

# SÜREKSİZ ÇALIŞAN ISIL SİSTEMLERDE ENERJİ TASARRUFUNUN ANALİZİ

*Energy Recovery Analysis in Thermal Systems Transient*

**Barbaros Batur**  
**M. Cem Çelik**  
**Muammer Akgün**

## ÖZET

Günümüzde, üretim süreçlerine göre sürekli ve kesintili rejimlerde çalışan ısı sistemleri mevcuttur. Sürekli çalışan ısı sistemleri belirli bir sürede geçici rejimi tamamlar ve sürekli rejime geçerler. Geçilen sürekli rejimde, ısı sistemlerinin sıcaklığının belirli limit değerleri içinde olması hedeflenir. Sürekli rejim çalışma şartları, çalışma periyoduna bağlı olarak, bir gün veya bir vardiya olabileceği gibi bu süre cam fırınlarında on yıldan fazla da sistem sürekli rejimden çıkmadan çalışabilir. Isı sistemlerindeki farklılıklara rağmen enerji verimliliği çalışmalarının ilk adımı olan ölçümler için benzer bir yol izlenmektedir. Geçici sistemlerde veya süreçlerde bazı kritik ölçümler sürekli olarak alınmalıdır. Sıcaklık ve yakıt tüketimi gibi sürekli ölçülemeyen veriler için kırılma noktaları titizlikle belirlenmelidir.

Süreksiz çalışan ısı sistemlerinin enerji geri kazanım çalışmalarında geri ödeme sürelerinin hesaplanması, sürekli sistemlere göre daha karışıktır. Değişen sıcaklığa ve debiye göre enerji geri kazanım miktarının hesaplanması gerekmektedir. Geri kazanılan ısının süreksiz sistemde çalışan başka süreçlere aktarılması zorlu bir problemdir. Genellikle, geri kazanılan ısının kullanımı için ısı depolamak gerekmektedir. Geri kazanılan ısının hesaplanması, bu ısının dağıtımı, depolanması, bu sistemin boyutlandırılması ve maliyeti oldukça karmaşık bir problemdir. Artan enerji maliyetlerine ek olarak karbon salımı kısıtlamaları endüstriyel tesislerde enerji verimliliği çalışmalarını tekrar gündeme taşımıştır. Bu çalışmada, bir fabrikada enerji geri kazanım sistemi tasarım süreçleri uygulamalı olarak ele alınmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Süreksiz Çalışan Isıl sistemler, Sürekli rejim, Geri kazanım, Enerji verimliliği

## ABSTRACT

Today, there are thermal systems operating in continuous and batch regimes according to the production process. Continuously operating thermal systems complete the transient regime in a certain time and switch to the continuous regime. In continuous regime, thermal systems temperature is aimed to be within certain limit values. The working period can be a day or a shift in steam boilers or industrial furnaces, as well as over ten years in glass furnaces. Despite the differences in furnaces, a similar path is followed for measurements, which are the first step in energy efficiency studies. In transient systems or processes, some critical measurements should be taken continuously. For data that cannot be measured continuously, such as temperature and fuel consumption, breakpoints must be carefully determined.

Calculation of payback periods in energy recovery studies of transient thermal systems is more complicated than in continuous systems. The amount of energy recovery needs to be calculated according to the changing temperature and flow rate. Transferring the recovered heat to other processes operating in the discontinuous system is a difficult problem. Generally, thermal storage is required to use the recovered heat. Calculation of the heat recovery, distribution and storage of this

heat, sizing and cost of this system is a very complex problem. In addition to the increasing energy costs, carbon emission restrictions have brought energy efficiency studies in industrial facilities back to the agenda. In this study, energy recovery system design processes and its application in a factory are investigated.

**Keywords:** Continuously Operating Thermal systems, Steady regime, Recovery, Energy efficiency

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Süreksiz Fırınlara Çalışma Şekilleri

Üretilen ürünler genellikle üretim sürecinin bir aşamasında ısı işleme tabi tutulur. Bir fırın, istenen sonuçları elde etmek için ısı uygulanabilmesi için cam, metal, seramik ve diğer malzemeleri tutabilen yüksek sıcaklık şartlarında çalışan bir odadır. Sürekli olmayan bir fırın gibi kapalı bir proses sisteminde optimum koşulların sürdürülmesi daha kolaydır.

Süreksiz fırınlar, parçaların eşit şekilde ısıtıldığı ve sıralı olarak işlendiği sürekli bir fırında kullanılan konveyör bant yaklaşımının aksine, sürekli olmayan fırın parçaları ayrı ayrı, genellikle partiler halinde işler (dolayısıyla kesikli fırın terimi). Böyle bir fırın, özel (veya yüksek hassasiyetli) uygulamalarda gerekli olan sıcaklık değişiminin formülasyonu konusunda esneklik sunar.

Örneğin hava, oksijen, karbondioksit, hidrojen, azot ve su içeren bir gazdır. Oda sıcaklığında, bu elementler yüzeylerle herhangi bir sorun yaratmayacak şekilde yavaş reaksiyona girer. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda çalışan fırın sistemlerinde imalat sürecine müdahale etmek mümkündür. Vakumlu fırınlar, bu kapsamda bir tür sürekli olmayan fırın tasarımıdır. Vakumlu fırınlarda, ısı işleminden önce hava fırın odasından çıkarılır. Ürün üzerinde oluşabilecek yüzey kirlenmelerini uzaklaştırmanın ve istenmeyen reaksiyonları önlemenin yanı sıra, metallerin gazını gidermek ve birleştirmek için vakum işlemleri de kullanılabilir.

İşlemin sonunda, işlem gören parçaları soğutmak için fırın odasına helyum, argon veya hidrojen gibi yüksek basınçlı gaz enjekte edilir. Sertleştirme, temperleme ve lehimleme, vakumlu fırınlarda gerçekleştirilen bazı işlemlerdir.

Diğer fırınların yanı sıra vakum fırını aşağıdaki ürünleri üretmek için bir kullanılır:

Uçak gövde, hidrolik ve motor parçaları, Nükleer reaktör bileşenleri, Dişliler, süspansiyon malzemeleri, direksiyon, enjektörler ve eksantrik mili gibi araç parçaları, Süper alaşımlı civatalar gibi bağlantı elemanları ve tıbbi bağlantı elemanları, Cerrahi aletler, protez yapay kalçalar, dizler ve eklemler gibi tıbbi ekipmanlar, El aletleri ve ev eşyaları.

