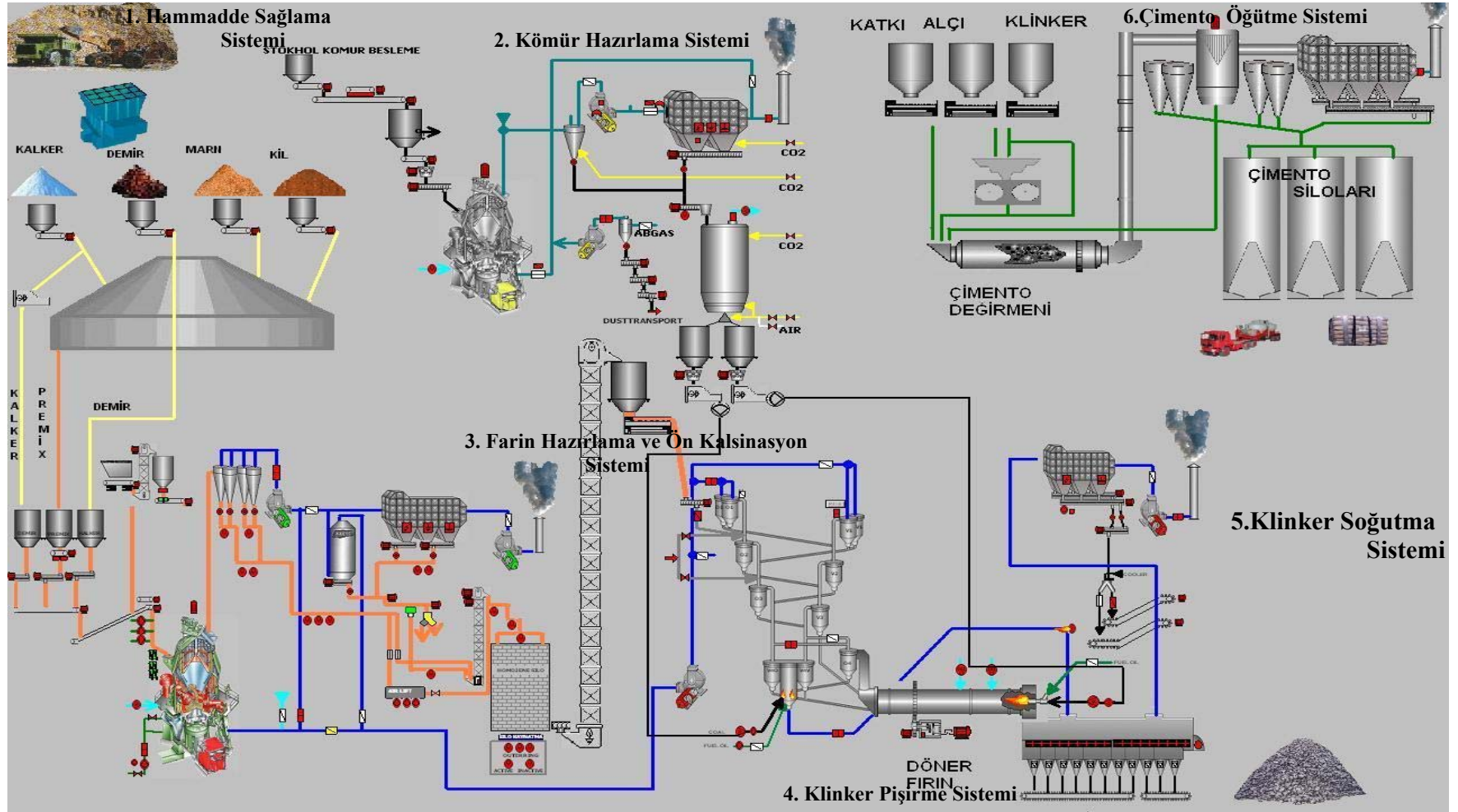
Düzenleyici hammaddeler

Demir cevheri: İçerisinde %50-60 oranında Fe_2O_3 olup kaynağına bağlı olarak SiO_2 ve Al_2O_3 ihtiva eder. Amacı pişirmeyi kolaylaştırmaktır.

Silis kumu: SiO_2 açısından zengindir.

Boksit: Al_2O_3 açısından zengindir. Ayrıca SiO_2 , Fe_2O_3 de içerir. Klinker granülleşmesine ve anzast teşekkülüne olumlu etkili vardır.

Pirit külü: Fe_2O_3 açısından zengin olup doğada tabii bir biçimde bulunmaz. Sanayi yan ürünüdür.



Şekil 4.2. Bir entegre çimento fabrikasının alt sistemleri ve akış şeması [4]

4.2.2. Hammadde hazırlama sistemi

Hammadde (farin) hazırlama ve ön kalsinasyon sistemi Şekil 4.2’de 3. sistem olarak verilmiştir. Kalker, demir, marn ve kilin karışımından oluşan farinin hazırlanmasıyla ilgili sistem; hammadde kırıcıları, üretim için uygun hammadde karışımı oluşturma üniteleri, hammadde harmanlama, farin öğütme, farin taşıma, depolama, homojenize etme, filtreleme (farin filtresi ve bacası), çok kademeli siklonlu ön ısıtma (kurutma) sistemi ve ön kalsinasyon sisteminden oluşur. Ocaklardan çıkartılan hammaddeler; taşıma kolaylığı sağlamak, boyut küçültmenin ilk aşamasını gerçekleştirmek, hammadde karışımının daha homojen olmasını sağlamak için 0-1000 mm boyutundan 0-40 mm boyutuna kırıcılar ile küçültülür.

Farin öğütme, farin fırında pişerken önce oksitler serbest hale gelir ve sonra sıcaklık yükseldikçe aralarında yeni bileşikler oluştururlar. Burada kireç miktarının yeterli olması ve hammaddelerin gereken oranlarda birleştirilmesi önem kazanır. Buyüzden farin bileşimi laboratuvarlar da devamlı kontrol edilir. Klinker içerisinde olması istenen oksit dağılımı ve ocakların mineralojik yapısı göz önünde bulundurularak, laboratuvar destekli, çalışma ile hammaddeler çeşitli tip ve oranlarda kırıcılardan geçirilerek 0-40 mm boyutundaki hammadde karışımı farin, genelde ortalama 8-12 mikron boyutuna kadar öğütme işlemi öğütülür. Boyutları küçülen farin, stok sahalarında stoklanır. Ayrıca, öğütme esnasında rutubet oranı da %1 seviyesine düşer. Farin öğütme işlemi değirmenlerde yapılp, bunlar:

- 1- Yatay Bilyeli Değirmenler
- 2- Dik Valsli Değirmenler
- 3- Roller Press ve Seperatör Kombinasyonu

Enerji tasarrufu yönünden dik valsli ve roller pres ve seperatör kombinasyonlu değirmenler daha idealdir. Dik değirmenlerde döner tabla üzerine dökülen hammadde karışımı; dönme kaynaklı merkez kaç kuvveti ile tabla dışına savrulur.

Vals ile tabla arasında ezilen malzeme sıcak gaz ile seperatöre taşınır. Öğünen malzeme farin silolarına giderken öğünememiş malzeme döner tablaya düşer.

Değirmenlerde öğütülen hammadde farin haline geldikten sonra; Besleme stabilizasyonu, alt-üst proses devamlılığı ve homojene edilebilmesi için silolara alınırlar. Eğer farin silosu homojene tipi bir silo ise öğütülmüş malı hem siloya beslerken hem de silodan alırken tam homojene etmeye çalışır.

4.2.3. Yakıt hazırlama sistemi

Çimento üretiminin en önemli aşaması farinin pişirilmesidir. Döner fırın, dünyada endüstri tesislerinde bulunan en büyük proses elemanı olarak kabul edilir. Çapı 3-7m, uzunluğu 50-75 m kadar olup 50 mm kalınlığında çelik saçtan yapılmış, refraktör tuğla astarlı dev bir borudur. Yaklaşık %3-4 eğimli olarak monte edilen fırın dakikada 1.5-4 devir yaparak döner. Bunun işletme ve enerji tüketimi çok olduğu için enerji tasarrufu yöntemlerinin uygulanmasını zorunlu kılar. Çimentoda kullanılan yakıtları (Bölüm 3'te yakıtlar daha ayrıntılı incelemiştir) ana ve atık yakıtlar diye sıralarsak;

a-) Ana yakıtlar: kömür, fuel-oil, petrol, gaz

b-) Atık yakıtlar: kllanılmış lastikler(ÖTL), atık yağ(1.ve2. kategori), Kontamine atıklar, plastikler, kağıt atıkları, plastikler, solvent ve kimyasallar, arıtma ve boya çamurları, ahşap parçaları, odun talaşı ve tozu, shale oil, biomass (kabuklar, çekirdek, kozupost, prina.....), hayvansal atıklar(kemik unu, hayvan yemi)

2004 yılı için Türkiye'de 39 fabrikadan sağlanan verilere göre, çimento sektöründe kullanılan yakıt karışımları, ısı değerleri ve ağırlıklı ortalama oranları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Çimento sektöründe 2004 yılında kullanılan yakıt karışımlarının ısıl bazda ortalama kullanım oranları [13]

Birincil Yakıt	Toplam kcal	%
Petrokok	10966454032288	39.72
Steam Coal	2330292796644	8.44
Linyit	6376241924772	23.09
İthal Linyit	5821757082032	21.09
Yerli Taşkömürü	500017150160	1.81
İthal Taşkömürü	436439368000	1.58
Fuel-Oil (Ağır)	189756802000	0.69
Fuel-Oil (Hafif)	816743477520	2.96
Doğalgaz	48535250295	0.18
LPG	124342852450	0.45
Top. Kalori Sarfı	27610580736160	100.00
Klinker Üretim (ton/yıl)	32448337	
Özgül Klinker Üretim Isısı (kcal/kg-klinker)	836.6	

Kullanılan toplam enerjinin ısıl bazda %96'sı petrokok, yerli-ithal linyit, yerli-ithal taşkömürü gibi katı yakıtlardan oluşmaktadır. Sıvı ve gaz yakıtlar, genelde devreye alma vb. özel işlemlerde kullanılmaktadır. Bu sebeple “yakıt hazırlama sistemi”, kömür hazırlama sistemi olarak tanımlanmaktadır. Ön ısıtıcıdan gelen malzeme fırına yukarıdan girer ve fırınla beraber dönerek, yuvarlanarak, kayarak daha sıcak bölgelere, alt uçtaki aleve doğru ilerler.

Enerji-işletme ekonomisi yönünden büyük ve öngörülen klinker kalitesine uygun olarak hazırlanan kömür karışımı, kömür değirmenlerinde farin ön ısıtıcısından çıkan sıcak baca gazı ve klinker soğutma havası uygulamasıyla, yakma sistemi koşullarına uygun bir biçimde öğütülür ve kurutulur.

Yakıt seçiminde dikkat edilecek hususlar

- 1- Yüksek kalorilik değeri
- 2- Kalori maliyeti
- 3- Kalorilik değerin stabilitesi
- 4- Yakıt partiküllerinin yanma oranı
- 5- Yakıt- hava karışımı
- 6- Emisyon değerleri

4.2.4. Klinker üretim yöntemleri ve pişirme sistemi

Klinker üretim yöntemleri ve teknolojileri

Klinkerin hammaddesi olan farinin döner fırın girişindeki nem oranına göre; yaş, yarı yaş, yarı kuru ve kuru olarak sınıflandırılır. Fırına beslenen farinin nem oranı kuru sistemde ortalama % 0-5, yarı kuru sistemde %14-16, yarı yaş sistemde %17-22, yaş sistemde ise ortalama %36 dolayındadır.

Taş ocağı çıkışında hammadde nemi %20'nin üzerinde ise yaş yöntem tercih edilir [13]. Yaş yöntemde (bilyeli değirmen); hammaddeye su ilave edilir; bilyeli değirmende öğütülen farin %36 (%24-48) nem içerikli çamur biçiminde döner fırına beslenir. Zincirli uzun fırınları üç parçaya ayırdığımızı var sayarsak; girişte nemi alınan hammadde, orta bölümde kalsine olur, çıkış bölümünde ise sinter sıcaklığında klinker olur ve soğutucuya gider. Farinin kurutulma, kalsinasyon ve klinkerleşme süreçlerinin tümü, döner fırının içinde gerçekleştiğinden, yaş yöntemde kullanılan döner fırınların boyları diğer yöntemlere kıyasla çok daha uzun ve klinker üretimi için gerekli özgül ısı tüketimi çok daha yüksektir.

Yaş yöntemde elektriksel özgül enerji tüketimi, kuru yöntemle kıyasla (20 kWh_e/ton-çimento) daha az olmasına karşın, yaş yöntemin klinker üretme yakıtsal özgül enerji tüketimi çok daha fazladır. Bu değer; kurutma, kalsinasyon ve klinkerleşme

süreçlerinin tamamının döner fırında gerçekleştiği yaş yöntemde 1450-1650 kcal/kg-klinker'dir. Kuru yöntemde ise bu tüketim değeri 700-900 kcal/kg-klinker'dir [12]. Ülkemizdeki yaş fırınların tamamına yakını, 1965-1973 yılları arasında, klinker üretim kapasitesinin artırılması amacıyla, 1973 dünya petrol krizi ardından ise yakıt tasarrufu sağlamak için kuru sisteme çevrilmiştir. Üretim kapasitesi yüksek ve yakıt tasarrufu avantajı vardır.

Yarı kuru yöntemler arasında sayılan *leopol* klinker üretim sisteminde farin, eğik bir döner tabak üzerinde %14-16 nem içerikli granül biçimine dönüştürülür; ardından beslendiği hareketli ızgara üzerinde kurutulur, ızgarada nemi gider, kısmen kalsine olur. Farin, kısmen kalsine olduğu için bu sistemin döner fırını, yaş yöntem fırınlarına kıyasla daha kısadır. Burada önce kalsinasyon süreci, ardından da klinkerleşme süreci tamamlanır. Bu sistemde 3000 t/gün-klinker üretim kapasitelerine ulaşılabilmektedir.

Halen ülkemizde yaş sistemle çalışan düşük kapasiteli sadece iki fırın üretimine devam etmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada özellikle kuru yöntem klinker üretim süreci incelenmiştir. 1963'ten sonra işletmeye alınan tüm klinker pişirme fırınları kuru sistem olarak kurulmuştur. OPEC'in kurulmasının ardından meydana gelen yoğun petrol krizi ile birlikte fuel-oille çalışan tüm çimento fabrikalarında kömüre dönüşüm başlatılmış ve kısa süre içinde tamamlanmıştır.

Kuru klinker üretim sistemi, ön kalsinasyonsuz ve ön kalsinasyonlu sistemler olmak üzere ikiye ayrılır. Kuru klinker üretim sistemi; farin hazırlama, kömür hazırlama, döner fırın, klinker soğutma alt sistemlerinden oluşur. Ön kalsinasyonlu kuru klinker üretim sisteminde, ön kalsinasyonsuz sistemden farklı olarak ön kalsinasyon işlemi uygulanmaktadır.

Kalsinatörler, çimento fabrikalarına karakteristik görünümü veren kuleler ve döner fırın bu aşamada kullanılır. Modern çimento fabrikalarında farin enerji tasarrufu amacı ile fırına girmeden önce bir ısıtmaya tabi tutulur. Yükseklikleri 60 metreyi

geçen ön ısıtma kulelerinde seri halindeki siklonlarda farin taneleri fırından gelen sıcak egzoz gazları içinde savrularak ısınırlar ve kısmen kalsine olurlar. Bazı ön ısıtıcılarda kulinin altında ve döner fırından hemen sonra önce bir ön kalsinasyon ünitesi bulunur. Son siklon aşamasından buraya sıcak hava ve yakıtla birlikte giren farin tanelerinde kalsinasyon, hammaddelerden CO₂ 'in ayrıştırılması, %95 'e varan ölçüde tamamlanabilir. Avantajları:

- Fırın termal yükünün azaltılması
- Yüksek fırın kapasitesinin temini
- Alkali-klor- ve kükürt sirkülasyonunun azaltılması
- Stabil ve daha konforlu fırın operasyonu
- Düşük kaliteli yakıt kullanabilme
- NOx emisyonlarında azalma imkanı

Ön kalsinasyonsuz kurutma sistemlerinde farin, değirmeni 50-70 °C’de terk eder; ters akımlı, çoklu kademeli, akışkanlaştırma sirkülasyon etkili bir kurutma sistemi olan kurutma siklonlarına girer; 25–30 saniyelik bir kalma süresi ardından döner fırın girişine ulaşır. Bu noktada farinin sıcaklığı da 800-850 °C’ye çıkar ve nemi %0,5’e iner. Bu sırada farinin yaklaşık %40’ı kalsine olur. Siklon kurutma sisteminde farin kurutmak için kullanılan döner fırın yanma gazı, döner fırından 850-1000 °C’de çıkar. Siklon kademelerinde kurutmanın gerçekleşmesi ardından siklon sistemini 320-350 °C dolayında terk eder. Bu sıcaklıktaki atık gaz, ilgili değirmenlerde farin ve kömür kurutmasında kullanılır; daha sonra filtre ve baca üzerinden atmosfere atılır.

Klinker pişirme sistemi

Klinker pişirme sistemi, klinkerin oluştuğu döner fırın ve bununla ilgili kömür yakma sisteminden oluşur. Ön kalsinatörlü klinker üretim sisteminde ön kalsinatör, fırın girişi ile son siklon kademesi arasında konumlanır. Ön kalsinasyonlu sistemde, fırında genelde yalnız klinker pişirme işlemi gerçekleştirilir. Yaş sistemlerde ise farin

kurutma, kalsinasyon ve klinker pişirme süreçleri döner fırının içinde gerçekleşir. Bu nedenle yaş sistemlerde döner fırınlar çok uzun, yatırım maliyeti yüksek ve yoğun yakıt enerjisi kullanan sistemlerdir. Yarı yaş ve yarı kuru sistemlerde döner fırın boyları, yaş sisteme kıyasla daha kısadır. Ön kalsinasyonsuz kuru sistemlerde, klinker, döner fırına 800-850°C sıcaklık, %40 dolayında ön kalsineli ve %0,5 nem oranıyla girer. Burada döner fırının işlevi, kalsinasyonu tamamlamak ve klinker pişirme işlemiyle klinker üretimini gerçekleştirmektir. Bu sistemlerdeki döner fırın boyu, ön kalsinasyonluya kıyasla biraz daha uzundur. Ön kalsinasyonlu döner fırınlarda farin, %95'lere varan kalsinasyon oranıyla fırına beslenir. Ön kalsinatörde, kalsinasyon için gerekli ısı, kömür değirmenlerinden sağlanan toz kömürün, klinker soğutma sisteminden sağlanan kızgın yakma havasıyla yakılmasıyla elde edilir. Ön kalsinatör ayrıca atıkların beslenmesi ve yakılmasıyla, döner fırının insinatör işlevi görmesi olanağını da sağlar. Ön kalsinatör kullanılması, döner fırının klinker üretim kapasitesini önemli boyutta artırır. Böylelikle atıkların çimento fabrikalarında enerji ekonomisine katkı sağlayacak biçimde, temiz ve verimli yakılmasının ve bertaraf edilmesinin önü açılmış olur. Boyu en kısa, yatırım tutarı en düşük olan bu tür bir döner fırın, fırın girişinden itibaren emniyet bölgesi (1150-1250 °C), geçiş bölgesi (1250-1450 °C), sinter bölgesi (1450-1500 °C) ve havuzlama bölgesinden (1300-1250 °C) oluşur. Üretilen klinker, 1250°C dolayında klinker soğutma sistemine dökülür [4].

Bu arada geri kalan CO₂ 'de malzemeden ayrılır ve kimyasal tepkimeye uğrar. Döner fırının alt ucunda toz kömür, doğalgaz, fuel oil gibi yakıtların yakılması ile oluşturulan alevin çıktığı boru bulunur. Alev borusundan çıkan beyaz kor halindeki alevin sıcaklığı 1870°C değerine (güneş yüzeyindeki sıcaklığın üçte birine) ulaşır. Bu en sıcak bölgede sıcaklığı 1480°C'ye varan kalsine malzeme kısmen ergiyip sıvılaşmaya başlar, ince taneler birbirine yapışıp daha büyük fırının alt ucundan çıkan klinker üzerinde soğutma işlemi uygulanır. Döner fırında çimento hammaddeleri içindeki kireç, silis ve alumin sıcaklık arttıkça, önce serbest hale gelirler, sonra da kendi aralarında birleşip yeni bileşikler meydana getirirler. Ön ısıtmada ve fırının en üst bölgesinde malzemedeki serbest ve kristal sular buharlaşır,

kil ayrışır ve CO₂ kalkerden ayrılmaya başlar. Aşağıya doğru daha sıcak bölgelerde kalsinasyon tamamlanır, serbest kalan CaO kilden ayrışan SiO₂ ve Al₂O₃ ile birleşerek kalsiyum silikat ve kalsiyum aluminatları meydana getirir.



İstenilen kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip hammadde (farin), fırınlarda ısıtılma işlemine tabi tutularak çeşitli reaksiyonlar sonucunda sistemden klinker olarak adlandırılan yarı mamul olarak çıkarlar.

4.2.5. Klinker soğutma sistemi

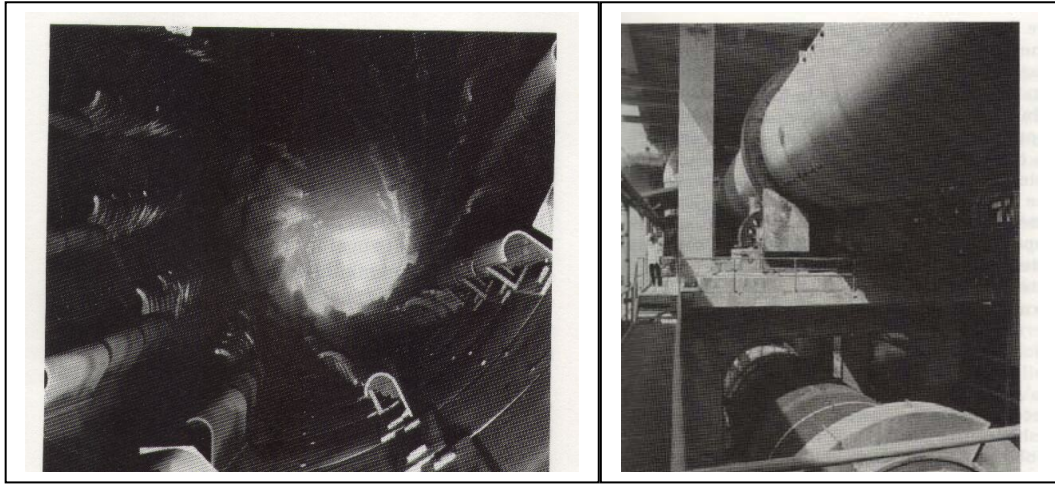
Üretimin diğer aşamalarına geçmeden önce klinkerin soğutulması gerekir. Klinker soğutması; klinker taşımalarını kolaylaştırır, öğütme sırasında sıcak klinkerden kaynaklanan sorunların önüne geçilmesine yardımcı olur, birim klinker başına yaklaşık 200 kcal/kg-klinker atık ısı geri kazanımı olanağını sağlar. Bu atık ısı, 850-900 °C'ye kadar ön ısıtılmış yakma havası oluşturulmasında kullanılır. Ayrıca bu ısı, farin ve kömür kurutma işlemlerinde de kullanılmaktadır. Artan fazla soğutma havası, denge bacasından dışarıya atılır. Soğutma tipleri ;

- 1- Döner tip soğutucular
- 2- Planet tip soğutucular
- 3- Izgaralı tip soğutucular
- 4- Shaft tipi soğutucular

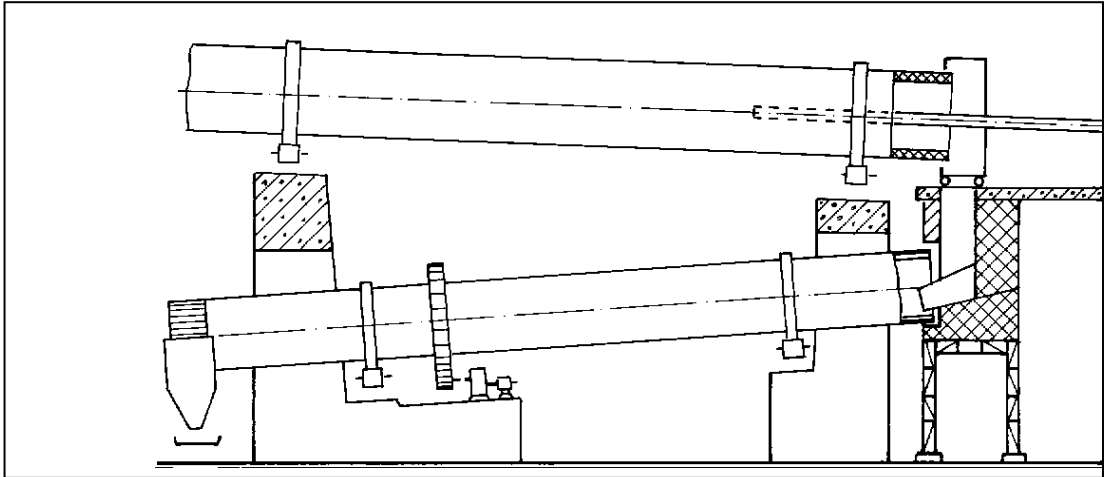
Soğutucu tipleri

1- *Döner Soğutucular* : En eski tip soğutuculardır. Tıpkı fırınlar gibi döner soğutuculardır. Fırının ihtiyacı olan hava miktarı fırın emişi ile birlikte döner soğutucu boyunca ilerlerken akım prensibi ile klinker soğutulur ve yaklaşık 400-750

$^{\circ}\text{C}$ olup, sekonder sıcaklık elde edilir. Bu soğutucuların ilk % 70'lik kısmı refrakter kaplıdır. Fırından ayrılan klinker $1300^{\circ}\text{C} - 1350^{\circ}\text{C}$ dir. Soğutucu çıkış sıcaklığı $150-300^{\circ}\text{C}$ 'dir. Verimlilik % 55-75'tir.



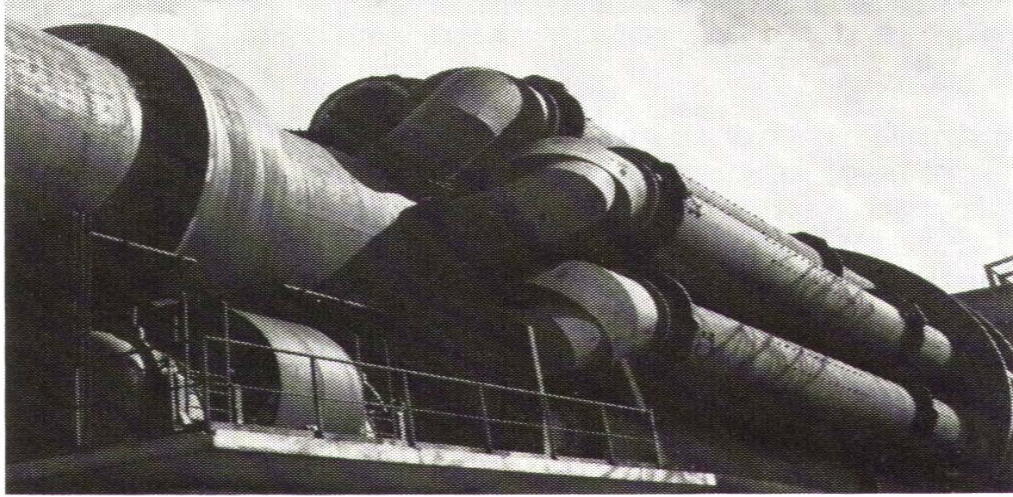
Resim 4.1. Döner soğutucu dış ve iç görünüşü



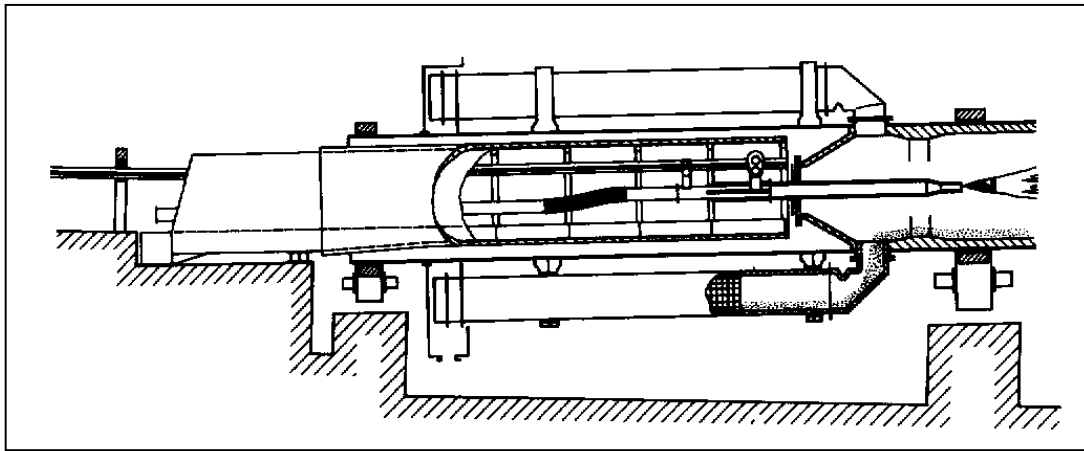
Şekil 4.3. Döner soğutucu

2- Satellite (planet) Soğutucular : Bu tip soğutucular fırının kendi gövdesine bağlı çapları silindirik borulardan oluşmaktadır. Soğutmaya giren hava fırının ihtiyacı olan yanma havası kadardır. Verimliliği % 60-65 arasındadır. Uzunluklarının % 25'inin refrakter kaplı olması sebebi ile gerek fırın mantosuna gerekse galelere çok büyük yükler binmektedir. Bu sebeple bu tip soğutuculu fırınlar belli bir kapasiteye kadar kullanılmaktadır. Bu da yaklaşık 700 ton/gün dür. Ancak yeni tip satelite

soğutucularda ilave gale istasyonları ile daha yüksek kapasitelere çıkmıştır.(4000 ton/gün).



