



Sena Özal

Iskenderun Technical University, sena.ozal24@gmail.com,

Hatay-İskenderun

Abdulla Sakallı

Iskenderun Technical University, abdulla.sakalli@iste.edu.tr,

Hatay-İskenderun

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2026.21.3.1A0506	
ORCID ID	0009-0002-0278-2547	0000-0002-2488-7318
Corresponding Author	Sena Özal	

**DEMİR-ÇELİK FABRİKALARINDA TRANSFER KAYNAKLI ISI KAYIPLARININ
AZALTILMASINA YÖNELİK DMADV METODOLOJİSİ İLE ISI MUHAFAZA SİSTEMİ
TASARIMI**

ÖZ

Demir-çelik endüstrisinde sıcak haddeleme sırasında slabların tav fırınından haddeleme ünitesine transferi, önemli ısı kayıplarına ve enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu çalışmada, transfer bölgesindeki radyasyon ve konveksiyon kaynaklı kayıpları azaltmak amacıyla hidrolik kontrollü, açılır-kapanır pasif bir Isı Muhafaza Kalkanı Sistemi tasarlanmıştır. Çalışma, DMADV metodolojisi kapsamında saha verileri, mühendislik hesaplamaları ve literatür bulguları kullanılarak yürütülmüştür. Önerilen sistem; modüler hareketli kalkan, yüksek sıcaklığa dayanıklı izolasyon, düşük emisyonlu iç yüzey, hidrolik mekanizma ve PLC tabanlı kontrol biriminden oluşmaktadır. Analitik hesaplamalarda, 15 tonluk bir slabda 10°C sıcaklık kaybının yaklaşık 90.000 kJ enerjiye ve 0,28 Nm³/ton doğalgaz tüketimine karşılık geldiği hesaplanmıştır. Sistem, sıcaklık homojenliğini iyileştirme, enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Bulguların CFD analizleri ve saha testleriyle doğrulanması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sıcak Haddeleme, Slab Transferi,
Isı Muhafazası, DMADV, Enerji Verimliliği

**DMADV-BASED DESIGN OF A HEAT RETENTION SHIELD SYSTEM FOR REDUCING SLAB
TRANSFER HEAT LOSSES IN HOT ROLLING PROCESSES**

ABSTRACT

During hot rolling in the iron and steel industry, the transfer of slabs from the reheating furnace to the rolling unit causes significant heat losses and increased energy consumption. In this study, a hydraulically controlled, movable passive Heat Retention Shield System was designed to reduce radiation and convection losses in the transfer section. The study was conducted within the DMADV framework using field data, engineering calculations, and literature findings. The proposed system consists of a modular movable shield, high-temperature-resistant insulation, a low-emissivity inner surface, a hydraulic mechanism, and a PLC-based control unit. Analytical calculations showed that a 10°C temperature decrease in a 15-ton slab corresponds to approximately 90,000 kJ of energy and 0.28 Nm³ of natural gas per ton. The system has the potential to improve temperature uniformity and reduce energy consumption and carbon emissions. Further CFD analyses and field tests are required to validate the findings.

Keywords: Hot Rolling, Slab Transfer, Heat Retention,
DMADV, Energy Efficiency

How to Cite:

Özal, S. ve Sakallı, A., (2026). Demir-çelik fabrikalarında transfer kaynaklı ısı kayıplarının azaltılmasına yönelik dmadv metodolojisi ile ısı muhafaza sistemi tasarımı. Engineering Sciences, 21(3):36-61, DOI: 10.12739/NWSA.2026.21.3.1A0506.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz sanayi alanında sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve maliyet optimizasyonu, işletmelerin rekabet avantajını belirleyen en önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle enerji tüketiminin yüksek olduğu demir-çelik sektörü, yüksek sıcaklık gereksinimleri nedeniyle yoğun enerji kullanımının olduğu üretim alanlarından biridir. Bu durum hem üretim maliyetlerini artırmakta hem de çevresel etkiler açısından çeşitli sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle üretim süreçlerinde meydana gelen enerji kayıplarının azaltılmasına yönelik çalışmalar önem kazanmaktadır [1]. Demir-çelik üretiminde tav fırınlarında ısıtılan slabların, haddeleme işlemi öncesinde belirli bir sıcaklık aralığında tutulması gerekmektedir [2]. Bu sıcaklık aralığı, malzemenin plastik deformasyon davranışı, ürün kalitesi ve proses kararlılığı açısından kritik bir parametredir. Ancak mevcut sistemlerde, tav fırınından çıkan slabların haddeleme hattına taşınması sırasında açık transfer bölgelerinde ilerlemesi, önemli düzeyde ısı kayıplarına neden olmaktadır. Bu kayıplar temel olarak radyasyon ve konveksiyon mekanizmaları ile gerçekleşmekte olup, hava akışı gibi çevresel faktörler tarafından da etkilenmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, haddeleme süreçlerinde transfer bölgelerinde oluşan ısı kayıplarını azaltmak amacıyla farklı ısı koruma sistemlerinin geliştirildiği görülmektedir [3 ve 4].

Özellikle ısı koruma üniteleri (Heat Conservation Units - HCU), kaba haddeleme makineleri ile bitirme makineleri arasında yer alan transfer masası (delay table) üzerine yerleştirilerek termal kayıpların azaltılmasına yönelik olarak ele alınmaktadır [3 ve 4]. Bu sistemler, sıcak malzemenin çevre ile olan ısı alışverişini sınırlayan bir örtü mekanizması olarak değerlendirilmektedir. Isı koruma sistemlerinin performansının, kalkan ile malzeme arasındaki mesafe, yüzey özellikleri ve sistem tasarım parametreleri gibi değişkenlere bağlı olduğu literatürde belirtilmektedir [2 ve 4]. Bu bağlamda, çeşitli çalışmalar bu tür sistemlerin transfer sürecindeki termal kayıpların azaltılmasına katkı sağlayabildiğini ortaya koymaktadır. Transfer aşamasında meydana gelen ısı kayıpları yalnızca sıcaklık düşüşü ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda üretim sürecinin genel dinamiklerini de etkilemektedir [1]. Haddeleme girişindeki sıcaklık değişimleri, deformasyon davranışını etkileyerek proses parametrelerinde değişikliklere yol açabilmektedir [5]. Bu durum, tav fırını çalışma koşullarının belirlenmesinde dikkate alınan önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Enerji tüketimindeki değişimlerin, üretim maliyetleri ve çevresel etkiler ile ilişkili olduğu literatürde sıklıkla ele alınmaktadır.

Özellikle fosil yakıt kullanımına bağlı emisyonların azaltılması, endüstriyel üretim süreçlerinde önemli araştırma alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda enerji verimliliğine yönelik sistemler, sürdürülebilir üretim yaklaşımları içinde değerlendirilmektedir. Bu proje kapsamında ele alınan "Haddeleme Öncesi Isı Koruma Sistemi", transfer bölgesinde oluşan ısı kayıplarının azaltılmasına yönelik literatürde yer alan çalışmalar temel alınarak geliştirilmiş bir yaklaşımdır. Önerilen sistem, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hidrolik kontrollü hareket edebilen ısı kalkanı yapılarından oluşmaktadır. Bu kalkanlar, transfer süresi boyunca malzeme yüzeyini kapatarak ısı transfer mekanizmalarını sınırlandırmayı amaçlamaktadır. Sistem tasarımında literatürde sıklıkla ele alınan iki temel yaklaşım olan ısı yansıtma (Heat Reflection - HRE) ve ısı depolama (Heat Storage Effect - HSE) prensipleri dikkate alınmaktadır [1, 2 ve 3]. Isı yansıtma mekanizması, yüzeylerden yayılan ısıyı geri yansıtılması ile ilişkilendirilirken, ısı depolama etkisi ise malzemenin ısıyı geçici olarak bünyesinde tutması ile açıklanmaktadır. Bu iki

yaklaşımın birlikte değerlendirilmesi, ısı koruma sistemlerinin tasarımında kullanılan temel yöntemler arasında yer almaktadır.

Ayrıca literatürde, transfer sürecinde sıcaklık dağılımının daha dengeli hale getirilmesinin proses stabilitesi ile ilişkili olduğu ifade edilmektedir [1]. Bu kapsamda, transfer masası üzerine entegre edilen ısı koruma elemanlarının hidrolik sistemler aracılığıyla kontrol edilebildiği ve üretim akışı ile uyumlu şekilde çalıştırılabildiği çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır. Kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklık ve termal şok dayanımına sahip olması gerektiği de literatürde vurgulanan tasarım kriterleri arasında yer almaktadır.

Literatürde ayrıca bu tür sistemlerin enerji tüketimi, üretim verimliliği ve çevresel etkiler üzerindeki rolü çeşitli araştırmalar kapsamında incelenmektedir [1 ve 6]. Isı kayıplarının azaltılmasının, tav fırınlarının çalışma koşulları ve enerji ihtiyacı ile ilişkili olduğu ifade edilmektedir. Bununla birlikte endüstriyel uygulamalarda sistemlerin teknik ve ekonomik etkileri farklı çalışmalarda değerlendirilmiş olup, bu alandaki araştırmalar devam etmektedir.

Sıcak haddeleme proseslerinde enerji verimliliği ve sıcaklık kontrolü üzerine yapılan çalışmalar, özellikle kaba haddeleme ile bitirme haddelemesi arasındaki transfer bölgesine odaklanmaktadır [1 ve 5]. Bu bölgenin proses içerisindeki kritik önemi literatürde vurgulanmakta olup, bu alanda meydana gelen ısı kayıpları farklı araştırmalara konu olmuştur. Araştırmalar, slabın kaba haddelemeden çıktıktan sonra bitirme hattına ulaşana kadar uzun bir transfer masası boyunca ilerlediğini göstermektedir. Bu süreçte malzeme yüksek sıcaklıklarda bulunduğundan çevre ile yoğun bir ısı alışverişi gerçekleşmektedir. Literatürde bu ısı kaybı mekanizmaları arasında radyasyonun baskın olduğu, konveksiyon ve iletim yoluyla oluşan kayıpların da sürece katkı sağladığı belirtilmektedir [1 ve 5]. Transfer sürecinde slab boyunca sıcaklık dağılımında farklılıklar oluşabildiği ve bu farkın çeşitli proses koşullarına bağlı olarak değiştiği literatürde ifade edilmektedir. Bu durum, haddeleme sürecinin kontrolü açısından dikkate alınan önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir [1 ve 5]. Isı koruma sistemleri literatürde pasif, aktif ve mekanik çözümler olmak üzere farklı kategorilerde ele alınmaktadır. Pasif sistemler yüzey özellikleri üzerinden ısı kaybını azaltmayı hedeflerken, aktif sistemler dış enerji girdisi ile ısı transferini kontrol etmeye dayanmaktadır. Mekanik çözümler arasında ise coil box gibi sistemler yer almaktadır ve bu sistemlerin farklı tasarım ve maliyet özelliklerine sahip olduğu bildirilmektedir [1, 3 ve 4]. Literatürde yer alan bu yaklaşımlar değerlendirildiğinde, transfer bölgesinde meydana gelen ısı kayıplarının yalnızca enerji tüketimi açısından değil; proses kararlılığı, ürün kalitesi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle mevcut çalışma kapsamında geliştirilen sistem yaklaşımının mühendislik ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından ortaya koyduğu katkının ayrıca değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışma, demir-çelik endüstrisinde sıcak haddeleme prosesinin en kritik aşamalarından biri olan slab transfer bölgesinde meydana gelen ısı kayıplarının azaltılmasına yönelik bir mühendislik çözümünü ele almaktadır [1]. Sıcak haddeleme sürecinde tav fırınından çıkan yüksek sıcaklıktaki slablar, kaba haddeleme ile bitirme haddelemesi arasında yer alan transfer masası üzerinde belirli bir mesafe boyunca açık atmosfer koşullarında taşınmaktadır [7]. Bu süreçte malzeme; yüksek sıcaklık farkı, çevresel hava akımları ve yüzey koşulları nedeniyle radyasyon, konveksiyon ve merdane temasından kaynaklanan iletim yoluyla önemli düzeyde ısı kaybına uğramaktadır.

