

SINIRDA KARBON DÜZENLEME MEKANİZMASI POLİTİKASINA UYUM: TÜRK ÇİMENTO ENDÜSTRİSİ İÇİN KARBONSUZLAŞTIRMA VE VERİMLİLİK YOL HARİTALARI

Nima ALIZADEH, Prof. Dr. Sermin ONAYGIL

İTÜ ENERJİ ENSTİTÜSÜ, Ayazağa Kampüsü, Maslak, İstanbul

alizadeh20@itu.edu.tr, onaygil@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, Türk çimento sektörünün enerji yoğunluğu ve Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) gibi zorlukların ortasında sürdürülebilirliğini artırma yollarını araştırmaktadır. Temsili bir Türk çimento tesisinde gerçekleştirilen kapsamlı enerji etütleri ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmeleri aracılığıyla, enerji verimliliği iyileştirmeleri ve karbon ayak izi azaltımı için olası fırsatların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma, döner fırınlar gibi enerji yoğun sistemlerin optimize edilmesi, daha temiz alternatif yakıtların benimsenmesi, atık ısı geri kazanımının uygulanması ve ileri teknolojik iyileştirmelerin konuşlandırılması dahil olmak üzere somut stratejiler önermektedir. Bildiride, bu operasyonel iyileştirmeler yardımıyla uzun vadeli rekabet gücüne ulaşma, SKDM'ye uyum sağlama ve uluslararası iklim hedefleriyle enerji ihtiyacı arasındaki kritik bağlantının, ulusal girişimlerle desteklenerek gerçekleştirilebileceği vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çimento Endüstrisi, SKDM (Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması), Enerji Verimliliği, Karbonsuzlaştırma

ABSTRACT

This study explores ways to enhance the sustainability of the Turkish cement sector amid challenges such as energy intensity and the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). Through comprehensive energy audits and Life Cycle Assessments conducted in a representative Turkish cement plant, the study aims to identify potential opportunities for energy efficiency improvements and carbon footprint reduction. It proposes concrete strategies including the optimization of energy-intensive systems such as rotary kilns, the adoption of cleaner alternative fuels, the implementation of waste heat recovery, and the deployment of advanced technological upgrades. The paper emphasizes that, with the aid of these operational improvements, it is possible to achieve long-term competitiveness, comply with CBAM, and bridge the critical link between energy demand and international climate targets, supported by national initiatives.

Keywords: Cement Industry, CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), Energy Efficiency, Decarbonization

1. GİRİŞ

Çimento endüstrisi, küresel kalkınmanın temelini oluşturan altyapı ve inşaat faaliyetlerinin vazgeçilmez bir unsuru olmasına rağmen, aynı zamanda dünyanın en enerji ve karbon-yoğun sektörlerinden biridir. Küresel ölçekte, insan kaynaklı toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu olan bu sektör, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynamaktadır. Türkiye, 110 milyon tonu aşan yıllık üretim kapasitesiyle dünyanın en büyük çimento üreticileri ve ihracatçıları arasında yer almaktadır. Bu durum, ülkenin ekonomik büyümesi için önemli bir üstünlük sağlarken, diğer yandan ciddi çevresel sorumlulukları da beraberinde getirmektedir.

Uluslararası iklim politikaları, özellikle Paris Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı, enerji yoğun sektörler üzerindeki dönüşüm baskısını artırmıştır. Bu politikaların en somut yansımalarından biri olan **Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM)**, veya uluslararası adıyla Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), Türk çimento sektörü için yeni bir dönemin habercisidir. Bu mekanizma, AB'ye ithal edilen ürünlerin üretim süreçlerinde ortaya çıkan karbon emisyonlarına dayalı bir maliyet getirerek, karbon kaçakını önlemeyi ve küresel ölçekte emisyon azaltımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Karbon-yoğun üretimi nedeniyle Türk çimento sektörü, SKDM'nin getireceği ek maliyetlerden en çok etkilenen sektörlerin başında gelmektedir. Bu durum, sektörün uluslararası pazarlardaki rekabet gücünü koruyabilmesi için karbonsuzlaştırma ve enerji verimliliği stratejilerini acilen benimsemesini zorunlu kılmaktadır [1].

Bu çalışma, Türkiye'deki temsili bir çimento tesisinde gerçekleştirilen vaka analizi aracılığıyla, enerji verimliliği fırsatlarını ve karbon azaltım potansiyelini bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Kapsamlı enerji etütleri ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) gibi bilimsel yöntemler kullanılarak, tesisin mevcut durumu analiz edilmiş ve SKDM uyumu için stratejik bir yol haritası çizilmeye çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI: ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÇALIŞMALARI

Çimento üretiminin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik akademik çalışmalar son yıllarda artmıştır. Bu çalışmalar genellikle enerji verimliliği, alternatif yakıt ve hammadde kullanımı ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) üzerine yoğunlaşmaktadır. YDD, bir ürünün veya sürecin "beşikten kapıya" (cradle-to-gate) veya "beşikten mezara" (cradle-to-grave) tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini sistematik olarak değerlendiren bir yöntemdir.

Türkiye özelinde yapılan araştırmalardan biri olan Çankaya ve Pekey (2019) çalışmalarında, Türkiye'deki bir çimento üretim tesisinin "beşikten kapıya" yaklaşımıyla karşılaştırmalı bir YDD analizini gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, alternatif yakıt ve hammadde kullanımının toplam çevresel etkiyi yaklaşık %12 oranında azaltabileceğini ve özellikle insan sağlığı ve ekosistem kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri önemli ölçüde düşürebileceğini ortaya koymuştur [2], [3]. Benzer şekilde, Zhang vd. (2014), alternatif hammaddelerin kullanıldığı bir YDD tabanlı CO₂ hesaplama çerçevesi geliştirmişler ve bu çerçevenin, çimento ürünlerinin çevresel zararlarını anlamak ve üretim sürecini optimize etmek için etkili bir yöntem olduğunu açıklamışlardır [4].

Sektördeki maliyetleri ve emisyonları düşürmenin en doğrudan yolu "enerji verimliliği" uygulamalarıdır. Atmaca ve Yumrutaş (2014), bir döner fırının enerji tüketimini etkileyen parametreleri termodinamik olarak analiz etmiş ve refrakter tuğlaların kalitesi ile fırın içindeki anazat tabakasının oluşumunun ısı transferi ve enerji verimliliği üzerinde ne kadar önemli bir rol oynadığını göstermiştir [5]. Engin ve Arı (2005) tarafından yapılan bir başka vaka çalışmasında, kuru tip bir döner fırın sisteminde yapılan enerji denetimi, toplam girdi enerjisinin yaklaşık %40'ının sıcak baca gazı, klinker soğutucu ve fırın gövdesi yoluyla kaybedildiğini tespit etmiştir. Bu kayıpların geri kazanılması hem enerji tasarrufu hem de emisyon azaltımı için büyük bir potansiyel oluşturmaktadır [6].

Küresel ölçekte, Griffiths vd. (2023), çimento ve beton endüstrisinin karbonsuzlaştırılması için sosyo-teknik sistemler, teknolojik yenilikler ve politika seçenekleri arasındaki etkileşimi inceleyen sistematik bir derleme araştırması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma, karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojilerinin, alternatif bağlayıcıların ve verimlilik artışlarının 2050 net sıfır hedeflerine ulaşmada kritik rol oynayacağını vurgulamaktadır [7]. Ishak ve Hashim (2022) ise, daha temiz bir çimento üretimi için eko-inovasyon stratejilerini araştırmış ve çok amaçlı bir optimizasyon modeli kullanarak farklı azaltım teknolojilerinin toplam maliyet ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmalar, teknolojinin, politikanın ve ekonomik fizibilitenin entegre bir şekilde ele alınması gerektiğini göstermektedir [8].

Bu literatür taraması, çimento endüstrisinde sürdürülebilirlik sağlamanın çok yönlü bir yaklaşım gerektirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu bildiri, mevcut literatürdeki bu bulguları temel alarak, Türkiye'deki bir tesis

Sekil 1- Çimento Üretim Süreci ve YDD Sınırları

3.2. Araştırma Yöntemi

Bu çalışmada, vaka analizi olarak seçilen tesiste iki aşamalı bir çalışma yöntemi izlenmiştir:

- **Detaylı Enerji Etüdü:** Tesisin enerji tüketim profili çıkarılmış, Önemli Enerji Kullanıcıları (ÖEK) belirlenmiş ve her bir sistem için verimlilik analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda, kompresörler, pompalar, fanlar, motorlar ve özellikle döner fırın üzerinde yerinde ölçümler ve veri analizleri gerçekleştirilmiştir.
- **Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD):** Tesisin karbon ayak izini ve diğer çevresel etkilerini ölçmek için "kapıdan kapıya" (gate-to-gate) bir YDD analizi yapılmıştır. Analiz, çevresel etki değerlendirmesi için endüstri standardı olan Simapro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı yakıt senaryoları (mevcut kömür kullanımı, doğal gaz, hidrojen ve karışık yakıt) modellenerek, karbonsuzlaştırma potansiyeli nicel olarak ortaya konmuştur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasının çimento sektörüne olası etkileri tanımlanarak, üretim tesisinde gerçekleştirilen enerji etütleri sonuçlarına göre elde edilebilecek enerji tasarruf değerleri ana enerji tüketim kaynağı olan döner fırın ve diğer yardımcı tesisler bazında açıklanarak, farklı yakıt senaryoları için yapılan Yaşam Döngüsü Değerlendirme bulguları verilmiştir.

4.1. Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) ve Sektöre Etkileri

Avrupa Yeşil Mutabakatının bir parçası olan SKDM, AB'nin iddialı iklim hedeflerine ulaşırken, sanayisinin rekabet gücünü korumak için tasarlanmış bir politika aracıdır. Mekanizma, AB'ye ithal edilen çimento, demir-çelik, alüminyum, gübre ve elektrik gibi karbon-yoğun ürünlerin üretimi sırasında salınan "gömülü" karbon emisyonları için bir maliyet getirmektedir. İthalatçılar, ithal ettikleri ürünlerin karbon içeriğine karşılık gelen miktarda SKDM sertifikası satın almak zorunda kalacaklardır. Sertifika fiyatları, AB Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) içindeki karbon fiyatlarına endeksleneyecektir [9].

Türk çimento sektörü için bu durumun anlamı şudur: AB, Türkiye'nin en büyük çimento ihracat pazarlarından biridir. SKDM'nin tam olarak yürürlüğe girmesiyle birlikte, üretim süreçleri karbon-yoğun olan Türk üreticileri, AB'deki rakiplerine kıyasla önemli bir maliyet dezavantajıyla karşı karşıya kalacaktır. Bu, ihracat gelirlerinde düşüşe ve pazar payı kaybına yol açabilir. Dolayısıyla, üretim süreçlerini karbonsuzlaştırmak, artık sadece bir çevresel tercih değil, aynı zamanda ekonomik bir zorunluluk haline gelmiştir.

4.2. Enerji Verimliliği ve Tasarruf Potansiyeli

Tesiste gerçekleştirilen enerji etüdü, tesisteki yardımcı sistemlerde önemli verimlilik artışı potansiyeli olduğunu göstermiştir.

- **Elektrik Motorları:** Tesiste yaygın olarak kullanılan verimlilik sınıfı düşük (IE2) motorların, yüksek verimli IE4 sınıfı motorlarla değiştirilmesiyle önemli ölçüde elektrik enerjisi tasarrufu sağlanabileceği hesaplanmıştır. Bu proje için yapılan fizibilite çalışması, 4,1 yıllık bir geri ödeme süresi ve yıllık 48,147 kWh'lik bir enerji tasarrufu öngörmektedir.
- **Basınçlı Hava Sistemi:** Mevcut kompresörlerin Özgül Enerji Tüketimi (Specific Energy Consumption - SEC) değerlerinin yüksek olduğu (ortalama 8,5 kW/Nm³/dk) tespit edilmiştir. Değişken hızlı ve daha verimli yeni nesil kompresörlerle bu değer 6,5 kW/Nm³/dk'ya düşürülebileceği ve projenin geri ödeme süresinin ortalama 2,96 yıl olacağı hesaplanmıştır.
- **Pompa ve Soğutma Sistemleri:** Soğutma kulesi pompalarının ve kulesinin verimliliklerinin düşük olduğu (%30-40 aralığında) saptanmıştır. Bu sistemlerin yenilenmesiyle verimliliklerin %65-70 seviyelerine çıkarılabileceği ve önemli tasarruflar sağlanabileceği görülmüştür.

4.3. Döner Fırın Analizi: Enerji Kayıplarının Merkezi

Tesisin enerji tüketiminin ve karbon emisyonlarının ana kaynağı olan döner fırının ısı verimliliği, yapılan kütle ve enerji denklemleri sonucunda yaklaşık %57,1 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, %70-80 aralığındaki endüstriyel

iyi uygulama (benchmark) değerlerinin oldukça altındadır. Düşük verimliliğin temel nedenleri, toplam enerji girdisinin önemli bir kısmının baca gazları (%25), fırın gövdesinden ısınım (%8) ve klinker soğutucudan atılan sıcak hava (%5) yoluyla kaybedilmesidir. Bu kayıpların azaltılması, tesisin genel performansını iyileştirmek için en büyük potansiyeli taşımaktadır.

4.4. Karbon Ayak İzi ve Azaltım Senaryoları (YDD Sonuçları)

Farklı yakıt senaryoları altında yapılan ve döner fırın dahil tüm tesis sistemlerini kapsayan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) analizi, karbonsuzlaştırma stratejilerinin potansiyelini nicel olarak ortaya koymuştur. Ton çimento başına CO₂ emisyonları aşağıdaki gibi bulunmuştur:

- Mevcut Senaryo (Kömür): 2,008 ton CO₂
- Doğal Gaz Senaryosu: 0,816 ton CO₂ (%59 azalma)
- Hidrojen Senaryosu: 1,036 ton CO₂ (%48 azalma)
- Karışık Yakıt Senaryosu: 0,807 ton CO₂ (%60 azalma)

Bu sonuçlar, yakıt seçiminin karbon ayak izi üzerinde ne denli büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Doğal gaza geçiş veya kömür, doğal gaz ve hidrojen gibi farklı yakıt türlerinin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle oluşturulan optimize edilmiş bir yakıt karışımı, emisyonları yarıdan fazla azaltma potansiyeline sahiptir.

Analizde dikkate alınan hidrojen senaryosunun, şu anki teknolojiyle fosil yakıtlardan (doğal gaz) üretilen "Gri Hidrojen" olduğu belirtilmelidir. Bu nedenle, üretim sürecinden kaynaklanan emisyonlar nedeniyle karbon ayak izi doğal gazdan daha yüksek çıkmıştır. Ancak, gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarıyla sudan üretilen "yeşil hidrojen" teknolojilerinin yaygınlaşması, hidrojeni en temiz ve sürdürülebilir alternatif yapma potansiyelini korumaktadır.

Şüphesiz, bu alternatif senaryoların hayata geçirilmesi yalnızca çevresel etkilere değil, aynı zamanda kapsamlı ekonomik analizlere de bağlıdır. Her bir alternatifin yatırım maliyeti, işletme giderleri, geri ödeme süresi ve SKDM gibi mekanizmaların getireceği potansiyel maliyet avantajları gibi faktörler, hangi senaryonun hem çevresel hem de ekonomik açıdan en uygulanabilir olduğunu belirlemede kritik rol oynayacaktır. Bu nedenle, teknolojik ve çevresel değerlendirmelerin, detaylı bir ekonomik fizibilite çalışması ile desteklenmesi zorunludur.

5. SONUÇ ve POLİTİKA ÖNERİLERİ

Bu çalışma, Türk çimento endüstrisinin SKDM'nin getirdiği zorlukları bir fırsata çevirerek sürdürülebilir bir geleceğe sahip olabilmesi için bilimsel temellere dayanan örnek bir yol haritası sunmaktadır. Vaka analizi, sektördeki tesislerin önemli enerji verimliliği ve karbon azaltım potansiyellerine sahip olduğunu göstermektedir.

- **Teknolojik ve Operasyonel İyileştirmeler:** Kısa vadede, yüksek verimli motorlara ve modern basınçlı hava sistemlerine geçiş gibi projelerle hızlı kazanımlar elde edilebilir. Orta ve uzun vadede ise, en büyük potansiyeli barındıran döner fırın verimliliğine odaklanılmalıdır. Atık Isı Geri Kazanım (AIGK) sistemleri, fırın yalıtımının iyileştirilmesi ve yanma optimizasyonu gibi yatırımlar, sektörün karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmasında kilit rol oynayacaktır.
- **Stratejik Yakıt Dönüşümü:** Fosil yakıtlara, özellikle de kömüre olan bağımlılığın azaltılması kaçınılmazdır. Doğal gaz, biyokütle ve atıktan türetilmiş yakıtlar gibi alternatiflere geçiş, emisyonları önemli ölçüde azaltabilir. Hükümet ve sektör kuruluşları, bu dönüşümü hızlandıracak teşvik mekanizmaları ve altyapı yatırımlarını desteklemelidir.
- **Politika ve Strateji Entegrasyonu:** SKDM'ye uyum, üretim tesislerinin kendi çabalarının ötesinde, ulusal bir sanayi stratejisi gerektirmektedir. Türkiye, kendi karbon fiyatlandırma mekanizmalarını geliştirip Yeşil Mutabakat Eylem Planı'nı kararlılıkla uygulayarak bu süreci yönetebilir. Ar-Ge ve inovasyonun desteklenmesi, özellikle karbon yakalama ve yeşil hidrojen gibi yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve ulusal ölçekte sahiplenilmesi için kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, Türk çimento endüstrisi için karbonsuzlaştırma ve enerji verimliliği, artık sadece bir çevresel sorumluluk değil, aynı zamanda küresel pazarlarda varlığını sürdürebilmesi için stratejik bir zorunluluktur. Bu çalışma, bu zorlu ama kaçınılmaz dönüşüm sürecinde atılması gereken adımlara ışık tutmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] UNFCCC, “ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Paris Agreement,” 2015. Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [2] S. Çankaya and B. Pekey, “A comparative life cycle assessment for sustainable cement production in Turkey,” *J Environ Manage*, vol. 249, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109362.
- [3] S. Çankaya and B. Pekey, “Comparative Life Cycle Assessment of Clinker Production with Conventional and Alternative Fuels Usage in Turkey,” *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 9, no. 8, pp. 213–217, 2018, doi: 10.18178/ijesd.2018.9.8.1103.
- [4] J. Zhang, G. Liu, B. Chen, D. Song, J. Qi, and X. Liu, “Analysis of CO₂ Emission for the cement manufacturing with alternative raw materials: A LCA-based framework,” *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 2541–2545, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.041.
- [5] A. Atmaca and R. Yumrutaş, “Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry,” *Appl Therm Eng*, vol. 66, no. 1–2, pp. 435–444, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.038.
- [6] T. Engin and V. Ari, “Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems - A case study,” *Energy Convers Manag*, vol. 46, no. 4, pp. 551–562, 2005, doi: 10.1016/j.enconman.2004.04.007.
- [7] S. Griffiths *et al.*, “Decarbonizing the cement and concrete industry: A systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 180, no. April, p. 113291, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113291.
- [8] S. A. Ishak and H. Hashim, “Effect of mitigation technologies on the total cost and carbon dioxide emissions of a cement plant under multi-objective mixed linear programming optimisation,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 186, pp. 326–349, 2022, doi: 10.1016/j.cherd.2022.07.048.
- [9] European Union, “European Green Deal,” 2019. Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ POTANSİYELLERİ ve

ATIK ISI KAZANLARININ KULLANIMI

Alpaslan GÜVEN, Adem KÖSE, Serkan DEMİR

SERDEMİR MÜHENDİSLİK LTD. ŞTİ. Başiskele / KOCAELİ

alpaslan.guven@serdemirmuhendislik.com, adem.kose@serdemirmuhendislik.com, sekan.demir@serdemirmuhendislik.com

ÖZET

Bu çalışmada; Sanayi sektörlerinden; taş ve toprağa dayalı alt sektörlerde, demir çelik sektöründen sonra, ısı enerjisi ve elektrik enerjisi tüketimin en yoğun olduğu ikinci sektör olan Çimento Sektöründe, enerji verimliliği potansiyellerinin ve enerji verimliliğinin sürdürülebilir olmasının öneminin vurgulanması amaçlanmaktadır.

