



Ekonomizer Tasarımları ve CFD Analiz Yöntemleri Üzerine Bir Literatür Derlemesi

Yenal AYDIN¹ , Kürşat TANRIVER² , Ferhat BALCI³ , Enes ÇİMİÇ⁴ 

(Alınış / Received: 24.03.2026, Kabul / Accepted: 05.07.2026, Online Yayınlanma / Published Online: 23.09.2026)

Anahtar Kelimeler

Atık Isı Geri Kazanımı
CFD
Ekonomizer
Isı Transferi
Kazan Sistemleri

Öz: Endüstriyel tesislerde enerji verimliliğinin artırılması hem ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanması hem de çevresel etkilerin azaltılması açısından günümüzde kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda, atık ısı geri kazanım sistemleri içerisinde yer alan ekonomizerler; özellikle kazan sistemlerinde baca gazlarında bulunan kullanılmamış ısının geri kazanılmasını sağlayarak yakıt tüketimini, işletme maliyetlerini ve zararlı emisyonları azaltan önemli ısı değiştirici ekipmanlardır.

Bu derleme makalesinde, kazan ekonomizerlerinin tasarım prensipleri, ısı transfer mekanizmaları, geometrik parametreleri ve performans artırmaya yönelik geliştirilen yöntemler literatür ışığında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma kapsamında, 2015 yılı öncesine ait temel çalışmalar ile ağırlıklı olarak 2020-2025 yılları arasında yayımlanmış ulusal ve uluslararası akademik yayınlar taranmıştır. İncelenen literatür; deneysel çalışmalar, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) tabanlı sayısal analizler ve analitik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen araştırmaları kapsamaktadır.

Özellikle kanatlı boru geometrileri, akış düzenlemeleri, malzeme seçimi, korozyon ve kirlenme etkileri ile işletme koşullarının ısı transfer katsayısı, basınç kaybı ve genel sistem verimi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Literatürden elde edilen bulgular, uygun geometrik optimizasyon ve CFD destekli tasarım yaklaşımlarının ekonomizer performansını anlamlı ölçüde artırabildiğini göstermektedir. Bu çalışmanın, ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek özgün bir ekonomizer tasarımı ve buna yönelik CFD analizleri için bilimsel ve metodolojik bir altyapı oluşturması amaçlanmaktadır.

¹ Yenal AYDIN- İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Sütluce Mah. İmrahor Cad. No: 82 Beyoğlu - İstanbul 34445

² Kürşat TANRIVER - İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Sütluce Mah. İmrahor Cad. No: 82 Beyoğlu - İstanbul 34445

³ Ferhat BALCI

⁴ Enes ÇİMİÇ

A Literature Review on Economizer Designs and CFD Analysis Methods

Keywords

Waste Heat Recovery
Heat Transfer
Boiler Systems
CFD

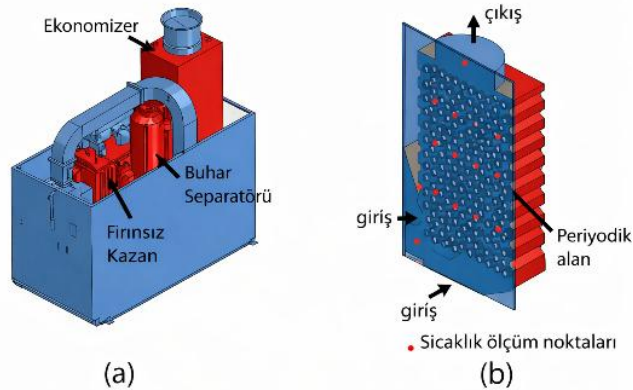
Abstract: Improving energy efficiency in industrial facilities is essential for both economic sustainability and environmental impact reduction. In this context, economizers play a key role in boiler systems by recovering waste heat from flue gases, thereby reducing fuel consumption, operating costs, and emissions.

This review paper examines boiler economizer design principles, heat transfer mechanisms, geometric parameters, and performance enhancement strategies based on existing literature. Fundamental studies published before 2015, along with recent national and international publications from 2020–2025, were systematically reviewed. The analyzed works include experimental investigations, CFD-based numerical studies, and analytical approaches.

Particular emphasis is placed on finned tube geometries, flow arrangement modifications, material selection, corrosion and fouling effects, and operating conditions influencing heat transfer, pressure drop, and overall efficiency. The findings indicate that CFD-supported geometric optimization significantly improves economizer performance. This review provides a scientific foundation for future original economizer design and CFD studies.

1. Giriş

Günümüzde enerji verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak, sanayi ve enerji sektörleri için kritik hedefler haline gelmiştir[1]. Özellikle kazan sistemlerinde, yanma sonucu ortaya çıkan yüksek sıcaklıklı atık baca gazlarında önemli miktarda kullanılmamış ısı enerjisi bulunmaktadır. Tipik bir kömür yakıtlı santral kazanında egzoz gazı sıcaklığı 120–140 °C düzeyindedir ve bu ısının doğrudan atmosfere atılması büyük enerji kaybına yol açar[2]. Bu nedenle atık ısının ekonomizer gibi ısı değiştiricilerle geri kazanımı, kazan verimini artırmak ve yakıt tüketimini düşürmek için yaygın bir çözümdür[3][4]. Ekonomizer, genel olarak kazanın çıkışındaki sıcak baca gazlarının ısını kazan besleme suyu veya taze hava akımına aktaran bir ısı değiştirici ekipmandır. Böylece besleme suyu önceden ısındığı için, suyun buhara dönüştürülmesi için gereken yakıt miktarı azalır; işletme maliyetleri ve sera gazı salımları düşer[4]. Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency - IEA) verilerine göre endüstriyel kazanlarda verim artırıcı önlemlerin yaygın uygulanmasıyla 2040 yılına kadar kümülatif 9 gigaton karbondioksit salımının önlenebileceği bildirilmektedir[4]. Bu bağlamda ekonomizer sistemlerinin geliştirilmesi, enerji tasarrufu ve iklim hedeflerine katkı açısından büyük önem taşır. Bu derlemede odak noktamız, kazan sistemleri ve endüstriyel süreçlerde ısı geri kazanımı sağlayan ekonomizer donanımlarının tasarımı ve CFD tabanlı analizleridir. Kazan-ekonomizer sisteminin şematik görünümü Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. (a) Fırınsız kazan–ekonomizer sisteminin şematik görünümü[4]. (b) ekonomizer ısı değiştirici yüzeyinin periyodik alan ve sıcaklık ölçüm noktalarıyla gösterimi[4].

Şekil 1’de, fırınsız kazan–ekonomizer sisteminin genel yerleşimi ve ekonomizer ısı değiştirici yapısı şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 1(a)’da kazan çıkışındaki baca gazlarının ekonomizer üzerinden geçirilerek besleme

suyuna ısı transferinin sağlandığı sistem konfigürasyonu sunulmaktadır. Şekil 1(b)'de ise, ekonomizerin periyodik ısı değiştirici yüzeyi, akış giriş-çıkış yönleri ve sıcaklık ölçüm noktalarının konumu gösterilerek ısı transferi ve sıcaklık dağılımının incelenmesine olanak sağlayan geometrik yapı özetlenmiştir [4].

