

## BİR KAMU BİNASINDAKİ SICAK SU KAZANINA UYGULANAN ATIK ISI GERİ KAZANIMININ ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZİ

Hacer AKHAN<sup>1\*</sup>, Özgür ÖZAYDIN<sup>1</sup>, Samet ÖZDEMİR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Bölümü, Ahmet Karadeniz Yerleşkesi, Edirne, Türkiye

**Makale Künye Bilgisi:** Akhan, H., Özaydın, Ö., Özdemir, S. (2024). Bir Kamu Binasındaki Sıcak Su Kazanına Uygulanan Atık Isı Geri Kazanımının Enerji Verimliliği Analizi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 25(1), 53-64.

Öne Çıkanlar	
	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Enerji atıklarının değerlendirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve mevcut enerji kayıplarının önlenmesi.</li><li>➤ Tüketilen enerji miktarının kalite ve performansı düşürmeden en aza indirilmesi.</li><li>➤ Isıtma sisteminde kullanılan kazanın enerji verimliliği incelenmiştir.</li><li>➤ Geri kazanılan enerjinin karşılığı kadar yakıt kullanılmayarak tasarruf sağlanmaktadır.</li></ul>
Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihçesi:</b> Geliş: 31 Ocak 2024 Kabul: 28 Haziran 2024	Endüstriyel tesislerde birçok uygulama sonucunda ve kamu binalarında mekanik sistemlerde atık ısı meydana gelir ve bu atık ısının atmosfere atılmadan önce işletmede farklı faydalı amaçlar için kullanılması ile önemli miktarlarda enerji ve para tasarrufu sağlanabilir. Bu çalışmada kamu binasının ısıtma sisteminde kullanılan sıcak su kazanının enerji verimliliği incelenmiştir. Verim artırıcı uygulamalar kapsamında atık ısıdan faydalanarak hangi oranlarda tasarruf sağlanacağı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta baca gazlarını bir ısı eşanjöründe kullanılıp atık ısı değerlendirilerek, kazanda kullanılan yakma havasının veya besleme suyunun ısıtılması sağlanabilir. İncelenen sıcak su kazanı sisteminin bacası ısı geri kazanımı yapılacak şekilde, ekonomizerli olarak önerilmektedir. Geri kazanılan enerjinin karşılığı kadar yakıt kullanılmayarak tasarruf sağlanmaktadır. Kazanda yapılan iyileştirmeler sonucunda yakıt tasarrufu 138 Nm <sup>3</sup> /h, kazan verimi artışı %3,87 olarak belirlenmiştir. Maliyet analizi geri ödeme süresi yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ekonomizerli sistemde yıllık \$29.049,0/yıl parasal tasarruf hesaplanmıştır. Eğer incelenen kamu binasında ekonomizerli kazan kullanılırsa, iyileştirmelerin geri ödeme süresi 0,13 yıl olacaktır.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Kazanlarda enerji verimliliği; Enerji tasarrufu; Atık ısı geri kazanımı	

### Energy Efficiency Analysis of Waste Heat Recovery Applied to a Hot Water Boiler in a Public Building

Article Info	Abstract
<b>Article Info:</b> Received: January 31, 2024 Accepted: June 28, 2024	As a result of many applications in industrial plants and mechanical systems in public buildings, waste heat is generated, and significant amounts of energy and money can be saved by using this waste heat for different useful purposes in the enterprise before it is discharged into the atmosphere. In this study, the energy efficiency of the hot water boiler used in the heating system of the public building has been investigated. Within the scope of efficiency-enhancing applications, it has been determined at which rates savings will be achieved by utilising waste heat. The exhaust gases leaving the boiler at high temperature can be used in a heat exchanger and the waste heat can be utilised to heat the combustion air or feed water used in the boiler. The chimney of the hot water boiler system examined is proposed as economiser for heat recovery. Savings are achieved by not using fuel equivalent to the recovered energy. As a result of the improvements made in the boiler, fuel saving was determined as 138 Nm <sup>3</sup> /h and boiler efficiency increase as 3.87%. The cost analysis was calculated using the payback period method. Annual monetary savings of \$29,049.0/year were calculated in the economiser system. If economiser boiler is used in the public building, the payback period of the improvements will be 0.13 years.
<b>Keywords:</b> Energy efficiency in boilers; Energy saving; Waste heat recovery	

## 1. Giriş

Enerji verimliliği, enerji kaynaklarının üretimden, iletim-dağıtım ve tüketime kadar tüm aşamalarda en yüksek etkinlikte değerlendirilmesidir. Enerji verimliliği, binalarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin, endüstriyel işletmelerde ise üretim kalitesi ve miktarının düşüşüne yol açmadan birim hizmet veya ürün miktarı başına enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Temel hedef, birim milli gelir başına tüketilen enerjiyi azaltmaktır. Enerji tasarrufu, enerji atıklarının değerlendirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve mevcut enerji kayıplarının önlenmesi yoluyla tüketilen enerji miktarının ekonomik kalkınmayı ve sosyal refahı engellemeden, kalite ve performansı düşürmeden en aza indirilmesi olarak tanımlanmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığına, 2021).

Enerji, hayatımızın her alanında ihtiyaç duyduğumuz bir kaynaktır. Enerji üretimi ve ısıtma için yaygın olarak kullanılan cihazlardan biri de kazanlardır. Kazanlar, yakıtın yanmasıyla oluşan ısı enerjisini suya veya başka bir akışkana aktararak buhar veya sıcak su üretirler. Bu buhar veya sıcak su, daha sonra ısıtma, soğutma, elektrik üretimi veya endüstriyel süreçler gibi farklı amaçlar için kullanılabilir.

Kazanların enerji verimliliği, işletme maliyetlerini azaltmak, enerji tasarrufunu sağlamak ve çevreyi korumak için önemlidir. Enerji verimliliği ve tasarrufu sağlamak için birçok farklı yöntem mevcuttur ve son teknolojilerin kullanımı ile kazanların daha verimli çalışması mümkündür.

