

Yüksek Fırınlarda Enerji Verimliliği Analizi: Kardemir A.Ş. Örneği

¹Murat ODABAŞ, ²Yusuf ÇAY, ³Enes KILINÇ

¹Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 78050, KARABÜK

²Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 54050, SAKARYA

³Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 78050, KARABÜK

Özet

Bu çalışmada, entegre demir çelik tesislerinde enerjiyi yoğun olarak tüketen yüksek fırınlarda enerji tasarrufu olanakları araştırılmıştır. Yüksek fırınlarda kullanılan demir ve karbon esaslı malzemeler fiziksel ve kimyasal olarak incelenmiş, enerji dengesi oluşturularak, enerji verimliliğini artırıcı noktalar tespit edilmiştir. Yüksek fırınların enerji tüketiminin Kardemir'in toplam enerji tüketiminin %58-60'ı olduğu görülmüştür. Mevcut durumda ton sıvı ham demir için yaklaşık 440 kg kok tüketildiği, yapılan yüksek fırın enerji dengesi hesapları sonucunda kok tüketiminin 400 kg'ın altına inebileceği tespit edilmiştir. Sonuç olarak alınacak tedbirler ile toplam %4,35 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Yüksek fırın, enerji verimliliği, enerji tasarrufu.

1. Giriş

Dünyadaki nüfus artışıyla birlikte, sanayileşmenin artması ve teknolojinin gelişmesi her geçen gün enerjiye olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir. Dünya enerji üretiminin önemli bir kısmı fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktadır (IEA, 2011). Enerji tüketiminin hızla artması, fosil kökenli yakıtların daha çok kullanılmasına neden olmaktadır.

Fosil kökenli enerji kaynaklarının hızla tükenmesi enerji tasarrufuna olan ilgiyi de giderek artırmaktadır. Ülkemizde, sanayide %15, yerleşim yerlerinde %35 ve taşımacılık maliyetlerinde %15 enerji tasarruf potansiyeli mevcuttur. Bu potansiyeller; yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edebilecek enerjiden daha yüksektir. Eğer enerji verimliliğine doğru, kararlı ve başarılı adımlar atılabilirse ülkemizdeki enerji talebi 2020 yılında %20 oranında (45 MTEP) azalacaktır (Terzi and Baykal, 2011). Ayrıca enerji tüketiminin azalması ile birlikte atmosfere salınan karbondioksit (CO₂) miktarı da azalacaktır. Böylece sera etkisi ile kaçınılmaz hale gelen iklim değişiklikleri riski de azaltılmış olacaktır. (Tütünoğlu vd., 2011).

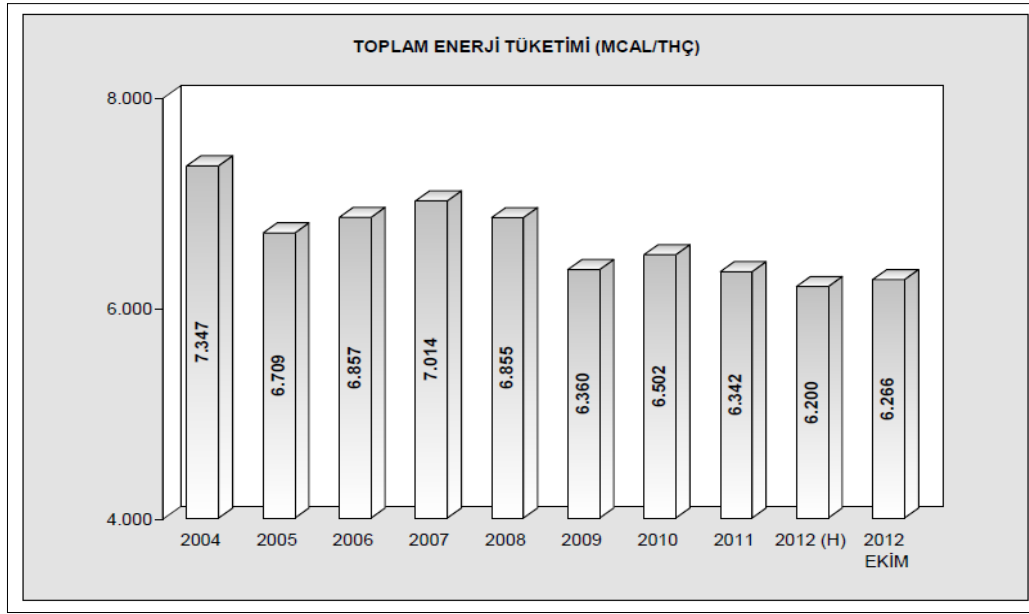
Demir-çelik sektörü yıllık yaklaşık 24 EJ (24x10¹⁸ J) enerji tüketimi ile en çok enerji tüketen sektörlerden birisidir ve dünyanın toplam enerji tüketiminin %5'ine karşılık gelmektedir (Xu and Cang, 2010).

Endüstri dalları içerisinde entegre demir çelik tesislerinde, ortalama rakamlara göre 1 ton ham çelik başına tüketilen enerji 4.500 – 6.500 Mcal (18,8 – 25,1 GJ) arasında değişmektedir (IISI, 1998). Yoğun enerji tüketicisi konumundaki bu tesisler, yüksek enerji tüketim değerleri nispetinde aynı zamanda yüksek enerji tasarruf potansiyeline de sahiptirler.

*Corresponding author: Address: Sakarya University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, 54050, Sakarya, TURKEY. E-mail address: ycay@sakarya.edu.tr.

