

Bir Kâğıt Fabrikasındaki Kojenerasyon Tesisinin Enerji Ve Ekserji Analizi

Ahmet KAYA*, M. Mustafa DUYMAZ, Muharrem İMAL

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Kahramanmaraş, Türkiye

ÖZET: Bu çalışmada; Türkiye’de çalışmakta olan Kahramanmaraş Kağıt San. ve Tic. A.Ş. bünyesindeki Kojenerasyon Tesisinin enerji ve ekserji analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Kojenerasyon tesisinde belirlenen otuz bir adet düğüm noktasının termodinamik özellikleri dikkate alınarak enerji ve ekserji değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ekipmanların ayrı ayrı enerji ve ekserji dengeleri kurulmuş, ortalama kayıp ve yıkıma uğramış olan enerji ve ekserjiler hesaplanmış, kayıp enerji oranı ve yok olan ekserji oranı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; toplam enerji kaybının %42,92’si ile en yüksek enerji kaybı ve toplam yok olan ekserjinin %87.3’ü ile en yüksek ekserji kaybı oranı olan ekipman, kazan olarak bulunmuştur. Elde edilen termodinamik özellikler yardımıyla Kojenerasyon Sisteminin ısı ve ikinci yasa verimleri sırasıyla %80.15 ve %32.75 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Ekserji Analizi, Kojenerasyon Tesisi, İkinci Kanun Analizi, Enerji Analizi, Termodinamik Analiz*

Energy and Exergy Analyses of Co-Generation Plant at a Paper Factory

ABSTRACT: In this study; the results obtained by energy and exergy analysis of the Cogeneration Plant, which operates in Turkey, within the Kahramanmaraş Kağıt San. ve Tic. A.Ş. were evaluated. Energy and exergy values were calculated considering thermodynamics properties of thirty-one node points, which identified in Cogeneration Plant. Individual energy and exergy balance of equipment were established based on the obtained results. Average lost and destroyed energy and exergy were calculated. Lost energy rate and vanished exergy rate were determined. According to the results, the boiler was found to be highest exergy loss rate equipment with 42,92% of the total energy loss and 87,3% of the exergy loss. The thermal and second law efficiency of Cogeneration Plant were calculated 80.15% and 32.57%, respectively, with the help of obtained thermodynamic properties.

KeyWords: *Exergy Analysis, Cogeneration Plant, Second Law Analysis, Energy Analysis, Thermodynamic Analysis*

1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun ve teknolojiye olan ihtiyacının sürekli artışına paralel olarak sanayi devriminin başından bu yana ülkeler sürekli sanayileşmekte, bu değişimin kaçınılmaz sonucu olarak ise insanoğlunun enerji ihtiyacı günden güne artmaktadır. Enerji ihtiyacındaki bu artışı karşılayacak olan enerji kaynakları ise gün geçtikçe azalmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında, enerji üretim ve tüketim miktarı her geçen gün daha fazla önem arz etmektedir.

Sanayi kuruluşlarının enerji ihtiyaçları, kamu tüketim değerlerinin oldukça üstünde olmakta ve birçok sanayi kuruluşunda elektrik enerjisinin yanı sıra su, su buharı, yağ vb. maddelerin yardımıyla termal enerji kullanımı da prosese dâhil olmaktadır. Elektrik ve buhar kullanımının bir arada olduğu proseslerde bu iki ihtiyacı da aynı zamanda karşılayabilecek sistemler kurulmuştur. Bu sistemlere Kojenerasyon Tesisi adı verilmektedir. Kojenerasyon sistemleri; lokal olarak

uygulanabilmesi, prosesin bir çok farklı ihtiyacını bir arada karşılayabilmesi, yüksek verimlilik değerlerine sahip olması ve değişken proses ihtiyaçlarına karşı toleranslı olması gibi sebeplerle, ilerleyen teknoloji ile birlikte sanayi kuruluşlarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu tesislerin yüksek verimlerde kullanılabilmesi için öncelikle tesisin enerji analizi yapılmalı, enerji analizinin yanı sıra ekserji analizi de yapılarak sistem ekipmanları ve sistem genelinde verimli olmayan noktalar tespit edilip, bu noktalarda yapılabilecek düzeltmeler belirlenmelidir.

Literatürde enerji santrallerinin enerji ve ekserji analizine yönelik çalışmalar mevcuttur. Ballı (2008); Eskişehir de kurulu bulunan gaz türbin motorlu kojenerasyon ve gaz-dizel motorlu trijenerasyon sistemlerinin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizini yapmıştır [1]. Yazıcı ve Selbaş (2011) ideal Rankine çevrimiyle çalışan bir buharlı güç santralinin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Sistemin toplam tersinmezliğini hesaplayarak en fazla tersinmezlik

* Sorumlu Yazar: kaya38@ksu.edu.tr

üreten elemanı belirlemişlerdir [2]. Rahim ve Gündüz (2013) gaz türbinli bir kojenerasyon santralının enerji ve ekserji analizini yaparak santraldeki kayıpları belirlemişlerdir [3]. Colpan ve Yesin (2006) gaz/buhar çevrimli kojenerasyon tesisine termodinamik ve ekonomik analiz uygulamışlardır [4]. Coşkun vd. (2013) Türkiye’de çalışmakta olan Çayırhan termik santralının enerji ve ekserji analizini yapmışlar, elde edilen termodinamik özellikler yardımı ile termik santralin ısı ve ikinci yasa verimlerini belirlemişler ve ekserji kayıplarının en yüksek olduğu ekipmanları tespit etmişlerdir [5]. Sevilgen (2004) gaz-türbin gruplu bir kojenerasyon sisteminin ekserjoekonomik analizini yapmıştır [6]. Rosen ve Dinçer (2004) kömür yakıtlı bir enerji santralinde farklı ölü hal şartları belirleyerek enerji ve ekserji analizi yapmışlardır [7]. Ünal ve Özkan (2014), Tunçbilek Termik Santralinde sistemin geneline ve her bir ekipmana ayrı ayrı enerji ve ekserji analizini yaparak sistem ekipmanlarından enerji ve ekserji kayıplarının en yoğun olduğu ekipmanı belirlemiş ve bu ekipmanda yapılabilecek düzeltmelere dair önerilerde bulunmuşlardır [8]. Kaya (2008) ideal Rankine çevrimine göre çalışan bir buharlı güç çevrimine ekserji analizini uygulamış ekserjistik verimin artması için yapılabilecek iyileştirmeleri belirlemiştir [9].