Çimento üretim prosesinin gereği olarak açığa çıkan yüksek sıcaklıktaki atık ısıların, geri kazanılması için kullanılan Atık Isı Geri Kazanım (AIGK-Waste Heat Recovery/WHR) sistemleri kullanılmaktadır. Türbin - jeneratör grupları ile, işletmenin toplam elektrik tüketimin yaklaşık %30 una kadar atık ısılar kullanılarak üretilebilmektedir. Atık Isı Geri Kazanım Kazanlarının kullanımı, enerji üretiminin sağlanmasıyla kalmaz. Bu kazanların kullanılmaması durumunda tüketilecek yakıt ile atmosfere salınacak karbon emisyonlarının da artmasına yol açacaktır. Ayrıca; Atık Isı Kazanların kullanılmaması veya verimliliklerinin düşmesi, Klinker üretim kapasitesinde de Yaklaşık %10 mertebesinde üretim düşüşüne yol açacaktır. Örnek hesaplama sonucu çevrimin verimi %26 olarak elde edilmiştir. Düşük çevrim oranı değerlendirildiğinde atık ısıdan daha yüksek verimle faydalanmanın yolları araştırılmalıdır.

Atık Isı Kazan Sistem kurulumunun sağlayacağı verimlilik artışı ve maddi kazançlar, sistem verimliliğinin etkin sürdürülmesine bağlıdır. Bu sebeple kazanlarda bakımsızlık nedeni ile oluşacak verim kayıplarının önemslenerek doğru bakım planlarının oluşturulmasının önemine dikkat çekilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimento Sektörü, Enerji Verimliliği, Atık Isı Kazanı, Kazan Verimliliği, WHR

ABSTRACT

This study aims to emphasize the importance of energy efficiency potentials and sustainability of energy efficiency in the Cement Sector, which is the second sector with the highest consumption of heat and electricity, after the iron and steel sector, in stone and soil-based sub-sectors of the industrial sectors.

Waste Heat Recovery systems are used to recover the high-temperature waste heat generated by the cement production process. By using turbine-generator groups, waste heat can be used to generate up to 30% of a company's total electricity consumption. The use of Waste Heat Recovery Boilers not only ensures energy production. Failure to use these boilers will also result in increased fuel consumption and carbon emissions into the atmosphere. Failure to use the boilers or their reduced efficiency will also lead to a reduction in clinker production capacity.

The increased efficiency and financial gains that a Waste Heat Boiler System installation will provide depend on the effective maintenance of system efficiency. For this reason, the importance of creating correct maintenance plans is emphasized, taking into account the efficiency losses that may occur due to neglect of boilers.

Key Words: Cement Industry, Energy Efficiency, Waste Heat Recovery Boiler, Boiler Efficiency, WHR

1. GİRİŞ

Yaşamın temel ihtiyaçlarından biri enerji gereksinimidir. Isınma ihtiyacı ile başlayan süreç teknolojinin işlevsel hale gelmesinde en önemli girdilerden biri haline gelmiştir. Enerji, herhangi bir endüstriyel sektörün varlığı ve büyümesi için temel birincil gereksinimlerden biridir. Genellikle, endüstriyel enerji tüketimi bir ülkenin ekonomik büyümesini doğrudan etkiler. Bu sebeple enerji tüketimi ve enerji verimliliği sürdürülebilir bir yaşam için son derece önemli unsurlardır.

Sanayi sektörlerinden; taş ve toprağa dayalı alt sektörlerde, demir çelik sektöründen sonra, ısı enerjisi ve elektrik enerjisi tüketimin en yoğun olduğu ikinci sektör olan Çimento Sektöründe, enerji verimliliği potansiyellerinin ve enerji verimliliğin sürdürülebilir olması işletme için son derece önemlidir.

Çimento sektöründe enerji verimliliği kapsamında literatür araştırmaları, Hammadde hazırlığı aşamasında, verimli hammadde taşıma sistemleri, verimli ayırıcıların kullanılması, homojenize karışım yöntemleri gibi, çimento üretimin ana prosesini oluşturan klinker üretim sürecinde, döner fırınların iyileştirilmesi, ön ısıtıcı üretim sistemlerinin kullanılması, verimli yakma sistemleri ve atık ısıdan güç üretimi gibi, çimento öğütme işlemi sürecinde çimento değirmenlerinin iyileştirilmesi, öğütme sisteminin iyileştirilmesi, proses kontrolü gibi ve basınçlı hava, taşıma sistemleri gibi yardımcı tesisler üzerinde çeşitli verimlilik artırıcı çalışmaların yapıldığını göstermiştir.

Yıllar içerisinde artan enerji maliyetleri üretim maliyetlerini etkileyen en önemli unsurlardan biri haline gelmiştir. Atık Isı Kazanlarının kullanımı sayesinde ele edilen elektrik enerjisi bu giderlerin optimizasyonu açısından büyük önem kazanmıştır. Diğer yandan İşletme elektrik tüketiminin yaklaşık %30'una varan geri kazanımın sürdürülebilir olması AIGK sistemlerinin işletilmesinin önemini ortaya koymuştur.

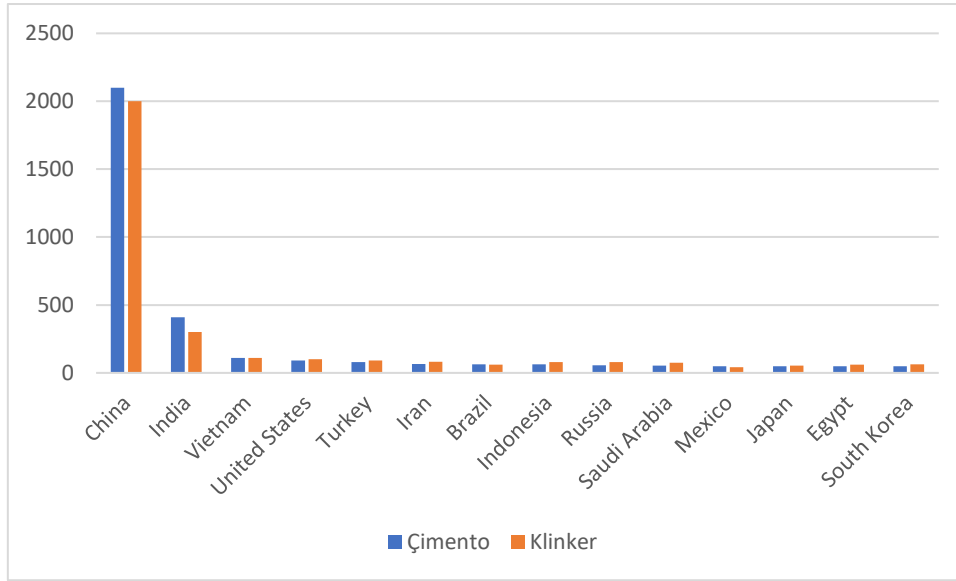
Atık Isı Kazan Sistem kurulumunun getireceği verimlilik artışı ve maddi kazançlar, sistem verimliliğinin etkin sürdürülmesine bağlıdır. Gerekli bakımların yapılmadığı sistemler verim kayıplarına uğramanın yanı sıra enerji ve üretim kayıplarına yol açmaktadır. Bu sebeple kazanlarda bakımsızlık nedeni ile oluşacak verim kayıplarının önemsenecek doğru bakım planlarının oluşturulması göz ardı edilmemelidir.

Bu çalışma kapsamında, çimento sektöründe bir atık ısı kazanı kullanılmasının, bu sektörde enerji verimliliğine katkısı araştırılacak ve sonuçları tartışılacaktır.

2. DÜNYADA ÇİMENTO SEKTÖRÜ

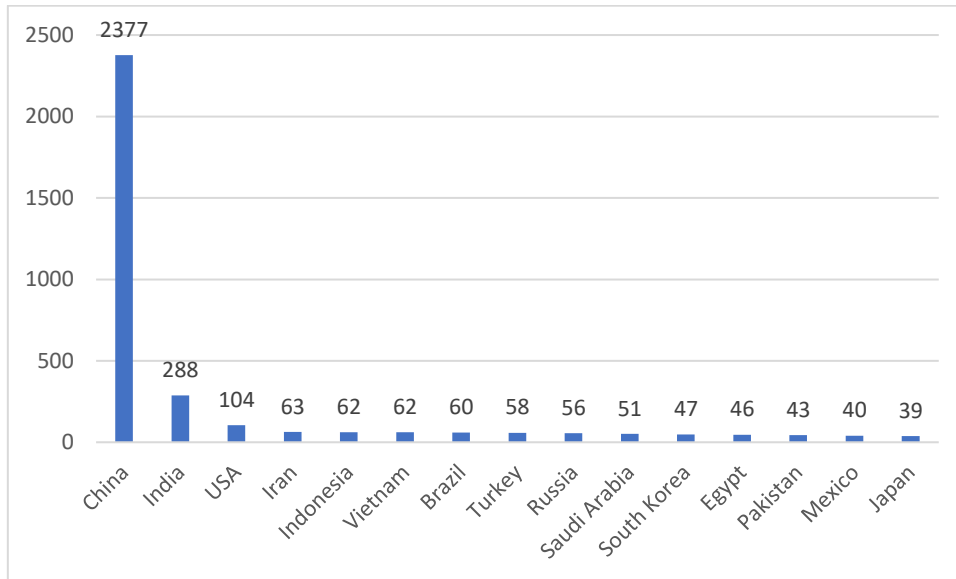
Dünyada, yapım işlerinin başlamasıyla birlikte bağlayıcı malzemeye ihtiyaç duyulmuştur. İlk zamanlarda kireç, harç gibi malzemeler kullanılırken, 1824 yılında Joseph ASPIDIN Çimentonun patentini alarak 19. yüzyılın başından itibaren dünyada çimento kullanılmaya başlanmıştır [2,3].

Çimento endüstrisi, önemli miktarda enerji kullanan enerji yoğun endüstrilerden biridir. Dünya pazarına bakıldığında, 2023 yılında çimento üretimi 4,1 milyar ton olarak gerçekleşmiştir. Dünya çimento üretiminde ilk beş ülke sırasıyla; Çin, Hindistan, Vietnam, ABD ve Türkiye'dir [2,3].



Şekil 1. 2023 yılı Dünya Çimento Üretimi (Milyon ton) (<https://worldpopulationreview.com/country-rankings/cement-production-by-country>)

2011 yılında dünya çimento tüketimi 3,59 milyar ton iken, 2012 yılında 3,75 milyar tona yükselmiştir; büyüme oranının %4,3 olduğu tahmin edilmektedir. 2013'ten 2015'e kadar küresel çimento tüketiminde sürekli bir büyüme görülmüştür. Ayrıca, 2016-2022 yılları arasında dünya çimento tüketiminin, Asya'daki gelişmekte olan ekonomilerdeki talep nedeniyle 4,8 milyar tondan 6 milyar tona ulaşması öngörülmüştür[7].



Şekil 2. 2020 yılı Dünya Çimento Tüketimi (milyon ton)
(<https://www.cemnet.com/Articles/story/171972/uncertain-times.html>)

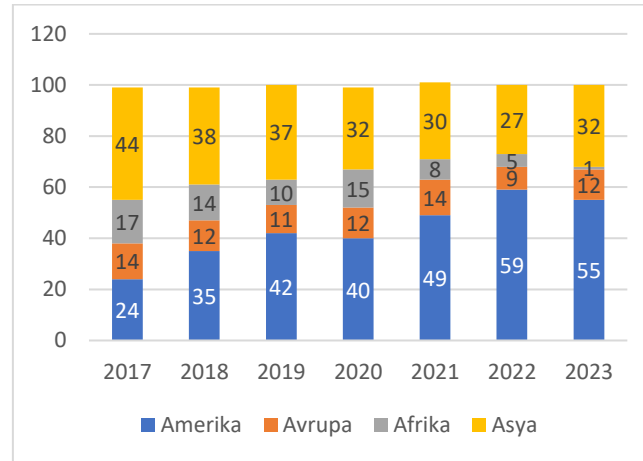
Çin ve Hindistan, dünya çimentosunun sırasıyla %59'unu ve %7'sini tüketmiştir. Önemli tüketici olan diğer ülkeler arasında Brezilya, Türkiye ve Rusya bulunmaktadır. Şekil 2, 2020 yılında en çok çimento tüketen ülkeleri göstermektedir. Hindistan ve Çin, dünya çimento tüketiminde yine lider konumdadır ve dünya çimentosunun yaklaşık üçte ikisini tükettiği görülmektedir. Çin ve Hindistan'daki çimento tüketiminin ana nedeni hızlı kentleşme olarak değerlendirilmektedir[7].

3. ÜLKEMİZDE ÇİMENTO SEKTÖRÜ

Türk çimento sektörü ise 1911 yılında 20.000 ton/yıl kapasiteli bir fırınla Darıca’da üretime başlamıştır. Daha sonra bu fabrika 1923 yılında tevsi edilerek kapasitesi 40.000 ton/yıla yükseltilmiştir. 1950’li yıllara kadar Ankara, İstanbul (Zeytinburnu ve Kartal) ve Sivas’ta 4 yeni fabrika kurulmuş ve toplam kapasite 370.000 ton/yıla ulaşmıştır. 1950’den sonra Türkiye Çimento Sanayisi T.A.Ş.’nin (ÇİSAN) kurulmasıyla üretim artışı sağlanmasına rağmen 1970’lere dek talebin yeterli derecede karşılanamaması nedeniyle çimento ithalatı devam etmiştir [2,3].

Günümüzde; Ülkemizde sektör, hammadde konusunda tamamen kendi kaynaklarını kullanmakta olup, üretimiyle ülke ihtiyacını karşılayabilmekte ve dünyanın 150’den fazla ülkesine ihracat yapmaktadır. 2023 yılında çimento üretimi 81,5 milyon ton olarak gerçekleşmiş ve sektörün kapasite kullanım oranı klinker bazında %79,8, çimento bazında %58,32 olarak hesaplanmıştır [2,3].

Çimento ihracatında ağırlık özellikle A.B.D. ve Haiti’nin etkisiyle Amerika kıtası olurken, ikinci önemli pazar İsrail ve Suriye etkisi ile birlikte Orta Doğu yani Asya pazarı olmuştur. Klinker ihracatında ağırlık, son yıllarda talebin arttığı Avrupa ülkeleri olmuştur. En çok klinker ihracatı İspanya, Belçika ve İtalya’ya yapılmıştır. Klinker ihracatının %52’si Avrupa’ya yapılırken, diğer bölgelerin pazar payları yaklaşık aynıdır. 2023 yılında çimento ihracatının % 55’i Amerika, %32’si Asya, %1’i Afrika ve %12’si Avrupa ülkelerine gerçekleştirilmiştir [1].



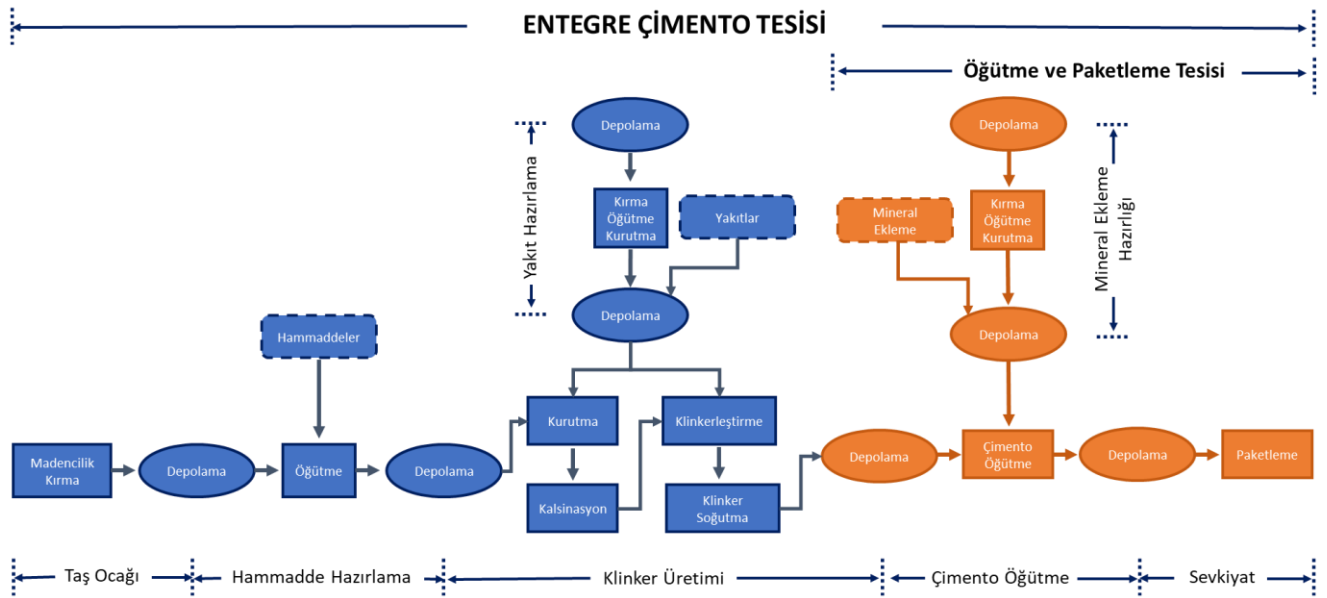
Şekil 3. Türkiye Çimento İhracatı Kıta Dağılımı (%) [1]

4. ÇİMENTO ÜRETİM PROSESİ

Bir entegre çimento üretim akışı; Hammadde Hazırlama, Farin Öğütme, Pişirme, Çimento Üretimi ve Paketleme olmak üzere beş ana kısımdan oluşmaktadır. Çimento üretiminde temel olarak dört üretim yöntemi vardır: kuru, yarı kuru, yarı ıslak ve ıslak [75].