Kazanların enerji verimliliğini artırmak için dikkat edilmesi gereken bazı faktörler şunlardır:

- İyi izolasyon: Kazanların çevresinde iyi bir şekilde izole edilmesi, ısı kaybını önler ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Isı kaybı kazanın verimini düşürmekte ve daha fazla yakıt tüketimine neden olmaktadır. Bu

nedenle, kazanların izolasyon malzemesi, kalınlığı ve durumu önemli olmaktadır.

- Düzenli bakım: Kazanların düzenli olarak yapılan bakım işleri, kazanın verimli çalışmasını sağlamaktadır. Bakım işlerini, kazanın temizliği, ayarı, kontrolü ve onarımı gibi işlemleri içermektedir. Bakımsız kazanlar, performans kaybına, arızalara, emisyon artışına ve güvenlik risklerine yol açabilmektedir.

- Geri kazanım sistemleri: Kazandan çıkan atık sıcak baca gazının veya buharının başka bir süreçte tekrar kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu şekilde, kazanın verimliliği artar ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Örneğin, atık ısı geri kazanım sistemi, baca gazından ısıyı geri kazanarak giriş suyunu ısıtmaktadır. Buhar geri kazanım sistemi ise, buharı yoğunlaştırarak ısıyı geri kazanıp kazana geri göndermektedir. Ekonomizer gaz çıkış sıcaklığı, fuel oil yakıtlı kazanlarda 180°C, motorin yakıtlı kazanlarda 150°C, doğal gaz ve LPG yakıtlı kazanlarda 110°C'ye kadar düşürülebilir. Her 20 °C baca gazı sıcaklık düşümü, verimde %1 artışa neden olmaktadır (Enerji Yöneticisi Eğitimi Ders Notları, 2021).

- Yüksek verimli kazanlar: Daha az enerji tüketen kazanlardır. Yakıtın yanmasıyla oluşan ısı enerjisinin daha iyi değerlendirip ve daha az atık ısı üretmektedir. Yüksek verimli kazanlar, geleneksel kazanlara göre daha maliyetli olabilir, ancak uzun vadede enerji tasarrufu sağlayarak yatırım maliyetini karşılamaktadır.

Dünyanın farklı ülkeleri enerji verimliliği önlemlerinin eksikliği sorununu ele almış ve enerji yönetimi alanında çeşitli araştırmalar yürütmüştür (Cagno vd., 2013; Lozano vd., 2018). Örneğin, Çin (Zang vd., 2015), Amerika Birleşik Devletleri (Worrell vd., 2000), Etiyopya (Tesema ve Worrell, 2015), Tayland (Hasanbeigi vd., 2011) ve Türkiye'den (Ates ve Durakbasa, 2012) yapılan önceki çalışmalar, çimento

endüstrisindeki enerji verimliliği potansiyelini farklı bir perspektiften araştırmıştır. Hasan ve ark. Bangladeş endüstrisinde enerji verimliliği olasılığı üzerine önceki iki araştırmayı (Hasan vd., 2019; Hasan vd., 2019; Hossain vd., 2020) araştırdı. Andersson ve Thollander (2019), İsveç kağıt hamuru ve kağıt endüstrisinde enerjiyle ilgili temel performans göstergelerinin mevcut uygulama ve operasyonelleştirme düzeyini incelenmiştir. Backlund ve ark. (2012), yönetim faaliyetlerinden kaynaklanan enerji verimliliği potansiyelinin, enerji yoğun endüstriler için daha fazla enerji verimli teknolojinin uygulanmasından kaynaklanan potansiyelden daha büyük olduğunu tahmin etmiştir. Tollander ve Ottosson, endüstrilerdeki gerçek enerji yönetimi uygulamalarına ilişkin araştırmaların az olduğunu ileri sürmektedir (Yang vd., 2023). Daha önceki çalışmalar tarafından desteklenen bir argüman (Thollander ve Ottosson, 2010; Yin, 2009), aynı zamanda hem teorik katkılar hem de pratik vaka çalışmaları ile ilgili daha fazla araştırma yapılmasını talep etmektedir. Schulz ve Stehfest (1984) bölgesel enerji tedariki iş birliği yoluyla emisyonları azaltma olasılığını erkenden tespit etmiştir. Daha sonra, farklı şirketler arasında enerji konularıyla ilgili bölgesel iş birliğinin hem finansal hem de çevresel açıdan faydalı olduğu ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmada geniş bir potansiyele sahip olduğu ortaya çıkmıştır (Klugman vd., 2009). Bölgesel ısı piyasası iş birliğine ilişkin daha ileri çalışmalar, toplam enerji tasarrufu olanaklarını göstermektedir (Karlsson vd., 2009; Thollander vd., 2007). Son yıllarda ilgi çeken çözümlerden biri de kojenerasyon sistemleridir (Marshman vd., 2010). Rudberg ve ark. (2013), enerji yoğun proses endüstrilerinde enerji yönetimini stratejik gündeme koymak için gerekli önkoşulları araştırmıştır. Binaların en az enerji ile ısıtılmasının termodinamik birinci ve ikinci yasalarına göre değerlendirilmesi üzerine çalışılmıştır (Can, 2011).