Özellikle yaklaşık 1050-1060°C seviyelerinde transfer edilen slabların çevre ile yoğun ısı alışverişine maruz kalması, proses açısından kritik sonuçlar doğurmaktadır [2]. Transfer süresi boyunca slabın baş ve kuyruk bölgeleri arasında oluşan sıcaklık farklılıkları (head-to-tail sıcaklık farkı), malzemenin termomekanik davranışını doğrudan etkilemekte; bu durum haddeleme sırasında deformasyon direncinin değişmesine, haddeleme kuvvetlerinde dalgalanmalara ve nihai ürün kalitesinde heterojenliğe neden olabilmektedir [5]. Bu nedenle transfer bölgesi, sıcak haddeleme prosesinde hem enerji kaybı hem de kalite kaybı açısından en hassas alanlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Isıl kayıpların artması, prosesin stabil şekilde sürdürülebilmesi için tav fırınlarının daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum doğalgaz tüketimini artırmakta, birim ürün başına enerji maliyetlerini yükseltmekte ve buna paralel olarak CO₂ emisyonlarını artırarak çevresel yük oluşturmaktadır. Dolayısıyla transfer bölgesinde ısı kayıplarının kontrol altına alınması, yalnızca operasyonel bir iyileştirme değil, aynı zamanda enerji verimliliği ve sürdürülebilir üretim açısından stratejik bir gereklilik haline gelmektedir. Bu kapsamda çalışma, DMADV (Define-Measure-Analyze-Design-Verify) metodolojisi temel alınarak yapılandırılmıştır.

İlk aşamada problem tanımlanmış, transfer bölgesindeki ısı kayıplarının süreç üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Ardından ölçüm ve analiz aşamalarında ısı kaybına neden olan temel mekanizmalar değerlendirilmiş ve sistematik bir mühendislik bakış açısıyla ele alınmıştır. Tasarım aşamasında ise endüstriyel koşullara uygun, hidrolik kontrollü, açılır-kapanır modüler ısı muhafaza kalkanı geliştirilmiştir. Bu sistem, transfer masası üzerine entegre edilerek slabın çevresel etkilerden kısmen izole edilmesini ve özellikle radyasyon ile konveksiyon kaynaklı ısı transferinin azaltılmasını hedeflemektedir. Çalışmanın metodolojik akışı beş temel aşamadan oluşmaktadır. Define (Tanımlama) aşamasında transfer bölgesindeki ısı kaybı problemi ve sistem gereksinimleri belirlenmiştir. Measure (Ölçme) aşamasında saha verileri, proses parametreleri ve enerji tüketim değerleri değerlendirilmiştir. Analyze (Analiz) aşamasında radyasyon, konveksiyon ve iletim kaynaklı ısı kayıpları incelenmiştir. Design (Tasarım) aşamasında hidrolik kontrollü ısı muhafaza sistemi geliştirilmiştir.

Verify (Doğrulama) aşamasında ise analitik hesaplamalar, literatür verileri ve performans göstergeleri kullanılarak sistemin potansiyel etkileri değerlendirilmiştir. Bu çalışma, saha verileri kullanılarak gerçekleştirilen analitik tasarım ve mühendislik değerlendirmesi niteliğindedir. Çalışma kapsamında tam ölçekli deneysel uygulama veya CFD tabanlı detaylı sayısal doğrulama gerçekleştirilmemiştir. Sunulan performans sonuçları, literatürde raporlanan çalışmalar, saha verileri ve mühendislik hesaplamaları temel alınarak elde edilen öngörüsül değerlendirmeleri ifade etmektedir. Geliştirilen sistemin temel yaklaşımı, slabın transfer süresi boyunca mümkün olduğunca termal dengesini koruması ve sıcaklık düşüşünün minimize edilmesidir. Bu sayede haddeleme giriş sıcaklığının daha kararlı bir aralıkta tutulması, proses boyunca gerekli deformasyon enerjisinin daha stabil hale gelmesi ve üretim hattındaki değişkenliğin azaltılması amaçlanmaktadır. Literatürde benzer sistemlerin, sıcaklık stabilitesini artırarak proses kararlılığına katkı sağladığı ve termal kayıpları önemli ölçüde düşürdüğü ifade edilmektedir. Ayrıca yapılan enerji değerlendirmeleri, küçük sıcaklık düşüşlerinin dahi önemli miktarda enerji tüketimine karşılık geldiğini göstermektedir. Bu bağlamda 10°C seviyesindeki bir sıcaklık kaybının bile doğalgaz tüketimi üzerinde anlamlı bir artışa neden olduğu görülmektedir. Bu nedenle önerilen ısı muhafaza sisteminin uygulanması, sadece ısı kayıplarının azaltılması değil, aynı zamanda doğrudan enerji maliyetlerinin düşürülmesi açısından da kritik bir

potansiyel taşımaktadır. Çalışmanın bir diğer önemli yönü, sistemin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisidir. Enerji tüketimindeki azalma, doğrudan fosil yakıt kullanımını azaltmakta ve CO₂ emisyonlarının düşmesine katkı sağlamaktadır. Bu durum, günümüzde artan karbon regülasyonları ve sürdürülebilir üretim hedefleri açısından demir-çelik sektörünün karşı karşıya olduğu çevresel baskıların azaltılmasına yönelik önemli bir katkı niteliği taşımaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, yalnızca bir ekipman tasarımı değil; aynı zamanda enerji verimliliği, proses optimizasyonu ve çevresel sürdürülebilirliği birlikte ele alan bütüncül bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır. DMADV metodolojisi ile desteklenen sistematik tasarım süreci sayesinde hem teorik hem de endüstriyel uygulama açısından uygulanabilirliği yüksek, yenilikçi ve ölçeklenebilir bir çözüm ortaya konulmaktadır. Bu yönüyle çalışma, demir-çelik endüstrisinde slab transfer süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik literatüre ve endüstriyel uygulamalara doğrudan katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Önemli Noktalar (Highlights):

Bu bölüm, sıcak haddeleme prosesinde tav fırınından çıkan slabların transfer masası üzerinde taşınması sırasında meydana gelen ısı kayıpların analitik olarak modellenmesi, sayısal yöntemlerle değerlendirilmesi ve önerilen ısı muhafaza sisteminin teknik tasarım parametrelerinin ortaya konulması amacıyla hazırlanmıştır. Çalışmanın ana odağı, slab transfer bölgesinde gerçekleşen radyasyon, konveksiyon ve kondüksiyon kaynaklı ısı kayıplarının mühendislik yaklaşımıyla incelenmesi ve bu kayıpları minimize etmeye yönelik hidrolik kontrollü ısı kalkanı sisteminin performansının teorik olarak değerlendirilmesidir.

- DMADV metodolojisi kullanılarak slab transfer bölgesindeki ısı kayıpları azaltmaya yönelik hidrolik kontrollü açılır-kapanır ısı muhafaza kalkanı sistemi tasarlanmış ve süreç temelli bir mühendislik yaklaşımı geliştirilmiştir.
- Önerilen sistem, transfer sırasında radyasyon ve konveksiyon kaynaklı ısı kayıplarını azaltarak haddeleme giriş sıcaklığının daha kararlı hale gelmesine ve proses sıcaklık homojenliğinin iyileşmesine katkı sağlamaktadır.
- Sistem uygulaması ile tav fırını enerji tüketiminin düşürülmesi, doğalgaz kullanımında azalma ve buna bağlı olarak CO₂ emisyonlarının azaltılması yönünde önemli bir potansiyel ortaya konulmaktadır.

3. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, sıcak haddeleme prosesinde tav fırınından çıkan slabların transfer süreci boyunca maruz kaldığı ısı kayıplarını azaltmaya yönelik hidrolik kontrollü pasif bir ısı muhafaza sistemi tasarlanmış ve sistemin teknik uygulanabilirliği analitik hesaplamalar, mühendislik tasarımı ve literatür tabanlı doğrulama yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın metodolojisi; proses verilerinin toplanması, sistem gereksinimlerinin belirlenmesi, mekanik tasarımın oluşturulması, analitik ısı transferi hesaplamalarının gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçların literatürde raporlanan benzer çalışmalarla karşılaştırılması aşamalarından oluşmaktadır. Araştırmada kullanılan temel veriler, sıcak haddeleme hattında gerçekleştirilen saha gözlemleri, işletme proses parametreleri ve literatürde yer alan mühendislik verilerinden elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan proses parametreleri arasında tav fırını çıkış sıcaklığı, haddeleme giriş sıcaklığı, slab boyutları, slab ağırlığı, transfer süresi, transfer hattı uzunluğu, çevre sıcaklığı, doğalgaz tüketimi ve fırın verimi yer almaktadır. Bu parametreler, sıcak haddeleme prosesinde

oluşan ısı kayıplarının hesaplanmasında ve önerilen sistemin performansının değerlendirilmesinde temel veri olarak kullanılmıştır.

Araştırma kapsamında elde edilen veriler üç ana grupta değerlendirilmiştir. Birinci grubu proses verileri oluşturmaktadır. Bu grupta slab sıcaklığı, transfer süresi, üretim kapasitesi ve transfer hattına ilişkin teknik bilgiler yer almaktadır. İkinci grubu termodinamik hesaplamalarda kullanılan fiziksel veriler oluşturmaktadır. Bu kapsamda çeliğin özgül ısı kapasitesi, yoğunluğu, emisyon katsayısı, Stefan-Boltzmann sabiti ve çevresel koşullara ait parametreler analitik hesaplamalara dâhil edilmiştir. Üçüncü grubu ise enerji analizlerinde kullanılan doğalgaz tüketimi, enerji dönüşüm katsayıları ve fırın verim değerleri oluşturmaktadır.

Sistem tasarımı temel amaç, slabın transfer süreci boyunca çevre ile olan ısı alışverişini minimum seviyeye indirerek haddeleme giriş sıcaklığının korunmasını sağlamaktır. Bu doğrultuda geliştirilen sistem, slab transferi sırasında otomatik olarak açılıp kapanabilen hidrolik kontrollü hareketli bir koruma kalkanı olarak tasarlanmıştır. Sistem herhangi bir aktif ısıtma elemanı içermemekte olup tamamen pasif ısı muhafaza prensibi ile çalışmaktadır. Böylece sistem, ilave enerji tüketmeden yalnızca mevcut termal enerjinin korunmasına odaklanmaktadır. Çalışmanın analitik bölümünde ısı transferi hesaplamaları radyasyon, konveksiyon ve kondüksiyon mekanizmaları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde enerji korunumu prensibi esas alınmış, transfer süresince slabda meydana gelen sıcaklık değişimleri literatürde kabul gören termodinamik bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda elde edilen sonuçlar enerji kazanımı, sıcaklık değişimi ve proses kararlılığı açısından değerlendirilmiştir.

Analitik hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler, literatürde raporlanan ANSYS-Fluent tabanlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) çalışmaları ve benzer mühendislik uygulamaları ile karşılaştırılmıştır. Böylece geliştirilen sistemin yalnızca teorik olarak değil, mühendislik açısından uygulanabilirliği de değerlendirilmiştir. Çalışmada doğrudan deneysel uygulama gerçekleştirilmemiş olmakla birlikte, kullanılan hesaplama yöntemi, saha verileri ve literatür doğrulamaları birlikte değerlendirilerek önerilen sistemin teknik performansı kapsamlı şekilde analiz edilmiştir.

3.1. Çalışmada Kullanılan Materyaller (Materials Used in the Study)

Bu çalışmada kullanılan materyaller, sıcak haddeleme hattında transfer edilen slabın termal davranışını analiz etmek ve geliştirilen ısı muhafaza sisteminin performansını değerlendirmek amacıyla seçilmiştir. Çalışmanın temel materyalini sıcak haddelenen slab, transfer hattı, hidrolik hareket mekanizması, koruyucu ısı muhafaza kalkanı, yüksek sıcaklığa dayanıklı refrakter ve izolasyon malzemeleri, taşıyıcı çelik konstrüksiyon elemanları ile kontrol sistemleri oluşturmaktadır. Sistem tasarımı kullanılan tüm ekipmanlar sıcak haddeleme prosesinin yüksek sıcaklık koşullarına uygun olacak şekilde seçilmiş ve tasarım sürecinde mekanik dayanım, termal kararlılık, bakım kolaylığı ve işletme güvenliği kriterleri dikkate alınmıştır. Isı muhafaza kalkanında kullanılan yalıtım katmanları yüksek sıcaklıklarda düşük ısı iletkenlik sağlayacak şekilde değerlendirilmiş, taşıyıcı konstrüksiyon ise oluşabilecek termal genleşmeleri karşılayabilecek mekanik özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Hidrolik mekanizma, slabın transferi sırasında sistemin otomatik olarak açılıp kapanmasını sağlayacak şekilde planlanmıştır. Böylece yalnızca slab transferi esnasında devreye giren sistem sayesinde proses sürekliliği korunurken gereksiz mekanik hareketlerin önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

Sistemin kontrol mantığı, üretim hattının çalışma düzenine uygun olarak tasarlanmış olup ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.2. Pasif Isı Muhafaza Katmanının Çalışma Prensibi (Working Principle of Passive Heat Retention Layers)

Önerilen hidrolik kontrollü ısı muhafaza sistemi, sıcak haddeleme prosesinde slabın tav fırınından çıktıktan sonra haddeleme ünitesine ulaşıncaya kadar geçen transfer süresi boyunca meydana gelen ısı kayıplarını azaltmak amacıyla geliştirilmiş pasif bir termal koruma sistemidir. Sistemin temel çalışma prensibi, dışarıdan herhangi bir enerji girdisi oluşturmada slabın sahip olduğu mevcut termal enerjiyi mümkün olduğunca korumaya dayanmaktadır. Bu nedenle sistem aktif ısıtma elemanları, elektrikli rezistanslar, gaz brülörleri veya ilave enerji sağlayan herhangi bir ekipman içermemektedir. Koruma mekanizması tamamen yüksek sıcaklığa dayanıklı yalıtım katmanları, düşük emisyonlu yüzeyler ve hareketli koruyucu kalkan yapısı ile gerçekleştirilmektedir.