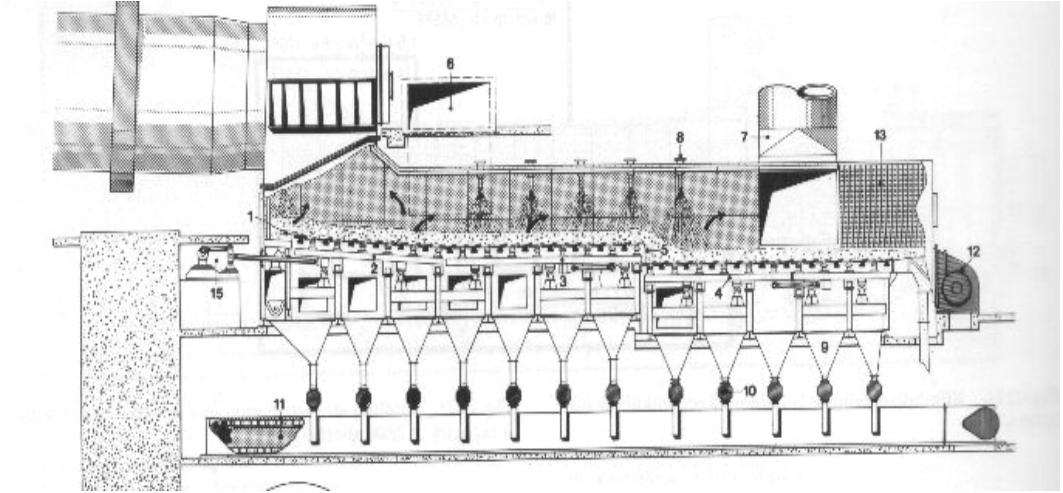
Resim 4.2. Planet soğutucu



Şekil 4.4.. Planet soğutucu

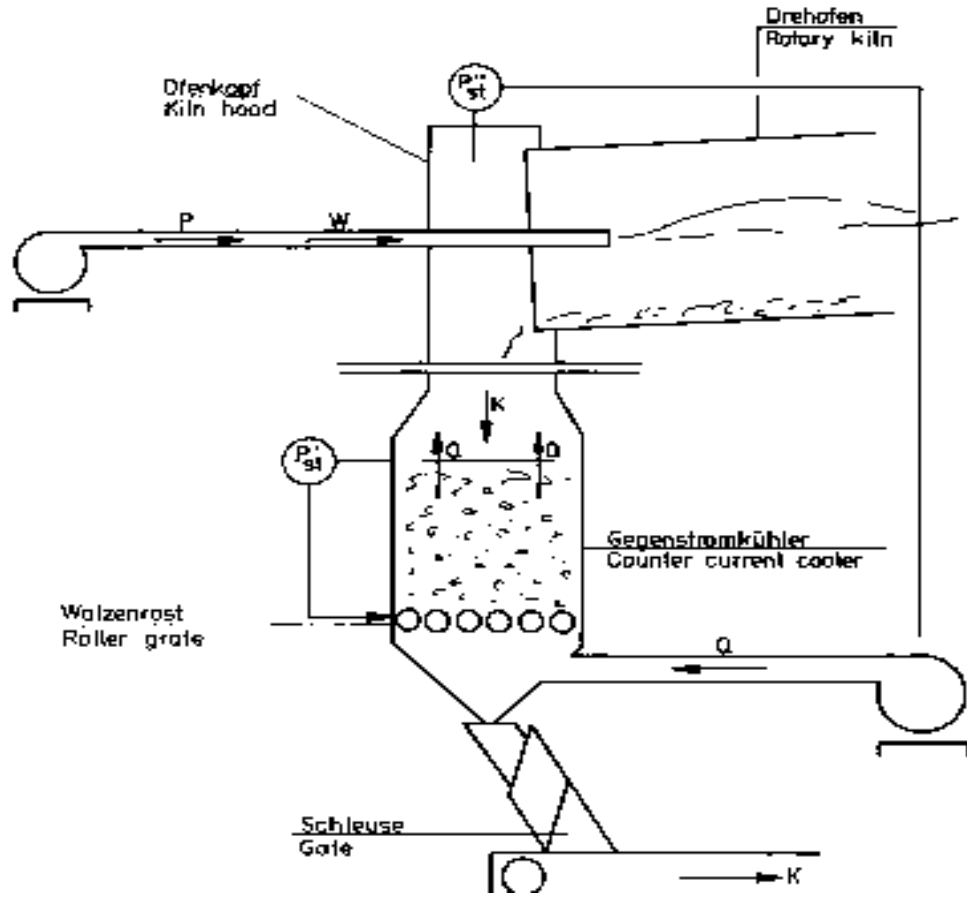
3- *Izgaralı Soğutucular* : Bu tip soğutucularda ısı alış verişi oldukça yüksek olup, klinker çok hızlı bir şekilde soğutulabilmektedir. Bu tip soğutucularda ısı kaybı diğer tiplere göre daha düşüktür. Izgaralı soğutucularda klinker çıkış ısısını 65°C 'ye kadar düşürmek mümkündür. İlk ızgaralı soğutucular 15° açı ile yapılmış olup, daha sonra 10° , 5° ve son teknolojilerde 0° ile imal edilmiştir. Ancak yüksek kapasiteli fırınlarda klinker tane boyutlar ince olduğundan 0° açı ile sevk etmek zorlaşmakta olup, bu sebeple tahrik 5° açı ile tasarlanıp 1.2 tahrik düz olarak tasarlanmaya başlanmıştır.

Bu tip soğutucularda 1 kg. klinker için 1,3–1,8 Nm³ hava verilebilir. Klinker spesifik enerji tüketimi 5,5–6 kwh/ton klinkerdir.



Resim 4.3. Izgaralı soğutucu

4- *Shaft Tipi Soğutucular* : Bu tip soğutucularda da ızgaralı tip soğutucular kadar yüksek sıcaklıkta sekonder hava elde etmek mümkündür. Ancak bu tip soğutucularda verilen soğutma havası direk olarak fırına gittiğinden belli bir kapasiteye kadar kullanılabilirler (3000 t/gün). Klinker niteliği bakımından ızgaralı soğutucular kadar iyi bir klinker elde etmek mümkündür. Shaft tipi soğutucuların dezavantajına gelirse bu soğutucuların verimli çalışabilmesi için klinker tane boylarının eşit ebatlarda olması gereklidir. Bu da hali ile pek mümkün değildir. Bu soğutucular daha yüksek delta basınçlı fanlara ihtiyaç duymaktadır. Özgül enerji tüketimleri ise ızgaralı soğutuculardan daha yüksektir (8 kwh/ton-klinker).



Şekil 4.5. Shaft tipi soğutucu

Burada en sık kullanılan yöntem ızgara plakalar üzerinde yavaşça ilerleyen klinker tanelerine basınçlı dış hava verilmesidir. Klinker iç yapısını etkileyeceği için soğutma hızının denetimli olması istenir. Ortamdan kazanılan ısı enerjisi klinker üretimi için gerekli olan miktarın üçte birine yakındır. Klinker soğutucusundan gelen sıcak hava tekrar fırının ısıtılmasında ve ön kalsinasyonda kullanılır. Artan sıcak havadan hammaddelerin kurutulması, sıcak su temini ve binaların ısıtılması gibi amaçlar içinde yararlanılır.

Türkiye’de en yaygın kullanılan soğutma sistemi, ızgaralı soğutma sistemidir. Bu sistemler, enerji verimliliği yönünden daha da geliştirilmektedir. Dayanıklılık, öğütülebilirlik gibi kaliteyle ilgili çimento özellikleri, klinkerin soğutma hızına doğrudan bağlıdır. Soğutma hızını artırmak için çeşitli etkinliklerde soğutma

sistemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Soğutma işlemi, soğutma ızgarasına alttan beslenen soğuk hava ile sağlanır. Bu hava, 850-900 °C sıcaklıkta yoğun ısı geri kazanım özellikli kızgın hava olarak soğutucudan çıkar.

4.2.6. Çimento öğütme sistemi

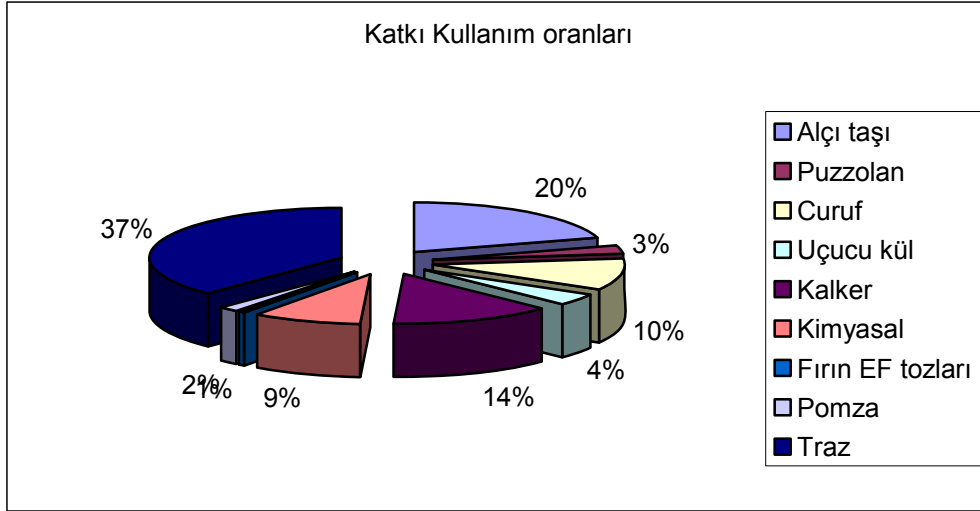
Soğutucudan çıkan klinker çimento üretiminde bir ara ürün sayılır. Çimento, klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile öğütülmesi sonucu elde edilir. Klinker kalsiyum sülfat ile doğrudan fabrikada öğütülebilir veya bu amaçla başka yerlerdeki öğütme tesislerine gönderilir, hatta yurt dışına ihraç edilir. Yaklaşık 2 cm çapındaki klinker tanelerinin çimento tanesi inceliğine kadar öğütülmesi gerekir. Çimento tane boyutları genellikle 40 mikronun altında, ortalama 15-20 mikron (0,0015-0,002 cm) olduğuna göre, bu aşama sonunda klinker tanesinin 1000 kere kadar küçültülmüş olması gerekmektedir. Klinker ve alçının öğütülmesinde daha çok bilyeli değirmenler kullanılır. Yaklaşık 3 m çapında çelik silindir şeklindeki değirmenlerde hacimlerinin üçte birine kadar çelik ezici bilyalarla doldurulmuş bölmeler bulunur. Klinker dönerken bilyalar klinker tanelerine çarparak onları ufalar. Son bölmede istenilen incelik elde edilmiş olur. Klinker doğrudan soğutucudan gelmişse hala 50-100 °C arası sıcaklıktadır ve öğütme sırasında değirmen içine basınçlı su verilerek sıcaklığın artması önlenmiş olur. Klinker öğütme sırasında ağırlıkça %3-5 arası kalsiyum sülfat katılır. Bu işlem çimentonun su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonların ve katılaşma sürecinin kontrolü bakımından zorunludur. Son yıllarda öğütmeyi kolaylaştırıcı bazı kimyasallar da bu aşamada klinkere katılmaktadır. Mineral katkıları farklı oranlarda katılarak değişik tipli çimentoların üretilmesi de yaygınlaşmıştır. Çimento sektöründeki 2004 yılında kullanılan klinker hammaddesinin (farin) karışım oranları Çizelge 4.3'te, ağırlıklı katkı oranları ise Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Çimento sektöründe 2004 yılında kullanılan klinker hammaddelerinin (farin) ortalama kullanım oranları [13]

Hammadde	Kullanım oranları
Kalker (kireç taşı)	63,4
Marn	19,1
Kil + Şist	14,5
Kaolen + Profillit	0,5
Kum	0,7
Pirit külü	0,2
Demir cevheri	1,4
Boksit	0,2

Çizelge 4.4. Çimento sektöründe 2004 yılında kullanılan katkı maddelerinin kullanım oranları [13]

Katkılar	Kullanım oranları
Alçı taşı	20,3
Puzzolan	2,8
Curuf	10,1
Uçucu kül	4,0
Kalker	13,7
Kimyasal	9,2
Fırın EF tozları	0,5
Pomza	1,5
Traz	37,9

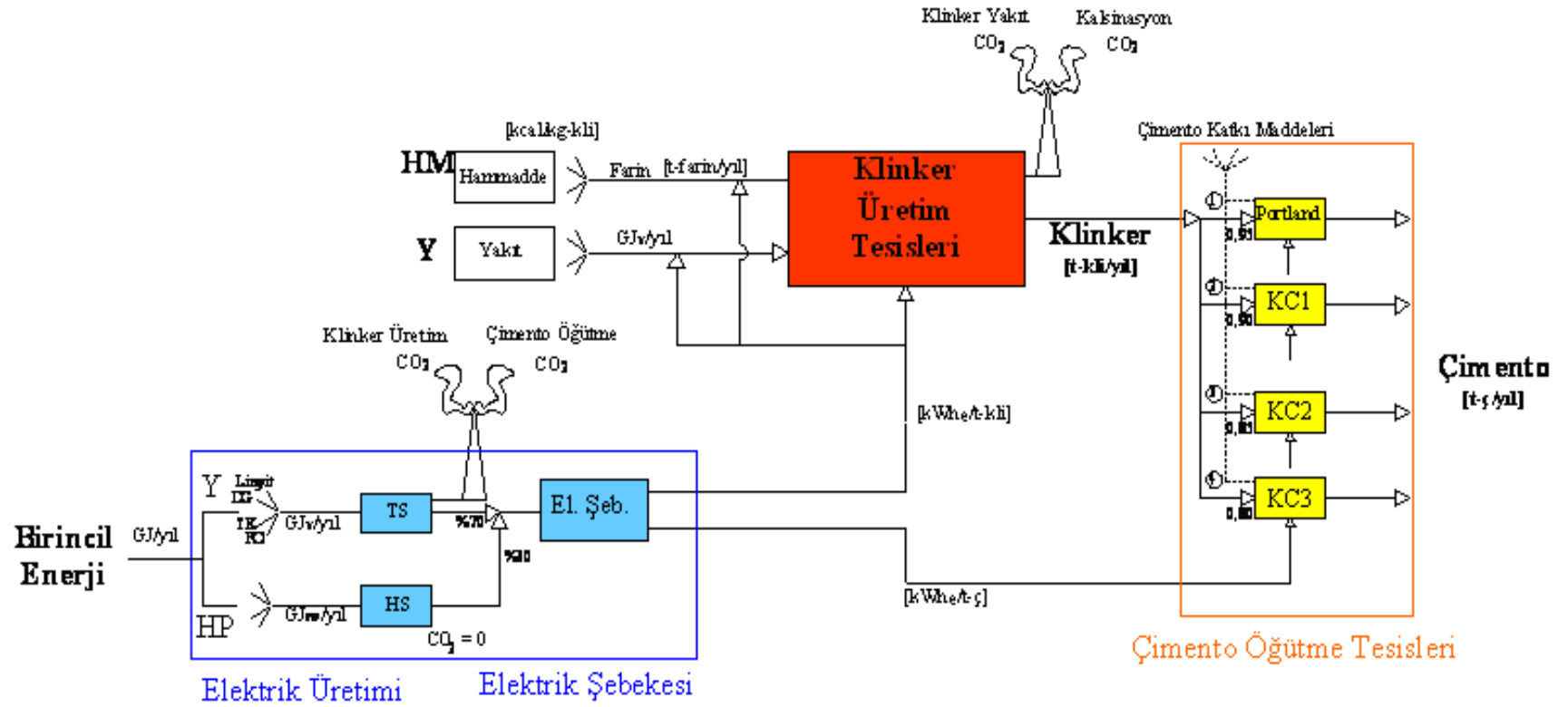


Şekil 4.6. Çimento sektöründe kullanılan katkı maddelerinin kullanım oranları [13]

4.3. Çimento Sektörü Enerji Verimliliği Modelinin Oluşturulması

Bu çalışmada mevcut 40 klinker üretim tesisi, bu tesislerin kümesel davranışını hammadde-enerji kullanımını ve emisyon özelliklerini veren ve buna eşdeğer bir referans klinker üretim tesisi ile tanımlanmıştır. Aynı şekilde 58 çimento öğütme tesislerinin kümesel davranışı, katkı maddesi ve elektrik kullanımı kümesel bir çimento öğütme tesisi ile temsil edilmiştir. Türkiye’de elektrik üretiminde kullanılan tüm termik ve hidrolik santrallerin kümesel birincil enerji (fosil yakıtlar, hidrolik potansiyeller) kullanma elektrik üretim ve emisyon oluşum özellikleri aynı şekilde kümesel bir elektrik üretim santrali ile, elektrik iletim-dağıtım şebekeleri ise tek kayıp oranlı bir kümesel referans elektrik şebekesiyle temsil edilmiştir. Sektöre elektrik besleyen Türkiye enterkonnekte elektrik iletim ve dağıtım şebekesi modelde belli oranda elektrik kaybı bulunan bir elektrik şebekesi tarafından tanımlanmıştır. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi Türkiye Çimento Sektörünün “enerji verimliliği modeli” verilmiştir. Bu model aynı zaman da sektörün CO₂ emisyon salınım davranışını hesaplamada kullanacak ilgili emisyon modeline genişletilebilir. Bu model, kümesel referans klinker üretim tesisi, kümesel referans çimento öğütme tesisi, kümesel referans elektrik üretim santrali ve kümesel referans bir elektrik şebekesinden oluşmaktadır. Bu modelin birincil enerji girdileri; klinker üretim tesisi için referans

yakıt karışımı, referans elektrik üretim santrali için referans birincil enerji (yakıtlar, hidrolik potansiyeller) karışımından oluşmaktadır. Kümesel klinker üretim ve kümesel öğütme tesisleri için gerekli elektrik enerjisi, kümesel referans elektrik şebekesinden sağlanmaktadır. Klinker üretim tesisinin hammadde girdisi kümesel karışimsal hammaddeden, çimento öğütme tesisinin hammadde girdisi ise kümesel referans katkı maddesi girdisinden oluşmaktadır. Klinker ara ürün olup, çimento sektöründe katkı maddesi ve elektrikle beraber girdiyi oluşturur ve oluşan çıktı çimentodur. Ayrıca klinker üretim tesisinde ve termik santraller de oluşan partikül (toz), CO₂ emisyonları ve gaz (SO₂, NO_x, CO, C_mH_n, vb.) emisyonları da genişletilmiş emisyon modeli ile hesaplanabilir. Bu çalışmada 1990-2020 yılları arasında çimento sektöründe gerçekleştirilebilecek enerji verimliliği çalışmaları incelenmiştir.



Şekil 4.7. Türkiye çimento sektörü için kümelenmiş bir enerji kullanım ve CO₂ emisyon modeli

Şekil 4.8’de verilen Türkiye çimento sektörü enerji verimliliği ile ilgili modelin uygulanmasıyla ilgili tüm teknik ve ekonomik veriler Çizelge 4.5’te topluca verilmiş ve tanımlanmıştır.

Çimento öğütme ve üretim sisteminin sistem yapısı Bölüm 4.2’de incelenmiştir. Kullanım yerinin özelliklerine (emniyet, güvenilirlik, dayanıklılık, ömür vb) uygun çimento üretimi yapılması, enerji ve işletme ekonomisi, çimento hammadde kaynaklarının daha uzun süre kullanılmaları vb. yönlerden büyük önem taşımaktadır.

Çizelge 4.5. Model girdi ve çıktıları

GİRDİLER	
Termik Santral Oranı	%70
Hidrolik Santral Oranı	%30
Termik Santral Verimi Ortalama	0,36
Hidrolik Santral Verimi Ortalama	0,85
Şebeke Verimi	0,78
Hammadde Ortalama Kullanım Oranları	Çiz. 4.3, Çiz. 4.20
Hammadde Üretimi	Çiz. 4.11
Özgöl Yakıt Maliyeti	Çiz. 4.20,
Klinker Hammadde Girdileri	
Üretim Miktarı ve Artışı	Çiz. 4.1, Çiz. 4.11, Çiz. 4.13., Şekil 4.1, Şekil 4.13
Özgöl Isı Tüketimi	Çiz. 4.14
Özgöl Elektrik Tüketimi	Çiz. 4.14
Birim Enerji Tüketimi	Çiz. 4.14, Çiz. 4.17, Şekil 4.14
Özgöl Maliyet	Çiz. 4.20

Çizelge 4.5. (Devam) Model girdi ve çıktıları

Çimento Hammadde Girdilerinin	
Yakıt ısı değeri ve ağırlıklı ortalama oranı	Çiz. 4.2,
Katkı Maddelerinin Kullanım Oranı	Çiz. 4.4, Şekil 4.7,
Katkı Oranı	Çiz. 4.11
Üretim Miktarı ve Artışı	Çiz. 4.1, Çiz. 4.11, Çiz. 4.12, Şekil 4.1, Şekil 4.12,
Çimento Öğütme Hesapları	Çiz. 4.12, Şekil 4.12,
Birincil birim Enerji Maliyeti (KEM)	Çiz. 4.10, Şekil 4.10, Şekil 4.11,
Özgül Isı Tüketimi	Çiz. 4.14
Özgül Elektrik Tüketimi	Çiz. 4.14, Çiz. 4.16, Şekil 4.13
Birim Enerji Tüketimi	Çiz. 4.14, Çiz. 4.18, Şekil 4.15
Yıllık Enerji Tüketimi	Çiz. 4.19
Katkılı Birim Enerji Tüketimi	Çiz. 4.15
Önlemlerin Ortalama Özgül Isı	Çiz. 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11
Önlemlerin Ortalama Elektrik Tasarrufu	Çiz. 4.9
Özgül yatırım değeri	Çiz. 4.9
Önlemlerin Tasarruf Edilen BE Maliyeti (TEM)	Çiz. 4.12,
Önlemlerin Uygulama Oranları	Çiz 4.9, Şekil 4.9
Doların Değer Kaybı	%1,9
Enerji Maliyeti Artışı	% 10,0
Faiz Oranı	%12, %30
Birim Elektrik Başına Maliyet	Çiz. 4.20
Özgül Enerji Maliyeti	Çiz. 4.20
Özgül Isı Maliyeti	Çiz. 4.20
Özgül Elektrik Maliyeti	Çiz. 4.20

4.4. Çimento Sektöründe Enerji Verimliliğinin Artırılması Çalışmalarında Mühendislik Yaklaşımı

Türkiye çimento sektöründe enerji verimliliğinin artırılması çalışmalarında, Şekil 4.8’de verilen ve tüm sektörü temsil eden kümesel çimento fabrikasının enerji akım ve bağlantı modelinde ve bu modeli oluşturan tesis gruplarında (klinker üretim, çimento öğütme vb.) enerji akışlarının, enerji kayıp noktalarının, bu noktalardaki proseslerin, proseslerle ilgili enerji kullanımlarının, enerji tasarruf potansiyellerinin, bu potansiyellerin boyutlarının, geri kazanım özelliklerinin ve yatırımlarının vb. verilerin ayrıntılı olarak belirlenmesi, teknik ve ekonomik analizlere tabi tutulması gerekir [14]. Öngörülen üretim projeksiyonlarının, en az enerji (yakıt, elektrik) kullanımı, dolayısıyla en az emisyon oluşumu ile gerçekleşmesini amaçlayan enerji verimliliğinin artırılması çalışmalarında esas alınan mühendislik yaklaşımı ele alınmıştır. Bu yaklaşımda önce, tüm çimento sektörünün enerji kullanım özelliğini ve ayrıca CO₂ emisyonu salınım davranışını veren ve Bölüm 4.3’te geliştirilen (Şekil 4.8) modele ihtiyaç vardır. Böyle bir modelin belli bir zaman aralığında (örn. 2004-2020) enerji verimliliği çalışmalarında kullanılabilmesi için, önce sektörün ilgili zaman dilimindeki üretim projeksiyonlarının; klinker hammaddesi, yakıt, çimento katkı maddesi karışım verileri ve kullanım senaryolarının; başlangıç yılı özgül enerji tüketimlerinin, sektörde uygulanması söz konusu olan tüm enerji tasarruf önlemlerinin [15] önlemlerle ilgili özgül tasarruf ve yatırım verileri [16] ile bunların sektörde uygulanabilirlik oranlarının [17] belirlenmesi gerekir. Bunun ardından ilgili önlemlerle, tasarruf edilen enerjinin maliyetleri (TEM, GJ/\$) hesaplanarak, sektör için enerji tasarruf sağlama eğrisi oluşturulur (Bölüm 4.7). Bu eğri yardımı ile sektörün ilgili zaman dilimindeki enerji verimliliği yatırımları için senaryolar oluşturulur ve maliyetler belirlenir.

4.5. Çimento Sektöründe Enerji Verimliliğinin Artırılması Yöntemleri

Çimento sektöründe enerji verimliliğinin artırılması sektör bazında geliştirilen enerji modelinin (Şekil 4.8) temel tesislerindeki (klinker üretim, çimento öğütme) enerji akışlarını, enerji kullanım ve enerji kayıp noktalarının, bu noktalarda enerji tasarruf önlemlerinin, tasarruf potansiyellerinin, tasarrufla ilgili mühendis yaklaşımlarının ve sistemlerinin, bunlarla ilgili sabit (yatırım) ve değişken (işletme) giderlerinin belirlenmesi gerekir. Bunlarla ilgili enerji tasarrufu önlemler listesi Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Enerji tasarruf önlemleri aşağıdaki gruplar altında sınıflandırılabilir:

- Farin hazırlama ile ilgili enerji tasarruf önlemleri
- Klinker üretme (kuru ve yaş yöntemler) ile ilgili enerji tasarruf önlemleri
- Çimento öğütme ile ilgili enerji tasarruf önlemleri
- Genel enerji tasarruf önlemleri

Çizelge 4.6. Çimento sektörü ile ilgili enerji tasarruf önlemleri listesi

ENERJİ TASARRUF ÖNLEMLERİ	
No	FARİN HAZIRLAMA İLE İLGİLİ ÖNLEMLER
1	Verimli Nakil Sistemleri
2	Verimli Homojenizasyon Sistemleri (Yerçekimi Tip Silo)
3	Verimli Homojenizasyon Sistemleri (Sürekli Sistem)
4	Ezici Pres ve Valsli Değirmen Kullanımı
5	Yüksek Verimde Seperatör Kullanımı (kuru yöntem)
	KLİNKER ÜRETME (KURU YÖNTEM) İLE İLGİLİ YÖNTEMLER
6	Döner Fırın Yakma Sisteminde İyileştirmeler
7	Döner Fırın Yüzey Isı Kaybının Azaltılması

Çizelge 4.6. (Devam) Çimento sektörü ile ilgili enerji tasarruf önlemleri listesi

8a	Atıklardan Sağlanan Yakıt Kullanımı (2010)
8b	Atıklardan Sağlanan Yakıt Kullanımı (2015)
8c	Atıklardan Sağlanan Yakıt Kullanımı (2020)
9	Modern Izgaralı Klinker Soğutucuya Dönüşüm
10	Güç Üretimi İçin Isı Geri Kazanımı (Sadece Yaş Sistem-Uzun Fırın İçin)
11	Yaş Prosesten Çoklu Kademeli Önkalsinasyonlu Kuru Sisteme Dönüşüm
12	Çoklu Kademeli Önısıtıcılı Sisteme Dönüşüm (Kuru Proses)
13	Düşük Basınç Kayıplı Akışkanlaşmalı, Çoklu Siklon Önısıtıcı Kullanımı
14	Izgaralı Soğutucuların Optimizasyonu
15	Uzun Döner Fırınlarda Çoklu Kademeli Ön Isıtıcılı ve Ön Kalsinasyonlu Fırına Dönüşü
16	Ön Isıtmalı Döner Fırına Ön Kalsinatörün Eklenmesi
	ÇİMENTO ÖĞÜTME İLE İLGİLİ ÖNLEMLER (Kuru ve yaş üretim yöntemleri için geçerli)
17	Daha Verimli Nakil Sistemlerinin Kullanılması
18	Bilyeli Değirmenle Valsli Önöğütme Sisteminin Kullanılması
19	Bilyeli Değirmenden Basınçlı Vals veya Horomill'e Dönüşüm
20	Yüksek Verimli Seperatör Kullanımı
21	Değirmenlerin İçsel Yapısının İyileştirilmesi
	GENEL ENERJİ TASARRUF ÖNLEMLERİ
22	Önleyici Bakım Uygulamaları (yalıtım, basınçlı hava kayıpları, bakım..)
23	Enerji Yönetimi ve Kontrol Uygulamaları
24	Yüksek Verimli Motor Kullanımı
25	Hız Kontrollü yüksek verimli Fan Uygulaması

4.5.1. Enerji tasarruf önlemleri

Enerji tasarruf önlemleri; uygun hammadde kullanımı, uygun yakıt kullanımı, uygun yanma uygulamaları, uygun ısı kullanımı ve uygun elektrik kullanımı adı altında gruplandırılabilir. Çizelge 4.6’da tasarruf önlemleri grupları, tasarruf numaraları ve tasarruf isimleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu önemler aşağıda tasarruf grupları adı altında önlem kod numaralarıyla verilmiş, her biri kısaca açıklanmıştır.