Yang, Lin, Pan, Geng, Chen, Liu (2023), hidrojenle zenginleştirilmiş doğal gazın kullanımının yoğunmalı

kazanların enerji tasarrufu ve termal performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Hidrojenle zenginleştirilmiş doğal gazın yanması, baca gazındaki su içeriğini artırarak yoğunmalı kazanların ek gizli ısıyı geri kazanmasını sağlamaktadır. 2,8 MW'lık sabit bir ısı yükünde gerçekleştirilen değerlendirmeler, H<sub>2</sub> zenginleştirmesinin alevin radyasyon yoğunluğunu artırdığını ve kazan verimliliğini artırarak ısı geri kazanımını sağladığını göstermektedir. H<sub>2</sub> fraksiyonu %0'dan %100'e çıktıkça, CO<sub>2</sub> emisyon yoğunluğu önemli ölçüde azalmaktadır. Çalışma, hidrojenle zenginleştirilmiş doğal gaz yoğunmalı kazanların potansiyel uygulama alanlarını ve karbon azaltma etkilerini inceleyerek, teorik bir referans sunmaktadır (Yang vd., 2023). Chen, Ye, Shen, Wang, Deng, Yang (2021), Hunan eyaletini örnek alarak özel olarak uyarlanmış enerji verimliliği standartlarının yerel endüstriyel sistemler için kritik önem taşıdığını vurgulamıştır. Eyaletin önde gelen endüstriyel yapısına dayanarak, etkin enerji ve ekserji analiz yöntemleri kullanılarak endüstriyel kazanların verimliliği incelenmiştir. Referans standartları, analitik hiyerarşi süreci ve belirsizlik analizi sonuçlarına dayanarak bölgesel endüstriyel kazan enerji verimliliği için önerilerde bulunulmuştur. Analiz, egzoz gazı sıcaklığı, yakıt uçucu maddesi, hava katsayısı, kazan kapasitesi, soğuk hava sıcaklık, cüruf karbon içeriği ve cüruf sıcaklığı gibi endüstriyel kazan sistemini etkileyen ana faktörleri belirlemiştir. Bu 4 faktörün anlaşılması, endüstriyel kazan sistemlerinde daha fazla enerji tasarrufunu mümkün kılacak yenileme projelerinin tasarımı için teorik bir temel sağlamaktadır. Hunan'ın enerji verimliliği standartları, karşılaştırmalı çalışmalar sonucunda önerilmiştir (Chen vd., 2021). Wang, Zou, Lu, Li, Hu, ve Wang (2024) tarafından yapılan araştırmaya göre, düşük yük altında kazanın yanma kararlılığının bozulduğu ve karbon yanma katsayısının düştüğü belirlenmiştir. Bu durum, kazanın termal verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Kazanın enerji verimliliği seviyelerini anlık olarak izlemek için

çevrimiçi izleme yöntemleri kullanılabilceği belirtilmiş, ancak karbon yanma katsayısının çevrimiçi izlenmesinin zorlu bir meydan okuma olduğu vurgulanmıştır. Araştırmada, fazla hava katsayısı ile karbon yanma katsayısı arasında bir teorik model geliştirilmiş ve çevrimiçi izleme sonuçları, daha düşük karbon yanma katsayısının kazan enerji verimliliğini artırabileceğini göstermiştir. Ancak, kısmi yük altında kazanlarda gerçek hava akışındaki eksikliklerin bu çalışma modunu etkileyebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, karbon tükenmişlik katsayısının birim yük arttıkça yükseldiği, birim yük düştükçe azaldığı tespit edilmiştir. Düşük yük altında kazanın yanma kararlılığı ve veriminin önemli ölçüde azaldığına dikkat çekilmiş ve çevrimiçi izleme yöntemlerinin, bu koşullarda kazan enerji verimliliğini iyileştirmek için temel bir araç sağlayabileceği ifade edilmiştir (Wang vd., 2024). Satyavada ve Baldi'nin (2018) çalışmasına göre, yoğunmalı kazanlar, baca gazlarından gelen ısının kazan girişindeki soğuk suyu ön ısıtarak çalışmaktadır, bu da enerji verimliliğini geleneksel kazanlara göre %10-12 artırmaktadır (Satyavada ve Baldi, 2018).

Bu çalışmada, kamu binasının ısıtma sisteminde kullanılan kazanın verimlilik açısından incelenmiştir. Ölçme, analiz etme ve değerlendirme aşamalarından sonra sistem iyileştirmeleri, verimlilik artırıcı yöntemler önerilmiştir. Isıtma sisteminde kullanılan kazanın atık ısıdan faydalanarak hangi oranlarda tasarruf sağlanacağı incelenmiştir. Yüksek sıcaklıktaki baca gazları kullanılıp atık ısı değerlendirilerek, enerji, yakıt tasarrufu ve ekonomik kazanç sağlanmaktadır.

Hedefler:

- Mevcut kazan sisteminin performansının belirlenmesi,
- Mevcut sistemde yapılabilecek iyileştirmelerin tespit edilip uygulanabilirliğinin ortaya konulması,
- Atık enerjiyi faydalı enerjiye dönüştürerek, enerji, yakıt tasarrufu ve ekonomik kazanç sağlanmasıdır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Deneysel Tesisi

#### 2.1.1. Sistem Özellikleri

Proje kapsamında incelenen sıcak su kazanı, gaz yakıtlıdır. Kazan 2011 yılında üretilmiştir. Kazanda yakıt olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Maksimum çalışma basıncı 3 bar, maksimum çalışma sıcaklığı 100°C, hidrostatik basıncı 4 bar'dır. Kazan dış yüzey izolasyonu 100'lük rapis telli taş yünü üzeri 0,60 gofrajlı alüminyum sac ile kaplanmıştır. Sıcak su kazanı teknik özellikleri **Tablo 1**'de verilmiştir.

Kazan dairesinde 3 sıcak su kazanı yer almaktadır, ancak 1 tanesi aktif olarak çalıştırılmaktadır. **Şekil 1**'de incelenen sıcak su kazanının bulunduğu kazan dairesi görüntüsü yer almaktadır. İncelenen sıcak su kazanı şekilde en sağdaki kazandır. Mevcut sıcak su kazanı sisteminde ekonomizer ısı geri kazanımı sistemi kullanılmamaktadır. **Şekil 2**'de kazan çıkış kanalı ve kazanın dağıtım kanalları, **Şekil 3**'te kazanının kumanda panosu ve doğalgaz sayacı görülmektedir.

