

Sinter Manyezit Üretimi Döner Fırınındaki Atık Isının Kojenerasyon Sistem Performansı ve Ekonomik Analizi

Samet Giray Tunca^{1*} , Abdullah Akbulut² 

¹Elektrik ve Enerji Bölümü, Dumlupınar Meslek Yüksekokulu, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, Türkiye

Geliş: 15.11.2023, Kabul: 27.11.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Yüksek sıcaklıklarda çalışan sistemlerde ana işlem sonrasında atık ısının oluştuğu görülmektedir. Günümüzde birçok sektör atık ısıyı geri kazanımda değerlendirmektedir. Çalışmamızda fabrikada yapılan üretimde ortaya çıkan atık ısının değerlendirilmesi ile ilgili aşamaları içermektedir. Özel bir fabrikada üretim aşamasında Döner fırınlar kullanılmaktadır. Döner fırınlar doğalgaz ve petrokok karışımı ile yakılmaktadır. Ateşlenen fırınlara manyezit madeni beslenmektedir. Döner fırınlardaki üretim süresince baca gazı oluşmaktadır. Baca gazı atık ısı kazanına gelerek kojenerasyon ünitesi için hazırlanmaktadır. Atık ısı kazanında oluşan buhar türbine gönderilerek enerji üretilmektedir. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre enerji ve ekserji hesaplamaları yapılmıştır ve sistemin çalışma verimi hesaplanmıştır. 3. Döner fırında yakılan petrokok ve doğalgazın enerji değerleri 13 MW ile 20.5 MW arasında değişirken, kazandan elde edilen enerji 3.6 MW ile 5.14 MW arasında değişmektedir. Kojenerasyon ünitesinde elde edilen anlık elektrik enerjisi değerleri ise 267 kWh ile 551 kWh arasında değişmektedir. Kazan için ortalama I. ve II. Yasa verimleri sırasıyla %20 ve %35 olarak hesaplanmıştır. Net bugünkü değer (NBD) yöntemi kullanılarak sistemin ekonomik analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji; ekserji; kojenerasyon; atık ısı; NBD yöntemi

Cogeneration System Performance and Economic Analysis of Waste Heat in Sinter Magnetite Production Rotary Kiln

ABSTRACT

It is observed that waste heat is generated after the main process in systems operating at high temperatures. Nowadays, many sectors use waste heat for recycling. In this study includes the stages related to the evaluation of waste heat generated in factory production. Rotary kilns are used in the production phase in a private factory. Rotary kilns are burned with a mixture of natural gas and petcoke. Magnesite ore is fed into the fired furnaces. Flue gas is formed during production in rotary kilns. Flue gas comes to the waste heat boiler and is prepared for the cogeneration unit. Energy is produced by sending the steam formed in the waste heat boiler to the turbine. Energy and exergy calculations were made according to the first and second law of thermodynamics and the operating efficiency of the system was calculated. While the energy values of petcoke and natural gas burned in the 3. rotary kiln vary between 13 MW and 20.5 MW, the energy obtained from the boiler varies between 3.6 MW and 5.14 MW. Instant electrical energy values obtained in

the cogeneration unit vary between 267 kWh and 551 kWh. Average for boiler is I. and II. Law efficiencies are calculated as 20% and 35%, respectively. An economic analysis of the system was made using the net present value (NPV) method.

Keywords: Cogeneration; exergy; energy; waste heat; NPV method

1. GİRİŞ

Birçok alanda kullanılabilir enerjiye çevrilmesi gereken atık ısı elde edilen prosesler mevcuttur. Endüstriyel enerjinin yatırım yapılabilecek kadar büyük bir kısmı atıl bir şekilde kaybolmaktadır. Bu kayıplar atık ısının en aza indirilmesi ve geri kazanımı ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu enerjinin tekrar kazanılması için atık ısı kazanları, eşanjörler ve ısı boruları gibi sistemler kullanılır. Bu geri dönüşüm sistemlerine yatırım yapılması ancak atık ısının yeterli sürede ve yeterli miktarda elde edilebiliyor olması gerekmektedir. Bu sistemlerin fizibilitesi yapılırken akışkanın debisi, nem, basınç ve sıcaklık değerleri önemli parametrelerdir, Sistemin kendisini amorti etmesi zaman bağlı bir durumdur. Sürenin kısılması sistemin süreklilik arz etmesiyle mümkün olabilir. (Çengel, Boles, & Kanoğlu, 2019).

Bir çimento fabrikasında 7,5 MW kapasitesi ile kurulan atık ısı geri kazanım sistemi mevcuttur. Yapılan çalışmada bu sisteme ait enerji-ekserji analizi yapılmıştır. Toplam ekserji verimi %69,5 bulunmuştur. Yapılan atık ısıdan geri kazanım sayesinde çevre etkisi açısından CO₂ emisyonunda 16 ton/yıl azalma gerçekleşmektedir. (Memiş, 2019).

Yapılan çalışmada reküperatör ve ısı tekeri ile atık ısı geri kazanım ısı değerleri incelenmiştir. Alınan verilerde verim açısından en yüksek değerler ısı tekeri için %97 ve reküperatör için %73 olarak elde edilmiştir. (Karanfil, Rüßen, Poyraz, & Güler, 2020).

Bu çalışmada bisküvi fırını akış şeması oluşturularak her bir düğüm noktası için termodinamik analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda bisküvi fırınının enerji veriminin %3,90 olduğu tespit edilip harcanan enerjinin %49,35'inin atık ısı olarak bacadan atmosfere salındığı tespit edilmiştir. net bugünkü değer (NBD) yöntemi ile organik rankine çevriminin maliyet analizi yapılmıştır. Sistemin çalışma ömrünün 20 yıl olarak kabul edildiği tasarım sonucunda iş akışkanı olarak R113'ün kullanılan çevrimde 58,62 kW elektrik enerjisi üretilip net bugünkü değeri (NBD) 1,979 milyon \$ olarak hesaplanmıştır (Erdoğan, 2023).

Dikili (2019) tarafından yapılan tez çalışmasında 410,8 MW kapasiteli doğalgaz kombine çevrim güç santralinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Birinci ve ikinci yasa verimleri sırasıyla %55,88, %53,06 olarak hesaplanmıştır. Kayıp en yüksek kondenserde daha sonra da baca gazından kayıp olan güç olarak belirlenmiştir. Tersinmezlik en yüksek yanma odasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. (Dikili, 2019).