Günümüzde çoğu çimento endüstrisi, ham maddeden gelen nemin kurutulması yüksek ısı enerjisi tükettiğinden, ıslak yöntem yerine kuru yöntemi tercih etmektedir. Ancak, çimento üretiminin kuru ve ıslak yöntemleri için temel süreç aynı kalmaktadır. Çimento üretiminin ilk adımı taş ocağı işletmesidir. Taş ocağı işletmesinden sonraki adım, birincil kırıcının kaya dağlarını maksimum 15 cm (6 inç) boyuta kadar kırdığı kırma işlemidir. Ardından, kayaları 7,5 cm (3 inç) veya daha küçük boyutlara indirmek için ikincil bir kırıcı veya çekiçli değirmen kullanılır. Daha sonra, bir bilyalı değirmen ile ince toz elde edilir. Boksit, demir cevheri ve kil gibi birçok başka malzeme de bilyalı değirmenin öğütme işlemi sırasında eklenir. Son olarak, ıslak bir işlem ise bilyalı değirmene su eklenerek bulamaç elde edilir ve bu bulamaç döner fırın sistemine beslenir. Ancak kuru bir işlemde, bilyalı değirmenden elde edilen toz, öğütme

aşamasında eklenen diğer bileşenlerle düzgün ve uygun bir şekilde karışması için karıştırma silolarına gönderilir. Bu öğütülmüş toz ön ısıtıcı kulesine beslenir. Ön ısıtıcı kulesi, birbiri üzerine yerleştirilmiş birkaç siklondan oluşur. Malzeme siklonun üstünden altına düşerken, sıcak gazlar aşağıdan yukarıya doğru giderek malzemeyi ısıtır. Kalsinasyon, ön ısıtıcı kulesinde 900 °C sıcaklık aralığında yapılan önemli bir çimento üretim işlemidir. Kalsinasyonda, kalsiyum karbonat (CaCO_3), çok miktarda karbondioksit (CO_2) gazı açığa çıkarılarak kalsiyum okside (CaO) dönüştürülür. Daha sonra kalsine edilmiş malzeme döner fırına beslenir ve alt uca bir brülör yerleştirilir. Bu brülör, çıkış uçlarında 1400°C–1500°C sıcaklık aralığı üretmek için doğal gaz/kömür/petrol gibi yakıtlar tüketir. Reaksiyonların çoğu, malzeme fırının üst ucundan alt ucuna hareket ettiğinde ve sonunda klinker üretildiğinde meydana gelir. Fırından çıkan klinkerin sıcaklığı çok yüksektir, bu nedenle sıcaklığının düşürülmesi gerekir. Genellikle klinkerin sıcaklığını düşürmek için soğutucular kullanılır. Daha sonra soğutulan klinker, klinker sahasına/depolama silosuna aktarılır. Klinker sahasından/depolama silosundan öğütme işlemi için alınır; bu işlem bir bilyalı değirmende veya dikey değirmen/silindirli presle yapılabilir. Öğütme değirmeninden elde edilen çimento tozu daha sonra paketlenmek ve sevk edilmek üzere paketleme tesisine götürülür [9,28,53]. Çimento üretimi akışı şematik olarak Şekil 4'te belirtilmiştir.



Şekil 4. Entegre Çimento Tesisi Üretim Şeması [4]

5. ÇİMENTO ÜRETİMİ VE ENERJİ TÜKETİMİ

Uluslararası Enerji Görünümüne (2016) göre, Dünya genelindeki tüm endüstriyel sektörlerin enerji tüketimi yılda ortalama %1,2 oranında artmaktadır. Dünya endüstriyel sektör enerji tüketiminin 2040 yılında yaklaşık 90 milyon GW' a ulaşmasının beklendiğini belirtmektedir[7].

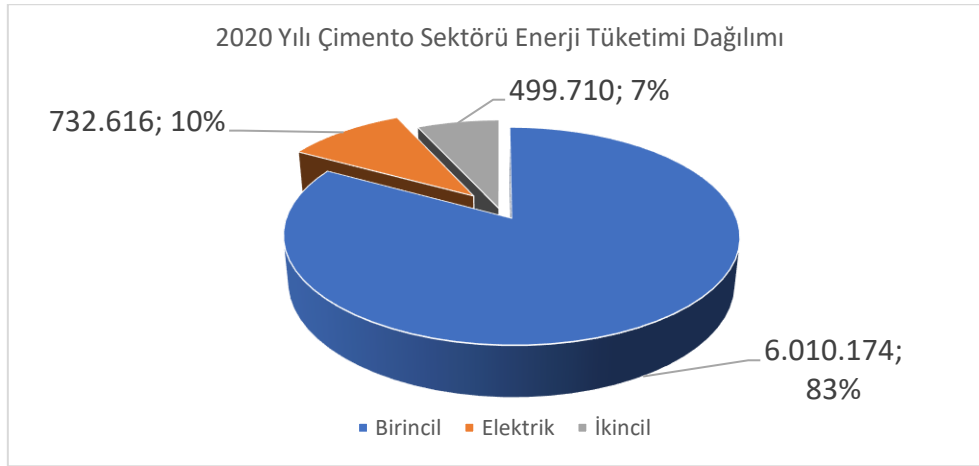
Çimento sektörü, sanayi sektöründe demir-çelik sektörünün ardından en fazla enerji tüketiminin gerçekleştiği alt sektördür. Malezya'daki çimento endüstrilerinin ülkenin toplam enerjisinin yaklaşık %12'sini tükettiğini, bu değerin İran'da %15 olduğunu belirtilmiştir [14]. Bu nedenle çimento sanayinde enerji tüketimini ve emisyon düzeyini azaltmak için ulusal ve uluslararası düzeyde çalışmalar yürütülmektedir. [33,36,71,21,79,77].

Çimento endüstrisinde, toplam enerji tüketimi toplam üretim maliyetinin %50-60'ını oluştururken, termal enerji %20-25'ini oluşturmaktadır [78,72]. Modern çimento endüstrisi, bir ton çimento üretmek

için 110-120 kWh elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır [58]. Termal enerji esas olarak yakma işlemi sırasında, elektrik enerjisi ise çimento öğütme işlemi sırasında kullanılır [58]. Türk Çimento Müstahsilleri Birliği’den alınan bilgilere göre, 2019 yılında sektör elektrik tüketimi yaklaşık 6,5 milyar kWh’tir.

2020 Yılı Çimento Sektörü Kıyaslama (Benchmarking) Raporu kapsamında ülkemizdeki entegre tesislerin tamamını temsil eden toplam 55 adet tesis ve ayrıca 12 adet çimento öğütme tesisi değerlendirilmiştir. Kıyaslama çalışmasında yer alan tüm tesislerin toplam nihai enerji tüketimi 7,24 milyon tep olup bu tüketimin yaklaşık %99,8’i entegre tesislerine aittir. 2020 yılında, bir önceki yıla göre ithal kömür, yerli taş kömürü ve doğal gaz tüketiminde artış, yerli linyit ve LPG’de ise azalma görülmüştür. İthal kömür tüketimi %63,5 artarak 4.140.417 tona, yerli taş kömürü tüketimi %49,2 artarak 60.489 tona ve doğal gaz tüketimi %44,3 artarak 15.712.650 Sm3 değerine ulaşmıştır. Yerli linyit tüketimi %44,2 azalarak 395.416 tona ve LPG tüketimi ise %33,2 azalışla 197 tona gerilemiştir. Ayrıca, ikincil (atık) yakıt kullanımında geçtiğimiz yıla kıyasla %1,7’lik mütevazı bir düşüş meydana gelmiş ve yaklaşık %7,7 değerine gerilemiştir. [4]

Toplam Enerji Tüketimi = 7.242.501 tep



Şekil 5. 2020 yılı Türkiye Çimento Sektörü Enerji Tüketim Dağılımı [4]

Enerji tüketiminin yaklaşık %80’i klinker fırınlarında gerçekleşmektedir. Sektörde son beş yılda ısı geri kazanım projeleri ile atık ısıdan elektrik enerjisi üretiminde %28,8’lik artış sağlanmasına rağmen, entegre ve öğütme tesislerinin özgül enerji tüketiminde bir yükseliş eğilimi gözlenmiş ve 2020 yılı özgül enerji tüketimi Türkiye ortalaması entegre tesisleri için 0,098 tep/ton-çimento ve öğütme/paketleme tesisleri için 0,004 tep/ton-çimento olarak gerçekleşmiştir. [4]

6. ENERJİ VERİMLİLİĞİ POTANSİYELLERİ

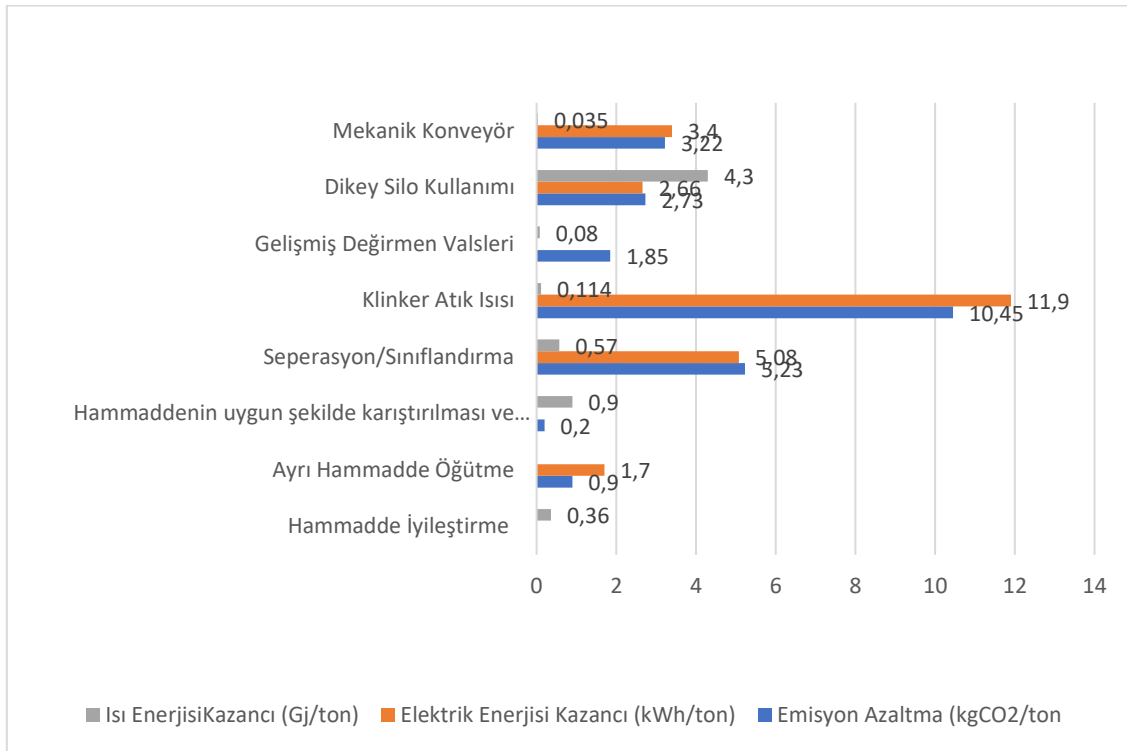
Çimento üretimi önemli miktarda enerji gerektirmektedir. Bu nedenle, enerji verimliliği ve emisyon azaltımı açısından hammadde hazırlığından paketlemeye varana kadar çeşitli potansiyeller barındırmaktadır. Bu potansiyelleri gruplandırarak olursak

6.1. Hammadde Hazırlığı Aşamasında Enerji Verimliliği Potansiyelleri

Kuru üretim koşullarında,

- 6.1.1. **Verimli ham madde taşıma sistemleri:** Fırın tozunu veya nihai çimento tozunu yada fırın sistemine hammadde besleyen konveyörlerde pnömatik tip yerine kullanılacak mekanik tip konveyör daha az enerji tüketecektir[7].

- 6.1.2. **Verimli karıştırma sistemleri:** Verimli bir yanma için hammaddeler döner fırına beslenmeden önce iyice karıştırılmalıdır. Homojenize edilmiş bir hammadde aynı zamanda kaliteli çimento üretimi sağlayacaktır. Hammaddelerin karıştırılmasında dikey tipi silolar veya hava akışkanlı silolar kullanılır. Dikey tip silolar, hava akışkanlı silolara kıyasla daha az enerji tüketir[7].
- 6.1.3. **Gelişmiş silindirli değirmenlerin kullanımı:** Hammaddeler ve kömür, geleneksel bilyalı değirmenler yerine, yatay, yüksek basınçlı ve yüksek verimli silindirli değirmenler gibi gelişmiş değirmenlerde öğütülürse daha az elektrik tüketimi sağlanabilecektir[7].
- 6.1.4. **Verimli ayırıcıların/sınıflandırıcıların uyarlanması:** Çimento fabrikalarında yüksek verimli sınıflandırıcılar (elekler) kullanılarak yaklaşık %8 elektrik enerjisi tasarrufu sağlanabilir [43,70].
- 6.1.5. **Homojenize Karışım:** Özellikle ıslak üretim proseslerinde, karıştırma için kullanılan basınçlı havanın etkinliği oldukça düşüktür, etkili bir karıştırma sistemi ile verimlilik artarken basınçlı hava optimizasyonu sayesinde CO2 salımları da azalacaktır[64].



Şekil 6. Hammadde hazırlamada enerji tasarrufu ve emisyon azaltım potansiyelleri [7]

6.2. Klinker Üretim Sürecinde Enerji Verimliliği Potansiyelleri

Çimento fabrikalarında, klinker üretim prosesinin enerji açısından daha verimli hale getirilmesi için aşağıda sıralanmış potansiyeller değerlendirilebilir.

6.2.1. Fırın Refrakter Malzemesinin İyileştirilmesi:

Fırının yanma bölgesinden gelen büyük miktarda ısı, fırının yüzeyinden atmosfere yayılır. Uygun refrakter malzeme seçimi, hammadde türü, çalışma koşulları ve kullanılan yakıt türü gibi parametrelere bağlı seçilecek uygun refrakter malzeme ile bu kayıplar en aza indirilebilmektedir[7].

6.2.2. Klinker üretim sürecinde soğutma sisteminin iyileştirilmesi:

Klinkeri soğutmak için; planet tipi, döner, uydu tipi, şaft tipi, alternatif hareketli ızgaralı soğutucu vb. gibi çeşitli tipte soğutucular kullanılır. Geleneksel olarak uydu tipi soğutucular çimento fabrikalarında kullanılmaktadır, ancak günümüzde daha yüksek verimlilikleri ve daha düşük yakıt tüketimleri nedeniyle hareketli ızgaralı soğutucular tercih edilmektedir[7].

6.2.3. Uzun kuru fırın sisteminin ön ısıtıcı/ön kalsinatörlü fırın sistemiyle değiştirilmesi:

Ön ısıtıcı/ön kalsinatör, hammaddeyi döner fırına girmeden önce ısıtmak için kullanılır; bu, CO₂ emisyonunu azaltır ve termal verimini artırır. Aspen Plus proses simülatörü kullanılarak yapılan çalışmada, önceden ısıtılmış döner fırının enerji verimliliğinin %61,30'a kadar artırılabilceğini bulunmuştur[62].

6.2.4. Çok kademeli ön ısıtıcılı üretim sistemi kullanma

Isı kaybı ve enerji verimliliği, tek veya iki kademeli bir sistem yerine çok kademeli bir ön ısıtıcı ve ön kalsinatör (dört veya beş kademeli) takılarak iyileştirilebilir. Geliştirilmiş bir klinker üretim sisteminin özellikleri arasında basınç düşüşünde azalma, fan gücünde azalma ve ısıyı geri kazanmada daha fazla yeterlilik yer almaktadır[7].

6.2.5. Fırın yanma sisteminin iyileştirilmesi:

Fırının verimliliği dolaylı ateşleme, alternatif yakıt kullanımı ve fosil yakıtın biyokütle, atık yakıtlar vb. gibi başka yakıtlarla kısmen değiştirilmesiyle artırılabilir. Farklı yakıt karışımları ve bunların ekin yakılması ile enerji verimliliği artırılabilirdi, yanma teknolojisindeki gelişmeler üzerinde çalışılmaktadır[55].

6.2.6. Klinker üretimi için fırın tahrikinin iyileştirilmesi:

Bir tahrik sistemi fırını döndürür ve önemli miktarda enerji kullanır. Farklı tipteki fırın tahrik sistemlerini incelenmiş ve tek pinyonlu fırın tahrik sisteminin en verimli sistem olduğu değerlendirilmiştir[66].

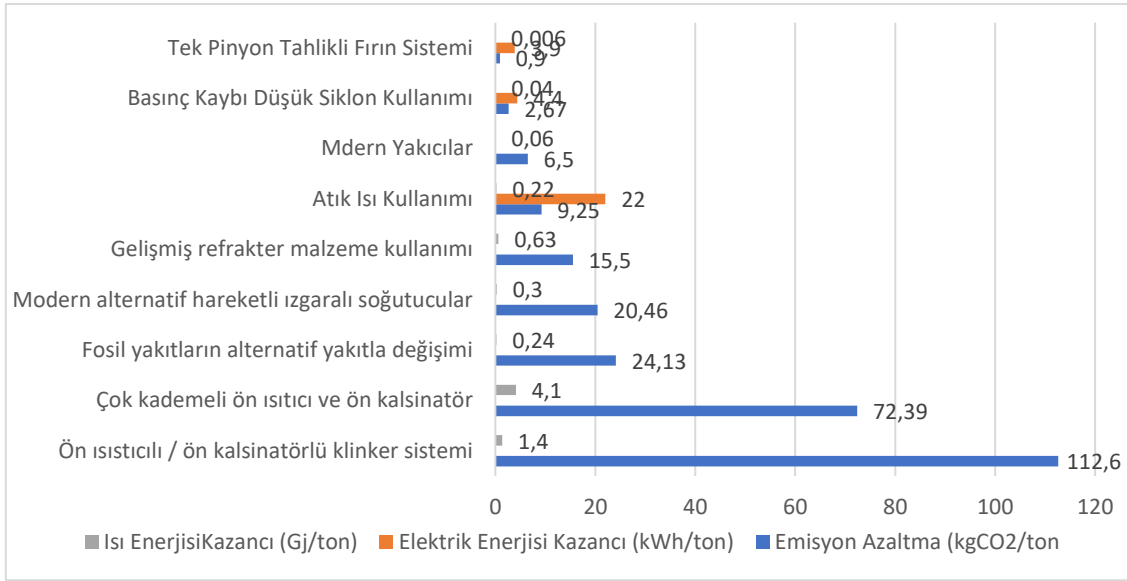
6.2.7. Düşük basınç kaybı olan siklonların kullanımı:

Siklonlar, ön ısıtma sisteminin en temel elemanlarıdır. Fan sisteminin elektrik tüketimi, eski siklonların düşük basınç kayıplı siklonlarla değiştirilmesiyle azaltılabilir[7].

6.2.8. Atık ısıdan güç üretimi:

Döner fırın ve klinker soğutma sisteminden atılan yüksek sıcaklıktaki baca gazları hammadde kurutma ve enerji üretimi için kullanılabilir; bu, sırasıyla 0,21–0,22 GJ/t ve 17,84–22 kWh/t termal ve elektrik enerjisi tasarrufu ve 3,68–9,25 kgCO₂/t'ye kadar emisyon azaltımı ile sonuçlanır[79,10,65]. Çimento döner fırınından çıkan atık ısı, fosfojipsin (klinker hammadde olarak, çimento ve kireç ile birlikte ikincil bağlayıcı olarak, yapay agrega üretiminde kullanılmaktadır) kalsine edilmesinde kullanılabilir, bu yaklaşım, fosfojipsin işlenmesi için fosil yakıt tasarrufu sağlamıştır[60]. Çimento üretiminin enerji verimliliği, fırın kabuğu yüzeyinden geri kazanılan ısı ile artırılabilir. Kızılötesi termografi, fırın kabuğu sıcaklığını ve fırın kabuğundan kaybedilen ısıyı izleyen bir teknolojidir. Bu yaklaşım, döner fırına giren enerjinin %12'sini kurtarabilir[80].