Pasif ısı muhafaza yaklaşımında amaç yeni bir ısı üretmek değil, mevcut ısıнын çevreye kaçışını sınırlandırmaktır. Tav fırınından yaklaşık 1050-1170°C sıcaklık aralığında çıkan slab, transfer süresince çevre sıcaklığı ile arasında oluşan yüksek sıcaklık farkı nedeniyle sürekli enerji kaybetmektedir. Bu enerji kaybı özellikle radyasyon ve konveksiyon mekanizmaları ile gerçekleşmektedir. Sıcaklık seviyesi yükseldikçe radyasyon kaynaklı enerji kayıpları Stefan-Boltzmann yasasına bağlı olarak önemli ölçüde artmakta ve toplam ısı kaybının büyük bölümünü oluşturmaktadır. Konveksiyon ise slab yüzeyi ile çevredeki hava arasında gerçekleşen ısı transferi sonucu oluşmaktadır. Pasif ısı muhafaza sistemi, bu iki temel kayıp mekanizmasını aynı anda sınırlandıracak şekilde tasarlanmıştır.

Sistemin en önemli bileşeni, slabın transferi sırasında üzerine kapanan hareketli ısı muhafaza kalkanıdır. Hidrolik silindirler yardımıyla çalışan bu mekanizma, slab transfer hattına ulaştığında otomatik olarak kapanmakta ve slab transfer bölgesini çevreleyen koruyucu bir hacim oluşturmaktadır. Böylece slab yüzeyi doğrudan açık atmosfer ile temas etmemekte, çevreye yayılan termal enerji önemli ölçüde sınırlandırılmaktadır. Transfer işlemi tamamlandığında hidrolik sistem tekrar devreye girerek kalkanı açmakta ve üretim hattının normal çalışma düzeni kesintiye uğramadan devam etmektedir.

Pasif katmanın çalışma mekanizması yalnızca fiziksel bir örtü görevi görmekten ibaret değildir. Koruyucu kalkanın iç yüzeyinde kullanılan yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeler, slab yüzeyinden yayılan radyatif enerjinin önemli bir bölümünü tekrar slab yüzeyine yönlendirmektedir. Bu sayede çevreye yayılan net radyasyon miktarı azalmakta ve slabın sıcaklığı daha uzun süre korunabilmektedir. Özellikle düşük emisyon katsayısına sahip yüzeylerin kullanılması, radyasyon kaynaklı enerji kayıplarının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Böylece sistem, herhangi bir enerji tüketmeden yalnızca mevcut enerjinin korunmasını sağlayan pasif bir termal reflektör gibi çalışmaktadır.

Sistem aynı zamanda konveksiyon kaynaklı ısı kayıplarının azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Açık atmosferde gerçekleşen transfer sırasında slab çevresinde sürekli hava hareketi meydana gelmekte ve bu durum sıcak yüzeyden çevreye gerçekleşen taşınım yoluyla ısı transferini artırmaktadır. Isı muhafaza kalkanının kapanmasıyla birlikte slab çevresinde daha kontrollü bir hava hacmi oluşmakta ve hava dolaşımı önemli ölçüde sınırlandırılmaktadır. Böylece konveksiyon katsayısı düşmekte ve slab yüzeyinden çevreye gerçekleşen enerji kaybı azalmaktadır. Bu etki özellikle rüzgârın yoğun olduğu açık transfer bölgelerinde sistem performansını daha da artırmaktadır.

Pasif katmanın sağladığı bir diğer önemli avantaj ise sıcaklığın slab boyunca daha homojen dağılmasına katkı sağlamasıdır. Koruma sistemi bulunmayan transfer hatlarında slabın baş ve kuyruk bölgeleri farklı sürelerde açık atmosferde kaldığından sıcaklık dağılımı homojenliğini kaybetmektedir. Önerilen sistem sayesinde slabın tamamı benzer termal koşullar altında korunmakta ve sıcaklık farkları önemli ölçüde azalmaktadır. Böylece yalnızca ortalama sıcaklık korunmamakta, aynı zamanda slab boyunca oluşan sıcaklık gradyanları da azaltılarak head-to-tail sıcaklık kararlılığı iyileştirilmektedir.

Sistemin tasarımında kullanılan izolasyon malzemeleri yüksek sıcaklık dayanımı, düşük ısı iletkenlik katsayısı, termal şok direnci ve uzun servis ömrü gibi kriterler dikkate alınarak seçilmiştir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık altında yapısal bütünlüğünü korurken aynı zamanda kalkan içerisindeki termal enerjinin mümkün olduğunca muhafaza edilmesini sağlamaktadır. Çelik taşıyıcı konstrüksiyon ise yüksek sıcaklıklarda meydana gelen termal genleşmeleri karşılayabilecek şekilde boyutlandırılmış ve mekanik dayanım kriterleri göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.

Pasif ısı muhafaza sistemi enerji tüketen bir sistem olmaması nedeniyle işletme maliyetleri açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. İlave elektrik enerjisi, doğalgaz veya başka bir enerji kaynağı gerektirmeden çalışması, sistemin işletme giderlerini oldukça düşük seviyede tutmaktadır. Bunun yanında hareketli parçaların sınırlı olması bakım ihtiyacını azaltmakta ve sistem güvenilirliğini artırmaktadır. Bu özellikleri sayesinde önerilen tasarım, enerji verimliliği ile bakım kolaylığını birlikte sağlayan sürdürülebilir bir mühendislik çözümü olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak geliştirilen pasif ısı muhafaza katmanı; radyasyon ve konveksiyon kaynaklı ısı kayıplarını azaltan, slab boyunca sıcaklık homojenliğini artıran, head-to-tail sıcaklık farkını düşüren, haddeleme giriş sıcaklığını koruyan ve ilave enerji tüketmeden çalışan yenilikçi bir mühendislik çözümüdür. Analitik hesaplamalar ve literatürde raporlanan benzer çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, sistemin hem enerji verimliliği hem de proses kararlılığı açısından önemli katkılar sağlayabilecek teknik bir çözüm olduğu değerlendirilmektedir.

3.3. Sistem Tasarım Kriterleri ve Mühendislik Yaklaşımı (System Design Criteria and Engineering Approach)

Önerilen hidrolik kontrollü pasif ısı muhafaza sistemi tasarlanırken yalnızca ısı kayıplarının azaltılması hedeflenmemiş, aynı zamanda mevcut sıcak haddeleme hattına herhangi bir proses değişikliği gerektirmeden entegre edilebilecek, güvenli, sürdürülebilir ve bakım açısından uygulanabilir bir mühendislik çözümü geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle sistem tasarımında termal performansın yanı sıra mekanik dayanım, işletme güvenliği, bakım kolaylığı, otomasyon uyumluluğu ve üretim sürekliliği birlikte değerlendirilmiştir. Sistemin hareket mekanizması olarak hidrolik tahrik sisteminin tercih edilmesinin temel nedeni, yüksek sıcaklık ortamlarında güvenilir çalışma performansının sağlanması ve ağır konstrüksiyon elemanlarını kontrollü şekilde hareket ettirebilmesidir. Transfer hattında kullanılan koruyucu kalkan yüksek sıcaklık etkisi altında çalıştığından, hareket sisteminin yüksek kuvvet üretebilmesi ve uzun süre kararlı performans gösterebilmesi önemli bir tasarım kriteri olarak değerlendirilmiştir. Hidrolik sistemler, düşük hızlarda yüksek kuvvet üretebilmeleri ve hareket kontrolünün hassas şekilde gerçekleştirilebilmesi nedeniyle bu tür endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Koruyucu kalkan geometrisi belirlenirken slabın transfer hareketini engellemeyecek, bakım işlemlerini zorlaştırmayacak ve transfer süresi boyunca maksimum koruma sağlayacak bir yapı

hedeflenmiştir. Bu kapsamda kalkanın açılma ve kapanma hareketleri transfer hattının çalışma çevrimi ile uyumlu olacak şekilde planlanmıştır. Böylece sistem yalnızca slab transferi sırasında devreye girmekte, transfer tamamlandıktan sonra otomatik olarak başlangıç konumuna dönmektedir. Bu yaklaşım sayesinde üretim hattında ilave bekleme süresi oluşturulmadan enerji verimliliği artırılmaktadır. Sistem tasarımında kullanılan izolasyon malzemelerinin seçiminde yüksek sıcaklık dayanımı, düşük ısı iletkenlik katsayısı, termal şok direnci, mekanik mukavemet ve uzun servis ömrü temel kriterler olarak dikkate alınmıştır. Aynı zamanda kullanılan malzemelerin bakım ve değişim işlemlerinin kolay gerçekleştirilebilmesi de tasarım sürecinde göz önünde bulundurulmuştur. Böylece sistemin yalnızca laboratuvar koşullarında değil, gerçek endüstriyel üretim ortamlarında da uygulanabilir olması hedeflenmiştir. Mühendislik yaklaşımı kapsamında sistem tasarımı enerji verimliliği, proses güvenilirliği ve sürdürülebilir üretim hedeflerini birlikte destekleyecek şekilde geliştirilmiştir. Bu doğrultuda sistem, mevcut termal enerjinin korunmasını sağlayarak ilave enerji tüketimini önlemekte, üretim hattının çalışma düzenini değiştirmeden uygulanabilmekte ve yüksek yatırım gerektiren proses değişikliklerine ihtiyaç duymadan enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde önerilen tasarım, yalnızca bir koruyucu kalkan mekanizması değil; mekanik tasarım, termal analiz, otomasyon uyumluluğu ve enerji verimliliği kriterlerinin birlikte ele alındığı bütünsel bir mühendislik çözümüdür. Bu yaklaşım, sistemin endüstriyel uygulanabilirliğini artırmakta ve sıcak haddeleme proseslerinde kullanılabilecek yenilikçi bir teknoloji olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Sistem tasarım sürecinde mühendislik kararlarının yalnızca deneyim ve saha gözlemlerine dayanmaması, aynı zamanda bilimsel yöntemlerle desteklenmesi amacıyla Pareto analizi ve Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) birlikte kullanılmıştır. İlk aşamada sıcak haddeleme hattındaki proses adımları enerji kaybı açısından değerlendirilmiş ve Pareto analizi ile toplam ısı kaybına en fazla katkı sağlayan proses bölgesi belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, enerji kayıplarının büyük bölümünün slabın tav fırınından çıktıktan sonra açık atmosferde ilerlediği transfer hattında meydana geldiği belirlenmiş ve sistem tasarımı bu kritik bölgeye odaklanacak şekilde planlanmıştır.

Tablo 1. Çalışmada DMADV metodolojisinin uygulanışı
(Table 1. Application of the DMADV methodology in this study)

DMADV Aşaması	Bu Çalışmada Gerçekleştirilen Faaliyet
Define	Transfer hattında meydana gelen ısı kaybı problemi tanımlanmış, enerji tüketimi ve proses kararlılığı üzerindeki etkileri belirlenmiştir.
Measure	Transfer hattı uzunluğu, slab giriş sıcaklığı, haddeleme giriş sıcaklığı, transfer süresi, doğalgaz tüketimi ve proses parametreleri saha kayıtlarından elde edilmiştir.
Analyze	Radyasyon, konveksiyon ve iletim kaynaklı ısı kayıpları analitik olarak incelenmiş, Pareto analizi ile en kritik enerji kayıp bölgesi belirlenmiştir.
Design	Hidrolik kontrollü pasif ısı muhafaza sistemi geliştirilmiş, AHP yöntemi kullanılarak en uygun hareket mekanizması seçilmiştir.
Verify	Sistem performansı analitik hesaplamalar, literatürde raporlanan çalışmalar ve mühendislik değerlendirmeleri potansiyel performansı değerlendirilmiştir.

Kritik proses bölgesi belirlendikten sonra koruyucu sistemin mekanik tasarımında kullanılabilecek alternatif çözümler Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda hidrolik, pnömatik ve elektrik motorlu hareket sistemleri; yüksek sıcaklık dayanımı, taşıma kapasitesi, hareket hassasiyeti, bakım gereksinimi, enerji tüketimi, yatırım maliyeti, proses uyumluluğu, işletme güvenliği ve uzun dönem işletme performansı kriterleri açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sırasında her kriterin sıcak haddeleme süreci üzerindeki etkisi dikkate alınmış ve kriter ağırlıkları mühendislik değerlendirmeleri ile literatürde önerilen tasarım esasları doğrultusunda belirlenmiştir.

