

Çimento üretim hattına entegre edilen ORC tabanlı atık ısı geri kazanım sistem analizi

Analysis of an orc-based waste heat recovery system integrated into a cement production line

Onur Alkal¹ , Bengi Sanli^{2*} , Onder Albayrak² 

¹ CTN Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş., Sarıçam, 01790, Adana, Türkiye.

² Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yenişehir, 33343, Mersin, Türkiye.

Öz: Çimento üretim süreçleri yüksek enerji tüketimi gerektirmekte ve önemli miktarda atık ısı ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada, 5.000 ton/gün klinker üretim kapasiteli bir çimento tesisine entegre edilen Organik Rankine Çevrimi (ORC) tabanlı atık ısı geri kazanım sisteminin enerji performansı ve çevresel katkıları incelenmiştir. Ön ısıtıcı ve klinker soğutucu çıkış gazlarından geri kazanılan atık ısının elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle, tesisin enerji verimliliğinin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılması hedeflenmiştir. ORC teknolojisinin orta ve düşük sıcaklıktaki atık ısı kaynaklarını değerlendirmedeki avantajları doğrultusunda sistemin net elektrik üretimi, çevrim performansı ve emisyon azaltım potansiyeli analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geri kazanılan enerjinin tesisin elektrik ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayabildiğini ve şebeke kaynaklı enerji tüketimini azaltarak kayda değer düzeyde CO₂ emisyon azaltımı sağladığını göstermiştir. Ayrıca ORC tabanlı sistemlerin kompakt yapısı, düşük işletme gereksinimi ve mevcut çimento üretim hatlarına kolay entegre edilebilir olması, bu teknolojiyi sürdürülebilir sanayi uygulamaları açısından güçlü bir alternatif haline getirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Organik Rankine Çevrimi (ORC), Isı Geri Kazanımı (WHR), elektrik enerjisi, CO₂ emisyonu

Abstract: Cement production processes require high energy consumption and generate significant amounts of waste heat. In this study, the energy performance and environmental contributions of an Organic Rankine Cycle (ORC)-based Waste Heat Recovery system integrated into a cement plant with a clinker production capacity of 5,000 tons/day were investigated. The system aims to improve energy efficiency and reduce the carbon footprint of the facility by converting waste heat recovered from preheater and clinker cooler exhaust gases into electrical energy. Considering the advantages of ORC technology in utilizing medium- and low-temperature waste heat sources, the net power generation, cycle performance, and emission reduction potential of the system were analyzed. The results demonstrated that the recovered energy could meet a significant portion of the plant's electricity demand while substantially reducing grid-based energy consumption and associated CO₂ emissions. In addition, the compact structure of ORC-based systems, their low operational requirements, and their ease of integration into existing cement production lines make this technology a strong alternative for sustainable industrial applications.

Keywords: Organic Rankine Cycle (ORC), Waste Heat Recovery (WHR), electrical energy, CO₂ emissions.

1. Giriş

Türkiye'nin birincil enerji tüketim yapısı sanayi odaklı bir karakter sergilemektedir. Ulusal enerji istatistiklerine göre yıllık toplam enerji tüketiminin yaklaşık 121,4 Milyon Ton Eşdeğer Petrol (MTEP) olduğu, bu tüketimin 36,8 MTEP'lik bölümünün sanayi sektörü tarafından kullanıldığı belirtilmektedir. Sanayi sektörü kendi içinde değerlendirildiğinde çimento sektörü yaklaşık 7,1 MTEP ile toplam enerji tüketiminin %5,85'ini oluşturmaktadır (TÜRKÇİMENTO, 2024). Çimento üretim tesislerinde enerji tüketimi büyük ölçüde klinker üretim hattında yoğunlaşmaktadır. Özellikle döner fırın ve ön ısıtıcı sistemleri proses içerisindeki en yüksek enerji tüketimine

sahip ekipmanlar olup, literatürde klinker üretim aşamasının toplam proses enerjisinin yaklaşık %75–85'ini tükettiği belirtilmektedir (International Finance Corporation [IFC], 2022; Madloul et al., 2011).

Çimento üretim sürecinde özellikle döner fırın çıkış gazları, ön ısıtıcı kuleleri ve klinker soğutma sistemlerinde orta ve düşük sıcaklık aralığında sürekli atık ısı oluşmaktadır (Liu et al., 2015; Mujumdar & Ranade, 2006). Bu durum, çimento sektörünü teknik ve ekonomik açıdan atık ısı geri kazanım sistemleri için uygun hale getirmektedir.