Bu çalışma kapsamında, 2020–2025 yılları arasında yayımlanmış akademik makaleler taranarak ekonomizerlerin tasarımındaki yenilikler, performans iyileştirme yöntemleri ve bu sistemlerin CFD ile analizine dair elde edilen bulgular sentezlenmiştir. Toplam 23 güncel makalenin içeriği, doğrudan özet verilmeden, tematik bir bütünlük içinde sunulmaktadır. Ele alınan literatür, kazan ekonomizerlerinin ısı transferini artırmaya yönelik tasarım değişiklikleri, akış dağılımının iyileştirilmesi, atık ısı kazanımının geliştirilmesi, alternatif ekonomizer teknolojileri (örneğin ısı borulu ekonomizerler) ve bu konuların CFD ile analiz edilmesi gibi alt başlıkları içermektedir. Ayrıca, literatürde öne çıkan bakım/işletme problemleri (kül, kirlenme, korozyon vb.) ve bunlara getirilen çözüm yaklaşımları da tartışılacaktır.

2. Yöntem

Bu derleme kapsamında, 2015 öncesi temel çalışmalar ile ağırlıklı olarak 2020–2025 dönemindeki hakemli yayınlar taranmıştır. ScienceDirect, Web of Science ve Google Akademik veri tabanlarında; 'economizer, boiler waste heat recovery, CFD' anahtar kelimeleri kullanılarak ulaşılan literatür; konu uygunluğu, yöntemsel yeterlilik ve performans metrikleri kriterlerine göre seçilmiştir. Bu doğrultuda yapılan seçimlerde; çalışmaların hesaplamalı akışkanlar dinamiği, deneysel veya analitik yöntemler kullanması ile ısı transferi, basınç kaybı ve verim gibi temel çıktıların raporlaması esas alınmıştır.

2.1 CFD Analiz Metodolojisi

Literatürde ekonomizer performans değerlendirmelerinde CFD; akış dağılımı, sıcaklık alanı, ısı transferi ve basınç kaybını (Δp) birlikte çözmek için yaygın biçimde kullanılmaktadır. Çoğu endüstriyel uygulamada hesaplama maliyeti nedeniyle Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) tabanlı $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ SST (Kayma Gerilmesi Taşınımı - Shear Stress Transport) modelleri tercih edilirken, kanatçık arkasındaki karmaşık girdap yapılarının incelendiği çalışmalarda Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation - LES) yaklaşımı öne çıkmaktadır. Çok fazlı problemler (kül/erozyon/yoğuşma) için Ayrık Faz Modeli (Discrete Phase Model - DPM), Akışkan Hacmi (Volume of Fluid - VOF) veya Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (User Defined Function - UDF) gibi ek modeller kullanılmakta; çıktılar Nusselt sayısı, toplam ısı transferi ve Δp gibi performans ölçütleriyle raporlanmaktadır. Tablo 1, problem türüne göre kullanılan temel CFD yaklaşımlarını özetlemektedir. Endüstriyel ölçekte RANS yaygınken, detaylı vorteks/ısı transferi çözümünde LES ve çok fazlı modeller tercih edilmektedir.

Tablo 1. Ekonomizer CFD analizlerinde problem türüne göre tercih edilen sayısal yöntemler ve modeller

Odak Alanı	Tercih Edilen CFD Yaklaşımı / Türbülans Modeli	Kullanım Nedeni ve Avantajı	İlgili Çalışmalar
Genel akış dağılımı	RANS ($k-\epsilon$, $k-\omega$ SST)	Hesaplama maliyeti düşük, endüstriyel ölçekli kazanlarda genel akış ve düzgün sıcaklık dağılımını (uniformluk) çözmek için ideal.	[4], [5]
Kanatçık (Fin) detayı	LES	Spiral veya dişli kanatçıkların arkasındaki karmaşık girdap (wake) yapılarını ve yerel ısı transferini hassas çözmek için.	[6]
Kül birikimi / erozyon	CFD + DPM	Gaz fazı ile katı partiküllerin (kül, toz) yörüngelerini ve çarpma/aşınma bölgelerini simüle etmek için.	[7], [8], [9]
Yoğuşma / faz değişimi	VOF veya özel UDF	Yoğuşmalı ekonomizerlerde damlacık oluşumu ve film tabakası analizi için.	[10], [11]

3. Literatür Özeti

Bu bölümde, kazan ekonomizerlerinde tasarım parametreleri ve CFD tabanlı performans iyileştirme yaklaşımları tematik olarak derlenmiştir. Çalışmalar; ısı transferi artırımı, akışın dengeli dağılması, alternatif teknolojiler ve dayanıklılık/bakım problemleri başlıklarında sınıflandırılmıştır.

3.1. Isı Transferini Artırmaya Yönelik Tasarım İyileştirmeleri

Son yıllarda yapılan çalışmalar, ekonomizerlerde ısı transferinin artırılması için kanatçık geometrisi, yüzey modifikasyonları ve boru dizilimlerinin kritik rol oynadığını göstermektedir. Helisel, spiral, perforasyonlu ve bütünlük kanatlı tasarımlar, akışta türbülansı artırarak ısı transferini genellikle %3–15 aralığında iyileştirmiştir; ancak bu kazanımlar çoğu durumda basınç düşümü artışıyla birlikte seyretmiştir [1] , [2] , [3]. Tablo 2'de görüldüğü üzere, farklı kanatçık ve boru geometrileri ısı transferinde iyileşme sağlamakta; ancak geometrik

karmaşıklık arttıkça basınç kaybı da yükselmektedir. Bu nedenle literatürde CFD tabanlı parametrik tarama ve optimizasyon çalışmaları, ısı transferi-basınç kaybı dengesinin sağlanmasında vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmaktadır[6],[12], [13].

Tablo 2. Ekonomizer uygulamalarında farklı kanatçık ve boru geometrilerine ait ısı ve hidrolik performans eğilimleri.

Çalışma	Kanatçık / Geometri Tipi	Yöntem	Isı Transfer Artışı	Basınç Düşümü	Temel Bulgular
Rajesh Babu vd. (2020) [3]	Helisel tırtıklı kanatçık	CFD	%3,5 – %5,1 ↑	Orta ↑	Segmentli yapı türbülansı artırmıştır.
Meng vd. (2022) [14]	Spiral kanatçıklı boru	LES-CFD	%6 – %10 ↑	Düşük-orta ↑	Girdap yapıları ısı geçişini iyileştirmiştir.
Liu vd. (2016) [6]	Delikli kanatçık	CFD	%8 – %15 ↑	Orta ↑	Sınır tabaka yenilenmiştir
Rayhan vd. (2023) [15]	Zigzag boru (kanatsız)	CFD	%4 – %7 ↑	Düşük ↑	Türbülans artışı sağlanmıştır
Zhang vd. (2023) [12]	IMSF spiral kanat	Sayısal + deneysel	%5 – %9 ↑	Orta (geometriye bağlı) ↑	Hatve ve kalınlık kritik

3.2. Akış ve Sıcaklık Dağılımının İyileştirilmesi

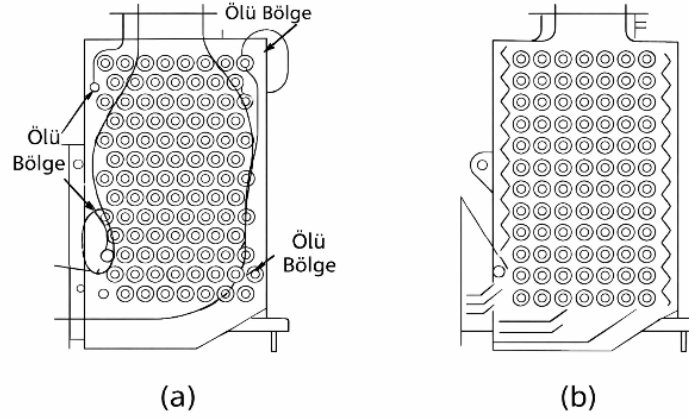
Literatürde ekonomizer performansını sınırlayan temel problemlerden birinin, akış ve sıcaklık dengesizliği olduğu gösterilmiştir. Giriş kanalındaki geometrik düzensizlikler, bazı boru demetlerinde aşırı yüklenmeye yol açarken diğer bölgelerde ölü akım alanları oluşturmaktadır [4].