Bu çalışmada, Kahramanmaraş’ta çalışmakta olan Kahramanmaraş Kağıt San. ve Tic. A.Ş.’de kömür yakıtlı kojenerasyon tesisinin her bir ünitesine enerji ve ekserji analizi yapılarak, enerji ve ekserji verimleri ile enerji ve ekserji kayıpları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve kayıpların azaltılması için çözüm önerileri sunulmuştur.

2. SÜREKLİ AKIŞLI SÜREKLİ AÇIK SİSTEMLERİN ENERJİ ANALİZLERİ

Genel bir sürekli akış sistemi için kütleli korunumu,

$$\sum_g \dot{m} = \sum_{\zeta} \dot{m} \quad (1)$$

şeklindedir.

Sürekli akışlı açık sistemler için enerjinin korunumu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}_g - \dot{E}_{\zeta} = dE_{sistem} / dt = 0 \quad (2)$$

veya

$$\text{Enerjinin korunumu: } \dot{E}_g = \dot{E}_{\zeta} \quad (3)$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{ısı, iş veya kütle ile} \\ \text{kontrol hacmine} \\ \text{giren enerji} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{ısı, iş veya kütle ile} \\ \text{kontrol hacminden} \\ \text{çıkan enerji} \end{array} \right)$$

Akışkanın birim kütesinin enerjisi $\theta = h + ke + pe = h + (V^2/2) + gz$ olduğundan sürekli akışlı açık bir sistemde ısı, iş ve kütle ile aktarılan enerji için enerjinin korunumu denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\zeta} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_g \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (4)$$

Bir girişli ve bir çıkışlı sürekli akışlı açık sistem için enerjinin korunumu denklemi:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) \quad (5)$$

şeklindedir.

Bu denklemler kütle debisi \dot{m} ile bölünürse, birinci yasa birim kütle için ifade edilmiş olur.

$$q - w = h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (6)$$

Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilirse, yukarıda verilen denklem aşağıdaki gibi olur.

$$q - w = h_2 - h_1 \quad (7)$$

Isıl verim ifadesi aşağıda verilen denklem kullanılarak elde edilmiştir [10];

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{giren}} \quad (8)$$

2.1. Ekserji Bileşenleri

Nükleer, manyetik, elektriksel ve yüzey gerilme etkilerinin yokluğunda bir sistemin toplam ekserjisi dört ayrı bileşene bölünebilir: fiziksel ekserji $\dot{E}x^{PH}$, kinetik ekserji $\dot{E}x^{KN}$, potansiyel ekserji $\dot{E}x^{PT}$ ve kimyasal ekserji $\dot{E}x^{CH}$;

$$\dot{E}x = \dot{E}x^{PH} + \dot{E}x^{KN} + \dot{E}x^{PT} + \dot{E}x^{CH} \quad (9)$$

Özgül ekserji aşağıdaki şekilde tanımlanır [1,8].

$$ex = ex^{PH} + ex^{KN} + ex^{PT} + ex^{CH} \quad (10)$$

Saf maddelerin fiziksel ekserjisi genel olarak;

$$ex^{PH} = (u - u_0) - P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (11)$$

Fiziksel ekserji kısaca;

$$ex^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (12)$$

Toplam fiziksel ekserji akısı ise;

$$\dot{E}x^{PH} = \dot{m}.ex^{PH} \quad (13)$$

şeklinde yazılabilir.

Kimyasal ekserjiyi değerlendirirken çeşitli alternatif teoriler ortaya atılmıştır. Saf maddeler için standart kimyasal ekserji değerleri ilgili çizelgelerden okunarak hesaplamalarda kullanılabilir. Gaz karışımları için ise aşağıdaki eşitlikten yararlanılır [1,8].

$$\bar{e}x^{CH} = \sum x_k \bar{e}x_k^{CH} + \bar{R}T_0 \sum x_k \ln x_k \quad (14)$$

Bu denklemde ex_k^{CH} terimi için standart kimyasal ekserji 2.5 kJ/kg olarak seçilmiştir [8].

2.2. Ekserji Kaybı ve Yıkımı

Sistemin herhangi bir elemanı için birim zamanda kaybedilen ekserji miktarı E_{ky} ;

$$\dot{E}x_{ky} = \dot{E}x_Q - \dot{E}x_W + \sum \dot{E}x_{m,g} - \sum \dot{E}x_{m,\xi} \quad (15)$$

veya

$$\dot{E}x_{ky} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} - W + \sum \dot{m}ex_g - \sum \dot{m}ex_\xi \quad (16)$$

şeklinde ifade edilir. Sistemin tümünde yok edilen ekserji ise, her bir elemanda yok edilen ekserjinin toplamıdır.

$$\sum_{x=1}^n \dot{E}x_{ky_x} = \dot{E}x_{ky_1} + \dot{E}x_{ky_2} + \dot{E}x_{ky_3} + \dots + \dot{E}x_{ky_n} \quad (17)$$

Herhangi bir üniteye veya elemanda yok edilen ekserjinin sistemin tümünde yok edilen ekserjiye oranı (y_k), ele alınan birimin kayıp enerjisinin ne kadarına neden olduğunu gösterir [8].