Şekil 7. çeşitli yaklaşımlarla klinker üretim sürecinde sağlanan enerji tasarrufu ve emisyon azaltım değerleri sunulmaktadır (16,26,29,49,55,59,63,68,72,76). Çok kademeli ön ısıtıcı ve ön kalsinatör sistemi ile döner fırın sisteminden geri kazanılan atık ısı sayesinde maksimum termal ve elektrik enerjisi tasarrufu mümkün olabilir[7].



Şekil 7. Klinker üretim sürecinde enerji verimliliği ve emisyon azaltma potansiyelleri [7]

6.3. Çimento öğütme işlemi için enerji verimliliği potansiyelleri

Öğütme işlemi, bir çimento üretim tesisinde tüketilen toplam elektriğin %70'ini tüketir[15]. Bu nedenle, öğütme işleminin yönteminin optimize edilmesi bir öğütme işlemi, daha az enerji tüketimiyle enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir.

6.3.1. Çimento değirmenlerinin iyileştirilmesi

Geleneksel çimento fabrikalarında öğütme işlemi için bilyalı değirmenler kullanılırdı. Günümüzde bilyalı değirmenlerin yerini dikey tip silindirli değirmenler veya yüksek basınçlı öğütme silindirleri almaktadır. Dikey milli değirmenlerin bilyalı değirmenlere göre avantajları arasında %20 daha az ısı enerjisi tüketimi, %20'ye kadar nem içeren malzemelerin öğütülmesi ve daha düşük işletme maliyeti yer almaktadır[7]. Yüksek basınçlı öğütme silindirlerinin kullanımıyla %30 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceğini tahmin edilmiş[80] ve %10-15'e varan bir enerji tasarrufu sağlandığını belgelemiştir[63].

6.3.2. Öğütme ortamının ve devresinin iyileştirilmesi

Öğütme ortamı ve devrelerinin seçimi esas olarak malzemenin sertliğine bağlıdır. Bilyaların yüzey sertliğini artırarak ve öğütme ortamını şarj ederek enerji tüketimi azaltılabilir. Çimento tozunun kalitesi ve enerji verimliliği, çimento öğütme devresinin akım şeması değiştirilerek artırılabilir. Sınıflandırıcı beslemesi için başlangıçta tasarlanan değirmen filtre akışı, nihai ürün silosuna gönderildiğinde üretim oranı %4,45 oranında iyileşmiştir. Bu, %4,26 oranında bir enerji tasarrufu anlamına gelmektedir[11]. Bilyalı değirmen sistemine yüksek verimli sınıflandırıcılar/ayırıcılar eklenerek ürün kalitesinde iyileştirme, yakıt tüketiminde azalma ve homojen çimento parçacıkları elde edilebilir.

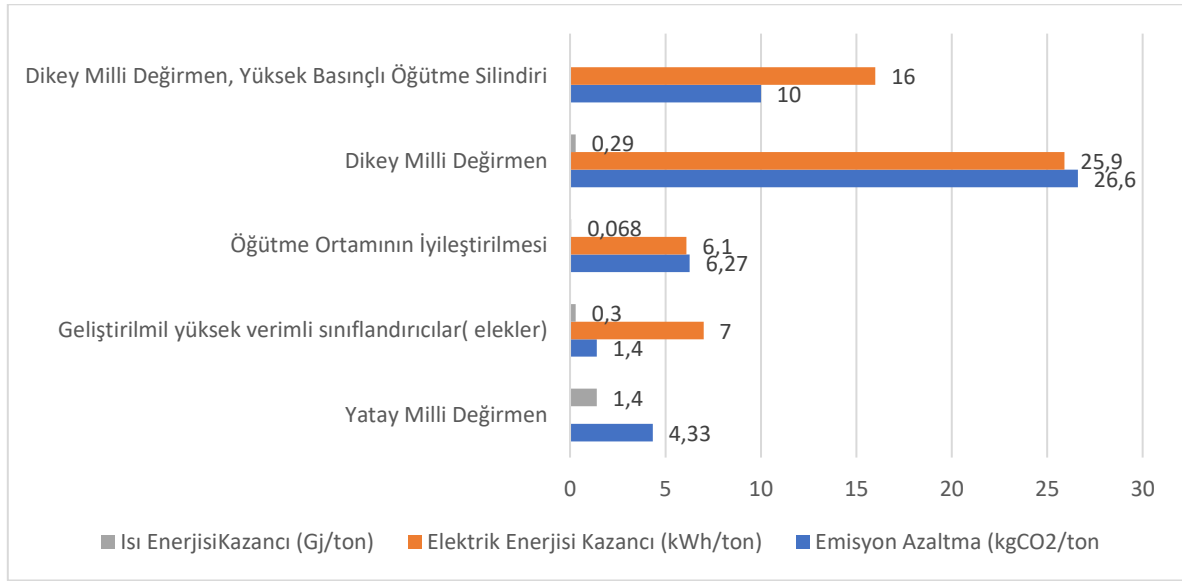
6.3.3. Geliştirilmiş proses kontrol sistemi

Çimento endüstrisinde, kontrol sistemi malzeme akışını düzenler. İyileştirilmiş bir proses kontrol sistemi, tüketilen toplam enerjinin %2,5-10'unu kurtarabilir[73,36]. İyileştirilmiş bir proses kontrol sisteminin uyarlanmasıyla enerji tüketiminde %2'lik bir azalma olduğunu belgelenmiştir [13].

6.3.4. Öğütme yardımcısında iyileştirme

Polimer bazlı yenilikçi öğütme yardımcıları, öğütme performansını %30-%32 oranında artırabilirken enerji kullanımını %7-%9 oranında azaltabilir[30]. Öğütülmüş çimentonun performansını artıran bir diğer öğütme yardımcısı ise Polikarboksilat bazlı öğütme yardımcısıdır. Bu yardımcılar, öğütme verimliliğinin yanı sıra çimento tozunun mekanik özelliklerini de iyileştirir[41].

Şekil 8, çimento öğütme işleminde çeşitli yöntemler kullanılarak sağlanan enerji verimliliği potansiyellerini ve emisyon azaltımını göstermektedir. Dikey haddeleme değirmenleri ve yüksek basınçlı öğütme silindirleri, öğütme işleminde elektrik enerjisini ve emisyon azaltımını önemli ölçüde azaltan yöntemler olarak görülmektedir.



Şekil 8. Çimento üretim sürecinde enerji verimliliği ve emisyon azaltım potansiyelleri [7]

6.4. Yardımcı Tesisler

Çimento fabrikalarının enerji verimliliğinin artırılmasına, çimento üretimine destek olan proseslerin iyileştirilmesiyle de destek olunabilir.

6.4.1. Verimli Aydınlatma Sistemleri

Çimento fabrikalarında aydınlatma sistemi toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %1,5'ini tüketmektedir. Bu sebeple; verimli aydınlatma armatür ve lambaların kullanılması, balast kayıplarının en aza indirgenmesi, hareket sensörleri ile birlikte gün ışığı kullanımının önceliklendirildiği sistemler enerji verimliliğini artırıcı önlemler olarak sıralanabilir.

6.4.2. Basınçlı Hava Sistemleri

Basınçlı hava sistemleri işletme maliyeti en yüksek akışlardan birine sahiptir. Maliyetin büyük bölümünü ise hava kaçakları oluşturmaktadır. Havadan alınıp sıkıştırmak için enerji harcadığımız bu akışkan kaçaklar sebebi ile havaya atılırken arkasında büyük bir maliyet bırakmaktadır. Düzenli bakım yapılmayan tesislerde %20-50 arasında bir sızıntı oranı görülebilir ve bu oran düzenli bakımla %10'a kadar düşürülebilir[64,65]. Ayrıca, basınçlı hava sistemlerinin düzenli bakımıyla enerji tüketiminin %20 oranında azaltılabileceği belgelenmiştir[28,20]. Eklenen her ilave hat ile birlikte sistem direnci değişmektedir. Bu direnci karşılamak için kompresörün çalışma basıncı artırılmaktadır. Doğru boru boyutları, sızıntı kayıpları önlenmesi ile %3 enerji tasarrufu sağlayabilir[20].

6.4.3. Yüksek verimli fan, elektrik motorları ve sürücüler

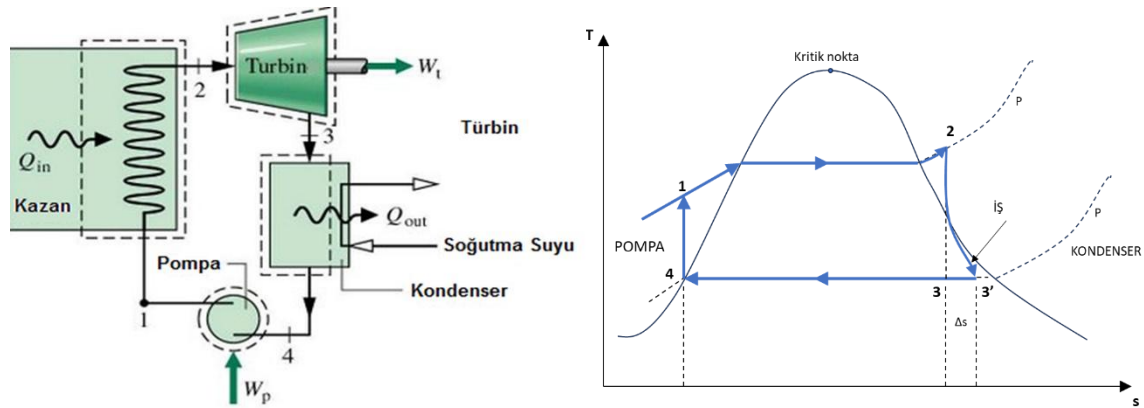
Motorlar; fanların tahrik edilmesi, fırınların döndürülmesi veya konveyörler yardımıyla ürün taşınmasında kullanılmaktadır. İşletmede farklı güce sahip 700'e yakın elektrik motoru bulunabilir. Yüksek verimli motorların kullanılması ile tüketilen toplam enerjini %3-8'i kadarı azaltılabilir[83,42,64]. Ayrıca değişken hız sürücüleri ile tahrik edilen sistemlerde ihtiyaca uygun güç tüketimi ile sistem verimliliği artırılabilir.

7. ATIK ISI GERİ KAZANIM SİSTEMLERİ

Atık Isı Geri Kazanım sistemleri (AIGK) endüstriyel tesislerde proseslerden açığa çıkan atık ısının geri kazanılarak, besleme akışkanına (hava veya ham maddeye) ön ısıtma veya ön soğutma, başka amaçlar için ısıtma, soğutma (absorbsiyonlu), güç üretimi (Klasik veya organik Rankine çevrimleriyle) amaçları için kullanan sistemlerdir. Bu sistemler; özellikle enerji yoğun endüstrilerde, örneğin çimento fabrikalarında, oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Atık ısı geri kazanımı kullanımının uygulamalarından birisi de, üretim prosesleri sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıktaki gazların enerjisini kullanarak yüksek basınç ve sıcaklıkta buhar üretmek ve bu buhar yardımıyla elektrik üretmektir. Sistem tasarımı ve kurulumu Rankine çevrimi prensibine dayanmaktadır.

Rankine çevrimi katı yakıt kullanan enerji santralleri ve atık ısı destekli güç üretimi için ideal çevrimdir. Bu çevrimde yapılan suyun buharlaştırılarak kızgın buhar haline getirilmesi, buhar türbininde genişletilerek iş üretildikten sonra kondensere sevk edilerek düşük basınç ve sıcaklıkta doymuş sıvı haline getirilmektedir. Çimento sektöründe de atık ısı yardımıyla buhar üretilen Rankine Çevrimine göre çalışan sistem Şekil 9 da verilmiştir.



Şekil 9. Rankin Çevrimi ve T-s Diyagramı

Sistemin Ana Bileşenleri; atık gazlardan ısı transferi sağlayan Isı Değiştiriciler, buhar üretimi sağlayan Buhar Üretim Ünitesi, Buhar ile elektrik üretilmesini sağlayan Türbin ve Jeneratör grubu, Çevrimin tamamlanmasını sağlayan Yoğuşturucu ve Yardımcı Sistemlerden oluşmaktadır.

Rankine çevriminin adımları dört aşama ile gösterilir, her adımda çalışma akışkanının hal değişimleri ifade edilir. Burada çevrimin ideal şartlarda olduğu varsayılır. Ama gerçek şartlarda çevrimin pompa ile sıkıştırma ve türbinde genişleme aşamaları izentropik değildir. Bu aşamalarda izentropide artış meydana gelir. Bundan dolayı gerçekte pompa için gereken güç ihtiyacı artar ve

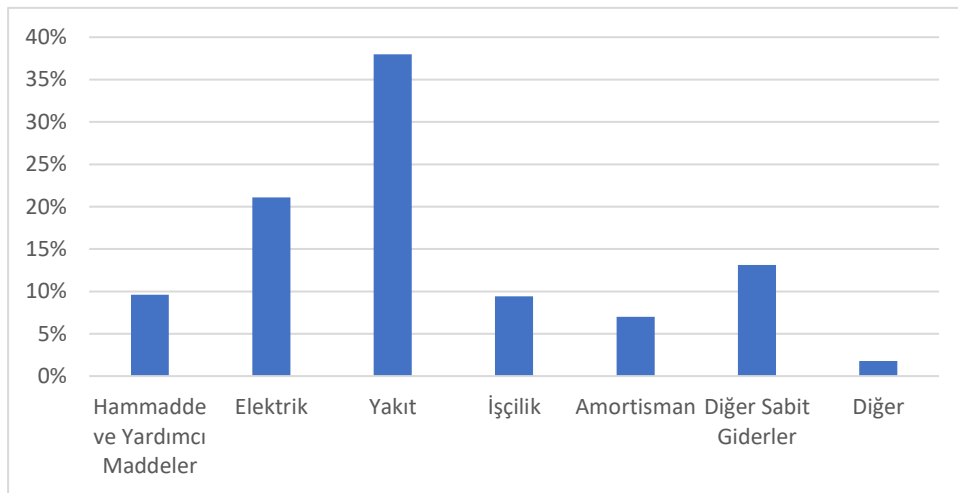
türbinden elde edilen iş azalır. **4-1** Önce çalışma akışkanı, düşük basınçtan, yüksek basınca pompalanır. (İdeal şartlarda izentropik olarak) Pompalama için güç girişine ihtiyaç vardır. (Örneğin mekanik veya elektrik gücü) **1-2** Yüksek basınçlı sıvı bir ısıtıcıya girer, bir dış ısı kaynağı ile sabit basınçta kızdırılmış buhar halini alana dek ısıtılır. **2-3** Kızgın buhar, türbin boyunca genişler ve güç çıkışı oluşturur. İdeal şartlarda, bu genişleme izentropiktir. **3-4** Buhar daha sonra kondensere girer, doymuş sıvı halini alana kadar soğutulur. Bu sıvı daha sonra tekrar pompaya girer ve çevrim tekrar eder.

8. ÇİMENTO FABRİKALARINDA ATIK ISI GERİ KAZANIMI SİSTEMLERİ

Entegre Çimento Üretiminin temel üretim aşamasını klinker üretimi oluşturmaktadır. Klinker üretimi esnasında pişirme prosesi sonucu ortaya çıkan yüksek sıcaklıktaki atık ısı, bazı öğütme proseslerinde kullanıldıktan sonra atmosfere atılmaktadır.

Ortaya çıkan bu atık ısının geri kazanıldığı sistemler ile üretilen elektrik enerjisi, sistem verimliliğini artırırken CO₂ emisyonlarının azaltılmasını, işletmenin sürdürülebilirliğinin artırılmasını sağlamaktadır.

Çimento Üretiminin maliyet kalemlerine bakıldığında yakıt ve elektrik enerjisi giderlerinin toplam maliyet içerisinde ki oranının %60 - %80 oranında olduğu görülmektedir[6].



Şekil 10. Çimento Üretimi Ortalama Maliyet Dağılımı [6]

Bir çimento fabrikasının toplam elektrik ihtiyacının yaklaşık %30'una kadarını AIGK Sistemleri tarafından atık ısıdan karşılanabilmektedir.

AIGK tesisleri sayesinde satın alınan elektrik tüketimi azaltılmakta, arz güvenliğinin sağlanmasına katkı konulmakta ve enerji üretiminde fosil yakıt kullanılmadığı için hem kaynaklar korunmakta, hem de sera gazı emisyonları azaltılmaktadır.

Şekil 7. Klinker üretim sürecinde enerji verimliliği ve emisyon azaltım potansiyelleri grafiğinden de görülebileceği üzere, atık ısı kullanımı ile elektrik üretimi en büyük potansiyeller arasında yer almaktadır. Ayrıca, enerji fiyatlarındaki yüksek artış riskinin kontrol edilebilir olması, yerinde üretim ve yerinde tüketim imkanı nedeniyle enerji kayıplarının minimuma indirilmesi ve hat yatırımı ihtiyaçlarının azaltılması da atık ısı geri kazanımı tesis yatırımlarının sağladığı diğer avantajlardır.

8.3.SP Kazan ve AQC Kazan Karşılaştırma

SP (Suspension Preheater Boiler) Kazan ve AQC (Air Quenching Cooler Boiler) Kazan, kullanım alanları ve koşulları değerlendirildiğinde kazanlar arasındaki karşılaştırma tablosu oluşmaktadır.

Tablo1. SP Kazan ve AQC Kazan Karşılaştırma tablosu

Özellik	SP Boiler	AQC Boiler
Isı kaynağı	Ön ısıtıcıdan çıkan egzoz gazı	Klinker soğutucusundan çıkan sıcak hava
Sıcaklık aralığı	280–350°C	300–400°C
Gazın toz içeriği	Yüksek	Düşük
Temizlik ihtiyacı	Daha sık (tozdan dolayı)	Daha az

8.4.SP Kazan ve AQC Kazan Kullanımının Avantajları

Atık Isı Kazanlarının kullanılması ile işletmede farklı avantajlar elde edilebilir. Atı Isı Kazan Kullanımı; Atık ısıdan enerji üreterek elektrik tüketimini azaltarak Enerji Verimliliğini artırır, Elektrik faturalarında önemli ölçüde azaltım sağlayarak spesifik enerji tüketimi azalır, CO₂ emisyonlarını düşürülmesine katkı sağlayarak, karbon ayak izini azaltılmasını destekler, Üretim süreçlerinin daha verimli çalışmasına katkıda bulunarak üretim verimliliğini artırır, Sürekli enerji üretimi sağlanarak sistemin sürdürülebilirliği desteklenir, Atık gaz sıcaklıklarının kontrolü ile yüksek sıcaklıklara maruz kalmayan ekipmanların kullanım ömrü uzar.