Farin hazırlama ile ilgili enerji tasarruf önlemleri

Önlem 1. Verimli Nakil Sistemleri Uygulanması: Çimento sektöründe nakil sisteminin başlıca işlevi, un boyutundaki hammadde ve ürün tozlarının (farin, klinker tozu, çimento, kömür tozu) sistemden sisteme taşınmasıdır. Bu taşıma işi pnömatik sistemlerle veya mekanik bantlı sistemlerle (konveyör) gerçekleştirilir. Pnömatik sistemlerde, yoğun elektrik tüketen kompresörler kullanıldığı için bu sistemlerin işletme maliyetleri yüksek, yatırım maliyetleri ise daha düşüktür. Bantlı ve kovalı mekanik taşıma sistemlerinin elektrik giderleri çok daha az, yatırım giderleri ise çok daha yüksektir. Elektrik üretim santrali (termik, hidrolik) girişindeki 100 birim birincil enerjinin (yakıt, hidrolik potansiyel) ancak 25 birimi çimento sektörüne elektriksel girdi olarak ulaşabilmektedir. Bu nedenle endüstriyel proseslerde 1 birim elektrik tasarrufu sağlamak, santral girişinde yaklaşık 4 birim birincil enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak, endüstriyel proseslerde elektrik enerjisi tasarrufu, enerji verimliliği, CO₂ ve diğer emisyonlar yönünden, ısı tasarrufuna kıyasla çok daha büyük önem taşımaktadır. Bilimsel kaynaklardan elde edilen verilere göre pnömatik sistemden konveyörlü mekanik sisteme geçilmesi durumunda birim ürün başına özgül elektrik tüketiminde 2 kWh_e/ton-ürün elektrik tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu tasarrufu gerçekleştirmek için yapılması gereken yatırım tutarı ise 3 \$/ton-ürün kapasitesi dolayındadır [16].

Önlem 2. Verimli Homojenizasyon Sistemleri Uygulanması: Enerji verimliliği, ürün kalitesi, işletme ekonomisi vb. yönlerden karışimsal girdilerden oluşan un biçimindeki ürünlerin (farin, çimento, çimento katkı maddesi, toz kömür vb.) karışım yapılarının olabildiğince değişmemesi gerekir. Bu ise, uygun ve etken homojenleştirme sistemleri yardımıyla sağlanmaktadır. Bu sistemler, farin homojenizasyonu, kömür homojenizasyonu altında isimlendirilirler. Homojenizasyon işlemleri basınçla akışkanlaştırma yöntemi ve yerçekimi etkili olmak üzere iki ana grup altında toplanır. Akışkanlaştırmalı homojenizasyonda kullanılan basınçlı hava, çok elektrik enerjisi tüketen kompresörlerden sağlandığından, bu sistemlerin elektrik tüketimi yüksektir. Yerçekimi uygulamalı sistemlerde ise elektrik tüketimi minimum düzeydedir. Hava akışkanlaştırmalı silo homojenizasyon sistemlerinde birim ürün başına kullanılan özgül elektrik tüketimi 1-1,5 kWh_e/ton-ürün dolayındadır [18]. Çok eski, 6-8 adet çeşitli silolardan değişken debilerde, madde çekerek mekanik homojenizasyonun yapıldığı kuru klinker üretim sistemlerinde, özgül elektrik tüketimi 2-2,6 kWh_e/ton-ürün dolayındadır [18]. Yeni kurulan modern tesislerde giderek düşük elektrik enerjisi tüketimli yerçekimi etkili homojenizasyon siloları kurulmaya başlanmaktadır. Birim farin üretimi başına elektrik tüketimindeki azalmanın 0,9-2,5 kWh_e/ton aralığında olduğu bildirilmektedir [17]. Bu uygulamanın özgül yatırım maliyeti 3,7 \$/ton-hammadde kapasitesi dolayındadır.

Önlem 3. Verimli Sürekli Homojenizasyon Sistemleri Uygulanması: Çimento sektörlerine gönderilen anket (Ek-1) formu cevaplarında, ülkemizde bazı çimento fabrikalarının sürekli hava akışkanlaştırmalı (kaynamalı) homojenizasyon uygulamalarına geçtikleri, bu uygulama ile elektrik tasarrufu sağladıkları beyan edilmiştir [15]. Sanayiden elde edilen anket (Ek-1) verilerine dayanarak bu önlemle sağlanan enerji tasarrufu 0,5 kWh_e/ton-klinker, özgül yatırım ise 3 \$/ton-klinker kapasitesi olarak alınmıştır.

Önlem 4. Ezici Pres ve Valsli Değirmen Kullanımı: Çimento sektöründe farin öğütme, çimento öğütme ve kömür öğütme sistemlerinde genelde bilyeli değirmenler kullanılır. Bu değirmenlerin özgül elektrik enerji tüketimini azaltmak için iki yöntem uygulanır. Bunlardan birincisi bilyeli değirmen önüne ezici presli öğütücü ilave edilmesidir. Diğerisi ise, bilyeli değirmenin doğrudan dik valsli değirmen ile değiştirilmesidir. Dik valsli değirmenlerde atık ısı kullanımı sayesinde gerekli farin kurutma işlemleri de kolayca gerçekleştirilebilmektedir. Bilyeli değirmenin, dik valsli değirmenle değiştirilmesi durumunda birim ürün özgül elektrik tüketiminde 7 kWh_e/ton dolayında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir [17]. Bununla ilgili özgül yatırım maliyeti ise 5,3 \$/ton kapasitedir [17].

Önlem 5. Yüksek Verimde Seperatör Kullanımı (Kuru Proses): Değirmenlerde özgül elektrik tüketiminin azaltılması için, öğütülen malzeme, en az sirkülasyon oranıyla istenilen inceliğe kavuşturulmalıdır. Yüksek verimli seperatör uygulamasıyla değirmenden çıkan ürünün istenilen incelikteki bölümü hemen değirmenden ayrılarak dışarıya verilmekte, ancak istenilenin üstünde kabalıktaki ürün, tekrar değirmene geri gönderilmektedir. Böylelikle ürünün uzun süre ve gereksiz biçimde öğütme sürecinde kalması önlenmekte, aşırı elektrik tüketimine ve değirmen aşınmalarına mani olunmaktadır. Bu amaç için, çeşitli yüksek verimli seperatörler geliştirilmiş ve bunlarla ilgili veriler literatürde verilmiştir [17]. Bu uygulamalarda özgül elektrik tasarrufu 2,3 kWh_e/ton (yaş proses), 2,7 kWh_e/ton (kuru proses) olarak, özgül yatırım maliyeti ise 2 \$/ton-farin kapasitesi olarak verilmektedir [16].

Klinker üretimi ile ilgili enerji tasarrufu önlemleri

Ülkemizde klinker üretiminin tamamına yakını kuru yöntemle yapılmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada ele alınan enerji tasarrufu uygulamalarında özellikle kuru yöntem esas alınmıştır. Klinker üretimiyle ilgili 11 adet enerji tasarruf yöntemi belirlenmiş ve bu yöntemler aşağıda kısaca incelenmiştir.

Önlem 6. Döner Fırın Yakma Sistemindeki İyileştirmeler: Çimento üretiminde enerji ekonomisinin, çimento kalitesinin, emisyon davranışlarının ve sistem ömrünün iyileştirilmesi, uygun işletme ve bakım onarım koşullarının oluşturulması için döner fırındaki yanma prosesine, diğer bir anlatımla klinker pişirme sürecine hakim olmak zorunludur. Uygun yanmanın sağlanması; uygun yakıt seçimine, uygun yakıt hazırlamaya, uygun yakıt hava karışımı sağlanmasına, yanma odasında sürekli tutuşmanın sağlanmasına ve yakıt taneciğinin yanma odasında yeterince uzun süreyle kalmasına bağlıdır. Bunlar dışında ayrıca brülör düzeni, brülör konumu, brülör eğimi vb. faktörler de yanmayı etkilemektedir. Klinkerin pişirilmesi sırasında farin ve yakıt özelliklerine, istenilen klinker kalitesine bağlı olarak döner fırında optimum alev biçiminin oluşturulması gerekir. Böyle bir alevin oluşturulması için; yanma gazı analiz verilerinin, farin, kömür, klinker analiz değerlerinin fırın yanma kontrol sistemlerine beslenmesi gerekmektedir. Günümüzde klinker pişirme proseslerinde karmaşık ve ileri teknolojiye sahip otomatik kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Döner fırında yanma ortamında farin ve kömürden kaynaklanan klor, sülfür, alkali vb. oranlarının uygun yanmayı engelleyecek boyutlarda olmaması sağlanmalıdır. Volatilizasyon katsayıları da denen bu oranların bir yüksek fırın için hesaplanan ve olması gereken değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir [19].

Çizelge 4.7. Bir döner fırında hesaplanan ve olması gereken buharlaşma değerleri

Bileşik	Hesaplanan Değerler	Olması Gereken Değerler
SO ₃	91,9	70
K ₂ O	65,5	80
Na ₂ O	60,4	50
Cl	95,8	>99
KCl	95,8	>99
K ₂ SO ₄	86,3	50
Na ₂ SO ₄	100	50
CaSO ₄	100	50

Yanma ortamının volatilizasyon değerleri, olması gereken değerleri aştığında yanma bozulmakta, eksik yanma kayıplarına neden olan CO emisyonları artmaktadır. Bu ise özgül enerji tüketimini artırır. Döner fırın yakma sisteminin iyileştirilmesi ve optimizasyonu ile %10'a varan özgül enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu önlemler ayrıca CO₂, CO, NO_x, SO₂ vb. emisyonlarının en az düzeye inmesine katkı sağlamaktadır. Enerji tasarrufu ile ilgili özgül yatırım bedelleri, uygulaması ön görülen önleme bağı olarak değişmektedir.

Önlem 7. Döner Fırın Yüzey Isı Kaybının Azaltılması: Döner fırının dış yüzeyinden, özellikle yanma bölgesinden atmosfere radyasyon ve konveksiyon yoluyla önemli boyutta ısı kayıpları oluşmaktadır. Uygun refraktör (fırın tuğlası) uygulamaları ile bu kayıplar en az düzeye indirilebilir. Literatürde verilen bilgilere göre yalıtım özellikli fırın tuğlaları kullanılması ile özgül ısı tüketimi 0,1-0,4 GJ/ton-klinker azaltılabilir [20]. Bununla ilgili özgül yalıtım maliyeti 0,25 \$/ton-klinker kapasitesi dolayındadır [21].

Önlem 8. Atıkların Yakıt Olarak Kullanımı: Döner fırınların sıcaklığının yüksek olması (900-1800 °C), yoğun türbülans olması, kalma sürelerinin çok uzun olması ve birçok reaksiyonun oluşmasına uygun koşulların bulunması dolayısıyla yüksek ağır metal, kükürt vb. içerikli tehlikeli atıkların buraya beslenerek klinker içerisinde tutulması ve böylece bertaraf edilmesi kolayca sağlanabilmektedir. Bu uygulama uzun yıllardan beri gelişmiş ülkelerde kullanılmaktadır. Tehlikeli atıkların büyük bölümü yakma tesislerine gereksinim duyulmadan döner fırında yakılmakta, böylelikle hem enerji tasarrufu sağlanmakta, hem de atıklar bertaraf edilmektedir. Hava kalitesinin korunması yönetmeliğinde bu uygulama ile ilgili herhangi bir atıfta bulunulmadığından ülkemizde klinker döner fırınlarında atık kullanımı ve bertaraf edilmesi uygulamasına uzun süreler geçilememiştir. Konuyla ilgili ilk deneysel çalışmalar, Aksaray Mercedes fabrikasının tehlikeli atık boya çamurlarının Konya çimento fabrikasında yakılması ile başlatılmıştır [22]. Bu çalışma sonuçları dikkate alınarak Çevre Bakanlığı, isteyen çimento fabrikalarına atık yakma izni vermeye başlamıştır. Günümüzde bazı çimento fabrikaları çeşitli tür ve kapasitelerde atık

yakma izinlerini almış, ancak bunların çok azında deneme niteliğinde, küçük boyutlarda atık yakma ve bertaraf işlemleri başlatılmıştır. Çimento anket (EK-1) sonuçlarına göre atık yakma ve bertaraf işlemleri 2010 ve ötesinde artan oranda devam edecektir. Bu çalışmada, 2010 yılında atık yakma oranı ısı bazda %1,5, 2015 yılında %3, 2020’de %6 olarak kabul edilmiştir.

Önlem 9. Modern Izgaralı Klinker Soğutucuya Dönüşüm: Klinker soğutma işlemi, yakıt ekonomisi ve klinker kalitesi yönünden büyük önem taşımaktadır. Klinker kalitesi bağlamında klinkerin istenilen hızda soğutulması; yakıt ekonomisi bağlamında ise klinkerden olabildiğince ısı geri kazanılması gerekir. Klinker soğutucular; şaftlı, döner, planet tipi ve ızgaralı olmak üzere dört grup altında toplanabilir. Izgaralı tür, bu türlerin en moderni olup büyük kapasitelerde ekonomik biçimde uygulanabilmekte ve klinker sıcaklıkları 83°C’a kadar indirilebilmektedir [23]. Küçük kapasiteli tesislerde bu yatırım ekonomik olmayabilir. Ön kalsinatörün bulunduğu döner fırınlarda, kalsinatöre uygun üçüncül hava sağlaması nedeniyle klinker soğutma, vazgeçilmez bir öneme sahiptir. Planet ve döner tip soğutucular genelde eski tesislerde bulunmaktadır. Planet türden ızgaralı türe geçişte özgül elektrik tüketiminde 3 kWh/ton-klinker artışına karşın, yakıt tüketiminde %8’lere varan azalma sağlanabilmektedir [23]. Ön kalsinatöre geçiş uygulamalarında ızgaralı klinker soğutucu kullanımı uygun üçüncül havanın sağlanması yönünden gerekli olmaktadır. Izgaralı klinker soğutucuya dönüşümün özgül yatırım bedeli 0,4-0,5 \$/ton-klinker kapasitesi, yıllık özgül işletme maliyetindeki artış ise 0,1 \$/ton-klinkerdir [24].

Önlem 10. Güç Üretimi İçin Isı Geri Kazanımı (Sadece Yaş Proses-Uzun Fırın İçin): Bu önlem sadece uzun fırınlı yaş klinker üretim sistemleri için söz konusudur. Bu uygulamada klinker soğutucu ve döner fırın atık ısıları kullanılarak bir atık ısı kazanında buhar üretilir. Üretilen buhar buhar türbinine gönderilerek elektrik elde edilir. Elektrik üretim verimleri oldukça düşük (%18) olup, özgül elektrik üretimi 11-25 kWh/ton-klinker [25] kadardır. Bu tür sistemlerde özgül yatırım 2-4 \$/ton-klinker kapasitesi, özgül işletme maliyeti ise 0,2-0,3 \$/ton-klinkerdir [26].

Önlem 11. Yaş Prosesten Çoklu Kademeli Ön kalsinasyonlu Kuru Prosese Dönüşüm:

Hammadde özellikleri ve işletme koşullarına bağlı olarak bazı durumlarda yaş prosesden çok kademeli ön kalsinasyonlu kuru sisteme dönüş ekonomik olmaktadır. Yaş proses de özgül ısı tüketimi 6 GJ/ton-klinker dolayındadır. Literatürde verilen bir yaş sistemden kuru sisteme dönüşüm örneğinde, özgül ısı tüketiminde 2,9 GJ/ton-klinker azalma sağlandığı bildirilmektedir. Buna karşın özgül elektrik tüketiminde ise 10 kWh_e/ton bir artış meydana gelmiştir. Yaş sistemden çok kademeli ön kalsinasyonlu kuru sisteme dönüşümün özgül yatırım maliyeti, sistem ve işletme özelliklerine göre 50-110 \$/ton-klinker kapasitesi gibi çok geniş bir aralıkta değişmektedir [27].

Önlem 12. Kuru Proseste Çoklu Kademeli Ön Isıtıcı Sistemine Dönüşüm:

Eski kuru sistemler, hiçbir ön ısıtıcıya sahip olmayabilir veya sadece 1, 2 ve 3 kademeden oluşan ön ısıtıcılara sahip olabilir. Böyle bir sistem günümüzdeki 4, 5 ve üzeri kademeli sistemlere kıyasla büyük ısı kayıplarına neden olabilir. Böyle durumlarda ön ısıtıcı kademe sayısı artırılarak enerji verimliliğinde iyileşme sağlanabilir. Modern siklonlu ve akışkanlaştırılmış ön ısıtıcılarda yoğun ısı geri kazanımı sağlanabilmektedir. Bu tür ön ısıtıcılarda basınç kayıplarının düşük olması nedeniyle fan motorları tarafından kullanılan elektrik tüketimi de azalmaktadır. Yeni ve etken ön ısıtıcıları kullanımı ile ısı geri kazanımı buna bağlı olarak farin sıcaklığı hızlı bir şekilde artmakta, dolayısı ile ön ısıtıcılarda ön kalsinasyon işlemi %30-40'lara ulaşmaktadır. Bu ise döner fırın klinker üretim kapasitesini artırmaktadır. Ön kalsinasyonda %30-40 oranında bir artış döner fırında klinker üretim yolunu da bu oranlarda kısaltmakta ve fırından dışarıya olan radyasyon kayıpları da bu oranda azalmaktadır [26]. Klinker kapasitesinin artması nedeniyle klinker soğutucusunun ortaya çıkacak yeni koşullara uyarlanması gerekir. Hammadde rezerv durumu dikkate alınarak eski fırınların değiştirilmesinin zorunlu olduğu, ekonomik yönden yeni fırına geçişin uygun olmadığı durumlarda bu yaklaşımdan yararlanmalıdır. Bu yaklaşımla eski doğu Almanya'daki bazı eski fırınlara çoklu modern ön ısıtıcılar ilave edilerek özgül ısı tüketimi 3,9 GJ/ton'dan 3,4 GJ/ton'a indirilmiştir [17].

Önlem 13. Düşük Basınç Kayıplı, Akışkanlaşmalı, Çoklu Siklon Ön Isıtıcı Kullanımı:

Siklonlar, ön ısıtıcılı klinker üretim sistemlerinin başlıca temel elemanıdır. Ön ısıtıcılarda düşük basınç kayıplı siklon uygulaması döner fırın baca gazı fanlarının elektrik tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Fanın verim durumuna göre, her bir 500 mmSS basınç azaltılmasıyla, özgül elektrik tüketiminde, 0,6-0,8 kWh_e/ton-klinker dolayında tasarruf sağlanabilmektedir. Çok eski fırınlarda özgül elektrik tasarrufu 0,6-1,1 kWh_e/ton-klinker kadardır [28].

Önlem 14. Izgaralı Klinker Soğutucularda Isı Geri Kazanımı Optimizasyonu:

Klinker soğutucular döner fırın çıkışında, klinkeri 1200 °C'dan 100 °C'a kadar soğutur. Kullanılan başlıca soğutucular ızgaralı, döner ve planet tipi olmak üzere üç tür altında toplanır. Klinker soğutucular, döner fırın brülörleri için birincil ve ikincil havaları, ön kalsinatör brülörleri için ise üçüncül havayı ısıtır [17]. Izgaralı soğutucular en modern soğutucular olup, özellikle büyük kapasiteli (10000 ton/gün-klinker'e kadar) döner fırınlar için uygun olmaktadır. Fazla hava uygulaması ile birincil ve ikincil hava sıcaklıkları istenilen değerlere indirilebilir. Fırın kullanımından sonra geriye kalan kızgın hava ise çok yüksek bir sıcaklıkta yakma havası olarak ön kalsinatöre gönderilir. Döner tip klinker soğutucular dünya klinker üretiminin %5'inde (2000-4500 ton/gün-klinker kapasiteli fırınlarda), planet tipi soğutucular ise (3000-4000 ton/gün-klinker kapasiteli fırınlarda) dünya klinker üretim kapasitesinin %10'unda kullanılmaktadır. Izgaralı klinker soğutucularda 1,2-1,5 GJ/ton-klinker kadar duyulur ısı geri kazanımı sağlanabilmektedir [17]. Bu ısı geri kazanımı uygun yanma koşullarının sağlanmasıyla klinker kalitesinde iyileşme ve çevreye olan emisyonlarda azalma da sağlamaktadır. Isı geri kazanımı, fazla havanın azaltılması, ızgara üstü klinker yatak kalınlığının kontrolü ve yeni geliştirilmiş ızgara uygulamalarıyla (örn. döner ızgaralı soğutucu) daha da iyileştirilebilir. Izgara üzerindeki soğutma havası dağılımının kontrolü klinker sıcaklığının çok daha düşük sıcaklıklara düşmesine ve soğutucu çıkışındaki kızgın havanın daha yüksek değerlere ulaşmasına olanak sağlar. Kızgın hava sıcaklığının artması, döner fırında ve kalsinatörde gereksinim duyulan özgül ısı azalmasını sağlar. Izgaralı soğutma sisteminin iyileştirmesiyle özgül ısı tüketiminde 10-20

kcal/kg-klinker (0,04GJ/ton-klinker) azalma sağlanabilmektedir [28]. Mevcut soğutucuların modern ızgaralı soğutucularla değiştirilmesi durumunda 20 kcal/kg-klinker (0,08 GJ/ton-klinker) enerji tasarrufu sağlandığı, buna karşılık fanların elektrik tüketiminde ise 2 kWh_e/ton-klinker kadar bir artış olduğu literatürde bildirilmektedir [17].

Önlem 15. Uzun Döner Fırınların Çoklu Kademeli Ön Isıtıcı ve Ön Kalsinasyonlu Fırına Dönüşümü (Kuru Proses): Bazı durumlarda eski kuru prosesli sistemlerde kullanılan uzun döner fırınların yenilenerek çoklu ön ısıtıcı, ön kalsinatörlü sisteme dönüştürülmesi ekonomik olmaktadır. Bu durumda özgül ısı tüketimi yaklaşık 4,5 GJ/ton-klinker'den 3,2 GJ/ton-klinker'e azalmakta ve 1,3 GJ/ton-klinker dolayında bir enerji tasarrufu sağlanabilmektedir[16]. Eski bir döner fırına, ön kalsinatör ve akışkanlaştırmalı ön ısıtıcılar ilavesi için gereken özgül yatırım bedelinin 28 \$/ton-klinker kapasitesi dolayında olduğu literatürde verilmektedir [24]. Başka bir kaynakta ise bu değer çok daha düşük değerlerde, 8,6 \$/ton-klinker dolayında olduğu ifade edilmektedir [24].

Önlem 16. Kuru Prosesli Ön Isıtmalı Döner Fırına Ön Kalsinatör Eklenmesi: Çok kademeli ön ısıtıcı döner fırına ön kalsinatör eklenmesi ile özgül ısı tüketimi azalmakta ve fırının klinker üretim kapasitesi artmaktadır. Mevcut döner fırınların, işletme ve çeşitli yapısal özellikleri dikkate alınarak, çeşitli yapımcı firmalar tarafından özel ön kalsinatör sistemleri geliştirilmiştir. Genelde mevcut fırının temel ve kuleleri yeni sistemle de kullanılmakla birlikte, mevcut klinker soğutucunun ve ön ısıtıcıların değiştirilmesi de söz konusu olabilmektedir. Literatürde bu yaklaşımla klinker üretim kapasitesinin %80-100 (1000 ton/gün-klinker'den 1800-2000 ton/gün-klinker'e) yükseldiği, özgül enerji tüketiminin ise 3,56 GJ/ton'dan 3,06-3,19 GJ/ton-klinker'e indirilerek %11-14 enerji tasarrufu sağlandığı bildirilmektedir [17]. Yine literatürde ön kalsinatör ilavesinin özgül yatırım bedelinin 28 \$/ton-klinker yıllık kapasitesi dolayında olduğu söylenmektedir [24].

Çimento öğütme ile ilgili enerji tasarrufu önlemleri

Önlem 17. Daha Verimli Nakil Sistemlerinin Kullanılması: Çimento öğütme sistemlerinde, farin taşıma sistemlerinde olduğu gibi pnömatik taşıma yerine mekanik taşıma uygulaması enerji verimliliği yönünden daha uygun olmaktadır (Bkz.. Önlem 1). Öğütülen birim malzeme miktarı için elektrik tasarrufu ve yatırım maliyetleri Önlem 1’de verildiği gibidir.

Önlem 18. Bilyeli Değirmen Önünde Ezici Presli Ön Öğütme Sistemi Kullanılması: Çimento öğütmede, bilyeli değirmen uygulaması durumunda çimento inceliğine bağlı olarak özgül elektrik tüketimi 33-45 kWh_e/ton-klinker dolayındadır [17]. Yeni öğütme yaklaşımlarıyla (bilyeli değirmen önüne ezici pres uygulaması, çeşitli tür valsli değirmenlere geçiş vb.) özgül elektrik tüketimi 22-33kWh_e/ton-klinker’e indirilebilir [29].

Bilyeli değirmen önüne ilave olarak bir ezici pres konumlanması durumunda da 8 kWh_e/ton-klinker enerji tasarrufu sağlandığı belirtilmektedir [30]. Ezici pres ilavesinin özgül yatırım bedelinin 2,5 \$/ton-klinker olduğu ve bunun bazı durumlarda 8 \$/ton-klinker’e kadar çıkabileceği ifade edilmektedir [17].

Önlem 19. Bilyeli Değirmenden Horomill'e Dönüşüm: İç içe geçmiş iki tambur arasında öğütme yaklaşımına dayanan yatay eksenli valsli değirmen (Horomill) ile ilgili geliştirme çalışmaları sonucunda bu sistemin çeşitli işletme sorunları büyük ölçüde çözülmüş ve özgül elektrik tüketimini diğer dik valsli değirmenlerdeki en alt değeri düzeyindedir (23 kWh_e/ton-klinker) [17]. Bu değirmenlerde öğütme işleminin tek geçişli olarak gerçekleştirilmesi nedeniyle sistem yatırım maliyeti daha düşüktür.

Günümüzde mevcut öğütme kapasitesinin arttırılmasında çoğunlukla yüksek basınçlı valsli değirmeler kullanılmakta, özellikle elektrik fiyatlarının yüksek olduğu yörelerde tercih edilmektedir [17]. Literatürde, eski bir bilyeli değirmenin horomill

ile değiştirilmesi durumunda özgül elektrik tüketiminde 27 kWh_e/ton-kliker'lik bir tasarruf sağlandığı ifade edilmektedir.

Önlem 20. Yüksek Verimli Seperatör Kullanımı: Seperatörler değirmen çıkışındaki kaba partikülleri ayırarak değirmen girişine yönlendirir. Alışılmış seperatörlerin ayırım verimleri düşük olduğundan, ince partiküller de değirmen girişine geri beslenmekte, bu partiküller tekrar tekrar öğütülmeye tabi tutulduğundan elektrik tüketimi artmaktadır. Yüksek verimli yeni seperatörler kaba partikülleri bir defa da ayırarak, gereksiz elektrik tüketimini önler. Bu yaklaşımla özgül öğütme elektrik tüketiminin 6 kWh_e/ton azaldığı, değirmen öğütme kapasitesinin ise % 25 arttığı literatürde verilmektedir [31].

Önlem 21. Değirmenlerin İç Yapısının İyileştirilmesi: Değirmen içindeki öğütme elemanlarının (bilye, merdane, vb.) aşınma ve öğütme etkinliklerinin, uygun bakım, onarım, sistem analizi, sistem modellemesi, optimizasyonu ve rehabilitasyon çalışmaları ile olabildiğince iyileştirilmesi, değirmenlerin özgül elektrik tüketimini azaltmaktadır [21]. Ülkemizde de bu tür bazı çalışmaların başarı ile yürütüldüğü görülmektedir. Değirmen iç plakalarının uygun biçimde tasarlanması da elektrik tasarrufu için önlemlidir. Değirmenlerin iç yapılarının iyileştirilmesi ile % 5-10 dolayında elektrik tasarrufu sağlanabilmektedir [21].