Son yıllarda Türkiye'de çimento sektöründe atık ısıdan

*İletişim Yazarı / Corresponding author. Eposta/Email : bengigozmen@mersin.edu.tr

Geliş / Received: 14.05.2026, Revizyon / Revised: 01.07.2026

Kabul / Accepted: 17.07.2026



elektrik üretimine yönelik uygulamalar artış göstermiştir. 2023 yılı itibarıyla Türkiye’de 17 fabrikada 26 atık ısı geri kazanım hattının devrede olduğu ve bu tesislerden elde edilen enerjinin yaklaşık 154,5 MW kurulu güce ulaştığı ifade edilmektedir (World Cement, 2024). Söz konusu üretim kapasitesi günlük bazda yaklaşık 618.000 hanenin elektrik tüketimine eşdeğer bir düzeyi temsil etmektedir. Bu değerler atık ısı geri kazanım teknolojilerinin yalnızca teorik bir potansiyel olmadığını, aynı zamanda endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Atık ısıdan elektrik üretiminde tercih edilen temel sistemler Rankine çevrimine dayalı sistemlerdir. Bu uygulamalar genel olarak Atık Isı Geri Kazanımı (Waste Heat Recovery – WHR) sistemleri olarak tanımlanmaktadır. WHR sistemleri endüstriyel prosesler sırasında atmosfere atılan termal enerjinin geri kazanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmesini amaçlayan teknolojik çözümleri ifade etmektedir. Literatürde WHR uygulamalarında en yaygın kullanılan çevrimlerin Steam Rankine Cycle (SRC) ve Organic Rankine Cycle (ORC) olduğu belirtilmektedir (Bertrand et al., 2022).

SRC sistemleri yüksek sıcaklık seviyelerinde etkinlik gösterirken, ORC sistemleri orta ve düşük sıcaklık aralığındaki ısı kaynaklarının değerlendirilmesinde teknik ve ekonomik açıdan uygun çözümler sunmaktadır. SRC sistemlerinde çalışma akışkanı olarak su kullanılmakta ve çevrim yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında işletilmektedir. Bu yapı yüksek özgül güç üretimi sağlamakla birlikte kazan sistemleri, su arıtma üniteleri, çok kademeli buhar türbinleri ve yardımcı ekipman gereksinimleri nedeniyle karmaşık bir tesis altyapısını zorunlu kılmaktadır (Kehlhofer et al., 2009).

SRC sistemlerinin işletme karakteristikleri incelendiğinde yüksek basınçlı buhar üretimi ve türbin giriş koşullarının sürekliliğinin sağlanması için kapsamlı operatör gözetimi gerektiği görülmektedir. Kazan besleme suyu kalitesi, kimyasal şartlandırma süreçleri ve emniyet sistemlerinin sürekli izlenmesi buhar çevrimlerinin işletme karmaşıklığını artırmaktadır (Elliott et al., 2012). Literatürde, klinker hattı atık gazlarından geri kazanılan ısının SRC tabanlı sistemlerle değerlendirilmesinin çimento tesislerinde önemli düzeyde elektrik üretim potansiyeli sunduğu belirtilmektedir. SRC tabanlı atık ısı geri kazanım sistemlerinde, atık ısı kaynağının sıcaklığına bağlı olarak yaklaşık %10–20 aralığında elektrik dönüşüm verimi elde edilebildiği rapor edilmektedir (Bao & Zhao, 2014).

Atık Isı Geri Kazanımı (WHR) uygulamalarında tercih edilen diğer çevrimler, ORC tabanlı çevrimlerdir. Çimento tesislerinden elde edilen atık ısının önemli bir bölümü 80–400 °C sıcaklık aralığında bulunduğundan ORC sistemleri termodinamik verim açısından uygun bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Literatürde orta ve düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarının değerlendirilmesine yönelik çalışmalar uygun akışkan seçimi ve sistem optimizasyonu