AHP değerlendirmesi sonucunda hidrolik tahrik sisteminin yüksek kuvvet üretme kapasitesi, ağır yükleri güvenli şekilde hareket ettirebilmesi, yüksek sıcaklık ortamlarında güvenilir çalışması ve mevcut sıcak haddeleme hattına minimum yapısal değişiklik ile entegre edilebilmesi nedeniyle en uygun alternatif olduğu belirlenmiştir. Aynı değerlendirme sürecinde koruyucu kalkanın geometrisi, izolasyon malzemelerinin seçimi ve sistem bileşenlerinin yerleşimi de enerji verimliliği, mekanik dayanım ve bakım kolaylığı kriterleri dikkate alınarak optimize edilmiştir.

Sonuç olarak Pareto analizi ile kritik enerji kayıp bölgesi belirlenmiş, Analitik Hiyerarşi Prosesi kullanılarak ise bu probleme en uygun mühendislik çözümü seçilmiştir. Böylece geliştirilen hidrolik kontrollü pasif ısı muhafaza sistemi yalnızca teorik hesaplamalara değil, sistematik karar verme yöntemleriyle desteklenen bilimsel bir tasarım sürecine dayandırılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan veriler saha gözlemleri, proses kayıtları, literatür verileri ve analitik hesaplamalardan elde edilmiştir. Çalışmanın temel veri setini slab giriş sıcaklığı, haddeleme giriş sıcaklığı, transfer süresi, transfer hattı uzunluğu, slab kütlesi, üretim kapasitesi, doğalgaz tüketimi ve ortam sıcaklığı oluşturmaktadır. Proses verileri işletme koşullarından elde edilen gerçek üretim parametrelerini temsil etmekte olup analitik hesaplamalarda temel girdi olarak kullanılmıştır. Bunun yanında literatürde raporlanan termal analiz sonuçları ve ısı transfer modelleri sistem tasarımının oluşturulmasında referans olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada deneysel laboratuvar verisi kullanılmamış olup tüm değerlendirmeler saha verileri, mühendislik hesaplamaları ve literatürde doğrulanmış termodinamik modeller esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan veri setleri, önerilen pasif ısı muhafaza sisteminin termal performansının değerlendirilmesi amacıyla seçilmiş ve enerji verimliliği analizlerinde temel girdi olarak kullanılmıştır.

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), sistem tasarımında kullanılacak hareket mekanizmasının belirlenmesi amacıyla uygulanmıştır. İlk aşamada değerlendirme kriterleri belirlenmiş, ardından hidrolik, pnömatik ve elektrik motorlu sistemler bu kriterler açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar Saaty'nin 1-9 önem ölçeği esas alınarak gerçekleştirilmiş ve her kriter için alternatiflerin göreceli üstünlükleri değerlendirilmiştir. Daha sonra kriter ağırlıkları hesaplanmış ve ağırlıklı karar matrisi oluşturularak alternatif sistemlerin toplam puanları elde edilmiştir. Böylece sıcak haddeleme hattının çalışma koşullarına en uygun hareket mekanizması sistematik bir karar verme yaklaşımı ile belirlenmiştir.

Tablo 2. Pasif ısı muhafaza sistemi tasarımında kullanılan ahp karar değerlendirme matrisi

(Table 2. AHP decision evaluation matrix used in the design of the passive heat preservation system)

Değerlendirme Kriteri	Kriter Ağırlığı (%)	Hidrolik Sistem	Pnömatik Sistem	Elektrik Motorlu Sistem
Yüksek sıcaklık dayanımı	20	5	3	4
Taşıma kapasitesi	15	5	2	4
Hareket hassasiyeti	10	5	4	4
Bakım kolaylığı	10	4	3	4
Enerji tüketimi	10	4	5	4
Yatırım maliyeti	10	4	5	3
Proses uyumluluğu	15	5	3	4
İşletme güvenliği	10	5	3	4
Servis ömrü	10	5	3	4
Toplam Ağırlıklı Değerlendirme	100	4.75	3.35	3.95
Not: Değerlendirme puanlamasında 1 en düşük, 5 ise en yüksek uygunluk seviyesini ifade etmektedir. Kriter ağırlıkları sıcak haddeleme prosesinin çalışma koşulları, sistem gereksinimleri ve mühendislik değerlendirmeleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) sonucunda en yüksek ağırlıklı puana sahip alternatif hidrolik hareket sistemi olarak belirlenmiş ve önerilen pasif ısı muhafaza sisteminde bu mekanizma tercih edilmiştir.				

Tablo 2 incelendiğinde, hidrolik hareket sisteminin toplam ağırlıklı değerlendirme puanının diğer alternatiflere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık dayanımı, taşıma kapasitesi, proses uyumluluğu ve işletme güvenliği kriterlerinde elde ettiği üstün performans nedeniyle hidrolik sistem en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Pnömatik sistem düşük yatırım maliyeti ve enerji tüketimi açısından avantaj sağlasa da yüksek sıcaklık ortamlarında ağır yüklerin güvenli şekilde taşınmasında yetersiz kalmaktadır. Elektrik motorlu sistem ise hassas hareket kabiliyeti sunmasına rağmen yüksek sıcaklık koşullarında ek koruma ihtiyacı ve mekanik entegrasyon gereksinimi nedeniyle hidrolik sistemin gerisinde kalmıştır. Bu nedenle önerilen pasif ısı muhafaza sisteminde hidrolik tahrik mekanizmasının kullanılması teknik ve ekonomik açıdan en uygun çözüm olarak değerlendirilmiştir.

3.4. Literatür Tabanlı Tasarım Yaklaşımları ve Sistem Geliştirme Kriterleri (Literature-Based Design Approaches and System Development Criteria)

Bu çalışmada geliştirilen sistem tasarımı oluşturulurken, literatürde sıcak haddeleme, tavlama prosesleri, atık ısı geri kazanımı ve termal verimlilik artırımı üzerine geliştirilen mühendislik uygulamaları incelenmiş ve tasarım kriterleri bu çalışmalar doğrultusunda belirlenmiştir. İncelenen çalışmalar, özellikle proses sırasında oluşan ısı kayıplarının azaltılması, mevcut enerjinin sistem içerisinde yeniden kullanılması ve üretim sürekliliğinin korunması üzerine yoğunlaşmaktadır [6, 8, 9, 10, 11, 12 ve 13]. Literatürde öne çıkan ilk yaklaşım, transfer bölgesinde kullanılan ısı muhafaza panelleri ve hareketli kalkan sistemleridir. Özellikle sıcak bant tesislerinde kaba haddeleme ile bitirme haddelemesi arasında yer alan transfer masaları üzerine yerleştirilen kaldırılabilir ısı kalkanlarının, termal kayıpların azaltılmasında yüksek performans gösterdiği belirtilmektedir [6]. Bu sistemlerde çok sayıda sökülebilir izolasyon elemanının kullanılması, bakım kolaylığı ve operasyonel esneklik sağlamaktadır [6]. Ayrıca her bir kalkan elemanının bağımsız sürücü sistemleri ile kontrol edilmesi sayesinde proses şartlarına göre

lokal müdahale gerçekleştirilebilmektedir [6]. Bu yaklaşım, çalışmada önerilen hidrolik kontrollü ısı muhafaza kalkanı sisteminin temel mekanik tasarım mantığını oluşturmaktadır [6]. Literatürde dikkat çeken ikinci yaklaşım ise atık ısı geri kazanımı ve ön ısıtma sistemleri üzerine kuruludur. Tavlama ve ısıtma fırınlarının egzoz çıkışlarına yerleştirilen ısı borulu ısı değiştiriciler sayesinde yüksek sıcaklıktaki atık enerjinin geri kazanılarak sisteme yeniden kazandırılması amaçlanmaktadır [8]. Bunun yanında yüksek ısıl iletkenliğe sahip bakır borulu plakalar aracılığıyla fırın yüzeylerinde biriken fazla enerjinin emilmesi ve yardımcı proseslerde değerlendirilmesi hedeflenmektedir [9]. Benzer şekilde fırın izolasyon katmanları içerisine entegre edilen hava ön ısıtma kanalları ile sisteme giren havanın önceden ısıtılması sağlanarak toplam enerji tüketimi azaltılmaktadır [10]. Bununla birlikte modern sistem tasarımlarında yalnızca enerji geri kazanımı değil, çok amaçlı enerji kullanımı ve yan ürün geri kazanımı da önem kazanmaktadır. Bu kapsamda egzoz gazları içerisinde bulunan haddeme yağlarının yoğunlaştırılarak yeniden kazanılması, atık ısının distilasyon sistemlerinde kullanılarak saf su üretimine dönüştürülmesi ve geri kazanılan enerjinin bölgesel ısıtma sistemlerine yönlendirilmesi gibi uygulamalar literatürde yer almaktadır [8, 11 ve 12]. Bu yaklaşımlar, enerji verimliliğinin yalnızca proses içerisinde değil tesis ölçeğinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir [11 ve 12]. Ancak bu çalışmanın temel odağı doğrudan atık ısı geri kazanımı değil, transfer bölgesinde oluşan ısı kayıplarının önleyici mühendislik yaklaşımıyla azaltılmasıdır. Bu nedenle literatürde yer alan geri kazanım uygulamaları, sistem tasarımına doğrudan aktarılmamış; yalnızca enerji verimliliği yaklaşımını destekleyen referans çerçevesi olarak değerlendirilmiştir.

Sistem performansını artırmaya yönelik bir diğer tasarım yaklaşımı ise bakım ve operasyonel verimlilik odaklı uygulamalardır. Isı transfer yüzeylerinde oluşan kireç ve tufal birikiminin temizlenmesine yönelik hareketli kazıyıcı mekanizmalar, aktif hava sirkülasyonu sağlayan fan sistemleri, seramik boru yapıları ve filtreleme ekipmanları sayesinde sistem sürekliliği artırılmaktadır [12 ve 13]. Ayrıca geri kazanım ekipmanlarının korunması amacıyla partikül filtreleri ve sıcak gaz depolama sistemleri kullanılmaktadır [13].

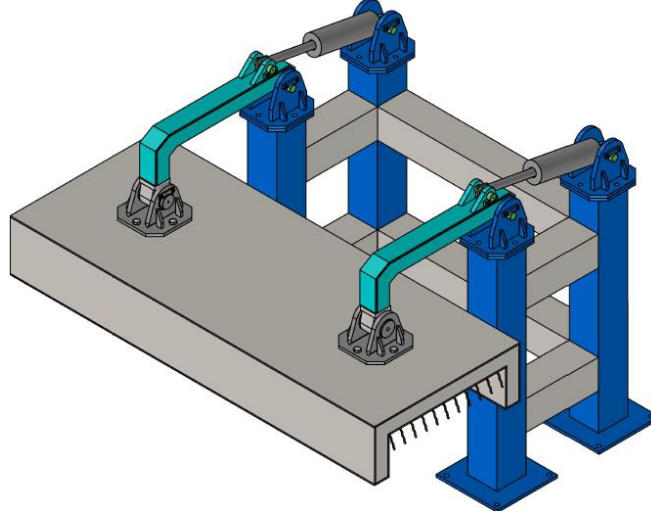
Bu literatür değerlendirmeleri doğrultusunda geliştirilen sistem; ısı muhafazası, atık ısı yönetimi, otomasyon, bakım kolaylığı ve enerji verimliliği kriterlerini birlikte ele alan bütüncül bir mühendislik yaklaşımı ile tasarlanmıştır. Böylece önerilen hidrolik kontrollü ısı muhafaza sistemi yalnızca transfer bölgesindeki ısı kayıplarını azaltmayı değil, aynı zamanda demir-çelik üretim süreçlerinde sürdürülebilir ve yüksek verimli bir operasyon modeli oluşturmayı hedeflemektedir [6, 8, 9, 10, 11, 12 ve 13].

3.5. Sistem Tasarımının Genel Yapısı Isı Transferi

Mekanizmalarının Analitik Modellenmesi (General Structure of System Design: Analytical Modeling of Heat Transfer Mechanisms)

Bu çalışmada önerilen sistem, sıcak haddeme prosesinde tav fırınından çıkan slabların haddeme ünitesine transferi sırasında meydana gelen ısı kayıplarını azaltmak amacıyla geliştirilmiş hidrolik kontrollü ısı muhafaza kalkanı (Heat Conservation Shield System) tasarımına dayanmaktadır [14]. Literatürde transfer bölgesinin, haddeme sürecindeki en kritik ısı kayıp bölgelerinden biri olduğu ve özellikle radyasyon kaynaklı ısı kaybının baskın olduğu belirtilmektedir [14]. Önerilen sistem, transfer masası (delay table) üzerine entegre edilen açılır-kapanır ısı kalkanı yapısından oluşmaktadır. Sistem,

operatör kontrollü olarak çalışmakta olup transfer süresince kapanarak slab yüzeyini çevresel etkilerden izole etmektedir.