8.5.Sektörün Atık Isıdan Elektrik Üretim Potansiyeli

Bir genelleme yapıldığında, çimento sektöründe ortalama 3000 ton/gün (4 kademeli ön ısıtıcı ve pre-kalsinatörlü) klinker üretimine sahip bir klinker üretim hattından, kullanılan teknolojiye ve hammaddelerin nemine bağlı olarak 3,0MW ile 6,0 MW arasında bir elektrik enerjisi elde edebilmek mümkün olabilmektedir. WHR ile elektrik enerjisi üretimi; fabrikaların enerji verimliliği koşullarına bağlı olarak, 30kw/ton klinker ile 45 kW/ton klinker arasındadır[6].

Atık Isıdan Elektrik Üretiminin Ortalama 35kW/ton klinker olacağı kabul edilirse, Çimento sektörünün 2023 yılı verileri doğrultusunda %79 kapasite kullanım oranı ile 73.000.000 ton/yıl klinker üretiminden yaklaşık 2.555.000.000 MWh/yıl Elektrik Üretimi gerçekleştirme potansiyeli bulunmaktadır.

8.6.AIGK Sistemi İçin Sayısal Örnek

Bir çimento tesisinde bulunan AQC Kazanı verileri ile sistem verimi için örnek hesaplamalar yapılmıştır.

Klinkerin soğutulması için kullanılan hava sayesinde kazana beslenen enerji:

$$Q_h = V_h \times \rho_h \times (T_2 \times C_{p1} - T_1 \times C_{p2}) \quad (1)$$

Denklemleri ile hesaplanabilir.

Q_h : Havanın Enerjisi (kJ/h)
 V_h : Hava Debisi (Nm³/h)
 ρ_h : Havanın Yoğunluğu 1,293 (kg/Nm³)
 T : Sıcaklık (K)
 C_{p1} : 390oC Havanın Özgöl Isınma Isısı (kJ/kgK)
 C_{p2} : 90oC Havanın Özgöl Isınma Isısı (kJ/kgK)

Klinker Soğutma Hava Debisi	145000 Nm ³ /h
Hava Giriş Sıcaklığı	390 °C
Hava Çıkış Sıcaklığı	90 °C
Havanın Özgöl Isısı (390oC)	1,076 kJ/kgK
Havanın Özgöl Isısı (90oC)	1,01 kJ/kgK
Havanın yoğunluğu	1,293 kg/Nm ³

$$Q_h = 145000 \times 1,293 \times (663 \times 1,076 - 363 \times 1,01)$$

$$Q_h = 65.011.923,63 \text{ kJ/h}$$

Atık Isı sayesinde elde edilen buhar enerjisi:

$$Q_b = m_b \times (h_b - h_{su}) \quad (2)$$

Denklemleri ile hesaplanabilir.

Q_b : Buhar Enerjisi (kJ/h)
 m_b : Buhar debisi (kg/h)
 h_b : Buhar Entalpisi (kJ/kg)
 h_{su} : Suyun Entalpisi (kJ/kg)

Yüksek Basınç Bölgesi:

Buhar Debisi	14 t/h
Buhar Basıncı	12,5 bar
Buhar Sıcaklığı	375 °C
Evaporatör Besi Suyu Sıcaklığı	140 °C
Ekonomizer Besi Suyu Sıcaklığı	36 °C
36oC Suyun Entalpisi	150,81 kJ/kg
12,5 bar 375oC Buhar entalpisi	3206,11 kJ/kg

$$Q_{bhp} = 14000 \times (3206,11 - 150,81)$$

$$Q_{bhp} = 42.774.200 \text{ kJ/h}$$

Alçak Basınç Bölgesi:

Buhar Debisi	2,3 t/h
Buhar Basıncı	3 bar
Buhar Sıcaklığı	160 °C
Evaporatör Besi Suyu Sıcaklığı	140 °C
Ekonomizer besı Suyu Sıcaklığı	36 °C
36oC Suyun Entalpisi	150,81 kJ/kg
3 bar 16oC Buhar entalpisi	2782,59 kJ/kg

$$Q_{blp} = 2300 \times (2782,59 - 150,81)$$

$$Q_{blp} = 6.053.094 \text{ kJ/h}$$

Kazan verimi; buhar enerjinin, kazana beslenen enerjiye oranı olarak tanımlandığında, verim:

$$\eta_k = \frac{Q_{bhp} + Q_{blp}}{Q_h} \quad (3)$$

Denklemleri ile hesaplanabilir.

$$\eta_k = \frac{42.774.200 + 6.053.094}{65.011.923,63}$$

$$\eta_k = 0,75$$

Atık Isı Kazanının verimi $\eta_k = \%75$ olarak hesaplanmıştır.

W_t : Türbinde Üretilen Elektrik Enerjisi (kJ/h)

Türbin Elektrik Üretim Ölçümü 4883 kW 17202446 kJ/h

Çevrim verimi,

$$\eta_{\zeta} = \frac{W_t - W_p}{Q_h} \quad (4)$$

Denklemlerinden hesaplandığında

W_p : Besi Suyu Pompası Enerji Tüketimi (kJ/h)

Q_{kon} : Kondenserden Atılan Enerji (kJ/h)

Pompa Elektrik Tüketimi (225 kWh)	810000 kJ/h
Buhar Debisi	16,3 t/h
Buhar Basıncı	0,06 bar
36°C Suyun Entalpisi	150,81 kJ/kg
0,06 bar 0,7 kurulukta Buhar entalpisi	1842,1 kJ/kg

$$Q_{kon} = 16300 \times (2083,6 - 150,81)$$

$$Q_{kon} = 31.504.477 \text{ kJ/h}$$

$$\eta_{\zeta} = \frac{(17.202.446 - 810.000)}{(65.011.923)}$$

$$\eta_{\zeta} = 0,26$$

Çevrim verimi $\eta_{\zeta} = \%26$ olarak belirlenmiştir.

8.7. Atık Isı Geri Kazanım Sistemlerinde Bakımın Verimliliğe Etkisi

Atık Isı Geri Kazanım Kazanlarının bakımları düzgün yapılmaz ise çeşitli problemler ortaya çıkabilecektir. Bu durum, hem sistemin verimliliğini düşürecek, hem de güvenlik risklerini artıracaktır. Planlı ve düzenli bakım yapılmamasının olası sonuçları ise aşağıdaki sonuçları doğuracaktır.

8.7.1. Isı Transfer Verimliliğinde Düşüş

Kir ve kül birikimi, ısı transfer yüzeylerinde ısı direnç yaratan katmanlar oluşturacaktır. Bu durum kazan verimini azalmasına, sistemin daha fazla yakıt tüketmesine neden olacaktır.

8.7.2. Basınç ve Sıcaklık Dengesizlikleri

Temizlenmeyen yüzeyler ve tıkanan borular, sirkülasyon problemleri ve yüksek sıcaklık farkları yaratabilir. Bu da boru patlamalarına veya conta kaçaklarına yol açabilir.

8.7.3. Korozyon ve Erozyon Artışı

Yoğunlaşma bölgelerinde asitik bileşikler oluşabilir. Özellikle, su kimyası kontrol edilmezse iç yüzeylerde korozyon gelişir. Diğer yandan, yüksek hızda partikül geçişi nedeniyle erozyon da hızlanır. Borularda hasar ve delinmeler daha kısa sürede yaşanır.

8.7.4. Arızalar ve Plansız Duruşlar

Baca gazı sirkülasyon fanları, kül tahliye sistemleri veya buhar devresinde arızalar oluşabilir. Bu arızalar genellikle *plansız ve maliyetli duruşlara* sebep olur.

8.7.5. Yangın ve Patlama Riski

Toz birikimi ve yüksek sıcaklık kombinasyonu yangın ve patlama riskini artırır. Basınç altında çalışan ekipmanlarda çatlak veya kaçak varsa patlama riski oluşabilir.

8.7.6. Çevresel Etkilerde Artış

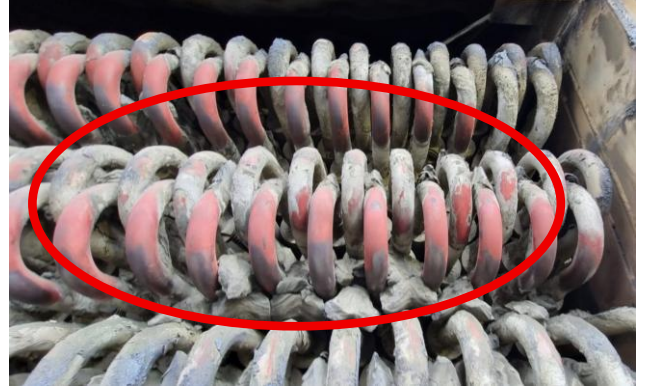
Yanma dengesizlikleri ve ısı kayıpları, emisyon değerlerini artırır. Bu durum çevre izinlerinin ihlaline ve cezalara yol açabilir.

8.7.7. Enerji Kazanımında Azalma

WHR (Waste Heat Recovery) sisteminin verimi düştüğünden, sistemin elektrik üretim kapasitesi azalır. Bu durum; satın alınan enerjinin artmasına, dolayısı ile *birim ürün başına enerji maliyetlerinin artmasına* neden olur.



Resim 1. Isı Geçirmeyen Deforme Olmuş (Finli) Kanatlı Boru



Resim 2. Tavllanmış ve Erozyona Uğramış Dirsek



Resim 3. Ekonomik Ömrünü Tamamlamış Kollektör



Resim 4. Delinmiş Kanatlı Boru

8.8. Bir İşletmede Atık Isı Kazanı Duruşu Elektrik Üretim Kaybı Örneği

Bir Çimento İşletmesinde 1 adet AQC kazan ve 2 Adet SP kazan olduğu ve üretim kapasitelerinin aşağıdaki gibi olduğu bilinmektedir.

KAZAN	Buhar Üretimi (t/h)	Farin Değirmenleri Devrede Ortalama Elektrik Üretimi (MW)		Ortalama Elektrik Üretimi (MW)
SP1	14	3,5 - 4		5
SP2	14	3,5 - 4		5
ACQ	15	3,5 - 4		5

AQC kazan ve/veya SP kazan arıza nedeniyle devreden çıkması halinde; işletmede atık ısıdan elde edilen elektrik üretiminin düşmesinin yanında, klinker üretim miktarı da düşmektedir. Atık ısının aktarılacağı herhangi bir yan tesis olmaması durumunda ciddi oranlarda üretim düşüşü ve enerji maliyeti çıkmaktadır.

- Herhangi bir kazanın 1 saatlik duruşta yaşanacak kayıp 5 MWh olup günde 120 MWh olacaktır.
- Enerji Borsasında 2025 yılında elektrik MWh fiyatları gününe ve saatine göre 2500-3000 TL/MWh arasında değişkenlik göstermektedir. Buna göre 5 MW kapasiteli bir kazanın 1 günlük duruşunun maliyeti 300.000 TL/gün ile 360.000 TL/gün arasında olacaktır.
- Ayrıca; ortalama 14ton/h buhar üretimi için kullanılan atık ısının 1 – 1,5 MW enerji kısmı farin değirmenlerinde kullanılabilir. WHR Sistemi devre dışı kaldığında atmosfere atılan ısı miktarı da artacaktır. Çevresel etki sebebi ile oluşan Yasal sınırlar bu sıcaklığın düşürülmesini isteyecektir. Isıyı kullanacak WHR sistemi olmadığından sıcaklığı düşürebilmenin yolu fırın kapasitesinin düşürülmesi anlamına gelmektedir.
- Günlük klinker üretim miktarının %5 - %10 azalması da gelir kaybı olarak enerji üretim kaybı maliyetine eklenmelidir.
- Çimento Üretimi, 340-350 t/h olan işletmede %10 üretim düşüşü ile günlük üretim kaybı 840t/gün olacaktır.
- Toplam Kayıp; 360.000 TL/gün enerji maliyeti ve 840t/gün klinker üretim kaybı olacaktır.

9. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Çimento üretimi yüksek enerji tüketimi ile gerçekleşen bir prosestir. İmalat aşamasında çıkılan yüksek sıcaklıklar sebebi ile açığa çıkan atık ısılar oluşmaktadır. Sektörün bir başka enerji tüketimi ise elektrik enerjisidir. AIGK sistemleri sayesinde atık ısıları kullanarak elde edilecek elektrik, toplam elektrik tüketimi içerisinde azımsanmayacak bir payı karşılayacaktır. Çimento üretim kapasitelerine ve kullanılan teknolojiye bağlı olarak, kurulacak sistemler ile 25 ile 30 ton/h buhar elde etmek mümkün olabilmektedir. Bu kapasiteler ile ortalama 5 MW düzeyinde güç ve elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Örnek hesaplama sonucu çevrimin verimi %26 olarak elde edilmiştir. Düşük çevrim oranı değerlendirildiğinde atık ısıdan daha yüksek verimle faydalanmanın yolları araştırılmalıdır.

Sektörün; Atık Isıdan Elektrik Üretiminin ortalama 35kW/ton klinker olacağı kabul edilirse, Çimento sektörünün 2023 yılı verileri doğrultusunda %79 kapasite kullanım oranı ile 73.000.000 ton/yıl klinker üretiminden yaklaşık 2.555.000.000 MWh/yıl Elektrik Üretimi gerçekleştirme potansiyeli bulunmaktadır.

Bu doğrultuda AIGK sistemlerinin kurulumu ve düzenli bakım ile verimliliklerinin etkinliği; işletmenin enerji tüketimlerinin optimizasyonunda, spesifik enerji tüketiminin azaltılarak, işletmenin sürdürülebilir olmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Atık Isı Kazanlarının verimliliğinin sürdürülebilir olması, doğru şekilde planlanmış günlük, aylık ve yıllık bakımların etkin şekilde yapılmasına bağlıdır. Doğru planlanmayan arıza ve duruşlar öncelikle uzayan bakım sürelerine sebep olacaktır. Üretim kaybının en aza indirgenmesi için acil önlem olarak kazan borularının körlenmesi gibi bir yöntem seçilecektir. Körleme işlemi ile birlikte kazan içerisinde termal dengesizlikleri oluşmaya başlayacaktır. Ayrıca boru dışında oluşacak erozyonlar ve artan termal gerilmeler mevcut boruların daha kısa sürede hasarlanmasına yol açacaktır.

Her türlü ekipmanın ve uzun termin süresi sebebi ile özellikle kanatlı boruların yedeklerinin tesis içerisinde hazır bulundurulması, uzun süreli duruşları ortadan kaldırılmasına yardımcı olacaktır. Yedekli çalışma yöntemi, gerek klinker gerek ise elektrik üretim kayıplarının yaşanmasının önüne geçecektir. Kanatlı boruların, kontrol vanalarının, emniyet vanalarının yedeklerinin bulundurulması ve hızlı tedarik edilmesi AIGK birimlerinin bakım planları için çok büyük önem arz etmektedir.

Sonuç olarak; Çimento işletmelerinde kullanılacak Atık Isı geri Kazanım Sistemlerinden, atık ısı kazanları sayesinde elektrik üretimi sağlayarak, sistem verimliliğini artırırken, birim ürün başına tüketilen enerji miktarının azaltılması ile sistem veriminin artmasına destek vermektedir. İşletmede tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %30'una varan oranlarda elektrik üretimine olanak sağlayan atık ısı kazanları, üretim sisteminin bir parçası olarak günümüz ekonomik koşullarında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Türk Çimento Raporu 2023 / Turkish Cement Report 2023 – TÜRKCİMENTO
- [2] Çimento Sektör Raporu 2023 – T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü
- [3] Çimento Sektör Raporu 2020 – T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü
- [4] 2020 Yılı Çimento Sektörü Kıyaslama Raporu – T.C. Enerji Ve Çevre Bakanlığı EVÇED Planlama ve Denetim Daire Başkanlığı
- [5] IFC Waste Heat Recovery In Turkish Cement Industry 2018
- [6] ALPAN M.Edip, Kasım 2013, Çimento Sektöründe Atık Isı Geri Kazanım sistemleri Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği,
- [7] Niranjana Sahoo, Anil Kumar, Samsher, (2022), Review On Energy Conservation And Emission Reduction Approaches For Cement Industry. Environmental Development 44 100767
- [8] Abouzeid, A.Z.M., Fuerstenau, D.W., 2009. Grinding of mineral mixtures in high-pressure grinding rolls. Int. J. Miner. Process. 93, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.05.008>.
- [9] ACC LIMITED, 2015. Sustainable Development Report accessed September 7 2020. https://www.acclimited.com/assets/new/pdf/ACC-SD-Report_02_240816.pdf.
- [10] Ahamed, J.U., Madloul, N.A., Saidur, R., Shahinuddin, M.I., Kamyar, A., Masjuki, H.H., 2012. Assessment of energy and exergy efficiencies of a grate clinker cooling system through the optimization of its operational parameters. Energy 46, 664–674. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.074>.
- [11] Altun, O., 2018. Energy and cement quality optimization of a cement grinding circuit. Adv. Powder Technol. 29, 1713–1723. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.04.006>.