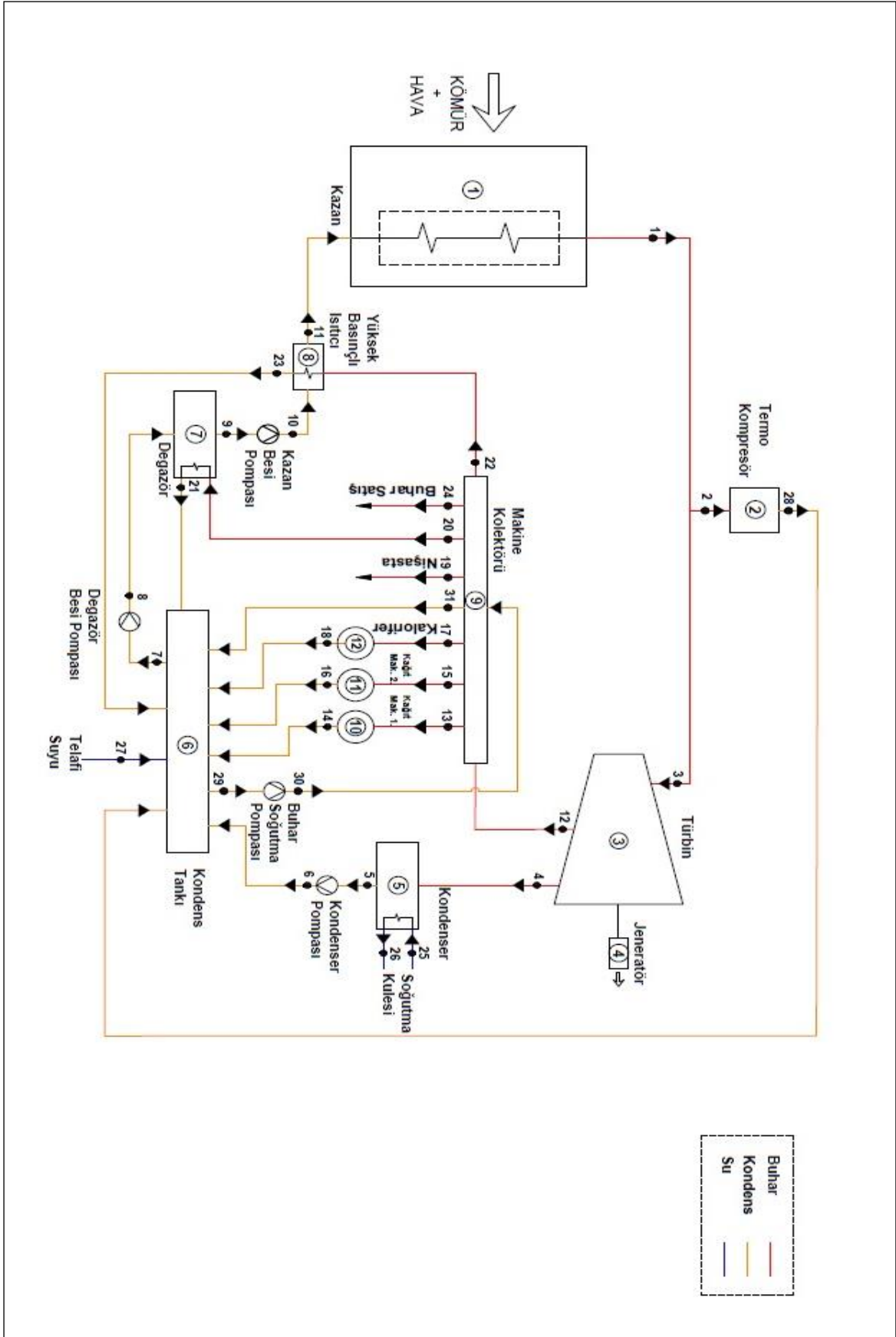
İkinci kanun verimi ise aşağıda verilen formülle ifade edilir [8];

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\text{kayıp ekserji}}{\text{giren ekserji}} = 1 - \frac{\dot{E}x_{ky}}{\dot{E}x_g} \quad (18)$$

3. MATERYAL METOD

Bu çalışmanın yapılacağı kojenerasyon tesisi, Türkiye'de Kahramanmaraş ilinde bulunan Kahramanmaraş Kağıt Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde çalışmaktadır. Tesis Kağıt Fabrikasının prosesinde kullanılan buhar ve elektrik ihtiyacını karşılamak için kurulmuştur. Kojenerasyon tesisinde 11.7MWe gücünde bir adet buhar türbini, 59MW (ısı) güce sahip bir adet pulverize kömürlü buhar kazanı, bir adet kondenser, ısıtıcı grubu ve yardımcı elemanlar bulunmaktadır. Isıtıcı grubu bir adet degazör ve bir adet yüksek basınçlı ısıtıcıdan oluşmaktadır.

Şekil 1'de verilen akış diyagramına göre, tesiste 31 adet düğüm noktası belirlenmiş ve belirlenen bu noktaların sıcaklık, basınç ve debi değerleri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlere göre her bir noktadaki akışkanın Termodinamik özellikleri hesaplanmış ve bulunan değerler Tablo 1'de gösterilmiştir [11].