Sürekli olmayan bir fırın, sağlık ve güvenlik standartlarına uygun olarak üretilen parçaların kalitesini ve performansını garanti etmelidir. Böyle bir fırın tasarımı, hatalı ürün sayısını azaltır ve maliyet tasarrufu sağlar [1].

### 1.2. Süreksiz Fırınlara Özellikleri

Sürekli ısı sistemleri, devreye girdiği andan sonra geçici rejimi bitirir ve sürekli rejime geçer. Sürekli rejimde brülör ya da bekler devreye girip çıksalar da fırın sıcaklıkları alt ve üst limitler içinde uzun süre sabit kalır. Bu süreç, buhar kazanları ya da endüstriyel fırınlarda bir güne veya bir vardiya süresini karşılık gelmesine rağmen cam fırınları gibi hiç durmayan işletmelerde on yılın üzerine dahi çıkabilir.

Süreksiz ısı sistemleri, belli bir zaman dilimi içerisinde bir periyotta ısınıp en yüksek sıcaklığa yakın bir sıcaklıkta bir süre kalacak ve sonra soğuyacak şekilde dizayn edilirler. Eğer süreksiz ısı sistemlerinde enerji tasarrufu yapmak istenirse, çevrim içindeki dar bir zaman aralığında gerçekleşen kütle ve ısı enerji dengesinin kurulması gerekmektedir. Kütle ve ısı dengenin kurulması için bazı kritik değerler periyodik olarak ölçülmelidir. Periyodik ölçüm olanağı olmayan sıcaklık ya da yakıt tüketimi gibi kritik

değerlerin en azından grafik üzerinde dönüm (ani artış, ani azalış, artıştan azalışa dönüş vb.) noktaları belirlenmelidir. Tablo 2' de pembe, kırmızı renk ve mavi renk bölgeleri, dönüm noktalarından biridir.

Süreksiz çalışan ısı sistemlerinde enerji dengesinin oluşturulması ile birlikte enerji tasarrufu önlemlerinin geri ödeme sürelerinin hesaplanması, sürekli çalışan ısı sistemlere göre daha karışıktır[2]. Geri ödeme süresi hesabında, çevrim içinde sürekli dalgalanan sıcaklığa bağlı olarak sürekli değişim gösteren enerji tasarruf miktarı bulunur. Tasarruf edilen ısı, fabrikada başka bir proseste kullanılıyorsa oluşacak dalgalanmayı en aza indirmek için ısının depolanması gerekebilir. Isının depolanma miktarına bağlı olarak depolama yatırımının maliyeti artar. Her bir depolama büyüklüğü için, değişen yatırım-geri ödeme süresi nedeniyle, yatırımın büyüklüğü ile tasarruf edilebilecek enerji arasında oluşan optimum nokta hesaplanmalıdır[3]. Isı çekilen sistem ve bu çekilen ısıyı kullanan sisteminin süreksiz olması durumunda çözülmesi gereken bir mühendislik problemi oluşur. Örneğin, süreksiz çalışan bir endüstriyel fırın bacasından çekilen enerji, fabrikada belli aralıklarla malzeme ısıtılmasında kullanılması durumunda fırının hangi saatlerde çalıştırılacağı, malzemenin hangi aralıklarla ısıtılması gerektiği bir mühendislik problemidir. Depolanması gereken ısı enerjisinin miktarına bağlı olarak hangi tür depolama yapılacağı, boyutunun optimizasyonu mühendislik problemini zorlaştırmaktadır.

## 2. Enerji Dengesi Hesabına Giren Enerji Kazançları

Yakıt olarak doğalgaz kullanılan örnek fırınındaki çevrimi, ısınma, yüksek sıcaklıkta bekleme ve soğuma süreçlerine bölebiliriz. Bu süreçlerin alt süreçlerinin başlangıç ve bitişinde en az bir kez olmak üzere; yakıt sayaç göstergesindeki değişim ile manometreden doğalgaz basıncı ve ortam sıcaklığı ölçülmüştür. Örnek alınan süreksiz endüstriyel fırınındaki değerler Tablo 1' de gösterilmiştir.

**Tablo 1** Örnek Endüstriyel Fırında Tüketilen Doğalgaz İle İlgili Değerler

Çevrimin Başlangıcından Sonra Geçen Süre (dakika)	2	52	97	212	297	407	447	477	523	528	618	653	671	701	720	774	796	856	946
Doğalgaz Sayacı Göstergesi (m <sup>3</sup> )	167488	167488	167489	167505	167535	167605	167632	167652	167685		167734	167749	167749	167749	167749	167749	167749	167749	167749
Sayaç Göstergesindeki Fark (m <sup>3</sup> )		0	1	16	30	70	27	20	33		49	15	0	0	0	0	0	0	0
Manometrede Okunan Basınç (bar)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,633	0,558	0,672	0,643	0,78		0,858	0,873	0,91	0,919	0,931	0,955	0,967	0,962	0,975

Tablodaki kırmızı bölge fırının ısındığı, beklerin çalıştığı, mavi bölge ise fırının soğuma bölgesini gösteren beklerin çalışmadığı zaman dilimini göstermektedir. Tabloda bu iki bölümü ayıran fark, doğalgaz sayacının çalışması ve durmasıdır. Fırının çalıştığı süreden sonraki dakikaları gösteren ikinci satırda, 618. dakika ile 653. dakika arasında bir yerde beklerin durduğu görülmektedir. Böylece bu iki farklı bölgeyi belirlemek kolay olmaktadır. 618. dakika sütunu ile 653. dakika sütunu oranlandığında, 653. dakika sütununun ısıtma bölgesinde olduğu hesaplanmıştır. Daha sonra bu iki bölgeye bölünen bir çevrim, kendi içinde daha çok benzer parçaya bölünerek çevrim karakteristiği daha belirgin yapılmalıdır. Tablo 2' de üçe bölünmüş hali gösterilmiştir. Çalışmalarda, fırın içi sıcaklığını da hesaba kattığımız beş parçaya bölünmesini daha uygun hale geldiği görülmüştür.