Bu çalışmada, bir firma bünyesinde kurulması düşünülen birleşik ısı-güç çevrim santral tesisi ele alınıp incelenerek termodinamik analizler yapılmıştır. 5 MW'lık kurulu güce sahip bir tesisin kurulması düşünülmüş, bunun için gerekli maliyet analizi yapılmıştır. Firmanın mevcut yakıt, sıcak su ve elektrik enerjisi maliyetleri toplamı ile kojenerasyon kurulduktan sonraki yakıt artışı tesis maliyeti değerlendirilmiştir (Güven, Ekmekçi, & Çiçek, 2003).

Enerji kayıpları, dizayn ve ekonomik açılardan sistemlerin değerlendirilmesi için enerji-ekserji analizleri önem arz etmektedir. Enerji kayıplarının nedenlerinin büyüklüklerinin ve sistem içerisindeki yerinin tespit edilmesinde yapılan analizler sistem verimini arttırmaktadır.

Yapılan verimlilik çalışmasında atık ısıdan üretilen elektrik enerji tesisinin etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar atık ısı kazanım sistemlerinin kurulumu-dizaynı, işletilmesi ve ekonomik açıdan fayda sağlayacak bir çalışma olmuştur. (Tütüncü & Özgener, 2016).

Termik santralde bölgesel ısıtma sistemi uygulanma şekli, tasarımı ve elektrik üretimi ile ilgili bilgilerin hesaplandığı çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada geri dönüş süresi ve mühendislik açısından veriler bulunmaktadır (Kolay, 2004).

Yapılan çalışmada ısıtma amaçlı kullanılmakta olan sıcak su kazanından atılan baca gazlarından faydalanarak çalışan ısı geri kazanım sistemindeki verim değeri yapılan deneyler sonucu yaklaşık %20 seviyesinde çıkmıştır (Kuvel, 2005).

Geleneksel soğutma sistemlerine göre ejektör kullanımı verim değerini düşürmektedir. Fakat çevre etkileri açısından avantajlı olduğu tespit edilmiştir (Ersayın, 2020).

Bölgesel ısıtma sisteminde baca gazından kaynaklanan kayıplar hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada atık ısı kaynı yaklaşık %6-8 arasında elde edilmiş ve giderin 58.658,79 \$ /yıl olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir hesaplamada ise sıcak su ihtiyacının karşılanması ile ilgili yapılmıştır. Sistemin 20 yıl olan ekonomik ömrü boyunca 122.820,83 \$ enerji tasarrufu olabileceği görülmüştür (Terhan , Özağdaş, & Omar, 2023).

Tasarlanan hermetik kombilerin atık ısıdan elektrik elde edilmesi için kullanılacaktır. Kaloriferde en düşük güç değeri iç dış sıcaklığı 35 °C ve 20 °C iken 57,83W, en yüksek güç değeri ise iç dış sıcaklığı 85 °C ve -20 °C 273,6 W olarak bulunmuştur. Kullanım suyundaki güç açısından en düşük değer iç dış sıcaklığın aynı olduğu 35 °C' de 31,19 W ve en yüksek değeri iç dış sıcaklığın 65 °C ve -20 °C iken 273,6 W olarak bulunmuştur. (Variyenli & Göktekin, 2018).

Yazıcı H. ve Selbaş R., yaptıkları çalışmalarında buharlı güç santralinin enerji-ekserji analizini yaparak sistemin toplam tersinmezliğini hesaplamışlar ve tersinmezliğin en fazla olduğu sistem elemanını incelemişlerdir (Yazıcı & Selbaş, 2011).

El-Masri güç santralinde buhar türbini kısmında ekserji hesaplamaları yapmıştır. Elde ettiği veriler ile kayıpları, ekserji bozunumları ve net iş arasında bulunan ilişkiyi tanımlamıştır (El-Masri, 1997).

Harlock, sistem verimlerini tanımlamıştır. Yaptığı çalışmada kapalı sistemler için termik verimin net işin verilen ısıya oranı ile hesaplanabileceğini, açık sistemlerde ise net işin ideal şartlardaki tersinir işe oranı olduğunu vurgulamıştır (Harlock, 1995).

Ballı Ö., Eskişehir’de bulunan gaz türbini motorlu bir kojenerasyon sisteminin performans değerlendirmelerini yapmıştır. Birinci ve ikinci kanunu uygulayarak enerji-ekserji analizlerini yapmıştır. Enerji kaybının en yüksek olduğu çevrim elemanının kondenser olduğu hesaplamıştır (Ballı, 2008).

Mert M.S., tarafından Ereğli’de Kurulu olan kojenerasyon ve konvansiyonel elektrik üretim tesisleri incelenmiştir. Veriler toplanarak enerji-ekserji, kütle, maliyet denklilikleri kurulmuştur. Sistemdeki her bir birimin ekserji ve termodinamik analizleri yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ekserji tahribinin en fazla olduğu birimlerden birinin buhar kazanı olduğu ve döner hava ısıtıcılarından sızan havanın baca gazına karıştığı tespit edilmiştir. Mert M.S., hava sızıntısının önüne geçilerek enerji ve ekserji analizlerinin iyileştirilebileceğini anlatan bir çalışma yapmıştır (Mert, 2010).

Bilginsoy A.K., çalışmasında termik gücü 160 MW olan bir termik santralin enerji ekserji analizlerini yapmıştır. Sistemin enerji ve ekserji kayıpları hesaplayıp, en fazla enerji kaybının %45,8 ile kondenserde, ekserji kaybının en fazla %58,05 ile kazanda olduğu tespit etmiştir. Ekserji kaybının en fazla kazanda oluşmasının en önemli sebebi, yanma işlemindeki sıcaklık farklarının etkisiyle oluşan ısı transferi olduğunu tespit etmiştir. Sonuç olarak A. Bilginsoy çalışmasında termik santralin yeniden dizayn edilmesi gerektiğini, borulama hatlarındaki yalıtım malzemelerinin yıpranmış olması ekstra bir ısı kaybının olduğunu ve kazandaki yüksek çıkan tersinmezlik değeri için gerekli analizlerin ve yenilemelerin yapılması gerektiğini anlatmıştır (Bilginsoy, 2012).

Bir magnezyum üretim şirketinde dolomitin kalsinasyonu için kullanılan döner fırının enerji dengesi yazılarak, ısı kaybının en büyük kaynağı belirlenmiştir. Isı kaybını azaltmak için, fırının kireçleme bölgesi üzerinde halkalı bir kanal oluşturan bir ısı değiştirici kullanılmıştır. Kullanılan ısı değiştirici fırının yakıt tüketimini %12.00 oranında azaltmış ve enerji ve ekserji verimini sırasıyla %7.35 ve %3.81 oranında artırmıştır (Tunca, 2015).