Şekil 1. Kojenерasyon Tesisi Akış Diyagramı

Tablo 1. Kojenerasyon Tesisi'ne Ait Düğüm Noktaları ve Termodinamik Özellikleri

Düğüm No	Faz Durumu	Sıcaklık	Basınç	Debi	Entalpi	Entropi
		T(°C)	P(bar)	ṁ(ton/s)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg.K)
1	Buhar	458.8	41.72	61.25	3348.4	6.942
2	Buhar	458.8	41.72	3.05	3348.4	6.942
3	Buhar	456.6	36.07	58.2	3350.91	7.010
4	Buhar	50.272	0,06	11.679	2591.71	8.069
5	Sıkıştırılmış sıvı	50.272	0,4	11.679	210.524	07073
6	Sıkıştırılmış sıvı	50.272	5.75	11.679	210.985	0.7070
7	Sıkıştırılmış sıvı	87.5	1	61.25	366.48	1.16353
8	Sıkıştırılmış sıvı	87.5	3	61.25	366.64	1.16339
9	Sıkıştırılmış sıvı	105.5	1.9	61.25	442.380	1.36863
10	Sıkıştırılmış sıvı	106	49	61.25	445.86	1.36481
11	Sıkıştırılmış sıvı	148.8	48	61.25	629.875	1.82513
12	Buhar	233.5	5.71	46.521	2922.84	7.136
13	Buhar	210	5.38	20.3	2874.38	7.06518
14	Sıkıştırılmış sıvı	125	2.31	20.3	525.102	1.58154
15	Buhar	210	5.38	15.821	2874.38	7.06518
16	Sıkıştırılmış sıvı	125	2.31	15.821	525.102	1.58154
17	Buhar	210	5.38	0.5	2874.38	7.06518
18	Sıkıştırılmış sıvı	90	1	0.5	376.993	1.19257
19	Buhar	210	5.38	1.1	2874.38	7.06518
20	Buhar	210	2.85	2.3	2886.24	7.37621
21	Sıkıştırılmış sıvı	110	1.419	2.3	461.372	1.41862
22	Buhar	210	3.6	5	2882.79	7.26338
23	Sıkıştırılmış sıvı	95	1	5	398.029	1.25010
24	Buhar	210	5.38	1.5	2874.38	7.06518
25	Sıkıştırılmış sıvı	21.4	3	1.198	90.0062	0.316125
26	Sıkıştırılmış sıvı	28.9	1	1.198	121.192	0.421349
27	Sıkıştırılmış sıvı	20	1	11.458	83.962	0.296242
28	Sıkıştırılmış sıvı	95	1	3.05	398.029	1.25010
29	Sıkıştırılmış sıvı	87.5	1	4.3	366.486	1.16353
30	Sıkıştırılmış sıvı	87.5	11	4.3	367.265	1.16283
31	Sıkıştırılmış sıvı	154	5.38	4.3	649.657	1.88267

Bu birimlerin dışında tesiste çalışan pompaların Termodinamik özellikleri de pompa verileri yardımıyla hesaplanmış ve Tablo 2’de sunulmuştur. Düğüm noktalarındaki değerlerin hesaplanması için her bir

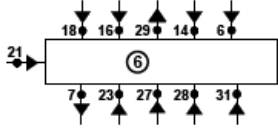
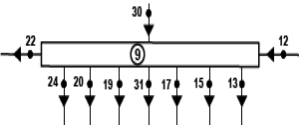



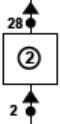

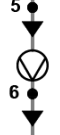
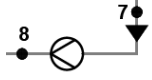

komponent için enerji ve ekserji dengeleri kurulmuş ve Tablo 3’te verilmiştir. Ayrıca her bir ekipmanın sembolik şekli de Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 2. Kojenerasyon Sistemi’nde Bulunan Pompalar ve Termodinamik Özellikleri

Pompa Tipi	Güç (kW)	\dot{m} (ton/s)		P (bar)		T (°C)		h (kJ/kg)	
		Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış
Buhar Soğutma Pompası	7.5	4.3	4.3	1	11	87.5	87.5	366.486	367.265
Kondenser Pompası	18.5	17.479	17.479	0,4	5.75	50.272	50.272	210.524	210.985
Degazör Besleme Pompası	11	61.25	61.25	1	3	87.5	87.5	366.48	366.64
Kazan Besleme Pompası	160	61.25	61.25	1.9	49	105.5	106	1.36863	1.36481

Tablo 3. Kojenerasyon Tesisi’ne Ait Komponentlerin Enerji ve Ekserji Dengeleri

Enerji ve Ekserji Dengeleri			
Ünite	Ünitenin Şekli	Enerji Dengesi	Ekserji Dengesi
Kazan		$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_{11} \cdot h_{11}$ $- \dot{E}_{Yakut} - \dot{E}_{Hava}$ $+ \dot{E}_{BacaGazı}$	$\dot{E}X_{Yakut} + \dot{E}X_{Hava} + \dot{E}X_{11}$ $= \dot{E}X_1 + \dot{E}X_{BacaGazı}$ $+ \dot{E}X_{Kayıp} + \dot{E}X_{Yıkım}$
Türbin		$\dot{Q}_3 - \dot{W}_1 = \dot{m}_4 \cdot h_4$ $+ \dot{m}_{12} \cdot h_{12} - \dot{m}_3 \cdot h_3$	$\dot{E}X_3 = \dot{E}X_4 + \dot{E}X_{12}$ $+ \dot{E}X_{w,türbin} + \dot{E}X_{Kayıp}$ $+ \dot{E}X_{Yıkım}$
Kondenser		$\dot{Q}_5 = \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_{26} \cdot h_{26}$ $- \dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{m}_{25} \cdot h_{25}$	$\dot{E}X_4 + \dot{E}X_{25} = \dot{E}X_4$ $+ \dot{E}X_{26} + \dot{E}X_{Kayıp}$ $+ \dot{E}X_{Yıkım}$
Yüksek Basıncılı Isıtıcı		$\dot{Q}_8 = \dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_{23} \cdot h_{23}$ $- \dot{m}_{10} \cdot h_{10} - \dot{m}_{22} \cdot h_{22}$	$\dot{E}X_{10} + \dot{E}X_{22}$ $= \dot{E}X_{11} + \dot{E}X_{23}$ $+ \dot{E}X_{Kayıp} + \dot{E}X_{Yıkım}$
Degazör		$\dot{Q}_7 = \dot{m}_9 \cdot h_9 + \dot{m}_{21} \cdot h_{21}$ $- \dot{m}_8 \cdot h_8 - \dot{m}_{20} \cdot h_{20}$	$\dot{E}X_8 + \dot{E}X_{20}$ $= \dot{E}X_9 + \dot{E}X_{21}$ $+ \dot{E}X_{Kayıp} + \dot{E}X_{Yıkım}$