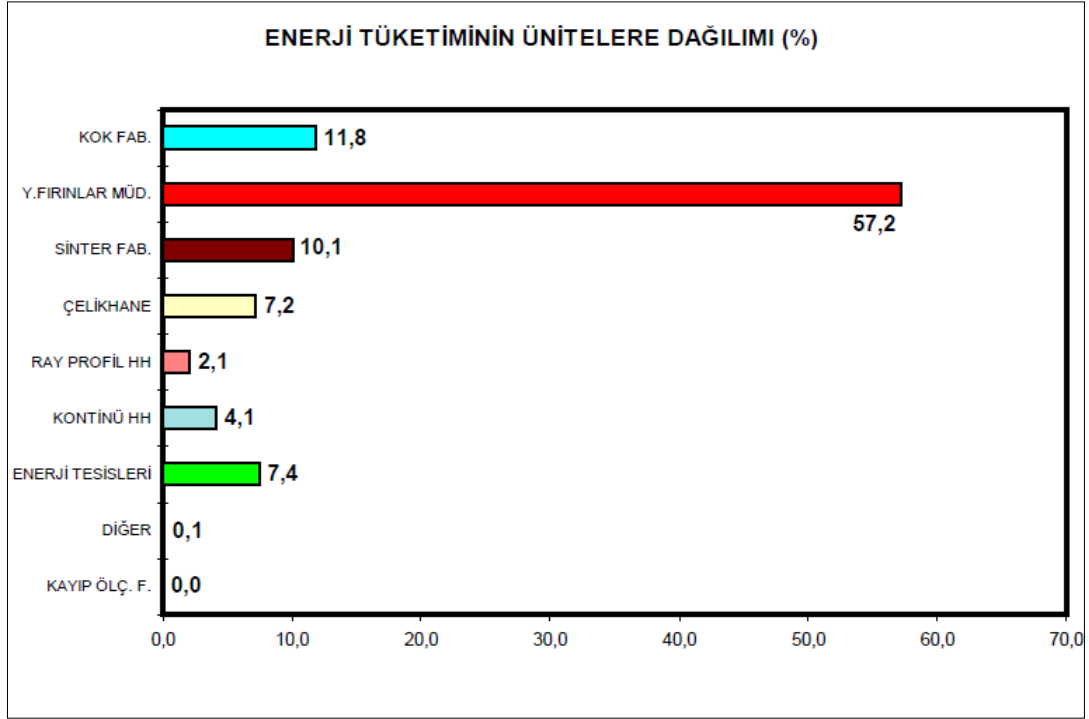
Kardemir’de spesifik enerji tüketimi 2012 Ekim ayı itibariyle yıllık ortalama 6.266 Mcal/THÇ’dir. Şekil 1’de Kardemir’de yıllara göre THÇ üretimi için gerekli enerji dağılımı görülmektedir.

Entegre demir çelik tesislerinde enerjiyi en yoğun kullanan ünite Şekil 2’de de görüldüğü gibi yüksek fırınlardır. Yüksek fırınlar genel enerji tüketimi içerisinde %57,2’lik pay ile Kardemir’in en yoğun enerji tüketen tesisleridir. Gerek enerji kayıplarının geri kazanımı gerekse proseste yapılacak iyileştirmeler ile yüksek miktarda enerji tasarrufu ve maliyet düşümü elde edilebilecektir.



Şekil 1. Kardemir yıllık enerji tüketimleri.

Yıllara göre dağılıma bakıldığında enerji tüketiminde belirgin düşüşler görülmektedir. Teknolojinin gelişmesi ve enerji kullanımını azaltacak yönde iyileştirmeler yapılması bunun en büyük sebeplerindedir.



Şekil 2. Kardemir enerji tüketiminin ünitelere dağılımı.

Yüksek fırınlarda enerji tasarruf yöntemlerinin araştırılması ile ilgili olarak literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Zhang vd. (2013), yaptıkları çalışmada demir ergitme prosesinin ve yardımcı malzemelerin operasyonel karakteristiklerinin çalışma özelliklerinin kok oranını başlıca etkileyen faktörler olduğunu tespit etmişlerdir. Daha sonra, kok hızı ile ana faktörler arasındaki ilişki haritası simüle edilmiştir. En düşük kok oranı için en iyi kombinasyon oluşturulmuştur. Optimizasyondan sonra kok miktarının 35,85 kg azaltılabilir olduğu gösterilmiştir.

Anishchenko vd. (2012), yüksek fırın verimliliği ve yüksek fırın üretkenliği üzerindeki temel teknolojik parametrelerin etkilerini ilişkilendiren bir formül elde etmiştir. Formül, modern yüksek fırın özelliklerini dikkate almıştır. Bu formüle göre hesaplamalar deneysel veriler ile yapılmıştır.

Bu çalışmada ülkemizde bulunan üç adet entegre demir çelik tesisinden biri olan Karabük Demir Çelik Fabrikaları A.Ş.'nin ana ünitelerinden biri olan yüksek fırınlarda enerji dengesi oluşturulmuş, enerji verimliliği incelenmiş ve potansiyel enerji kazanımları ortaya çıkarılmıştır.

2. Yüksek Fırımlar

Yüksek fırınlar demir cevherinin sıcak madene (pik demir) dönüştürüldüğü tesislerdir. Yüksek fırınlarda pik demir üretiminin yanı sıra cüruf, yüksek fırın gazı, baca tozu, yıkayıcı çamuru gibi yan ürünler de elde edilmektedir. Yüksek fırına şarj edilen malzemelerden (Fe)

dışındaki diğer elementler (pik içerisinde çözünemeyenler) ve oksitler cürufu oluşturmaktadır. Kullanılan hammadde kalitesine ve çalışma şartlarına bağlı olarak 1 ton sıvı pik ile birlikte 200 – 300 kg arasında cüruf üretilir.

Yüksek fırınlarda sıcak maden elde edilmesi için fırına cevher, pelet, sinter gibi demir kaynağı malzemeler, çakmak taşı, dolomit, kireç taşı, olivin gibi cüruf yapıcı malzemeler ve enerji kaynağı olan metalürjik kok şarj edilir. Bu malzemeler fırının üst bölgesinden şarj edilirken; kömür, katran, fuel oil, doğal gaz gibi enerji kaynakları ise fırının alt bölgesinden verilir. Fırın üst bölgesinden şarj edilen malzemelerden sadece kok fırın alt bölgesine kadar katı ve akkor halinde iner. Diğer malzemeler belirli aşamalar geçirerek fırın alt bölgesine sıvı olarak iner.