**Tablo 2** Fırın Çevriminin Benzer Şartlarda Bölünmesi

Çevrimin Başlangıcından Sonra Geçen Süre (dakika)	2	52	97	212	297	407	447	477	523	528	618	653	671	701	720	774	796	856	946	
Doğalgaz Sayacı Göstergesi (m <sup>3</sup> )	167488	167488	167489	167505	167535	167605	167632	167652	167685		167734	167749	167749	167749	167749	167749	167749	167749	167749	
Sayaç Göstergesindeki Fark (m <sup>3</sup> )		0	1	16	30	70	27	20	33		49	15	0	0	0	0	0	0	0	
Manometrede Okunan Basınç (bar)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,633	0,558	0,672	0,643	0,78		0,858	0,873	0,91	0,919	0,931	0,955	0,967	0,962	0,975	
Yakıt Tüketimi (Nm <sup>3</sup> /dakika)		0	0,043711	0,273671	0,848359	1,655517	1,56483	1,5872	1,52537		1,098518	0,856726	0	0	0	0	0	0	0	
		Ön Isıtma Bölgesi					Kuvvetli Isıtma Bölgesi						Soğuma Bölgesi							

Başlangıçtan itibaren sonra doğalgaz ve manometre ölçümlerinin düzenli olmayan aralıklarla okunduğu görülmektedir. Hesapları yapabilmek için yaklaşık 16 saat süren çevrimde okunan değerlerin eşit aralıklı zaman dilimlerine ayrılması gerekmektedir. Bu durumda oluşan Tablo 3 aşağıda görülebilir.

**Tablo 3. Ölçülen Yakıt Değerlerinin Eşit Aralıklı Saat Dilimlerine Göre Hesaplanması**

Ölçüm Yapılan Saat Dilimini Temsil Eden Saat	7,30	8,30	9,30	10,30	11,30	12,30	13,30	14,30	15,30	16,30	17,30	18,30	19,30	20,30	21,30	22,30
Ölçüm Yapılan Saat - Başlangıçtan İtibaren (Isınma Dilimi -Isınma/Soğuma)	1. h ls	2. h ls	3. h ls	4. h ls	5. h ls	6. h ls	7. h ls	8. h ls	9. h ls	10. h ls	11. h ls	12. h s	13. h s	14. h s	15. h s	16. h s
Sayaç Göstergesindeki Fark (m <sup>3</sup> )	5,00	6,50	15,30	16,20	20,60	30,20	37,70	35,60	56,00	90,90	23,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fatura ile karşılaştırma sonucu düzeltme (0,942 ile düzeltildi)	4,71	6,123	14,413	15,26	19,405	28,448	35,51	33,54	52,75	29,108	21,949					
Manometrede Okunan Basınç-Cihaz Basıncı (bar)	0,90	0,90	0,90	0,82	0,59	0,60	0,55	0,78	0,82	0,87	0,90					
Mutlak Basınç (bar)	1,90	1,90	1,90	1,82	1,59	1,60	1,55	1,78	1,82	1,87	1,90					
Tüketilen Gerçek Doğalgaz miktarı (Nm <sup>3</sup> )	8,34	10,84	25,51	25,88	28,75	42,41	51,29	55,62	89,46	50,58	38,86					

Tablo 3'te ölçüm yapılan saat dilimini temsil eden zaman aralığı, örneğin saat 7.00-8.00 saat dilimini, saat 7.30 temsil etmiştir. Hesaplama yapılan zaman aralıkları ne kadar küçültülürse, yapılan hata o kadar az olacaktır. Örnek hesapta bir saatlik zaman dilimi hesapların doğruluğu için yeterli görülmüştür. Bir alt sırada ise, fırının çalışma periyodunda kaçınıcı saatte olduğu ve ısınma ya da soğuma durumunda olduğu belirtilmiştir. Düzensiz zaman aralıklarında alınan ölçüm değerleri, interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleri kullanılarak, saatlik dilimler haline tek tek getirilmiştir [4].

Ölçülen değerler, uzun süreli çevrim sayısı ve fatura değerleri ile karşılaştırılmış ve arada yaklaşık %6 kadar fark olduğu görülmüştür. Doğalgaz sayaç, manometre ve ölçüm saatlerinin tam tabloda yazılan zamanlarda olmaması, doğalgaz sıcaklığının ölçüm sıcaklığından farklı olması, fatura hesabındaki hatalardan olduğunu düşündüğümüzden nedenlerden oluşan bu fark, fatura değeri temel alınarak düzeltilmiştir.

Doğalgaz basıncını ölçen manometre değerlerindeki değişim, gaz tesisatındaki çekişin artmasıyla artan hat direncine göre oluşan basınç düşmesi nedeniyledir. Bu alet basıncının hesaplarda kullanılan mutlak basınca değiştirilmesi unutulmamalıdır. Ölçülen tüketilen doğalgaz verileri, Avogadro Yasası olan  $\left(\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2}\right)$  kullanılarak Normal metreküp (Nm<sup>3</sup>) değerine getirilmiştir.

### 3. Enerji Dengesi Hesabındaki Enerji Kayıpları

#### 3.1. Baca Gazı Kayıpları Hariç Diğer Enerji Kayıpları

Fırında kullanılan enerji miktarlarının hesaplanması, doğalgazın yanması ile üretilen ısı enerjisini hesaplamaktan çok daha karışıktır. Bu tür fırın ve kazanlardan iki temel kayıp olmaktadır. Bunlar baca kaybı ve cihaz yüzey (kabuk - cidar) kaybını oluşturan taşınım ve ışınım kaybıdır. Fırının zemine bağlantı özelliğinden dolayı fırından yere iletim kaybı ihmal edilebilir. Ayrıca çevrimleri hızlandırmak için fırınların kapaklarının fırın sıcaklığı 150-250°C'de açılır. Fırın kapaklarının fırın tam soğumadan açılması sonucunda sıcak ürünlerden, ürünlerin yerleştirildiği arabadan, yalıtım malzemesinden ve fırın tuğlalarından ortama ısı yayılır.

Fırın kapakları açıldığında, fırın sıcaklığının ortalama 200°C civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu sıcaklıkta fırından işlem gören ürün, ürünü fırında taşıyan araba, arabanın yalıtım malzemesi ve fırını yalıtım için kullanılan özel tuğlalar ortam sıcaklığına kadar soğumaktadır. Fırın dışına alınan ürün, araba ve arabanın yalıtım malzeme sıcaklığı 200°C, fırın duvar yalıtım malzemesi için fırın içi sıcaklığı ile ortam sıcaklığının ortalama sıcaklığı olarak 115°C olduğu kabul edilerek hesap yapılabilir.