Tablo 3'ün Devamı			
Kondensat Tankı		$\begin{aligned} \dot{Q}_6 &= \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_{29} \cdot h_{29} \\ &- \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} \\ &- \dot{m}_{16} \cdot h_{16} - \dot{m}_{18} \cdot h_{18} \\ &- \dot{m}_{21} \cdot h_{21} - \dot{m}_{23} \cdot h_{23} \\ &- \dot{m}_{27} \cdot h_{27} - \dot{m}_{28} \cdot h_{28} \\ &- \dot{m}_{31} \cdot h_{31} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{E}X_7 + \dot{E}X_{29} &= \dot{E}X_6 \\ &+ \dot{E}X_{14} + \dot{E}X_{16} + \dot{E}X_{18} \\ &+ \dot{E}X_{21} + \dot{E}X_{23} + \dot{E}X_{27} \\ &+ \dot{E}X_{28} + \dot{E}X_{31} + \dot{E}X_{Kayıp} \\ &+ \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$
Makine Kolektörü		$\begin{aligned} \dot{Q}_9 &= \dot{m}_{13} \cdot h_{13} + \dot{m}_{15} \cdot h_{15} \\ &+ \dot{m}_{17} \cdot h_{17} + \dot{m}_{19} \cdot h_{19} \\ &+ \dot{m}_{20} \cdot h_{20} + \dot{m}_{22} \cdot h_{22} \\ &+ \dot{m}_{24} \cdot h_{24} + \dot{m}_{31} \cdot h_{31} \\ &- \dot{m}_{12} \cdot h_{12} - \dot{m}_{30} \cdot h_{30} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{E}X_{12} + \dot{E}X_{30} &= \dot{E}X_{13} \\ &+ \dot{E}X_{15} + \dot{E}X_{17} + \dot{E}X_{19} \\ &+ \dot{E}X_{20} + \dot{E}X_{22} + \dot{E}X_{24} \\ &+ \dot{E}X_{31} + \dot{E}X_{Kayıp} + \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$
PM1		$\dot{Q}_{10} = \dot{m}_{14} \cdot h_{14} - \dot{m}_{13} \cdot h_{13}$	$\begin{aligned} \dot{E}X_{13} &= \dot{E}X_{14} \\ &+ \dot{E}X_{Kayıp} + \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$
PM2		$\dot{Q}_{11} = \dot{m}_{16} \cdot h_{16} - \dot{m}_{15} \cdot h_{15}$	$\begin{aligned} \dot{E}X_{15} &= \dot{E}X_{16} \\ &+ \dot{E}X_{Kayıp} + \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$
Kalorifer		$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} - \dot{m}_{17} \cdot h_{17}$	$\begin{aligned} \dot{E}X_{17} &= \dot{E}X_{18} \\ &+ \dot{E}X_{Kayıp} + \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$
Termo Kompresör		$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{28} \cdot h_{28} - \dot{m}_2 \cdot h_2$	$\begin{aligned} \dot{E}X_2 &= \dot{E}X_{28} \\ &+ \dot{E}X_{Kayıp} + \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$
Buhar Soğutma Pompası		$\begin{aligned} \dot{Q}_{BSP} &= \dot{W}_{BSP} + \dot{m}_{29} \cdot h_{29} \\ &- \dot{m}_{30} \cdot h_{30} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{E}X_{BSP} + \dot{E}X_{29} &= \dot{E}X_{30} + \dot{E}X_{Kayıp} \\ &+ \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$
Kondenser Pompası		$\begin{aligned} \dot{Q}_{KP} &= \dot{W}_{KP} + \dot{m}_6 \cdot h_6 \\ &- \dot{m}_5 \cdot h_5 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{E}X_{BSP} + \dot{E}X_{29} &= \dot{E}X_{30} + \dot{E}X_{Kayıp} \\ &+ \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$
Degazör Besleme Pompası		$\begin{aligned} \dot{Q}_{DSP} &= \dot{W}_{DSP} + \dot{m}_8 \cdot h_8 \\ &- \dot{m}_7 \cdot h_7 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{E}X_{DSP} + \dot{E}X_7 &= \dot{E}X_8 + \dot{E}X_{Kayıp} \\ &+ \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$
Kazan Besleme Pompası		$\begin{aligned} \dot{Q}_{KSP} &= \dot{W}_{KSP} + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} \\ &- \dot{m}_9 \cdot h_9 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{E}X_{KSP} + \dot{E}X_9 &= \dot{E}X_{10} + \dot{E}X_{Kayıp} \\ &+ \dot{E}X_{Yıkım} \end{aligned}$

Tablo 1 ve Tablo 2'deki değerlerin yardımıyla mevcut 31 adet düğüm noktası için enerji (Denklem 7), fiziksel ekserji (Denklem 13), kimyasal ekserji (Denklem 14) ve toplam ekserji (Denklem 9) değerleri hesaplanmış ve Tablo 4'te verilmiştir. 1 numaralı ve 3 numaralı düğümler kazan ve türbini göstermektedir. En

yüksek enerji ile fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri kazan ve türbinde olmuştur.