Bu sorunu gidermek amacıyla önerilen dönüş yönlendirme kanatları, baffle ve eksenel ekonomizer konfigürasyonlarının, CFD analizleriyle akış dağılımını iyileştirerek ısı transferini %2–25 aralığında artırabildiği rapor edilmiştir [4], [5], [16]. Ancak bu tür pasif elemanların basınç kaybı üzerindeki etkileri dikkatle optimize edilmelidir. Tablo 3'te, akış yönlendirme elemanları ve alternatif ekonomizer teknolojilerine yönelik literatürde raporlanan çalışmalar karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 3. Akış yönlendirmeli ve alternatif ekonomizer uygulamaları.

Çalışma	Uygulanan Yöntem	Analiz Türü	Performans Kazancı	Ek Açıklama
Qalbi & Ahn (2023)[4]	Turning guide vane (TGV)	CFD	Termal verimde %25 ↑	Sıcaklık dağılımı iyileşti
Zeng vd. (2022)[16]	Eksenel ekonomizer	CFD	Isı transferinde %2 ↑	Akış daha dengeli
Kang vd. (2025)[17]	Isı borulu ekonomizer	Deneysel + ampirik Model	Hacimsel ısı yoğunluğu 3,24 kat ↑	Kompakt tasarım avantajı
Li vd. (2024)[18]	Floroplastik kaplı boru	Deneysel	Korozyon önlenildi	Yoğuşmalı çalışmaya uygun

İncelenen çalışmalar, yönlendirme kanatçıkları ve benzeri akış düzenleyici elemanların yalnızca ısı transferi performansını değil, aynı zamanda sıcaklık dağılımının homojenliğini ve hidrolik davranışı da önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, eksenel ve borulu ekonomizer tasarımlarının kompaktlık ve hacimsel ısı yoğunluğu açısından avantaj sağladığı, floroplastik kaplı borular gibi alternatif çözümlerin ise yoğuşmalı çalışmaya uygunluk ve korozyon direnci bakımından öne çıktığı görülmektedir. Bu bulgular, akış yönlendirme stratejileri ile alternatif teknolojilerin birlikte değerlendirilmesinin ekonomizer performansının artırılmasında etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 2'de, ekonomizer giriş kanalındaki akış dağılımı, akış yönlendirme elemanlarının varlığına bağlı olarak karşılaştırmalı şekilde sunulmaktadır. Şekil 2(a)'da akış yönlendirmesi bulunmayan durumda ısı değiştirici yüzey üzerinde akışın homojen dağılmadığı ve bazı bölgelerde ölü akış alanlarının oluştuğu görülmektedir. Buna karşılık, Şekil 2(b)'de yönlendirme kanatçıklarının kullanılmasıyla akışın boru demeti boyunca daha dengeli dağıldığı ve ölü bölge oluşumunun belirgin biçimde azaldığı gösterilmektedir[4].



Şekil 2. (a) Akış yönlendirmesi bulunmayan ekonomizer kanalındaki akış dağılımı[4]. (b) akış yönlendirme kanatçıkları ile iyileştirilmiş akış dağılımı[4].

Dönüş kanatları gibi rehber yapıların, özellikle kompakt kazanlarda sınırlı alan içinde akış yönlendirmek için etkili olduğu ortaya konmuştur. Bu tip kılavuz kanatlar daha önce de gaz türbini iç soğutma kanallarında ve büyük kojenerasyon kazanlarının geçiş bölgelerinde başarıyla uygulanmıştır[4]. Rehber kanatlar, mevcut ekipmana sonradan da eklenebildikleri için maliyet etkin iyileştirme çözümleri sunarlar[4]. Bununla birlikte, literatürde vurgulandığı üzere, her bir modifikasyon basınç düşümü gibi istenmeyen etkiler doğurabileceğinden, CFD analizleri ile farklı tasarım senaryolarını karşılaştırmak optimum çözümü bulmak açısından gereklidir[4]. Nitekim bir çalışmada, delikli plakalı akış yönlendirici (baffle) ve girdap kanatlı yönlendirici (swirl-vane baffle) gibi farklı tipte yönlendiriciler denenmiş; girdaplı yönlendiricinin homojenliği (uniformluğu) artırmada etkili olduğu fakat her iki yöntemin de basınç düşüşünü belirgin şekilde artırdığı rapor edilmiştir [4]. Dolayısıyla güncel eğilim, homojenliği iyileştirirken minimum aerodinamik kayıp yaratacak akış düzelticilerin tasarımıdır. CFD destekli çok hedefli optimizasyon algoritma teknikleri bu alanda potansiyel sunmaktadır [4].

Buhar jeneratörlerinde kullanılan eksenel ekonomizer tasarımlarında akış dağılımının ısı transferi üzerindeki etkileri de önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Bölücü levha (divider plate) yüksekliği ve sıcak-soğuk akış taraflarındaki dağılım, ısı değiştirici performansını doğrudan belirlemektedir. Sayısal analizlere göre, eksenel ekonomizer yapılandırması buhar üretim miktarını yaklaşık %2-3 oranında artırabilmekte; bölücü levha yüksekliğinin belirli bir aralıkta artırılması ise özellikle soğuk taraf bölgesinde ısı transfer katsayısını iyileştirmektedir[16]. Akış dağılımının düzensiz olduğu bölgelerde yerel ısı transferi düşerken, akışın iki taraf arasında daha dengeli dağılması ısı performansını anlamlı biçimde yükseltmektedir. Bu bulgular, eksenel ekonomizerlerin hem akış yönlendirme hem de ısı transferi açısından optimize edilmesinin kritik olduğunu göstermektedir[16].