Endüstride en yüksek enerji sarfiyatının yapıldığı sektörlerin başında çimento sektörü gelmektedir. Bu nedenle, enerji tasarrufu açısından araştırmalar ve uygulanabilir süreçler ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Altınkaynak M., çalışmasında enerji tüketiminin yaklaşık 75kW/ton üretim başına olduğu fabrikanın verilerini kullanmıştır. Üretim aşamasında bulunan döner fırına ait enerji-ekserji ve kütle hesaplamalarını yapmıştır. Enerji ve ekserji verimi sırasıyla %49.2 ve %58.6 olarak hesaplanmıştır. Analizlere göre kayıplar hatlardan, fırın yüzeyinden ve baca sisteminden kaynaklandığı tespit edilmiştir (Altınkaynak, 2012).

Gürtürk M., çalışmasında enerji-ekserji ve ekonomik analizlerini döner fırın sisteminde gerçekleştirmiştir. Enerji verimi döner fırında %69 bulunmuştur. Ekserji verimi ise &16 olarak bulunmuştur. Yine döner fırındaki eksergoekonomik faktör %70 hesaplanmıştır. Çalışmadaki analizler sayesinde kayıplar ve sistemin olumsuz çalışma koşulları belirlenmiştir (Gürtürk, 2015).

Shrikant K. ve Alok C. yaptıkları çalışmada Birla çimento fabrikasının ekserji analizini yaparak ekserji verimliliği ve dengesi hesaplanmıştır. Prosesin ortalama fiili çalışma verilerine dayanarak, ekserji dengeleri ön ısıtıcı, döner fırın, döner soğutucu ve tüm proses için oluşturulmuştur. Sistemin elektrik ihtiyacı atık ısı geri kazanım sistemi kullanılarak azaltılabilir (Shrikant & Chaube, 2013).

Net bugünkü değer indirgeme tekniğine dayanmaktadır. Bu teknikte nakit akış tablosu proje boyunca oluşan gelir ve gider yıl bazında belirlenir. Belirlenen indirgeme oranı her yıl için ayrı şekilde kullanılır ve elde edilen verinin toplamı projenin “Net Bugünkü Değeri” ni oluşturur.

Bu çalışmada, atık ısı buhara çevrilerek sistemden alınabilecek enerji hesaplanmış ve sistem aşamalarındaki elde edilen veriler ele alınmıştır. Manyezit yüksek sıcaklıklarda döner fırınlara beslenir ve burada oluşan baca gazı baca çıkışından önce atık ısı kazanına gelmektedir. Atık ısı kazanında türbine gönderilen buhar değerlendirilerek enerji üretilmektedir.

Türbine gelecek buhar basıncı ve debisi 20 bar ve 8 t/h olarak tasarlanmıştır. Buhar sıcaklığı 343 °C.’dir. Çevrimin çalışma koşulları ve verileri Döner fırından başlayarak analiz edilmiştir. Net bugünkü değer kullanılarak ekonomik analiz yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Kojenerasyon tesisinde, 3. Döner fırın kazanında üretilen buhar ile elektrik enerjisi üretilmekte, çürük buhar yoğunlaştırılarak sıcak su oluşmasını sağlamak ve su kazana geri beslenerek su tüketimi düşürülerek tamamen kapalı bir çevrim yapılmaktadır. Kojenerasyon ünitesinde herhangi bir atık bacası bulunmamaktadır.

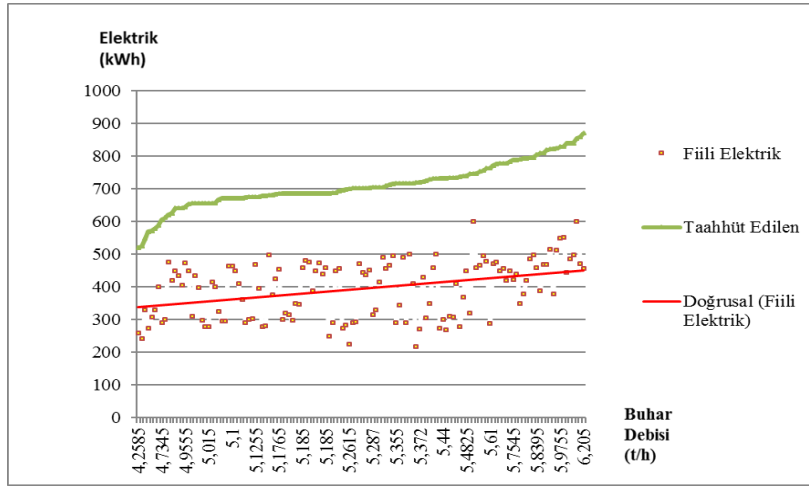
2.1. Kojenerasyon Sistemi

Kojenerasyon tesisinde verim buhar üretim kapasitesi ile doğrudan ilgilidir. Buhar türbinine gelen buhar debisi arttıkça verim de artmaktadır. 3. Döner fırınlara beslenen manyezit miktarı, türü ve çalışma süresi buhar türbinin üretiminde değişkenlikler olmasına sebep olmaktadır. 3. Döner fırın ateşlemesinde doğalgaz ve petrokok yakıtları kullanılmaktadır. Döner fırının çalışma sisteminde ateşleme sonrasında oluşan yüksek sıcaklıktaki baca gazı döner fırın çıkışında atık ısı kazanına gelir. Kazan içerisindeki borulardan geçen sıcak su döner fırından gelen baca gazı sayesinde kızgın buhara dönüşür. Kızgın buhar buhar türbinin bulunduğu kojenerasyon ünitesine, döner fırından kazana gelen atık gaz ise bacadan atılmak için tozsuzlaştırma için

filtreye gönderilmektedir. Türbin verilerinin istenilen düzeyde olması için buhar özellikleri 8t/h, 343 °C ve 20 bar basınç olmalıdır.

2.2. Deneysel Çalışma

Fabrikada iki aylık süreç boyunca her gün günde iki defa alınan veriler neticesinde aşağıdaki grafikler oluşturulmuştur. Türbine gönderilen buhar sıcaklığı dikkate alınarak elde edilen anlık enerji verileri gösterilmiştir.