Tablo 4'teki değerler ile (8) ve (18) numaralı denklemler kullanılarak Kojenerasyon sisteminin ısı verimi %80.15 ve ekserji verimi %32.75 olarak bulunmuştur.

Tablo 4. Kojenerasyon Tesisi'ne Ait Enerji ve Ekserji Değerleri

Kojenerasyon Tesisine Ait Enerji ve Ekserji Değerleri				
Düğüm	Enerji	Fiziksel Ekserji	Kimyasal Ekserji	Toplam Ekserji
Noktası	\dot{E} (kW)	\dot{E}^{PH} (kW)	\dot{E}^{CH} (kW)	\dot{E}^X (kW)
1	56969.31	21850.59	42.53	21893.13
2	2836.84	1088.07	2.12	1090.19
3	54173.05	20475.50	40.42	20515.91
4	1971.14	622.05	8.11	630.16
5	682.97	14.09	8.11	22.20
6	684.47	15.88	8.11	23.99
7	6235.25	414.18	42.53	456.72
8	6237.97	417.61	42.53	460.15
9	7526.60	665.65	42.53	708.18
10	7585.81	744.23	42.53	786.76
11	10716.62	1541.15	42.53	1583.68
12	37770.40	10349.73	32.31	10382.03
13	16208.31	4361.97	14.10	4376.07
14	2960.99	329.30	14.10	343.40
15	12632.10	3399.55	10.99	3410.53
16	2307.68	256.65	10.99	267.63
17	399.22	107.44	0.35	107.78
18	52.36	3.64	0.35	3.99
19	878.28	236.36	0.76	237.13
20	1843.99	442.57	1.60	444.17
21	294.77	27.61	1.60	29.21
22	4003.88	1004.03	3.47	1007.50
23	552.82	41.80	3.47	45.27
24	1197.66	322.31	1.04	323.35
25	29.95	0.13	0.83	0.96
26	40.33	0.08	0.83	0.91
27	60.64	0.88	7.96	8.84
28	337.22	25.50	2.12	27.62
29	437.75	29.08	2.99	32.07
30	438.68	30.26	2.99	33.25
31	775.98	111.34	2.99	114.33

Tablo 5'te komponentler için sırasıyla giren enerji, çıkan enerji, kayıp enerji ve bu enerji kaybının tesisteki toplam enerji kaybına olan oranı verilmiştir. Kayıp enerjinin ve enerji kayıp oranının en fazla

olduğu ekipmanın sırasıyla %97.39 ile buhar tüketim grubu ve %42.92 değeri ile kazan olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Ünite Bileşenleri için Enerji Değerleri

Üniteler	Giren Enerji	Çıkan Enerji	Kayıp Enerji	Enerji Kaybı Oranı
	(kW)	(kW)	(kW)	%
Kazan	76421.31	64778.15	11643.17	42.92
Türbin	54173.05	48766.54	5406.50	19.93
Kondenser	8437.89	723.30	7714.59	28.44
Yüksek Basıncılı Isıtıcı	11589.69	11269.44	320.25	1.18
Yardımcı Grup	54335.57	52433.78	1901.79	7.01
Buhar Tüketim Grubu	32076.47	5658.25	26418.22	97.39
Pompa Grubu	15426.92	15286.85	140.07	0.52
Toplam	252460.90	198916.32	27126.36	100.00

Aynı şekilde Tablo 6'da ise Ekserji girdi, çıktı, ve kayıp değerleri verilmiş olup yine tesisteki toplam ekserji kaybına oranı da hesaplanarak elde edilmiştir.

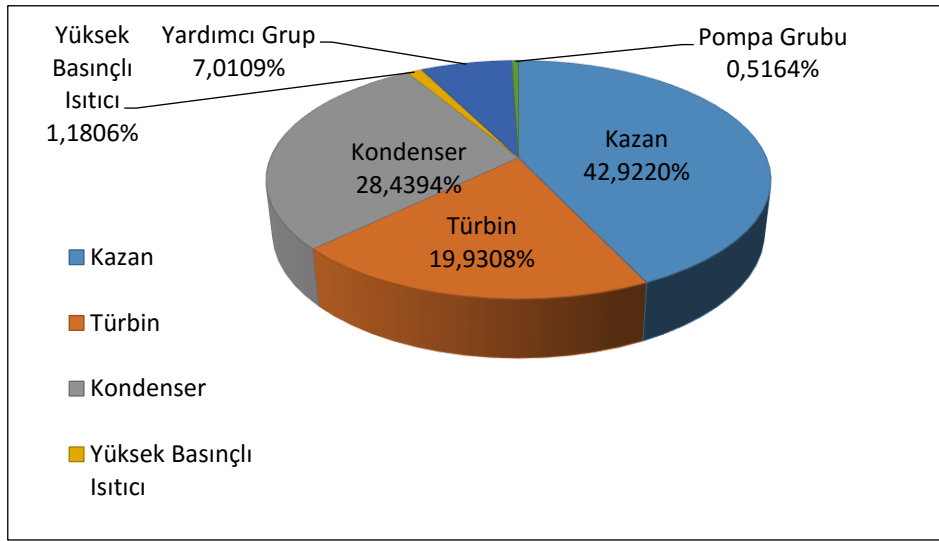
Tablo 6 incelendiğinde; yıkılan ekserji, yok olan ekserji ve kayıp ekserji oranlarının en yüksek olduğu yerin kazan olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Ünite Bileşenleri için Ekserji Değerleri