Genel enerji tasarrufu önlemleri

Önlem 22. Önleyici Bakım Uygulamaları (Yalıtım, Basınçlı Hava Kayıpları, Planlı Bakım, vb.): Döner fırınlar, dolayısıyla tüm klinker üretim sistemi sürekli çalışan, yoğun enerji tüketen sistemlerdir. Bunların devre dışında kalması ve tekrar devreye alınması çok uzun zaman alır ve büyük boyutlarda enerji kaybına neden olur. Bu durum, bu tür sistemlerde önleyici bakımın ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Çağdaş çimento üretim sistemlerinde otomasyon uygulamalarıyla hammadde ve yakıt özelliklerinin ve sistem işletme parametrelerinin sürekli izlenmesi, hata ve arızaların yerlerinin, zamanlarının ve boyutlarının sürekli kayıt

altında tutulması enerji ve işletme ekonomisi yönünden çok büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda sistemdeki kritik noktaların belirlenip, koruyucu bakım programı kapsamında buralardan kaynaklanan durmaların ve diğer olumsuzlukların önlenmesi gerekmektedir. Planlı bakım (örn. döner fırın tuğlaları için) enerji tasarrufu yanında durma sürelerini azalttığı için fırının kullanım ve yük faktörünü artırarak işletme ekonomisini iyileştirir. Fırına yanlış hava sızmalarının önlenmesi ile özgül enerji tüketiminde 11 kcal/kg-klinker azalma sağlanabilir. Literatürde önleyici bakım uygulamaları ve proses kontrolü uygulamaları ile 5 kWh_e/ton-klinker enerji tasarrufu sağlandığı ifade edilmektedir [32].

Önlem 23. Enerji Yönetimi ve Kontrol Uygulamaları: Döner fırının uygun olmayan işletme koşullarında çalıştırılması ısı kayıplarının başlıca nedenidir. Otomatik kontrol uygulamaları uygun işletme ve yanma koşullarının oluşturulmasında, ürün kalitesinin artırılmasında ve öğütme enerjisinin azaltılması yönünden en etken yaklaşımdır. Farin ve yakıt beslemenin homojen olması, daha kararlı fırın işletmesine, kaliteli klinker üretimine ve döner fırında daha etken enerji tasarrufuna olanak sağlamaktadır. Uygun enerji yönetimi ve proses kontrolüyle % 2,5-10 arasında enerji tasarrufu sağlanabildiği literatürde ifade edilmektedir [33].

Önlem 24. Yüksek Verimli Motor Kullanımı: Döner fırınların döndürülmesi, farin ve çimentonun öğütülmesi, yakıt hazırlama ve taşıma gibi işlemler elektrik motorlarıyla gerçekleştirilmektedir. Tipik bir çimento fabrikasında 500-700 dolayında elektrik motoru vardır. Bunların güçleri birkaç kW_e'ten başlayarak MW_e değerlerine erişmektedir. Döner fırın özgül elektrik tüketimi 40-50 kWh_e/ton-klinker dolayındadır [17]. Yeni ve uygun motor ve hız kontrol uygulamalarıyla tesis özelliklerine bağlı olarak % 3-8 arasında elektrik tasarrufu sağlanmaktadır [18].

Önlem 25. Hız Kontrollü Yüksek Verimli Fan Uygulaması: Çimento sektöründe fanlarda damperli debi kontrolü yerine, hız ayarlı debi kontrolü uygulamaları önemli boyutta elektrik enerjisi tasarrufu sağlanmaktadır. Bu tasarruflar akış özellikleri ve yük koşullarına göre değişmektedir. Bu tasarrufların boyutu %7-60 arasında

değişmektedir [18]. Bununla ilgili geniş kapsamlı bir çalışma kaynak [17] verilmiştir.

4.6. Önlemler İçin Modelde Kullanılan Özgül Tasarruflar ve Yatırımlar

Yukarıda sıralanan önlemlerden pek çoğu için özgül tasarruflar ve özgül yatırım maliyetleri aralıklar halinde verilmiştir. Modelde kullanılan değerler ise bu aralıklar ve Türkiye şartları dikkate alınarak belirlenmiştir (Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.8).

Maliyet değerleri, önlem 3 hariç 1994 yılı dolar değeridir. 2004 yılı maliyetleri belirlenirken doların alım gücündeki azalma da dikkate alınmıştır. 1994 yılı doları ile 2004 yılı doları arasında $0.81 \$ (1994) = 1 \$ (2004)$ dönüşümü kullanılmıştır. Bu dönüşümden faydalanılarak 2004–2020 yılları arasında da doların her yıl %1,9 değer kaybettiği varsayılmıştır. Bu değer kaybı, %10 oranındaki enerji fiyatı artışının içinde kabul edilmiştir. Bu değerler dikkate alınarak yakıt ve elektrik kaynaklı toplam birincil enerji bazında yıllara göre hesaplanan birincil enerji maliyeti KEM, Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Çimento sektöründe kullanılan birincil birim enerji maliyetleri (KEM)[4]

Yıllar	2005	2010	2015	2020
KEM (\$/GJ)	4,09	6,59	10,6	17,1

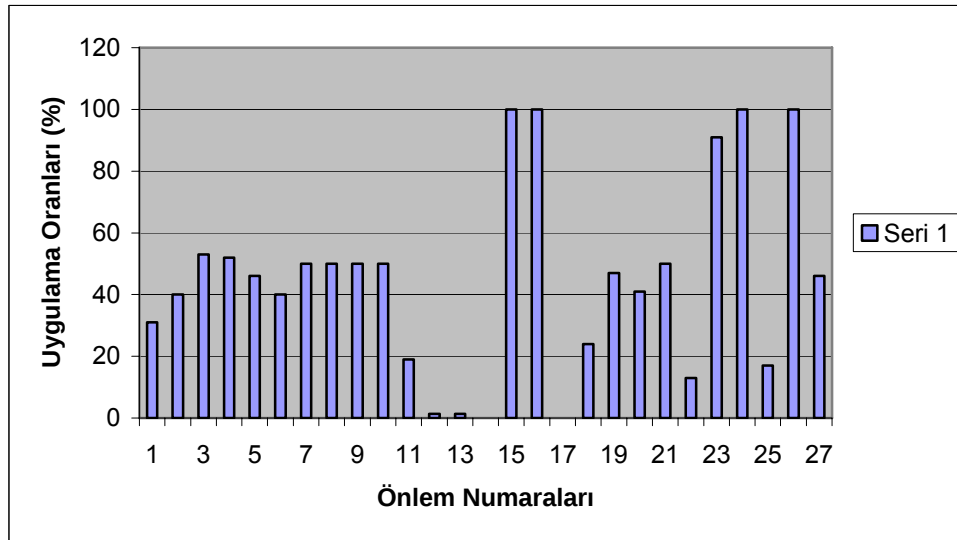
Aynı zamanda bu değer, modelin girdilerinden biri olup, istenildiği takdirde değiştirilebilmektedir. Doların değer kaybı, ilerdeki yıllar için özgül yatırım maliyetlerinin belirlenmesinde dikkate alınmıştır. Önlemler için modelde kullanılan özgül ısı ve özgül elektrik tasarrufları ve özgül yatırım maliyetleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Önlemlerin ortalama özgül ısı, elektrik tasarrufu, ortalama özgül yatırım değerleri ve uygulama oranları

Önlem Kodu	Kullanılan Özgül Isı Tasarrufu (GJ/T)	Kullanılan Öz. El. Tasarrufu (kWh/T)	Ortalama Özgül Yatırım (\$/T)		Uygulama Oranları (%)
			1994	2004	
1	0	2,91	5,357	6,61	31
2	0	0,89	6,607	8,16	40
3	0	0,25		3	53
4	0	10	9,464	11,68	52
5	0	3,3	3,571	4,41	46
6	0,096	0	0,98	1,21	40
7	0,075	0	0,25	0,31	50
8a (%1,5katkı)	0,026	0	1	1,23	50
8b (%3 katkı)	0,052	0	1	1,23	50
8c (%6 katkı)	0,105	0	1	1,23	50
9	0,15	-1,5	0,6	0,74	19
10	0	10	3,25	4,01	1,36
11	1,4	-5	75	92,59	1,36
12	0,45	0	20	24,69	0
13	0	2	3	3,7	100
14	0,0918	0	0,2	0,25	100
15	0,65	0	28	34,57	0
16	0,2	0	4,793	5,92	24
17	0	2,32	3	3,7	47
18	0	4	2,5	3,09	41
19	0	13,5	4	4,93	50
20	0	2,75	2,252	2,78	13
21	0	1	0,7	0,86	91

Çizelge 4.9. (Devam) Önlemlerin ortalama özgül ısı, elektrik tasarrufu, ortalama özgül yatırım değerleri ve uygulama oranları

Önlem Kodu	Kullanılan Özgül Isı Tasarrufu (GJ/T)	Kullanılan Öz. El. Tasarrufu (kWh/T)	Ortalama Özgül Yatırım (\$/T)	Uygulama Oranları (%)	Önlem Kodu
22	0,025	1,5	0,1	0,12	100
23	0,1	2	1,5	1,85	17
24	0	3	0,2	0,25	100
25	0	6,5	0,097	0,12	46



Şekil 4.8. Çimento sektöründe enerji tasarruf önlemlerinin uygulanabilme oranları

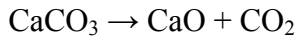
Her bir önlem için;

Kullanılan Özgül Isı Tasarrufu [GJ/T-klinker, GJ/T-çimento] Sanayi ve literatürden alınan özgül ısı tasarrufu aralığından [GJ/T-klinker, GJ/T-çimento, GJ/t-farin]

$$\text{Özgül ısı tasarrufu} = \frac{\text{sanayi}[GJ/T - kli] + \text{literatür}[GJ/T - kli]}{2} \quad (4.1)$$

Farin hazırlama ile ilgili ilk 5 önlemin özgül ısı tasarrufu hesabı için, literatürde birim [t-farin] olarak verildiğinden aşağıdaki denklemden ve Eş. 4.1'den faydalanarak Eş. 4.2 elde edilir.

100 Birim farin başına 56 Birim klinker üretilmektedir.



100kg 56kg

$$\text{Özgül ısı tasarrufu} = \frac{\text{sanayi}[GJ/T - \text{kli}] + \left[\text{literatür}[GJ/T - \text{farin}] \times \frac{100}{56} \right]}{2} \quad (4.2)$$

Türkiye çimento sektöründe henüz atık yakıt kullanımı uygulanılmaya başlanmadığı için, atıklardan sağlanan yakıt kullanımının (2010- 2015- 2020 yılları için, Önlem 8a, 8b, 8c) özgül yakıt tasarrufu hesabında, tahmini atık oranı (%1,5, %3, %6) aşağıdaki Eş. 4.3'den hesaplanır.

$$\text{Öz. yakıt tas. [GJ/T-kli]} = \text{Toplam kalori sarfıyatı [GJ/T-kli]} \times \text{atık oranı (\%)} \quad (4.3)$$

Kullanılan Özgül Elektrik Tasarrufu [kWh/T-klinker, kWh/T-çimento] Sanayi ve literatürden alınan özgül elektrik tasarrufu aralığından [kWh/T-klinker, kWh/T-çimento, kWh/T-farin] yukarıdaki Eş. 4.1 ve Eş. 4.2'deki gibi hesaplanmasıyla bulunur.

Kullanılan Özgül Yatırım[\$/T-klinker, \$/T-çimento] Literatürde özgül yatırım değerleri 1994 yılı için geçerli olup, bu değerleri 2004 yılına uyarlamak için, 0,81 \$ (1994) = 1 \$ (2004) dönüşümü kullanılmıştır. Yani 1994 yılında 1 dolar 100 birim değerindeyken 2004 yılında enflasyon nedeniyle 1 dolar 81 birim değerine düşmüştür, paranın değeri azalmış, yapılacak yatırımların mali değerleri

yükselmiştir. Bu nedenle 2004 yılı için literatürdeki özgül yatırım değerleri Eş. 4.4'teki gibi hesaplanır.

$$\text{2004 yılı özgül yatırım aralığı (literatür)} = \text{lit. öz. yat.} \times \frac{100}{81} \quad (4.4)$$

Kullanılan özgül yatırım hesabında, sanayi ve dön özgül yatırım aralığından [\$/T-klinker, \$/T-çimento, \$/T-farin], yukarıdaki Eş. 4.1 ve Eş. 4.2'deki gibi hesaplanmasıyla bulunur.

Uygulama potansiyel oranları ve dönüşüm oranları, sanayide yapılan anket (EK-1) çalışmalarında üretim bazında (ton olarak) alınan değerlerdir (%). Potansiyel dönüşüm oranları [%], sanayide her bir önlemin uygulanma oranı; dönüşüm oranı ise her fabrikaya uygulanabilirliğidir. Dönüşüm faktörü [%] 100 kabul edilir. Elimizdeki potansiyelin % 100 oranında uygulayabiliriz; ama herhangi bir fabrikada maliyet gibi sebeplerden dönüşüm olamıyorsa bu oran %100 alınmaz. Uygulama oranı (Çizelge 4.9 ve Şekil 4.9) Eş. 4.5'teki gibi hesaplanır.

$$\text{Uygulama oranı [\%]} = \text{pot. dön. or.} \times \text{dön. fak} / 100 \quad (4.5)$$

4.7. Enerji Tasarrufu Sağlama Eğrisi ve Bulunması

Yapılacak hesaplamalarda, yıllık faiz (F) %12, karşılaştırmalar içinse faiz %12 ve %30 olarak alınmıştır. Faiz oranı düştükçe ilk yıllarda yapılan önlemler artar, gelecek yıllarda yapılacak önlemler azalır.

Çizelge 4.10. Enerji tasarruf önlemlerinin tasarruf edilen birim enerji maliyetine (TEM) göre sıralaması

Önlemin Uygulama Önceliği	Önlemin Kodu	TEM (\$/GJ) (%12 faiz)	TEM (\$/GJ) (%30 faiz)
1	25	0,13	0,30
2	14	0,17	0,40
3	22	0,2	0,48
4	7	0,26	0,62
5	9	0,34	0,82
6	6	0,93	2,25
7	23	0,97	2,35
8	8c	1,01	2,45
9	24	1,02	2,46
10	8b	2,025	4,9
11	19	2,49	6,03
12	10	2,74	6,6
13	15	3,30	7,98
14	12	3,41	8,2
15	16	3,67	8,88
16	8a	4,05	9,79
17	11	4,24	10,26
18	18	5,26	12,72
19	21	5,9	14,24
20	5	10,33	24,98
21	4	12,33	29,80
22	20	13,01	31,46

Çizelge 4.10.(Devam) Enerji tasarruf önlemlerinin tasarruf edilen birim enerji maliyetine (TEM) göre sıralaması

Önlemin Uygulama Önceliği	Önlemin Kodu	TEM (\$/GJ) (%12 faiz)	TEM (\$/GJ) (%30 faiz)
23	17	14,12	34,13
24	1	19,4	46,86
25	13	23,9	57,7
26	2	62,3	150,59
27	3	81,82	197,80

Çizelge 4.10’da görüldüğü gibi 25 kod no.lu enerji tasarruf önlemi en avantajlı ve ilk öncelikle uygulanması gereken önlemdir. 3 kod no.lu enerji tasarruf önlemi ise TEM değeri en büyük ve son uygulanması gereken önlemdir.

Enerji tasarrufu sağlama eğrisinin dikey eksen; enerji tasarruf önlemlerinin alınması sonucunda tasarruf edilen birim birincil enerjinin maliyetinin (\$/GJ_{TEM}), yatay eksen ise tasarruf edilen enerjinin maliyetine göre sıralanmış enerji tasarruf önlemlerini göstermektedir. Böyle bir eğrinin oluşturulabilmesi için, her önlemle tasarruf edilen enerjinin birim maliyetinin hesaplanması gerekmektedir [53-55]. Bu amaçla yapılan ekonomik analizde, her bir önlem ile tasarruf edilen birincil enerjinin birim maliyeti TEM (EK-2) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$TEM = [(YA+YBO)/YET] \quad (4.6)$$

TEM : Tasarruf edilen birincil enerjinin birim maliyeti, (\$/GJ_{TEM}),

YA : Yıllık amortisman gideri, (\$/yıl),

YBO : Yıllık bakım onarım maliyetindeki değişme, (\$/yıl),

YET : Yıllık birincil enerji tasarrufu, (GJ/yıl)

Yapılan ekonomik analizlerde, doğrusal amortisman yöntemi uygulanmıştır. Her bir enerji tasarrufu önlemi için yıllık amortisman YA aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$YA = TY \times YAO \quad (4.7)$$

Burada; TY, incelenen enerji tasarruf önlemi için yapılan toplam yatırım maliyeti (\$); YAO ise yıllık amortisman oranı (1/yıl) (Bölüm 2.2.2 Eş. 2.4'te açıklanmıştır). Sektörel bazda her bir enerji tasarruf önlemi ile ilgili toplam yatırım maliyeti TY aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$TY = \ddot{O}Y \times TTK \times UO \quad (4.8)$$

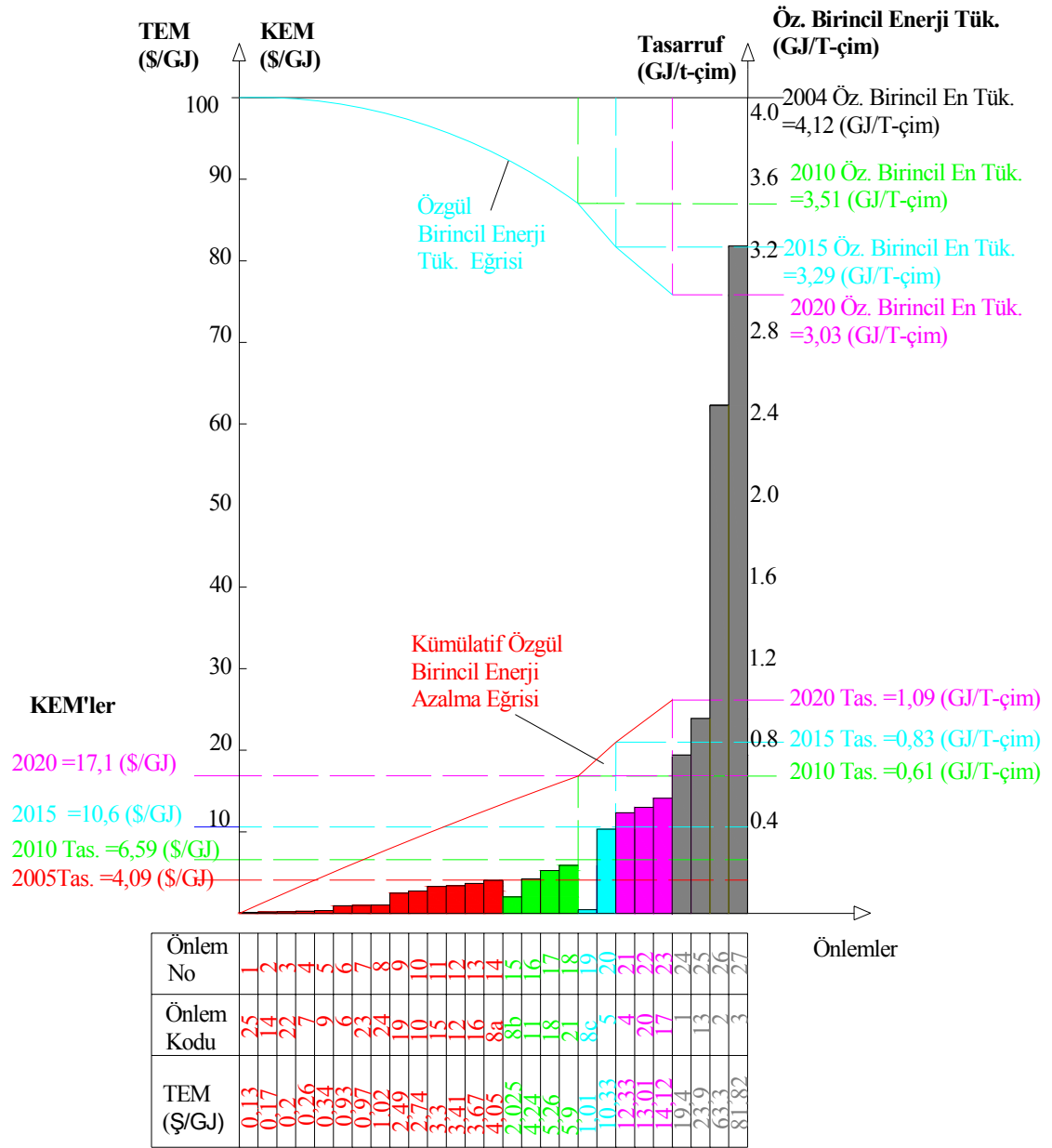
Burada; $\ddot{O}Y$, özgül yatırım maliyeti (\$/ton); TTK, sektörel toplam kurulu kapasiteyi (ton/yıl); UO ise ilgili enerji tasarruf önleminin toplam kurulu kapasite içindeki uygulanabilirlik oranını tanımlar (Çizelge 4.9, Şekil 4.9). Her bir enerji tasarrufu önlemi ile ilgili ortalama özgül yatırım maliyetleri ($\ddot{O}Y$), ortalama özgül ısı tasarrufu ($\ddot{O}IT$) ve özgül elektrik tasarrufu ($\ddot{O}ET$) ilgili önlem kod numaralarıyla beraber daha önce Çizelge 4.9'da verilmiştir.

$$YET = \ddot{O}ET \times TTK \times UO \quad (4.9)$$

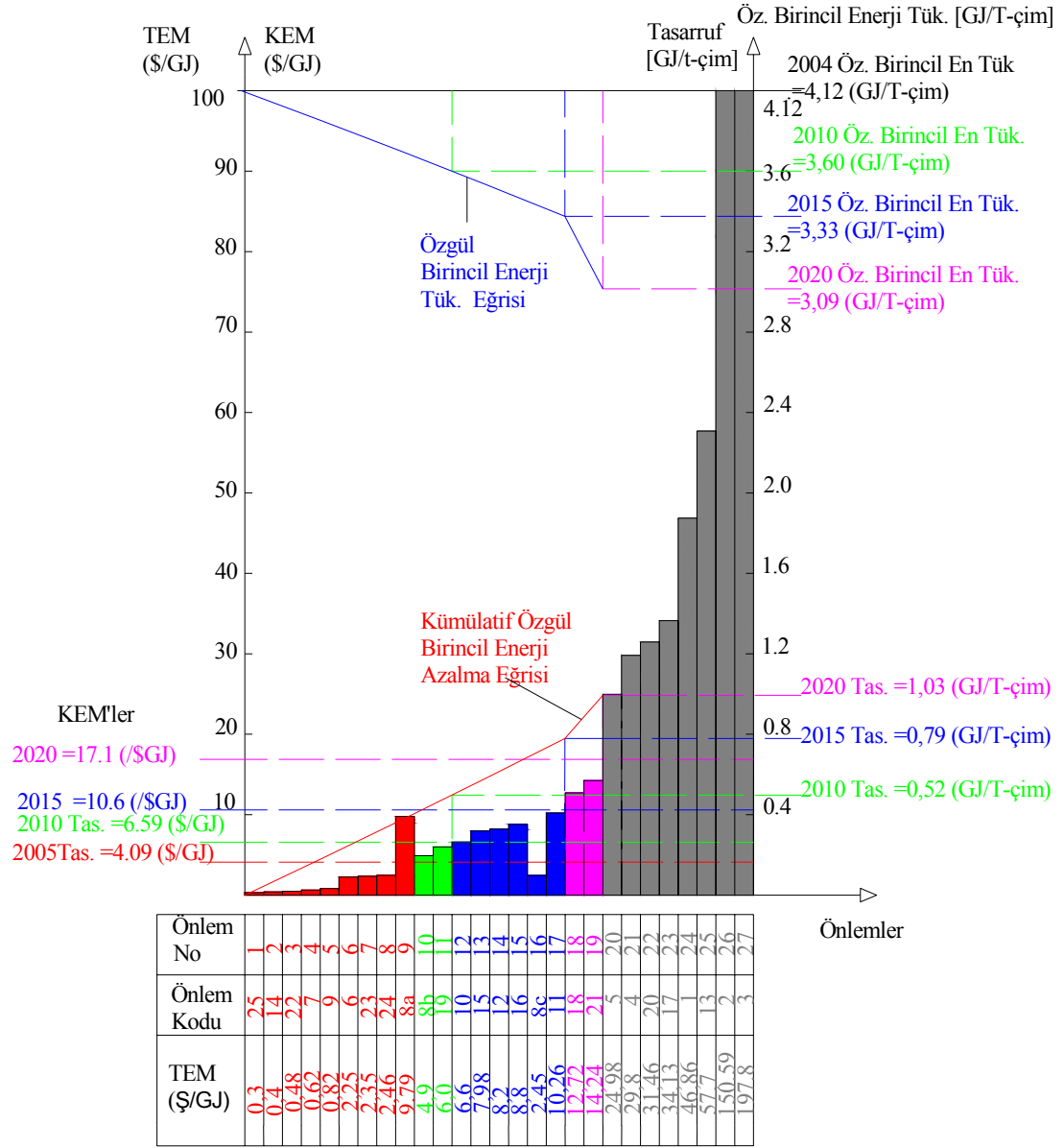
Burada; $\ddot{O}ET$, özgül birincil enerji (ısı ve elektrik kaynaklı, GJ/ton) tasarrufunu; TTK, toplam kurulu kapasiteyi (ton/yıl); UO, ilgili tasarruf önleminin sektörel bazda uygulanabilirlik oranını tanımlar. Eş. 4.8 ve Eş. 2.4 'ün sonuçları Eş. 4.7'ye, Eş.4.7 ve Eş. 4.9'da Eş. 4.6'a yerleştirilirse, Eş. 4.6 yardımıyla her bir enerji tasarruf önlemi için tasarruf edilen birincil enerjinin birim maliyeti TEM bulunur (Çizelge 4.10) ve "Enerji Tasarrufu Sağlama Eğrisi"nde minimumdan maksimuma doğru olacak şekilde yatay eksene yerleştirilir. Eğrinin dikey ekseni ise söz konusu önlemlerin özgül önlemlerin özgül maliyetlerini gösterir. Herhangi bir referans referans yılında girdisel toplam özgül maliyeti (\$/GJ) hesaplanır ve enerji tasarrufu sağlama eğrisinde yatay bir doğru olarak gösterilir. Bu doğrunun altında kalan önlemlerde, özgül yakıt

ve elektrik yoluyla tasarruf edilen enerjinin maliyeti ($\$/GJ_T$), piyasadan satın alınan enerjinin özgül maliyetinin ($\$/GJ_Y$) altında olacağından, bu önlemlerin hemen uygulamaya koyulması, ekonomik yönden uygun olacaktır.

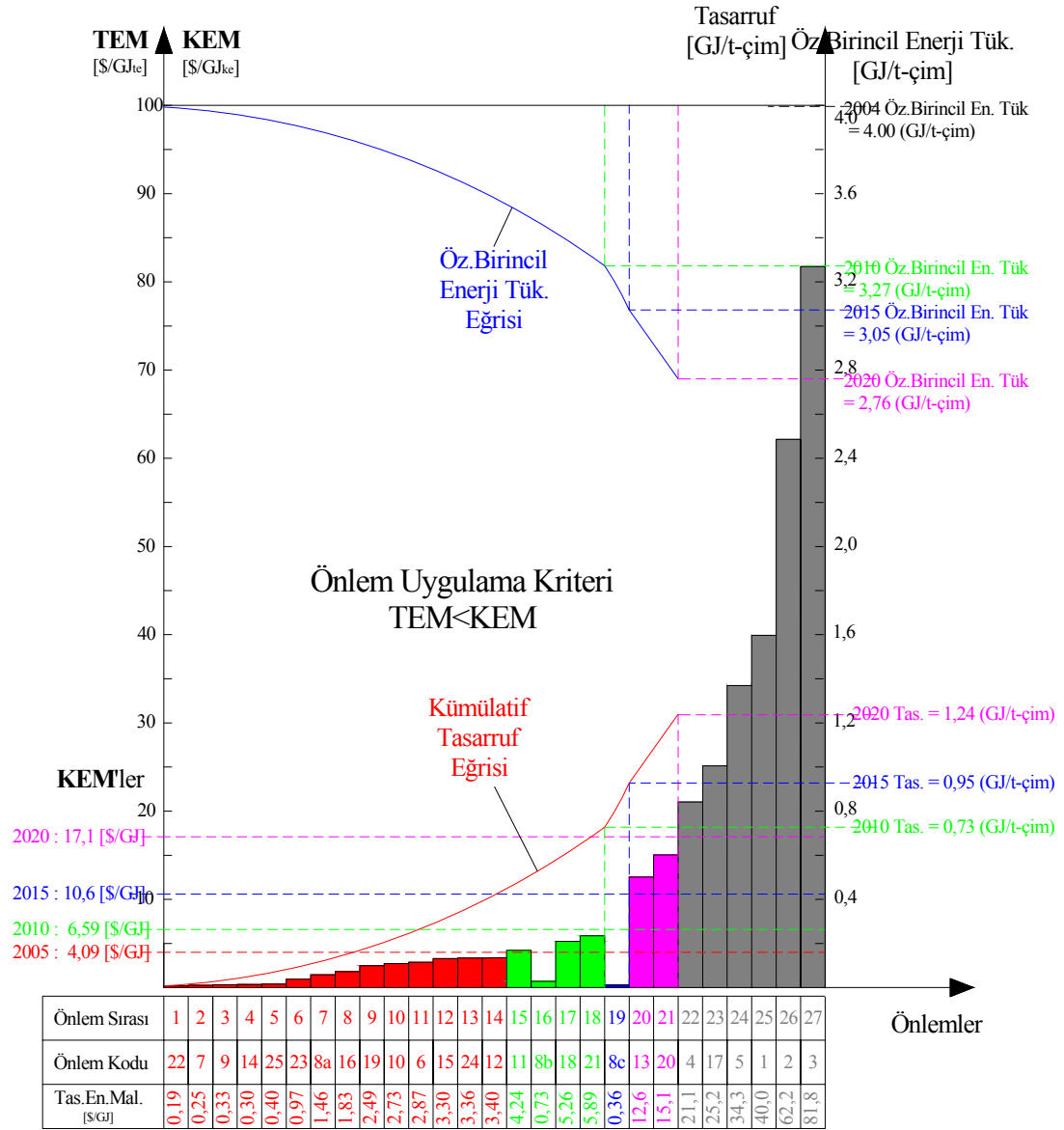
Bölüm 4.5.1’de incelenen enerji tasarrufu önlemlerinin Türkiye Çimento Sektörü şartlarında uygulanması sonucu elde edilen, tasarruf edilen birincil enerji birim maliyetleri (TEM) (Çizelge 4.10); Bölüm 4.3’deki enerji modeli ve yukarıda yapılan ekonomik analiz yöntemleri kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde önlemlerle ilgili yatırımların ömrü 30 yıl, faiz oranları ise iki seçenek olarak %12 ve %30 alınmıştır. Hesaplamalar sonucunda belirlenen TEM’lerin yıllara göre artan değerlerde sıralanmasıyla elde edilen “Türkiye Çimento Sektörü Enerji Tasarrufu Sağlama Eğrisi” %12 ve %30 faiz oranları için Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmektedir. Bu şekillerde TEM sırasını bozan önlemlerden 8b ve 8c sırasıyla %3 ve %6 oranında atık yakılması ile ilgilidir. Düşük faiz oranlarında önlemlerin uygulamaya konulması daha yakın zamanda olmasına karşılık, yüksek faiz oranlarında önlemlerin uygulamaya geçirilmesi daha ileriki yıllara kaymaktadır. TEM artış hızlarının, KEM artış hızlarına kıyasla 3-5 kat daha az olması (Böl.4.7, Böl.4.5), KEM>TEM kriteri uyarınca uygulama olanağı doğan enerji verimliliği önlemlerinin uygulanabilirliğini ve önemini ilerleyen yıllarda daha da artırmaktadır. Biz burada her önlemin hem elektrik, hem ısı hem de parasal olarak ortalama değerini aldık (Şekil 4.10-4.11). Eğer yatırım değerini büyük, ısı ve elektrik tasarrufu değerlerini küçük alsaydık bu kötü bir duruma göre yapılan hesap olup önlem sıraları, uygulama zamanları değişecektir (Şekil 4.12 ve Şekil 4.13). Burada ortalama yapılan hesaba göre uygulanacak ilk önlem 25 kodlu önlem olup, kötümser senaryoda ilk uygulanacak önlem 22 kodlu önlemdir.