Akış dağılımı konusunda bir diğer kritik husus, akışın yüksek hızla dar kesitlere yönelmesiyle oluşabilecek aşınma ve korozyon etkileridir. Özellikle yüksek basınçlı ekonomizerlerde, giriş başlığı (dağıtıcı) tasarımının dengesiz olması durumunda bazı borulara normalden fazla akış girebilmektedir. Bu durumun yol açtığı aşırı akış hızı ise literatürde akış destekli korozyon (Flow-Accelerated Corrosion - FAC) olarak bilinen olaya sebebiyet verebilmektedir. 2025 yılına ait bir çalışmada, bir atık ısı geri kazanım kazanının (Heat Recovery Steam Generator - HRSG) yüksek basınç ekonomizer giriş manifoldundaki malzeme aşınım kompozisyonu, dağıtıcı çapı, boru bağlantı sayısı vb. tasarım değişkenleri incelenmiş ve CFD destekli optimizasyonla akış hız dağılımının iyileştirilip korozyon hızının azaltılabileceği gösterilmiştir. Bu tür sonuçlar, ekonomizer tasarımında dayanıklılık ve bakım gereksinimlerini azaltmak için akışın olabildiğince düzgün dağıtılmasının önemine işaret etmektedir. Özetle, literatürde 2020 sonrası ekonomizer çalışmalarında akış ve sıcaklık benzerliğini artırmak, dolayısıyla hem ısı transferini hem de ekipman ömrünü iyileştirmek önemli bir tema olmuştur. CFD analizleri, bu amaçla önerilen her türlü pasif veya aktif akış kontrol elemanının etkisini görselleştirmek ve sayısal olarak değerlendirmek için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

3.3. Alternatif Ekonomizer Teknolojileri ve Performans Karşılaştırmaları

Klasik kazan ekonomizerleri genellikle kanatlı boru demetlerinden oluşurken, son yıllarda daha kompakt ve yüksek performanslı alternatif ısı değiştirici teknolojileri de araştırılmıştır. Bu kapsamda en dikkat çekici yaklaşımlar; ısı borulu ekonomizerler, yoğunlaşma ekonomizerler ve korozyona dayanıklı malzeme/kaplama kullanılan sistemlerdir.

Isı borulu ekonomizerlerde, faz değişimine dayalı ısı iletim mekanizması sayesinde yüksek ısıl iletkenlik sağlanmakta ve birim hacim başına düşen ısı transfer kapasitesi önemli ölçüde artmaktadır. Deneysel ve sayısal çalışmalar, ısı borulu tasarımların geleneksel finli borulu ekonomizernere kıyasla daha kompakt yapıda benzer veya daha yüksek ısı geri kazanımı sağlayabildiğini göstermektedir [6].

Yoğuşmalı ekonomizerlerde ise baca gazındaki su buharının gizli ısı da geri kazanılarak toplam ısı transferi artırılmaktadır. Bu sistemlerde düşük çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak korozyon riski ortaya çıkabildiğinden, malzeme seçimi kritik hale gelmektedir. Son çalışmalarda floroplastik kaplama gibi korozyona dayanıklı yüzeylerin kullanımıyla, asit çığ noktası altındaki çalışma koşullarında dahi güvenli ve verimli ısı geri kazanımı mümkün olablmıştır [18].

Genel olarak alternatif ekonomizer teknolojileri, özellikle alan kısıtı olan endüstriyel uygulamalarda ve yüksek verim hedeflenen sistemlerde önemli avantajlar sunmakta; ancak ilk yatırım maliyeti ve işletme koşulları dikkate alınarak uygulamaya özel değerlendirme yapılması gerekmektedir.

3.4. Endüstriyel Uygulama Bulguları

Seçilen literatür kapsamında, laboratuvar veya pilot düzeydeki çalışmaların yanı sıra tam ölçekli santral uygulamalarından elde edilen veriler de mevcuttur. Bu çalışmalar, önerilen ekonomizer iyileştirmelerinin gerçek dünya koşullarında sağlayabileceği kazanımları gözler önüne sermektedir. Örneğin, 660 MW kapasiteli bir termik santralde gerçekleştirilen bir uygulamada, kazanın elektrostatik toz tutucusu ile kükürt giderim kulesi arasına bir düşük basınçlı ekonomizer (Low-Pressure Economizer - LPE) eklenmiştir. Sonuçta, santralin yıllık kömür tüketiminde 8316 ton standart kömür eşdeğeri tasarruf ve yaklaşık 15.300 ton karbondioksit emisyon azaltımı sağlandığı bildirilmiştir[18].

Süperkritik santrallerde ekonomizer performansının daha doğru modellenenebilmesi amacıyla geliştirilen yeni teorik yaklaşımlar, ısı transferi davranışının çalışma yükü ve akış düzeniyle birlikte önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. 660 MW kapasiteli bir üniteye karşı-akış ve eş-akış ısı transfer düzenlerinin değerlendirilmesi, yerel ısı transfer katsayısı ile ortalama katsayı arasındaki farkın özellikle ekonomizer çıkışında belirginleştiğini ortaya koymuştur[19]. Novel model ile gerçekleştirilen analizlerde, suyun fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişiminin ısı transfer alanı gereksinimi üzerinde doğrudan etkili olduğu ve geleneksel modellerin bu bağımlılığı yeterince temsil etmediği vurgulanmıştır. Ayrıca ekserji analizi, farklı yük seviyelerinde ısıl performansın karakteristik olarak değiştiğini ve uygun ekonomizer düzeninin seçiminin sistem verimliliği açısından kritik olduğunu göstermektedir[19].

Yüksek akış hızlarına ve değişken ısıl yüklere sahip endüstriyel kazanlarda ekonomizerin güvenli işletimi, özellikle suyun kaynama sınırına yaklaşan koşullarda kritik önem taşımaktadır. Yüksek fırın gazı akışının ekonomizer yüzeylerinde suyun kaynama ihtimalini artırması hem proses dengesini hem de ekipman ömrünü olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle yapılan son çalışmalarda, ekonomizer içindeki kaynama oranının doğrudan ölçülmesinin zorluğu göz önünde bulundurularak, baca gazı ve su tarafındaki işletme parametrelerine dayalı dolaylı çevrimiçi bir kestirim yöntemi geliştirilmiştir[20]. Isı dengesi prensiplerine dayanan bu yaklaşım, kaynama oranının gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayarak uygun işletme ayarlarının yapılmasına ve olası güvenlik risklerinin önlenmesine imkân tanımaktadır. Yöntemin endüstriyel kazanlarda uzun vadeli işletme kararlılığını artırdığı ve ekonomizerin hizmet ömrünü uzattığı rapor edilmiştir[20].

Yüksek basınçlı HRSG sistemlerinde evaporatör-ekonomizer etkileşimi, buhar üretim kapasitesi ve akış kararlılığı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Son çalışmalar, akış dağılımındaki dengesizliklerin özellikle doğal sirkülasyonlu sistemlerde buhar kalitesini olumsuz etkilediğini ve bazı boru sıralarının termal açıdan dezavantajlı hâle gelmesine yol açtığını göstermektedir. Termal-hidrolik denklemlerin segmentli çözümü ile gerçekleştirilen analizler, ekonomizer aşağı akış borularında gözlenen kendi kendine dolaşım probleminin, hız alanının optimize edilmesi ve uygun boğucu orifislerin uygulanması ile önemli ölçüde azaltılabildiğini ortaya koymuştur[21]. Uygulanan yapısal iyileştirmeler hem ısı transfer performansının hem de hidrolik stabilitenin aynı anda artırılmasını sağlamış ve yaklaşım noktası sıcaklık farkının düşürülmesiyle buhar üretiminin iyileştiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, HRSG-ekonomizer etkileşimini ele alan bütünsel termodinamik modellerin güvenli ve verimli işletme için kritik önemde olduğunu göstermektedir[21].