Üniteler	Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Kaybı	Yıkılan Ekserji	Yok Olan Ekserji	Kayıp Ekserji Oranı
	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	%
Kazan	60306.97	26832.21	1818.27	31656.49	33474.76	87.30
Türbin	20515.91	20037.19	420.78	57.95	508.67	1.33
Kondenser	631.12	64.58	373.23	193.32	383.46	1.00
Yüksek Basıncılı Isıtıcı	1794.26	1628.95	20.28	145.02	112.20	0.29
Yardımcı Grup	12178.07	11247.05	92.60	838.42	249.77	0.65
Buhar Tüketim Grubu	8984.58	642.64	3483.18	4858.76	3505.11	9.14
Pompa Grubu	1416.17	1304.15	4.61	107.41	110.30	0.29
Toplam	105827.09	61756.76	6212.95	37857.37	38344.27	100.00

Şekil 2'de bu çalışmanın yapıldığı Kahramanmaraş Kağıt San. ve Tic. A.Ş. Kojenerasyon tesisi ekipmanlarının enerji kayıp oranları gösterilmiştir. Bu grafiğe göre en yüksekten en düşüğe toplam enerji kaybının görüldüğü ekipmanlar sırasıyla; %42.92'si ile kazan, %28.43'ü ile kondenser, %19.93'ü ile türbin, %7.01'i ile yardımcı grup, %1.18'i ile yüksek basınçlı ısıtıcı ve % 0.51'i ile pompa grubudur. Tesis standart bir enerji

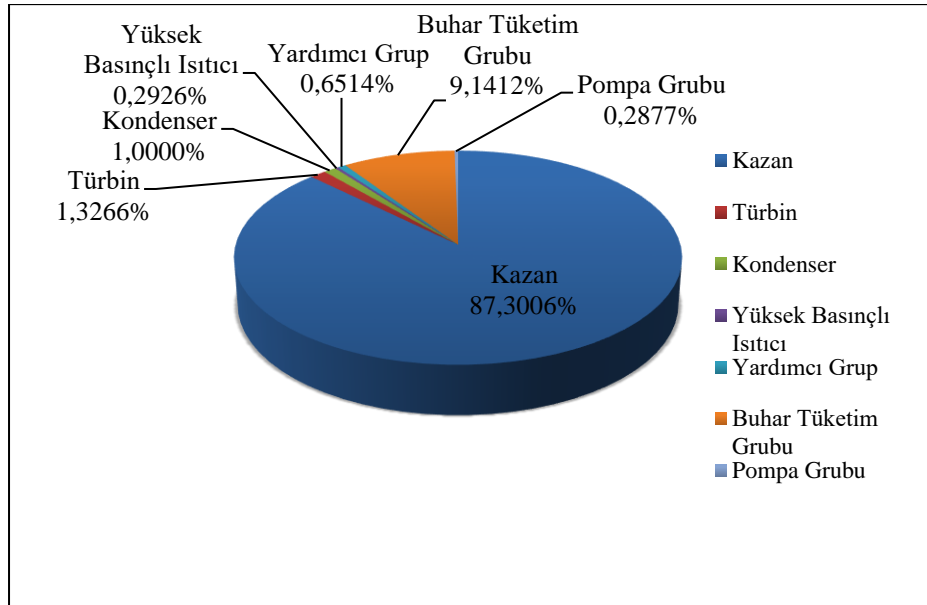
santralinden farklı olarak bir kojenerasyon tesisi olması sebebiyle üretilen enerjinin büyük bir kısmı, kağıt üretim prosesinde değerlendirilen buhar tüketim grubunda tüketilmektedir. Burada bir tüketim söz konusu olduğundan, buhar tüketim grubunda harcanan enerji, kayıp olarak değerlendirilmemiştir. Buna göre kazan ve kondenser enerji kaybının değerlendirilmesi açısından öncelikli sıradadır.



Şekil 2. Kojenerasyon Tesisi Enerji Kayıp Oranlar

Şekil 3'te ise kojenerasyon tesisi ekipmanlarının ekserji kayıp oranları verilmiştir. Bu grafiğe göre en yüksekten en düşüğe ekserji kaybı değerlerinin olduğu ekipmanlar sırasıyla; toplam ekserji kaybının %87.3'ü ile kazan, %9.14'ü ile buhar tüketim grubu, %1.33'ü ile türbin, %1'i ile kondenser, %0.65'i ile yardımcı grup, %0.29'u ile yüksek basınçlı ısıtıcı ve

%0.29'ü ile pompa grubudur. Şekil 3'ten de görüldüğü gibi, ekserji kaybının en yüksek olduğu ekipmanlar kazan ve buhar tüketim grubudur. Diğer ekipmanların ekserji kayıpları ise kazan ve buhar tüketim grubuna nazaran son derece düşüktür.



Şekil 3. Kojenerasyon Tesisi Ekserji Kayıp Oranları

Enerji ve Ekserji verimleri göze alındığında öncelikli iyileştirme planlarının kazan üzerinde olması gerektiği anlaşılmaktadır. Buhar kazanı veriminin artması için en önemli parametrelerden biri yanma veriminin artırılmasıdır. Bunun için kömür besleme sistemlerinde, yakıcılarda, kazan içerisinde bulunan rekuperatif tip hava ısıtıcılarda revizyonlar yapılmalıdır. Bunun yanı sıra buhar kazanının verimliliğini belirleyen bir diğer önemli faktörde ısının su ve buhara geçerken

karşılaştığı dirençlerdir. Bu dirençlerin en aza indirilebilmesi için kazan içerisinde bulunan kızdırıcı ve ekonomizer borularının yenilenmesi ve bu sayede zamanla cüruf kaplanan bu borularda oluşan ısı direncin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Ayrıca kazan ve bağlı sistemlerin ısı yalıtımlarının iyileştirilmesi de düşünülmelidir.