ile elektrik üretim veriminin artırılabilceğini göstermektedir (Tchance et al., 2011). Bu çevrimlerde, düşük kaynama noktasına sahip organik akışkanlar tercih edilmekte ve çevrim 80–400 °C sıcaklık aralığındaki ısı kaynaklarıyla uyumlu şekilde tasarlanmaktadır (Quoilin et al., 2013). ORC sistemlerinde çevrim basınçlarının daha düşük seviyelerde tutulabilmesi türbin ve ısı değiştirici tasarımlarının daha kompakt ve modüler olmasına olanak sağlamaktadır. Organik akışkanların termodinamik özellikleri sayesinde türbin giriş koşulları daha kararlı bir aralıkta tutulabilmekte ve kısmi yük koşullarında performans korunabilmektedir (Imran et al., 2015; Lemort et al., 2013). Bu yapı ORC sistemlerinin PLC ve SCADA tabanlı otomasyon sistemleriyle entegre edilmesini kolaylaştırmakta ve çevrim parametrelerinin gerçek zamanlı izlenmesini mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, ORC sistemlerinde operatör müdahalesi büyük ölçüde izleme ve periyodik bakım seviyesinde kalmaktadır. ORC sistemlerinin tesis entegrasyonu açısından sunduğu modüler yapı mevcut çimento hatlarına minimum proses kesintisi ile uygulanabilmesine imkân sağlamaktadır. Kompakt ısı değiştirici tasarımları ve kapalı çevrim mimarisi sayesinde sistem sınırlı alanlarda dahi uygulanabilmektedir. Ayrıca organik akışkanlı sistemlerde kullanılan kapalı devre prensibi su tüketimini minimize etmekte ve özellikle su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır.

Ek olarak, ORC sistemleri; daha kompakt ekipman yapısı, düşük operatör ihtiyacı ve mevcut tesislere kolay entegrasyon avantajları ile öne çıkmaktadır. Bu özellikler, özellikle revizyon veya retrofit projelerinde yatırım kararını olumlu yönde etkilemektedir. Ekonomik açıdan ise yatırım maliyeti (CAPEX), işletme maliyeti (OPEX), elektrik fiyatı ve geri kazanılabilir ısı miktarı temel parametreler olarak değerlendirilmektedir. Literatürde 8–12 yıllık değerlendirme periyodu önerilmekte olup ORC sistemlerinin düşük bakım giderleri sayesinde geri ödeme süresinin daha avantajlı olduğu görülmektedir (Wang et al., 2015).

Türkiye’de gerçekleştirilen uygulamalarda WHR sistemlerinin tesis elektrik tüketiminin önemli bir bölümünü karşılayabildiği rapor edilmektedir (Hedman, 2019). SRC ve ORC sistemlerinin termodinamik performansları karşılaştırıldığında, buhar çevrimlerinin teorik olarak daha yüksek verim sağlayabildiği; ancak bu performansın çoğunlukla yüksek sıcaklık seviyelerinde mümkün olduğu görülmektedir (Bao & Zhao, 2014). Orta ve düşük sıcaklık aralığında ise SRC sistemlerinin verimi azalırken sistem karmaşıklığı artabilmektedir. Buna karşılık ORC sistemlerinde çalışma akışkanının çevrim koşullarına uyarlanabilmesi sayesinde düşük sıcaklık seviyelerinde dahi net elektrik üretimi sürdürülebilmektedir (Quoilin et al., 2013).

Enerji geri kazanım sistemlerinin çevresel etkileri karbon emisyonları açısından değerlendirildiğinde, atık ısıdan üretilen elektrik enerjisinin şebeke elektrliğini ikame ettiği görülmektedir. Türkiye elektrik üretim portföyünde

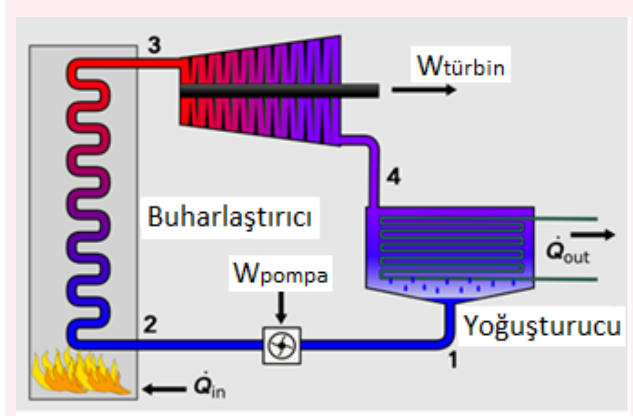
fosil yakıt temelli üretimin önemli paya sahip olması nedeniyle, WHR ve ORC tabanlı sistemlerin entegrasyonu ile dolaylı CO₂ eşdeğeri emisyon azaltımı sağlanabilmektedir (International Energy Agency [IEA], n.d.). Bu katkı, sanayi tesislerinin sürdürülebilirlik raporlamalarında ve sınırda karbon düzenleme mekanizmaları kapsamında önemli bir teknik performans göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Miró et al., 2016).

Bu çalışma kapsamında 5000 ton/gün klinker üretim kapasiteli bir çimento fabrikasının üretim hattına ORC tabanlı geri kazanım sistemi entegre edilmiş ve sistem çevrim performansı, net elektrik üretimi, çevrim verimi, özgül enerji geri kazanım katsayısı ve sistem kullanılabilirliği açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarla sistem avantajları ortaya konmuştur.