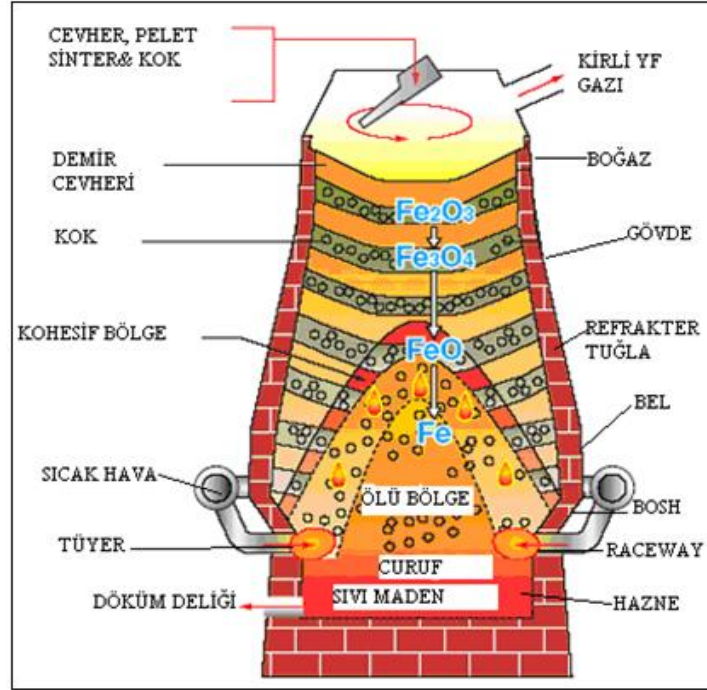
Yüksek fırın içerisinde hammaddelerin ergimesi ve demirin oksitlerinden ayrışarak indirgenme işlemleri CO gazı ile yapılır. İndirgenme ve parçalanma reaksiyonları sonrası açığa çıkan çeşitli gazlar fırın içerisinde belirli mertebelerde reaksiyona girerler. Bu reaksiyonlar sonrasında kullanılmayan gazlar yüksek fırını terk eder. Yüksek fırından ayrılırken beraberinde küçük boyutlu (toz) malzemeleri de fırından uzaklaştırır. Gaz içerisindeki bu malzemeler ayrıştırılıp temizlendikten sonra geriye kalan ürün, yüksek fırın gazı olarak adlandırılır ve fabrikanın çeşitli yerlerinde yakıt olarak kullanılır. Gaz içerisindeki toz ise baca tozu olarak adlandırılır ve gazdan ayrışarak toz silosunda birikir.

Yüksek fırın yanma havası üfleyicisi (blower) tarafından üretilen ve yüksek fırın sobalarında ısıtılarak sıcaklığı 1000 - 1250°C'ye kadar yükseltilecek hava, fırına tüyer (hava üfleme borusu) bölgesinden girer ve aşağıdaki reaksiyon meydana gelir:



Bu reaksiyondaki karbon, kok, kömür, katran, fuel oil, doğal gaz gibi ısı kaynaklarından sağlanırken; O₂ üfleyici (blower) tarafından sağlanan ön ısıtılmış havadan veya havaya karıştırılan saf oksijenden sağlanır.

Şekil 3'te de görüleceği üzere oluşan sıcak gaz (2000 - 2250°C) fırın alt bölgesinden üst bölgesine hareket ederken cevher, pelet, sinter gibi demir kaynağı malzemeler ile çeşitli aşamalarda reaksiyona girerek bu malzemelerin demir içeriklerini diğer oksitlerden ayırmaktadır. Ayrılan demir ve birlikte çözünen diğer elementler, pik olarak adlandırılır ve sıvı halde fırın hazne bölgesinde birikir. Hammaddelerin içerisinde bulunan demir dışındaki diğer oksitler ise cüruf olarak adlandırılır. Cüruf hazne bölgesinde sıvı pikin üzerinde sıvı halde birikir.



Şekil 3. Yüksek fırınların çalışma prosesi.

3. Metodoloji

3.1. Spesifik Enerji Tüketimi

Çalışmada genelden özele doğru detaylandırılan spesifik enerji tüketimi ve denge analiz yöntemleri kullanılmıştır. Spesifik enerji tüketimi yöntemi ve enerji denge analizi yöntemi; bir prosese giren enerjinin prosesi ne şekilde terk ettiğini net olarak belirlemek üzere seçilmiştir. Böylece prosesi terk eden enerjilerden olası kayıplar tespit edilmiş ve potansiyel kazançların elde edilmesi için önerilerde bulunulmuştur. Kullanılan yöntemlerde dönemsel etkilerin en aza indirilebilmesi amacıyla veriler ortalama olarak alınmış, özellikle detay analizlerde ton başına ya da üretim periyodu başına oluşan dengeler irdelenmiştir. Hesaplamalarda 2012 yılı verileri baz alınmıştır.

Bu tespitler yapılırken uluslararası bazda Uluslararası Demir Çelik Enstitüsü (IISI), ulusal bazda Elektrik İşleri Etüt İdaresi Ulusal Enerji Tasarrufu Merkezi (UETM) ve Japan International Cooperation Agency (JICA) tarafından önerilen, tüm dünyada sektör tarafından kullanılan spesifik enerji tüketim hesaplama metodu olan toplam enerji tüketiminin üretime olan oranından yararlanılmıştır.