**Tablo 1.** İncelenen kazanın teknik özellikleri

Özellik	Değer
Kazan cinsi	Gaz/Sıvı yakıtlı sıcak su kazanı
Kazan tipi	TR P 814
Üretim tarihi	2011
Kapasite	814
Maksimum çalışma basıncı	3 bar
Maksimum çalışma sıcaklığı	100 °C
Su hacmi	1040 lt
Hidrostatik test basıncı	4 bar



**Şekil 1.** İncelenen sıcak su kazanının bulunduğu kazan dairesi görüntüsü (En sağdaki incelenen kazan)



Şekil 2. İncelenen kazanının sıcak su dağıtım kanalları



Şekil 3. Sıcak su kazanının kumanda panosu ve doğalgaz sayacı

### 2.1.2. Ölçüm Cihazları

Çalışmada, akredite olmuş ulusal kuruluşlar tarafından kalibrasyonu yapılmış ve etiketlenmiş ölçüm cihazları kullanılmıştır. Çalışma süresince termal kamera, baca gazı emisyon ve sıcaklık ölçüm cihazı, sistem üzerine sabit montajlı basınç, debi ve sıcaklık ölçerlerden faydalanılmıştır.

Şekil 4'te görülen termal kamera kazan yüzey sıcaklıklarını belirlemek için kullanılmıştır. Enerji israflarını, yapısal kusurları tespit edebilmekte ve AR-GE ürün kalitesi için kolaylıkla, hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edebilmektedir. (-20 +1200 C) yüksek çalışma sıcaklık aralığı ve 0.045° hassasiyet ile rahatlıkla kullanabilmektedir. 8X zoom özelliği, Led ışık, Lazer işaretleyici ve değiştirilebilir lensler sayesinde problemleri alanı görebilir, işaretleme yapabilir ve aynı anda 5 farklı noktayı görüntüleyebilir ve sıcaklık değerlerini incelenebilmektedir. Ayrıca minimum, maksimum ve ortalama değer alınabilmektedir.

Şekil 5'te görülen baca gazı ölçüm cihazı, Oksijen(O<sub>2</sub>), Karbonmonoksit (CO), Azotoksit (NO), Sülfür (SO<sub>2</sub>) veya Azotdioksit (NO<sub>2</sub>), Hidrokarbon (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>), Hidrojen (H<sub>2</sub>) ve Hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), Amonyak (NH<sub>3</sub>) ve Hidroklorikasit (HCl) ölçümü yapmaktadır.

Baca gazı ölçüm cihazı, 2.60 L/dk pompa çekiş gücüne sahiptir.



Şekil 4. Ölçümlerde kullanılan termal kamera



Şekil 5. Ölçümlerde kullanılan baca gazı ölçüm cihazı

### 2.2. Yapılan Ölçümler ve Alınan Değerler

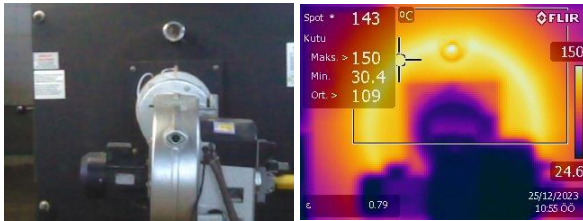
Sıcak su kazanı sisteminde doğalgaz tüketimi ve basıncı, baca gazı çıkış sıcaklığı ve emisyon değerleri, kazan yüzey sıcaklıkları ve ortam koşulları değerleri ölçülen başlıca parametrelerdir. Tablo 2'de kazan sisteminde yapılan ölçümler ve alınan değerler yer almaktadır. Mevcut sistemde ekonomizer bulunmamaktadır, tablodaki "Eko dahil" verileri tasarım değerleridir.

Ölçülen veriler değerlendirildiğinde, kazanda baca gazı sıcaklıkları 120-150 °C aralığında bulunması normal kabul edilmektedir. O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve CO değerleri kabul edilebilir düzeydedir.

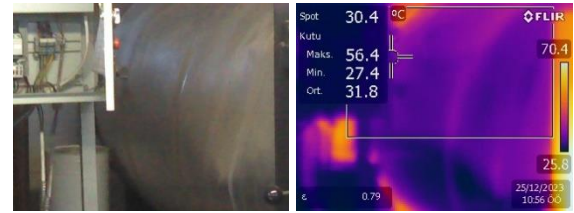
Şekil 6'da kazan ön yüzey sıcaklık dağılımı, Şekil 7'de kazan sağ yüzey ve Şekil 8'de sol yüzey sıcaklık dağılımı yer almaktadır. Termal görüntülerde kazan dış yüzey malzemesi emisivite değeri 0,79 'dır.

**Tablo 2.** Kazan sisteminde yapılan ölçümler ve alınan değerler

Tarih	03.01.2024				
Ekonomizer Durumu		<b>Eko Hariç</b>		<b>Eko Dahil</b>	
Yanma Havası Damper Açıklığı		<b>100%</b>		<b>100%</b>	
Data Toplama Zamanı		0	15 dakika	0	15 dakika
Doğalgaz Değeri	m <sup>3</sup>	3.510.000,9	3.510.094,9	3.510.094,9	3.510.157,6
Doğal Gaz Basıncı	mbar	280,0	280,0	280,0	280,0
Doğal Gaz Sıcaklığı	°C	26,0	26,0	26,0	26,0
Doğal Gaz Sayaç Değeri	Nm <sup>3</sup>	3.861.001,0	3.861.104,4	3.861.104,4	3.861.173,3
Çıkış Basıncı	bar	1,70	1,70	1,70	1,70
Su Sayaç Değeri	kg	65	65	65	65
<b>Baca gazı Sıcaklığı</b>					
Ekonomizer Öncesi	°C	172,60	186,90	172,60	186,90
Ekonomizer Sonrası	°C	172,60	186,90	100,21	108,28
<b>Baca gazında O<sub>2</sub> Oranı</b>					
Baca gazında O <sub>2</sub> Oranı	%	4,10	4,10	4,10	4,10
<b>CO Oranı</b>					
CO Oranı	ppm				
<b>Ortam Sıcaklığı</b>					
Ortam Sıcaklığı	°C	23,1	23,1	23,1	23,1
<b>Bağıl Nem Miktarı</b>					
Bağıl Nem Miktarı	%	55,0	55,0	55,0	55,0
<b>Besi Suyu İletkenliği</b>					
Besi Suyu İletkenliği	ppm	150,0	150,0	150,0	150,0
	mS/cm	234,0	234,0	234,0	234,0
<b>İletkenlik Ölçülen Sıcaklıklar</b>					
İletkenlik Ölçülen Sıcaklıklar	°C	21,0	21,0	21,0	21,0
<b>Kazan Yüzey Sıcaklıkları</b>					
Ön Yüzey	°C	40,00	41,10	40,00	41,10
Arka Yüzey	°C	28,00	28,00	29,00	29,00
Sol Yan Yüzey	°C	27,40	27,50	27,00	27,00
Sağ Yan Yüzey	°C	30,00	30,10	30,00	30,00