2. Materyal ve Metot

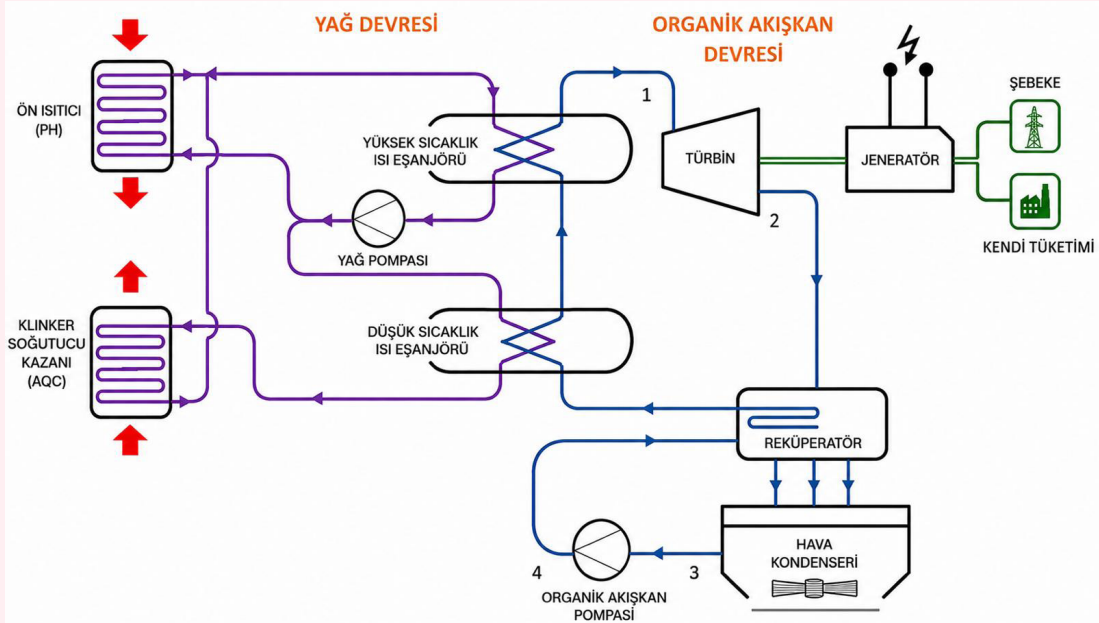
2.1. Organik Rankine Çevrimi (ORC)

Isı enerjisinin mekanik enerjiye ve ardından elektrik enerjisine dönüştürüldüğü temel güç çevrimine Rankine çevrimi denir. Organik Rankine Çevrimi (ORC) ise düşük ve orta sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elektrik üretmek amacıyla kullanılan bir termal enerji dönüşüm sistemidir. Klasik Rankine çevrimi ile aynı prensiple çalışmakta olup, su yerine düşük kaynama noktasına sahip organik akışkanlar kullanılmaktadır. Bu sayede 80–350 °C sıcaklık aralığındaki ısı kaynaklarından enerji üretimi mümkün olmaktadır. ORC tabanlı sistemler; jeotermal enerji, atık ısı geri kazanımı, biyokütle sistemleri ve güneş termal sistemleri gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Quoilin et al., 2013; Hung et al., 1997). Tipik organik rankine çevrimine ait şematik gösterim **Şekil 1**'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Organik Rankine Çevrimi'nin şematik gösterimi (Wikimedia Commons, n.d.)