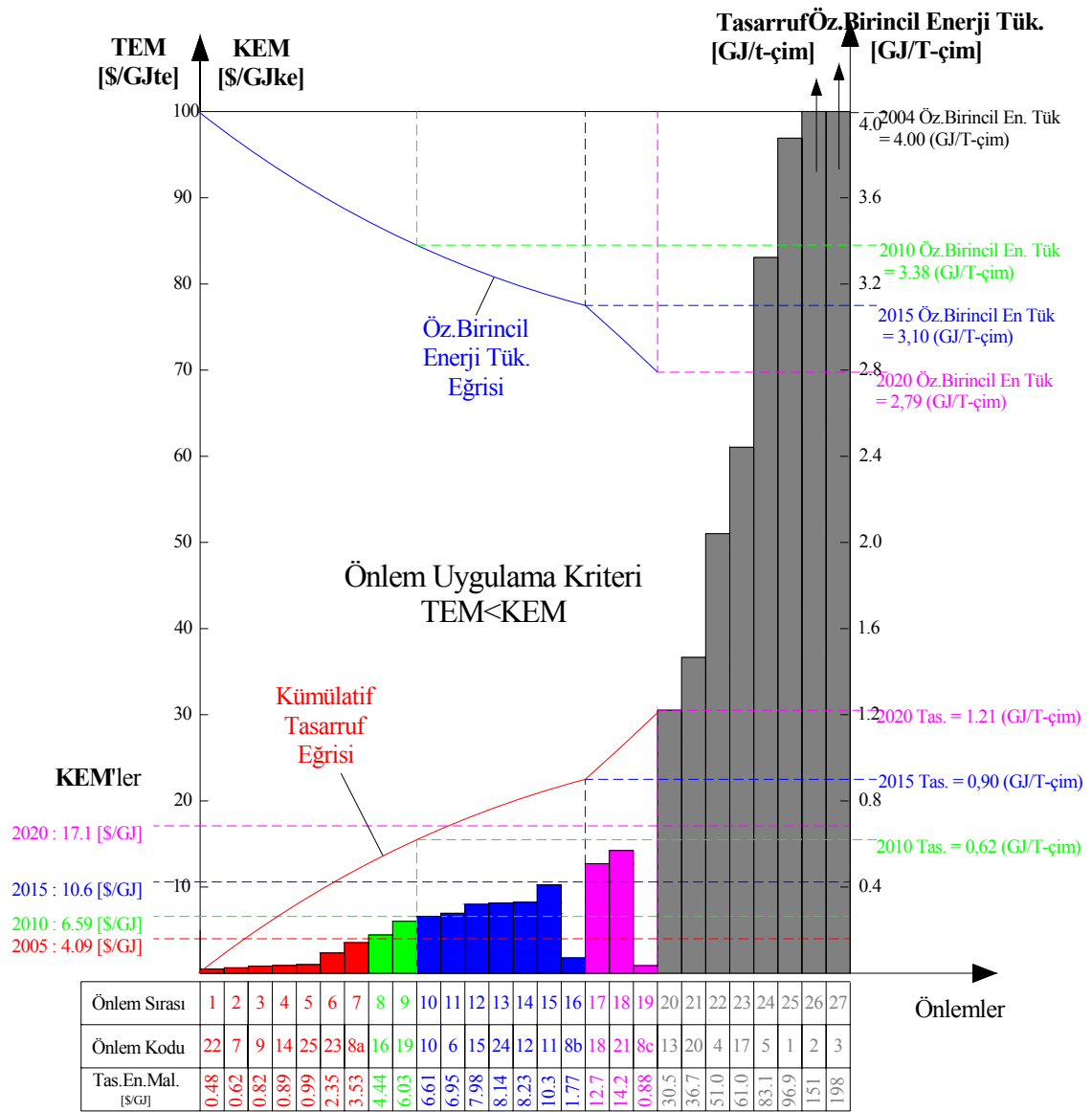
Şekil 4.9. Çimento sektörü enerji tasarrufu sağlama eğrisi (%12 faiz)



Şekil 4.10. Çimento sektörü enerji tasarrufu sağlama eğrisi (%30 faiz)



Şekil 4.11 Kötümser senaryo için enerji tasarrufu sağlama eğrisi (%12 faiz)



Şekil 4.12 Kötümser senaryo için enerji tasarrufu sağlama eğrisi (%30 faiz)

4.8. Enerji Hesapları

4.8.1. Fiili üretim ve katkı oranları

1990-2004 yılları için Türkiye'deki fiili klinker üretimi [T/yıl] ve fiili çimento üretimi [T/yıl] verilmiştir. 2010–2015 ve 2020 yılları için Türkiye'deki fiili çimento üretim tahmini değeri verilmiştir [T/yıl]. 2010-2015 ve 2020 yılları için katkı oranı tahmini değerleri %20, %25 ve %30 olarak kabul edilmiştir [%]. 1990 ve 2004 yılı için Türkiye'deki klinker üretim Kapasitesi, çimento öğütme kapasitesi, hammadde kapasitesi bilinmektedir. Buradan da katkı oranı aşağıdaki formülle bulunur.

Çizelge 4.11. Yıllara göre klinker üretim kapasitesi, çimento öğütme kapasitesi, hammadde kapasitesi ve katkı oranı değerleri

Yıllar	1990	2004	2010	2015	2020
Kli. Fiili Ür. [Bin T-kli/yıl]	20252	32779	42400	46612	53211
Çim. Fiili Ür. [Bin T-çim/yıl]	24416	38796	53000	62150	76015
Fiili Ham. Ür. [Bin T-farin/yıl]	36164	58533	75714	83236	95019
Katkı Or. [%]	17,05	15,51	20	25	30

klinker +katkı → çimento

$$1990 \text{ ve } 2004 \text{ yılı için katkı oranı} = \frac{\text{çimento} - \text{klin ker}}{\text{çimento}} \times 100 = \left(1 - \frac{\text{kli}}{\text{çim}}\right) \times 100 \quad (4.10)$$

Eş. 4.10'dan 1990 ve 2004 yılları için kullanılan katkı oranı değeri bulunur.

$$\text{Klinker Fiili Üretim miktarı (T-kli/yıl)} = \text{çimento fiili üretimi} \times \left(1 - \frac{K.O}{100}\right) \quad (4.11)$$

Eş. 4.11'den 2010–2015 ve 2020 yılları için klinker fiili üretim miktarı hesaplanır.

Çimento Fiili Üretim miktarı bu değerler verilmiştir.

$$\text{Fiili ham. üretim miktarı (T-farin/yıl)} = \frac{100}{56} \times \text{Kli. fiili ür. mik.} \quad (4.12)$$

Eş. 4.12'den 2010–2015 ve 2020 yılları için fiili hammadde üretim miktarı hesaplanır.

Çimento Üretim Hesapları

Çimento Öğütme Kapasitesi [T-çim/yıl]; Önlemlerin çimento öğütme kapasitesini artırmadığı varsayılmıştır. Bu yüzden 2004 yılını baz alarak sabit kabul ettik.

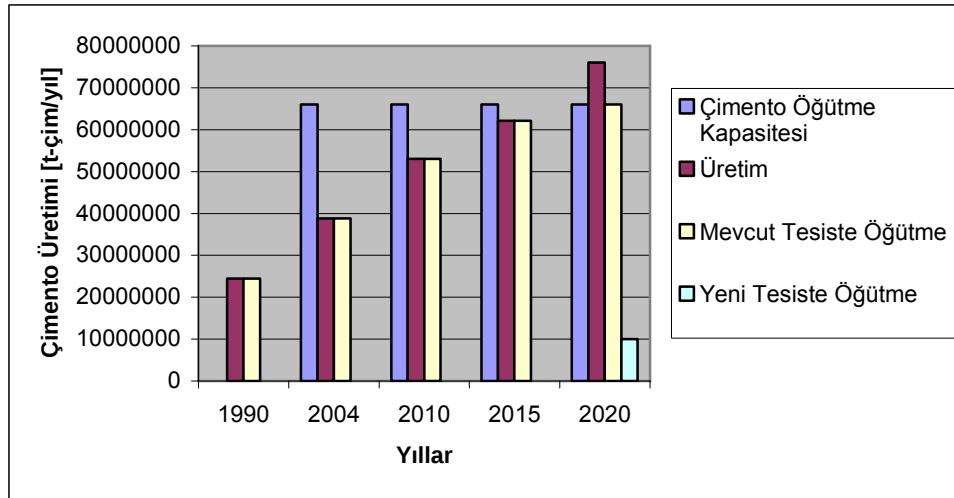
Üretim [T-çim/yıl]; 2010 için çimento üretim değeri DPT 9. kalkınma planından alınmıştır. 2015 ve 2020 yılları için çimento üretim değeri belirlenirken, 9. kalkınma planında ki 2007-2013 yılları için öngörülen artış hızının, 2013-2020 yılları arasında da devam ettiği öngörülmüştür.

Mevcut Tesiste Öğütme [T-çim/yıl]; Mevcut tesisler, en fazla kapasiteleri kadar üretim yapabilirler.

Yeni Tesiste Üretim [T-çim/yıl]; Üretim tahminlerinin mevcut kapasite değerini aşması durumunda, açıkta kalan üretim miktarı yeni tesislerin işletmeye girmesiyle karşılanacaktır. Aldığımız önlemler sonucunda 2020 yılı için çimento üretim miktarı, üretim kapasitesini aşmaktadır. Bu sebepten yeni tesisler kurmak gerektirir.

Çizelge 4.12. Yıllara göre çimento üretimi, kapasitesi ve tesis yeterliliği

Yıllar	1990	2004	2010	2015	2020
Çim. Öğütme Kapasitesi [Bin T-çim/yıl]		65983	65983	65983	65983
Üretim [Bin T-çim/yıl]	24416	38796	53000	62150	76015
Mevcut Tesiste Öğütme [Bin T-çim/yıl]	24416	38796	53000	62150	65983
Yeni Tesiste Öğütme [Bin T-çim/yıl]	0	0	0	0	10032



Şekil 4.13. Yıllara göre çimento üretimi, kapasitesi ve tesis yeterliliği

Klinker Üretim Hesapları

Mevcut Üretim Kapasitesi [T-kli/yıl]; Üretim kapasitesini artıran önkalsinatördür ki bu %100 artış sağlar. Türkiye'deki fabrikaların 3/4'ünde önkalsinatör uygulaması vardır. Geriye kalan fabrikaların bu önlemi 2010 yılında uyguladığını kabul edersek;

2010 yılı mevcut üretim kapasitesi [T-kli/yıl] = 2004 yılı ür. kap. $\times$ 1,25

(4.13)

hesaplanır. Önkalsinatör klinker kapasitesini tek artıran önlem olduğundan ve de 2010 yılında her fabrikada bu önlemin alındığını kabul edersek, 2010 yılı ve sonrası yıllar için üretim kapasitesini aynı kabul ederiz.

Üretim [T-kli/yıl]: 2010 ve sonrasındaki yıllar için klinker üretiminin hesaplanması [T-kli/yıl] için Çizelge 4.11'deki çimento fiili değeri ve katkı oranı değeri alınarak, Eş. 4.14'te kullanılır.

$$\text{Kli. Fiili üretimi} = \text{çim. fiili üretimi} \times \left(1 - \frac{\text{katkı oranı}}{100}\right)$$

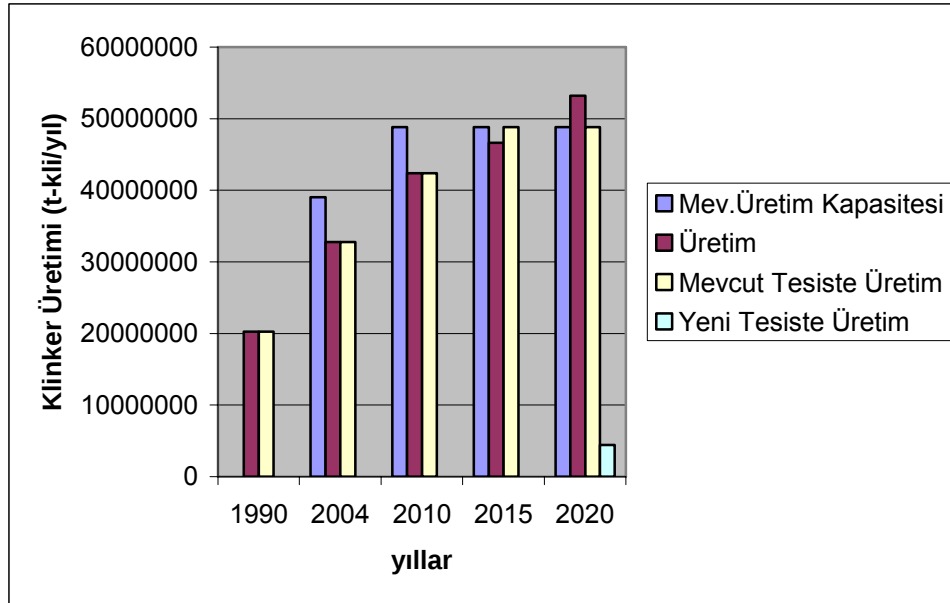
(4.14)

Mevcut Tesiste Üretim [T-kli/yıl]; Mevcut tesisler, en fazla kapasiteleri kadar üretim yapabilirler.

Yeni Tesiste Üretim [T-kli/yıl]; Üretim tahminlerinin mevcut kapasite değerini aşması durumunda, açıkta kalan üretim miktarı yeni tesislerin işletmeye girmesiyle karşılanacaktır. Aldığımız önlemler sonucunda 2015 yılı ve sonrasında klinker üretim miktarı, üretim kapasitesini aşmaktadır. Bu sebepten yeni tesisler kurmak gerektirir.

Çizelge 4.13. Yıllara göre klinker üretimi, kapasitesi ve tesis yeterliliği

Yıllar	1990	2004	2010	2015	2020
Mev.Üretim Kapasitesi [Bin T-çim/yıl]		39043	48804	48804	48804
Üretim [Bin T-çim/yıl]	20252	32779	42400	46612	53211
Mevcut Tesiste Üretim [Bin T-çim/yıl]	20252	32779	42400	46612	48804
Yeni Tesiste Üretim [Bin T-çim/yıl]	0	0	0	0	4407



Şekil 4.14. Yıllara göre klinker üretimi, kapasitesi ve tesis yeterliliği

4.8.2. Enerji Hesapları

Klinker Enerji Hesapları

1990 yılı için özgül ısı tüketimi [kcal/kg-kli], özgül elektrik tüketimi [kWh/T-kli] değeri Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinden alınmıştır.

2004 yılı için özgül ısı tüketimi [kcal/kg-kli], özgül elektrik tüketimi [kWh/T-kli] değeri Benchmarking'den alınmıştır. 2010 ve sonrası için önlemlerin uygulandığı düşünülerek, yeni özgül ısı tüketimleri, özgül elektrik tüketimleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

Özgül Isı Tüketimi [kcal/kg-kli, GJ/T-kli]; Özgül ısı tüketimi aynı zamanda özgül yakma enerjisine de eşittir.

TEM > KEM olduğunda önlemler hesaplamalara girmezler, TEM < KEM olduğunda önlemler hesaplamalara girmektedir.

$$\text{Özgöl ısı tasarrufu} = \text{ortalama öz. ısı tas. önlemleri} \times \text{uygulama oranı} / 100 \quad (4.15)$$

O yıldaki her bir önlem için yukarıdaki hesap yapıp, toplam özgöl ısı tasarrufu bulunmuş olur.

$$\text{ÖIT-2010} = (\text{ÖIT-2004}) - (\text{2010'da dahil alınan ısı tasarrufu önlemleri}) \quad (4.16)$$

$$\text{OIT} - 2010 = (\text{OIT} - 2004) - \sum_{i=1}^n \% \cdot \text{Tas}$$

Çizelge 4.14'ten 2004 yılı için özgöl ısı tüketimi değeri alınır.

$$\left[\frac{GJ}{T - kli} \right] = (\text{ÖIT} - 2010) \left[\frac{kcal}{kg - kli} \right] \times 4.18 \left[\frac{kJ}{kcal} \right] \times 1000 \left[\frac{kg - kli}{t - kli} \right] \times \frac{1}{10^6} \left[\frac{GJ}{kJ} \right] \quad (4.17)$$

Özgöl Elektrik Tüketimi [kWh/T-kli, GJy/T-kli, GJbe/T-kli]; TEM > KEM olduğunda önlemler hesaplamalara girmezler, TEM < KEM olduğunda önlemler hesaplamalara girmektedir.

$$\text{Özgöl el. tasarrufu} = \text{ortalama öz. El. tas. önlemleri} \times \text{uygulama oranı} / 100 \quad (4.18)$$

O yıldaki her bir önlem için yukarıdaki hesap yapıp, toplam özgöl ısı tasarrufu bulunmuş olur.

$$= \text{önceki yıl öz.el.tük.kli.} - [\text{o yılki öz.el.tas.} [\text{GJ}_e/\text{T-kli}] / 0,0036 [\text{GJ}_e/\text{kWh}_e]] \quad (4.19)$$

Yıllar için Öz. El. Tük. Kli. [kWh/T-kli] =

0,0036 değeri Eş. 4.20'deki gibi bulunur.

$$\left[\frac{GJe}{T - kli} \right] = \text{öz.el.tük.kli} \left[\frac{kWhe}{T - kli} \right] \times 4.18 \left[\frac{kJ}{kcal} \right] \times \frac{1}{10^6} \left[\frac{GJe}{kJ} \right] \times 861 \left[\frac{kcal}{kWhe} \right] \quad (4.20)$$

Önlem 9 (Modern Izgaralı klinker soğutucuya dönüşüm) ve Önlem 11 (yaş prosesten çoklu kademeli önkalsinasyonlu kuru sisteme dönüşüm) ‘in değerleri “–“ olmuştur, çünkü yaptığımız tasarruftan çok daha fazla enerji harcanmaktadır.

- 1- Termik santral oranı (TS ora.) [%]: 0.7
- 2- Hidrolik santral oranı (HS ora.) [%]: 0.3
- 3- Termik santral verimi (TS ver., ort.): 0.36
- 4- Hidrolik santral verimi (TS ver., ort.): 0.85
- 5- Şebeke verimi: 0.78

Özgül Birincil enerji termik santral yakıt değeri [GJbe-ts/T-kli]

$$\left[\frac{GJbe - hs}{T - kli} \right] = \frac{\text{öz.el.tük.kli}}{\text{şebeke ver.}} \left[\frac{GJe}{T - kli} \right] \times \frac{TS. oranı}{TS ver.} \quad (4.21)$$

Özgül Birincil enerji hidrolik santral yakıt değeri [GJbe-hs/T-kli]

$$\left[\frac{GJbe - hs}{T - kli} \right] = \frac{\text{öz.el.tük.kli}}{\text{şebeke ver.}} \left[\frac{GJe}{T - kli} \right] \times \frac{HS. oranı}{HS ver.} \quad (4.22)$$

Özgül BE Santral Girişi [GJbe/T-kli]: Eşitlik 4.21 ve Eş.4.22’den faydalanarak Eş. 4.23 bulunur.

$$\text{Öz. BE sant. Gir. (GJbe/T-kli)} = \text{öz. BE termik sant.} + \text{öz. BE hidrolik sant.} \quad (4.23)$$

$$\left[\frac{GJbe}{T - kli} \right] = \left[\frac{GJbe - y}{T - kli} \right] + \left[\frac{GJbe - hs}{T - kli} \right]$$

Özgül Toplam Klinker BE. [GJbe/T-kli]: Eşitlik 4.17 ve 4.23'den faydalanarak Eş. 4.24 bulunur. Özgül birincil enerji santral girişi 1990 yılı ve sonrası için Eş.4.24 kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır (Bkz. Çizelge 4.14).

$$\text{Özgül Toplam Klinker BE. [GJbe/T-kli]} = \text{öz. Yakma en.} + \text{öz. BE sant. Gir} \quad (4.24)$$

Çimento Enerji Hesapları

Özgül Elektrik Tüketimi [kWh/T-çim, GJy/T-çim, GJbe/T-çim]; 1990 yılı için çimento öğütme ile ilgili elektrik tüketim değeri bilinmemektedir. Bunu bulabilmek için, klinker elektrik tüketimindeki değişim oranından faydalanarak, 2004 yılı için verilmiş olan özgül elektrik tüketimi değeri ile çarparak 1990 yılı için özgül elektrik tüketim değerini elde ederiz (Çizelge 4.14). Yukarıda klinker için kullanılan Eşitlik 4.18-4.20 bu bölümde de kullanılır.

Özgül Toplam Çimento BE. [GJbe/T-çim]: Yukarıda klinker için kullanılan Eşitlik 4.21–4.24'teki değerler bu bölümde de kullanılır.

Çimento işleminde, klinker de olduğu gibi yanma işlemi olmadığından; Eş. 4.17'deki Öz. Yak. En.=0'dır ve Eş. 4.24 aşağıdaki gibi olur.

$$\text{Özgül Toplam Çimento BE [GJbe/T-kli]} = \text{öz. BE sant. Gir.}$$

Çizelge 4.14. Klinker ve çimento enerji hesapları

ENERJİ HESAPLARI		Yıllar	1990	2004	2010	2015	2020
Klinker Enerji Hesapları	Özgül Isı Tüketimi	kcal/kg-kli	935,90	836,60	760,4	757,30	751,02
		GJ/T-kli	3,91	3,50	3,2	3,17	3,14
	Öz.El.Tük	kWh/T-kli	82,60	75,06	67,44	66	60,7
		GJ/T-kli	0.3	0.27	0.24	0.24	0.22
	Öz. BE. T.S	GJy/T-kli	0,75	0,67	0,6	0,6	0,55
	Öz. BE. H.S	GJhs/T-kli	0.14	0.12	0.1	0.1	0.1
	Öz. BE Sant.Girişi	GJbe/T-kli	0,89	0,79	0,7	0,7	0,65
	Öz. Top. Kli. BE	GJbe/T-kli	4.8	4.29	3.9	3.87	3.7
Çim. Öğütme Enerji Hesapları	Öz.El.Tük	kWh/T-çim	51,23	46,58	37,3	37,3	35,8
		GJ/T-çim	0.18	0.17	0.13	0.13	0.129
	Öz. BE. T.S	GJy/-çim	0,460	0,42	0,33	0,33	0,32
	Öz. BE. H.S	GJhs/T-çim	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06
	Öz. Top. Çim. BE.	GJbe/T-çim	0,54	0,5	0,39	0,39	0,38

Katkılı Çimento Özgül Enerji Tüketimi

Katkı oranlarına göre çimentolarda isimler alırlar. Mesela, %5 katkı içeren çimentolarda “portland çimento” ismini alır. Çimentoda kullanılan katkı oranı arttıkça, klinker üretimi için gereken ısı enerjisi azalmakta, elektrik enerjisi de düşmektedir. Yapılan hesaplamalarda 2004 yılı baz alınmıştır. Eş 4.25. kullanılarak Çizelge 4.15 oluşturulmuştur.

$$\text{Öz.Top.BE Tük} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T-çim}} \right] = \frac{\text{kli.or.}}{100} \cdot \text{öz.top kli.BE} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T-kli}} \right] + \frac{\text{k.o.}}{100} \cdot \text{öz.top çim.BE} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T-çim}} \right] \quad (4.25)$$

$$\text{Özgöl BE Tük. Azalma}[\%] = \frac{(\text{öz.top.kli.BE} - \text{öz.top.BE.tük}) \left[\frac{GJ}{T - kli} \right]}{\text{öz.top.kli.BE} \left[\frac{GJ}{T - kli} \right]} \times 100 \quad (4.26)$$

Çizelge 4.15. Katkı ve klinker oranları, özgül toplam birincil enerji tüketimi ve tüketimdeki azalma yüzdesi

Çimento	Katkı Oranları [%]	Klinker Oranı [%]	Öz.Top.BE Tük. [GJ/T-çim]	Öz. BE Tük. Azalma [%]
Öğ. Klinker	0	100	4,29	0
PÇ	5	95	4,1	4,4
KÇ10	10	90	3,9	9
KÇ16	16	84	3,7	13,98
KÇ20	20	80	3,5	17,5
KÇ30	30	70	3,2	26,2
KÇ40	40	60	2,8	34,9
KÇ50	50	50	2,4	43,7

4.8.3. Enerji Tasarrufu İle İlgili Senaryolar

Toplam Özgöl Elektrik Tüketimi

Bu bölümde hesaplamalar aşağıdaki gibi tanımlanan üç senaryoya göre %12 faiz oranına göre yapılmıştır.

Senaryo 1: Üretimin 1990 yılı teknolojisiyle gerçekleştirilmesi,

Senaryo 2: Üretimin 2004 yılı teknolojisiyle gerçekleştirilmesi,

Senaryo3: Üretiminin 2004 yılı itibariyle tasarruf önlemleri alınarak gerçekleştirilmesi.