Şekil 6. Kazan ön yüzey sıcaklık dağılımı



Şekil 8. Kazan sol yüzey sıcaklık dağılımı



Şekil 7. Kazan sağ yüzey sıcaklık dağılımı

### 2.3. Analiz ve Hesaplamalar

Kazanlarda verimlilik hesaplaması doğrudan yöntem ve ısı kaybıyla dolaylı yöntem olarak iki yol ile hesaplanabilmektedir (Enerji Yöneticisi Eğitimi Ders Notları, 2021). Bu çalışmada kayıpların hesaplanması

yöntemi kullanılarak, kazan verimi hesaplanmıştır. Kayıpları belirleyip azaltarak, verimi artırmak hedeflendiği için kayıp yöntemi seçilmiştir. Tüm kayıpları toplayıp aşağıdaki denklemini kullanarak verimlilik hesabı yapılmıştır.

$$Kazan\ verimi\ (\% \eta) = 100 - L_{Toplam} \quad (1)$$

$L_{Toplam}$  ısı kayıpları toplamıdır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$L_{Toplam} = L_{KBG} + L_{N BG} + L_{COBG} + L_{RK} + L_B \quad (2)$$

**Tablo 3.** Kazandan kaynaklanan başlıca ısı kayıpları (Enerji Yöneticisi Eğitimi Ders Notları, 2021)

Isı Kaybı	Denklemler
1. Kuru Baca Gazı Yoluyla Olan Isı Kaybı ( $L_{KBG}$ )	$L_{KBG} = \frac{K \times (T_{BG} - T_0)}{CO_2} \times \frac{Yakıt\ üst\ ısı\ değeri}{Yakıt\ alt\ ısı\ değeri} \quad (3)$
	$K = \frac{69,7 \times C_{yakıt} \times (Yakıtın\ alt\ ısı\ değeri)^2}{(Yakıtın\ üst\ ısı\ değeri)^3} \quad (4)$
	$CO_2 = \left\{ 1 - \left[ \frac{O_2}{21} \right] \right\} \times (CO_2)_{max} \quad (5)$
	$(CO_2)_{max} = \%11,74 \quad (6)$
2. Baca Gazındaki Nem Nedeniyle Olan Isı Kaybı ( $L_{N BG}$ )	$L_{N BG} = \frac{(9 \times H_{yakıt}) \times (50 - T_0 + (0,5 \times T_{BG}))}{Yakıt\ üst\ ısı\ değeri} \times \frac{Yakıt\ üst\ ısı\ değeri}{Yakıt\ alt\ ısı\ değeri} \quad (7)$
3. Baca gazındaki Yanmamış Karbonmonoksit Nedeniyle Olan Isı Kaybı ( $L_{COBG}$ )	$L_{COBG} = \frac{K \times CO_{BG}}{CO_2 + CO_{BG}} \times \frac{Yakıt\ üst\ ısı\ değeri}{Yakıt\ alt\ ısı\ değeri} \quad (8)$
	$Doğal\ Gaz\ için\ K\ değeri = 32 \quad (9)$
4. Blöf Nedeniyle Olan Isı Kaybı ( $L_B$ )	$L_B = \frac{(T_B - T_{H2O}) \times BM \times (100 - L)}{((T_B - T_{H2O}) \times BM) + ((100 - BM) \times (660 - T_{H2O}))} \times \frac{Yakıt\ üst\ ısı\ değeri}{Yakıt\ alt\ ısı\ değeri} \quad (10)$
	Denklemden $T_B$ blöf suyu sıcaklığı, $T_{H2O}$ besi suyu sıcaklığı ve $BM$ blöf miktarıdır. $BM = \frac{Besi\ suyu\ iletkenliği}{Kazan\ suyu\ iletkenliği} \times 100 \quad (11)$
5. Kazan Yüzeyinden Radyasyon ve Konveksiyonla Olan Isı Kaybı ( $L_{RK}$ )	$L_{RK'} = (U_r + U_c) \times A \times (T_y - T_0) \quad (12)$
	$U_r = \frac{E \times 5,67}{(T_y - T_0)} \times \left[ \left( \frac{T_y}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$
	Denklemden $E$ yüzey malzemesine ve işleme şekline bağlı Emissivite katsayısı, $T_y$ yüzey sıcaklığı ve $T_0$ ortam sıcaklığıdır.
	$U_c = B \times (T_y - T_0)^{0,25} \quad (14)$
	$B$ değeri, yukarıya bakan yatay yüzeyler için 1,7, dikey yüzeyler ve geniş silindirlere için 1,45 ve yatay silindirlere için 1,2 alınmaktadır.
	$L_{RK} = \frac{L_{RK'}}{Yakıt\ tarafından\ verilen\ ısı} \quad (15)$
Toplam ( $L_{Toplam}$ )	$L_{Toplam} = L_{KBG} + L_{N BG} + L_{COBG} + L_{RK} + L_B \quad (2)$