Kazandan sonra en yüksek enerji kaybının görüldüğü ekipman kondenserdir. Ancak kondenserdeki enerji kaybı durumuna farklı yaklaşmak gerekmektedir. Kondenser sonrasında çalışan kondens ve besi suyu pompaları tek fazlı sistemle çalışan bir ekipmandır ve pompaya gelen akışkanın sıvı olması zorunludur [8]. Bu sebeple çevrimde kendine yer bulan kondenser akışkanı gaz fazından sıvı fazına dönüştürürken, yüksek miktardaki enerji soğutma kulesi vasıtasıyla dışarı atılmaktadır. Bu noktada kondensere yapılabilecek bir müdahale mümkün olmamaktadır.

Türbin enerji kaybı oranı sıralamasında üçüncü sırada yer almaktadır, fakat türbinde yapılabilecek iyileştirmelerin çok maliyetli olması ve geri dönüş sürelerinin uzunluğu sebebiyle ile türbinde yalnızca ara çekiş kontrollerinin hassasiyetinin yükseltilmesi verimli bir müdahale olabilir. Benzer sonuçlar termik santrale uygulanan enerji ve ekserji analizinde de elde edilmiştir [8].

Tüm bunların dışında, üzerinde çalışılmış olan kojenerasyon tesisi, operatörlerin vasıtasıyla analog kontrolörler ile yönetilmektedir. Bu nedenle işletme esnasında insan hatası faktöründen kaynaklanan verimsizlikler olabilmektedir. Sistemin geneline uygulanacak bir otomasyon sistemi ile bu hataların ortadan kaldırılması akabinde sistem genelinde bir verim artışı olacağı düşünülmektedir.

Fosil yakıtların sınırlı olması ve çevreye salınan egzoz gazları göze alındığında bu tarz tesislerin verimli çalışması son derece önemlidir. Verimliliği tesis edebilmek adına tesisin tamamına uygulanacak olan iyileştirmelerin önemi açıkça görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Halen çalışmakta olan Kahramanmaraş Kağıt San. ve Tic. A.Ş. Kojenerasyon Tesisi'nin tespit edilen parametrelere göre Termodinamik analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilenler aşağıda verilmiştir;

- Santralde toplam enerji kaybının %42.92'si kazanda, %28.43'ü kondenserde ve %19.93'nün de türbinde olduğu belirlenmiştir.
- Toplam ekserji kaybının ise %87.3'ü kazanda, %9.14'ü buhar tüketim grubunda ve %1.33'ü de türbinde olduğu tespit edilmiştir.
- Enerji ve Ekserji verimleri göze alındığında öncelikli iyileştirmenin kazanda olması gerektiği anlaşılmaktadır.

SEMBOLLER ve KISALTMA LİSTESİ

ç	Çıkış
E	Enerji, kJ/kg
Ex	Özgül ekserji, kJ/kg
g	Giriş
h	Entalpi, kJ/kg
ky	Kayıp
m	Kütle, kg
\dot{m}	Kütleli debi, kg/s
Q	Isı, kJ
s	Entropi, kJ/kgK
T	Sıcaklık, K
W	İş, J
y	Yok edilen ekserji oranı, birimsiz

alt indisler

PH	Fiziksel ekserji
CH	Kimyasal ekserji
PT	Potansiyel ekserji
KN	Kinetik ekserji

5. KAYNAKLAR

- [1]. Ballı, Ö., “Kojenerasyon Sistemlerinin Enerji, Kullanılabilirlik (Ekserji) ve Ekserjiekonomik Analiz Yöntemleri Kullanılarak Performansının Değerlendirilmesi”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, Haziran 2008.
- [2]. Yazıcı, H., Selbaş, R., “Bir buharlı güç santralinin enerji ve ekserji analizi”, Selçuk Üniversitesi-Teknik Online Dergi, 10 (2011) 117-135
- [3]. Rahim, M.A., Gündüz, D., “Gaz türbinli bir ısı-güç (kojenerasyon) çevrim santralinin enerji ve ekserji analizi:Ankara Şartlarında Uygulama”, Türk Bilim Araştırma Vakfı, 6 (2) (2013) 19-27.
- [6]. Sevilgen, S.H., “Kojenerasyon Sisteminin Ekserjiekonomik Analizi” Journal of Engineering and Natural Sciences-Sigma, 4 (2004) 234-248
- [4]. Colpan, C. O., Yesin, T., “Energetic, exergetic and thermoeconomic analysis of Bilkent combined cycle cogeneration plant”, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, 06531 Ankara, Turkey, 2006.
- [5]. Coşkun, A., Geredelioğlu, Ç., Bolattürk, A., Gökaslan, M. Y. , “Çayırhan Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi”, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17/20 Nisan 2013, İzmir.
- [7]. Rosen, M.A and Dinçer,İ., “Effect of Varying dead-state properties on energy and exergy analysis of thermal systems”, International

- Journal of Thermal Science, 43 (2) (2004) 121-133.
- [8]. Ünal, F., Özkan, D.,B., “Tunçbilek Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi”, Tesisat Mühendisliği, 143 (2014) 5-13.
- [9]. Kaya, M., “Buharlı Güç Çevrim Veriminin Ekserji Analiziyle Belirlenmesi”, CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, Cilt:1, Sayı: 9, Soma, 2008.
- [10]. Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., “Thermal Design and Optimization”, 1996.
- [11]. Çengel, Y. A., Boles, M. A, “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik”, McGraw-Hill Literatür Ortak Yayını, (Çev. T. Derbentli), 1996.