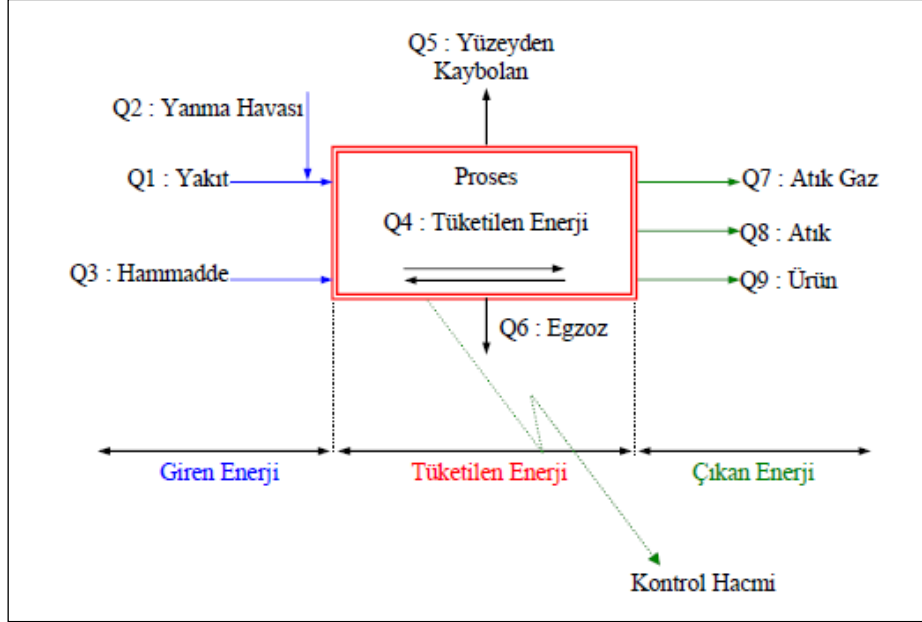
$$\text{Spesifik Enerji Tüketimi} = \frac{\text{Toplam enerji tüketimi (Mcal)}}{\text{Toplam üretim (ton)}} \quad (2)$$

3.2. Enerji Dengesi

Enerji denkliği analizi, en basit anlamda giren ve çıkan enerji kaynaklarının belirlenip birbirine eşitlenmesidir. Kontrol hacimleri için enerji denkliği şu şekilde yazılabilir (Çengel ve Boles, 2011):

$$\sum E_g = \sum E_c \quad (3)$$

Yüksek fırınlar için enerji dengesi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Yüksek fırınlar için enerji dengesi.

Şekilden de görüldüğü gibi yüksek fırınlar için enerji dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 \quad (4)$$

3.3. Yüksek Fırınlar İçin Enerji Dengesi

Yüksek fırınlar denge analizinde giren-çıkan dengesi, kontrol hacmine giren ve çıkan enerji denkleğinin oluşturulması ile hesaplanabilmektedir. Kardemir yüksek fırınlarına uygulanan enerji dengesi modelinde Binran'ın yapmış olduğu modellemelerden yararlanılmıştır (Binran, 1980). Yüksek fırınlar için enerji dengesi Tablo 1'de verilmiştir.

Oluşturulan modelde demirin indirgenme reaksiyonları sırasında oluşan ısı giderleri, diğer kayıplar hesaplandıktan sonra geriye kalan toplam ısıdan hesaplanmıştır.

Ekim 2012 ayına ait veriler veri toplanılan zaman periyodu içerisinde en stabil çalıştığı zamanlar olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda ortalama değerler baz alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan spesifik değerler için baz alınan değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Yüksek fırınlar için enerji dengesi.