Daha da önemlisi, bir araştırma ekibi 1000 MW'lık ultra süperkritik bir kömür santralinde, iki kademeli atık ısı kazanım sistemi kurarak hem duyulur hem gizli ısıyı çekmeyi amaçlamıştır. Yapılan teorik ve deneysel çalışmalar, iki kademeli optimizasyon ile tek kademeli sisteme kıyasla kazan besleme suyu ısıtmasının çok daha verimli gerçekleştiğini ve santral kömür tüketiminin birim enerji başına 4,11 g azalabildiğini göstermiştir[18]. Bu da yıllık bazda 14,2 milyon USD'nin üzerinde net kazanç anlamına gelmektedir[18]. Aynı çalışmada, baca gazından su geri kazanımı da yapılmış ve yılda binlerce ton suyun yoğunlaştırılarak yeniden kullanıldığı rapor edilmiştir[18]. Bir

diğer endüstriyel testte, 250.000 m³/h debideki baca gazından özel bir ısı değiştiriciyle saatte 129,5 GJ ısı ve 61,6 ton su geri kazanıldığı belirtilmiştir[18]. Bu değerler, atık ısı geri kazanımının yalnızca enerji verimliliği değil, su tasarrufu gibi çevresel boyutlarda da katkı yapabileceğini göstermesi açısından önemlidir.

Özetlemek gerekirse, son 5 yılda literatürde rapor edilen saha ve pilot uygulamalar, ekonomizer iyileştirmelerinin pratikte yüksek ölçüde uygulanabilir ve kârlı olduğunu doğrulamaktadır. Gerek mevcut kazanlara ek düşük sıcaklıklı ekonomizer ünitelerinin eklenmesi, gerek mevcut ekonomizerlerin daha iletken malzemeler veya ek ısıtma kademeleriyle revizyonu, santral ölçeğinde kayda değer yakıt ve maliyet tasarrufları sağlamaktadır. Bu da enerji dönüşümü ve karbon azaltma hedeflerine ulaşmak adına ekonomizer teknolojilerinin geliştirilip yaygınlaştırılmasının stratejik bir yol olduğunu ortaya koymaktadır.

3.5. Ekonomizerlerde Malzeme Bozulması, Korozyon ve Arıza Mekanizmaları

Düşük sıcaklıklı ekonomizer (Low-Temperature Economizer - LTE) görülen akış kaynaklı aşınma mekanizmalarına yönelik çalışmalar, özellikle gaz-katı akışlarının boru yüzeylerinde oluşturduğu erozyonun sistem ömrü üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. CFD ile birleştirilmiş DPM kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, partikül çarpmasının boru hattı boyunca üç karakteristik bölge oluşturduğu; aşınma şiddetinin başta gaz hızı, kütle fraksiyonu ve partikül boyutu olmak üzere akış parametrelerine yüksek duyarlılık gösterdiği belirlenmiştir[7]. Baca gazı koridorunun boru geometrisiyle birlikte optimize edilmesinin LTE içindeki erozyonu önemli ölçüde azalttığı rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, düşük sıcaklıklı ekonomizerlerde partikül kaynaklı erozyonun tasarım sürecinde dikkate alınması gereken kritik bir etken olduğunu göstermektedir[7].

Düşük sıcaklıklı ekonomizer bölgelerinde partikül kaynaklı aşınma, gaz-katı akış etkileşimlerinin yoğun olduğu büyük ölçekli santrallerde önemli bir arıza mekanizmasıdır. **Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve ayrık faz modeli** tabanlı gelişmiş **erozyon tahmin modelleri (Erosion Prediction Model - EPM)**, erozyon şiddetinin giriş gaz hızının dağılımı, toz konsantrasyonu ve genişleme bölgesinin geometrisi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmalarda, ekonomizerin dikey baca hattı üzerinde konumlandırılması, 35°'nin altında bir genişleme açısının kullanılması ve kısa-sık yerleştirilmiş yönlendirme plakalarının uygulanmasıyla aşınmanın belirgin şekilde azaltılabildiği rapor edilmiştir[9]. Bu tasarım ilkeleri, 1000 MW kapasiteli bir tesiste uygulamaya geçirildiğinde aşınma bölgelerinin önemli ölçüde iyileştiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, LTE ekonomizerlerde erozyon teşhisinde ve aşınmayı azaltmaya yönelik tasarım optimizasyonlarında mühendislik açısından değerli bir referans sunmaktadır[9].

Ekonomizer tüp demetlerinde görülen ısı transferi kayıplarının önemli bir nedeni, katı partikül içeren baca gazlarında kül birikiminin zamanla artmasıdır. Bu kapsamda yapılan son çalışmalarda, DPM ve UDF'nin birleştirildiği sayısal yöntemler kullanılarak kül çökeltme davranışı ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Farklı boru sıralama konfigürasyonlarında gerçekleştirilen analizler, kül birikiminin partikül boyutuna, baca gazı hızına ve gaz-katı kütle oranına yüksek duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır[8]. Boyuna hatvenin küçültülmesi ve enine hatvenin artırılması hem kül birikimini hem de buna bağlı ısı transferi kayıplarını azaltan en etkili tasarım stratejileri arasında yer almaktadır. Çalışmanın bulguları, ekonomizerlerde kül kaynaklı kirlenme/kurum birikimi problemlerinin tasarım aşamasında akış-partikül etkileşimiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir[8].

Ekonomizer tüplerinde görülen malzeme bozulmalarının bir diğer önemli mekanizması, yakıtın içerdiği kükürtlü bileşiklerin yanması sonucu ortaya çıkan asit çığ noktası korozyonudur. Rafineri proseslerinde ara petrol ürünleriyle işletilen kazanlarda yapılan incelemeler; boruların duman tarafı (fire-side) yüzeylerinde oluşan birikinti tabakalarının, yüksek oranda demir oksit ve kükürt bileşiklerini içerdiğini ortaya koymuştur. Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy - SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını (Energy Dispersive X-ray - EDX) spektroskopisi ile gerçekleştirilen mikroyapı analizleri; tüp cidarında gözlenen hasarın, asit çığ noktası sıcaklığının altına düşen yüzeylerde meydana gelen sülfürik asit yoğunlaşmasından kaynaklandığını ortaya koymaktadır.[22]. Korozyonun ilerlemesi, tüp duvarı incelmeye ve ölçek tabakalarının düzensiz birikimiyle ısı transferinin zayıflamasına neden olmaktadır. Çalışma, yakıt bileşiminin kontrolü ve uygun işletme sıcaklıklarının sağlanmasının asit çığ noktası korozyonunun azaltılmasında kritik rol oynadığını vurgulamaktadır[22].