Şekil 1. Isı kalkanı sistem tasarımı
(Figure 1. Heat shield system design)

Önerilen ısı muhafaza sisteminin performansının değerlendirilebilmesi için sistem tasarımında esas alınan proses ve işletme parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler; slab sıcaklığı, transfer hattı koşulları, fırın çalışma karakteristikleri ve enerji tüketim değerleri gibi sistemin termal davranışını doğrudan etkileyen değişkenleri kapsamaktadır. Çalışmada kullanılan parametreler saha verileri esas alınarak oluşturulmuş olup, gerçekleştirilen enerji analizleri ve ısı kaybı hesaplamalarının temel girdilerini oluşturmaktadır. Bu kapsamda sunulmuştur.

Tablo 3. Saha tabanlı tesis ve proses parametreleri
(Table 3. Field-Based Plant and Process Parameters)

Parametre	Değer	Açıklama
Slab Tav Fırını Kapasitesi	250 ton/saat	Tesis Üretim Kapasitesi
Slab Giriş Sıcaklığı	1170°C	Tav Fırınından Çıkış Sıcaklığı
Haddeleme Giriş Sıcaklığı	1160°C	Transfer Sonrası Hedef Giriş Sıcaklığı
Sıcaklık Düşüşü (ΔT)	10°C	Transfer Hattında Oluşan Kayıp
Ortam Sıcaklığı	20°C	Çevresel Sıcaklık Koşulu
Doğalgaz Tüketimi	33 Nm ³ /ton	Ortalama Spesifik Tüketim
Slab Ağırlığı	15 ton	Tek Slab Kütlesi
Fırın Verimi	%60	Isıl Verim Katsayısı
Transfer Hat Uzunluğu	120-126 m	Sahada Ölçülen Transfer Mesafesi
Transfer Süresi Etkisi	Orta-Yüksek	Isı Kaybı Üzerindeki Operasyonel Etki

Tablo 3'te yer alan haddeleme öncesi ısı muhafaza sistemi uygulanan tesisin temel işletme parametreleri verilmiştir. Slab giriş ve çıkış sıcaklıkları, fırın kapasitesi, doğalgaz tüketimi ve transfer hattı uzunluğu gibi kritik proses değişkenleri, sistemin saha koşullarındaki çalışma sınırlarını tanımlamak amacıyla sunulmuştur. Bu veriler, ısı kaybı analizlerinin temel giriş parametrelerini oluşturmaktadır.

Tablo 4. Enerji ve ısı kaybı hesap parametreleri
(Table 4. Energy and Heat Loss Calculation Parameters)

Parametre	Değer	Birim
Kütle (<i>m</i>)	15.000	kg
Özgül Isı (<i>C_p</i>)	0.6	kJ/kg°C
Sıcaklık Farkı (<i>ΔT</i>)	10	°C
Isı Kaybı (<i>Q</i>)	90.000	kJ
Gerçek Enerji İhtiyacı	150.000	kJ
Doğalgaz Eşdeğeri	4.2	Nm ³ /slab
Ton Başına Tüketim	0.28	Nm ³ /ton

Tablo 4 içerisinde yer alan slab transfer sürecinde meydana gelen 10°C'lik sıcaklık düşüşüne bağlı olarak oluşan ısı kaybı ve bunun doğalgaz eşdeğeri hesaplanmıştır. Hesaplamalar, kütle, özgül ısı kapasitesi ve fırın verimi dikkate alınarak yapılmış olup, sistemin enerji kaybı üzerindeki etkisini sayısal olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 5. Ekonomik kazanç ve tasarruf analizi
(Table 5. Economic Gain and Savings Analysis)

Parametre	Değer
Günlük Üretim	6000 ton
Günlük Doğalgaz Tasarrufu	1500-1800 Nm ³
Günlük Ekonomik Kazanç	27.000-32.400 TL
Yıllık Çalışma Günü	300 gün
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu	450.000-540.000 Nm ³

Tablo 6. Yatırım fizibilitesi ve geri dönüş analizine ilişkin değerlendirme
(Table 6. Preliminary investment feasibility and payback assessment)

Parametre	Değerlendirme
Yatırım Kapsamı	Hidrolik sistem + St52 mekanik yapı + izolasyon + otomasyon
Analiz Türü	Ön fizibilite
İşletme Kazancı	Doğalgaz tasarrufuna dayalı
ROI Durumu	48 ay
Bakım Analizi	Kestirimci Bakım
Sonuç	Ekonomik potansiyel mevcut

Tablo 6'da verilen yatırım fizibilitesi değerlendirmesi, bu çalışma kapsamında geliştirilen pasif hidrolik kontrollü Isı Muhafaza Kalkanı Sistemine aittir. Analizde aktif ısıtma sistemleri dikkate alınmamış olup değerlendirmeler yalnızca önerilen pasif sistemin yatırım potansiyeli, bakım gereksinimi ve enerji tasarrufu esas alınarak hazırlanmıştır. Isı muhafaza kalkanı sisteminin uygulanmasıyla elde edilen günlük ve yıllık enerji tasarrufu ile buna bağlı ekonomik kazanımlar sunulmuştur. Doğalgaz tüketimindeki azalma üzerinden yapılan hesaplamalar, sistemin hem işletme maliyetlerini düşürücü etkisini hem de yıllık bazda sağladığı finansal katkıyı göstermektedir.

Radyasyon Analizi: Yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 1000°C ve üzeri) en baskın ısı kaybı mekanizması radyasyon olup, net ısı kaybı Stefan-Boltzmann yaklaşımı ile ifade edilmektedir:

$$q = \varepsilon \sigma (T_h^4 - T_c^4) A \quad (1)$$

Q = Toplam ısı transfer miktarı (W)

q = Birim alandaki ısı akısı (W/m²)

ε = Yüzey emisyon katsayısı (-)

σ = Stefan-Boltzmann sabiti (5,67×10⁻⁸ W/m²K⁴)

A = Isı transfer yüzey alanı (m²)

T_h = Slab yüzey sıcaklığı (K)

T_c = Çevre sıcaklığı (K)

Bu ifadede yüzey emisyon katsayısı, Stefan-Boltzmann sabiti ve mutlak sıcaklıklar dikkate alınmaktadır. Literatür verilerine göre, uygun tasarlanmış ısı kalkanı sistemleri radyatif ısı transferini önemli ölçüde sınırlandırarak ısı akışını düşürmektedir.

Konveksiyon Analizi: Transfer masası boyunca hareket eden slabın çevre hava ile etkileşimi sonucunda oluşan ısı kaybı, taşınım katsayısı üzerinden modellenmektedir. Bu katsayı Nusselt, Reynolds ve Prandtl sayıları ile ilişkilendirilmekte olup akış rejiminin çoğunlukla türbülanslı olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle konvektif ısı kaybı, sistemin çalışma koşullarına ve hava akış hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Kondüksiyon (Merdane Teması): Slabın taşıyıcı merdaneler ile teması sonucunda meydana gelen ısı iletimi, kondüksiyon mekanizması ile açıklanmaktadır. Bu temas yüzeylerinde oluşan ısı transferi, merdane sıcaklığı ve temas süresi ile doğrudan ilişkilidir.

3.6. Sayısal Simülasyon ve Modelleme Yöntemleri (Numerical Simulation and Modeling Methods)

Bu çalışma kapsamında sistemin detaylı CFD, FEM veya transient termal simülasyonları gerçekleştirilmemiştir. Ancak önerilen sistemin gelecekte doğrulanmasına yönelik kullanılabilecek sayısal yöntemler değerlendirilmiştir. Literatürde transfer bölgesi termal analizlerinde CFD tabanlı yöntemler kullanılarak hava akışı, radyasyon etkileşimi ve sıcaklık dağılımı zamana bağlı olarak modellenmektedir. Özellikle ANSYS-Fluent tabanlı üç boyutlu geçici analizler, sistem performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen hidrolik kontrollü Isı Muhafaza Sistemi aktif ısıtma elemanı içermemekte olup pasif ısı koruma sistemi olarak sınıflandırılmaktadır. Sistemin termal etkisi; yüksek sıcaklık dayanımlı izolasyon malzemeleri, yansıtıcı yüzeyler ve slab ile çevre arasındaki ısı alışverişinin fiziksel olarak sınırlandırılması ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada sunulan performans değerlendirmeleri yalnızca pasif sistem mimarisi için geçerlidir. Aktif sistemlere ilişkin literatür sonuçları yalnızca karşılaştırmalı referans olarak değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda önerilen sistemin CFD tabanlı üç boyutlu transient analizler, deneysel sıcaklık ölçümleri ve pilot ölçekli saha testleri ile doğrulanması önerilmektedir.

3.7. Isı Muhafaza Sistemi Teknik Tasarım Parametreleri (Thermal Insulation System Technical Design Parameters)

Önerilen sistem, sıcak haddeleme hattında transfer masası üzerine entegre edilen hidrolik kontrollü açılır-kapanır ısı muhafaza kalkanlarından oluşmaktadır. Sistem, slabın transfer süresince çevresel etkilerden izole edilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Mekanik yapı St52 kalite çelik malzemedan imal edilmekte olup, sistem hidrolik silindirler aracılığıyla hareket ettirilmektedir. Toplam sistem ağırlığı yaklaşık 2192 kg olarak öngörülmektedir. Kalkan yapısının iç kısmında yüksek sıcaklığa dayanıklı, düşük emisyon özellikli izolasyon malzemeleri (seramik fiber veya taş yünü) kullanılmaktadır. Tasarımın temel amacı, slab ile çevre arasındaki ısı transfer yollarını minimize ederek özellikle radyasyon ve konveksiyon kaynaklı kayıpları azaltmaktır.

3.7.1. Pasif Isı Muhafaza Katmanının Yapısı ve Çalışma Prensibi (Structure and Working Principle of Passive Heat Insulation Layers)

Önerilen ısı muhafaza sisteminde kullanılan pasif katman, yüksek sıcaklık dayanımına sahip seramik fiber esaslı yalıtım malzemesi ile düşük emisyon katsayısına sahip yansıtıcı metal yüzeylerden

oluşmaktadır. Bu katman, herhangi bir dış enerji kaynağına ihtiyaç duymadan yalnızca fiziksel ve termal özellikleri sayesinde ısı transferini sınırlandırmaktadır. Pasif katmanın temel amacı, slab yüzeyi ile çevre atmosfer arasındaki termal etkileşimi azaltarak slabın transfer süresi boyunca sahip olduğu sıcaklığı mümkün olduğunca korumaktır. Pasif katman, yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyden çevreye gerçekleşen radyasyon kaynaklı enerji yayılımını düşük emisyon katsayılı yüzeyler sayesinde azaltmaktadır. Aynı zamanda seramik fiber yalıtım tabakası düşük ısı iletkenlik katsayısı sayesinde iletim yoluyla gerçekleşen ısı transferini sınırlandırmaktadır. Kalkan ile slab arasında oluşan kapalı hacim ise hava hareketini azaltarak doğal ve zorlanmış taşınım kaynaklı ısı kayıplarını önemli ölçüde düşürmektedir. Bu mekanizmalar birlikte değerlendirildiğinde pasif katman; radyasyon, iletim ve taşınım mekanizmalarının tamamı üzerinde etkili olmakta, slab boyunca daha kararlı bir sıcaklık dağılımı oluşturmakta ve transfer sürecindeki toplam ısı kaybını azaltmaktadır.

Pasif sistemlerin en önemli avantajı herhangi bir elektriksel veya yakıt destekli enerji girdisi gerektirmemesi, düşük bakım ihtiyacına sahip olması ve mevcut üretim hatlarına kolaylıkla entegre edilebilmesidir. Aktif sistemlerde ise rezistans, indüksiyon veya sıcak hava gibi ek enerji kaynakları kullanılarak slab yeniden ısıtılmaktadır. Buna karşılık bu çalışmada önerilen sistem, yalnızca mevcut ısının korunmasını hedefleyen pasif bir ısı muhafaza sistemi olarak tasarlanmıştır.

3.8. Enerji Kazanımı ve Analitik Değerlendirme (Energy Recovery and Analytical Evaluation)

Bu çalışmada sunulan sonuçlar dört farklı veri kaynağına dayanmaktadır.