Senaryo 1: 1990 Yılı İçin Önlemsiz Toplam Özgül Elektrik Tüketimi

1990 yılından itibaren önlem almadan toplam özgül elektrik tüketimini [kWh/T-çim] hesapladığımızı düşünürsek, yaptığımız işlemde “1990 yılı öz. el.tük. kli ve 1990 yılı öz. el.tük. çim.” değeri hep aynı kalacaktır (Çizelge 4.14). Katkı oranı yıllara göre değiştiği için sonuçlar değişecektir (Çizelge 4.11). Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.14’teki değerler kullanılarak Eş. 4.27’de yerine konur (Bkz. Şekil 4.16 ve Çizelge 4.16).

$$= \text{öz. el.tük.kli.} \left[\frac{kWh}{T-kli} \right] \times \left(1 - \left(\frac{\text{katkı Oranı}}{100} \right) \right) \left[\frac{kli}{\text{çim}} \right] + \text{öz. El.tük. çim} \left[\frac{kWh}{T - \text{çim}} \right] \quad (4.27)$$

Senaryo 2: 2004 Yılı İçin Önlemsiz Toplam Özgül Elektrik Tüketimi

Senaryo 2’de 1990 yılı toplam özgül elektrik tüketimi [kWh/t-çim] değeri Senaryo 1’deki 1990 yılı değeriyle aynıdır. 2004 yılından itibaren önlem alınmadığını düşünürsek, yapacağımız hesaplamalarda 2004 ve sonraki yıllar için “2004 yılı öz. El.tük. kli ve 2004 yılı öz. el.tük. çim.” değeri kullanılacaktır. Katkı oranı yıllara göre değiştiği için sonuçlar değişecektir. (Çizelge 4.11).). Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.14’teki değerler kullanılarak Eş. 4.28’de yerine konur (Bkz. Şekil 4.16 ve Çizelge 4.16).

$$= \text{öz. el.tük. kli.} \left[\frac{kWh}{T-kli} \right] \times \left(1 - \left(\frac{\text{katkı Oranı}}{100} \right) \right) \left[\frac{kli}{\text{çim}} \right] + \text{öz. el.tük. çim} \left[\frac{kWh}{T - \text{çim}} \right] \quad (4.28)$$

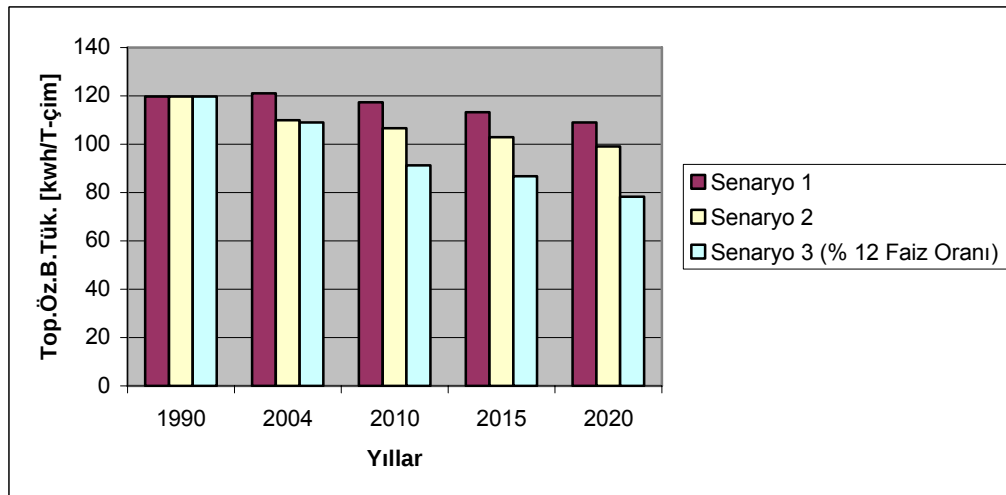
Senaryo3: Üretiminin 2004 Yılı İtibariyle Tasarruf Önlemleri Alınarak Gerçekleştirilmesi

Klinker ve çimentonun toplam özgül elektrik tüketimini[kWh/t-çim] Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.14'den faydalanarak faiz oranı %12 ve %30 için Eş. 4.24'teki gibi hesaplarız (Bkz. Şekil 4.14 ve Çizelge 4.16).

$$\left[\frac{KWh}{T - \text{çim}} \right] = \text{Kli. kayn. öz. el. tas.} \times \left(1 - \frac{k. or.}{100} \right) + \text{çim. kayn. öz. el. tas.} \quad (4.29)$$

Çizelge 4.16. Toplam özgül elektrik tüketimi [kWh/T-çim]

Yıllar	1990	2004	2010	2015	2020
Senaryo 1	119,75	121,0	117,3	113,18	109,054
Senaryo 2	119,75	109,99	106,6	102,87	99,117
Senaryo 3 (% 12 Faiz Oranı)	119,75	109,0	91,2	86,72	78,327
Senaryo 3 (% 30 Faiz Oranı)	119,75	110	93,8	90,4	84,5



Şekil 4.15. Toplam özgül elektrik tüketimi

Klinker Özgöl Toplam Birim Enerji Tüketimi

Senaryo1: 1990 yılı Önlemsiz Özgöl Toplam Birim Enerji Tüketimi-Klinker

1990 yılından itibaren önlem almadan klinker özgöl toplam birim enerji tüketimini [GJbe/T-kli] hesapladığımızı düşünürsek, 1990 yılı için bu değer Bölüm 4.8.1.3'teki öz. Top. Kli. BE 1990 yılı değeriyle aynıdır (Eş. 4.22, Çizelge 4.14). 2004 yılı için, 1990 yılının aynı değerini alırken önlem almadığı kabul edildiği için. 2010 yılı için ön kalsinatör olmayan fabrikalara da bu önlemin eklendiğini varsayılmıştır. 2010 yılındaki klinker özgöl toplam birim enerji tüketimi, Eş. 4.30'daki formül kullanılarak bulunur. 2010 yılındaki değer, 2015 ve 2020 yılı içinde aynıdır, çünkü klinker kapasitesi artırıcı başka önlem mevcut değildir.

$$\begin{aligned} \text{Öz. Top. BE. Tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - kli}} \right] &= (1990 \text{ yılı Öz. Isı Tük.kli} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - kli}} \right] - \text{ön kalsinatör} \\ \text{eklenmesi kullanılan öz.ısı tas.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - kli}} \right] \times (\text{uyg.Oranı}/100) &+ \text{öz.Kli.El.Tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - kli}} \right] \end{aligned} \quad (4.30)$$

Senaryo 2: 2004 yılı Önlemsiz Özgöl Toplam Birim Enerji Tüketimi-Klinker

2004 yılından itibaren önlem almadan klinker özgöl toplam birim enerji tüketimini [GJbe/T-kli] hesapladığımızı düşünürsek, 1990 ve 2004 yılı için bu değer Bölüm 4.7.1.3'teki öz. top. kli. BE 1990 ve 2004 yılı değeriyle aynıdır (Eş. 4.22, Çizelge 4.14). 2010 yılı için ön kalsinatör olmayan fabrikalara da bu önlemin eklendiğini varsayılmıştır. 2010 yılındaki klinker özgöl toplam birim enerji tüketimi, Eş. 4.31'deki formül kullanılarak bulunur. 2010 yılındaki değer, 2015 ve 2020 yılı içinde aynıdır, çünkü klinker kapasitesi artırıcı başka önlem mevcut değildir.

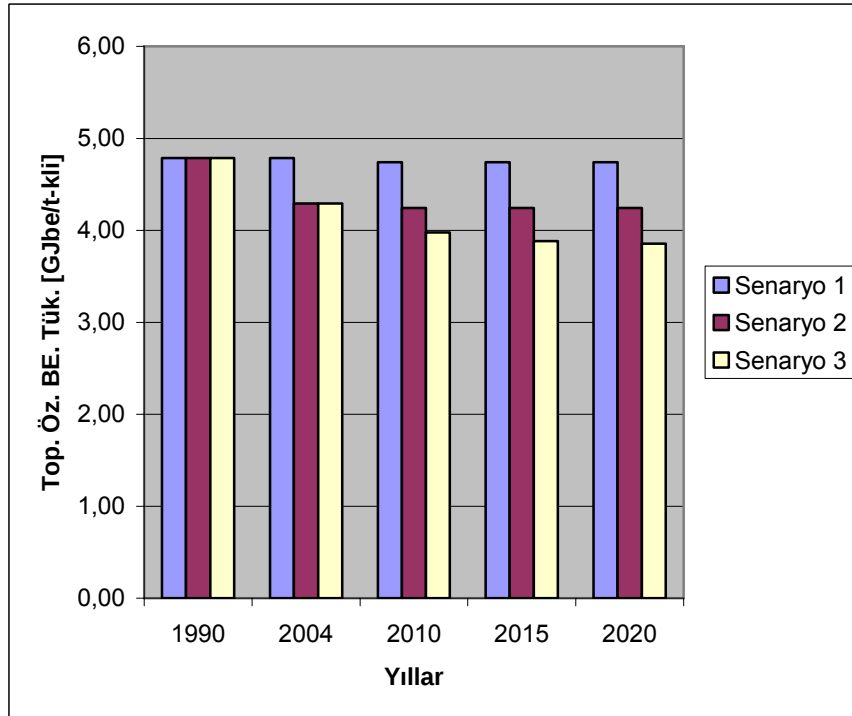
$$\begin{aligned} \text{Öz. Top. BE. Tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{t - kli}} \right] &= (2004 \text{ yılı Öz. Isı Tük.kli} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{t - kli}} \right] - \text{ön kalsinatör eklenmesi} \\ &\text{kullanılan öz. Isı tas.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{t - kli}} \right] \times (\text{uyg. Oranı}/100) + \text{öz. Kli. El. Tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{t - kli}} \right] \end{aligned} \quad (4.31)$$

Senaryo 3: Önlemlili Özgöl Toplam Birim Enerji Tüketimi-Klinker

Çizelge 4.14 ve Eş. 4.22'den faydalanarak Bölüm 4.8.1.3'te incelenmiştir.

Çizelge 4.17 Klinker özgöl toplam birim enerji tüketimi senaryoları [GJbe/T-kli]

Yıllar	1990	2004	2010	2015	2020
Senaryo 1	4,79	4,79	4,74	4,74	4,74
Senaryo 2	4,79	4,29	4,24	4,24	4,24
Senaryo 3 (% 12 Faiz Oranı)	4,79	4,29	3,89	3,86	3,78



Şekil 4.16. Klinker İçin Enerji Tüketimi

Çimento Özgöl Toplam Birim Enerji Tüketimi

Senaryo 1: 1990 yılından Önlensiz Özgöl Toplam Birim Enerji Tüketimi-Çimento

1990 yılı için değer, senaryo 3'teki 1990 yılına ait değerle aynıdır. 1990 yılındaki değer, 2004 yılında önlem almadığımızı kabul ettiğimiz için, 1990 yılındaki değerle aynıdır. 2010 ve sonrası yıllar için aşağıdaki formül kullanılır. Burada yalnız katkı oranı değişmektedir (Şekil 4.18ve Çizelge 4.18).

$$\begin{aligned} \text{Öz. Top. BE. Tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - çim}} \right] &= (\text{o yılki 1990 yılından itibaren önlensiz öz. top tük.} \\ \text{kli} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - kli}} \right] \times \left(1 - \left(\frac{\text{katkı oranı}}{100} \right) \right) &\left[\frac{\text{T - kli}}{\text{T - çim}} \right] + 1990 \text{ yılı öz.Çim.El.Tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - çim}} \right] \end{aligned} \quad (4.32)$$

Senaryo 2: 2004 yılı Önlensiz Özgöl Toplam Birim Enerji Tüketimi-Çimento

1990-2004 yılı için senaryo 3'teki o yıllara ait değerler kabul edilip, 2010 yılı sonrası yıllar aşağıdaki gibi hesaplanır (Şekil 4.16ve Çizelge 4.18).

$$\begin{aligned} \text{Öz. Top. BE. Tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - çim}} \right] &= (\text{o yılki 2004 yılından itibaren önlensiz öz. top. tük.} \\ \text{kli} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - kli}} \right] \times \left(1 - \left(\frac{\text{katkı oranı}}{100} \right) \right) &\left[\frac{\text{T - kli}}{\text{T - çim}} \right] + 2004 \text{ yılı öz.çim.el.tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - çim}} \right] \end{aligned} \quad (4.33)$$

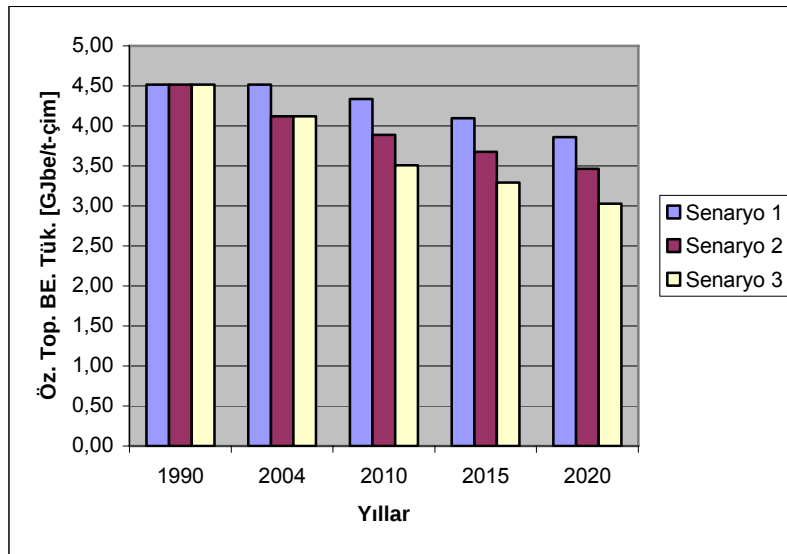
Senaryo 3: Önlemlili Özgöl Toplam Birim Enerji Tüketimi-Çimento

Çizelge 4.14 ve Eşitlik 4.23'ten faydalanarak Bölüm 4.7.1.4'te incelemiştik. Önlemlili çimento için özgöl toplam birim enerji tüketimi $[\text{GJbe}/\text{T-çim}]$ Eş.4.34'te hesaplanmış Şekil 4.16ve Çizelge 4.18'de gösterilmiştir. Her yıl için;

$$\text{Öz. top. BE. tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - çim}} \right] = \text{öz. top. BE. tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - kli}} \right] \times (1 - (\text{katkı oranı}/100)) + \text{öz. el. tük.} \left[\frac{\text{GJbe}}{\text{T - çim}} \right] \quad (4.34)$$

Çizelge 4.18 Çimento için toplam BE tüketimi [GJbe/T-çim]

Yıllar	1990	2004	2010	2015	2020
Senaryo 1	4,51	4,51	4,33	4,10	3,86
Senaryo 2	4,51	4,12	3,89	3,68	3,46
Senaryo 3 (% 12 Faiz Oranı)	4,51	4,12	3,51	3,29	3,03
Senaryo 3 (% 30 Faiz Oranı)	4,51	4,12	3,60	3,33	3,09



Şekil 4.17 Çimento için enerji tüketimi

Toplam Yıllık Enerji Tüketimi

Devamlı 2020 yılı için yeni tesis Öz. Top. BE. Tük. Alınır. Aslında bu teknoloji 1994 yılından beri var fakat yeni tesiste önlemlerin hepsini aldığımız zamanki değeri 2020

yılında kabul ederiz ve bu şekilde hesaplarız. Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'deki değerlerden faydalanarak Çizelge 4.19 oluşturulur. $PJ = 10^{15}$ J

$$\text{Top. Yıl. En. Tük. [PJ/a]} = (\text{Mevc. Tesis Ür.} \times \text{öz. top. BE. tük. Çim. [GJbe/T-çim]} + \text{yeni tesis ür.} \times \text{2020 yılı yeni tesis için öz. top. BE. tük. [GJbe/T-çim]}) / 10^6 \text{ [GJ/PJ]} \quad (4.35)$$

Çizelge 4.19. Toplam yıllık enerji tüketimi (%12 faiz için) [PJ/yıl]

Yıllar	1990	2004	2010	2015	2020
Senaryo 1	91,42	147,97	190,73	218,36	231,06
Senaryo 2	91,42	135,07	174,04	199,15	211,85
Senaryo 3 (% 12 Faiz Oranı)	91,42	135,07	148,82	160,73	161,11
Senaryo 3 (% 30Faiz Oranı)	91,42	135,07	152,71	162,64	164,58

4.8.4. Maliyet hesapları

Birincil Enerji Maliyeti

Toplam yakıt kalori sarfiyatı = 836,6 [Kcal/kg-kli] (Bkz. Çizelge 4.2)

$$\text{Toplam yakıt kalori sarfiyatı} = 3,5 \text{ [GJ/T-kli]} \quad (4.35)$$

Birim başına elektrik maliyeti = 8,03 [\$/kWhe]

Türkiye'de çimento sanayinde kullanılan yakıtlar, yakılan yakıtın toplam içindeki oranı (%), ısı değeri (Hu) [kcal/kg-yakıt], özgül yakıt maliyeti [\$/t-yakıt] Çizelge 4.20 verilmiştir (Bkz. Çizelge 4.2). Yaptığımız hesaplamalar da 2004 yılı referans alınmıştır ve Çizelge 4.20 oluşturulmuştur.

$$\text{Yakıt kalori sarf.} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T - kli}} \right] = \text{yakıt oranı}[\%]/100 \times \text{toplam kalori sarf.} \quad (4.36)$$

$$\text{Toplam Yakıtın } H_u [\text{kcal/kg-yakıt}] = \sum(\text{yakıt oranı} [\%] \times H_u [\text{kcal/kg-yakıt}]) \quad (4.37)$$

$$\text{Öz. Mal} \left[\frac{\$}{\text{T - kli}} \right] = \left(\frac{\text{kalorisarf} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T - kli}} \right]}{H_u \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg-y}} \right] \cdot 4.18 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} \right] \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{T}} \right] \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{kJ}} \right]} \right) \times \text{öz.yak.mal} \left[\frac{\$}{\text{T - y}} \right] \quad (4.38)$$

$$\text{Toplam içindeki yakıt oranı} [\%] = \frac{\text{kalori sarfı} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T - kli}} \right]}{\text{toplam kalori sarfı} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T - kli}} \right]} \times 100 \quad (4.39)$$

$$\text{Özgöl El.mal.} \left[\frac{\$}{\text{T - kli}} \right] = \frac{\text{öz.el.tük.kli} [\text{kWhe/T - kli}]}{100} \times \text{birim el. baş.mal.} \left[\frac{\$}{\text{kWhe}} \right] \quad (4.40)$$

Özgöl elektrik tüketimi klinker için [kWhe/T-kli] yukarıdaki Bölüm 4.8.1’de hesaplanmıştır (Çizelge 4.14).

$$\text{Kalori Sarfıyatı Topl.} [\text{GJ/T-kli}] = \text{yakıtın topl. kalori sarf.} + \text{el. yakıt sarf.} \quad (4.41)$$

Elektrik yakıt sarfıyatı da yukarıdaki Bölümde Öz. BE. santral girişi [GJ/T-kli] olarak Bölüm 4.8.1’de hesaplanmıştır.

$$\text{Toplam öz. maliyeti} [\$/\text{T-kli}] = \text{toplam yakıt öz. Mal.} + \text{toplam el. öz. mal.} \quad (4.42)$$

$$\text{Toplam içindeki el. oranı} [\%] = \frac{\text{el.kalori sarf.} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T - kli}} \right]}{\text{top. kalori sarf} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T - kli}} \right]} \quad (4.43)$$

Çizelge 4.20. Yakılan yakıtın yakıt oranı, kalori sarfıyatı, ısı değeri, özgül maliyeti, özgül yakıt maliyeti, toplam içindeki oranı

Yakıtlar	Yakıt Oranı (%)	Kalori Sarfı (GJ/T -kli)	Hu (kcal/kg-yakıt)	Özgül Yakıt Maliyet (\$/T-yakıt)	Özgül Maliyet (\$/T-kli)	Toplam içindeki oran (%)
Petrokok	39,72	1,39	7000	83,37	3,96	32,4
Steam Coal	8,44	0,3	6500	60	0,65	7
Linyit	23,09	0,81	4500	56,66	2,43	18,8
İthal Linyit	21,09	0,74	5500	75,86	2,43	17,2
Yerli Taşkömürü	1,81	0,063	7400	60	0,12	1,47
İthal Taşkömürü	1,58	0,055	7500	60	0,11	1,28
Fuel-Oil (Ağır)	0,69	0,02	10000	60	0,03	0,47
Fuel-Oil (Hafif)	2,95	0,1	10250	727,55	1,75	2,33
Doğalgaz	0,18	0,006	12000	60	0,007	0,14
Lpg	0,45	0,015	10000	140	0,053	0,35
Yakıt Toplam	100	3,5	6218,415		11,55	
Elektrik		0,79			6,03	18,5
Toplam		4,29			17,58	100

Kabuller;

- 1- 2005 yılı referans seçilir.
- 2- 2005 yılı enerji artış oranı 1 seçilir.
- 3- Yıllık enerji artış oranı 1.1 seçilir. Tahmini bir değerdir.
- 4- Yıllık enerji maliyet artışı %10 kabul edilir. Enerjinin dengeli arttığını düşünürüz.

Öz. En. Maliyetinin yıllara göre artış oranı;

$$\text{Yıllar için öz. En. Mal. Artış oranı } [\$/\text{GJ}] = \text{yıllık artış oranı}^{(\text{yıl} - 2005)} \quad (4.44)$$

$$2005 \text{ yılı öz. en.mal. } \left[\frac{\$}{\text{GJ}} \right] = \frac{\text{öz. mal. top.}}{\text{toplam kalori sarfıyatı}} \left[\frac{\$/t - kli}{\text{GJ}/t - kli} \right] \quad (4.45)$$

$$2010-15-20 \text{ yılı öz.en.mal} \left[\frac{\$}{\text{GJ}} \right] = 2005 \text{ yılı öz.en.mal.} \times \text{o yılki öz.en.mal.artış.oranı} \quad (4.46)$$

$$2005 \text{ yılı öz. ısı mal. } \left[\frac{\$}{\text{GJ}} \right] = \frac{\text{öz. yak. mal. top.}}{\text{toplam kalori sarfıyatı}} \left[\frac{\$/t - kli}{\text{GJ}/t - kli} \right] \quad (4.47)$$

$$2010-15-20 \text{ yılı öz.ısı mal. } [\$/\text{GJ}] = 2005 \text{ yılı öz.ısı mal.} \times \text{o yılki öz ısı mal. oranı} \quad (4.48)$$

$$2005 \text{ yılı birim ısı başına mal. } \left[\frac{\$}{\text{GJ}} \right] = \frac{\text{Birim el. baş mal. } [\$/\text{kWhe}]/100}{0.0036[\text{Gj}/\text{kWhe}]} \quad (4.49)$$

$$2010-15-20 \text{ yılı.birim ısı başına mal} \left[\frac{\$}{\text{GJ}} \right] = 2005 \text{ yılı öz.en.mal.} \times \text{o yılki öz.artış.oranı} \quad (4.50)$$

2005 yılı için Birim Elektrik başına Maliyeti $[\$/\text{kWh}] = 8.03$ alınır. Her fabrikada kullanılan değerdir.

$$2010-15-20 \text{ yılı öz.el.mal} \left[\frac{\$}{\text{kW}} \right] = 2005 \text{ yılı öz.el.mal.} \times \text{o yılki öz.en. artış.oranı} \quad (4.51)$$

Çizelge 4.21. Özgöl enerji maliyet değerleri

	Artış Oranı	Öz.En.Mal (\$/GJ)	Öz. Isı Mal (\$/GJ)	Öz. El. Mal (\$/GJ)	Öz. El. Mal (cent/kWh)
Öz. En. Mal. (2005)	1	4,09	3,3	22,3	8,03
Öz. En. Mal. (2010)	1,61	6,59	5,31	35,9	12,9
Öz. En. Mal. (2015)	2,59	10,6	8,55	57,8	20,8
Öz. En. Mal. (2020)	4,18	17,1	13,79	93,2	33,5

Yıllara Göre Yatırım Değerleri [\$]

Yıllara göre yatırım değeri; o yıl yapılmış olan toplam tasarrufların ekonomik değeridir.

Tasarruf Edilen Enerjilerin Birim Maliyetleri [\$/GJ]

İşletme ömrü değerleri [yıl]: n önlemi ilgilendiren aksam içindir.

Eş. 2.4'te amortisman oranı hesabı gösterilmektedir.

$$\text{Yıllık Amortisman} \left[\frac{\$}{\text{yıl}} \right] = \text{top. yat. } [\$] \times \text{amor. oranı} \left[\frac{1}{\text{yıl}} \right] \quad (4.52)$$

her yıl için,

$$\text{Tas. Ed. En. Birim Mal. } [$/GJ] = \text{Amortisman Değeri } [$/yıl] / \text{Tasarruf } [GJ/yıl] \quad (4.53)$$

Çizelge 4.18'deki değerler, Eş. 4.53'te yerine konarak tasarruf edilen enerji birim maliyeti değeri bulunur.

BE Eş Değer Enerji Maliyeti [\$/yıl]

Önlemler alınmış olarak hesaplanır. Çizelge 4.19'daki senaryo 3 (faiz %12) için ve Çizelge 4.21'deki özgül enerji maliyeti değerlerinden faydalanılarak hesaplanır.

$$\text{BE Eş De. En. Mal. [$/a]} = \text{Top. Yıl. En. Tük. [PJ/a]} \times \text{Öz. En. Mal. [$/GJ]} \times 10^6 \text{ [GJ/PJ]} \quad (4.54)$$

- *Amortisman olarak [\$/a]* o yıl için yapılan tasarrufların amortisman değerlerinin toplamını alırsınız.

- *Toplam [\$/a]* yukarıdaki iki hesabın toplamını alırsınız.

Çizelge 4.22 Yatırım değerleri

Yıllar		2004	2010	2015	2020
Yıllara Göre Yatırım Değerleri(milyon \$)		0	309	675	433
Tasarruf Edilen Enerjilerin Birim Maliyetleri (\$/GJ)		0	1,43	1,64	3
Tasarruf Değerleri (GJ/yıl)		25628871,73	33551363,21	35702291,85	39605005,15
BE Eş Değer Enerji Maliyeti (Senaryo 1) (milyon \$/yıl)		605,9	1257,8	2319	3963
BE Eş Değer Enerji Maliyeti (Senaryo 2) (milyon \$/yıl)		553,1	981	2115	3635
Önlemler Alınarak Enerji Maliyeti (milyon \$/yıl)	BE Maliyeti	553,1	981	1707	2755
	Amortisman	0	37	43	89,9
	Toplam	553,1	1018	1750	2844,9
Tasarruf Potansiyeli (Senaryo 1) (milyon \$/yıl)		52,8	276	612	1207
Tasarruf Potansiyeli (Senaryo 2) (milyon \$/yıl)		0	166	408	879

Çizelge 4.23. Toplam enerji maliyeti %12 ve %30 faiz oranı için

Yıllar	2004	2010	2015	2020
Toplam enerji Maliyeti (%12 için) (milyon \$/yıl)	553,1	1018	1750	2844,9
Toplam enerji Maliyeti (%30 için) (milyon \$/yıl)	553,1	1046	1801,7	2916,5

Türkiye çimento sektöründe 1990–2004 yılı arasında almış olduğu bazı rehabilitasyon ve enerji tasarrufu önlemleriyle, 1990 yılı referans alınarak 2004 yılı itibariyle toplam birincil enerji tüketiminde 42,65 PJ/yıl (Çizelge 4.17); Özgül ısı tüketiminde 99,3 kcal/kg-klinker (Çizelge 4.12); özgül elektrik tüketiminde 11.1 kWhe/ton-çimento (Çizelge 4.14); özgül birincil enerji tüketiminde ise 0,50 GJbe/ton-kli (Çizelge 4.15, Şekil 4.10) tasarruf sağlanmıştır.

5.ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE MODELLEME SONUÇLARININ ENERJİ İRDELENMESİ

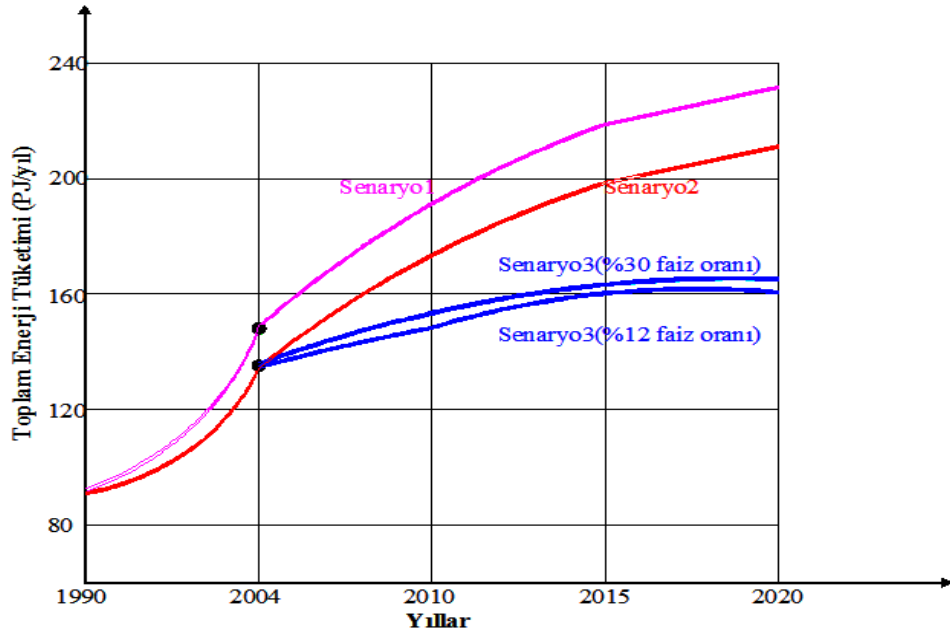
Sektörle ilgili çeşitli öngörü ve olasılıkların incelenmesini amaçlayan böyle karmaşık bir çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için, önce Türkiye çimento sektörünün sistem yapısı ve işletme özelliklerinin incelenmesi, bunun ardından da sistemin tümleşik enerji kullanımı tanımlayabilen ve bunu hesaplanabilir hale getiren bir matematiksel modelin geliştirilmesi gerekir. Türkiye çimento sektöründe 2005 yılı itibarıyla 40 entegre klinker üretim tesisi ve 58 çimento öğütme tesisi bulunmaktadır. Sektör kullandığı elektriği, termik ve hidrolik santraller tarafından beslenen Türkiye elektrik şebekesinden sağlamaktadır. Modelleme yaklaşımında ilgili sistemler kümelendirilerek “Türkiye Çimento Sektörü Enerji Kullanımı ve CO₂ Emisyonu Salınım Modeli” geliştirilmiştir (Böl. 4.3, Şekil 4.8). Bu model yardımı ile, sektörde uygulanması söz konusu olabilecek enerji tasarruf önlemlerinin (Böl. 4.5.1) ekonomik analizleri senaryolar biçiminde yapılarak, “Türkiye Çimento Sektörü Enerji Tasarrufu Sağlama Eğrileri” oluşturulmuştur (Böl. 4.7). 2004-2020 yılları için geliştirilen enerji tasarrufu sağlama eğrileri, %12 ve %30 faiz oranları için sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir. Enerji tasarrufu sağlama eğrileri kullanılarak, Türkiye çimento sektöründe enerji verimliliği ile ilgili bazı senaryo çalışmaları yapılmıştır. Bu senaryolar aşağıda tanımlandığı gibidir:

Senaryo 1: Üretimin 1990 yılı teknolojisiyle gerçekleştirilmesi: Bu senaryoda 2004 ve 2020 yılları arasındaki çimento üretimi için 1990 yılında mevcut olan teknolojiyi kabul eder. Özgül birincil enerji tüketimi, mevcut fabrikalar için 4,51 GJ/T-çim olarak kabul edilir. Mevcut fabrika kapasitesi tamamen kullanıldığı zaman, mevcut fabrikaya önkalsinasyon ilavesi ile kapasite artırılabilir. Bu artırılan kapasite 2015 yılında yetersiz bir hale gelince, o zaman ek imalat kapasitesi yaratmak için mevcut ekonomik şartlar ile tespit edilen teknolojilerle donatılmış yeni fabrikaların kurulması kabul edilir.