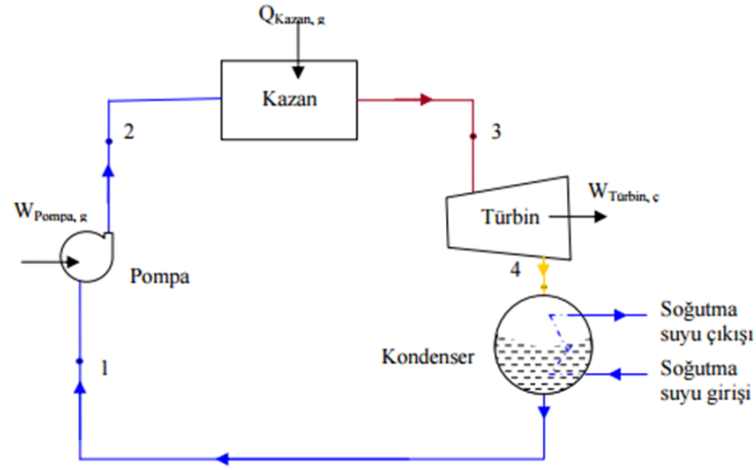
Şekil 1: Anlık enerji grafiği

Türbin sistemini kuran firmanın taahhüt ettiği değerleri ve sistemin mevcut şartlardaki çalışma durumundaki değerleri görmekteyiz. Sistemin mevcut çalışma durumundaki buhar debisine karşılık üretmesi gereken elektrik enerjisi 500-900 kWh değerleri arasındaki eğridir. Fakat mevcut çalışma durumunda üretilen elektrik enerjisi değerleri inişli –çıkışlı bir durumda olup, genel olarak 250-500 kWh değerleri arasındadır.

3. BUHAR TÜRBİNİ ÇEVİRİMİ, BİRİNCİ KANUN VE İKİNCİ KANUN DENKLEM ÇÖZÜMLEMELERİ, ENERJİ EKSERJİ ANALİZLERİ

3.1. Buharlı Türbin Çevrimi Birinci Kanun Analizi

Birinci kanun analizi yapılırken amaç ısı verimin bulunmasıdır. Isıl verim kazan yoğunlaştırıcı, türbin ve pompadan gelen veriler ile elde edilir. Yapılan çalışmada çevrimde bulunan her elemana birinci kanun uygulanmıştır.



Şekil 2: Rankine çevrimi

3.1.1. Pompa Birinci Kanun Analizi

a-) Kütle korunumu yasası

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (1)$$

b-) Enerji korunumu yasası

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 - \dot{W}_p \eta_p \quad (2)$$

$$\dot{W}_p = (\dot{m}_s (h_2 - h_1)) / \eta_p \quad (3)$$

3.1.2. Kazan Birinci Kanun Analizi

a-) Kütle korunumu yasası

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

b-) Enerji korunumu yasası

$$Q_k = \dot{m}_s (h_3 - h_2) \quad (4)$$

3.1.3. Türbin Birinci Kanun Analizi

a-) Kütle korunumu yasası

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_s$$

b-) Enerji korunumu yasası

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_T \eta_T \quad (5)$$

$$\dot{W}_T = (\dot{m}_s (h_3 - h_4)) / \eta_T \quad (6)$$

3.1.4. Kondenser Birinci Kanun Analizi

a-) Kütle korunumu yasası

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 = \dot{m}_5$$

$$\dot{m}_{ssg} = \dot{m}_{ssç} = \dot{m}_{ss}$$

b-) Enerji korunumu yasası

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{ssg} h_{ssg} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{ssç} h_{ssç} \quad (7)$$

$$\dot{m}_s (h_4 - h_1) = \dot{m}_{ss} (h_{ssç} - h_{ssg}) \quad (8)$$

3.2. Buharlı Türbini Çevrimi İkinci Kanun Analizi

Birinci kanun enerjinin niceliği ile ilgilidir. Enerjinin biçim değiştirmesindeki sayısal verileri ifade eder. Enerjiler arasında kaynak ve biçim açısından ayırım gözetmez. İkinci kanun ise enerjinin niteliği ile ilgilidir. Hal değişimlerinde niteliğin değişimini hesaplamak için yöntemler ortaya koyar (Horlock, 1995).

Sürekli akışlı açık sistemlerde ekserji analizi için temel denklemler;

$$\dot{E}_Q = Q((T - T_0)/T) \quad (9)$$

$$\dot{E}_W = \dot{W} \quad (10)$$

Ekserji dengesi;

$$E_Q - E_W = \sum m_c E_c - \sum m_g E_g + T_0 S_{\text{üretim}} \quad (11)$$

Burada \dot{E}_Q ısı transferinin birim zamandaki ekserjisi ve \dot{E}_W mekanik enerjinin birim zaman ekserjisi, E özgül ekserjiyi, T_0 çevre sıcaklığını ve $S_{\text{production}}$ entropi üretimini ifade etmektedir. ç alt çıkışı, g girişi göstermektedir. Sistemin her bir bileşeni için hesaplanan tersinmezlik sonrasında aşağıdaki denklem ile toplam tersinmezlik hesaplanır.

$$I = T_0 S_{\text{üretim}} \quad (12)$$

Burada I tersinmezliği ifade eder. Tersinmezlik birim zamanda kaybolan ekserjidir. Ekserji genellikle kimyasal ekserji ve termodinamiksel ekserjinin toplamı olarak kabul edilir. Termodinamiksel ekserji bir durumun çevre sıcaklığı ve basıncı ile dengedeki ekserjidir.

$$E = (h - T_0 s) + \left(\frac{1}{2}\right) v^2 + gZ - (h_0 - T_0 s_0) \quad (13)$$

Denklemden potansiyel ve kinetik enerji ihmal edilirse; fiziksel özgül ekserji;

$$E = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (14)$$

Buhar türbini sisteminde tersinmezliklerin hesaplanabilmesi için her bir eleman için giren ekserjinin ve çıkan ekserjinin bilinmesi gerekir.

$$\dot{W} = \sum \dot{E}_Q + \sum \dot{m}_g \dot{E}_g - \sum \dot{m}_c \dot{E}_c - I \quad (15)$$

3.2.1. Kazan Ekserji Analizi

Kazanın yapısı gereği bir çok ekserji formu oluşmaktadır. Sisteme gelen atık ısı içeriğinde bulunan yanma ürünlerinden, tersinmezliklerden ve ekonomizlerden kaynaklanan ekserji formları bulunmaktadır. Kazanın ekserji durumu proses adyabatik olarak kabul edildiğinde hesaplamak mümkün olur. Bunun dışında her durum için ekserji analizi yapmak mümkün değildir. Kazan için yapılacak detaylı bir ekserji analizi ayrı bir çalışma konusudur. Bu nedenle yanma ürünlerinin, kızdırıcının, ekonomizerin neden olduğu ekserjiler bu çalışmaya içerisine alınmamıştır. Yalnızca döner fırından gelen atık ısının ısı enerjisinin kazan içerisindeki borulardaki suya aktarıldığı kabulü yapılmıştır. Kazana giren ve kazandan çıkan akışkanının kütle miktarının değişmediği kabul edilmiştir. Sürekli akışlı şartlarda bulunan kazanın ekserji dengesi sunulmuştur.