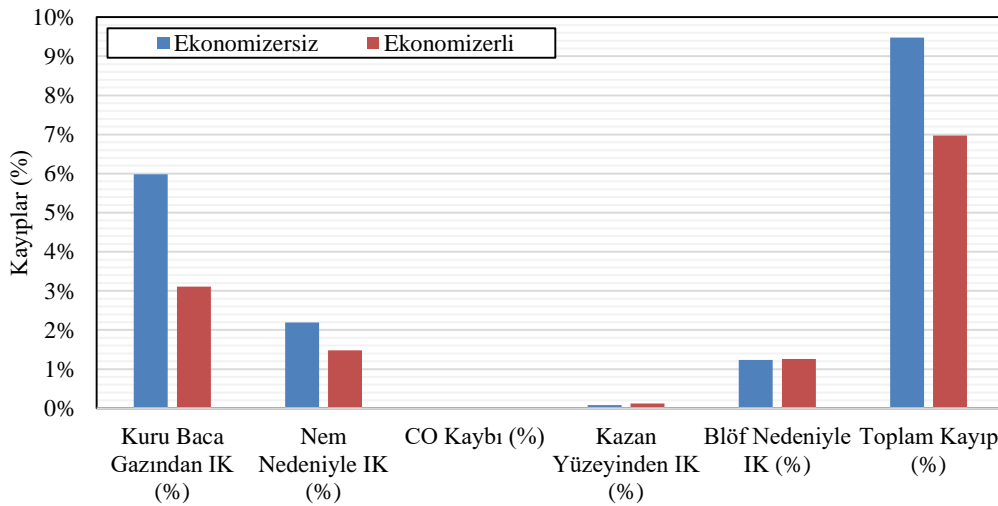
**Tablo 3**'teki denklemler ve ölçülen değerler kullanılarak, ekonomizerli ve ekonomizersiz durum için kazanda oluşan ısı kayıpları hesaplanmıştır. Isı kayıplarıyla dolaylı yöntem kullanılarak her bir durum için verim belirlenmiştir. **Tablo 4**'te ekonomizerli ve ekonomizersiz durum için sıcak su kazanı sistemi kayıpları ve kazan verimi değerleri görülmektedir. Kazanda yapılan iyileştirmeler sonucunda kazan verimi

artışı %3,87 olarak belirlenmiştir. **Şekil 9** ve **Şekil 10**'da ekonomizerli ve ekonomizersiz durum için sıcak su kazanı sistemi kayıpları yüzdelik olarak verilmektedir. Baca gazı analizinde ölçülen  $O_2$  değerleri dikkate alınarak fazla hava oranı şu formül kullanılarak hesaplanabilmektedir.

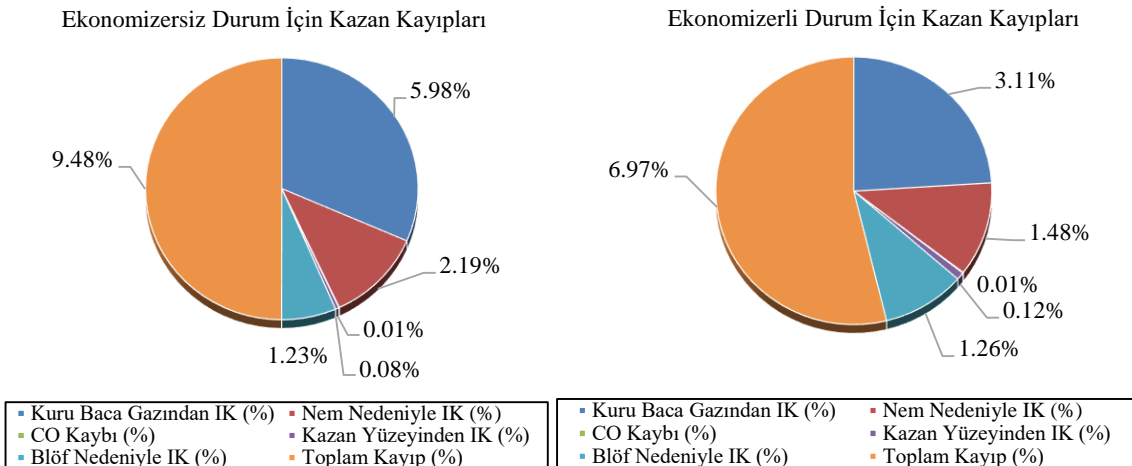
$$\text{Fazla Hava Oranı (\%)} = \frac{O_2}{21-O_2} * 100 \quad (16)$$

**Tablo 4.** Ekonomizerli ve ekonomizersiz durum için sıcak su kazanı sistemi ısı kayıpları (IK) ve kazan verimi

	Ekonomizersiz	Ekonomizerli
Kuru Baca Gazından IK (%)	5,98	3,11
Nem Nedeniyle IK (%)	2,19	1,48
CO Kaybı (%)	0,01	0,01
Kazan Yüzeyinden IK (%)	0,08	0,12
Blöf Nedeniyle IK (%)	1,23	1,26
Toplam Kayıp (%)	9,48	5,97
Kazan Verimi (%)	90,52	94,03
Fazla hava (%)	24,26	24,26