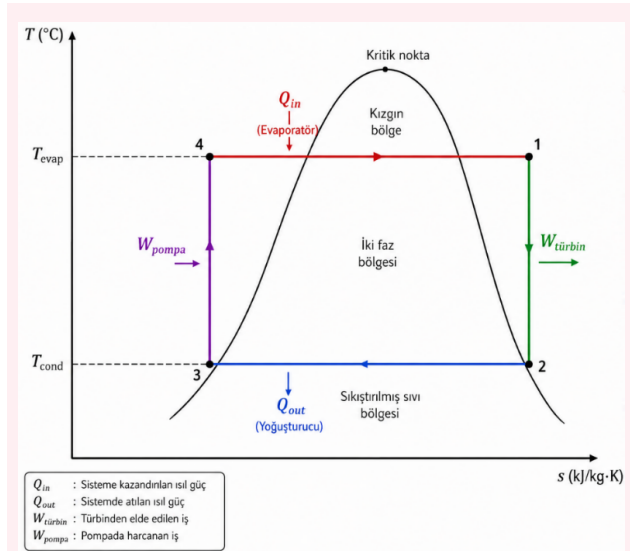
Organik Rankine Çevrimi, pompa, evaporatör, türbin ve kondenser olmak üzere dört temel elemandan oluşan kapalı bir çevrimdir. Bu çalışma kapsamında tasarlanıp kullanılan ORC tabanlı geri kazanım sistemi, çimento üretim sürecinde ortaya çıkan yüksek sıcaklıktaki gazların değerlendirilmesi prensibine dayanmaktadır ve sistem şematik olarak **Şekil 2**'de gösterilmiştir. Atık ısı, ön ısıtıcı (Pre Heater, PH) ve klinker soğutucu (Air Quenching Cooler, AQC) çıkış gazlarından elde edilmekte ve termal yağ devresi aracılığıyla buharlaştırıcılara aktarılmaktadır. Termal yağ sıcaklık aralığı yaklaşık 100–315 °C seviyelerindedir. Literatür verilerine göre, AQC sistemleri için geri kazanılabilir ısı genellikle 200–300 kJ/kg klinker, PH sistemleri için ise 300–400 kJ/kg klinker aralığındadır (International Finance Corporation [IFC], 2022). Buharlaştırıcıda organik çalışma akışkanına aktarılan ısı ile yüksek basınçlı buhar elde edilmekte ve türbi-



Şekil 2. ORC tabanlı geri kazanım sisteminin şematik gösterimi

ne bağlı jeneratör grubu vasıtasıyla elektrik enerjisi üretilmektedir. Üretilen elektrik enerjisi tesis içi tüketimde kullanılabilmekte veya şebekeye verilebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanıp kullanılan ORC tabanlı geri kazanım sistemine ait çevrimin T-s diyagramı ►Şekil 3'te gösterilmektedir. Çimento tesisindeki ön ısıtıcı egzoz gazları ve klinker soğutucu çıkış havasından geri kazanılan ısı enerji evaporatörde organik akışkana aktarılmakta ve çevrime giren toplam ısı güç (Q_{in}) sisteme kazandırılmaktadır. T-s diyagramında bu süreç 4-1 aşaması olarak gösterilmektedir. Buhar türbine sevk edilerek organik akışkanın kazandığı enerji mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Türbinde gerçekleşen bu izentropik genişleme süreci T-s diyagramında 1-2 aşaması olarak tanımlanmaktadır. Türbinden çıkan organik buhar, yoğunlaştırıcıda ısı kaybederek izobarik yoğunlaşma işlemi neticesinde sıvı faza geçmektedir ve bu işlem T-s diyagramında 2-3 aşaması ile temsil edilmektedir. Pompa, yoğunlaşmış organik akışkanın tekrar evaporatör basıncına yükseltildiği yaklaşık izentropik sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu süreç, T-s diyagramında 3-4 aşaması olarak ifade edilmektedir.



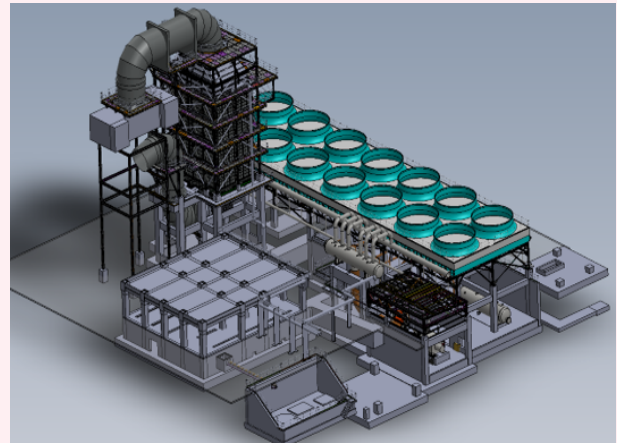
Şekil 3. ORC tabanlı geri kazanım sisteminin T-s diyagramı

2.2. Sistem Enerji ve Performans Analizi

Atık ısı geri kazanımına dayalı ORC sistemlerinde enerji ve performans analizi, sistemin termodinamik verimliliğinin ve elektrik üretim kapasitesinin belirlenmesi açısından temel bir değerlendirme yöntemidir. Bu analiz kapsamında; evaporatöre aktarılan toplam ısı güç, türbinden elde edilen mekanik güç, pompa tüketimi ve kondenserde çevreye atılan ısı miktarı ayrı ayrı incelenerek sistemin net güç üretimi hesaplanmaktadır. Bununla birlikte çevrim verimi, ısı geri kazanım etkinliği ve çalışma akışkanının termofiziksel özellikleri gibi parametreler, sistem performansını doğrudan etkileyen başlıca unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle çimento tesisleri gibi yüksek sıcaklıklı atık gaz akışına sahip endüstriyel proseslerde, atık ısının uygun sıcaklık se-

viyelerinde değerlendirilmesi çevrimin enerji dönüşüm verimini önemli ölçüde artırabilmektedir. Bir çimento tesisinde kullanılan ORC tabanlı geri kazanım sistemine ait genel bir görüntü ►Şekil 4'te sunulmuştur.