- **Ölçülen veriler:** İşletmeden elde edilen saha verileri (slab sıcaklığı, transfer süresi, doğalgaz tüketimi, üretim kapasitesi vb.).
- **Hesaplanan veriler:** Enerji dengesi ve ısı transferi denklemleri kullanılarak analitik olarak hesaplanan sonuçlar.
- **Literatür tabanlı değerlendirmeler:** Benzer çalışmaların rapor ettiği deneysel ve sayısal bulgular.
- **Öngörülen performans sonuçları:** Önerilen sistemin uygulanması durumunda beklenen mühendislik kazanımları ve enerji tasarrufu tahminleri.

Analitik hesaplamalar, transfer sürecinde meydana gelen küçük sıcaklık düşüşlerinin dahi önemli enerji kayıplarına karşılık geldiğini göstermektedir. 10°C seviyesindeki bir sıcaklık kaybı, slab başına yaklaşık 0.25-0.3 Nm³/ton doğalgaz tüketimine karşılık gelmektedir. Günlük 6000 ton üretim kapasitesine sahip bir tesis için bu durum önemli bir enerji tasarrufu potansiyeli oluşturmaktadır. Yıllık bazda değerlendirildiğinde, önerilen sistemin uygulanması ile doğalgaz tüketiminde kayda değer bir azalma sağlanabileceği ve bunun ekonomik karşılığının milyon TL seviyelerinde olduğu hesaplanmaktadır. Buna ek olarak sistemin uygulanması, sadece enerji tüketimini değil aynı zamanda proses sıcaklık stabilitesini de iyileştirme potansiyeline sahiptir; bu durum haddeleme sırasında daha homojen deformasyon davranışı ve daha kararlı üretim koşulları oluşturmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, analitik ve sayısal çalışmalar önerilen ısı muhafaza sisteminin transfer bölgesindeki ısı kayıpları azaltmada etkili olabileceğini, enerji verimliliğini artırabileceğini ve proses kararlılığını iyileştirebileceğini ortaya koymaktadır. Ekonomik uygulanabilirlik açısından sistemin yatırım fizibilitesi ön değerlendirme düzeyinde ele alınmıştır. Hidrolik ekipmanlar, St52 kalite

çelik konstrüksiyon, otomasyon elemanları ve yüksek sıcaklık dayanımlı izolasyon bileşenleri dikkate alınarak sistem için yaklaşık yatırım maliyetinin endüstriyel kurulum ölçeğine bağlı olarak değişkenlik göstereceği öngörülmektedir.

Analitik enerji tasarrufu hesaplamalarına göre sistemin sağlayacağı doğalgaz tüketim azalması dikkate alındığında yatırımın belirli bir geri dönüş potansiyeli taşıdığı değerlendirilmektedir. Ancak bu çalışma kapsamında ayrıntılı CAPEX-OPEX analizi, bakım maliyetleri ve net yatırım geri dönüş süresi (ROI) hesaplanmamıştır. Bu nedenle ekonomik sonuçlar kesin yatırım fizibilitesi olarak değil, enerji tasarrufuna dayalı ön ekonomik değerlendirme olarak yorumlanmalıdır.

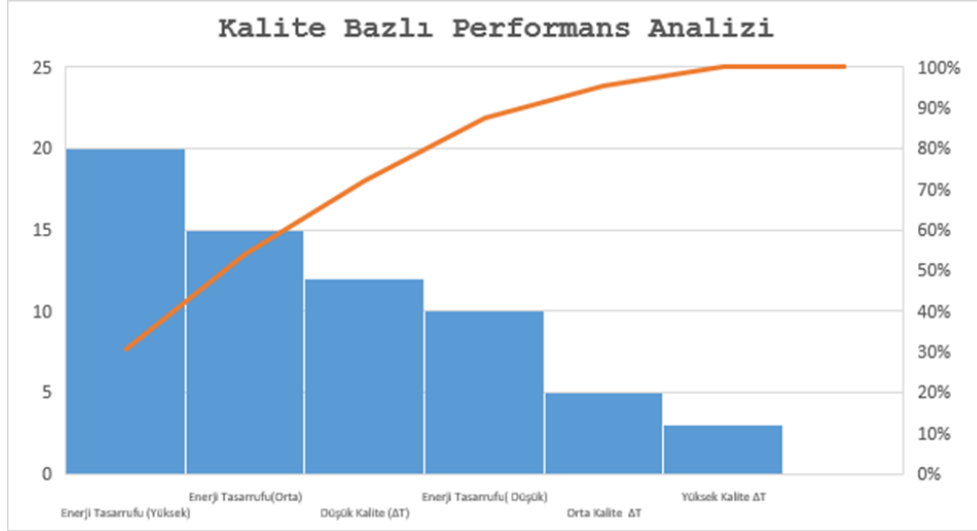
3.9. Kalite Bazlı Performans Analizi (Quality-Based Performance Analysis)

Isı muhafaza sistemi uygulamasının etkisini değerlendirmek amacıyla, üretim hattında yaygın olarak kullanılan üç farklı çelik kalite seviyesi için analiz yapılmıştır. Bu kalite seviyeleri; düşük karbonlu yapı çeliği, orta karbonlu konstrüksiyon çeliği ve yüksek kaliteli alaşımlı çelik olarak sınıflandırılmıştır. Her bir kalite grubunda sıcaklık stabilitesi ve enerji tüketimi açısından sistemin etkisi karşılaştırılmıştır. Analizler, özellikle transfer hattında oluşan sıcaklık kaybının ürün kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve ısı muhafaza sisteminin kalite bağımlı performansını göstermektedir.

Tablo 7. Farklı çelik kalite seviyelerinde ısı muhafaza sisteminin sıcaklık kontrolü ve enerji verimliliği üzerindeki etkisi
(Table 7. Effect of the heat conservation system on temperature control and energy efficiency across different steel grade levels)

Çelik Kalitesi	Kalkan Yok ΔT (°C)	Kalkan Var ΔT (°C)	Sıcaklık Stabilitesi	Enerji Tüketimi Etkisi
Düşük Kalite (Yapı Çeliği)	65	12	Orta	%10 tasarruf
Orta Kalite (Konstrüksiyon Çeliği)	65	5	Yüksek	%15 tasarruf
Yüksek Kalite (Alaşımlı Çelik)	65	<2	Çok Yüksek	%20+ tasarruf

Bu çalışmada kullanılan sıcaklık farkı parametreleri iki farklı kavramı ifade etmektedir. Analitik enerji hesaplamalarında kullanılan $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ değeri, slabın transfer hattı boyunca maruz kaldığı ortalama sıcaklık kaybını temsil etmektedir. Kalite bazlı performans analizinde kullanılan $\Delta T=65^{\circ}\text{C}$ değeri ise slabın baş (head) ve kuyruk (tail) bölgeleri arasında oluşan sıcaklık farkını ifade etmektedir. Dolayısıyla bu iki değer farklı termal parametreleri temsil etmekte olup birbirlerinin alternatifi değil, prosesin farklı yönlerini açıklayan göstergelerdir.



Grafik 1. Kalite bazlı performans analizi
(Figure 1. Quality-based performance analysis)

Grafik 1’de sunulan kalite bazlı performans analizi, önerilen ısı muhafaza sisteminin farklı çelik kalite seviyeleri üzerindeki termal etkisini ve enerji verimliliğine katkısını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, sistemin hem sıcaklık kaybını azaltmada hem de enerji tasarrufu sağlamada tüm kalite gruplarında belirgin bir iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, ısı kalkanı kullanılmadığı durumda tüm kalite seviyeleri için slab üzerindeki sıcaklık farkı (ΔT) 65°C olarak sabit kalmaktadır. Bu durum, transfer sürecinde çevresel etkilere bağlı olarak oluşan kontrolsüz ısı kaybının prosesin doğal bir sonucu olduğunu göstermektedir. Buna karşılık ısı muhafaza sisteminin devreye alınmasıyla birlikte sıcaklık farkı önemli ölçüde azalmış; düşük kalite çelikte 12°C , orta kalite çelikte 5°C ve yüksek kalite çelikte ise 2°C seviyesine kadar düşmüştür. Bu sonuçlar, sistemin özellikle yüksek hassasiyet gerektiren çelik kalitelerinde sıcaklık homojenliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Enerji verimliliği açısından değerlendirildiğinde, kalite seviyesine bağlı olarak sistemin sağladığı tasarruf oranlarının arttığı görülmektedir. Düşük kalite üretimde enerji tasarrufu %10 seviyesinde gerçekleşirken, orta kalite için bu oran %15’e, yüksek kalite üretimde ise %20’ye kadar yükselmektedir. Bu artış, sıcaklık stabilitesinin iyileşmesiyle birlikte fırın yeniden ısıtma ihtiyacının azalmasından kaynaklanmaktadır.

Elde edilen bulgular birlikte değerlendirildiğinde, önerilen ısı muhafaza sisteminin yalnızca termal kayıpları azaltmakla kalmadığı, aynı zamanda proses kararlılığını artırarak enerji tüketimini optimize edebileceği değerlendirilmektedir. Özellikle yüksek kalite çelik üretiminde sağlanan düşük ΔT değeri, ürünün mekanik özelliklerinde homojenlik ve boyutsal doğruluk açısından kritik bir avantaj sağlamaktadır. Bu durum, sistemin endüstriyel uygulamalarda yüksek katma değer oluşturabilecek bir çözüm olabileceğini göstermektedir. Bir önceki bölümde sunulan analitik hesaplamalar, tasarım parametreleri ve performans değerlendirmeleri doğrultusunda, sonraki bölümde sistemin termal, operasyonel ve ekonomik etkileri bütüncül şekilde yorumlanarak bulgular ve tartışmalar başlığı altında ele alınmıştır.

3.10. Önerilen Sistemin Homojen Sıcaklık Dağılımına Etkisi (Effect of the Proposed System on Homogeneous Temperature Distribution)

Sıcak haddeleme prosesinde slabın tav fırınından çıktıktan sonra açık atmosferde transfer edilmesi sırasında oluşan radyasyon ve konveksiyon kaynaklı ısı kayıpları yalnızca ortalama sıcaklığın düşmesine neden olmamakta, aynı zamanda slab boyunca sıcaklık dağılımının homojenliğini de olumsuz etkilemektedir. Transfer süresi boyunca özellikle slabın ön (head) ve arka (tail) bölgeleri farklı sürelerde çevre koşullarına maruz kaldığından, slab boyunca sıcaklık gradyanları oluşmakta ve haddeleme girişinde istenmeyen termal dengesizlikler meydana gelmektedir.

Önerilen hidrolik kontrollü pasif ısı muhafaza sistemi, slabın transfer süresince çevre ile olan doğrudan etkileşimini sınırlandırarak radyasyon ve konveksiyon yoluyla gerçekleşen enerji kayıplarını azaltmaktadır. Böylece yalnızca ortalama sıcaklık korunmamakta, aynı zamanda slab boyunca sıcaklığın daha dengeli dağılması sağlanmaktadır. Daha homojen sıcaklık dağılımı; haddeleme kuvvetlerinin dengelenmesi, plastik deformasyonun daha kararlı gerçekleşmesi, ürün boyutsal hassasiyetinin artırılması ve mikroyapısal özelliklerin iyileştirilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Şekil 4'te koruma sistemi bulunmayan transfer hattındaki sıcaklık dağılımı ile önerilen pasif ısı muhafaza sistemi kullanıldıktan sonraki sıcaklık dağılımı şematik olarak karşılaştırılmıştır. Şematik gösterim, sistemin slab boyunca meydana gelen sıcaklık gradyanlarını azalttığını ve sıcaklığın daha homojen şekilde korunmasına katkı sağladığını göstermektedir. Bu değerlendirme, analitik hesaplamalar ve literatürde raporlanan termal analiz sonuçlarıyla uyumlu olup önerilen sistemin proses kararlılığı üzerindeki olumlu etkisini desteklemektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada geliştirilen hidrolik kontrollü pasif ısı muhafaza sistemi; saha verileri, analitik hesaplamalar ve literatürde raporlanan benzer çalışmalar birlikte değerlendirilerek analiz edilmiştir.

Bu kapsamda elde edilen bulgular dört farklı grupta ele alınmıştır:

- İşletmeden elde edilen saha verileri,
- Analitik ısı transferi hesaplamaları,
- Literatürde raporlanan deneysel ve sayısal çalışmalar ile yapılan karşılaştırmalar ve
- Önerilen sistemin endüstriyel uygulama koşullarında sağlayabileceği mühendislik öngörülleri. Böylece çalışmada sunulan değerlendirmelerin hangi veri kaynağına dayandığı açık biçimde ortaya konulmuştur.