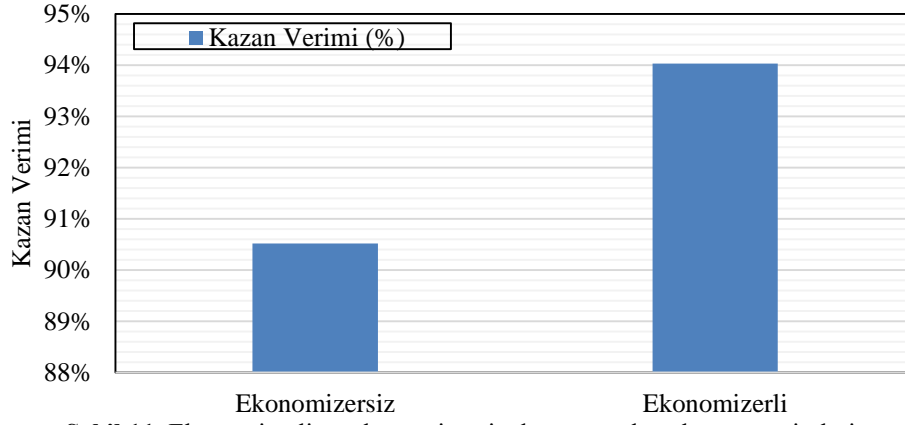


**Şekil 9.** Ekonomizerli ve ekonomizersiz durum için sıcak su kazanı sistemi kayıpları



**Şekil 10.** Kazan ünitesi ekonomizerli ve ekonomizersiz durum için enerji kayıpları





Şekil 11. Ekonomizerli ve ekonomizersiz durum sıcak su kazanı verimleri

### 3. Ekonomik Analiz

İncelenen sıcak su kazanı sistemi bacasında ısı geri kazanımı (ekonomizer-rekuperatör) kullanıldığında sağlanacak tasarruf hesaplanmıştır. Rekuperatörde iç içe geçmiş iki boru vasıtasıyla baca gazındaki ısı, yanma havasına transfer edilir ve ısı geri kazanımı ile verim artırılır. **Tablo 5**'te kazan ünitesi tasarrufu ve ekonomik analiz sonuçları yer almaktadır. Kazanda yapılan iyileştirmeler sonucunda yakıt tasarrufu 138 Nm<sup>3</sup>/h olarak belirlenmiştir. Maliyet analizi geri ödeme süresi yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ekonomizerli sistemde yıllık \$29.049 /yıl parasal tasarruf hesaplanmıştır. Eğer endüstriyel tesis ekonomizerli kazan kullanılırsa, geri ödeme süresi 0,13 yıl olacaktır.

**Tablo 5.** Kazan ünitesi tasarrufu ve ekonomik analiz sonuçları

Parametre	Değer
Yakıt tasarrufu (Nm <sup>3</sup> /h)	138
Doğalgaz fiyatı ((\$/Nm <sup>3</sup> )	0,16
Yıllık çalışma süresi (h)	1320
Tasarruf ((\$/Yıl)	29.049,0
Ekonomizer fiyatı + İşçilik ((\$)	3.821,0

### 3.1. Yakıt Ekonomisi

**Tablo 6** ve **Şekil 12**'de 1 ton sıcak su üretimi için yakıt maliyetleri yer almaktadır. Yakıt maliyetini hesaplamada kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

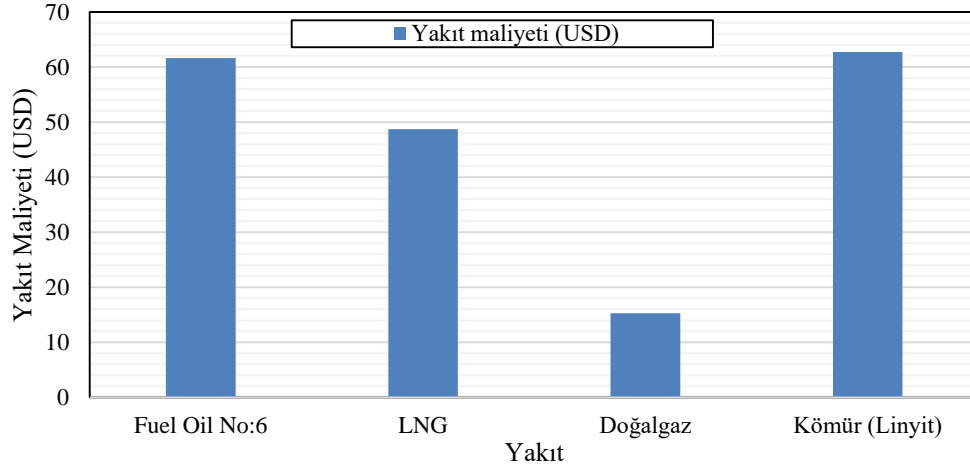
$$\text{Üretilecek Enerji} = \text{Yakıt Tüketimi} \times \text{Alt Isıl Değer} \times \text{Verim} \quad (17)$$

$$\text{Yakıt Tüketimi} = \frac{\text{Üretilecek Enerji Miktarı}}{\text{Alt Isıl Değer} \times \text{Verim}} \quad (18)$$

$$\text{Toplam Maliyet} = \text{Yakıt Maliyeti} + \text{İşçilik Maliyeti} \quad (19)$$

**Tablo 6.** 1 ton sıcak su üretimi için yakıt maliyetleri.

Yakıt Türü	Yakıt Miktarı	Yakıt Maliyeti (\$)
Fuel Oil No:6	73,5 (kg)	61,61
LNG	80,8 (m <sup>3</sup> )	48,71
Doğalgaz	80,8 (m <sup>3</sup> )	15,24
0-10mm toz Kömür	235,29 (kg)	62,73



Şekil 12. 1 ton sıcak su için yakıt maliyetleri

### 3.2. Bulgular ve Tartışma

İncelenen sıcak su kazanı sistemi bacası ısı geri kazanımı yapacak şekilde, ekonomizerli (reküperatörlü) olarak önerilmektedir. Reküperatörde iç içe geçmiş iki boru vasıtasıyla baca gazındaki ısı, yanma havasına transfer edilir ve ısı geri kazanımı ile verim artırılır. İç içe geçmiş iki boru aracılığı ile sıcak baca gazından enerjiyi yanma havasına transfer edilmektedir. İçteki borudan sıcak baca gazı, dıştaki borudan yanma havası ters istikamette gönderilmektedir. Yanma havası baca gazından geri kazanılan ısı enerjisi kazan beslene sıcak suyu transfer edilmektedir. Geri kazanılan enerjinin karşılığı kadar yakıt kullanılmayarak tasarruf sağlanmaktadır. Kazanda yapılan iyileştirmeler sonucunda yakıt tasarrufu  $138 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , kazan verimi artışı %3,87 olarak belirlenmiştir. Maliyet analizi geri ödeme süresi yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ekonomizerli sistemde yıllık \$29.049,0/yıl parasal tasarruf hesaplanmıştır. Eğer endüstriyel tesis ekonomizerli kazan kullanılırsa, geri ödeme süresi 0,13 yıl olacaktır.