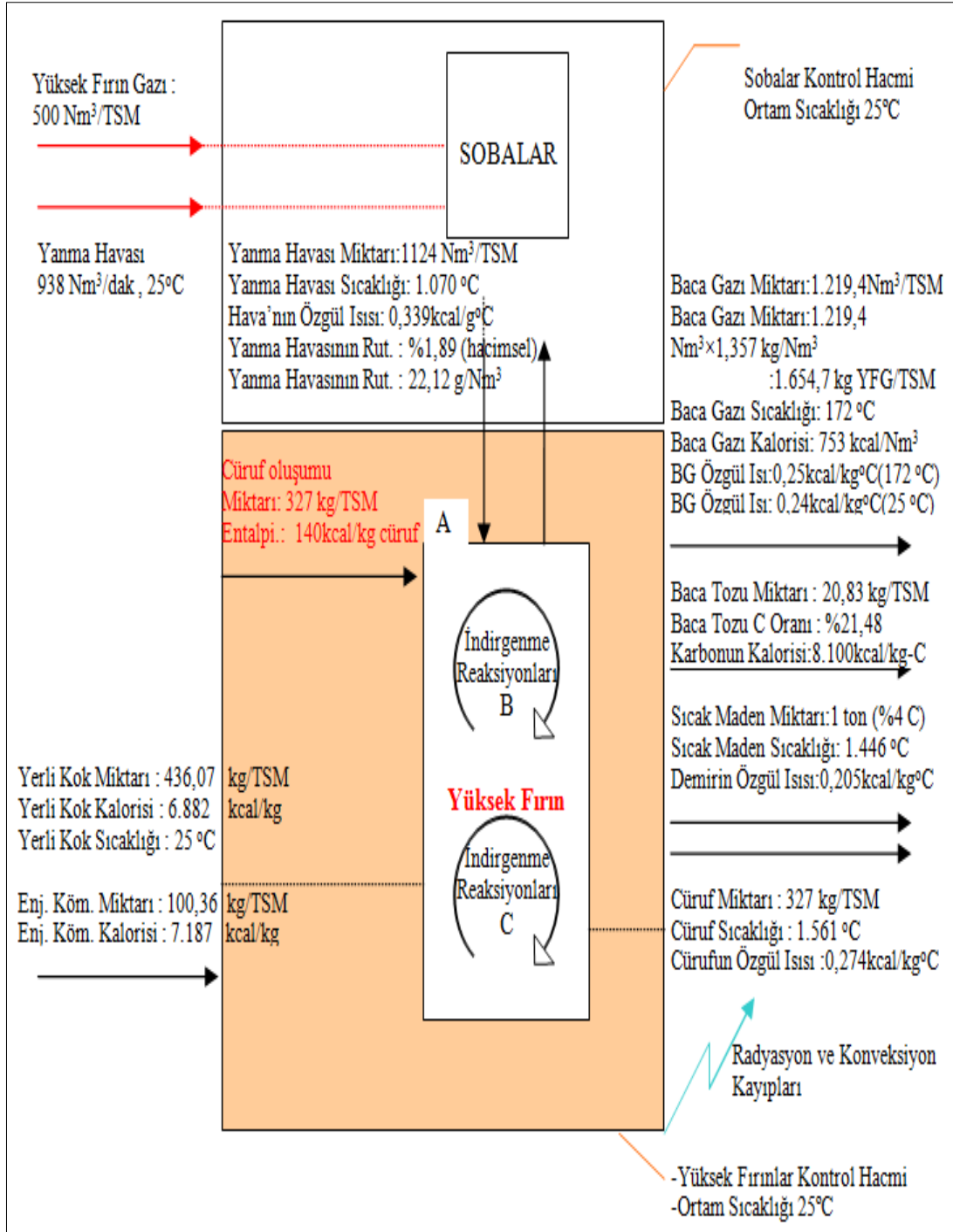
Maddeler		Heaplama	
Giren Enerji	1) Kokun yanmasıyla	Kok	Kalorifik Değer (kcal/kg)
	2) Yanma havasının duyulur ısısı	Yanma Havası	Özgül Isısı (kcal/Nm ³ K)
	3) Yanma havası içindeki nemin duyulur ısısı	Yanma Havasındaki H ₂ O	Özgül Isısı (kcal/kgK)
	4) Curuf üretim ısısı	Curuf	140 (kcal/kg-curuf)
Çıkan Enerji	5) Fe deoksidasyonu	Fe ₂ O ₂	1.777 (kcal/kg-Fe)
		Fe ₃ O ₄	1.585 (kcal/kg-Fe)
		FeO	1.151 (kcal/kg-Fe)
	6) Si deoksidasyonu	Si	6.750 (kcal/kg-Si)
	7) Mn deoksidasyonu	Mn	1.652 (kcal/kg-Mn)
	8) P deoksidasyonu	P	5.966 (kcal/kg-P)
	9) SM duyulur ısısı	Sıvı Maden	Entalpi (kcal/kgSM)
	10) Curufun duyulur ısısı	Curuf	Entalpi (kcal/kg-curuf)
	11) Baca gazının duyulur ısısı	YFG	Özgül Isı (kcal/Nm ³)
	12) Yanma havasındaki nemin atılması	Yanma havasındaki H ₂ O	3.183 (kcal/kg- H ₂ O)
13) Baca gazı ve Baca tozunun gizli ısısı	YFG	Kalorifik Değer Nm ³ /TSM	
	Baca Tozu	8.100 (kcal/kg-C)	
14) SM içindeki C	Sıcak Maden (SM)	8.100 (kcal/kg-C)	

Tablo 2. Yüksek fırınlar için cüruf, sıvı maden, hava, O₂, CO, CO₂, N₂, H₂, CH₄ ve H₂O gazları özgül ısıları (Binran, 1980).

Sıcaklık (°C)	Entalpi kcal/kg	Özgül Isılar										
		kcal/kg°C				kcal/Nm ³ °C						
		Cüruf	Cüruf	Sıcak Maden	Hava	O ₂	CO	CO ₂	N ₂	H ₂	CH ₄	H ₂ O
0	0		3.5%C	4.5%C								
100	19	0,185	0,232	0,233	0,311	0,312	0,311	0,387	0,311	0,306	0,366	0,341
200	40	0,198	0,230	0,231	0,312	0,320	0,313	0,432	0,312	0,309	0,425	0,348
300	60	0,210	0,228	0,229	0,315	0,325	0,315	0,450	0,313	0,309	0,454	0,352
400	81	0,219	0,226	0,227	0,318	0,330	0,318	0,466	0,316	0,310	0,483	0,357
500	105	0,226	0,224	0,225	0,321	0,334	0,321	0,480	0,319	0,311	0,511	0,363
600	129	0,231	0,222	0,223	0,324	0,339	0,325	0,493	0,321	0,312	0,541	0,369
700	152	0,235	0,220	0,221	0,328	0,343	0,329	0,504	0,325	0,313	0,567	0,375
800	177	0,238	0,218	0,219	0,331	0,347	0,332	0,515	0,329	0,314	0,593	0,381
900	202	0,242	0,216	0,217	0,334	0,351	0,335	0,523	0,331	0,316	0,618	0,387
1.000	228	0,245	0,214	0,215	0,338	0,354	0,338	0,532	0,334	0,317	0,641	0,393
1.100	256	0,249	0,212	0,213	0,340	0,356	0,341	0,540	0,338	0,319	0,664	0,400
1.200	293	0,255	0,210	0,211	0,343	0,359	0,344	0,547	0,340	0,321	0,684	0,406
1.300	336	0,260	0,208	0,209	0,345	0,362	0,346	0,553	0,342	0,323		0,411
1.400	400	0,288	0,206	0,207	0,348	0,364	0,348	0,559	0,345	0,325		0,418
1.500		0,279	0,204	0,205	0,350	0,366	0,351	0,565	0,347	0,326		0,482
1.600		0,271	0,202	0,203	0,355	0,368	0,353	0,570	0,350	0,328		0,488
1.700		0,262			0,354	0,370	0,355	0,570	0,351	0,330		0,493
1.800					0,356	0,372	0,357	0,579	0,353	0,332		0,498
1.900					0,358	0,374	0,358	0,583	0,354	0,334		0,502
2.000					0,359	0,376	0,360	0,587	0,356	0,336		0,506

4. Bulgular ve Tartışma

4 nolu yüksek fırın işletme verileri Tablo 3'te, bu veriler doğrultusunda oluşturulan enerji dengesi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. 4 nolu yüksek fırın enerji dengesi.