Fırına giren ürün ile çıkan ürün ağırlıkları uzun bir süre ölçülmüş, aralarında ağırlık farklı ortalama %7 olarak bulunmuştur. Bu fark, ürün bünyesindeki suyun buharlaşmasından kaynaklandığı kabul edilmiştir [5].

Fırın yüzey kayıpları (zarf kaybı) için fırının dört yan yüzeyi ve üst yüzeyinden yapılan sıcaklık ölçümleri, kanallarda ortalama hız ölçümünde de yapıldığı gibi dörtgenlere ayrılarak ölçüm noktaları belirlenmiştir. Bir yüzey termometre ile düzenli aralıkla ölçülen sıcaklıklar için Nusselt Sayısı' dan ısı taşınım katsayısı bulunmuştur. Her saat dilimi içinde değişen sıcaklıkla, fırın yüzeyindeki hava akımının laminar ya da türbülanslı olması durumuna göre değişen ısı taşınım katsayısı ile hesap yapılmıştır. Fırınların alt yüzeyinin sıcaklıkları ölçülemediği için sadece tahmin edilebilmiştir. Hesaplanan örneğe benzetilerek diğer fırınlar için hesap yapılmıştır. Sadece bir fırının yan yüzeyi ile ortam sıcaklık farkı Tablo 4 de gösterilmiştir. Seçilen örnek fırında ölçülen en yüksek ortalama sıcaklık farkı 36°C olmuştur.

**Tablo 4.** Fırın Yüzey Sıcaklıkları ve Ortam Sıcaklıkları Farkının Çevrim Süresince Değişimi

Ölçüm Saati Yapılan Dilimini Temsil Eden Saat	7,30	8,30	9,30	10,30	11,30	12,30	13,30	14,30	15,30	16,30	17,30	18,30	19,30	20,30	21,30	22,30
Ölçüm Saati Yapılan Dilimini Başlangıçtan İtibaren (Isınma/Soğuma)	1. h ls	2. h ls	3. h ls	4. h ls	5. h ls	6. h ls	7. h ls	8. h ls	9. h ls	10. h ls	11. h ls	12. h S	13. h S	14. h S	15. h S	16. h S
Fırın Yan Yüzey Sıcaklığı - Ortam Sıcaklığı (°C)	0	0	0	0	2	5	10	17	29	36	34	32	30	26	22	18

Fırın iç basıncı, başlangıçta atmosfer basıncına çok yakındır. Sürekli fırınlarda fırın içi basınç, süreksiz fırınlara göre daha önemlidir. Sürekli fırınlarda fırın içi basınç pozitif olduğunda malzeme giriş ve çıkışında kapaklar açıldığı için kapaklardan sıcak duman gazları kaçar. Bunun tersi durumda, fırın içi basınç negatif olduğunda bu sefer ortam sıcaklığındaki hava fırın içine girer ve fırını soğutur. Ayrıca fırın kapaklarından ışınım kaybı da hesaba katılması önemlidir. Özel durumlar dışında süreksiz fırınlarda bu tip kapaklardan ışınım kayıpları ya yoktur ya da son derece sınırlıdır. Örneğin süreksiz cam ergitme fırınlarında küçük karıştırma boşlukları olabilir.

### 3.2. Duman Gazı Kayıpları

Fırın kaybı hesabında en zor bölüm, baca sisteminin kayıplarını hesaplamaktır. Duman gazı, baca sisteminin korunması amacıyla hava ile karıştırılarak sıcaklığı düşürüldükten sonra bacadan atmosfere atılır. Ayrıca baca sisteminden atmosfere atılan ısı enerjisi, sağlanabilecek tek kayıp enerjidir. Bu nedenle baca sistemindeki kayıpların hesaplanması konusunda özel bir önem gösterilmiştir. Duman gazı ile hesap yaparken önemli olan sadece duman gazı sıcaklığından ziyade duman gazının kompozisyonu daha da önemlidir [5,6]. Zaten yakıt tüketimi olmadığı zaman duman gazı kompozisyonun atmosferik hava kompozisyonu ile aynı olduğu açıktır. Yanma bölümünde ise fırından çıkan duman gazı aynı olmasına rağmen, duman gazının fırın çıkışında farklı oranlarda hava ile karışması, duman gazı ölçümlerindeki kompozisyonunu tamamen değiştirir. Bu durum baca gazı hesabını zorlaştırmaktadır. Fakat bu durum bir kez fırın yakma sistemindeki hava fazlalık katsayısı ( $\lambda$ ) hesaplandıktan sonra fırın bacasını soğutmak için baca gazına karıştırılan hava miktarını hesaplamakta kolaylık sağlar [7]. Tablo 5' de Fırın içi sıcaklıkları ve baca sıcaklıklarının çevrim süresince değişimi gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Çevrim Süresince Fırın İçi Sıcaklığı ve Baca Sıcaklığının Değişimi

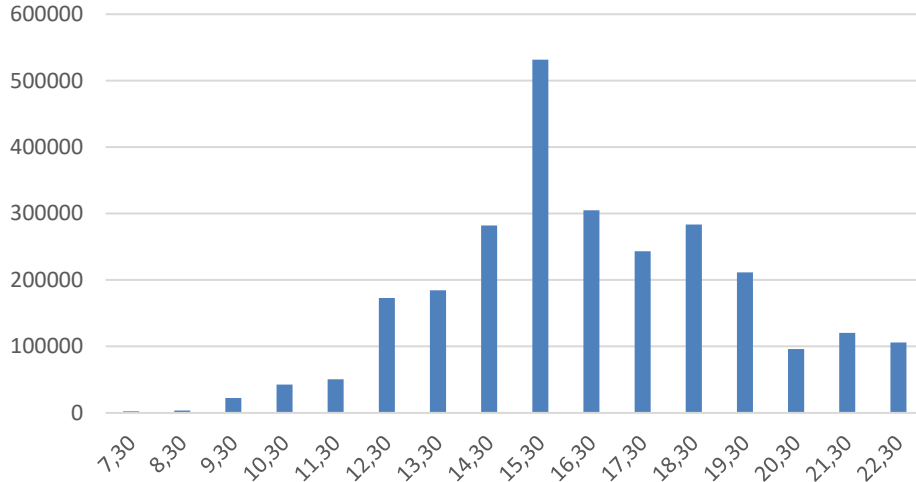
Ölçüm Saati Yapılan Dilimini Temsil Eden Saat	7,30	8,30	9,30	10,30	11,30	12,30	13,30	14,30	15,30	16,30	17,30	18,30	19,30	20,30	21,30	22,30
Ölçüm Saati Yapılan Dilimini Başlangıçtan İtibaren (Isınma/Soğuma)	1. h ls	2. h ls	3. h ls	4. h ls	5. h ls	6. h ls	7. h ls	8. h ls	9. h ls	10. h ls	11. h ls	12. h S	13. h S	14. h S	15. h S	16. h S
Fırın İçi Sıcaklığı (°C)*	81	142	293	427	572	695	864	966	1047	1067	1069	752	555	448	322	213
Baca Sıcaklığı (°C)	45	63	98	137	195	262	338	457	416	335	347	366	271	189	25	25