- [12] Altun, O., Benzer, H., Karahan, E., Zencirci, S., Toprak, A., 2020. The impacts of dry stirred milling application on quality and production rate of the cement grinding circuits. *Miner. Eng.* 155, 106478 <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106478>.
- [13] Atmaca, A., Yumrutas, R., 2014. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a cement plant: Part II–Application. *Energy conversion and management* 79, 799–808.
- [14] Avami, A., Sattari, S., 2007. *Energy Conservation Opportunities: Cement Industry in Iran*, pp. 65–71.
- [15] Batra, V.K., Mittal, P.K., Kumar, K., Chhangani, P.N., 2005. *Modern Processing Techniques to Minimize Cost in Cement Industry*.
- [16] Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A., 2013. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *J. Clean. Prod.* 51, 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>.
- [17] Bhatti, J.I., Miller, F.M., Kosmatka, S.H. (Eds.), 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*, vol. 2004. Portland Cement Association, Washington DC.
- [18] Birch, E.R.I.K., 1990. Energy savings in cement kiln systems. *Energy Effic. Cem. Ind.* 12756, 112.
- [20] Blaustein, E., Radgen, P., 2001. Compressed air systems in the European Union. In: *Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions*. Stuttgart.
- [21] Borghetti Soares, J., Tiomno Tolmasquim, M., 2000. Energy efficiency and reduction of Co₂ emissions through 2015: the Brazilian cement industry. *Mitig. Adapt. Strategies Glob. Change* 5, 297–318. <https://doi.org/10.1023/A:1009621514625>.
- [22] Bourtsalas, A.T., Zhang, J., Castaldi, M.J., Themelis, N.J., Karaiskakis, A.N., 2018. Use of non-recycled plastics and paper as alternative fuel in cement production. *J. Clean. Prod.* 181, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.214>.
- [23] Bump, J.A., 1996. New cooler installed at Lafarge Alpena Plant: fuller controlled flow grate (C.F.G.) clinker cooler. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 32 (6), 1409–1412. <https://doi.org/10.1109/28.556645>.
- [24] Cadez, S., Czerny, A., 2016. Climate change mitigation strategies in carbon-intensive firms. *J. Clean. Prod.* 112, 4132–4143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.099>.
- [25] Canadian Industry Program for Energy Conservation, 2009. Available at Can. Cem Ind. Energy Bench Mark. : accessed 10 October 2020 <https://www.nrcan.gc.ca/sites/nrcan/files/oe/pdf/Publications/industrial/cement-eng.pdf>.
- [26] Carrasco, F., Grathwohl, S., Maier, J., Ruppert, J., Scheffknecht, G., 2019. Experimental investigations of oxyfuel burner for cement production application. *Fuel* 236, 608–614. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.135>.
- [27] Cembureau, 2009. Available at: *Activ. Rep.* accessed September 7 2020 http://www.cembureau.eu/sites/default/files/documents/Activity%20Report%202009_1.pdf.
- [28] Cembureau, 1997. *Best available techniques for the cement industry*. http://files.gamta.lt/aaa/Tipk/tipk/4_kiti%20GPGB/40.pdf. (Accessed 1 November 1997). Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (C.A.D.D.E.T, 1997. *Revolutionary Low-NO_x High-Efficiency Gas Burner*. International Energy Agency.
- [29] Conroy, G.H., 1989. Experience of the high-pressure roller press installation at Coplay Cement's Nazareth I Plant. In: *IEEE Record of Conference Papers On Cement Industry Technical Conference*. IEEE, pp. 509–543. <https://doi.org/10.1109/CITCON.1989.36378>. May. CSI/ECRA, 2017. *Development of*

- State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: 24 Trying to Look Ahead. European Cement Research Academy.
- [30] Dengiz "Ozcan, E., Çinku, K., "Ozdamar, S., Ergin, H., "Ozkan, S.G., 2022. Investigation of the effect of polymer-based novel grinding aids on cement grinding efficiency. *J. Appl. Polym. Sci.* 139, 51870 <https://doi.org/10.1002/app.51870>.
 - [31] Duploux, A., Trautwein, J., 1997. Umbau und optimierung der drehofenanlagen im werk karsdorf der Lafarge Zement Gmbh. *ZKG Int.* 50, 190–197. <http://pascalfrancis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=2828185>.
 - [32] El-Salamony, A.H.R., Mahmoud, H.M., Shehata, N., 2020. Enhancing the efficiency of a cement plant kiln using modified alternative fuel. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 14, 100310 <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100310>.
 - [33] Engin, T., Ari, V., 2005. Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study. *Energy Convers. Manag.* 46, 551–562. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.04.007>.
 - [34] Fujimoto, S., 1994. Modern technology impact on power usage in cement plants. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 30, 553–560. <https://doi.org/10.1109/28.293698>.
 - [35] Ghenai, C., Inayat, A., Shanableh, A., Al-Sarairah, E., Janajreh, I., 2019. Combustion and emissions analysis of Spent Pot lining (S.P.L.) as alternative fuel in cement industry. *Sci. Total Environ.* 684, 519–526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.157>.
 - [36] Gielen, D., Taylor, P., 2009. Indicators for industrial energy efficiency in India. *Energy* 34, 962–969. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.11.008>. Goebel, A., 2001. Personal Communication with Alexander Goebel. Krupp Polysius, Beckum, Germany.
 - [37] Hasanbeigi, A., Menke, C., Therdyothin, A., 2010. The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis: the case study of Thai cement industry. *Energy Pol.* 38, 392–405. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.030>.
 - [39] 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 Effic.* 4, 93–113.
 - [40] Hasanbeigi, A., Morrow, W., Masanet, E., Sathaye, J., Xu, T., 2013. Energy efficiency improvement and CO2 emission reduction opportunities in the cement industry in China. *Energy Pol.* 57, 287–297. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.053>.
 - [41] He, Y., Zhang, X., Wu, G., Shi, P., 2021. Effects of polycarboxylate-based grinding aid on the performance of grinded cement. *J. Wuhan Univ. Technol.-Materials Sci. Ed.* 36, 682–688.
 - [42] Hendriks, C.A., Worrell, E., De Jager, D., Blok, K., Riemer, P., 1998. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. IEA GHG R&D Programme Interlaken, Austria*, pp. 939–944. August.
 - [43] Holderbank, 1993. Present and future use of energy in the cement and concrete industries in Canada. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/5877254>. (Accessed 1 March 1993).
 - [44] Hossain, M.U., Poon, C.S., Wong, M.Y.K., Khine, A., 2019. Techno-environmental feasibility of wood waste derived fuel for cement production. *J. Clean. Prod.* 230, 663–671. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.132>.
 - [45] Huang, M., Ying, X., Shen, D., Feng, H., Li, N., Zhou, Y., Long, Y., 2017. Evaluation of oil sludge as an alternative fuel in the production of Portland cement clinker. *Construct. Build. Mater.* 152, 226–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.157>.

- [46] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (I.T.I.B.M.I.C.), 2004. Final report on cement survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (U.N.I.D.O.) for the contract entitled cement sub-sector survey for the project energy conservation and GHG emissions reduction in Chinese TVEs-phase II. P.O. No. 16000393 Contract no. 03/032/ML. September 9.
- [47] International Energy Outlook, 2016. International Energy Outlook. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf). (Accessed 30 June 2016).
- [48] IPCC, 2014a. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on. Retrieved from. <http://www.ipcc.ch/index.htm>.
- [49] Ishak, S.A., Hashim, H., 2015. Low carbon measures for cement plant—a review. *J. Clean. Prod.* 103, 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.003>.
- [50] Kamal, K., 1997. Energy efficiency improvement in the cement industry. In: Seminar on Energy Efficiency, Organized by ASSOCHAM-India and RMA-USA. January.
- [51] Karpan, B., Raman, A.A.A., Aroua, M.K.T., 2021. Waste-to-energy: coal-like refuse derived fuel from hazardous waste and biomass mixture. *Process Saf. Environ. Protect.* 149, 655–664. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.009>.
- [52] Karwa, D.V., Sathaye, J., Gadgil, A., Mukhopadhyay, M., 1998. Energy Efficiency and Environmental Management Options in the Indian Cement Industry. *Forest Knolls*.
- [53] Kim, S.Y., Kim, J.J., 2007. The impact of daylight fluctuation on a daylight dimming control system in a small office. *Energy Build.* 39, 935–944. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.009>. Lakshmikanth, R., 2011. Impacts of Cement Manufacturing.
- [54] Li, H., Zhao, J., Huang, Y., Jiang, Z., Yang, X., Yang, Z., Chen, Q., 2016. Investigation on the potential of waste cooking oil as a grinding aid in Portland cement. *J. Environ. Manag.* 184, 545–551. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.027>.
- [55] Liu, F., Ross, M., Wang, S., 1995. Energy efficiency of China's cement industry. *Energy* 20, 669–681. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00002-X](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00002-X). Lowes, T.M., Bezant, K.W., 1990. Energy management in the U.K. cement industry. *Energy Effic. Cem. Ind.* 669–681.
- [56] Madlool, N.A., Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim, N.A., 2011. A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 2042–2060. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>.
- [57] Madlool, N.A., Saidur, R., Rahim, N.A., Islam, M.R., Hossain, M.S., 2012. An exergy analysis for cement industries: an overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 921–932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.013>.
- [58] Mandal, S.K., Madheswaran, S., 2010. Environmental efficiency of the Indian cement industry: an interstate analysis. *Energy Pol.* 38, 1108–1118. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.063>. Marciano, E.J., 2004. Sustainable Development and the Cement and Concrete Industries. Mejeoumov, G.G., 2007. Improved Cement Quality and Grinding Efficiency by Means of Closed Mill Circuit Modeling. Texas A&M University.
- [59] Miller, S.A., John, V.M., Pacca, S.A., Horvath, A., 2018. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement Concr. Res.* 114, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>. MINES, I.B.O., 2018. Indian minerals yearbook 2016. Gov. India Minist. Mines Nagpur 13, 1–17. Mishra, U.C., Sarsaiya, S., Gupta, A., 2022. A systematic review on the impact of cement industries on the natural environment. *Environmental Science and Pollution Research* 1–12.

- [60] Mittal, A., Rakshit, D., 2020. Utilization of cement rotary kiln waste heat for calcination of phosphogypsum. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 20, 100729 <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100729>.
- [61] Morrow III, W.R., Hasanbeigi, A., Sathaye, J., Xu, T., 2014. Assessment of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries. *J. Clean. Prod.* 65, 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.022>.
- [62] Okoji, A.I., Anozie, A.N., Omoleye, J.A., Taiwo, A.E., Osuolale, F.N., 2022. Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks. *Alex. Eng. J.* 61, 5097–5109. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.010>. Parkes, F.F., 1990. Energy saving by utilization of high efficiency classifier for grinding and cooling of cement on two mills at castle cement (Ribblesdale) Limited, Clitheroe, Lancashire, U.K. *Energy Effic. Cem. Ind.* 12756, 81.
- [63] Patzelt, N., 1992. High-pressure grinding rolls, a survey of experience. In: *IEEE Cement Industry Technical Conference*. IEEE, pp. 149–181. <https://doi.org/10.1109/CITCON.1992.687614>. May. Philips, K.S., Enviro-Seal, P., 2001. Case Study—M/S Maihar Cement. ibm.gov.in.
- [64] Price, A.C., Ross, M.H., 1989. Reducing industrial electricity costs—an automotive case study. *Electr. J.* 2, 40–51. [https://doi.org/10.1016/1040-6190\(89\)90024-9](https://doi.org/10.1016/1040-6190(89)90024-9). Price, L., Worrell, E., Galitsky, C., 2008. Energy Efficiency Improvement Opportunities for the Cement Industry (No. LBNL-72E-Chinese). Lawrence Berkeley National Lab.(L.B.N.L.), Berkeley, CA (United States).
- [65] Price, L., Hasanbeigi, A., Lu, H., Lan, W., 2009. Analysis of Energy-Efficiency Opportunities for the Cement Industry in Shandong Province, China (No. LBNL-2751e-Rev). Lawrence Berkeley National Lab.(L.B.N.L.), Berkeley, CA (United States). <https://doi.org/10.2172/974445>. Rand, I., 2001. Air Solutions Group—Compressed Air Systems Energy Reduction Basics.
- [66] Regitz, J., 1996. Evaluation of mill drive options. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 32, 653–662. <https://doi.org/10.1109/28.502178>.
- [67] Saidur, R., 2009. Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings. *Energy Pol.* 37, 4104–4113. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.052>.
- [68] Salas, D.A., Ramirez, A.D., Rodríguez, C.R., Petroche, D.M., Boero, A.J., Duque-Rivera, J., 2016. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review. *J. Clean. Prod.* 113, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.078>.
- [69] Salzborn, D., Chin-Fatt, A., 1993. Operational results of a vertical roller mill modified with a high efficiency classifier. In: [1993] *Record of Conference Papers 35th IEEE Cement Industry Technical*. IEEE, pp. 329–337. <https://doi.org/10.1109/CITCON.1993.296976>. May. Schneider, U., 1999. From ordering to operation of the first QUADROPOL (R) roller mill at the Bosenberg cement works. *ZKG Int.* 52 (8), 460–+. Schorcht, F., Kourti, I., Scalet, B.M., Roudier, S., Sancho, L.D., 2013. Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide. European Commission Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, Luxembourg.
- [70] Shapiro, M., Galperin, V., 2005. Air classification of solid particles: a review. *Chem. Eng. Process: Process Intensif.* 44, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.02.022>.

- [71] Sheinbaum, C., Ozawa, L., 1998. Energy use and CO₂ emissions for Mexico's cement industry. *Energy* 23, 725–732. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00022X](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00022X).
- [72] Shwekat, K., Wu, H.C., 2018. Benefit-cost analysis model of using class F fly ash-based green cement in masonry units. *J. Clean. Prod.* 198, 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.229>. Simmons, M., Gorby, L., Terembula, J., 2005. First Vertical Roller Mill for Cement Grinding. *IEEE*. Singhi, M.K., Bhargava, R., 2010. Sustainable Indian cement industry. In: Workshop on International Comparison of Industrial Energy Efficiency, pp. 27–28. January. Süssegger, A., 1993. In: Separator-Report'92 Proc, vol. 92. K.H.D. symposium.
- [73] U.N.F.C.C.C., United Nations Framework Convention on Climate Change, 2008. Unit. Nation Frame Work Conv. Clim. Change. Available at: <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1175367790.14/view22/08/2010S>. Van den Broeck, M., 1999. GO control goes 'multi-circuit. *Int. Cem. J.* 1, 35–37.
- [74] Van der Meer, F.P., Gruendken, A., 2010. Flowsheet considerations for optimal use of high pressure grinding rolls. *Miner. Eng.* 23, 663–669. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.09.012>.
- [75] Van Oss, H.G., Padovani, A.C., 2002. Cement manufacture and the environment: part I: chemistry and technology. *J. Ind. Ecol.* 6, 89–105. <https://doi.org/10.1162/108819802320971650>. Venkateswaran, S.R., Lowitt, H.E., 1988. The U.S. Cement Industry: an Energy Perspective (No. DOE/RL/01830-T58). Energetics, Inc., Columbia, MD (U.S.A.).
- [76] Vidergar, R., Rapson, D., Dhanjal, S., 1997. Gyro-therm technology boosts cement kiln output, efficiency and cuts NO_x/sub x/emissions. In: 1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference. XXXIX Conference Record (Cat. No. 97CH36076). IEEE, pp. 345–357. <https://doi.org/10.1109/CITCON.1997.599369>. April. Vleuten, F., 1994. Cement in Development Energy and Environment Netherlands. Energy Research Foundation.
- [77] Wang, N., 2008. Environmental Production: Use of Waste Materials in Cement Kilns in China (Master's Thesis, Høgskolen I Telemark). <http://hdl.handle.net/11250/2439022>.
- [78] Wang, J., Dai, Y., Gao, L., 2009. Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry. *Appl. Energy* 86, 941–948. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.09.001>.
- [79] Worrell, E., Martin, N., Mitt, L., 2000. Potentials for energy efficiency improvement in the U.S. cement industry. *Energy* 25, 1189–1214. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00042-6).
- [80] Wu, W.N., Liu, X.Y., Hu, Z., Zhang, R., Lu, X.Y., 2019. Improving the sustainability of cement clinker calcination process by assessing the heat loss through kiln shell and its influencing factors: a case study in China. *J. Clean. Prod.* 224, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.209>. Wustner, H., 1986. Energy-saving with the roller press comminution process. *World Cement* 17, 94–96.
- [80] Yang, H., Plank, J., Sun, Z., 2019. Investigation on the optimal chemical structure of methacrylate ester based polycarboxylate superplasticizers to be used as cement grinding aid under laboratory conditions: effect of anionicity, side chain length and dosage on grinding efficiency, mortar workability and strength development. *Construct. Build. Mater.* 224, 1018–1025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.011>.
- [81] Zhang, J., Tan, H., He, X., Yang, W., Deng, X., 2020. Utilization of carbide slag-granulated blast furnace slag system by wet grinding as low carbon cementitious materials.

- Construct. Build. Mater. 249, 118763
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118763>.
- [82] Kimura, S., & Phoumin, H. (2021). Energy Outlook and Energy Saving Potential in East Asia 2020.
- [83] ÇEBİ H., 2015, Çimento Tesislerinde Atık Isı Geri Kazanımından Elektrik Üretimi

ÖNSÖZ:

Enerji verimliliği sistemi; üretim veya genel giderlerde enerji ve bakım giderlerini azaltmak kullanılan bir sistemdir. Etkili bakım, operasyonel iyileştirmeler ve enerji verimli teknolojiler ile enerji tasarrufu sağlanır.

Bu çalışmanın amacı; enerji tasarruf için bakımın rolünü araştırmak ve enerji tüketimini azaltmak için mevcut bakım yöntemlerinin uygulanmasıdır. Bu konuda bildirimizde yöntemler hakkında detaylı bilgi verilecektir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Verimli Teknolojiler, Enerji Verimli Proje, Bakım Yönetim Sistemi, Enerji Verimliliği Yönetim Sistemi, Korunan Enerji Maliyeti

1.GİRİŞ:

Enerji; sanayi, ticari konutlar, hizmet konutları ve özel konutlar içinde hayati önem taşımaktadır. Yaşamımızda genel olarak geçmişten gelen fosil yakıtlara bağımlılık sürmekte ve fosil yakıt rezervleri de hızlıca tükenmektedir. Buna bağlı olarak yakıt fiyatlarının da yukarı doğru hızlı yükselmesiyle kullanıcıların önlemler almalarına neden oluyor.

Enerji yönetimi; Fosil yakıt rezervlerinin azalması ve enerji fiyatlarının yükselmesi ile önem kazanmış ve bazı ülkelerde zorunlu hala gelmiştir.

Enerji yönetiminin amacı, enerji kullanımını etkin ve verimli bir şekilde tüketmektir. Bu nedenle enerji yönetimi enerjinin verimli kullanılması ve enerji maliyetlerinin azaltılması için etkin bir sistemdir.

Enerji verimli teknolojilerin (EVT) uygulanmasının birinci amacı enerji maliyetlerinin azaltılması yanında çevre ile de ilgilidir. EVT uygulanması ile üretkenlikte de artış sağlanmaktadır. Üretkenliğin artması ile enerji yoğunluğu ve spesifik enerji tüketiminde de ürün başına azalmaya yol açtığı bilinmektedir. EVT'lerin uygulanması ile enerji dışı kazanımlarda sağlanmaktadır. Örneğin;

- Üretim maliyetlerinde düşüş,
- Çevresel etkilerin azaltılması,
- Atıkların azaltılması,
- Ürün kalitesinde daha yüksek kullanım faktörü,
- Daha fazla güvenilirlik ve İS&G güvenliğinin artmasıdır.

Sonuç olarak; EVT'ler sadece enerji verimliliği faydaları değil, aynı zamanda enerji dışı kazanımlarda vardır.

EVT yanında enerji verimli projelerin (VAP) uygulanması ile de enerji tasarrufuna katkı sağlanmaktadır. Enerji yönetim uygulamaları aşağıda ki bazı maddeleri içermektedir;

- Temizlik,
- Bakım,
- Enerjinin izlenmesi,
- Eğitim,

- Enerji etüdüdür.

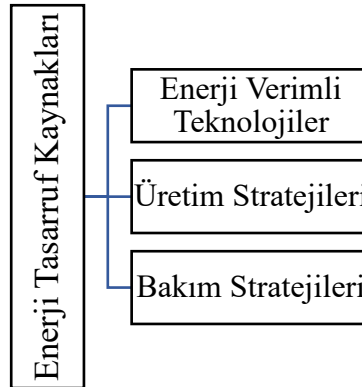
Sonuç olarak EVT ile VAP birleştirilerek daha etkin sonuçlar alınabilir. Bunun için kuruluşlarda Enerji Yönetiminin (EY) etkin bir şekilde uygulanması enerji maliyetlerinin düşmesine, çevresel etkilerin azalmasına hem de verimliliğin artmasını sağlayacaktır.

Bakım ve enerjinin izlenmesi ise; bu işlemler yapılmadan VAP'lerin tespit edilmesi kolay olmayabilir. Ayrıca bakım ile de potansiyel VAP'lar tespit edilebilir. Bu işlemler ile verimsiz çalışan ve sık sık arıza yapan donanımlarda tespit edilebilir. Bu donanımlarda basit bakım teknolojileri ile alınacak önlemler sonrası verimli bir düzeye getirilebilir. Bakım ve izleme daha az bir sermaye ile yapılabilmektedir. Buna karşılık EVT'lerin yatırım maliyeti daha sermaye yoğunudur. Bu nedenle bakım, enerji verimliliği programında maliyet etkin stratejilerden biri olarak kullanılabilir.