Sıcak haddeleme proseslerinde slabın tav fırınından çıktıktan sonra haddeleme ünitesine ulaşınca kadar geçen transfer süresi, enerji kayıplarının en kritik aşamalarından biri olarak kabul edilmektedir [1, 2, 5 ve 15]. Bu süreçte slabın açık atmosfer koşullarına maruz kalması nedeniyle radyasyon ve doğal konveksiyon mekanizmaları baskın hale gelmekte ve önemli düzeyde ısı kaybı oluşmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, özellikle 1000°C üzerindeki sıcaklıklarda toplam ısı kaybının büyük bir kısmının radyasyon mekanizması ile gerçekleştiğini ve bunun slab sıcaklığında ciddi düşürlere yol açtığını göstermektedir [2, 5, 15 ve 16]. Ayrıca transfer hattının proses verimliliği açısından kritik bir bölge olduğu, bu bölgede yapılacak iyileştirmelerin enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını doğrudan azaltabileceği belirtilmektedir [17, 18, 19 ve 20]. Bu çalışma kapsamında geliştirilen pasif ısı muhafaza sistemi, transfer hattında herhangi bir ek enerji girdisi kullanmadan slabın sahip olduğu mevcut termal enerjiyi korumayı

hedeflemektedir. Sistem, yüksek sıcaklığa dayanıklı yalıtım katmanları ve koruyucu kalkan yapısı sayesinde radyasyon ve konveksiyon kaynaklı ısı kayıplarını sınırlandıran bir termal bariyer oluşturmaktadır. Bu sayede slabın haddeleme ünitesine daha yüksek sıcaklıkta ulaşması sağlanmakta, yeniden ısıtma ihtiyacı azaltılmakta ve proses enerji verimliliği artırılmaktadır. Bu yaklaşım, literatürde yer alan ısı muhafaza panelleri ve termal koruma sistemleri ile benzer prensiplere dayanmakta olup mevcut üretim hatlarına entegre edilebilirliği açısından önemli bir mühendislik avantajı sunmaktadır [3, 4, 17 ve 21].

Literatürdeki güncel çalışmalar, reheating furnace ve transfer hattı süreçlerinde geliştirilen enerji optimizasyon modellerinin, sıcaklık kontrol algoritmalarının ve CFD tabanlı analizlerin sistem performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir [12, 13, 14, 2, 24, 25 ve 26]. Ayrıca dijitalleşme ve model tabanlı kontrol yaklaşımlarının enerji tüketimini azaltmada kritik rol oynadığı rapor edilmektedir [18, 27 ve 28]. Bu bağlamda önerilen pasif sistem, karmaşık kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duymadan benzer bir termal koruma etkisi oluşturmaları bakımından literatürdeki birçok aktif ve yarı-aktif sistem yaklaşımına alternatif bir çözüm sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, sistemin yalnızca ısı kaybını azaltmakla kalmadığını, aynı zamanda slab boyunca sıcaklık dağılımını iyileştirdiğini göstermektedir. Transfer süresi boyunca head, body ve tail bölgeleri farklı sürelerde çevresel etkilere maruz kaldığından sıcaklık homojenliği bozulabilmektedir [2, 5 ve 7]. Literatürde bu farkın proses kararlılığını doğrudan etkilediği ve haddeleme kuvvetlerinde dalgalanmalara neden olduğu belirtilmektedir [7, 29 ve 30]. Önerilen sistem bu sıcaklık farklarını azaltarak daha kararlı bir deformasyon davranışı sağlamaktadır.

Bu kapsamda yapılan değerlendirmelerde, koruma sistemi bulunmayan durumda slab boyunca oluşan sıcaklık farklarının literatürde 60-80°C seviyelerine ulaşabildiği, koruyucu sistemlerin ise bu farkı önemli ölçüde azaltabildiği rapor edilmektedir [2, 7 ve 30]. ...önerilen pasif sistemin sıcaklık gradyanlarını azaltma ve proses stabilitesini iyileştirme potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Sıcaklık homojenliğinin iyileşmesi yalnızca enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda ürün kalitesi açısından da kritik bir faktördür. Daha uniform sıcaklık dağılımı, mikroyapısal dönüşümlerin daha dengeli gerçekleşmesini sağlayarak mekanik özelliklerde homojenlik oluşturmaktadır [7 ve 29]. Ayrıca haddeleme sırasında oluşan yük dalgalanmaları azaltmakta ve ürün geometrisi daha stabil hale gelmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, önerilen pasif ısı muhafaza sisteminin literatürde yer alan aktif, yarı-aktif ve CFD tabanlı sistemlerle karşılaştırıldığında daha düşük maliyetli, daha basit yapı ve endüstriyel entegrasyonu kolay bir çözüm sunduğu görülmektedir. Buna karşın aktif sistemlerin sıcaklık kontrolü açısından daha yüksek hassasiyet sağladığı ancak bunun ek enerji tüketimi ve sistem karmaşıklığı ile gerçekleştiği belirtilmektedir [3, 14, 18, 24].

Sonuç olarak, geliştirilen sistemin hem enerji verimliliği hem de proses kararlılığı açısından önemli iyileştirmeler sağladığı, ayrıca mevcut haddeleme hatlarına kolayca entegre edilebilecek bir mühendislik çözümü sunduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, haddeleme öncesi transfer bölgesinde meydana gelen ısı kayıplarını azaltmak amacıyla geliştirilen hidrolik kontrollü ısı muhafaza sisteminin termal performansı, enerji verimliliği ve ekonomik etkileri analitik hesaplamalar, saha verileri ve literatür bulguları birlikte değerlendirilerek incelenmiştir.

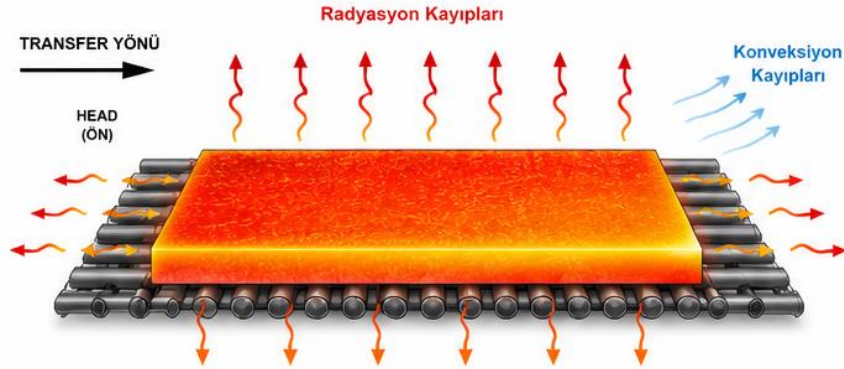
Elde edilen sonuçlar, tav fırınından çıkan yaklaşık 1050-1170°C sıcaklıktaki slabların transfer masası boyunca çevresel etkiler nedeniyle önemli oranda ısı kaybına uğradığını göstermektedir. Özellikle radyasyon kaynaklı ısı kaybının baskın olduğu bu süreçte, 10°C seviyesindeki sıcaklık düşüşünün dahi proses üzerinde belirgin enerji kaybına neden olduğu belirlenmiştir. Yapılan mühendislik hesaplamalarına göre, 15 tonluk bir slab için 10°C sıcaklık kaybı yaklaşık 90.000 kJ ısı kaybına karşılık gelmekte, fırın verimi dikkate alındığında bu değer 150.000 kJ gerçek enerji ihtiyacına ulaşmaktadır. Bu durum, yaklaşık 4.2 Nm³/slab doğalgaz tüketimine denk gelmektedir. Ton bazında değerlendirildiğinde ise bu kayıp 0.25-0.30 Nm³/ton seviyesinde gerçekleşmektedir.

Analitik değerlendirmeler ve literatür bulguları doğrultusunda, transfer sürecindeki sıcaklık düşüşünün azaltılabileceği ve ΔT değerinin yaklaşık 2-5°C aralığına kadar düşürülebileceği öngörülmektedir. Kalite bazlı analizler ise sistemin farklı çelik sınıflarında etkili olduğunu ortaya koymuştur. Düşük kalite çelikte sıcaklık farkı 12°C'ye, orta kalite çelikte 5°C'ye ve yüksek kalite çelikte ise 2°C seviyesine kadar düşürülmüştür. Bu sonuçlar, sistemin özellikle yüksek kalite çelik üretiminde maksimum termal stabilite sağladığını göstermektedir.

Analitik hesaplamalar doğrultusunda sistemin 10°C seviyesindeki sıcaklık korunumu sağlaması durumunda ton başına yaklaşık 0.25-0.30 Nm³ doğalgaz tasarrufu sağlayabileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada sunulan sonuçlar dört farklı veri kaynağına dayanmaktadır. Ölçülen veriler, işletmeden elde edilen saha kayıtlarını (slab sıcaklığı, transfer süresi, üretim kapasitesi ve doğalgaz tüketimi) kapsamaktadır. Hesaplanan veriler, enerji dengesi ve ısı transferi denklemleri kullanılarak elde edilen analitik sonuçlardan oluşmaktadır. Literatüre dayalı sonuçlar, benzer çalışmaların deneysel ve sayısal bulgularından yararlanılarak yapılan karşılaştırmaları ifade etmektedir. Öngörülen performans sonuçları ise önerilen pasif ısı muhafaza sisteminin endüstriyel uygulama koşullarında sağlayabileceği potansiyel enerji tasarrufu, sıcaklık korunumu ve proses iyileştirmelerine ilişkin mühendislik değerlendirmelerini temsil etmektedir. Bu nedenle çalışmada sunulan öngörülen performans değerleri deneysel olarak doğrulanmış sonuçlar olarak değil, saha verileri, analitik hesaplamalar ve literatür bulgularıyla desteklenen mühendislik öngörülerini olarak değerlendirilmelidir. Çalışmanın temel sınırlılığı, önerilen sistemin henüz pilot ölçekli veya endüstriyel ölçekte deneysel olarak doğrulanmamış olmasıdır. Bu nedenle gelecekte gerçekleştirilecek pilot uygulamalar, deneysel doğrulama çalışmaları ve uzun dönemli saha testleri ile sistem performansının doğrulanması önerilmektedir.

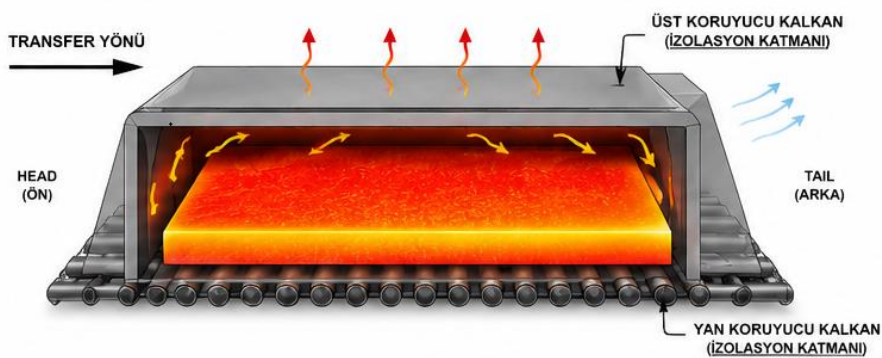
Tablo 8. Aktif ve pasif sistem karşılaştırması
(Table 8. Comparison of active and passive systems)

Karşılaştırma Kriteri	Aktif Sistem	Pasif Sistem (Önerilen Sistem)
Uygulama Öncesi	Isı kaybı yüksektir	Isı kaybı yüksektir
Uygulama Sonrası	Dış enerji ile slab yeniden ısıtılır	Mevcut ısı korunur
Isı Yayılımı	İlave enerji ile sıcaklık artırılır	Radyasyon ve taşınım azaltılır
Sıcaklık Homojenliği	Çok yüksektir	Yüksektir
Enerji Tüketimi	Yüksektir	Çok düşüktür
Bakım İhtiyacı	Fazladır	Düşüktür
İşletme Maliyeti	Yüksektir	Düşüktür



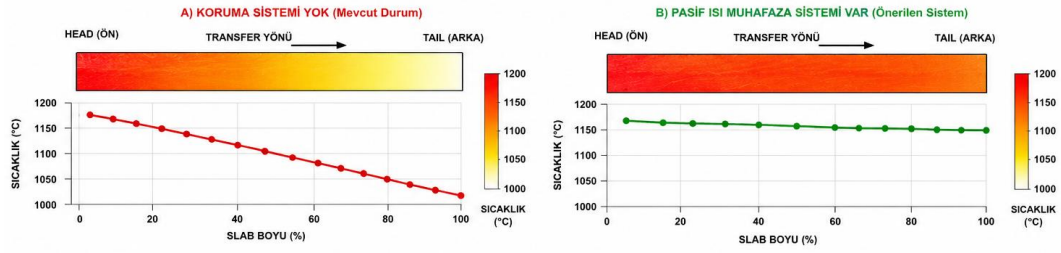
Şekil 2. Isı muhafaza sistemi kullanılmadan ısı yayılımı
(Figure 2. Heat propagation without using a heat retention system)

Şekil 2’de, pasif ısı muhafaza sistemi bulunmayan durumda slab yüzeyinden çevreye gerçekleşen ısı kaybı mekanizması gösterilmektedir. Bu durumda özellikle radyasyon ve doğal konveksiyon etkileri baskın hale gelmekte ve slab yüzeyinden çevreye yoğun bir ısı akışı gerçekleşmektedir. Açık atmosfer koşulları nedeniyle slabın transfer süresi boyunca hızlı sıcaklık kaybına uğradığı ve bunun sıcaklık homojenliğini bozduğu görülmektedir. Özellikle slabın üst ve yan yüzeylerinde ısı kaybının daha yüksek olduğu ve bunun sıcaklık gradyanlarını artırdığı gözlemlenmektedir.