\*Üretici gizliliğini korumak için normal bir çevrimdeki fırın içi sıcaklığı değil, bir deneme üretimi fırın içi sıcaklığı verilmiştir.

Baca sistemindeki kayıp, üç yöntem ile hesaplanabilir. Birinci yöntemde, yakılan yakıt debisi ve hava fazlalık katsayısı ile duman gazı kompozisyonunu temel alarak duman gazı debisi bulunur ve buna

bağlı olarak duman gazı kaybını hesaplanabilir. İkinci yöntem fırın içi sıcaklığını temel alarak baca sistemi ve ortam sıcaklık hesaplarından, baca sistemindeki boşluklardan giren havayı hesaplayarak baca kaybını bulunabilir. Üçüncü yöntem ise EN 12953-11 standardında da belirtilen yöntemle benzeterek, ısı enerjisi kazanım ve kayıplarının bilançosundan duman gazı kaybını hesaplanmaktadır. Üçüncü yöntem daha az hatalı sonuç verir. Örnek fırın, üçüncü yöntemle hesap edilmiş, birinci ve ikinci yöntemle de kontrol edilmiştir. Baca gazı hesabı konusunda gösterilen bu hassasiyetin nedeni, ısı sağılacak ana kaybın baca sisteminde olmasıdır. Şekil 1’de gösterilen duman gazındaki ısı enerjisi kullanılabilen enerji değil, sadece fırın bacasından çıkan enerjidir. İlk dört saat ürün, araba ve yalıtım malzemesinin ısıtılması ve ürün içindeki suyun buharlaşması nedeniyle neredeyse sağılacak çok az enerji vardır. Bu ilk dört saat yüzey kaybı da yoktur.

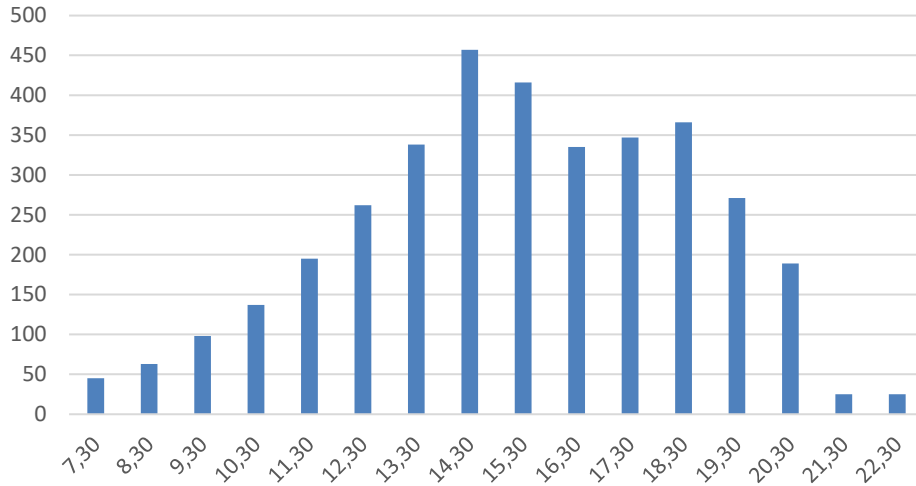
Fırın Bacasından Çıkan Enerji (kcal/h)



\*Üretici gizliliğini korumak için normal bir çevrimdeki fırın bacasından çıkan enerji değil, bir deneme üretimi bacadan çıkan enerji verilmiştir.

Şekil 1 Fırın Bacasından Kaybolan Isı Enerjisinin Çevrim Süresince Değişimi

Fırın Baca Sıcaklığı (°C)

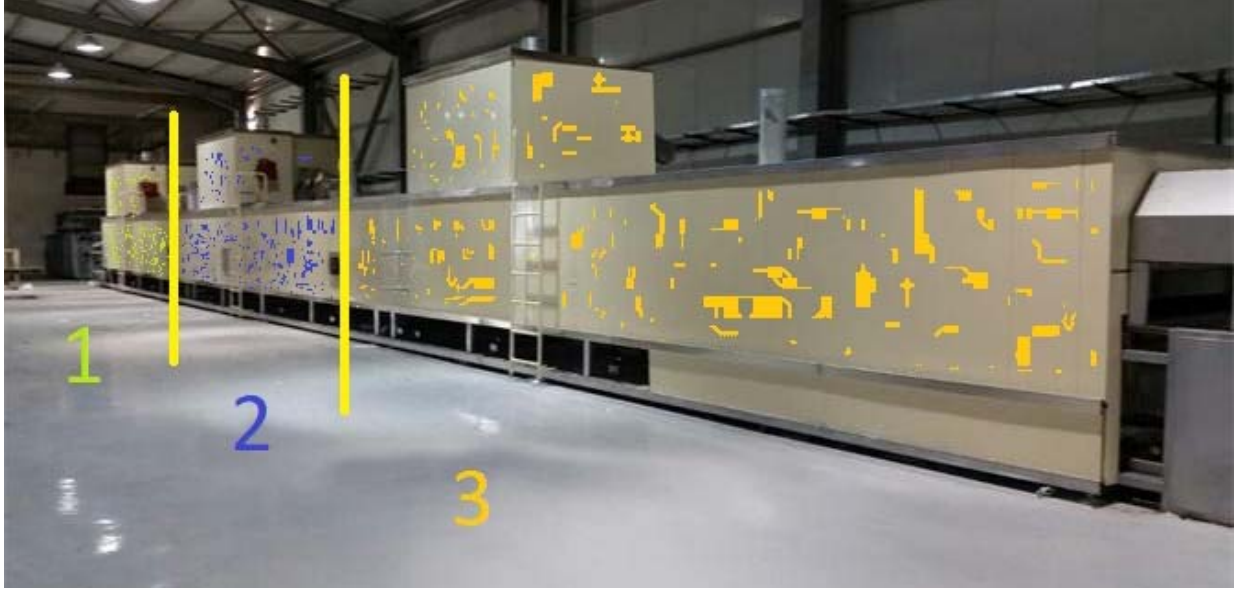


Şekil 2 Fırın Bacası Sıcaklığının Çevrim Süresince Değişimi

Fırın bacasından atılan ısıdan ziyade baca gazının sıcaklığına bağlı olarak başka bir proste kullanılacak ısı enerjisi miktarı dikkate alınmalıdır. Fırın bacası sıcaklıklarının çevrim içindeki değişimi Şekil 2’de gösterilmiştir.