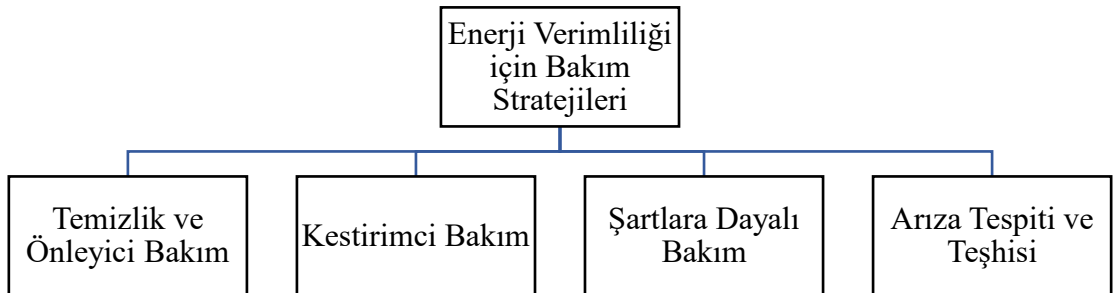
Kuruluşlar, bakım yönetim sistemi (BYS) ile EY sistemlerinin enerji verimliliğinin sürdürülebilirliğine katkı sağladığı bilinse de genellikle her ikisini de bağımsız bir şekilde yürütmeye yeğlemektedirler. Enerji verimliliği potansiyelini artırmak için bu iki sistemin ortak bir alanda birleşmesinde fayda vardır.

2.ENERJİ VERİMLİLİĞİ İÇİN BAKIM

Enerji verimliliği programı, enerji tüketimini ve maliyetini azaltmak için önemlidir. Enerji verimliliği iyileştirmesi; enerji verimliliği teknolojileri, operasyonel veya üretim iyileştirme, uygun temizlik ve verimli bakım (Şekil 1) uygulanarak sağlanabilir. Enerji verimliliği teknolojisinin uygulanması, enerji verimli motordan, değişken hızlı sürücülerin (VSD) , atık ısı geri kazanım teknolojilerinin uygulanmasından vb. oluşmaktadır. Enerji tüketiminde azalma, aynı zamanda operasyonel veya üretim iyileştirmesi ile de sağlanabilir. Odak noktamız, uygun şekilde enerji tüketimini azaltmaktır.



Şekil.1.Enerji tasarrufu fırsatları için kaynaklar

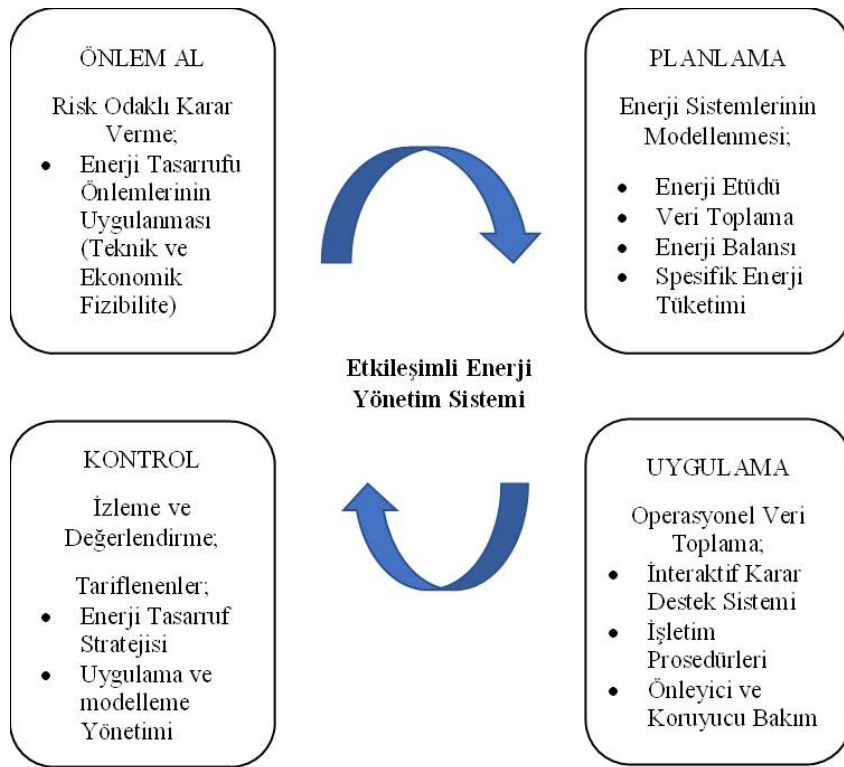


Şekil.2.Enerji Verimliliği için bakım stratejileri

Şekil.2.de enerji verimliliği için bakım stratejileri şu şekilde sınıflandırılabilir: temizlik, önleyici bakım, kestirimci bakım, şartlara dayalı bakım ve gelişmiş durum izleme (arıza tespiti ve teşhisi vb.)

Bakım, Bir Enerji Verimliliği Fırsatıdır;

Karbondioksit emisyonu salınımı yüksek olan ve fosil yakıt tüketen endüstrilerde, yönetim, verimli teknolojiler ve enerji verimli etüt yoluyla enerjinin tasarruflu kullanımı için çeşitli enerji tasarrufu stratejileri uygulanmaktadır. İmalat sanayilerinde enerji verimliliğinin önemi, enerji maliyetini ve tüketimini aynı zamanda çevresel etkileri (CO2 emisyonları, atıklar) azaltmaktır. Endüstrideki birçok enerji verimliliği önlemi, satın alma ve bakım uygulamaları aşamalarında ve prosedürlerinin iyileştirilmesinden oluşur. Bu önlemlerin sadece enerji tasarrufunda değil bunun dışında da olumlu etkileri vardır. Bu önlemlerle bakım maliyetlerini azaltabilir ve üretkenlik artırabilirler. Bu sonuçlara ulaşmak için “Enerji Verimliliği Yönetim Sistemine (EYS)” ihtiyaç vardır. Bu çalışma için, Şekil 3'de gösterilen döngünün yüksek performans elde etmek için optimum bakım ve işletim prosedürleri seçilmesine izin veren karar verme prosedürünü de içeren bir EYS şeması geliştirilmiştir.



Şekil.3.Karar verme döngüsü

Enerji tasarrufu önlemlerinin uygulanması ve karar verilmesine sistemin durumuna bağlıdır, bu nedenle teknik ve ekonomik fizibilite ve optimum noktaya ulaşmak için bu iki önemli gerçeği dengelemek önemlidir.

Maliyet Etkin Enerji Tasarrufu;

Karar verme prosedürü, optimum bakım prosedürlerinin seçilmesine izin verir, ancak en uygun maliyetli bakım uygulamasının seçimini göstermez. Bu konuyu ele almak için, ekipman arıza olasılığını ve bakım maliyetlerini ve arıza sonuçlarını değerlendirmek gerekir. Daha sonra, yapılan karar ağacı yöntemine dayalı, ortalama arıza maliyetleri ile ifade edilen ekipman arızası ile ilişkili riski en aza indiren bakım prosedürünü seçmek için kullanılabilir.

Son yıllarda bakım stratejileri, düzeltici yaklaşımdan önleyici yaklaşıma doğru evrilmiştir ve deterministik modeller entegre edilmiş veya olasılıksal olan güvenilirlik ve riske dayalı modeller ile değiştirilmiştir. Optimum bakım aralığını elde etmeye yönelik yaklaşımlar, toplam maliyetin minimizasyonunu beraberinde getirmektedir. Maliyet minimizasyonu da bakım planlamasının amaçlarından biridir. Bununla birlikte, endüstri tesislerinde maliyet etkin enerji tasarrufu önlemlerinin önemi, büyük enerji kullanan ekipmanların enerji tüketimini azaltmaktır. Bu yaklaşımların amacı ise endüstrilerde verimlilik ve maliyet avantajı sağlamaktır. Amaçları doğrudan enerji ile ilgili olmasa bile, faydaları genellikle enerji tasarrufuna da uygulanır.

Koruma arz eğrisi (Üretim maliyeti ile üretilen malların miktarını gösteren tablolar arz eğrisi olarak nitelendirilir). Hem mühendislik hem de ekonomiyi yakalayan analitik bir araçtır. Eğri, belirli bir teknoloji veya önlemin uygulanması ve sürdürülmesi ile ilgili maliyetleri ve kullanım ömrü boyunca bu seçenekle ilişkili enerji tasarruflarını hesaba katan marjinal Korunan Enerji Maliyetinin (KEM) bir fonksiyonu olarak enerji tasarrufu potansiyelini gösterir. Bir koruma arz eğrisi kullanmanın avantajı, enerji verimliliği hakkında karmaşık bilgileri özetlemek için açık ve anlaşılması kolay bir çerçeve sağlamasıdır. Başka bir deyişle, teknolojileri, maliyetleri ve enerji tasarrufu potansiyelleri ile birlikte Korunan Enerjinin Maliyeti analizi bakım ve işletim sistemini de içerir.

Aşağıdaki denklemle hesaplanan KEM;

(1) Korunan Enerji Maliyeti

$$KEM = \text{Yıllık Sermaye Maliyeti} + B\&O \text{ Yıllık Değişim Maliyetleri} / \text{Yıllık Enerji Tasarrufu}$$

B=Bakım

O=Operasyonel (Üretim)

$$(2) \text{ Yıllık Sermaye Maliyeti} = [d/I - (1+d)^{-n}]$$

- B&O= TL/y olarak yıllık bakım ve işletme maliyetleri,
- Yıllık enerji tasarrufu kWh/y olarak,
- Yıllık sermaye maliyeti TL/y olarak,
- d= iskonto oranı ve
- n=enerji verimliliği önleminin yaşam süresidir(yıl).

Çalışmamızda, yaklaşık 3 yıllık kısa geri ödeme süreleri için sanayide enerji verimliliği yatırımının önündeki engelleri yansıtmak için reel iskonto oranı d'nin yıllık %0,75'e eşit olduğu varsayılmıştır.

Maliyet analizi, maliyetleri proses tesisi ekipmanı ile ilişkili bazı istenmeyen arıza olaylarıyla ilişkilendiren bir veri tabanının varlığına bağlıdır. Mevcut analiz için maliyetler üç sınıfa ayrılmıştır:

- Sabit işletme maliyetleri;
- Değişken operasyonel maliyetler ve
- Kullanabilirlik maliyetler

Toplam bakım ve işletme maliyetleri, Eşitlik 2'de gösterildiği gibi bu maliyetlerin toplamı ile hesaplanabilir. (3) aşağıda:

$$(3) \text{ Toplam B\&O Maliyeti} = \text{Sabit Maliyet} + \text{Değişken Maliyet} + \text{Kullanılabilir Maliyet}$$

Bakım ve İşletme sabit maliyetleri, proses tesisi işletimi ile bağımsız olarak ilişkilidir. Bu maliyetler, tesis çalışanlarının ücretlerini, genel ve ekipman bakım maliyetlerini, sigorta ve vergileri kapsar. Değişken B&O, üretim miktarına veya ekipman çalışma zaman geçmişine bağlı maliyetleri içerir. Her iki maliyet sınıfı da proses tesisi ekipmanına uygulanan bakım politikasına bağlıdır.

Bir Vaka Çalışması ile Açıklayalım;

Karar verme modeli ve veri analizini bir vaka çalışması ile açıklayabiliriz. Burada iki adet mikser kullanımı esas alınmıştır. Birinci mikserde üretilen karışım, ikinci mikse verilmekte ve mikserden nihai ürün olarak çıkmaktadır.

Enerji verimliliği analizi için geliştirilen model mikser motorunu ve tüketilen elektrik miktarını kritik bileşenler olarak kullanmıştır. Elektrik motoru mikserlerin ürünü homojenize etmek için enerji üretir. Çalışmada amaç, geçmiş veriler ve gözlemlerde, tanımlanan verimlilik önlemleri ile arızaları önlemek ve/veya arızalardan kaynaklanan olumsuz etkileri azaltmak için kullanılmış ve analiz edilmiştir.

Aşağıdaki adımlarla önerilen çerçeve tanıtıldı:

- En kritik bileşenin tanımlanması. Bu çalışmada özellikle elektrik motoru (160 kWh) ele alınmıştır.
- Kullanım ömrü ve enerji tüketimi verilerinin toplanması ve gözlemlenmesi, ayrıca ilgili (bakım düzeltici ve önleyici) faaliyetler ve arızalar veri toplama.
- Tahmini bakım maliyetleri ve bakım politikalarının ekonomik değerlendirmesi (temel olarak dengeli maliyet ve verimsizlik riski).
- Bakım optimizasyonu (olasılık ve sonuçlar açısından).
- Sistemin tahmini işletme maliyetleri.
- Çalışmanın tamamında tanımlanan yerde enerji verimliliği arz eğrisi modeli kullanılarak, bakım optimizasyonu ve işletim prosedürleri yoluyla enerji verimliliğinin analizi yapılmıştır.

Ayrıca; Bakım ve işletme personelinin alınan girdileri dayanarak veri varsayımı yapılmıştır.

Senaryo çalışmalarının tanımı ve verimlilik önlemleri (bu durumda, elektrik tasarrufu için göreceli potansiyeller olan üç temel durum senaryosu seviyesi tanımlanmıştır; düşük, orta ve yüksek) ve sistem koşulları da göz önüne alınarak bakım faaliyetleri, işletme prosedürleri temelinde verimliliği artırmak için çözümler önerilmiştir.

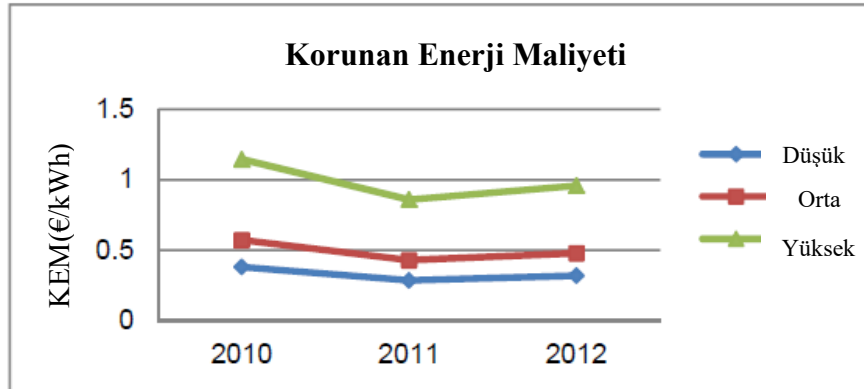
Yapılan çalışma sonrasında elektrik tasarruf miktarını belirlemek için (düşük, orta ve yüksek seviyede) teklif edilen her bir öneri için bölüm çalışanlarının da görüşü alınmalıdır. Sonuç olarak her bir seviyede yüzde verimlilik artışı değişkenlik gösterebilir. Belki de düşükten yükseğe geçildiğinde verimlilik artışı yüzde olarak azalış bile gösterebilir.

Tablo.1’de her bir seviye için verimlilik seviyesi için tasarruf miktarları ve CO₂ azalma potansiyelleri gösterilmektedir.

Verimlilik temel durum senaryoları özellikleri	Karakteristikler	Potansiyel Geri Kazanılacak Enerji (%)	Ortalama Tasarruf Miktarı (kWh/y)	Ortalama Elektrik Birim Fiyatı(€/kWh)	Q (Sermaye Maliyeti Faktörü)	Yıllık Tasarruf Edilen Enerji Miktarı (kWh/Y)	Yıllık Azaltılan CO ₂ Miktarı (KgCO ₂ /Yıl)
Düşük	Bakım, çalışmayı desteklemek için gerekenlerle sınırlıdır	15	300.000	0,15	0,922	45.000	22.500
Orta	Bakım, işlemlerin rutin bir parçasıdır ve bazı önleyici faaliyetler içerir.	10	300.000	0,15	0,922	30.000	15.000
Yüksek	Hem rutin hem de kestirimci bakım yaygın olarak uygulanmaktadır	5	300.000	0,15	0,922	15.000	7.500

Tablo.1. Her temel durum senaryosu için maliyet etkinliği ve çevresel fayda verileri

Elektrik motoru ile geçmiş veriler incelendiğinde, motorun 8.000 Saat çalıştıktan sonra arıza yapmasıdır. Arıza yapılan tarih olarak bakıldığında Temmuz 2010 ayı gözükmemektedir. Stokta bulunan yedek motor ile değişim 10 saat civarında sürdüğü ve bu süre zarfında üretim kaybı yaşandığı görülmüştür. Bu arızadan sonra tüm elektrik motorlarında önleyici bakımın yanında düzeltici bakımında yapıldığı saptanmıştır. Ayrıca 2010, 2011 ve 2012 yılları için her üç senaryo kapsayacak KEM analizi yapılmış. Çalışmada senaryo orta düzey seviyesinde vurgulanmıştır.



Grafik.1. Korunan enerji maliyeti €/kWh.

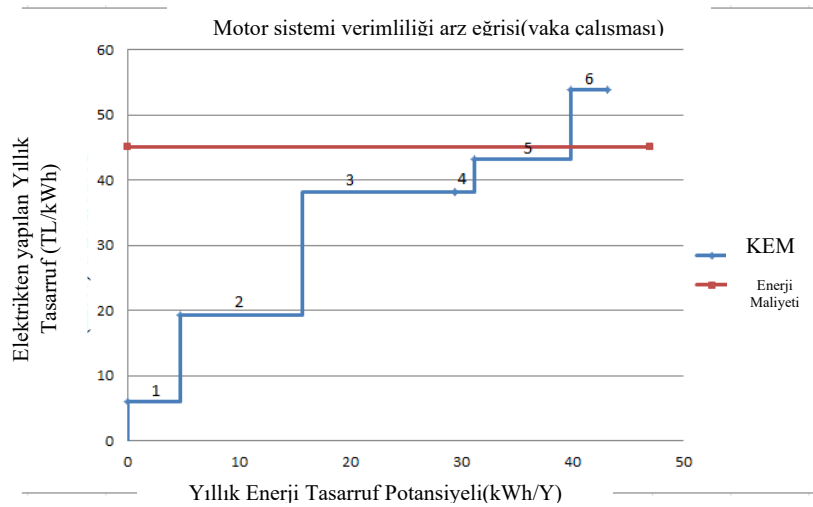
Verimlilik düzeyi bazında kararlar alınmış, bu nedenle bakım faaliyetleri, işletim prosedürleri ve sistem koşulları bazında verimliliği artırmak için çözümler oluşturulmuş ve önerilen

çözümler, burada da geliştirilen model ile kümülatif yıllık enerji tasarrufu tahmin edilmiştir. Tablo 2'de gösterilen orta seviye bir temel durum senaryosu için yıllık kümülatif CO₂ azaltım potansiyeli de hesaplanmıştır.