Tablo 3. 4 nolu yüksek fırın işletme verileri.

GÜNLER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Sıcak Maden Üretimi (ton)	1230	1.332	1.296	1.152	1.260	1.307	1.337	437	1.237	1.310	1.228	1.312	1.064	1.042	1.180	969
Hava Miktarı (Nm ³ /dak)	962	994	991	870	967	1.003	1.001	855	963	972	918	976	808	819	892	861
Hava Sıcaklığı (°C)	1.048	1.050	1.038	1.059	1.072	1.077	1.134	1.066	1.070	1.076	1.070	1.078	1.074	1.079	1.090	1.079
Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	201	195	202	194	202	213	198	226	190	163	162	168	169	189	181	177
Hava Rutubeti (gr/Nm ³)	18,70	17,01	21,53	21,07	29,67	27,75	25,58	29,50	32,95	22,37	22,16	20,63	19,03	23,43	18,46	17,89
Analizler %																
Maden Sıcaklığı (°C)	1.451	1.448	1.446	1.438	1.418	1.443	1.433	1.431	1.456	1.458	1.455	1.448	1.441	1.454	1.425	1.435
Cüruf Hacmi (kg/TSM)	338	330	334	330	310	323	337	319	319	321	340	338	333	319	331	348
C (%)	4,05	3,96	3,93	3,82	3,93	3,96	3,94	4,07	4,11	3,95	4,03	3,85	4,02	4,05	3,91	3,94
Si (%)	0,49	0,42	0,42	0,44	0,37	0,42	0,46	0,66	0,68	0,47	0,46	0,37	0,39	0,47	0,37	0,46
Mn(%)	0,95	0,88	0,88	0,87	0,70	0,80	0,70	0,80	0,77	0,70	0,72	0,72	0,71	0,77	0,64	0,73
P(%)	0,072	0,066	0,069	0,066	0,061	0,066	0,090	0,100	0,091	0,088	0,086	0,091	0,091	0,092	0,090	0,093
GÜNLER	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	ORT
Sıcak Maden Üretimi (ton)	1.261	1.329	1.354	1.375	1.321	1.183	1.236	987	1.224	1.280	1.258	1.201	1.202	1.249	1.092	1.201
Hava Miktarı Nm ³ /dak	969	965	1.026	1.029	1.007	898	961	914	975	988	931	895	905	952	819	938
Hava Sıcaklığı (°C)	1.074	1.072	1.081	1.067	1.070	1.091	1.086	1.069	1.080	1.029	1.076	1.043	1.062	1.046	1.049	1.070
Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	187	162	183	166	176	176	174	125	152	161	115	148	131	132	101	172
Hava Rutubeti (gr/Nm ³)	18,33	17,65	18,46	19,00	19,34	18,15	19,27	19,55	21,59	21,34	23,85	22,07	25,89	25,93	27,57	22,12
Analizler %																
Maden Sıcaklığı (°C)	1.462	1.452	1.473	1.461	1.454	1.427	1.453	1.436	1.454	1.469	1.429	1.463	1.449	1.449	1.408	1.446
Curuf Hacmi (kg/TSM)	338	348	366	328	316	318	326	316	320	311	313	296	316	329	332	227
C (%)	3,92	3,84	4,07	3,95	3,97	3,87	3,99	4,18	3,97	4,03	3,97	4,04	4,07	4,11	3,80	3,98
Si (%)	0,53	0,42	0,62	0,51	0,45	0,45	0,52	0,41	0,53	0,55	0,31	0,62	0,46	0,44	0,23	0,46
Mn(%)	0,77	0,69	0,89	0,81	0,78	0,69	0,78	0,78	0,70	0,84	0,69	0,88	0,83	0,80	0,61	0,77
P(%)	0,093	0,092	0,093	0,091	0,096	0,093	0,092	0,082	0,068	0,071	0,067	0,066	0,069	0,069	0,065	0,081

Tablo 4. Yüksek fırın gazı özgül ısısı.

YÜKSEK FIRIN GAZININ ÖZGÜL ISISI								
			Cp (kJ / kgK)	Cp (kJ / kgK)	Cp (kcal / kmolK)	% Vol	kg/kmol	kcal/kmolK
GAZ BİLEŞENLERİ	N ₂	28	1,0413	0,2487	6,9626	0,4980	13,9440	3,4674
	CO	28	1,0417	0,2487	6,965	0,2380	6,6640	1,6577
	CO ₂	44	0,8396	0,2005	8,8222	0,2180	9,5920	1,9232
	H ₂	2	14,1931	3,3893	6,7786	0,0380	0,0760	0,2576
	CH ₄	16	2,2502	0,5373	8,5975	0,0080	0,1280	0,0688
SIC. K	298	2,9800				1,0000	30,4040	7,3747
SIC. °C	25					Cp=	0,2430	kcal/kgK
YÜKSEK FIRIN GAZININ ÖZGÜL ISISI								
			Cp (kJ / kgK)	Cp (kJ / kgK)	Cp (kcal / kmolK)	% Vol	kg/kmol	kcal/kmolK
GAZ BİLEŞENLERİ	N ₂	28	1,0466	0,2499	6,9979	0,4980	13,9440	3,4850
	CO	28	1,0549	0,2519	7,0533	0,2380	6,6640	1,6787
	CO ₂	44	0,9797	0,234	10,294	0,2180	9,5920	2,2441
	H ₂	2	14,4873	3,4596	6,9191	0,0380	0,0760	0,2629
	CH ₄	16	2,7145	0,6482	10,3715	0,0080	0,1280	0,0830
SIC. K	452	4,5200				1,0000	30,4040	7,7536
SIC. °C	172					Cp=	0,2550	kcal/kgK

Enerji Girdileri:

Kokun yanmasıyla üretilen enerji:	<u>3.001.033 kcal/TSM.</u>
Enjeksiyon kömürünün yanmasıyla üretilen enerji:	<u>721.287 kcal/TSM.</u>
Yanma havasıyla giren enerji:	<u>399.470 kcal/TSM.</u>
Yanma havası içindeki nem ile gelen enerji:	<u>8.861 kcal/TSM.</u>
Cüruf üretiminde ortaya çıkan ısı:	<u>45.780 kcal/TSM.</u>

Giren Toplam Enerji: 3.876.432 kcal/TSM

Enerji Çıktıları:**(Fe) Demirin deoksidasyon ısısı ve diğerleri**

Fe₂O₃, Fe₃O₄ ve FeO'nun indirgenme reaksiyonları sırasında ihtiyaç duyulan ısı bu kapsamda proses gereği harcanan ısı olarak kabul edilmektedir. Burada harcanan enerji toplam enerji dengesinde kalan kısım içerisinde kabul edilmiştir.

Sıcak maden içerisindeki Si'nin enerjisi:	<u>31.050 kcal/TSM.</u>
Sıcak maden içerisindeki Mn'nin enerjisi:	<u>12.720 kcal/TSM.</u>
Sıcak maden içerisindeki P'nin enerjisi:	<u>4.832 kcal/TSM.</u>
Sıvı maden ile çıkan enerji:	<u>291.303 kcal/TSM.</u>

Cüruf ile çıkan enerji:	<u>138.401 kcal/TSM.</u>
Yüksek fırın gazı ile çıkan enerji:	<u>65.476 kcal/TSM.</u>
Yanma havasının kurutulması için tüketilen enerji:	<u>79.135 kcal/TSM.</u>
Sıcak maden içindeki C ile çıkan enerji:	<u>322.380 kcal/TSM.</u>
Yüksek Fırın Gazının gizli ısı ile çıkan enerji:	<u>918.208 kcal/TSM.</u>
Baca tozu içerisindeki C oranı:	<u>36.241 kcal/TSM.</u>

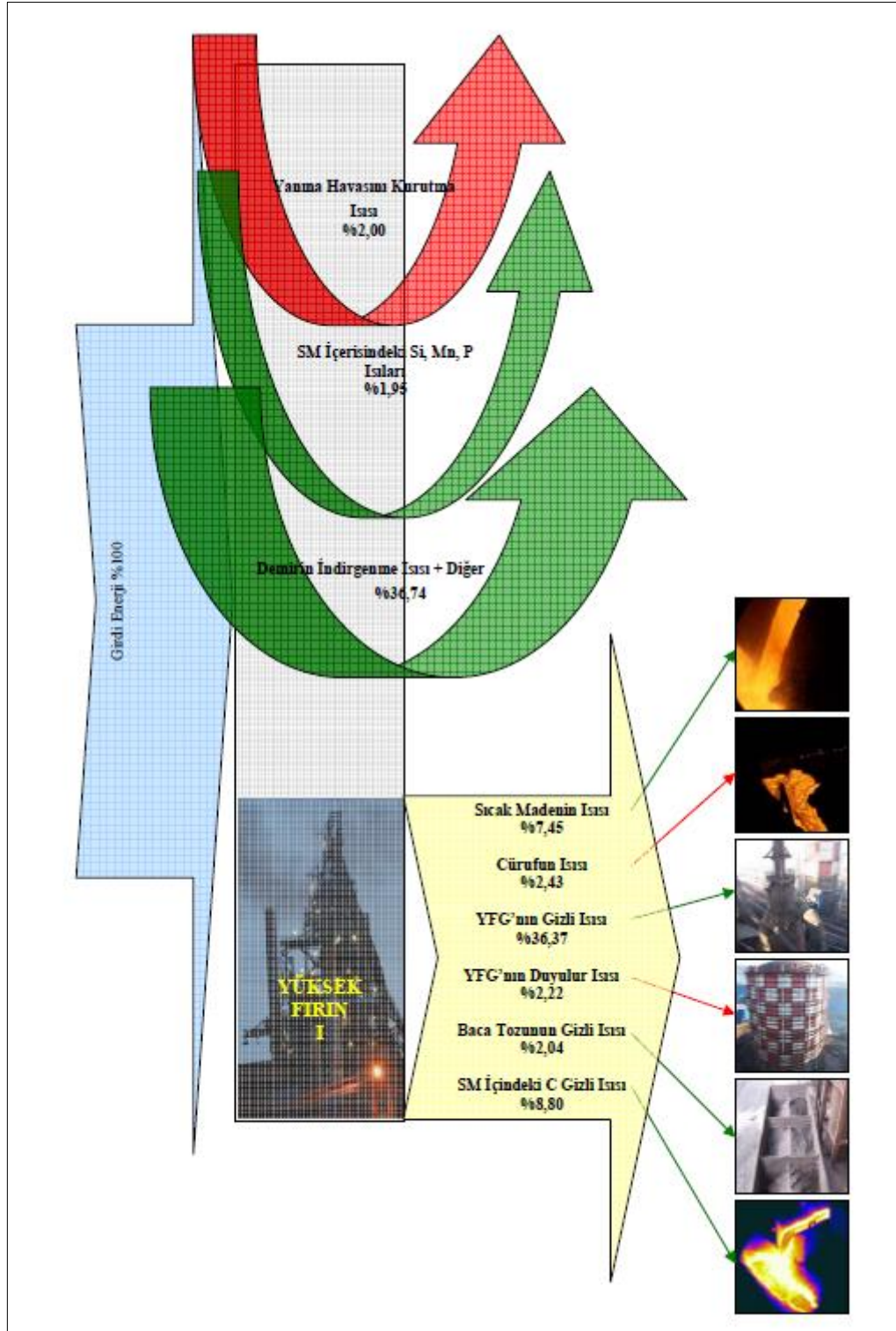
Çıkan Toplam Enerji: 3.876.432 kcal/TSM

Hesaplamalar sonucu oluşan 4 nolu yüksek fırın enerji dengesi tablosu Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Hesaplamalar sonucu oluşan 4 nolu yüksek fırın enerji dengesi.