#### 4. Süreksiz (Kesikli) Isıl Sistemlerde Göz Önüne Alınması Gereken Hususlar

Örnek fırında duman gazında son iki saatte sistemden çekilebilecek belirgin bir enerji kalmaz. Eğer baca sisteminden atılan ısı enerjisiyle yakma havasının ısıtılması düşünülüyorsa, 15 saatlik bir çevrimin yaklaşık 5 saatlik bir zaman diliminin değerlendirmesi daha doğru olur. Yine tek bir fırının baca sistemindeki ısı enerjisini çekip, bu ısı enerjisini başka bir proseste kullanmayı planlanıyorsa; 15 saatlik bir çevrime 1,5 saatlik fırını boşaltıp-doldurma süresinin de eklenmesi gerekir. Yaklaşık 16,5 saatlik bu zaman süresince, 9 saatlik bir zaman aralığında duman gazı bünyesindeki ısı enerjisi çekilebilir. Bu durum, sürekli bir ısı çekimi için birbirinin benzeri en az iki endüstriyel fırını birbiriyle uyumlu olarak çalıştırmayı gerektirir. Pratikte iki fırın da yeterli olmayabilir.



Şekil 3. Bir Sürekli Tünel Fırında Üç Farklı Bölge

Görülebileceği gibi sürekli fırınlarla süreksiz fırınlarda enerji tasarrufu mantıklarının birbirinden çok farklı olduğu görülebilir. Eğer ele aldığımız endüstriyel fırın sürekli bir fırın olsaydı, vardiya çalışma günlerine bağlı olarak devreye alınması sonrası haftada bir ya da bakım sonrası birkaç ayda bir, birkaç saatlik geçici rejim sonrasında baca sisteminden çekilebilecek ısı enerjisi değişken olmayacaktı. Sürekli fırınlarda, fırın bölgelerinde sıcaklık değişken olsa bile zamandan bağımsızdır. Şekil 3' te bir sürekli tünel fırındaki üç farklı bölge görülmektedir.

Büyük sürekli tünel fırınlarda bekler, ayarlanan sıcaklığı sabit tutabilmek için devreye girip çıkarlar. Bir bek durduğu zaman dahi diğer beklerden gelen duman gazları bacalardan akışa devam edebilir. Bu durum, sürekli fırınlarda da baca sisteminden çekilen ısı enerjisi ile yakma havasının ısıtılması hesabını güçleştirir. Bütün baca çıkışlarını bir kollektörde toplayıp, burada ısının çekilmesi ve ısıtılan yakma havasının bir kanal sistemiyle beklere verilmesi, yatırımın geri ödeme süresini çok arttırabilir ve bu durumda yatırım ekonomik olmayabilir. Aynı zamanda sürekli tünel fırınlarda duman gazı kompozisyonu, beklerin çalışma durumuna göre sürekli değişim gösterir. Buna karşı süreksiz fırınlarda ısınma sürecinde bütün beklerin çalışma süreleri çok daha fazladır. Soğuma sürecinde bekler ya durur ya da çok kısa aralıklarla çalışır. Bu iki farklı durum beklere gelen havanın ısıtılması ya da bacalardan çekilen ısıların kullanım yerlerini değiştirir.

Sürekli ve süreksiz fırınlarda, fırın bacasından atılan ısı enerjisinin yakıtı oranı, fırında ulaşılan en yüksek sıcaklığa ve bu sıcaklıktaki çevrimin süresine bağlıdır. Fırın sıcaklığı ne kadar yüksekse, çevrim süresi ne kadar uzun ise, bacadan atılan ısı enerjisinin, toplam atılan enerjiye oranı o kadar yüksek olur. Örneğin 1000°C'den daha yüksek sıcaklıklarda, tam gün süren çevrimlerde baca kayıplarının toplam ısı kaybına oranı %80'lere ulaşabilir. Bu nedenle süreksiz endüstriyel fırınlardaki enerji tasarrufu önlemlerinde ilk dikkat edilecek nokta, baca gazı kayıplarıdır. Örneğin düz cam fırınlarında, 1200°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda, 36 saatten fazla süre tutulması gerekir. Bu nedenle

cam fırınlarının rejeneratörleri, fırından birkaç kat büyük olur. Rejeneratörden çıkan duman gazı bünyesinde bulunan ısı enerjisini geri kazanmak için atık ısı kazanları da kullanılır.

İşletmede atılan duman gazının sıcaklığı ve debisi ne kadar yüksek ise sistemden çekilecek ısı miktarı da o kadar artar. Örneğin saha ısıtma ile orta basınçlı buhar eldesi için kullanılacak ısı değiştiricilerin/atık ısı kazanlarının etkinlikleri farklı olacaktır. Bu nedenle çekilen ısının kullanım sıralamasındaki parametrelerinden biri, en yüksek sıcaklıkta ısı gerektiren tüketim noktasıdır [4]. Bu süreçte sıcaklık tek başına parametre olmayabilir. Yerleşim sorunları nedeniyle fırın yakma havasının ısıtılması ilk seçeneklerden biridir. Fabrika yerleşimi de sistemden çekilecek ısı enerjisinin kullanılma noktalarını belirlemektedir. Bu konuda karar verme yetkisinin fabrika sahibi ve yöneticilerine bırakılması önerilir.