Motor sistemi için enerji verimliliği önlemleri	Temel durum verimlilik senaryoları:			Yıllık Enerji Tasarruf(kWh/Y)	Yıllık Toplam CO2 Miktarı Azaltımı (KgCO2/Y)
	Düşük (15% Üzeri)	Orta (10% Üzeri)	Yüksek (5% Üzeri)		
	Mümkün Olan Geri Kazanım Potansiyeli(kWh/Y)			Orta Seviye İçin	Orta Seviye İçin
1. Sızıntıları, hasarlı contaları ve ambalajı onarın	3,0	2,0	1,0	4.996	2.348
2. Mikserden tortuları çıkarın	7,0	5,0	3,0	15.668	7.834
3. Motoru daha enerji verimli tipte değiştirin	14,0	7,0	5,0	29.413	14.706
4. Aşağıdakiler gibi yeni teknolojilerin ve daha verimli cihazların kullanımı:					
Yeni kayışlar (daha yüksek güç geçişi ve bakım gerektirmeyen)	1,0	1,0	1,0	31.240	15.620
5. Tahmine dayalı bakım programını başlatın (bakım optimizasyonu)	7,0	5,0	2,0	39.917	19.959
6. İnverter kullanımı (o Değişken hızlı sürücü)	* vaka çalışması için ekonomik değil.			48.189	21.595
*Motorun yönetim tüketimi, işin başlangıcındaki pik tüketimleri en aza indirmek için, günde sadece bir kez motoru çalıştırarak ve sadece günlük işin sonunda motoru kapatarak önlem 6 için ekonomik bir alternatiftir.					

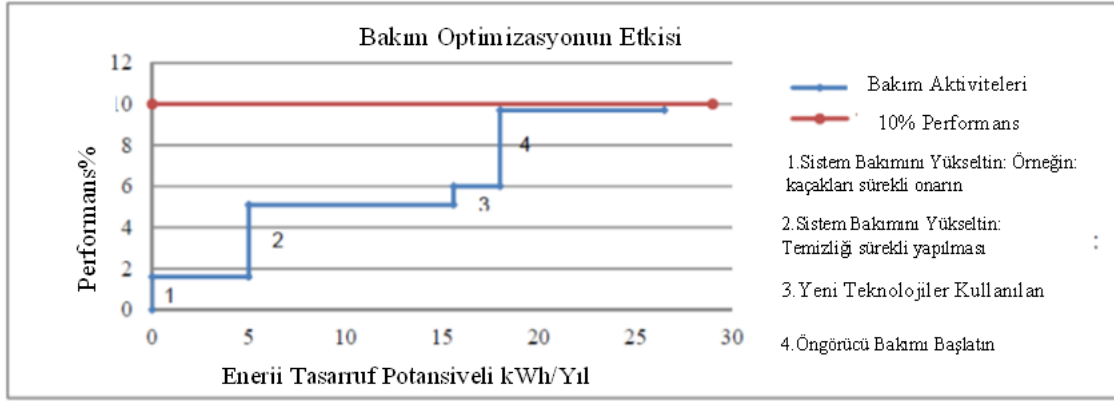
Tablo.2. Motor sistemi için enerji verimliliği önlemleri (vaka çalışması).

Grafik.2. elektrik motoru sistemi için koruma arz eğrisini göstermektedir (sunulan vaka çalışması), enerji tasarrufu potansiyelini, bakım ve işletme maliyetlerini içeren B&O'yu içeren her bir önlemin (Tablo 2) uygulanmasıyla ilişkili maliyetleri hesaba katan Marjinal Korunan Enerji Maliyetinin bir fonksiyonu olarak sunar. Belirtmek gerekir ki, enerji maliyet çizgisinin altında kalan enerji verimliliği önlemleri (bu çalışmada enerji fiyatı 0,15 €/kWh, dolayısıyla yıllık elektrik enerjisi maliyeti yaklaşık 45000 €'dur), hem teknik hem de ekonomiktir, dolayısıyla maliyet etkindir ve enerji maliyet çizgisinin üzerindeki verimlilik önlemleri maliyet etkin değildir, dolayısıyla bu çalışmada 6. önlem teknik olarak uygulanabilir ancak ekonomik değildir.



Grafik.2. Elektrik motoru sistemi için koruma arz eğrisi (vaka çalışması).

Sonuçlar ayrıca, yalnızca bakım optimizasyonu yoluyla bile; yükseltme sistemi bakım, yeni teknolojilerin kullanılması ve kestirimci bir bakım programı başlatıldığında, Grafik.3'te gösterildiği gibi orta baz durum senaryosu için sistemin performansını %10'a kadar artırmak mümkündür.



Grafik.3. Bakım Optimizasyonunun Etkisi (Vaka Çalışması)

2.1. Temizlik

Günümüzde etkin enerji yönetimi programı uygulanmasında, programa temizlik hizmetleri de dahil edilmektedir. Enerji verimliliği perspektifinde, temizlik, bir tesiste yürüyerek veya görsel bir inceleme gerçekleştirilerek enerji kaybının tanımlanmasıyla ilgili uygulamadır. Uygulamada, temizlik ekibinin olmaması ile bu işlem yürütülemez.

Temizlik ve bakım, ücretsiz veya düşük maliyetle uygulanabilecek enerji tasarrufu uygulamaları olarak kabul edilmektedir. Potansiyel enerji kaybının belirlenmesi genellikle bir enerji denetiminin parçasıdır. Enerji denetiminin temel seviyesi, geçişli enerji denetimidir. Gözden geçirme denetimi sırasında, bir denetçi bir tesisteki potansiyel enerjiyi belirlemek için her zaman görsel bir inceleme gerçekleştirir. Bazı enerji denetimlerde, örneğin; buhar dağıtım sistemi hatlarında temizlik ve bakım yoluyla enerji tasarrufu potansiyeli bulunabilmektedir ayrıca aynı uygulama ile basınçlı hava dağıtım sistemi ve elektrik motorlarında da enerji tasarrufu potansiyelleri bulmak mümkün oluyor.

2.1.1. Endüstriyel Tesislerde Temizlik ve Bakım

Buhar sisteminde kapsamlı bir enerji denetimi yapıldığında; yanlış yalıtım, zayıf yalıtım, aşınmış yalıtım ve buhar dağıtımının bir kısmında yalıtım bulunmadığını tespit edilebilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda büyük bir miktarda enerji kaybı olduğu görülmüştür. Buhar dağıtım hatlarının büyük bir kısmı uygun şekilde kurulmadığı görülmüş ve bunun neden olduğu buhar kaçakları enerji kaybına neden olmaktadır. Buhar kaçaklarını onarmak, çok kısa süreli geri ödeme süresine sahiptir. Kontrol sırasında uygunsuz bakım nedeniyle korozyona uğramış borular ve vanalar görülebilir. Ayrıca, buhar kapanlarının denetlenmesi de enerji tasarrufu açısından potansiyeldir. Buhar kapanlarının belli periyotlarda kontrol edilmesi ve önlem alınması sonucunda önemli enerji tasarruf sağlanır ve geri ödemesi çok kısadır. Sonuç olarak, buhar dağıtım sisteminde enerji kaybını önlemek için iyi bir temizlik ve bakımın belli periyotlarda yapılması şarttır.

Yönetim pratiği olarak işletme ve bakım personeli de enerji sektöründe çok önemli bir rol oynamaktadır. İşletme ve Bakım personelinin öngörülen enerji tüketimini önlemek veya en azından azaltmak için ekipmanın bakımını yapma ve çalıştırma konusundaki yetersizliği enerji tasarrufu konusunda önemlidir.

Yapılan çalışmalarda; İşletme ve Bakım personelinin ilgili enerji yönetim sistemine uyumlu çalışmaları sonucunda %80'nin kapsadığı görülmüştür. Birçok enerji etüt çalışmalarında teknik ve ekonomik analize odaklanır ancak bu analizlerde işletme ve bakım faktörleri dikkate alınmaz. Bu faktörler arasında;

- Geçmiş bakım uygulamalarının değerlendirilmesi,
- Bakım maliyetleri,
- Önleyici bakım teknikleri ve araçları
- Personelin becerileri ve davranışlarıdır.

Bu nedenle başarılı bir enerji yönetim sistemi için, işletme ve bakım faktörlerini de göz önünde bulundurmak gerekir.

REFERANSLAR;

1. Maintenance an Opportunity for Energy Saving/Behnoush Darabnia*, Micaela Demichela
2. McKane A., Hasanbeigi A., 2011, Motor systems energy efficiency supply curves: A methodology for assesing the energy efficiency potential of industrial motor systems,

Sanayide Enerji Verimliliğinin Artırılmasında Yağlayıcı Formülasyonlarının Rolü: Bir Derleme

The Role of Lubricant Formulations in Increasing Energy Efficiency in Industry: A Review

Sevda Atar¹, İsmail Murat Bayram¹

¹Petrol Ofisi Teknoloji Merkezi Laboratuvarları (Petrol Ofisi Technology Center Laboratories)- POTEM, Derince, Türkiye

sevda.atar@petrolofisi.com.tr, murat.bayram@petrolofisi.com.tr

Özet

Sanayi sektörlerinde enerji verimliliğini artırmak, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin temel bileşenlerinden biridir. Küresel enerji tüketiminin yaklaşık dörtte biri sanayi sektöründen kaynaklanmakta olup, bunun önemli bir bölümü sürtünme ve aşınma kaynaklı tribolojik kayıplardan oluşmaktadır. Bu kayıpların azaltılmasında, yağlayıcı formülasyonlarının geliştirilmesi kritik bir rol oynar. Yeni nesil sentetik, biyobazlı ve nano-katkılı yağlayıcılar, sürtünme katsayısını azaltarak enerji tasarrufu sağlar, ekipman ömrünü uzatır ve yağ değişim periyotlarını artırır. Bu derleme, sanayide enerji verimliliğini artırmak için yağlayıcı teknolojilerinde meydana gelen son gelişmeleri ve farklı endüstrilerden uygulama örneklerini literatür destekli olarak sunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı ve kapsamı sanayide enerji verimliliğini artırmak için yağlayıcıların oynadığı kritik rolün altının çizilmesi, yağlayıcı formülasyonlarının değiştirilmesi ve geliştirilmesi ile elde edilebilecek enerji verimliliğinin gözler önüne serilmesi, farklı yağlayıcı formülasyonları ile raporlanan verimlilik çalışmaları örnekleri ile konunun esteklenmesidir.

Summary

Improving energy efficiency in industrial sectors is a key component of the sustainable development goals. Approximately one-quarter of global energy consumption originates in the industrial sector, a significant portion of which consists of tribological losses due to friction and wear. Improving lubricant formulations plays a critical role in reducing these losses. New-

generation synthetic, bio-based, and nano-additive lubricants reduce the coefficient of friction, saving energy, extending equipment life, and increasing oil change intervals. This review presents, with literature support, recent advances in lubricant technologies to improve energy efficiency in industry and application examples from various industries.

The aim and scope of this study is to underline the critical role played by lubricants in increasing energy efficiency in industry, to demonstrate the energy efficiency that can be achieved by changing and improving lubricant formulations, and to support the subject with examples of efficiency studies reported with different lubricant formulations.

1. Giriş

Enerji, sanayi sektörünün en önemli girdilerinden biridir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA, 2022) verilerine göre, dünya genelinde toplam enerji tüketiminin yaklaşık %24'ü endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Bu enerjinin %10–15'i tribolojik kayıplar nedeniyle boşa harcanmaktadır (Holmberg & Erdemir, 2017).

Yağlayıcılar; sürtünme, aşınma ve enerji kayıplarını minimize eden, sistemlerin verimli çalışmasını sağlayan temel yardımcı malzemelerdir. Yağlayıcı formülasyonlarının iyileştirilmesiyle sanayide enerji tüketiminin %3–10 arasında azaltılabileceği bildirilmiştir (Mang & Dresel, 2017).

2. Yağlayıcıların Enerji Verimliliğine Katkısı

Makine sistemlerinde sürtünme katsayısının düşürülmesi, doğrudan enerji tüketimiyle ilişkilidir. Yeni nesil yağlayıcılar:

- Sürtünme katsayısını %15–30 oranında azaltabilir (Li et al., 2019),
- Yüzey sıcaklıklarını 5–10°C düşürebilir,
- Enerji tüketiminde %3–8 oranında tasarruf sağlayabilir (Cecilia et al., 2021).

Polialfaolefin (PAO), ester ve polialkilen glikol (PAG) bazlı sentetik yağlar, geleneksel mineral yağlara kıyasla daha stabil film oluşturur ve oksidatif bozulmaya karşı temelde dayanıklıdır (Mang & Dresel, 2017). Ancak günün sonunda yağ formülasyonunun performansı kullanılan temel hammaddelerden ziyade oluşturulan formülün performans çıktılarına dayanmaktadır.

Örneğin; polialfaolefin bazlı bir yağlayıcı formülasyonu, mineral bazlı bir yağlayıcı formülasyonundan daha düşük oksidatif performans sergileyebilir.

3. Yağlayıcılarda Katkı Maddeleri

Katkı maddeleri, yağlayıcının tribolojik performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle:

- Aşınma önleyici (AW),
- Yüksek basınç (EP),
- Sürtünme düşürücü (FM)

katkılar enerji verimliliği açısından belirleyici unsurlardır (Shahnazar et al., 2016).

Yeni çalışmalar, grafen oksit (GO), bor nitrid (h-BN) ve nano-elmas parçacıkları gibi katkıların yağ film kalınlığını %20–40 oranında artırdığını göstermektedir (Hu et al., 2022).

3.1. Nano-Katkılı Yağlayıcılar

Nano-katkılı yağlayıcılar, tribolojik yüzeylerde mikro ölçekte koruyucu tabakalar oluşturarak sürtünme direncini azaltır.

- Li et al. (2019) çalışmasında WS_2 nanoparçacıklı yağlayıcıların metal yüzeylerde sürtünmeyi %25 azalttığı,
- Hu et al. (2022) araştırmasında grafen katkılı yağların dişli sistemlerinde enerji verimliliğini %6 oranında artırdığı,
- Shao et al. (2023) çalışmasında TiO_2 nanoparçacıklarının motor yağlarında yakıt verimliliğini %3,5 artırdığı bildirilmiştir.

Nano-katkıların yağlayıcı içindeki dağılım kararlılığı ve yüzeye tutunma mekanizması, formülasyon başarısında kritik rol oynar.

4. Yağ Tüketiminin Azaltılması ve Çevresel Etkiler

Yüksek oksidasyon direncine sahip yağlayıcılar, yağ değişim aralıklarını 2–4 kat uzatabilir (Erhan & Sharma, 2020). Bu durum hem ekonomik hem de çevresel açıdan avantaj sağlar.

Ayrıca biyobazlı yağlayıcılar, %90'a kadar biyolojik olarak parçalanabilir oldukları için çevreye yayılan atık yağ miktarını ciddi oranda azaltır (Cecilia et al., 2021).

5. Endüstriyel Uygulama Örnekleri

Tablo 1'de farklı sektör alanları için formülasyon ve yağlayıcı türü değiştirilerek elde edilen enerji verimliliği değerlerine ait örnekler verilmiştir.

Tablo 1. Farklı sektörler için endüstriyel uygulama örnekleri

Sektör	Yağlayıcı Türü/ Uygulama	Enerji Verimliliği İyileşmesi	Kaynak
Otomotiv	PAO bazlı motor yağları, molibden katkılı FM sistemleri	%2-4 yakıt ekonomisi artışı	Li et al., 2019
Çelik Sanayi	Sentetik hidrolik yağlar (ester bazlı)	%5 enerji tasarrufu, %40 yağ tüketimi azalması	Cecilia et al., 2021
Gıda Endüstrisi	NSF-H1 onaylı biyobazlı yağlayıcılar	%3-4 enerji azalması, atık yağ %30 düşüş	Erhan & Sharma, 2020
Kimya Sanayi	PAG bazlı kompresör yağları	%6 enerji verimliliği artışı	Hu et al., 2022
Çimento Üretimi	Yüksek sıcaklığa dayanıklı EP katkılı dişli yağları	%7 enerji tasarrufu	Zhang et al., 2021
Tekstil Sektörü	Düşük viskoziteli silikon bazlı yağlayıcılar	%4 enerji azalması, %25 daha uzun ekipman ömrü	Khan et al., 2020
Enerji Üretimi (Rüzgar Türbinleri)	Nano-bor katkılı sentetik dişli yağları	%8 enerji verimliliği artışı	Shao et al., 2023
Denizcilik	Biyobazlıgemi motor yağları (ISO VG 100-150)	%5 yakıt tasarrufu, %50 yağ ömrü artışı	IEA, 2022

Farklı endüstriyel sektörlerde farklı uygulamaların sonuçları yağlayıcının ve yağlama sistemlerinin önemini göstermektedir. Baz yağ seçimi, uygulama alanına bağlı olarak %2 ile %40 arasında yağ tüketiminin azalmasını sağlayabilmekte, atık yağ üretimini %30 azaltmakta, enerji verimliliğini %8 arttırmakta, ekipman ömründe %25 ve yağ ömründe %50'ye kadar artış sağlanabilmektedir.

6. Sonuç ve Gelecek Perspektifler

Yağlayıcı formülasyonlarındaki teknolojik ilerlemeler, sanayi proseslerinde enerji verimliliğini artırmanın en etkili yöntemlerinden biridir.

Derlenen verilere göre:

- Enerji tüketimi %3–10 azaltılabilir,
- Yağ değişim periyotları 2–4 kat uzatılabilir,
- Toplam yağ tüketimi %30–50 düşürülebilir.

Gelecekteki çalışmaların, biyobazlı nano-katkılı hibrit sistemler ve akıllı sensör destekli yağlayıcı izleme teknolojileri üzerine yoğunlaşması beklenmektedir.

Kaynakça

Cecilia, J. A., Azevedo, D. C. S., Cavalcante, C. L., & Rodríguez-Castellón, E. (2021). Development of environmentally friendly lubricants: current challenges and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125152.

Erhan, S. Z., & Sharma, B. K. (2020). Lubricants and Hydraulic Fluids from Renewable Sources. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(4), 1613–1623.

Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5(3), 263–284.

Hu, J., Liu, Q., & Zhang, Y. (2022). Tribological performance of graphene-based nanolubricants in industrial gear systems. *Lubricants*, 10(4), 112.

Khan, M. A., Rahman, M. M., & Alam, M. S. (2020). Performance evaluation of silicone-based lubricants in textile machinery. *Industrial Lubrication and Tribology*, 72(5), 673–681.

Li, X., Zhang, C., Wang, H., & Liang, H. (2019). Nano-additives in lubricants for industrial applications: A review. *Tribology International*, 133, 205–217.

Mang, T., & Dresel, W. (2017). *Lubricants and Lubrication* (3rd ed.). Wiley-VCH Verlag GmbH.

Shao, J., Chen, X., & Wang, Z. (2023). Energy efficiency improvement in mechanical systems using nano-TiO₂ lubricants. *Energy Reports*, 9, 545–553.

Zhang, R., Wu, D., & Liu, J. (2021). High-temperature EP lubricants for cement industry applications. *Wear*, 476, 203762.

IEA (International Energy Agency). (2022). *Energy Efficiency 2022: Analysis and Outlooks to 2030*. OECD/IEA, Paris.

Shahnazar, S., Bagheri, S., & Hamid, S. B. A. (2016). Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 3153–3170.