Performans analizinde ayrıca sistemin farklı işletme koşulları altındaki davranışı da dikkate alınmaktadır. Atık gaz sıcaklığındaki değişimler, debi dalgalanmaları, evaporatör ve kondenser basınç seviyeleri ile türbin izentropik verimi gibi işletme parametreleri, ORC sisteminin net elektrik üretim kapasitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle gerçekleştirilen enerji analizleri yalnızca mevcut çalışma koşullarının değerlendirilmesi için değil, aynı zamanda sistem optimizasyonu, ekipman boyutlandırması ve uzun dönem işletme stratejilerinin oluşturulması açısından da önemli mühendislik verileri sunmaktadır. ORC tabanlı WHR sistemlerinin bütüncül enerji ve performans değerlendirmesi, endüstriyel tesislerde enerji verimliliğinin artırılması ve karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik uygulanabilir çözümlerin geliştirilmesinde kritik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4. ORC tabanlı geri kazanım sisteminin genel görünümü

2.3. Sistem Performansı Analizinde Kullanılan Temel Denklemler

Kütlenin korunumu denklemi;

$$\dot{m}_g - \dot{m}_c = \Delta \dot{m}_{kh} \quad (1)$$

$$\Sigma \dot{m}_g = \Sigma \dot{m}_c \quad (2)$$

Genel enerjinin korunumu denklemi;

$$\dot{E}_g = \dot{E}_c \quad (3)$$

$$\dot{Q}_g - \dot{W}_g + \Sigma \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_c - \dot{W}_c + \Sigma \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (4)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_c - \dot{W}_g \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_g - \dot{Q}_c \quad (6)$$

Net elektrik üretimi:

$$W_{net} = W_{t\ddot{u}rb\ddot{u}n} - W_{pompa} \quad (7)$$

Net çevrim verimi:

$$\eta_{th} = \frac{\text{Elde edilen net iş}}{\text{Toplam giren ısı}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} \quad (8)$$

Yıllık enerji üretimi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$E = W_{net} \times t \quad (9)$$

Burada;

$$E = \text{yıllık enerji üretimi (MWh)} \quad (10)$$

$$W_{net} = \text{net güç (MW)} \quad (11)$$

t = yıllık çalışma süresi (h) anlamına gelmektedir.

Elektrik üretiminin neden olduğu karbon emisyon değeri aşağıdaki formülle belirlenmektedir.

$$CO_2_{elek.\ddot{u}ret} = E \times EF \text{ (ton } CO_2/\text{yıl)} \quad (12)$$

Bu hesaplamada, Türkiye elektrik şebekesi için ortalama emisyon faktörü (EF) yaklaşık 0,50 ton CO_2 /MWh kabul edilmiştir.

Sistem hesaplamalarında kullanılan veriler aşağıda ►**Tablo 1**'de verilmiştir:

Tablo 1. AQC eşanjöründe kullanılan termal yağ verileri ve bazı sistem verileri	
Yağ debisi (kg/s)	100
ORC'ye yağ giriş sıcaklığı (°C)	305
ORC'ye yağ giriş basıncı (bar)	6
ORC'den yağ çıkış sıcaklığı (°C)	105
ORC'den yağ çıkış basıncı (bar)	4,5
Klinker debisi (kg/s)	57,87
Termal yağ tipi	Therminol® 66
Yoğunluk 305 °C'de (kg/m ³)	804
Dinamik viskozite 305 °C'de (mPa·s)	0,40
Isıl iletkenlik 305 °C'de (W/m·K)	0,094