### Teşekkür

Bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (TÜBAP) tarafından Öğrenci Bilimsel Araştırma Desteği ile finanse edilmiştir (Proje No: TÜBAP-2023/175).

### Çıkar Çatışması Beyanı

Çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Kaynaklar

- Andersson, E., Thollander, P. (2019). Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry, *Energy Strategy Reviews*, 24, 229-235.
- Ates, S.A., Durakbasa, N.M. (2012). Evaluation of corporate energy management practices of energy intensive industries in Turkey. *Energy*, 45, 81-91.
- Backlund, S., Broberg, S., Ottosson, M., Thollander, P. (2012). Energy efficiency potentials and energy management practices in Swedish firms (5-055-12), *ECEEE Ind. Sıcak summer Study*, 669-677.
- Can, A. (2011). Binaların En Az Enerji İle Isıtılmasının veya Soğutulmasının Termodinamik Birinci ve İkinci Yasalarına Göre Değerlendirilmesi. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 13/16 Nisan 2011/İzmir.
- Cagno, E., Worrel, J.E., Trianni, A., Pugliese, G. (2013). A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renew Sıcak sustain Energy Rev.*, 19, 290-308.

- Chen, B., Ye, X., Shen, J., Wang, S., Deng, S., & Yang, J. (2021). Investigations on the energy efficiency limits for industrial boiler operation and technical requirements—taking China's Hunan province as an example. *Energy*, 220, 119672.
- Enerji Yöneticisi Ders Notları, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığına, 2021.
- Hasanbeigi, A., Menke, C., Therdyothin, A. (2011). Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry. *Energy Efficiency*, 4, 93-113
- Hasan, A.M., Hoq, M.T., Thollander, P. (2018). Energy management practices in Bangladesh's iron and steel industries. *Energy strategy reviews*, 22, 230-236.
- Hasan, A., Rokonuzzaman, M., Tuhin, R.A., Salimullah, S.M., Ullah, M., Sakib, T.H. (2019). Drivers and barriers to industrial energy efficiency in textile industries of Bangladesh. *Energies*, 12, 1775.
- Hossain, S.R., Istiak, A., Ferdous, S., Azad, A.S.M., Monjurul, H. (2020). Empirical investigation of energy management practices in cement industries of Bangladesh, *Energy*, 212, 118741.
- IEA - International Energy Agency. (2018). *Energy Efficiency 2018: Analysis and Outlooks to 2040*. in: Market Report Series. IEA/OECD. Ingarao, G., 2017.
- Karlsson, M., Gebremedhin, A., Klugman, S., Henning, D., Moshfegh, B. (2009). Regional energy system optimization – potential for a regional heat market. *Appl Energy*, 86(4):441–451.
- Klugman, S., Karlsson, M., Moshfegh, B. (2009). A Swedish integrated pulp and paper mill – energy optimisation and local heat cooperation. *Energy Pol*, 37(7):2514–24.
- Lozano, F.J., Lozano, R., Freire, P., Jimenez-Gonzalez, C., Sakao, T., Ortiz, M.G. (2018). New perspectives for green and sıcak sustainable chemistry and engineering: approaches from sıcak sustainable resource and energy use, management, and transformation. *J Clean Prod*, 172, 227-232.
- Marshman, D.J., Chmelyk, T., Sidhu, M.S., Dumont, G.A. (2010). Energy optimization in a pulp and paper mill cogeneration facility. *Appl Energy*, 87, 3514–3525.
- Rudberg, M., Waldemarsson, M., Lidestam, H. (2013). Strategic perspectives on energy management: A case study in the process industry, *Applied Energy*, 104, 487-496.
- Satyavada, H., & Baldi, S. (2018). Monitoring energy efficiency of condensing boilers via hybrid first-principle modelling and estimation. *Energy*, 142, 121-129.
- Schulz, V., Stehfest, H. (1984). Regional energy sıcak supply optimization with multiple objectives. *Eur J Operat Res*. 17(3):302–12.
- Tesema, G., Worrell, E. (2015). Energy efficiency improvement potentials for the cement industry in Ethiopia. *Energy*, 93, 2042-2052.
- Thollander, P., Ottosson, M. (2010). Energy management practices in Swedish energyintensive industries. *J Clean Prod.*, 18, 1125-1133.
- Thollander, P., Danestig, M., Rohdin, P. (2007). Energy policies for increased industrial energy efficiency: evaluation of a local energy programme

- for manufacturing SMEs. *Energy Pol.*, 35(11):5774–5783.
- Wang, Y., Zou, Z., Lu, K., Li, Q., Hu, P., & Wang, D. (2024). Modeling for on-line monitoring of carbon burnout coefficient in boiler under partial load. *Energy*, 288, 129859.
- Worrell, E., Martin, N., Price, L. (2000). Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. *Energy*, 25, 1189-1214.
- Worrell, E., Bernstein, L., Roy, J., Price, L., Harnisch, J. (2009). Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Eff.*, 2, 109–123.
- Yang, H., Lin, X., Pan, H., Geng, S., Chen, Z., & Liu, Y. (2023). Energy saving analysis and thermal performance evaluation of a hydrogen-enriched natural gas-fired condensing boiler. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(50), 19279-19296.
- Yin, R.K. (2009). *Case study research: design and methods*. 4th ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Inc.
- Zhang, S., Worrell, E., Crijns-Graus, W. (2015). Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry. *Appl Energy*, 147, 192-213.