## 5. Süreksiz Fırınlarda Tasarruf Edilebilen Enerji Türleri

İzolasyon gibi tasarruf edilen pasif enerjiden çok daha fazla, süreksiz fırınlarda fabrikada kullanılacak ısı enerjisi elde edilir. Bu kullanılacak tasarruf edilen ısı enerjisi de genellikle ikiye ayrılır. Bunlardan biri sıcak hava ve diğeri ise sıcak sudur.

Sıcak hava, cam fırınlarında da çok belirgin olarak kullanıldığı gibi, yakma havasının ısıtılmasıdır. Yakma havasının sıcaklığı, fırın beklerinin olanak verdiği sıcaklığa kadar kullanılabilir. Çok basit bek değişiklikleri ile 150°C olan bu sıcaklık, biraz özel bir uygulamalarla 300°C sıcaklığa kadar çıkartılabilir. Yine örnekte verilen cam fırınlarında bu yakma hava sıcaklığı 500°C nin üzerine çıkartılması gerekir. Aksi durumda, cam üreten işletmenin ekonomik olarak rekabet etmesi zorlaşır. Yakma sıcaklığının seçimi, periyodun uzunluğu, enerji tüketimi, enerji fiyatı, bek fiyatı, banka faizleri gibi kıstaslar içinde optimum sıcaklığın bulunması ile belirlenir.

Eğer fabrikada 100°C'nin üzerindeki sıcak hava dışında, buhar ve kızgın yağ uygulamaları varsa, baca sıcaklığı da göz önüne alınarak özel çözümler bulunması gerekir.

Elde edilecek sıcak su ise, bütün yıl ve mevsimsel olarak kullanılacak sıcak su olarak ikiye ayrılabilir. Mevsimsel olarak ısıtmada ve yıkanmada kullanılacak sıcak su ya da proseste kullanılan sıcak suyun birlikte olması yine kolay olmayan bir geri dönüşüm süresi gerektiği kararının verilmesini gerektirir.

## 6. Enerji Tasarrufu Sağlayacak Cihazların Büyüklüğünün Belirlenmesi

Değişkenlerin bir bölümü için ekonomik öncelik alınabilir. Isı değiştiricinin boyut-maliyet eğrisinin düzgün olarak büyümemesi, artan ya da azalan enerji fiyatları önemlidir. Diğer yünden de ısı değiştirici büyüdükçe tam kapasite ile çalıştığı süre azalmaktadır.

Ayrıca fabrikada ihtiyaç olan maksimum enerji miktarı, ısı geri kazanım sisteminin başka enerji kaynakları ile yedeklenip, yedeklenmediği gibi veriler de yapılacak ısı ihtiyacının büyüklüğünü belirleyebilir. Kullanılacak ısının depolanması da önemli bir değişkendir. Örneğin sıcak su kullanılacaksa enerji depolanabilir, sıcak hava ise depolanamaz kabul edilebilir.

Geri ödeme süresi, finans ve faiz oranları da ısı değiştiricinin büyüklüğünün seçiminde etkili olur. Geri ödeme süresi azaldıkça büyüklüğü artırma eğilimi artar. Örneğin, Şekil 1'de baca çıkışındaki sağılmak istenen enerji düzeyi 200.000 kcal/h'ten 300.000 kcal/h'e doğru artış göstermektedir.



## 7. Tasarruf Edilen Enerjini Kullanılacağı Yerleri Belirlemesi

Bütün bu hesapları yapmadan önce tasarruf edilen sıcak hava ve sıcak suyun nerede kullanılabileceği konusuna karar verip, hesaplanması gerekiyor. Bir sistemden ne kadar enerji tasarruf edileceğinden çok, bu elde edilen enerjinin kullanılabilirliği önemlidir ve ilk düşünülmesi gereken konu prosesi anlayarak elde edilecek enerjinin kullanılmasıdır. Fırınlardan için ilk akla gelen uygulama, yakma havasının ısıtılmasıdır. Bu göreceli olarak tasarruf miktarı ve geri ödeme süresi daha kolay hesaplanabilecek bölümdür. Daha sonra süreksiz fırınlardan zaman içinde değişken olarak elde edilecek sıcak su, sıcak yağ ve havanın kullanılması anlamına gelir. Sıcak su ve yağ bir miktar depolanabilir olduğundan, depo kapasitesine dikkat edilerek tasarruf edilen sıcak su ve yağın büyük bölümü gerekli yerlere ulaştırılabilir. Hesaplanması en zor bölüm, süreksiz fırınlardan elde edilen, yakma havasında kullanılmayan sıcak havanın düzgün ya da değişken sıcak hava tüketiminde kullanılmasıdır. Örneğin kurutma amaçlı ya da iklimlendirme amacıyla kullanılan sıcak hava bu türdendir.

## 8. Süreksiz Fırınlarda Tasarruf Edilen Enerjinin Optimizasyonu

Fırınlardan elde edilebilecek enerjinin, işletmede kullanılabilecek enerjiden daha az olması durumu sık rastlanan bir durumdur. Bu durumda, kullanılacak tasarruf edilen enerjinin sadece ekonomik olarak değerli enerjiye dönüşümü tek kistas olmamalıdır. Uyum sorunu olmayan, daha rahat depolanan enerji, tasarruf edilen kullanım noktasını seçmekte önemlidir. Bu seçim, firma sahibi ya da yöneticisinin son kararı vermesi şartıyla, hesap ve dizayn yapan mühendisler, işletme üretim sorumluları, gerekiyorsa kalite kontrolcüler, finansçılar, enerji yönetiminden sorumluların katılması tercih edilmelidir. Bu arada kullanılan enerjinin otomatik kontrolü de önemlidir.

## 9. Enerji Tasarrufu İçin Yapılan Sistemde Otomatik Kontrol

Enerji tasarrufunda hesap ve maliyetin dışında uygulanabilirlik de zorunlu olarak göz önüne alınması gereken bir veridir. Cihazlar için yeterli hacmin dışında sistemin otomatik kontrolle uyumlu olması da önemlidir. Bu konuda en kolay yöntem, tecrübeli otomatik kontrolcülerle çalışmaktır. Bunun dışında sistemi projelendiren mühendisin mutlaka en azından sınırlı bir otomatik kontrol bilgisi olması gerekmektedir. Örneğin baca gazından yakma havası ısıtan bir ısı değiştiricinin hangi sıcaklıkta, hangi şartlarda çalışacağını dizayn mühendisinin, otomatik kontrolcüye anlatması gerekmektedir. Sistem kurulduktan sonra da sistemin doğru çalışıp, çalışmadığının kontrolü, hata ve eksiklerin nasıl düzeltileceğini bilmesi gerekmektedir. Otomatik kontrolcünün fiziksel sorunları bilmesi zordur.