$$E_2 + E_Q = E_3 + I_K \quad (16)$$

$$\varepsilon_2 = (h_2 - T_0 s_2) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (17)$$

$$s_0 = (s_{s,0} - s_{f,0}) / s_{sf,0} \quad (18)$$

$$s_2 = (s_{s,2} - s_{f,2}) / s_{sf,2}$$

$$\varepsilon_3 = (h_3 - T_0 s_3) - (h_0 - T_0 s_0)$$

$$s_3 = (s_{s,3} - s_{f,3}) / s_{sf,3}$$

$$E_Q = \dot{m}_S Q_K (1 - T_0 / T_K) \quad (19)$$

$$I_K = \dot{m}_S T_0 ((s_3 - s_2) - Q_K / T_K) \quad (20)$$

3.2.2. Yoğuşturucunun (Kondenser) Ekserji Analizi

Yoğuşturucuya gelen soğutma suyu kütleinin sabit olduğu kabulü yapılmıştır Bu kabul ile ilgili ekserji dengesi;

$$E_4 + E_{ss1} = E_1 + E_{ss2} + I_{Yog} \quad (21)$$

$$\varepsilon_1 = (h_1 - T_0 s_1) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (22)$$

$$\varepsilon_4 = (h_4 - T_0 s_4) - (h_0 - T_0 s_0)$$

$$\varepsilon_{ss1} = (h_{ss1} - T_0 s_{ss1}) - (h_0 - T_0 s_0)$$

$$\varepsilon_{ss2} = (h_{ss2} - T_0 s_{ss2}) - (h_0 - T_0 s_0)$$

$$I_{Yog} = (\dot{m}_s (h_4 - h_1) - \dot{m}_s T_0 (s_4 - s_1) + \dot{m}_{ss} (h_{ss1} - h_{ss2}) - \dot{m}_{ss} T_0 (s_{ss1} - s_{ss2})) \quad (23)$$

3.2.3. Buharlı Güç Çevrimi Toplam Tersinmezlik ve Toplam Verim

Çevrimde bulunan yoğuşturucu ve kazandaki tersinmezlikler elde edildikten sonra sistemin toplam tersinmezliğinin elde edilmesi için aşağıda bulunan formüller kullanılmıştır.

$$I_{Top} = \sum I_{Sistem\ Elemanları} \quad (24)$$

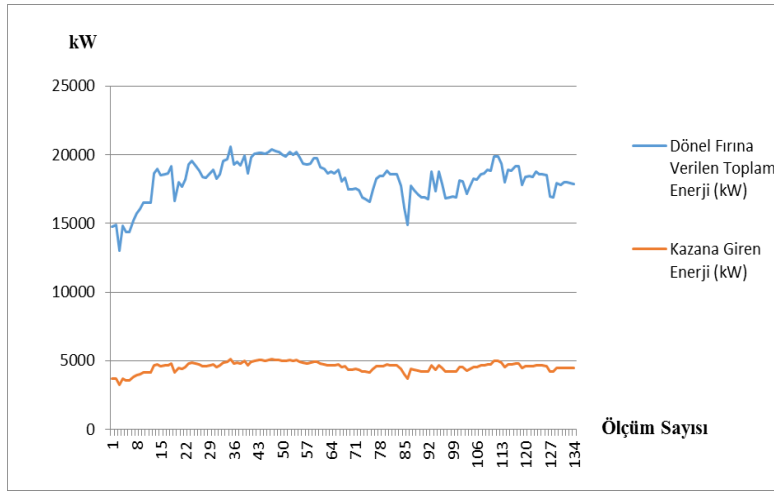
$$I_{Top} = I_K + I_{Yoğ} \quad (25)$$

$$I_{Top} = (\dot{m}_s (h_2-h_3) - \dot{m}_s T_0 (s_2-s_3) + \dot{m}_s (h_4-h_1) - \dot{m}_s T_0 (s_4-s_1) + \dot{m}_{ss} (h_{ss1} - h_{ss2}) - \dot{m}_{ss} T_0 (s_{ss1}-s_{ss2}) + Q_K (1 - T_0/T_K)) \quad (26)$$

Buharlı güç çevriminin çalışmasındaki yapılan kabuller;

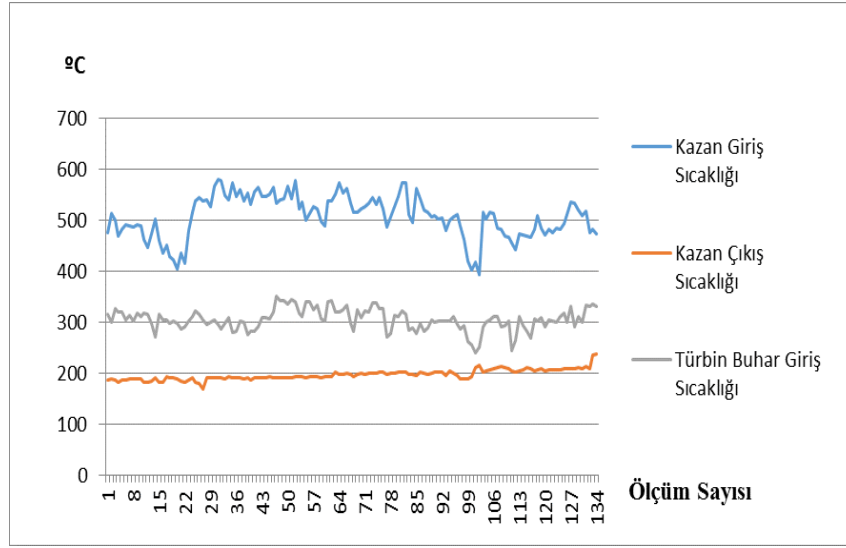
Çalışmada belirtilen kabuller yapılmıştır. Birinci ve ikinci kanun analizleri bu kabuller çerçevesinde yapılmıştır.

- Pompa hattı ve boru hattındaki basınç kayıpları ihmal,
- Pompada adyabatik sıkıştırma,
- Kazana döner fırın haricinde herhangi bir şekilde ısı transferi yoktur,
- Türbinden dış ortama ısı transferi yoktur,
- Türbinde sistemindeki basınç kayıpları ihmal,
- Kazanda ve yoğuşturucuda iş etkileşimi yoktur.