Düşük sıcaklıklı ekonomizer bölgelerinde yalnızca ısı transferi kayıpları ve korozyon değil, aynı zamanda uçucu toksik bileşiklerin yoğunlaşmasıyla ilişkili kimyasal oluşum süreçleri de önemli çevresel ve operasyonel riskler oluşturabilmektedir. Katı atık yakma tesislerinde yapılan kapsamlı saha analizleri; poliklorlu dibenzo-p-dioksin ve dibenzofuran (Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans - PCDD/F) bileşiklerinin büyük ölçüde ekonomizerin düşük sıcaklıklı bölgesinde yoğunlaşarak gaz fazdan aerosol veya katı faza taşındığını göstermektedir. Çalışmada tanımlanan tamponlama etkisi (buffering effect), söz konusu bileşiklerin oluşumunu baskılayan ve toplam toksik emisyonları ortalama %82,9 oranında azaltabilen bir mekanizma olarak öne çıkmaktadır[23]. Söz konusu mekanizma; bileşiklerin ekonomizer içerisinde hapsedilmesini sağlayan **temasla tutulma (interception)**

ve kontrollü salınım süreçlerine dayanmaktadır. Düşük sıcaklık aralığının, özellikle düşük klorlama dereceli PCDD/F türlerinin yoğunlaşmasına elverişli olduğu ve proses koşullarındaki ani değişimlerin bu bileşiklerin salınımını tetikleyebildiği belirtilmiştir. Elde edilen bulgular, ekonomizer tasarımında kimyasal yoğunlaşma davranışının dikkate alınmasının hem çevresel performans hem de son arıtma aşamalarının yükünün azaltılması açısından kritik olduğunu göstermektedir[23].

3.6. Ekonomizer Sistemlerinde İleri Modelleme, Yapay Zekâ ve Gerçek Zamanlı Optimizasyon

Ekonomizerlerin yapısal tasarımı ve performansının iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda, geometrik ve operasyonel değişkenlerin eşzamanlı olarak optimize edilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Konstrüktal teori kullanılarak gerçekleştirilen yakın tarihli bir araştırmada, serpantin boru demetlerinden oluşan bir ekonomizerin dış çap, grup sayısı ve sıra sayısı gibi temel tasarım parametreleri çok amaçlı bir optimizasyon çerçevesinde değerlendirilmiştir[24]. Isı transfer oranı ile güç tüketimi birlikte minimize edilen karma fonksiyon, optimum boyutsuz dış çapın 0.92, optimum grup sayısının 16 ve sıra sayısının ise 8 olarak seçilmesiyle en düşük değere ulaşmıştır. Parametrelerin tekil varyasyonlarında dahi toplam iyileştirme oranlarının dış çap için %5,7, grup sayısı için %4,9, sıra sayısı için ise %5,0 düzeylerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, sıralı baskın olmayan genetik algoritma-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II - NSGA-II) kullanılarak elde edilen Pareto optimalite sınırı; tasarım değişkenlerinin birbiriyle olan karmaşık etkileşimlerinin sistem performansı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Bu bulgular, ekonomizerlerin yapısal ve parametrik tasarımında optimizasyon temelli yaklaşımların gelecekte daha yaygın bir şekilde kullanılabileceğine işaret etmektedir[24].

4. Tartışma

Yukarıda sunulan literatür bulguları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, ekonomizer tasarımı ve analizinde son yıllarda belirgin bir ilerleme ve çeşitlilik olduğu görülmektedir. Isı transferi iyileştirme alanında yapılan çalışmalar, küçük geometrik modifikasyonlarla bile kazan veriminde anlamlı artışlar yakalanabildiğini göstermiştir. Örneğin, dişli kanatçık eklenmesi gibi yöntemlerle %3-5 civarı iyileştirmeler mütevazı görünebilir; ancak büyük ölçekli santrallerde bu oranlar yıllık tonlarca yakıt tasarrufuna tekabül etmektedir. CFD analizleri sayesinde, geleneksel deney-yanılma yöntemleriyle bulunması zor olabilecek en uygun kanatçık aralığı, şekli veya düzeni kısa sürede tespit edilebilmektedir. Akış dağılımı konusunda ise literatür; ekonomizer performansının yalnızca ısı transfer alanına değil, aynı zamanda akışın homojenliğine de bağlı olduğunu vurgulamaktadır. Geçmişten günümüze kazan tasarımlarında duman yolunun yönlendirici kanatlar vasıtasıyla düzenlenmesi gibi geleneksel yöntemler kullanılmış olsa da, güncel çalışmalar bu süreçlerin nicel etkilerini ve ileri düzey optimizasyon olanaklarını detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Yönlendirici kanatlar ve saptırıcı plakalar (baffles) gibi akış düzenleyici bileşenler uygun şekilde tasarlandığında; ekonomizer girişinde sıcaklık dağılımını iyileştirerek hem verimi artırmakta hem de malzeme ömrünü uzatmaktadır. Burada kritik olan, bu elemanların basınç düşümüne yol açarak kazan çekişini olumsuz etkilememesidir. CFD tabanlı çok amaçlı optimizasyon araçları; ısı transferinin en üst düzeye çıkarılması ve basınç kaybının en aza indirilmesi gibi birbiriyle çelişen hedefleri eş zamanlı olarak değerlendirerek, en ideal tasarım dengesini belirlemede büyük bir potansiyele sahiptir. Nitekim incelenen bazı çalışmalarda; söz konusu yaklaşımla en yüksek akış homojenliğini ve en düşük basınç kaybını eş zamanlı olarak sağlayan yönlendirici kanat konfigürasyonları geliştirilmiştir[4].

Ekonomizerler konusunda yeni teknolojilerden sayılan ısı borulu sistemler ve entegre ısı pompalı çözümler en dikkat çekici olanlardır. Isı boruları uzun süredir ısı değişiminde kullanılsa da kazan ekonomizeri olarak denenmesi son dönemde hız kazanmıştır. Kang vd'nin çalışması, ısı borulu ekonomizerlerin konvansiyonel tasarımlarla başa baş ısı geri kazanımı sağlarken, boyut ve ağırlıkça çok daha avantajlı olabileceğini net biçimde ortaya koymuştur[17].

Malzeme geliştirmeleri ve korozyon dayanımı tarafında da tartışılması gereken bulgular vardır. Floroplastik kaplı ekonomizer gibi yaklaşımlar, klasik metal ekonomizerlerin "asit çığ noktasının altına inilememe" kısıtını ortadan kaldırarak, bacadan çıkan su buharının enerjisini de yakalamayı mümkün kılmaktadır[18]. Bu, kazan veriminde teorik olarak %10'lara varan ilave artış potansiyeli demektir[25]. Ancak saf polimer malzemelerin yapısal zayıflıkları, şu anki araştırmaların bu teknolojiyi hibrit yapılarla çözmeye çalışmasına yol açmaktadır[18]. Yani yakın gelecekte, paslanmaz çelik tüplerin ince bir yüksek iletken polimer tabaka ile kaplandığı ekonomizerler endüstriyel standart haline gelebilir. Bu sayede kazanlar, 50-60 °C seviyelerine kadar baca gazı sıcaklığını düşürüp hem ısı hem su kazanımı yapabilecek ve yine de uzun ömürlü olacaktır. Bu, ekonomizer konseptinin sadece ısı değiştirici donanımı değil, aynı zamanda akıllı kontrol stratejileriyle de büyük faydalar sağlayabileceğini hatırlatmaktadır.