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, 5000 ton/gün klinker üretim kapasiteli bir çimento tesisinde ORC tabanlı atık ısı geri kazanım sistemi entegre edilmiş, performans analizleri gerçekleştirilmiş ve atık ısıdan elde edilen elektrik üretimiyle gerçekleştirilecek karbon emisyonundaki azalma miktarı belirlenmiştir. Özellikle ön ısıtıcı egzoz gazları ve klinker soğutucu çıkış havasından geri kazanılan ısı enerjisinin çevrime etkin biçimde aktarılmasıyla sistemin kararlı bir net güç üretimi sağladığı görülmüştür. Ön ısıtıcı egzoz gazlarından (PH) 370 kJ/kg, klinker soğutucu (AQC) çıkış gazlarından yaklaşık 263 kJ/kg ısı elde edil-

diği belirlenmiştir. Toplam geri kazanılabilir termal güç ise 36.629 kW olarak hesaplanmıştır. Çimento üretim tesislerinde ulaşılan 250–400 °C sıcaklıkları için ORC sistemlerinin verimleri genellikle %18 ile %25 arasında değişmektedir (International Finance Corporation [IFC], 2022; Bertrand et al., 2022). Bu nedenle temsili bir değer olarak bu çalışmada $\eta_{ORC} = \%22$ alınmıştır. Bu verim değerine göre elde edilen elektrik gücü çıktısı 8,06 MW olarak belirlenmiştir. Yıllık 330 gün üzerinden belirlenen 7.920 saatlik toplam çalışma süresine göre yıllık elektrik üretimi 63,8 GWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değere göre ise yıllık yaklaşık 32.000 ton CO_2 eşdeğeri emisyon salımının önüne geçilmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, sistem veriminin büyük ölçüde atık ısı kaynağının sıcaklık seviyesi, ısı değiştirici performansı ve türbin çalışma verimine bağlı olarak şekillendiği görülmektedir. Özellikle evaporatörde gerçekleşen ısı transfer etkinliğinin yüksek olması, organik akışkanın daha yüksek entalpi seviyelerine ulaşmasını sağlayarak türbinden elde edilen iş miktarını artırmaktadır. Bununla birlikte kondenser performansı ve pompa tüketimi gibi yardımcı ekipmanların çevrim üzerindeki etkileri de net güç üretimi açısından dikkate değer parametreler olarak öne çıkmaktadır.

Çevresel etkiler açısından değerlendirildiğinde ise, sistemin yıllık yaklaşık 32.000 ton CO_2 eşdeğeri emisyon salımı azaltımı sağlayabilme potansiyeli, ORC tabanlı WHR uygulamalarının sürdürülebilir sanayi politikaları açısından önemli bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Enerji geri kazanımı yoluyla fosil kaynaklı elektrik tüketiminin azaltılması, karbon ayak izinin düşürülmesine doğrudan katkı sağlarken, karbon maliyetlerinin giderek önem kazandığı günümüz sanayi işletmelerinde ekonomik avantaj da sunmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, 5000 ton/gün klinker üretim kapasiteli bir çimento tesisine entegre edilen ORC tabanlı atık ısı geri kazanım sistemi analiz edilerek sistemin enerji performansı, elektrik üretim potansiyeli ve çevresel katkıları değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda sistemin yıllık yaklaşık 63,8 GWh elektrik üretimi sağlayabildiği ve bu üretimin tesisin toplam elektrik ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayabileceği belirlenmiştir. Güncel sanayi elektrik tarifeleri dikkate alındığında, sistemin yıllık yaklaşık 250–290 milyon TL düzeyinde ekonomik katkı sağlayabileceği öngörülmüştür. Ayrıca sistem sayesinde yıllık yaklaşık 32.000 ton CO_2 eşdeğeri emisyon azaltımı sağlanabileceği, karbon fiyatlandırma mekanizmaları kapsamında ise yaklaşık 100 milyon TL seviyesinde ilave çevresel ekonomik fayda oluşturabileceği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, ORC tabanlı atık ısı geri kazanım sistemlerinin enerji yoğun üretim yapan çimento tesislerinde enerji verimliliğinin artırılması, dışa bağımlı enerji tüketiminin azaltılması ve karbon emisyonlarının düşürülmesi açısından teknik, ekonomik ve çevresel olarak güçlü bir alternatif

sunduğunu göstermektedir.

5. Gelecek Çalışmalar ve Öneriler

Gelecek çalışmalarda, ORC tabanlı atık ısı geri kazanım sistemlerinde farklı organik çalışma akışkanlarının çevrim performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda enerji analizine ek olarak ekserji, termoekonomik ve çevresel etki analizlerinin yapılması, ORC tabanlı sistemlerin çimento sektöründeki teknik uygulanabilirliği ve ekonomik sürdürülebilirliği açısından daha kapsamlı değerlendirmeler sunacaktır (Hung et al., 1997).

Araştırma Etiği / Research Ethics

Etik kurul izni gerekmemektedir.