Giren Enerji (3.876.432 kcal/TSM)	kcal	%
Kokun yanmasıyla prosese giren	3.001.033	77,4
Enjeksiyon kömürünün yanmasıyla giren	721.287	18,6
Yanma havasının duyulur ısı	399.470	10,3
Cüruf üretimi esnasında oluşan enerji	45.780	1,2
Yanma havası içindeki nemin duyulur ısı	8.861	0,2
Çıkan Enerji (3.876.432 kcal/TSM)	kcal	%
Demirin indirgenme ısıları + diğer	1.976.686	51,0
Baca gazının (YFG) taşıdığı gizli ısı	918.208	23,6
Sıvı maden içindeki karbonun gizli ısı	322.380	8,3
Sıcak madenin duyulur ısı	291.303	7,5
Cürufun duyulur ısı	138.401	3,5
Yanma havasını kurutmak için gerekli ısı	79.135	2,0
Yüksek fırın gazının duyulur ısı	65.476	1,6
Baca tozunun gizli ısı	36.241	0,9
Sıcak maden içerisindeki Si' nin ısı	31.050	0,8
Sıcak maden içerisindeki Mn' nin ısı	12.720	0,3
Sıcak maden içerisindeki P' nin ısı	4.832	0,1

Bu sonuçlara göre 4 nolu yüksek fırın için Sankey Diyagramı oluşturulmuş ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. 4 nolu yüksek fırın için Sankey Diyagramı.

Enerji dengesi kurulan 4 nolu yüksek fırında hangi noktalarda enerji tasarrufu yapılabileceği örneklerle ele alınmış ve enerji verimliliğinin artırılması yönelik yapılan çalışmalar ile birlikte Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Enerji tasarruf imkanları ve enerji verimliliğine yönelik yapılan çalışmalar.

Projeler	Tahmini Enerji Tasarruf Oranı (%)	Tahmini Finansman İhtiyacı (USD)	Geri Kazanım Süresi
Yüksek Fırın Kok Oranının Azaltılması	0,90	300.000	10 gün
Yüksek Fırın Yakma Havaasının Oksijenle Zenginleştirilmesi	0,40	350.000	27 gün
Soba Bacasına Konulacak Ekonomizer ile Soba Yakma Havaasının Ön Isıtılması	0,80	800.000	30 gün
Şarj Malzemelerinin Dağılımının Kontrolü	0,45	400.000	25 gün
Cüruf Isısının Geri Kazanımı	0,15	250.000	76 gün
Top Gas Recovery Turbine (TRT) uygulaması	0,85	10.000.000	1 yıl
Soba Üfleme - Bekleme - Isıtma Adımlarının İyileştirilmesi	0,40	650.000	50 gün
Yüksek Fırın Kontrol Sisteminin İyileştirilmesi	0,15	350.000	72 gün
Yüksek Fırına İlave Yakıt Enjeksiyonu	0,15	300.000	62 gün
Yüksek Fırın Blower Havaasından Rutubet Giderme	0,10	300.000	3 ay

5. Sonuç ve Öneriler

Yüksek fırında kullanılan demir esaslı malzemeler ve karbon esaslı yakıtlar fiziksel ve kimyasal olarak incelenmiştir. Enerji balansı yapılmış, enerji verimliliğinin artırılması ve enerji geri kazanımı için açık noktalar belirlenmiştir. Bunlardan enerji geri kazanımı olarak cüruf ısısının geri kazanımı ve baca gazı ısısı geri kazanımı belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Ayrıca yüksek fırın prosesinde yanma verimini arttıracak çalışmalar da büyük miktarda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu çalışmada pülverize kömürün yanma verimi artırılmış ve kok yakıt tüketiminde tasarruf sağlanmıştır. Spesifik enerji tüketiminde %1,4 tasarruf sağlanmıştır. Bu değer çok düşük görülmesine karşın yapılan hesaplamalarda yıllık 4.246 TEP'e denk gelmektedir.

Kaynaklar

Anishchenko SA, Fedorenko DY, Kravchenko VP. Influence of technological parameters on blast-furnace productivity. Steel in Translation 2012; 41: 4-9.

Binran T. Japanese Steel Making Handbook. 3rd ed. Nippon Tekko Kyokai: Iron and Steel Institute of Japan; 1-6, 1-80; 1980.

Çengel YA, Boles MA. Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla. 5. Baskı. Çeviri Editörü: Pınarbaşı A. İzmir: Güven Bilimsel; 753-757, 764; 2011.

Energy Use in the Steel Industry. Brussels: International Iron and Steel Institute; 12-64; 1998.

Terzi ÜK, Baykal R. Efficient and effective use of energy: a case study of Tofas. Environmental Research, Engineering and Management 2011; 1 (55): 29-33.

Tütünoğlu Y, Güven A, Öztürk İT. Cam temperleme fırınında enerji analizi. III. Enerji Verimliliği Kongresi. Kocaeli; 153-166; 2011.

Xu C, Cang D. A brief overview of low CO₂ emission technologies for iron and steel making. International Journal of Iron and Steel Research 2010; 17 (3): 1-7.

Zhang H, Feng ZH, Wang YH. Optimization research of the comprehensive coke rate of blast furnace based on the operational characteristic of auxiliary materials. Switzerland: Trans Tech Publications; 3-9, 260-261; 2013.

Kısaltmalar

BFSS	: Yüksek fırın baca simülatörü
CFD	: Computational fluid dynamics
IEA	: International Energy Agency
IISI	: Uluslararası Demir Çelik Enstitüsü
JICA	: Japan International Cooperation Agency
THÇ	: Ton ham çelik
UETM	: Ulusal Enerji Tasarrufu Merkezi