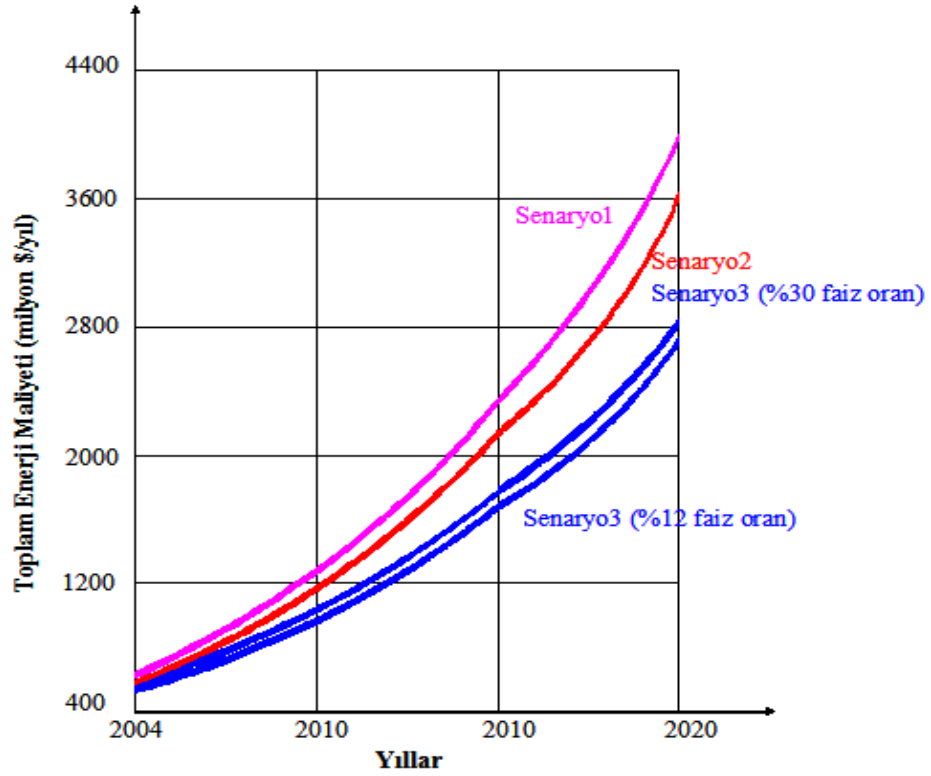
Senaryo 2: Üretimin 2004 yılı teknolojisiyle gerçekleştirilmesi: Bu senaryoda 2004 yılından sonra 2004 teknolojisinin kullanılmasını kabul eder. Böylece özgül birinci enerji tüketimi 1990 ve 2004 yılları için 4,51 GJ/T-çim olarak kabul edilir ve 2004 yılından sonraki bütün seneler için bu 4,12 GJ/T-çim'dur. Ancak bundan yeni kurulmuş fabrikalar veya önkalsinasyonu yeni tesis edilmiş fabrikalar hariçtir. Kapasite artırımı ile ilgili tahminler senaryo 1'deki ile aynıdır.

Senaryo 3: Üretiminin 2004 yılı itibariyle tasarruf önlemleri alınarak gerçekleştirilmesi: Senaryo 3, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiş öncelik sıralarına, enerji tasarrufu sağlama eğrisine göre 2004 yılından sonra, enerji tasarrufu ölçümlerinin gerçekleştirilmesini öngörür. Senaryo çalışmalarından elde edilen sonuçlar Şekil 5.1'den 5.6'a kadar sunulmaktadır.

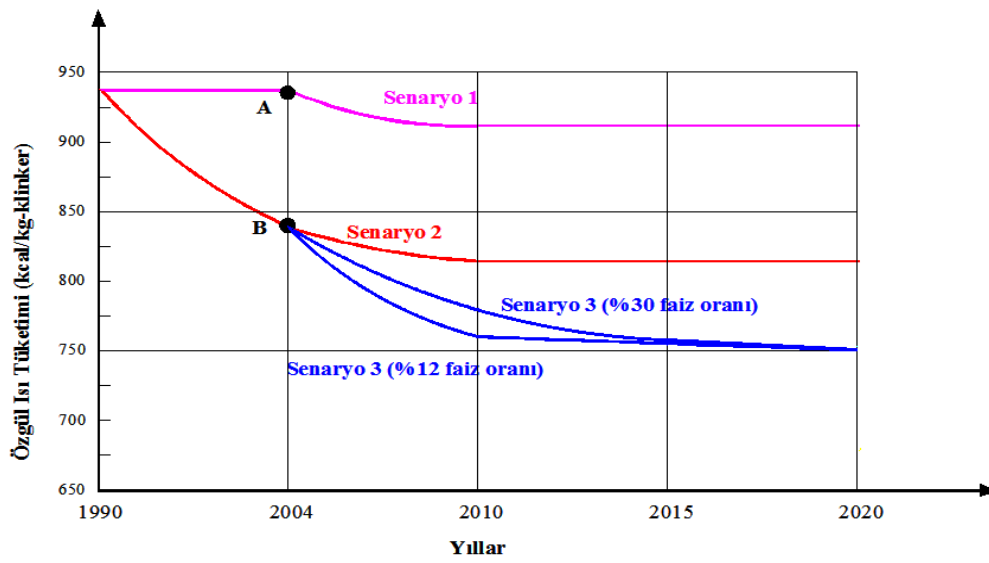
İncelenen senaryolar için, Türkiye çimento sektöründe tüketilen toplam birincil enerjilerin yıllara göre değişimi Şekil 5.1'de, tüketilen enerjinin maliyetinin yıllara göre değişimi Şekil 5.2'de, özgül ısı ve özgül elektrik tüketimlerinin yıllara göre değişimleri ise sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir.



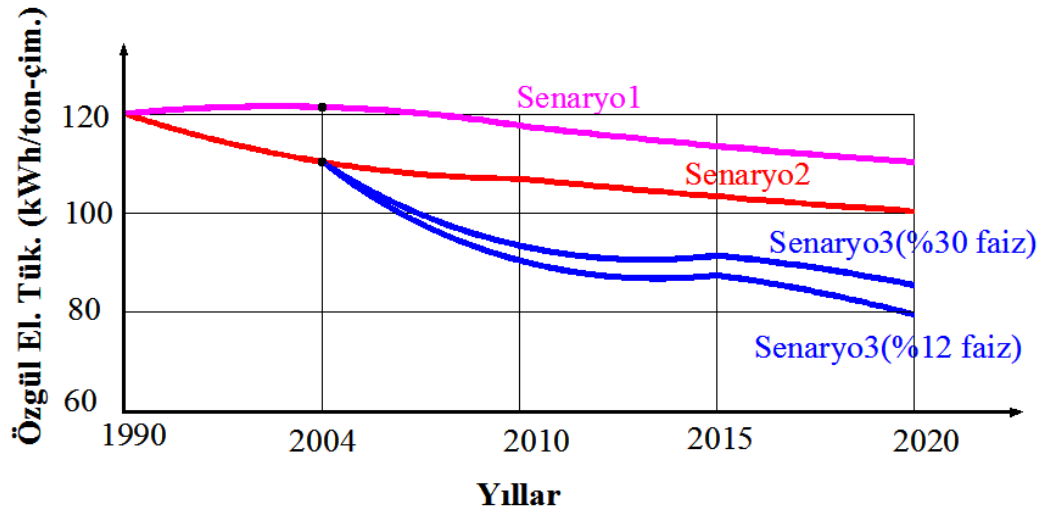
Şekil 5.1. İncelenen senaryolar için Türkiye çimento sektöründe tüketilen toplam birincil enerjinin yıllara göre değişimi



Şekil 5.2. İncelenen senaryolar için Türkiye çimento sektöründe tüketilen toplam enerjinin maliyetinin yıllara göre değişimi



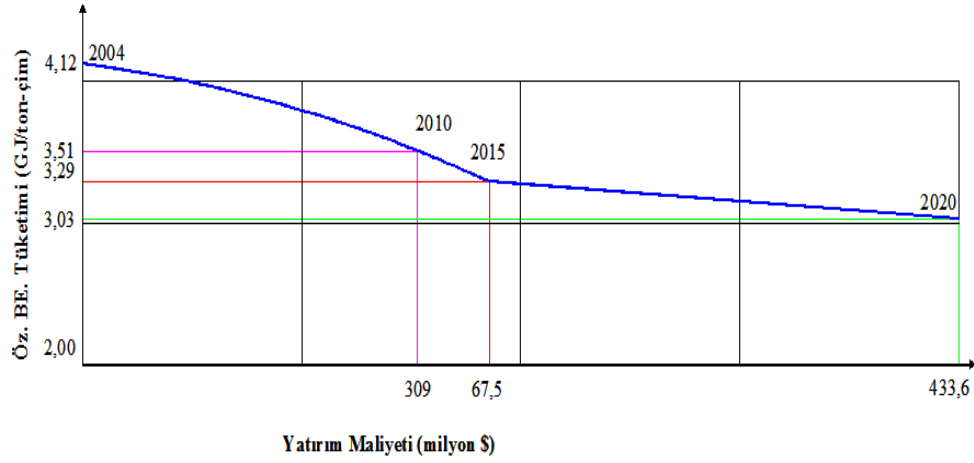
Şekil 5.3. İncelenen senaryolar için Türkiye çimento sektöründe özgül ısı tüketiminin yıllara göre değişimi



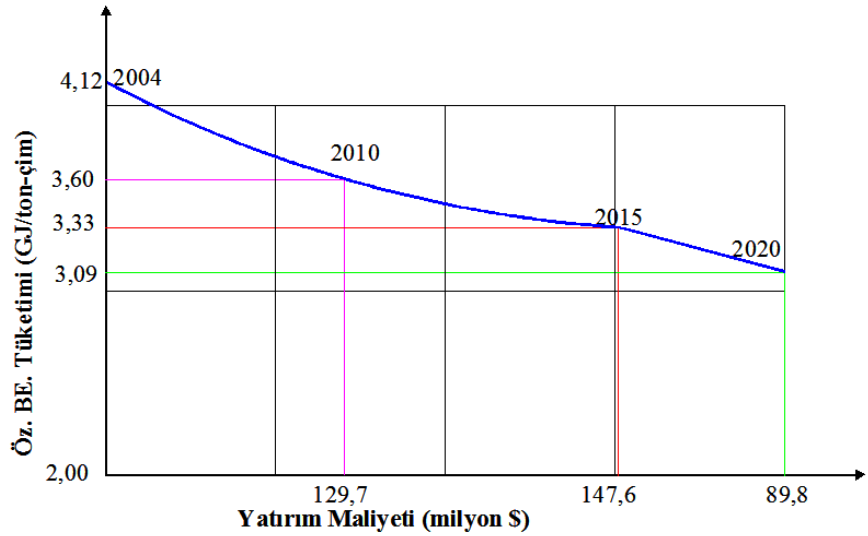
Şekil 5.4. İncelenen senaryolar için Türkiye çimento sektöründe özgül elektrik tüketiminin (klinker ve çimento) yıllara göre değişimi

Bu şekillerden görüldüğü gibi çimento sektörü 1990-2004 yılları arasında almış olduğu bazı rehabilitasyon ve enerji tasarrufu önlemleriyle, 1990 yılı referans alınarak 2004 yılı itibariyle (Senaryo 1- Senaryo 2, A-B) toplam birincil enerji tüketiminde 12,9 PJ/yıl ya da %9; toplam enerji giderlerinde 52,8 milyon \$/yıl ya da %9; özgül ısı tüketiminde 99,3 kcal/kg-klinker ya da %10,6; özgül elektrik tüketiminde ise 9,7 kWh_e/ton-çimento ya da %8 tasarruf sağlamıştır.

%12 ve %30 faiz oranları için senaryo 3'den elde edilen, özgül birincil enerji tüketimlerinin ve yatırım maliyetlerinin yıllar itibariyle değişimi Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Türkiye çimento sektörünün özgül birincil enerji tüketiminin maliyetlere ve yıllara göre değişimi (Senaryo 3, %12 faiz)



Şekil 5.6. Türkiye çimento sektörünün özgül birincil enerji tüketiminin maliyetlere ve yıllara göre değişimi (Senaryo 3, %30 faiz)

Düşük faiz oranında (%12 faiz) 2005-2010 yılları için daha fazla sayıda enerji tasarruf önlemi alınabilmekte, 2010-2015 yılları için kullanılan enerji maliyeti (KEM)'in aynı dönemdeki tasarruf edilen enerji maliyeti (TEM)'in altında kalması nedeniyle, bu dönemde atık yakma dışında hiçbir tasarruf önlemi alınamamaktadır. Şekil 5.5'teki kırılmanın nedeni budur. %30 faiz oranı durumunda (Şekil 5.6) 2005-2010 yılları arasındaki TEM'ler daha yüksek olduğundan, bu dönemde alınan

tasarruf önlemi sayısı azalarak, tasarruf önlemleri 2010-2015 yıllarına kaymakta, Şekil 5.5'te görülen kırılma ortadan kalkmaktadır.

Şekil 5.5'ten görüldüğü gibi faiz oranı %12 alındığında özgül birincil enerji tüketimi 2004 yılında 4,12 GJ/t-çimento değerinden, 2020 yılında 3,03 GJ/t-çimento'ya azalmaktadır. Bu azalmanın gerçekleştirilebilmesi için 2010 yılında 309 milyon \$, 2020 yılında ise 433,6 milyon \$ yatırım yapılması gerekmektedir. Bu yatırım maliyetleri anılan yılların doları cinsinden olup, maliyetlere finansman giderleri dahil değildir.

Faiz oranı %30 olduğunda ise özgül birincil enerji tüketimi 2004 yılında 4,12 GJ/t-çimento iken, 2020 yılında 3,09 GJ/t-çimento'ya düşmektedir. Bunu sağlamak için 2010 yılında 129,7 milyon \$, 2015 yılında 147,6 milyon \$, 2020 yılında 89,9 milyon \$ yatırım yapılması gerekmektedir.

6.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada endüstriyel tesislerde enerji verimliliği çalışmaları ile ilgili mühendislik yaklaşımları ve teknik ve ekonomik analizler ayrıntılı bir biçimde incelenmiş, bu amaca yönelik genel bir uygulama metodolojisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yaklaşım Türkiye çimento sektörüne uygulanmıştır. Konuyla ilgili uluslar arası ve ulusal çalışmalar taranmış, çimento fabrikalarına anket (Ek-1) uygulanmış, enerji verimliliği çalışması için gerekli teknik, ekonomik ve yönetsel veriler toplanmıştır. Bu veriler kullanılarak, sektörün kümesel enerji verimliliği sağlama ve emisyon yayılımını azaltmaya yönelik bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model kullanılarak çimento sektörünün 2004-2020 yılları için enerji verimliliği çalışmalarının uygulama stratejileri, uygulamaların ekonomik ve işletme boyutları 3 senaryo altında incelenmiş, sonuçlar enerji tasarrufu sağlama eğrileri biçiminde gösterilmiştir. Bu eğriler yardımıyla öngörülen enerji fiyatları, faiz oranları, geri ödeme süreleri vb. faktörler dikkate alınarak her bir enerji tasarruf önleminin hangi yılda uygulamaya konulacağı, öngörülen sürelerde özgül enerji tasarruf değerlerindeki değişimler, toplam enerji tasarruf miktarları, söz konusu olan toplam yatırım miktarları, tasarruf edilen enerjinin parasal karşılıkları bu eğrilerden kolayca elde edilebilir. Sektör için geliştirilen kümesel model aynı yaklaşımla bireysel fabrika verileri girilerek tek bir fabrika içinde uygulanabilir. 1990 yılı referans alınarak 2004 yılı itibarıyla toplam birincil enerji tüketiminde 12,9 PJ/yıl tasarruf sağlamıştır. Bunun parasal karşılığı 52,8 milyon \$/yıl'dır. Faiz oranının %12 olması durumunda özgül birincil enerji tüketimi 2004 yılında 4,12 GJ/t-çimento değerinden, 2020 yılında 3,03 GJ/t-çimento'ya azalmaktadır. Bu azalmanın gerçekleştirilebilmesi için 2010 yılında 309 milyon \$, 2020 yılında ise 434 milyon \$ yatırım yapılması gerektiği görülmüştür. Bu programın uygulanması durumunda çimento sektöründe 2004-2020 yılları arasında toplam 26,04 PJ birincil enerji tasarrufu sağlanabileceği, bunun ise parasal karşılığı 8,95 \$/GJ olacağı hesaplanmıştır.

Enerji verimliliğinin ekonomik yönden en etken olduğu sektörler yoğun enerji tüketen sektörlerdir. Bunların başında çimento, demir-çelik, petrokimya, kağıt ve selüloz, tekstil, şeker gelmektedir. Geliştirilen enerji verimliliği metodolojisi ve enerji tasarrufu sağlama eğrisi yaklaşımının, yukarıdaki kuruluşlarda da uygulanması ülke ekonomisi yönünden çok faydalı olacaktır. Burada önemli olan konu; her sektör bazında, sektörle ilgili ulusal ve uluslar arası teknik ve ekonomik verilerin uygun biçimde sağlanması, tesisler temelinde uygulanacak anket (Ek-1) çalışmalarıyla kuruluşların gerçek enerji kullanım işletme biçimlerinin, sistem yapılarının ayrıntılı biçimde belirlenmesi gerekir. Daha sonrada sektörler ilgili benzer yaklaşımlarla (Bölüm 4.3) “diğer enerji yoğun sektörler için enerji verimliliğini sağlama ve emisyon modelleri”den yararlanılarak ekonomik analizler yapılabilir ve “diğer enerji yoğun sektörler için enerji verimliliği sağlama eğrileri” oluşturulabilir. Bu eğriler yardımıyla istenilen senaryolar biçiminde enerji verimliliği, ilgili yatırım ve işletme maliyetleri, enerji maliyetleri vb. konularda fayda maliyet analizleri gerçekleştirilebilir.

Bu geliştirdiğimiz model sayesinde, CO₂ emisyonunun azaltılmasına yönelik yaklaşımlar, önlemler ve teknolojiler belirlenip CO₂ emisyonlarının azaltılması ile ilgili gerekli analiz alt yapısı oluşturulabilir. Mevcut ve ileriye dönük CO₂ emisyonlarının dağılımı hesaplanarak, enerji tasarrufu önlemlerinin CO₂salınımına etkileri irdelenebilir. Enerji tasarrufu sağlama eğrisi yardımıyla CO₂ emisyonlarını azaltma analizleri ve projeksiyonları yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Durmaz, A., “Energy Sources and Industrial Energy Saving”, *Applied Research Journal of METU*, 1:1-10 (1983).
2. Durmaz, A., “Kömürün Yanması”, Kömür Özellikleri Teknolojisi ve Çevre İlişkileri, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 353-394 (1998).
3. Çürüksulu, M., “150 Mw_e Kurulu Güçteki Düşük Kaliteli Linyitle Çalışan Bir Termik Santral İçin Buhar Kazanı Tasarımı”, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 8-13 (2006).
4. Ercan Y., Durmaz A., Çürüksulu M., Daloğlu Ş., “*Türkiye Çimento Sektöründe Enerji Verimliliğinin Artırılması ve Sera Gazı Emisyonlarının Azaltılması İle İlgili Fayda-Maliyet Analizleri*”, Ankara, Mayıs, 3-74 (2006)
5. Durmaz A., “*Enerji Mühendisliği, Tasarım Optimizasyon, Teknik Ekonomik ve Çevresel Çözümler, Ankara*”, Eylül, 2-13 (2003)
6. Durmaz, A., Güngen, G., Karabay, M., Ercan Y., “Application of Energy Conservation Techniques to Some Industrial Complexes in Turkey”, *Symposium on the Outlook of Energy in the Third World*, Tahran, 1-30 (1983).
7. Durmaz, A., Ercan, Y., “Orhaneli Termik Santrali Kazanının Yanma ve Emisyon Sorunlarının İncelenmesi”, *GEÇER Araştırma Merkezi*, Ankara, 1-20 (2004).
8. Durmaz, A., “Alışılmış Yakma Teknolojileri ve Uygulamaları, “**1. Ulusal Yanmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Sempozyumu Bildiri Kitabı**”, Ankara, Haziran 77-79 (1991).
9. Kakaç, S., Arınç, F., “Örneklerle Mühendislik Isı Transferinin Esasları”, *Pelikan Yayıncılık*, 249-383 (2004).
10. Erkovan, İ., “Klinker Üretim Tekniği”, *Türkiye Çimento ve Toprak Sanayii T.A.Ş.*, (1990).
11. “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Taş ve Toprağa Dayalı Ürünler Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu (Çimento ve Hazır Beton)”, *DPT*, Ankara , 2505 - ÖİK 525 (2000).
12. “Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), Taş ve Toprağa Dayalı Sanayiler (Çimento Sanayi) Özel İhtisas Komisyonu Raporu Taslağı”, *DPT*, 20-35 (2006).
13. Omurtay, B., “2004 Yılı Benchmarking Değerlendirmeleri (Çimento Sektörü)”, *EİE-UETM*, Şubat 46-65 (2006).

14. Ercan, Y., Durmaz, A., Sivrioğlu M., “EFOM-12 C Enerji Arz Modelinin Türkiye’ye Uygulanması”, *DPT Projesi, GEÇER Araştırma Merkezi*, Ankara, 27-42 (1988).
15. “2004 Yılı Sanayide Enerji Verimliliği Proje Yarışmasına Katılan Projeler”, *EİE/UETM* (2005).
16. Holderbank Consulting, “Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada”, *CANMET*, Ottawa, Ontario, Canada (1993).
17. Martin, N., Worrell, E., Price, L., “Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Cement Industry”, *Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory*, LBNL – 44182, September (1999).
18. Fujimoto, S., “*Modern Technology Impact on the Power Usage in Cement Plants, Proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference*”, Toronto, Ontario, Canada, May (1993).
19. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), “*Cement Sustainability Initiative CO₂ Emission Inventory Protocol*”, Version 2.0. Cenevre, Switzerland. www.wbcsd.org.
20. Lowes, T.M., Bezant, K.W., “Energy Management in the UK Cement Industry, Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis)”, *Elsevier Applied Science*, London, England, 30-57 (1990).
21. Lesnikoff, G., “Personal Communication, Hanson Cement”, Cupertino, CA, 70-85 (1999).
22. Durmaz A., Ercan Y., “Aksaray Mercedes Fabrikasının Tehlikeli Atıklarının Konya Çimento Fabrikasında Yakılarak Bertaraf Edilmesi”, *Gazi Üniversitesi GEÇER Araştırma Merkezinde*, Ankara, 60-75 (1990).
23. Vleuten, F.P. van der, “Cement in Development: Energy and Environment, Netherlands Energy Research Foundation”, *Petten*, The Netherlands, (1994).
24. Jaccard, M.K. & Associates and Willis Energy Services Ltd., “Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada”, *Report prepared for Natural Resources Canada*, Ottawa, Canada, 30-46 (1996).
25. Steinbliss, E., “Traditional and Advanced Concepts of Waste Heat Recovery in Cement Plants, Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J.Sirchis)”, *England, Elsevier Applied Science*, London, 50-62 (1990).

26. Van Oss, H., "Personal Communication, U.S." *Geological Survey*, February 9th, 25-45 (1999).
27. , M., "The Effects of New Climate Change Commitments on Energy Intensive Industries: The Cement Industry, in The Impact of High Energy Price Scenarios on Energy-Intensive Sectors: Perspectives from Industry Workshops (1997)" by Sutherland, R., Richards, N., Nisbet, M., Steinmeyer, D., Slinn, R. Tallet, M., Fruehan, R.J., 85-96 (1996).
28. Birch, E., "Energy Savings in Cement Kiln Systems, Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis)", *Elsevier Applied Science*, London, England, 56-83 (1990).
29. Cembureau, "Best Available Techniques for the Cement Industry", *Brussels*, Cembureau, 98-110 (1997).
30. Scheuer, A., Sprung, S., "Energy Outlook in West Germany's Cement Industry, Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis)", *Elsevier Applied Science*, London, England, 87-107 (1990).
31. Parkes, F.F., "Energy Saving by Utilisation of High Efficiency Classifier for Grinding and Cooling of Cement on Two Mills at Castle Cement (Ribblesdale) Limited, Clitheroe, Lancashire, UK, Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis)", *Elsevier Applied Science*, London, England, 84-102 (1990).
32. Lang, T.A., "Energy Savings Potential in the Cement Industry and Special Activities of the 'Holderbank' Group, in Industrial Energy Efficiency, Policies and Programmes Conference Proceedings (May 26-27, 1994)", *International Energy Agency and U.S. Department of Energy*, Paris, 76-100 (1994).
33. Ruby C.W., "A New Approach to Expert Kiln Control, Proc. 1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference Record, Institute of Electronics Engineers", New Jersey, 103-125 (1997).

EKLER

EK-1 Türkiye çimento sektörü için yapılan anket çalışması

**ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE SERA GAZI
EMİSYONLARI DURUM BELİRLEME ANKETİ¹**

Kuruluş Adı:

Adresi:

Konuyla İlgili İrtibat Kurulacak Kişi:

Telefon:

Faks:

E-mail:

BÖLÜM A: KURULUŞUNUZUN 1990 YILINDAKİ DURUMU

Kuruluşunuz 1990 öncesi faaliyete girmişse 1990 yılına ait, aksi taktirde kuruluş yılına ait bilgiler;

Yılı :

Üretim Kapasitesi : Klinker[t/yıl], Çimento.....[t/yıl]

Fiili Üretim : Klinker[t/yıl], Çimento.....[t/yıl]

Özgül Enerji Kullanımı

Elektrik : [kWh/t-klinker]

Elektrik (Toplam) : [kWh/t-çimento]

Isı (Yakıt Bazında) : [kcal/kg-klinker]

Kullanılan Yakıtlar, Yakıt Karışımı ve Tüketimler

	Toplam Tüketim	Özgül Tüketim
Kömür	:[t/yıl];.....[t-kömür/t-klinker]	
Fuel-oil	:[t/yıl];.....[t-fuel-oil/t-klinker]	
Petrokok	:[t/yıl];.....[t-petrokok/t-klinker]	
Doğalgaz	:[Nm ³ /yıl];[Nm ³ -doğalgaz/t-klinker]	
Diğer (Atıklar)	:[t/yıl];.....[t/t-klinker]	

EK-1 (Devam) Türkiye çimento sektörü için yapılan anket çalışması.

EK-1 (Devam) Türkiye çimento sektörü için yapılan anket çalışması

:[t/yıl];.....[t/t-klinker]

:[t/yıl];.....[t/t-klinker]

Not: Kömür analiz föylerinin fotokopilerini ekleyiniz.

Kullanılan Teknolojiler

Üretim Sistemi : Kuru ☐, Yaş ☐, Yarı Yaş ☐

Siklon Ön Isıtıcı Kademe Sayısı: Adet

Ön kalsinasyon Ünitesi : Var ☐, Yok ☐

Kullanılan Değirmenlerin Türleri (bilyeli, valsli, horomill vb.) ve Yerleri;

1)

2)

3)

Değirmen Seperatör Tür ve Özellikleri:

1)

2)

3)

1 Anketi, ekte sunulan MS Word dosyasını kullanarak bilgisayar ortamında doldurunuz.

Homojenizasyon Sistemlerinin Türü ve Özellikleri:

Ana Nakil Sistemlerinin Türleri (bant, elevatör, pnömatik vb.) ve Yerleri:

Klinker Soğutma Sisteminin Türü ve Özellikleri:

EK-1 (Devam) Türkiye çimento sektörü için yapılan anket çalışması.

Ana Fanlarda Debi Kontrol Biçimini Belirtiniz:

	<u>Sabit Devir - Klapeli</u>	<u>Değişken Devir (Frekans Konvertörlü)</u>
1)Fanı		
2)Fanı		
3)Fanı		
4)Fanı		

Döner Fırın Kontrol Özellikleri:

Malzeme Besleme Kontrol Biçimi:

Manuel ☐ Otomatik Kontrollü ☐ Bilgisayar Kontrollü ☐

Yanma Kontrolü Biçimi :

Manuel ☐ Otomatik Kontrollü ☐ Bilgisayar Kontrollü ☐

Proses Kontrol Biçimi: Yerel Manuel ☐

Merkezi Manuel ☐

Merkezi Bilgisayar Destekli ☐

Çimentoda Katkı Oranı: %.....

Katkı Türleri :

.....

.....