Şekil 3: Döner fırına verilen enerji – Kazana giren enerji

Şekil 3. Enerji grafiğinde görülmekte olan 127 ölçüm neticesinde Döner fırına verilen enerji miktarı ortalama 15000-20000 kW değerleri arasındadır. Bu ölçümlerde 15000 kW altında olan ölçümlerde görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi Döner fırındaki enerjinin %25'i kazana girmektedir.

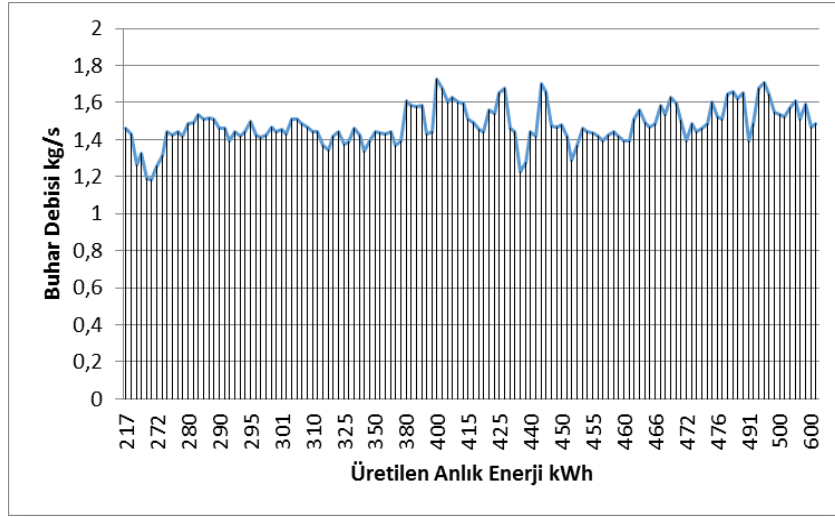


Şekil 4: Sıcaklık grafiği

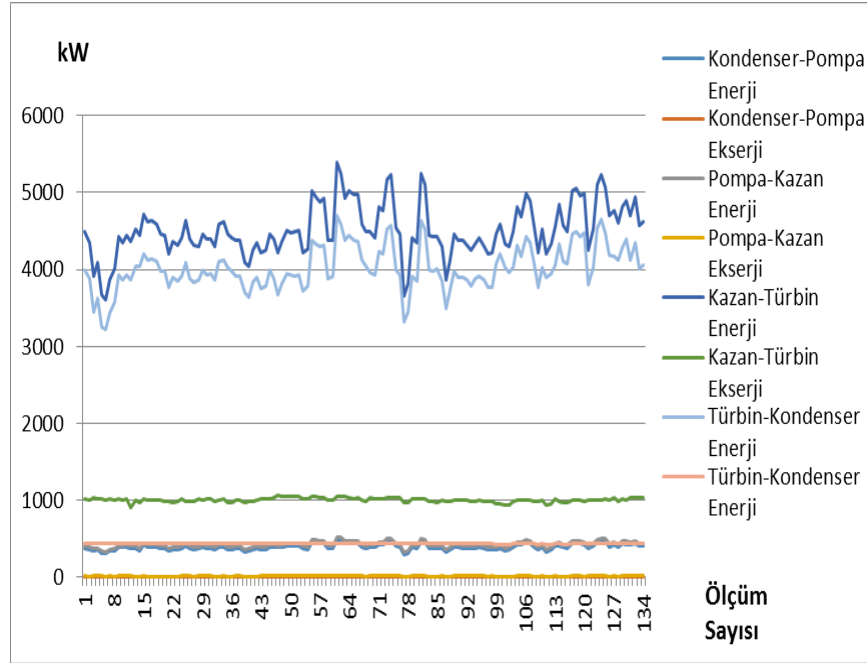
Şekil 4’teki sıcaklık değerleri kazana giriş, kazandan çıkış ve türbine giriş değerlerini göstermektedir. Döner fırından gelen atık ısı 400-580 °C ‘da kazana girer. Yapılan 129 ölçümde en düşük değerler 400 °C olduğu görülmektedir. Kazana giren sıcaklık inişli-çıkışlı bir grafik çizmiştir. Bunun sebebi ise Döner fırında işlenen malzeme yapısı ve çeşitliliğidir. Kazan çıkış sıcaklığı 200-220 °C değerleri arasındadır. Türbine giriş sıcaklığı ise 250-340 °C değerleri arasındadır.

Şekil 5. Buhar debisine karşılık gelen anlık enerji üretimi görülmektedir. Buhar debisi değerleri 4,2 – 6,2 t/h arasındadır. İstenilen 8 t/h değerine ulaşmadığı görülmektedir. Üretilen anlık enerji değerleri 217 – 600 kWh değerleri arasındadır.

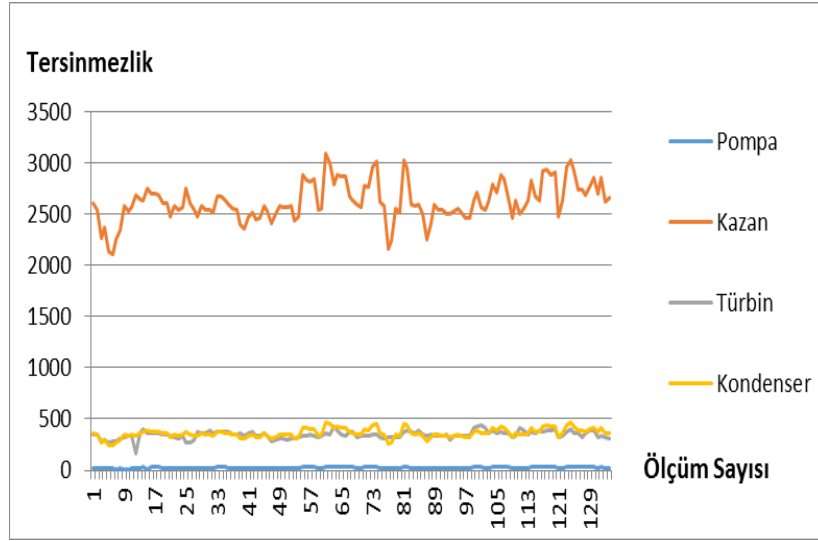
Şekil 6.’da çevrimde bulunan ana kısımlardaki enerji ve ekserji değerleri gösterilmektedir. Ölçüm değerleri ile yapılan analizler sonucunda 1 noktasındaki enerji değeri 320-470 kW, ekserji değeri 8-16 kW aralıklarında, 2 noktasında enerji değeri 325-528 kW, ekserji değeri 13-19 kW aralıklarında, 3 noktasında enerji değeri 3600-5400 kW, ekserji değeri 970-1050 kW aralıklarında, 4 noktasında enerji değeri 3320-4700 kW, ekserji değeri 430-440 kW aralıklarındadır.