Yapay Zeka Kullanımı / Artificial Intelligence Use

Yazar(lar), bu çalışmanın hazırlanması sürecinde yalnızca dil düzenleme amacıyla üretici yapay zeka aracı (örneğin ChatGPT) kullanıldığını, içerik üretiminde bu araçlara başvurulmadığını ve tüm bilimsel sorumluluğun kendilerinde olduğunu beyan eder.

Yazar Katkıları / Author Contributions

Kavramsallaştırma / *Conceptualization*: [O.Alkal, B.Sanli, O.Albayrak], Metodoloji / *Methodology*: [O.Alkal, B.San-

li, O.Albayrak], Formal Analiz / *Formal Analysis*: [O.Alkal, B.Sanli, O.Albayrak], Araştırma / *Investigation*: [O.Alkal, B.Sanli, O.Albayrak], Kaynaklar / *Resources*: [O.Alkal, B.Sanli, O.Albayrak], Veri Düzenleme / *Data Curation*: [O.Alkal, B.Sanli, O.Albayrak], Yazım - İlk Taslak Hazırlığı / *Writing - Original Draft Preparation*: [O.Alkal, B.Sanli, O.Albayrak], Yazım - Gözden Geçirme ve Düzenleme / *Writing - Review & Editing*: [O.Alkal, B.Sanli, O.Albayrak], Görselleştirme / *Visualization*: [O.Alkal, B.Sanli, O.Albayrak], Denetim / *Supervision*: [B.Sanli, O.Albayrak]

Çıkar Çatışmaları / Competing Interests

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırma Fonlaması / Research Funding

Bildirilmedi.

Veri Erişilebilirliği / Data Availability

Uygulanamaz.

Hakem Değerlendirmesi / Peer-review

Dış hakemler tarafından değerlendirildi.

Orcid

Onur Alkal <https://orcid.org/0009-0009-6950-0162>

Bengi Sanli <https://orcid.org/0000-0001-6805-2454>

Onder Albayrak <https://orcid.org/0000-0001-5918-3858>

Kaynaklar

- Bao, J., & Zhao, L. (2014). A review of steam Rankine cycle for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.027>
- Bertrand, A., et al. (2022). Waste heat-to-power with steam and organic Rankine cycles: Potentials and feed-in tariffs in the EU27+UK. *Energy Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.075>
- Elliott, T. C., Chen, K., & Swanekamp, R. (2012). *Standard handbook of powerplant engineering*. McGraw-Hill.
- Hedman, B. (2019). Waste heat recovery in Turkish cement industry: Review of existing installations and assessment of remaining potential. IFC / World Bank Group. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19396.48006>
- Hung, T. C., Shai, T. Y., & Wang, S. K. (1997). A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 22(7), 661–667.
- Imran, M., et al. (2015). Volumetric expanders for low grade heat and waste heat recovery applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.036>
- International Energy Agency. (n.d.). Low-carbon transition in the cement industry. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
- International Finance Corporation. (2022). Waste heat recovery in the Turkish cement industry. <https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/mgrt/waste-heat-recovery-in-turkish-cement-industry.pdf>
- Kehlhofer, R., Bachmann, R., Nielsen, H., & Warner, J. (2009). Combined-cycle gas & steam turbine power plants. PennWell Publishing.
- Lecompte, S., Huisseune, H., Van den Broek, M., & De Paepe, M. (2015). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 448–461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.089>
- Lemort, V., et al. (2013). Thermodynamic performance analysis of organic Rankine cycles. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.051>
- Liu, Z., et al. (2015). Waste heat recovery technologies for the cement industry: A review. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.042>
- Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042–2060. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>
- Miró, L., et al. (2016). Environmental assessment of waste heat recovery systems. *Applied Energy*.
- Mujumdar, K. S., & Ranade, V. V. (2006). Simulation of rotary cement kilns using a one-dimensional model. *Chemical Engineering Research and Design*, 84(A3), 165–177.
- Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., & Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.038>
- Tchanche, B. F., et al. (2011). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.015>
- TÜRKÇİMENTO. (2024). Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği ener-



- ji tüketimi ve atık ısı geri kazanımı istatistikleri. https://www.turkcimento.org.tr/tr/atik_isi_gerikazanimi
- Wang, X. Q., Li, X. P., Li, Y. R., & Wu, C. M. (2015). Payback period estimation and parameter optimization of subcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery. *Energy*, 88, 734–745.
- Wikimedia Commons. (n.d.). Rankine cycle layout [Diagram]. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Rankine_cycle_layout.png
- World Cement. (2024). Triple transformation in Turkey. <https://www.worldcement.com/special-reports/28102024/triple-transformation-in-turkey/>