Genel olarak tartışıldığında, ekonomizer tasarımı ve CFD analizi alanında disiplinler arası bir yaklaşımın önemi ortaya çıkmaktadır. Isı transferi, akışkanlar mekaniği, malzeme bilimi ve kontrol mühendisliği bu alanda iç içe

geçmiştir. CFD, akış, ısı geçişi, kütle transferi, kimyasal reaksiyon gibi birden fazla fiziksel olguyu bir arada simüle edebilen, güçlü bir araç olarak bu disiplinlerin kesişiminde konumlanmaktadır. Nitekim bazı araştırmacılar, ekonomizer tüplerinde kirlenmeyi ve bunun ısı transferine etkisini sayısal olarak öngörebilmek için akışkan analizine parçacık birikim modellerini entegre etmektedir[2][26]. Gelecekte, bu tür entegre yaklaşımların gerçek zamanlı izleme ve karar destek sistemlerine dönüşmesi beklenebilir. Örneğin; büyük ölçekli bir kazana ait ekonomizer verilerinin CFD yardımıyla sürekli olarak izlenmesi ve tespit edilen kirlenme seviyesine bağlı olarak uygun zamanda otomatik kurum üfleme (soot-blowing) işleminin gerçekleştirilmesi hem yakıt tasarrufu hem de ekipman ömrünün uzatılması açısından ideal bir senaryo teşkil etmektedir. Wang vd'nin bu yönde bir adım atarak derin öğrenme yöntemleriyle desteklenmiş bir optimizasyon çerçevesi sunmuş ve geleneksel sabit zamanlı iskeleme yöntemine kıyasla enerji veriminde %3,96'lık ilave iyileşme elde etmiştir[26]. Bu, yapay zekâ ve CFD birlikteliğinin saha uygulamalarında getirebileceği avantajlara güzel bir örnektir.

Son olarak, derlemedeki bulgular ışığında karşılaşılan zorluklara da değinmek gerekir. CFD analizleri çok değerli bilgiler sunsa da modellerin doğruluğu için deneysel verilerle kalibrasyon şarttır. Ayrıca çok yüksek Re sayılarında ve karmaşık geometrilerde hesaplamalı maliyet hala yüksektir. Endüstrinin bu teknolojilere çekinceli yaklaşımı, genellikle yatırım getirisi hesaplarına dayanmaktadır. Ancak incelenen saha çalışmalarının çoğu, ekonomizer iyileştirmesinin birkaç yıl içinde kendini amorti ettiğini göstermektedir[18]. Yine de, yeni malzemelerin uzun dönem dayanımı, ısı borulu sistemlerin bakım gereksinimleri gibi konularda daha fazla uygulama tecrübesine ihtiyaç vardır. Literatürdeki çoğu çalışma, belirli bir senaryoda verim artışına odaklanırken, gerçek operasyon koşullarında değişken yük, yakıt türü değişimi, kirlenme gibi etkenlerin performansı nasıl etkilediği daha fazla araştırılmalıdır.

5. Sonuç ve Öneriler

2015 yılı öncesine ait temel çalışmalar ile ağırlıklı olarak 2020–2025 yılları arasında ekonomizer tasarımı ve CFD analizi konularında yapılan akademik çalışmalar, bu alanın hem bilimsel hem pratik açıdan zenginleştiğini ortaya koymaktadır. Derlenen literatüre dayanarak aşağıdaki temel sonuçlar ve öneriler sunulabilir:

- **Verim Artışı Potansiyeli:** Ekonomizerler, uygun tasarım iyileştirmeleri sayesinde kazan verimliliğinde önemli artışlar sağlayabilmektedir. Isı transferini artırmak amacıyla kullanılan helisel dişli kanatçıklar, perforasyonlu yüzeyler ve spiral boru dizilimleri gibi yöntemler; birim bazda küçük oranlar gibi görünse de büyük ölçekli uygulamalarda yıllık binlerce ton yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Endüstriyel bir örnekte, baca gazı ısısının tam verimle kullanılması sonucunda bin megavatlık bir santralin kömür tüketiminin yaklaşık 4 g/kWh azaltılabildiği ve yıllık 14 milyon doları aşkın tasarruf sağlanabileceği ortaya konmuştur. Bu doğrultuda, enerji üreten ve tüketen tesislerin mevcut ekonomizer ekipmanlarını gözden geçirerek yeni geliştirilen teknoloji ve tasarımlarla revize etmeleri önerilmektedir.
- **CFD'nin Rolü:** Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, ekonomizer tasarım sürecinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu analizler sayesinde prototip imal etmeden farklı tasarımları sanal ortamda test etmek, akış ve sıcaklık dağılımlarını detaylıca incelemek mümkün olmaktadır. Bu yaklaşım hem araştırma-geliştirme maliyetlerini düşürmekte hem de optimum çözüme hızla ulaşılmasını sağlamaktadır. Özellikle çoklu hedef optimizasyonu, yapay zekâ destekli modelleme ve gerçek zamanlı simülasyon konularında bu uygulamaların daha da genişletilmesi tavsiye edilir. Örneğin büyük kazanlarda işletme sırasında uygulanan ve dijital ikiz yaklaşımı olarak bilinen sürekli izleme yöntemleri ile kirlenme oluşumunun tespiti ve temizleme zamanlarının optimize edilmesi, literatürde prototip düzeyinde başarıyla gösterilmiştir[26]. Bu tür yenilikçi uygulamaların endüstriyel ölçekte hayata geçirilmesi teşvik edilmelidir.
- **Yenilikçi Teknolojilere Geçiş:** Isı borulu ekonomizerler, ısı pompası entegre sistemler ve korozyona dayanıklı yeni malzemeler gibi yenilikler, atık ısı geri kazanımında devrimsel iyileştirmeler vadetmektedir. Isı borulu sistemlerin kompaktlığı ve yüksek gizli ısı taşıma kapasitesi, özellikle modüler kazan sistemleri ve atık ısıdan maksimum fayda sağlanmak istenen prosesler için caziptir. Benzer şekilde, floroplastik kaplı veya polimer esaslı ekonomizerler, asidik yoğunlaşma problemi olan tesislerde oyun değiştirici olabilir. Ancak bu yeni teknolojilerin uzun vadeli performans verilerine ihtiyaç vardır. Araştırmacılara, pilot ölçekli demonstrasyon projeleriyle bu sistemlerin, farklı yakıtlar, değişken yük profilleri vb. senaryolarda denenmesini öneriyoruz. Ayrıca, çok kademeli ısı geri kazanım sistemleri konsepti geliştirilmelidir. Mevcut literatür, tek kademeli yerine iki veya daha fazla kademeli ısı değiştirici yerleşiminin hem duyulur hem gizli ısıyı bir arada toparlamada üstün olduğunu göstermektedir[18]. Gelecekte, tam bir atık ısı basamaklandırması (cascade) oluşturularak, yüksek sıcaklık ekonomizeri ve düşük sıcaklık yoğunlaştırıcı kombinasyonlarının standart hale gelmesi beklenmektedir.

Sonuç olarak, ekonomizer tasarımı ve analizi alanındaki güncel literatür; enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak için mühendislik yeniliklerinin ve hesaplamalı araçların etkin şekilde kullanıldığını göstermektedir. Akademik çalışmalar; düşük verim, kirlenme, korozyon ve kontrol optimizasyonu gibi endüstriyel uygulamalarda

karşılaşılan temel problemlere somut çözümler sunmaktadır. Bu önerilerin hayata geçirilmesi, enerji maliyetlerini düşürmekle kalmayıp küresel ölçekte karbon emisyonlarının azaltılmasına da doğrudan katkı sağlayacaktır. Gelecekte yapılacak araştırmalarda, ekonomizer teknolojilerinin bütünsel sistem optimizasyonu içinde ele alınması önem arz etmektedir. Nitekim atık ısı geri kazanımı ile karbon yakalama veya su arıtma proseslerinin birleştirildiği entegre sistemler üzerine çalışmalar günümüzde ivme kazanmıştır[1]. Baca gazından ısı kazanırken aynı anda su buharını yoğunlaştırarak su geri kazanımı sağlamak veya bu süreci azot oksitlerin giderimi prosesine entegre etmek gibi çok amaçlı çözümler, geleceğin yeşil ve döngüsel enerji ekonomisinin temel yapı taşlarını oluşturacaktır.