1990'dan Önce Kurulan Tesislerde 1990'a Kadar Yapılan Rehabilitasyon, Enerji Tasarrufu ve Çevre Korumaya Yönelik Alınmış Önlemlerin Listesi ve Etkinliği, Maliyetler, Tasarruf Miktarları ve Geri Ödeme Süreleri vb. (liste olarak ekleyiniz)² :

² Çimento sektöründe enerji tasarrufuna yönelik bazı güncel yöntemler liste halinde Bölüm C'de verilmiştir.

EK-1 (Devam) Türkiye çimento sektörü için yapılan anket çalışması.

BÖLÜM B: KURULUŞUNUZUN 2004 YILINDAKİ DURUMU

Yılı : 2004

Üretim Kapasitesi : Klinker[t/yıl], Çimento.....[t/yıl]

Fiili Üretim : Klinker[t/yıl], Çimento.....[t/yıl]

Özgül Enerji Kullanımı (Kurulduğu yıldan 2004 yılına kadar bütün yıllar için vermeniz rica olunur.)

Elektrik : [kWh/t-klinker]

Elektrik (Toplam) : [kWh/t-çimento]

Isı (Yakıt Bazında) : [kcal/kg-klinker]

Kullanılan Yakıtlar, Yakıt Karışımı ve Tüketimler

	Toplam Tüketim	Özgül Tüketim
Kömür	:[t/yıl];.....[t-kömür/t-klinker]	
Fuel-oil	:[t/yıl];.....[t-fuel-oil/t-klinker]	
Petrokok	:[t/yıl];.....[t-petrokok/t-klinker]	
Doğalgaz	:[Nm ³ /yıl];[Nm ³ -doğalgaz/t-klinker]	
Diğer (Atıklar)	:[t/yıl];.....[t/t-klinker]	
	:[t/yıl];.....[t/t-klinker]	
	:[t/yıl];.....[t/t-klinker]	

Not: Kömür analiz föylerinin fotokopilerini ekleyiniz.

Kullanılan Teknolojiler

Üretim Sistemi : Kuru ☐ Yaş ☐ Yarı Yaş ☐ Uyg. Yılı³ :

Siklon Ön Isıtıcı Kademe Sayısı: Adet Uyg. Yılı³ :

Ön kalsinasyon Ünitesi : Var ☐ Yok ☐ Uyg. Yılı³ :

Kullanılan Değirmenlerin Türleri (bilyeli, valsli, horomill vb.) ve Yerleri;

1)Uyg. Yılı³:

2)Uyg. Yılı³ :

3)Uyg. Yılı³ :

EK-1 (Devam) Türkiye çimento sektörü için yapılan anket çalışması.

Değirmen Seperator Tür ve Özellikleri:

- 1)Uyg. Yılı³ :
- 2)Uyg. Yılı³ :
- 3)Uyg. Yılı³ :

Homojenizasyon Sistemlerinin Türü, Özellikleri ve Uyg. Yılı³ :

Ana Nakil Sistemlerinin Türleri (bant, elevatör, pnömatik vb.), Yerleri ve Uyg. Yılı³ :

3 Bölüm A'daki teknolojiden farklıysa uygulandığı yıl.

Klinker Soğutma Sisteminin Türü, Özellikleri ve Uyg. Yılı³:

Ana Fanlarda Debi Kontrol Biçimi:

	<u>Sabit Devir - Klapeli</u>	<u>Değişken Devir</u> <u>(Frekans Konvertörlü)</u>	<u>Uygulama</u> <u>Yılı³</u>
1)Fanı			
2)Fanı			
3)Fanı			
4)Fanı			

EK-1 (Devam) Türkiye çimento sektörü için yapılan anket çalışması.

Döner Fırın Kontrol Özellikleri:

Malzeme Besleme Kontrol Biçimi:

Manuel ☐ Otomatik Kontrollü ☐ Bilgisayar Kontrollü ☐

Uyg. Yılı³ :

Yanma Kontrolü Biçimi :

Manuel ☐ Otomatik Kontrollü ☐ Bilgisayar Kontrollü ☐

Uyg. Yılı³ :

Proses Kontrol Biçimi: Yerel Manuel ☐

Merkezi Manuel ☐

Merkezi Bilgisayar Destekli ☐

Uyg. Yılı³ :

Çimentoda Katkı Oranı: %..... (Katkı oranının yıllara göre değişimini ekte veriniz)

Katkı Türleri :

.....

.....

Bölüm A'daki Yıldan Sonra 2004 Yılına Kadar Yapılan Rehabilitasyon, Enerji Tasarrufu ve Çevre Korumaya Yönelik Alınmış Önlemlerin Listesi ve Etkinliği, Maliyetler, Tasarruf Miktarları ve Geri Ödeme Süreleri vb. (liste olarak ekleyiniz)² :

EK-2 Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

MODELİN SAYISAL OLARAK ÖRNEKLENDİRİLMESİ

Bu tez çalışmasında çimento sektörü örneğinde sektörel enerji tasarrufu metodolojisi incelenmiş, enerji verimliliği sağlama ve CO₂ emisyonları azaltmaya mühendis çalışmalarıyla ilgili bir EXCEL paket programı geliştirilmiştir. Excel programlama ve bilgi akış yöntemi Fortran'a kıyasla daha zor takip edilebilir ve algılanabilir olması nedeniyle geliştirilen programın örneklerle açıklanması, okuyucular ve kullanıcılar bağlamında önem arz etmektedir. Aşağıda enerji tasarruf önlemleri bağlamında, hesaplama ve hesap akış biçimi örneklerle açıklanmıştır.

EK 2.1. Enerji Tasarruf Eğrisi Uygulama Kıstasları ve Hesaplama Yöntemleri

Enerji tasarruf eğrileri endüstriyel tesislerde bireysel olarak veya aynı sektörde benzeri tüm tesisleri kapsayacak biçimde sektörel bazda uygulanabilir. Aşağıdaki örnekler Türkiye'de tüm çimento sektörünü temsil eden tümleşik özellikli bir çimento fabrikasında hesaplanmıştır. Sektörel bazda tümleşik temsili çimento fabrikasında enerji tasarruf yerleri, türleri bunların enerji tasarruf potansiyelleri belirlenmiştir. Bu potansiyellerin enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılması için gerekli yatırımlar belirlenmiştir. Bu yatırımların enerji ve işletme ekonomisi yönünden başlangıç yılı itibariyle hangi yıllarda kullanımının ekonomik olacağının belirlenmesi, uzun dönemli bir zaman diliminde yatırım programlarının hazırlanması gerekli kaynakların sağlanması ve gerekli uygulamalara geçilebilmesi bağlamında büyük önem taşımaktadır. Herhangi bir enerji tasarrufu önleminin hangi yıl ekonomik olarak uygulamaya konulması, bu önlemin o yılki yıllık maliyetinin (yıllık amortisman, yıllık işletme, yıllık personel vb.), diğer bir ifadeyle bu önlem yoluyla sağlanan tasarruf edilen yıllık enerjinin maliyeti (TEM/yıl), bu önlemin uygulanmaması durumunda kullanılan yıllık kullanım enerjisi maliyetinin (KEM/yıl) üzerinde olması gerekir. Önlem uygulama temel kriteri $TEM < KEM$ 'dir. Buradaki temel sorun, TEM ve KEM'lerin hesaplanmasıdır.

EK-2 (Devam) Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

EK 2.1.1. Tasarruf edilen enerji maliyeti (TEM)'in hesabı

TEM aşağıdaki biçimde hesaplanır. Eşitlik 4.6'yı daha ayrıntılı bir biçimde ele alırsak;

$$TEM [\$/GJ] = YTEBEM [\$/Yıl] / YTEBE [GJ/yıl] \quad (EK.1)$$

Burada; YTEBEM; Yıllık Tasarruf Edilen Birincil Enerjinin Maliyetini [\$/Yıl], YTEBE ise Yıllık Tasarruf Edilen Birincil Enerji miktarını [GJ/yıl] göstermektedir.

Yıllık Tasarruf Edilen Birincil Enerjini Miktarının (YTEBE) Hesabı

$$YTEBE [GJ/yıl] = \text{ÖBETP} [GJbe/ton\text{-}\dot{c}im.] * TK [ton\text{-}\dot{c}im./a] * UO [\%] \quad (EK.2)$$

Burada, ÖBETP; ilgili önlemin özgül birincil enerji tasarruf potansiyelini, TK [ton- $\dot{c}im./a$]; sektörel toplam üretim kapasitesini, UO; ilgili önlemin toplam kapasitesel uygulama oranını ifade eder. Örneğin, UO = 0,5, mevcut 58 fabrikanın toplam kapasitenin yarısında bu önlem uygulanacak, diğer yarısında ise o anda uygulanmış durumda. Buradaki esas sorun, ÖBETP'nin, o noktada kullanılan özgül ikincil enerji tasarruf potansiyeli (ÖİETP) üzerinden, çeşitli dönüşüm faktörleri kullanılarak hesaplanmasıdır. ÖİETP'leri ilgili tasarruf önleminde kullanılan komponentlerin (değirmen, motor, fan, taşıma organları vb.) üreticilerinden doğrudan sağlanabilir. ÖBETP>>ÖİETP.

$$\text{ÖBETP} [GJbe/a] = \text{ÖİETP} [GJie/a] / \left(\eta - \sum_{i=1}^n (\Delta k)_i \right) \quad (EK.3)$$

EK-2 (Devam) Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

Örneğin, ısı tüketen bir birim yenisiyle değiştirilerek 10 [kcal/t-çim] özgül ısı tasarrufu (ÖİET) sağlanmış olsun. Kazan verimi (η) ise kazan çıkışında ısı n=2 yerde

ısı kaybıyla toplam bu birime ulaşıyorsa, yoldaki toplam ısı kaybı $\sum_{i=1}^n (\Delta k)_i = 0,05$

ise ve kazan verimi $\eta=0,85$ olması durumunda, $\text{ÖBETP} = \frac{10}{(1-0,05)(0,85)} = 12,4$
[kcal/ton-çim].4,18 [kJ/kcal].(1/10⁶) [GJ/kJ]

$\text{ÖBETP} = 51,8 \cdot 10^{-6}$ [GJbe/ton-çim] = 10 [kcal/ton-çim.] ÖİETP olarak bulunur.

Örneğin, eski kömür değirmeni yerine daha verimli ve ÖİETP = 10 [kWe/ton-çim] olan yeni bir değirmen konması durumunda; ÖBETP [GJ/ton-çim] değeri yukarıdakine benzer biçimde ve çok daha karmaşık olarak aşağıdaki veriler dikkate alınarak hesaplanır. İlgili yerdeki 10 [kWe/ton-çim] elektrik enerjisi 0,75 verimli şebeke girişinde $\frac{10}{0,75} = 13,3$ [kWe/ton-çim] bunun termik santral/hidrolik santral

elektrik üretim oranı 0,70/0,30 olduğundan termik santral oranı 9,3 [kWe/ton-çim], hidrolik santralde üretilen elektrik ise 4 [kW/ton-çim]'dir. Termik santral üretim verimi 0,36 olduğundan, gerekli yakıt enerjisi biçimindeki birincil enerji girdisi $9,3/0,36 = 25,8$ [kWbe/ton-çim], hidrolik santral verimi 0,85 olduğundan hidrolik santral girişindeki hidrolik potansiyel enerjisi biçimindeki birincil enerji girdisi 4,7 [kW/ton-çim]'dir. Santral girişleri özgül birincil enerji toplamı = $25,8 + 4,7 = 30,5$ [kWbe/ton-çim]'dir. Böylelikle;

$\text{ÖBETP} = 30,5$ [kWbe/ton-çim] = 10 [kW/ton-çim] ÖİETP'dir.

Buradan da ÖBETP kullanılarak tasarruf edilen yıllık enerji GJ/yıl biçiminde hesaplanır.

EK-2 (Devam) Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

Yıllık Tasarruf Edilen Birincil Enerjini Maliyeti (YTEBEM) Hesabı

Yıllık tasarruf edilen birincil enerji maliyetleri, önlemlerle ilgili yıllık amortisman giderleri ile yıllık işletme giderlerindeki artma, azalma göz önünde bulundurularak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$YTEBEM[\$/a]=YA [\$/a]\pm Yİ [\$/a]$$

Burada; YA $[\$/a]$; yıllık amortisman (Bölüm 4te) , $\pm Yİ [\$/a]$; yeni önlemin uygulamaya konulmasıyla artma, eksilme biçiminde oluşan ilave yıllık işletme giderleri (personel, sarf, ilave enerji, paket program vb.) gösterir. İlave artışlar (+), ilave azalmalar (-) işaretiyle yukarıdaki denkleme girer.

Tasarruf Edilen Birim Birincil Enerji Maliyetinin (TEM) Hesabı

TEM, YTEBEM'nin YTEBE'ye bölümü ile bulunur.

$$TEM [\$/GJ] = YTEBEM [\$/a] / YTEBE [GJ/yıl]$$

Kullanılan Birim Enerjinin (KEM) Maliyetinin Hesaplanması

KEM, yıllık kullanılan toplam enerji maliyeti (YEM), yıllık toplam kullanılan enerji miktarına (YEK) bölümü ile bulunur.

$$KEM [\$/GJ] = YKEM [\$/a] / YEK [GJ/a] \quad (EK.5)$$

Burada, YKEM $[\$/a]$; yıllık kullanılan toplam enerji maliyetini, YEK $[GJ/a]$ ise ilgili yılda kullanılan toplam birincil enerji maliyetini gösterir. YEK ve YKEM muhasebe kayıt verileri kullanılarak hesaplanır.

EK-2 (Devam) Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

Başlangıç yılından başlayarak, örneğin 2005-2020 yılları arasında her yıl için KEM'ler hesaplanır, enerji tasarrufu eğrisinde y eksenini üzerinde (TEM/KEM eksenini) yatay çizgiler biçiminde konumlanır. Tüm önlemler için TEM'ler hesaplanır, büyüklük sırasına göre dizilip dikey kolonlar (bartchart) biçiminde yatay x eksenini (önlemler eksenini) üzerine sıralanır. Bu çalışmada oluşturulan enerji tasarruf eğrilerinde (Şekil 4.9-4.12) yalnız 2005, 2010, 2015 ve 2020 KEM değerleri çeşitli renklerde yatay çizgiler biçiminde gösterilmiştir.

Çizelge 4.8.'deki KEM [\$/GJ] değerlerini bulabilmek için; YKEM Çizelge 4.20'de toplam özgül maliyet [\$/t-kli] ve YEK ise toplam kalori sarfıyatı [GJ/t-kli] olarak gösterilmiştir. Çizelge 4.21'deki artış oranını kullanarak 2005 yılı KEM değerini hesaplarız. KEM değeri aynı zamanda Çizelge 4.21'deki özgül enerji maliyeti de demektir. Şekil 4.9-4.12'deki Enerji Tasarrufu Sağlama Eğrisini oluşturmak için önlem sıraları belirlenmeli. Önlemin uygulama sırası ise TEM < KEM olmalı. TEM > KEM olduğunda önlemler sıralamaya giremeyeceği gibi hesaplamalara da girmezler. KEM'i hesaplayabilmek için; YKEM [\$/a], YEK [GJ/a] değerlerini hesaplamalıyız. YKEM'i bulabilmek için Çizelge 4.20'yi oluşturmalıyız. Bunun içinse çimento üretiminde kullandığımız yakıtların; yakıt oranını [%], ısı değeri (Hu, kcal/kg-y), özgül yakıt maliyetini [\$/ton-yakıt], toplam içindeki oranını ve bunların toplam değerini belirlememiz gerekmektedir.

Örnek olarak petrokoku ele alırsak;

Toplam yakıt kalori sarfıyatı = 836,6 [Kcal/kg-kli] (Bkz. Çizelge 4.2),

Toplam yakıt kalori sarfıyatı = 3,5 [GJ/T-kli],

Birim başına elektrik maliyeti = 8,03 [\$/kWhe] olarak verilmiştir.

çizelge 4.20'de petrokok için yakıt oranı=39,72 [%], Hu= 7000 [kcal/kg-y], özgül yakıt maliyeti=83,37[\$/t-y]) verilmiştir. Bu değerleri eşitliklerde yerine koyarsak;

$$\text{Petrokok kalori sarfıyatı} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T - kli}} \right] = \text{yakıt oranı}[\%]/100 \times \text{toplam kal. sarf.}[\text{GJ/T-kli}] \quad (4.36)$$

EK-2 (Devam) Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

$$\text{Petrokok kalori sarfıyatı} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T - kli}} \right] = 39,72[\%]/100 \times 3,5 = 1,39 \text{ [GJ/T-kli]}$$

$$\text{Öz. Mal} \left[\frac{\$}{\text{T - kli}} \right] = \left(\frac{\text{kalorisarf} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T - kli}} \right]}{Hu \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg-y}} \right] \cdot 4.18 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} \right] \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{T}} \right] \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{kJ}} \right]} \right) \times \text{öz.yak.mal} \left[\frac{\$}{\text{T-y}} \right] \quad (4.38)$$

Öz.Mal.[\$/T-kli]=[1,39/(7000×4,18×10³×10⁻⁶)] ×83,37= 3,96 [\$/ton-kli] bulunur. Diğer yakıtlar içinde bu şekilde hesaplamalar yapılır, değerler bulunur ve sonunda bütün değerler toplanır. Böylece, yakıt toplam özgül maliyeti =11,55 [\$/ton-kli] ve yakıt toplam kalori sarfıyatı=3,5 [GJ/T-kli] elde edilir.

$$\text{ÖzgülEl.mal.} \left[\frac{\$}{\text{T - kli}} \right] = \frac{\text{öz.el.tük.kli} [\text{kWhe/T - kli}]}{100} \times \text{birim el.baş.mal.} \left[\frac{\$}{\text{kWhe}} \right] \quad (4.40)$$

Özgül elektrik tüketimi klinker için [kWhe/T-kli] yukarıdaki Bölüm 4.8.1.3'te hesaplanmıştır (Çizelge 4.14). öz. elektrik tüketimi=82,6 [kWhe/T-kli]. Burada 2004 yılı baz alınmıştır.

$$\text{ÖzgülEl.mal.} \left[\frac{\$}{\text{T - kli}} \right] = \frac{82,6 [\text{kWhe/T - kli}]}{100} \times 8,03 \left[\frac{\$}{\text{kWhe}} \right] = 6,03 \left[\frac{\$}{\text{T - kli}} \right]$$

YKEM [\$/ton], kullanılan yakıt maliyeti ve elektrik maliyetinin toplamına eşittir.
YKEM [\$/T-kli] = toplam yakıt öz. Mal. + toplam el. öz. mal. (4.42)

$$\text{YKEM [$/T-kli]} = 11,55 [$/T-kli] + 6,03 [$/T-kli] = 17,58 [$/T-kli]$$

$$\text{YEK [GJ/T-kli]} = \text{yakıtın topl. kalori sarf.} + \text{el. yakıt sarf.} \quad (4.41)$$

EK-2 (Devam) Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

Yakıtın toplam kalori sarfiyatını yukarıda bulunmuştur, elektrik yakıt sarfiyatı ise Çizelge 4.14'te 2004 yılı baz alınarak özgül BE santral girişi=elektrik yakıt sarfiyatı=0,79 [GJ/T-kli]'dir. Eş. 4.41'de yerine koyarsak;

$$YEK [GJ/T-kli] = 3,5 [GJ/T-kli] + 0,79 [GJ/T-kli] = 4,29 [GJ/T-kli]$$

$$\text{Yıllar için öz. En. Mal. Artış oranı } [$/GJ] = \text{yıllık artış oranı}^{(yıl - 2005)} \quad (4.44)$$

$$\text{2010yılı için öz. En. Mal. Artış oranı} = 1.1^{(2010-2005)} = 1.61051 [$/GJ] \quad (\text{Bkz. Çiz.4.21})$$

$$KEM [$/GJ] = YKEM [$/ton]/YEK [GJ/ton] \quad (EK.5)$$

$$\text{2005 yılı KEM değeri} = 17,6./4,3 = 4.09 [$/GJ]$$

$$\text{2010-15-20 yılı öz.en.mal} \left[\frac{\$}{GJ} \right] = \text{2005 yılı öz.en.mal.} \times \text{yılki öz.en.mal.artış.oranı} \quad (4.46)$$

$$\text{2010 yılı öz.en.mal (KEM)} = 4,09 \times 1,61 = 6,59 [$/GJ]$$

Bu şekilde 2015 ve 2020 yılları için KEM [\$/GJ] değerleri bulunmaktadır.

Örnekler: TEM değerlerini bulmak için

Ele alacağımız örneklerde değişmeyen veriler;

$$\text{Şebeke verimi } [\%] = 78$$

$$\text{Termik santral oranı} = 0,7 \quad \text{termik santral verimi } [\%] = 0,36$$

$$\text{hidrolik santral oranı} = 0,3 \quad \text{hidrolik santral verimi } [\%] = 0,85$$

Kabuller

$$\text{kazan verimini} (\eta) = 1$$

$$\text{yoldaki toplam kayıpları} \left(\sum_{i=1}^n (\Delta k)_i \right) = 0$$

$$\text{faiz oranı (F, } [\%]) = 12$$

$$\text{işletme ömrü (n) (yıl)} = 30$$

$$Yİ [$/a] = 0$$

EK-2 (Devam) Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

Örnek 1. Önlem1. Verimli nakil sistemlerinde özgül ısı tasarrufu=0 [GJ/T-kli], özgül elektrik tasarrufu= 2,9 [kW/T-kli], UO=31 [%], TK=39043000 [ton/a], Özgül yatırım (ÖY)=4,13 [\$/t-kli]'dür. Bu önlemin tasarruf edilen birincil enerji maliyetini (TEM) hesaplamak için:

Almış olduğumuz önlemde, ısı tasarrufu olmayıp, elektrik tasarrufu mevcuttur. ÖBETP: ısı ve elektrik toplam tasarrufu, ÖBETP1: ısı tasarrufu, ÖBETP2'de elektrik tasarrufu olsun.

ÖBETP1=0 [GJbe/T-kli]= 0 [kcal/kg-kli] Eş.4.17'den faydalanarak bulunur.

ÖBETP2= 2,9 [kW/T-kli]=0,01 [GJbe/ton-kli] Eş. 4.20'den faydalanarak hesaplanır.

Şebeke girişindeki elektrik enerjisi=0,01/0,78=0,0128 [GJbe/ton-kli]]'dir.

Termik santral girişindeki elektrik enerjisi=0,0128×0,7/0,36 = 0,0249 [GJbe/ton-kli]

Hidrolik santral girişindeki elektrik enerjisi=0,0128×0,3/0,85 = 0,0045 [GJbe/ton-kli]

Santral girişindeki özgül birincil enerjisi=0,0249+0,0045=0,0294[GJbe/ton-kli]

Isı ve elektrik enerjisinin toplam birincil enerji değeri;

ÖBETP=ÖBETP1+ÖBETP2 = 0+0,0294=0,0294 [GJbe/ton-kli]

YTEBE [GJ/yıl] = ÖBETP [GJbe/ton-kli.]×TK [ton-kli./a]×UO [%] (EK.2)

YTEBE[GJ/yıl]=0,0294[GJbe/ton-kli.]×39043000[ton-kli./a]×0,31[%]

YTEBE[GJ/yıl]=355837 [GJ/yıl]

YA [\$/a] = TY [\$] × YAO[1/a] (4.7)

$$YAO = \frac{F(F+1)^{n_A}}{(F+1)^{n_A} - 1} = \frac{0,12 \times (0,12 + 1)^{30}}{(0,12 + 1)^{30} - 1} = 0,124 [1/yıl] \quad (2.4)$$

TY = ÖY [\$/ton-kli]×TKK [ton-kli/a]×UO [%] (4.8)

EK-2 (Devam) Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

$$TY = 4,13[\$/\text{ton-kli}] \times 39043000 [\text{ton-kli/a}] \times 0,31[\%] = 49986753 [\$]$$

Eş. 4.7’de yerine koyarsak $YA = 49986753 [\$] \times 0,124 [1/a] = 6198357,4 [\$/a]$ bulunur.

Yukarıdaki kabullerde $Y\dot{I}=0$ kabul ettiğimizden,

$$YTEBEM[\$/a] = YA [\$/a] \pm Y\dot{I} [\$/a] \quad (\text{EK.4})$$

$$YTEBEM[\$/a] = 6198357,4 [\$/a] \pm 0 [\$/a] = 6198357,4 [\$/a]$$

$$TEM [\$/GJ] = YTEBEM [\$/a] / YTEBE [GJ/yıl] \quad (\text{EK.1})$$

$$TEM [\$/GJ] = 6198357,4 [\$/a] / 355837 [GJ/yıl] = 17,4 [\$/GJ]$$

Örnek 2. Önlem 22. Önleyici bakım uygulamalarını (yalıtım, basınçlı hava kayıpları, bakım..) ele alırsak; $\dot{O}BETP1=0,025 [GJ/T-kli]$, $\dot{O}\dot{I}ETP2=1,5 [kW/T-kli]$, $UO=100 [\%]$, $TK=39043000 [\text{ton/a}]$, Özgül yatırım ($\dot{O}Y$)= $0,061 [\$/t-kli]$ ’dür Bu önlemin tasarruf edilen birincil enerji maliyetini (TEM) hesaplamak için:

Bu önlemden, ısı tasarrufu ve elektrik tasarrufu bir arada bulunmaktadır. $\dot{O}BETP$: ısı ve elektrik toplam tasarrufu, $\dot{O}BETP1$: ısı tasarrufu, $\dot{O}BETP2$ ’de elektrik tasarrufu olsun.

$\dot{O}BETP1=0,025 [GJbe/T-kli] = 6 [kcal/kg-kli]$ Eş.4.17’den faydalanarak bulunur.

$\dot{O}\dot{I}ETP2= 1,5[kW/T-kli]=0,0054 [GJbe/ton-kli]$ Eş. 4.20’den faydalanarak hesaplanır.

Şebeke girişindeki elektrik enerjisi= $0,0054/0,78=0,007 [GJbe/ton-kli]$ ’dir.

Termik santral girişindeki elektrik enerjisi= $0,007 \times 0,7/0,36 = 0,0136 [GJbe/ton-kli]$

Hidrolik santral girişindeki elektrik enerjisi= $0,007 \times 0,3/0,85 = 0,0025 [GJbe/ton-kli]$

Santral girişindeki özgül birincil enerjisi= $0,0136+0,0025=0,0161[GJbe/ton-kli]$

Isı ve elektrik enerjisinin toplam birincil enerji değeri;

EK-2 (Devam) Modelin sayısal olarak örneklendirilmesi

$$\text{ÖBETP} = \text{ÖBETP1} + \text{ÖBETP2} = 0,025 + 0,0161 = 0,0411 \text{ [GJbe/ton-kli]}$$

$$\text{YTEBE [GJ/yıl]} = \text{ÖBETP [GJbe/ton-kli.]} \times \text{TK [ton-kli./a]} \times \text{UO [\%]} \quad (\text{EK.2})$$

$$\text{YTEBE[GJ/yıl]} = 0,0411 \text{ [GJbe/ton-kli.]} \times 39043000 \text{ [ton-kli./a]} \times 1 [\%] = 1604667 \text{ [GJ/yıl]}$$

$$\text{YA [$/a]} = \text{TY [\$]} \times \text{YAO[1/a]} \quad (4.7)$$

YAO, faiz oranı ve işletme ömrü değişmeyeceği için örnek 1’de Eş.2.4’tekideğerle aynıdır.

$$\text{YAO} = 0,124 \text{ [1/yıl]}$$

$$\text{TY} = \text{ÖY [$/ton-kli]} \times \text{TKK [ton-kli/a]} \times \text{UO [\%]} \quad (4.8)$$

$$\text{TY} = 0,061 \text{ [$/ton-kli]} \times 39043000 \text{ [ton-kli/a]} \times 1 [\%] = 2381623 \text{ [\$]}$$

Eş. 4.7’de yerine koyarsak $\text{YA} = 2381623 \text{ [\$]} \times 0,124 \text{ [1/a]} = 295321 \text{ [$/a]}$ bulunur.

Yukarıdaki kabullerde $\text{Yİ} = 0$ kabul ettiğimizden,

$$\text{YTEBEM[$/a]} = \text{YA [$/a]} \pm \text{Yİ [$/a]} \quad (\text{EK.4})$$

$$\text{YTEBEM[$/a]} = 295321 \text{ [$/a]} \pm 0 \text{ [$/a]} = 295321 \text{ [$/a]}$$

$$\text{TEM [$/GJ]} = \text{YTEBEM [$/a]} / \text{YTEBE [GJ/yıl]} \quad (\text{EK.1})$$

$$\text{TEM [$/GJ]} = 295321 \text{ [$/a]} / 1604667 \text{ [GJ/yıl]} = 0,18 \text{ [$/GJ]}$$

Bu değerlerin Çizelge 4.10’daki TEM değerlerinden farklı çıkmasının sebebi, Excel’de hesapların çok hassas olarak yapılmasından, örnekteki değerlerin hassas alınmayıp, yuvarlatılmasından kaynaklanmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DALOĞLU Şehnaz
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 11.07.1983, Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 536 552 55 67 / 0 312 432 44 92
 e-mail : sehnazdaloglu@mynet.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Osman Gazi Üniversitesi Mak.Müh.Böl.	2004
Lise	Cumhuriyet Lisesi.	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006	Anadolu Yapı Denetim A.Ş.	Proje Müh.
2007	Kara Kuvvetleri Lojistik Komutanlığı	Proje Takip Uzm.

Yabancı Dil

İngilizce İleri