Şekil 3. Pasif ısı muhafaza sistemi kullanıldığında ısı yayılımı
(Figure 3. Heat propagation when a passive heat retention system is used)

Şekil 3’de, geliştirilen pasif ısı muhafaza sisteminin uygulanması durumunda slab etrafında oluşturulan koruyucu kalkan yapısı görülmektedir. Bu yapı sayesinde slabın çevre ile doğrudan ısı etkileşimi sınırlandırılmakta, radyasyon ve konveksiyon kaynaklı ısı kayıpları önemli ölçüde azaltılmaktadır. Termal bariyer etkisi sayesinde ısı enerjisinin slab içerisinde daha uzun süre tutulduğu ve transfer süreci boyunca sıcaklık düşüşünün minimize edildiği anlaşılmaktadır. Bu durum, slabın haddelme ünitesine daha yüksek ve daha stabil bir sıcaklıkla ulaşmasını sağlamaktadır.



Şekil 4. Slab boyunca sıcaklık dağılımı karşılaştırması (öncesi-sonrası)
(Figure 4. Comparison of temperature distribution along the slab (before and after))

Şekil 4'te, koruma sistemi bulunmayan ve önerilen pasif sistem kullanılan durumlar için slab boyunca sıcaklık dağılımı karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Mevcut durumda slabın baş (head) ve son (tail) bölgeleri arasında belirgin bir sıcaklık farkı olduğu ve sıcaklığın lineer olarak azaldığı görülmektedir. Pasif sistem uygulandığında ise sıcaklık dağılımının daha uniform hale geldiği, sıcaklık gradyanlarının belirgin şekilde azaldığı ve head-tail arasındaki farkın önemli ölçüde düşürüldüğü gözlemlenmektedir. Bu durum, sistemin sıcaklık homojenliğini artırarak proses kararlılığına katkı sağladığını göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, önerilen ısı muhafaza sistemi yalnızca enerji tüketimini azaltan bir ekipman değil, aynı zamanda haddeleme prosesinde sıcaklık homojenliğini artıran, ürün kalitesini iyileştiren ve operasyonel kararlılığı güçlendiren bütünlük bir mühendislik çözümüdür. Bu yönüyle sistem, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından yüksek potansiyele sahip bir endüstriyel iyileştirme yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmanın temel sınırlılığı, önerilen sistemin henüz pilot ölçekli veya endüstriyel ölçekte deneysel olarak doğrulanmamış olmasıdır. Bu nedenle enerji tasarrufu, sıcaklık stabilitesi ve proses performansına ilişkin değerlendirmeler; saha verileri, analitik hesaplamalar ve literatürde raporlanan çalışmalar temelinde oluşturulan mühendislik öngörülerini temsil etmektedir. Gelecek çalışmalarda sistemin pilot uygulamalar, uzun dönemli saha testleri ve CFD tabanlı analizlerle doğrulanması önerilmektedir. Bu çalışma, DMADV metodolojisinin sistematik yaklaşımı doğrultusunda gerçekleştirilmiş olup, problem tanımlama, ölçme, analiz, tasarım ve doğrulama aşamalarını bütüncül bir mühendislik bakış açısıyla ele almıştır. Gelecekte gerçekleştirilecek pilot uygulamalar ve deneysel doğrulama çalışmaları ile önerilen sistemin endüstriyel performansının daha kapsamlı şekilde ortaya konulması hedeflenmektedir.

Öneriler:

- Geliştirilen sistemin pilot ölçekli saha uygulamaları ile doğrulanması önerilmektedir.
- Transfer bölgesindeki termal davranışın CFD tabanlı detaylı analizlerle incelenmesi önerilmektedir.
- Farklı slab boyutları ve çelik kaliteleri için sistem performansının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.
- Sistemin uzun dönem bakım maliyetleri ve yatırım geri dönüş süresinin endüstriyel uygulamalar kapsamında araştırılması önerilmektedir.

SEMBOLLER

m : Kütle (slab ağırlığı) kg
 C_p : Özgül ısı kapasitesi kJ/kg·°C
 ΔT : Sıcaklık farkı °C
 T_{in} : Slab giriş sıcaklığı °C
 T_{out} : Slab çıkış / haddeleme giriş sıcaklığı °C
 η : Fırın termal verimi
 V : Doğalgaz hacmi Nm³
 E_{gas} : Doğalgaz enerji eşdeğeri kJ/Nm³
 P : Üretim kapasitesi ton/saat
 W : Slab ağırlığı ton
 L : Transfer hattı uzunluğu m
 $\dot{V}$: Doğalgaz tüketim debisi Nm³/ton
 $\dot{m}$: Kütlesel akış
 Q : Isı enerjisi (ısı kaybı / kazancı)

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazar, herhangi bir kişi, kurum veya kuruluş ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmektedir.

FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Bu çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kuruluş tarafından finansal destek alınmamıştır.

ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Yazar, bu makalenin hazırlanması sürecinde bilimsel araştırma ve yayın etiği kurallarına uyulduğunu beyan etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wang, J., Liu, Y., Sundén, B., Yang, R., Baleta, J., and Vujanović, M., (2017). Analysis of slab heating characteristics in a reheating furnace. *Energy Conversion and Management*, 143:444-456.
- [2] Mansouri, N., Mirhosseini, M., and Saboonchi, A., (2012). Thermal modeling of strip across the transfer table in the hot rolling process. *Applied Thermal Engineering*, 38:91-104.
- [3] Jang, J.Y., Guo, J.W., and Chang, C.C., (2019). The Heat Transfer Analysis of an Acting-type Heat Retention Panel used in a Hot Rolling Process. *Applied Sciences*, 9(1):189.
- [4] Khloponin, N., Lisin, V., and Skorokhodov, V., (2001). The application of heat-conservation shields for hot strip mills. *Steel Times International*, 22-24.
- [5] Anantha Kirthan, K.K., Sathurtha Mourian, S., Vignesh, M., and Nisanth, A., (2014). Analysis of Temperature loss of Hot Metal during Hot Rolling Process at Steel Plant. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 4(8):23-29.
- [6] Shandong Hongwang Industrial Co., Ltd. (2021). Soğuk haddeleme tavlama atık ısı geri kazanım cihazı (Cold rolling annealing waste heat recovery device). Çin Patenti No: CN 213327720 U.
- [7] Padhy, S.M., Kambli, A.H., Ukamanal, M., and Mishra, P.C., (2018). Cooling mechanisms on run out table: A technical review. *Materials Today: Proceedings*, 5(9):18162-18169.
- [8] Keliti Metal Technology (Tianjin) Co., Ltd. (2021). Atık ısı geri kazanım fonksiyonuna sahip sürekli fırın (Continuous furnace with waste heat recovery function). Çin Patenti No: CN 213447231 U.

- [9] Zhangjiagang Liwan Precision Components Co., Ltd. (2022). Atık ısı geri kazanımlı çelik boru üretimi için tavlama fırını (Annealing furnace for steel pipe production with waste heat recovery). Çin Patenti No: CN 217579008 U.
- [10] Nanjing Boqiao Machinery Co., Ltd. (2022). Yüksek verimli ısıtım işlem fırını atık ısı geri kazanım cihazı (High-efficiency heat treatment furnace waste heat recovery device). Çin Patenti No: CN 217922211 U.
- [11] Jilin Liangtong Technology Co., Ltd. (2023). Çan tipi temperleme fırını atık ısı geri kazanım cihazı (Bell-type tempering furnace waste heat recovery device). Çin Patenti No: CN 219174540 U.
- [12] Ahmed, Z., T'Jollyn, I., Lecompte, S., Schoonjans, T., Demeester, T., Beyne, W., De Raad, T., and De Paepe, M., (2024). A truncated transient slab model for a reheating furnace. *Heat Transfer Engineering*, 45(11), 993-1010.
- [13] Skopec, P., Vyhlídal, T., and Knobloch, J., (2024). Development of a continuous reheating furnace state-space model based on the finite volume method. *Applied Thermal Engineering*, 246, 122888.
- [14] Wang, D., Zhang, X., Zhu, Y., and Jiang, Z., (2024). Optimization of Exergy Efficiency in a Walking Beam Reheating Furnace Based on Numerical Simulation and Entropy Generation Analysis. *Processes*, 12(3):451.
- [15] Colás, R., (1995). Modelling heat transfer during hot rolling of steel strip. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 3(4):437-453.
- [16] Torres, M. and Colas, R., (2000). A model for heat conduction through the oxide layer of steel during hot rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 105(3):258-263.
- [17] Effect Assessment of Charging Conditions on Energy Consumption and Slab Heating Quality in an Industrial-Scale Reheating Furnace. (2025). *Applied Thermal Engineering*, 265, 125565.
- [18] Liu, D., Zhang, G., Zeng, J., and Wu, C., (2024). Investigation of Solidification Heat Transfer in Slab Continuous Casting Process Based on Different Roll Contact Calculation Methods. *Materials*, 17(2):482.
- [19] Zhang, N., Jiang, T., and Lv, Z., (2024). Research on Continuous Casting-Hot Rolling Scheduling Model Involving Reheating Furnace Conversion Mode and Improved Bat Optimization Solution Algorithm. *Applied Sciences*, 14(11):4494.
- [20] Xu, J., Li, B., and Qi, F., (2024). Oxidation model of slabs in an industrial-scale walking-beam reheating furnace with mixed loading. *Applied Thermal Engineering*, 256:124119.
- [21] Liu, Q., Hanoglu, U., Rek, Z., and Šarler, B., (2024). Simulation of Temperature Field in Steel Billets during Reheating in Pusher-Type Furnace by Meshless Method. *Mathematical and Computational Applications*, 29(3):30.
- [22] Wang, D., Zhang, X., Zhu, Y., and Jiang, Z., (2024). Analysis of heat transfer coefficient and skid marks in a slab reheating furnace considering beam misalignment and contact heat conduction. *International Journal of Thermal Sciences*, 204:109209.
- [23] Wang, D., Zhang, X., Zhu, Y., and Jiang, Z., (2024). Optimization of Exergy Efficiency in a Walking Beam Reheating Furnace Based on Numerical Simulation and Entropy Generation Analysis. *Processes*, 12(3):451.
- [24] Lemus-Ávalos, L., Ramos-Banderas, J.Á., Hernández-Bocanegra, C.A., Calderón-Rojas, M.U., and Solorio-Díaz, G., (2024). Energy Optimization of a Steel Slab Reheating Furnace Through the Use of Swirl and Diffusion Burners Using a New Mathematical

- Simulation Methodology. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals.
- [25] Zhao, M., Li, X., and Hu, X., (2025). Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Reheating Furnaces Under Oxygen-Enriched Conditions. *Processes*, 13(8):2454.
<https://doi.org/10.3390/pr13082454>.
- [26] Calderón-Rojas, M.U., Hernández-Bocanegra, C.A., Ramos-Banderas, J.Á., López, N.M., Mendoza-De-la-Rosa, L.A., and Solorio-Díaz, G., (2025). Analysis of the Thermal-Kinetic-Fluid-Dynamic Profile of a Slab Reheating Furnace Using CFD-Dynamic Mesh. *DYNA*, 100(1).
- [27] Ban, Y., Zhang, Y., Wang, X., et al., (2025). Multisource Heterogeneous Data Fusion-Based Process Monitoring of the Reheating Furnace in Steel Production. *ACS Omega*.
- [28] Li, X. and Peng, K., (2025). Prediction of Billet Temperature Field in Reheating Furnace for Hot Strip Rolling Based on General Physics-Informed Neural Network. *Metallurgical Industry Automation*, 49(3):138-150.
- [29] Wang, Q., Sun, J., Yang, J., Wang, H., Dong, L., Jiao, Y., Li, J., Zhi, Z., and Yang, L., (2024). Online Partition-Cooling System of Hot-Rolled Electrical Steel for Thermal Roll Profile and Its Industrial Application. *Processes*, 12(2):410.
- [30] Tian, G., Li, B., Mo, D., and Xu, J., (2025). Systematic Study on the Thermal Performance of Casting Slab Under Varying Environmental Conditions. *Metals*, 15(9):967