Teşekkür

Yazarlar bu çalışma için herhangi bir finansal destek almamıştır

Yazar Katkı Oranları

Tüm yazarlar eşit derecede katkıda bulunmuşlardır

Çıkar Çatışması

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

6. Kaynakça

- [1] Qiao, J., Wang, Q., Na, E., Wen, X., Liang, Z., & Zhang, Y. (2025). Recent progress in waste heat recovery technology for boiler flue gas: A comprehensive review. *Thermal Science*, 29(6A), 4453–4471. <https://doi.org/10.2298/TSCI250703176Q>
- [2] Xu, W., Jin, Y., Zhu, L., & Li, Z. (2021). Performance analysis of the technology of high-temperature boiler feed water to recover the waste heat of mid-low-temperature flue gas. *ACS Omega*, 6(40), 26318–26328. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03465>
- [3] Rajesh Babu, C., Kumar, P., Roy, S., & Kanungo, D. (2021). CFD analysis of an economizer for heat transfer enhancement using serrated finned tube equipped with variable fin segments. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1405–1412. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.422>
- [4] Qalbi, C. Q. A. M., & Ahn, J. (2023). Designing a turning guide vane using CFD for an economizer of a non-furnace boiler. *Processes*, 11(6), 1617. <https://doi.org/10.3390/pr11061617>
- [5] Behzadi, A., & Abbasian Arani, A. A. (2025). Modification of the flow pattern in ducts outlet and boiler economizer chamber for optimization of existing high pressure boilers to improve boiler performance. *International Journal of Thermofluids*, 28, 101310. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101310>
- [6] Liu, X., Yu, J., & Yan, G. (2016). A numerical study on the air-side heat transfer of perforated finned-tube heat exchangers with large fin pitches. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 100, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.081>
- [7] Zhang, H., Gong, L., An, X., Ye, X., Wei, G., & Yu, A. (2020). Numerical study on the erosion process of the low temperature economizer using computational fluid dynamics-discrete particle method. *Wear*, 450–451, 203269. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203269>
- [8] Zhao, W., Chen, L., & Xu, Y. (2025). Numerical analysis of fly ash deposition behavior in economizer tube bundles using coupled CFD–DPM. *Powder Technology*, 438, 119052. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121241>
- [9] Ye, X. (2024). Gas-particle flow induced erosion of economizer in low-low temperature electrostatic precipitators: Numerical prediction and engineering application. *Powder Technology*, 439, 119696. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119696>
- [10] Salehipour, D., Jalili, B., & Jalili, P. (2024). Effect of humidification of combustion products in the boiler economizer with spiral geometry. *Results in Engineering*, 21, 101906. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101906>
- [11] Miliuskas, G., Puida, E., Poškas, R., Ragaišis, V., Paukštaitis, L., Jouhara, H., & Mingilaitė, L. (2022). Experimental investigations of water droplet transient phase changes in flue gas flow in the range of temperatures characteristic of condensing economizer technologies. *Energy*, 256, 124643. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124643>

- [12] Zhang, D., Wu, W., Zhao, L., & Dong, H. (2023). Mathematical investigation of heat transfer characteristics and parameter optimization of integral rolled spiral finned tube bundle heat exchangers. *Processes*, 11(7), 2192. <https://doi.org/10.3390/pr11072192>
- [13] Kanthasamy Ganesan, S., Alagesan, S., Shanmugam, P., Murugan, S., & Tufa, M. (2022). Analysis of fin characteristics for overall heat transfer in the boiler economizer. *Thermal Science*, 26(2A), 849–855. <https://doi.org/10.2298/TSCI200730154K>
- [14] Meng, X., Zhang, Y., Li, H., & Chen, J. (2022). Numerical investigation of heat transfer enhancement in spiral finned tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 182, 121935. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104176>
- [15] Rayhan, S., Kariya, K., & Miyara, A. (2023). CFD-based performance analysis of zigzag tube heat exchangers for heat transfer enhancement. *Thermo*, 3(2), 200–215. <https://doi.org/10.3390/thermo3020019>
- [16] Zeng, C., Wang, Z., Li, X., & Zhao, Y. (2022). Numerical study on the enhanced heat transfer characteristics of steam generator with axial economizer. *Energy Reports*, 8, 10254–10267. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107794>
- [17] Kang, S., Seo, J. H., Lim, J. B., & Lee, J. (2025). Effective waste heat recovery of boiler flue gas using a heat pipe heat exchanger: A performance comparison with finned-tube economizer. *International Journal of Energy Research*, 49(12), 8781–8794. <https://doi.org/10.1155/er/8781810>
- [18] Li, K., Meng, Z., Feng, H., Wang, Y., Wang, Q., & Gao, X. (2024). Improvement of heat transfer correlation for fluoroplastic steel heat exchanger and theoretical analysis of application characteristics. *Energies*, 17(20), 5054. <https://doi.org/10.3390/en17205054>
- [19] Wang, Y., Cao, L., Li, X., Wang, J., Hu, P., Li, B., & Li, Y. (2020). A novel thermodynamic method and insight of heat transfer characteristics on economizer for supercritical thermal power plant. *Energy*, 191, 116573. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116573>
- [20] Ye, Y., Wang, H., & An, X. (2020). An indirect online method for measuring the boiling rate of BFG boiler economizer. *Energy Reports*, 6(Suppl. 2), 703–709. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.141>
- [21] An, N., Zhang, B., Zhu, T., Yu, T., Gao, H., & Yang, D. (2025). Thermal-hydraulic analysis and performance improvement of HP evaporator and HP economizer for a heat recovery steam generator. *Applied Thermal Engineering*, 279(F), 128044. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128044>
- [22] Subramanian, C. (2020). Deterioration of economizer tube in utility boiler. *Applied Thermal Engineering*, 170, 114834. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104643>
- [23] Lu, J.-W., Xie, Y., Xie, B., Li, Z., Huang, Z., Zhang, D., & Hai, J. (2023). Buffering effect of the economizer against PCDD/Fs in flue gas from solid waste incineration plants. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.029>
- [24] Li, Z., Chen, X., & Wu, J. (2021). Structural and parametric multi-objective optimization of boiler economizers using constructal theory and NSGA-II. *Energy*, 236, 121296. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120013>
- [25] Nugraha, A. S., Purwanto, H. H., & Bayuseno, A. P. (2020). Performance analysis of economizer for waste heat recovery in boiler system. *E3S Web of Conferences*, 202, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018001004>
- [26] Shi, Y., Wang, N., Cui, F., Wen, J., Jia, J., & Wang, B. (2025). Improving the heat transfer efficiency of economizers: A comprehensive strategy based on machine learning and quantile ideas. *Energies*, 18(16), 4227. <https://doi.org/10.3390/en18164227>