Şekil 5: Buhar debisi - Anlık enerji



Şekil 6: Enerji ve ekserji grafiği



Şekil 7: Tersinmezlik grafiği

Şekil 7’de ölçümlerden elde edilen değerler ile yapılan enerji ve ekserji analizi sonucunda pompa, kazan, türbin ve kondenserdeki tersinmezlik değerleri gösterilmektedir. Tersinmezliğin en yüksek olduğu kısım kazandır. Kazandaki tersinmezlik değerleri 2000-3000 değerleri arasında ve sistem yapısı için yüksek olup, türbin ve kondenserde 250-480 aralığında, pompada ise bu değerler 30-50 aralığında makul seviyededir. Sistem istenilen seviyede enerji üretememektedir. Tersinmezlik değerlerinde de anlaşılacağı gibi kazanın yapısı sistem için uygun değildir.

4. EKONOMİK ANALİZ

4.1. Net Bugünkü Değer (NBD)

Projenin ekonomik analizinde kullanılan Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi ekonomik ömür boyunca projedeki net nakit akış girdilerinin yatırım için yapılmış giderlerin kabul edilmiş bir indirgeme oranı ile mevcut güne indirgenen değerleri arasında farkı gösterir.

Bir projenin uygulama kabulü net bugünkü değerın sıfıra eşit veya büyük olmasıyla gerçekleşmesi gerekmektedir. Projelerde net bugünkü değerın büyük olması o projenin öncelikli kabul edilmesi açısından öncelik verilmesini ifade etmektedir.

Çizelge 1: Projenin net bugünkü değer yöntemi ile ekonomik analiz tablosu

KOJENERASYON ÜNİTESİNİN NBD YÖNTEMİ İLE EKONOMİK ANALİZİ (\$)												
		Yıllar										
	Bugün	1	3	5	7	9	10	11	13	15	17	19
Yatırım												
Multistage Turbostage Generatör Seti	-\$285.032,14											
Acil Durum Pompası	-\$4.958,68											
Kontrol Paneli	-\$27.364,55											
Kondenser	-\$79.706,15											
Mühendislik Hizmetleri	-\$7.346,19											
Eğitim ve Devreye Alma	-\$29.017,45											
Nakliye	-\$2.534,44											
Toplam	-\$435.959,60											
İndirilmiş Toplam	-\$407.713,50											
Hurda Maliyeti	-\$40.771,35											
Nakit Akışı												
Elektrik tüketimi (0,1 \$/kWh)	-	-\$20.952,53	-\$24.893,70	-\$29.576,20	-\$35.139,49	-\$41.749,23	-\$45.506,66	-\$49.602,26	-\$58.932,44	-\$70.017,63	-\$83.187,94	-\$98.835,60
Elektrik üretimi (0,1 \$/kWh)	-	\$45.149,66	\$53.642,31	\$63.732,43	\$75.720,50	\$89.963,52	\$98.060,24	\$106.885,66	\$126.990,85	\$150.877,83	\$179.257,95	\$212.976,37
Bakım-Onarım (%2)	-	-\$443,63	-\$525,25	-\$621,87	-\$736,27	-\$871,71	-\$948,51	-\$1.032,08	-\$1.221,94	-\$1.446,73	-\$1.712,87	-\$2.027,97
Toplam Nakit Akışı		\$23.753,49	\$28.223,36	\$33.534,35	\$39.844,74	\$47.342,58	\$51.605,07	\$56.251,33	\$66.836,47	\$79.413,47	\$94.357,13	\$112.112,79
Kümülatif Nakit Akışı	-\$407.713,50	-\$383.960,00	-\$329.844,48	-\$265.545,67	-\$189.147,31	-\$98.372,56	-\$46.767,49	\$9.483,83	\$137.636,21	\$289.903,76	\$470.824,32	\$685.789,64
İskonto Oranı (9,5%)	\$0,37	\$0,33	\$0,28	\$0,24	\$0,19	\$0,16	\$0,15	\$0,14	\$0,11	\$0,10	\$0,08	\$0,07
Bugünkü Değer	-\$366.942,15	\$21.692,69	\$21.496,43	\$21.301,95	\$21.109,22	\$20.918,23	\$20.823,38	\$20.728,96	\$20.541,40	\$20.355,53	\$20.171,34	\$19.988,81
NBD						\$48.722,42						

5. SONUÇ ve TARTIŞMALAR

Ölçüm değerleri ile yapılan enerji-ekserji analizlerinin sonucunda 1 noktasındaki enerji değeri 320-470 kW, ekserji değeri 8-16 kW aralıklarında, 2 noktasında enerji değeri 325-528 kW, ekserji değeri 13-19 kW aralıklarında, 3 noktasında enerji değeri 3600-5400 kW, ekserji değeri 970-1050 kW aralıklarında, 4 noktasında enerji değeri 3320-4700 kW, ekserji değeri 430-440 kW aralıklarındadır. Ölçümlerden elde edilen değerler ile yapılan enerji ve ekserji analizi sonucunda pompa, kazan, türbin ve kondenserdeki tersinmezlik değerleri gösterilmektedir. Tersinmezliğin en yüksek olduğu kısım kazandır. Kazandaki tersinmezlik değerleri 2000-3000 değerleri arasında ve sistem yapısı için yüksek olup, türbin ve kondenserde 250-480 aralığında, pompada ise bu değerler 30-50 aralığında makul seviyededir. Sistem istenilen seviyede enerji üretememektedir. Tersinmezlik değerlerinde de anlaşılacağı gibi kazanın yapısı sistem için uygun değildir.

Hedeflenen elektrik enerjisi değerine ulaşılması için buhar türbinine gelen buharın sıcaklık, debi ve basınç değerlerinin firma taahhüdüne ulaşması gerekmektedir. Atık ısının kazana gelmeden önce döner fırınlardan çıktıktan sonra tozsuzlaştırmaya faydası olması açısından siklon grubuna gelmesi değerlerin yükselmesine yardımcı olacaktır. Atık ısı kazanının yapısı hakkında, kojenerasyon sisteminin çalışma şartlarına

uygunluğu açısından ayrı bir araştırma ve çalışma yapılarak kojenerasyon sistemine uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Sistemden istenilen seviyede verim alınmamasına rağmen mevcut halde yapılan ekonomik analizde sistemin 20 yıllık ömrü olduğu düşünüldüğünde yatırıma değer bir proje olduğu görülmektedir. Atık ısı kazanında yapılacak iyileştirmeler enerji üretim miktarını artırarak, kümülatif nakit akış değerinin pozitif duruma daha erken yıllarda gelmesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada kojenerasyon ünitesinin yatırım için taahhüt edilen değerlere ulaşmaması nedeniyle beklenen verimin altında çalıştığı görülmektedir. Atık ısı kazanının yapısı sistemle uyumlu çalışmamaktadır. Kazanın yetersizliği istenilen elektrik üretimine ulaşmakta zorluk çıkarmaktadır. Döner fırından gelen atık ısı manyezitin içeriğinden dolayı toz partiküllerini kazana taşımaktadır. Bu durum kazan boru demetlerindeki ısı transferinde olumsuz durumlara sebep olmaktadır. Hesaplamalarda tersinmezlik değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değer kazan sisteminde olduğu görülmektedir. Ekserji hesaplamaları göz önüne alındığında tersinmezlik değerlerinin en büyük olduğu çevrim elemanının kazan olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmanın sonuçları atık ısı kazanı kojenerasyon sistemine uyumlu çalışmadığı ve ayrı bir çalışma yapılarak detaylı incelenmesi gerektiği ortaya koymaktadır.

Net bugünkü değer yöntemi ile hazırlanan ekonomik analiz tablosunda görüldüğü gibi kümülatif nakit akış değeri 10. ve 11. Yıllar arasında pozitif geçmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

S.G.T.: Yöntem, doğrulama, analiz, araştırma, veri alma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

A.A.: Kavramsallaştırma, yöntem, doğrulama, araştırma, kaynaklar, gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

Altınkaynak, M. (2012). *Çimento Fabrikalarında Kullanılan Döner Fırının Termodinamik*. Süleyman Demirel Üniversitesi Enerji Sistemleri ABD.

Ballı, Ö. (2008). *Kojenerasyon sistemlerinin enerji, Kullanılabilirlik (ekserji) ve Ekserjiekonomik Analiz Yöntemleri Kullanılarak Performansının Değerlendirilmesi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.

Bejan, A. (1996). *Street Network Theory of Organization in Nature*. Journal of Advanced Transportation.

Bejan, A. (1997). *Advanced Engineering Thermodynamics*. New York: Jhon Wiley and Sons.

- Bilginsoy, A. K. (2012). *Bir Termik Santralde Termodinamik Analiz ve Isıl Süreçlerdeki Tersinmezliklerin Belirlenmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans.
- Cziesla, F., Tsatsaronis, G., & Zengliang, G. (2005). *Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in an externally fired combined cycle power plant*. Energy.
- Çengel, Y., Boles, M., & Kanoğlu, M. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. Mc Graw Hill.
- Dikili, K. (2019). *Atık Isı Kazanlı Gaz-Buhar Çevrimli Güç Santralinin Ekserji Analizi*. Zonguldak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Diñçer, İ. (2002). *The Role of Exergy in Energy Policy Making*. Energy Policy.
- Diñçer, İ., & Rosen, M. (2003). *Thermoeconomic Analysis Of Power Plants*. Energy Conversion and Management.
- El-Masri, M. (1997). *Exergy analysis of combined cycles: Part 1 – Air cooled Brayton cycle gas turbine*. ASME J. Eng. Gas Turbine Power.
- Erdoğan, M. (2023). *Endüstriyel Bisküvi Fırınının Termodinamik, Maliyet Analizi Ve Atık Isı Geri Kazanımı*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Ersayın, E. (2020). *Atık Isı Geri Kazanımında Yeni Tekniklerin Modellenmesi*. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gürtürk, M. (2015). *Alçı Üretimi Yapan Bir Tesisin Enerji Ekserji ve Eksergoekonomik Analiz Yöntemiyle Performansının Değerlendirilmesi*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Güven, H., Ekmekçi, İ., & Çiçek, A. (2003). *Bir Sanayi Tesisinde Kojenerasyon Ve Atık Isı Geri Kazanımının İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.
- Horlock, J. (1995). *Combined power plants-past, present and future*. Gas Turbines Power .
- Karamarkovic, V., Marasevic, M., & Karamarkovic, R. (2013). *Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns*. Applied Thermal Engineering.
- Karanfil, G., Rüşen, S. E., Poyraz, Ş., & Güler, M. (2020). *Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri Ve Isıl Verim Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi*. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi.
- Kolay, E. (2004). *Kojenerasyon Sistemlerinde Atık Isı Kullanımı Ve Bir Uygulama Örneği*. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kuvel, A. (2005). *Baca Gazlarından Atık Isı Geri Kazanımının Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Memiş, O. (2019). *Çimento Sektöründe Atık Isı Geri Kazanım (WHR) Sisteminin Ekserji ve Enerji Analizi*. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Mühendisliği İşletim ve Teknolojileri Anabilim Dalı.
- Mert, M. S. (2010). *Bir Güç Santralinin Ekserjik ve Termoekonomik Analizi*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Rant, Z. (1964). *Exergie and Anergie*. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden.
- Shrikant, K., & Chaube, A. (2013). *Exergy Analysis of Birla Cement Plant Satna*. International Journal of Scientific & Engineering Research.
- Şahin, H. E. (2012). *Kritik-Üstü Tip Bir Buharlı Güç Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Tarakçıoğlu, A. (2006). *Sanayide Atık Isıdan Yararlanma Yöntemleri*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Terhan, M., Özağdaş, E., & Omar, M. (2023). *Ekonomizer, Yoğuşmalı Ekonomizer Ve Hava Ön Isıtıcı Tasarımları İle Atık Isı Geri Kazanımının Enerji Ve Ekonomik Değerlendirilmesi*. Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi.

Tunca, S. G. (2015). *Sinter Manyezit Üretimi Dönel Fırınlarındaki Atık Isının Elektrik Üretiminde Değerlendirilmesi*. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Tütüncü, G., & Özgener, Ö. (2016). *Çimento Sektöründe Atık Isı Geri Kazanım (WHR) Sisteminin Termodinamik İncelenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi.

Variyenli, H., & Göktekin, K. (2018). *Hermetik Gaz Yakıcı Cihazlardaki Atık Isı Enerjisinin Elektrik Enerjisine Dönüştürülmesi*. Politeknik Dergisi.

Wall, G., & Gong, M. (2001). *On Exergy And Sustainable Development – Part 1: Conditions And Concepts*. Exergy, An International Journal.

Yazıcı, H., & Selbaş, R. (2011). *Bir Buharlı Güç Santralinin Enerji Ve Ekserji Analizi*. Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, Cilt 10, Sayı 1.