## 10. Sonuç

Bir tesiste enerji tasarrufunu planlarken ilk yapılması gereken, tesisin kütle ve enerji dengesini çıkarmak için gerekli ölçüm noktalarını belirlemekten geçmektedir. Bir ölçüm noktasındaki değer, birden çok yolla ve birden çok kez ölçülerek daha doğru olarak bulunabilir. Isıl sistemlerde, kütle ve enerji akış hesapları yapılırken kullanılan yakıtın verdiği ısı enerjisi temel alınarak prosesteki enerji kayıpları ve ürüne verilen enerji, yakıt enerjisi ile eşitlemeye çalışılır. Yakıtın verdiği enerji ile ürüne verilen ve kayıp enerji arasındaki fark, istenilen değere ininceye kadar ölçümler ve hesaplar tekrarlanır. Bu tekrarlama işlemleri, ölçüm ve hesap yapanın sistem hakkındaki tecrübesine göre artar ya da azalır.

Enerji dengesini sağlamak için yapılan ölçüm ve hesapların en zorlarından biri de süreksiz ısı sistemlerinin enerji ölçüm ve hesaplarıdır. Bu çalışmada bir süreksiz endüstriyel fırın örnek alınarak

ölçüm noktalarının özelliklerine göre yapılması gereken ölçümler ile kütle ve enerji dengesi oluştururken yapılması gerekenler değerlendirilmiştir. Enerji tasarrufundan sağlanan kazanım ve yatırım için gerekli maliyet hesaplanmadan doğru enerji tasarrufu hesabı yapılamaz. Eğer enerji tasarrufunun getireceği kazanım ile başka yerde kullanılacak enerji elde edilmesi durumunda, elde edilen enerjinin kullanım yeri de önem kazanır. Yasal zorunluluk nedeniyle yapılan enerji tasarrufu önlemleri ve teşvikler dışındaki önlemlerde maliyet ve geri ödeme süresi, temel karar verme kriterleridir. Bu kriterleri sağlayan çizelgenin oluşturması için de bütün işletmeye giren enerji, bu enerjinin kullanıldığı bütün noktalardaki enerji miktarı ve özellikleri belirlenmelidir. Süreksiz sistemlerdeki bu noktalardaki enerji ve özellikleri sürekli değişerek enerji tasarrufu önlemlerinin zor uygulandığı yerlerden birini karşımıza çıkartır. Bu çalışmada en zor tasarruf önlemlerinden birinin uygulaması olan süreksiz ısı sistemleri ile en ucuz enerji olan tasarruf edilen enerjinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] OpExWorks Types and Classification of Different Furnaces. [online] Available at: [https://www.opexworks.com/KBase/Energy\\_Management/Termal\\_Energy\\_Management/Furnaces/Types\\_and\\_Classification\\_of\\_Different\\_Furnaces.htm](https://www.opexworks.com/KBase/Energy_Management/Termal_Energy_Management/Furnaces/Types_and_Classification_of_Different_Furnaces.htm)
- [2] [fen.mu.edu.tr/icerik/metalurji.mu.edu.tr/Sayfa/Materials%20and%20Energy%20Balance%20-%20Course%209%20Heat%20Balance%20in%20Pyrometallurgy.pdf](http://fen.mu.edu.tr/icerik/metalurji.mu.edu.tr/Sayfa/Materials%20and%20Energy%20Balance%20-%20Course%209%20Heat%20Balance%20in%20Pyrometallurgy.pdf)
- [3] KARAKOŞ T H., AÇIKKALP E., HEPBAŞLI A., Novel method for determining optimum insulation thickness of a piping system, August 2014, Conference: 1th International Conference on Energy (ICOE 2014)
- [4] SHEPPARD W. F., (1911). "Interpolation" . Pada Chisholm, Hugh (ed.). Encyclopædia Britannica. 14 (11th ed.). Cambridge University Press. pp. 706–710.
- [5] STOECKER W., (2017). "Design of Thermal Systems 3rd edition", pp304.
- [6] DZURENDA L., BANSKIMAY A., (2015). "Dependence of the boiler flue gas losses on humidity of wood biomass", , *Archives of Thermodynamics* 36(4), DOI: [10.1515/aoter-2015-0034](https://doi.org/10.1515/aoter-2015-0034)).
- [7] BİLGİN A., (2011) Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyonlar, Tesisat Mühendisliği dergisi, Mart-Nisan 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

### Barbaros BATUR

1966 İstanbul doğumludur. 1990 yılında İTÜ Makine Fakültesini Makine Mühendisi olarak bitirmiştir. 1995 yılında Marmara Üniversitesinden Endüstri Yüksek Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2002 yılında YTÜ' de Makine Mühendisliği, Isı Proses Dalında doktorasını tamamlamıştır. 2005 yılından beri YTÜ, Makine Bölümünde Öğretim Görevlisi Dr. olarak ders vermektedir. Proses, enerji, ısıtma-havalandırma tesisat konularında çalışmaktadır.

### Mustafa Cem Çelik

1973 yılı Edirne doğumludur. 1995 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 1999 yılında Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Yüksek Lisans derecesi olarak yüksek mühendis olmuştur. 2014 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Doktor unvanını almıştır. 1999 Yılından bu güne Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi / Öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Yenilenebilir enerji, hidroelektrik santraller, iç hava kalitesi, karbon ayak izi hesaplamaları konularında çalışmaktadır.

**Muammer AKGÜN**

1990 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesinden, 1995 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine-Enerji Anabilim Dalından mezun olmuştur. 1992-1998 yılları arasında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Araştırma Görevlisi olarak, 1998-2013 yılları arasında kazan ve basınçlı kap sektöründe Ar&Ge, Tasarım, Üretim ve Şantiye montaj alanlarında çeşitli projelerde çalışmıştır. 2013-2022 yılları arasında, Bacader Genel Koordinatörü olarak görev yapmıştır. Halen MMO İstanbul Şubesinde Kazan ve Basınçlı Kaplar komisyon başkanlığı yapmaktadır. MMO İstanbul Şubesi bünyesinde yayınlanan “Kızgın Sulu, Kızgın Yağlı, Buharlı Isıtma Sistemleri” kitabının altı bölümünün yazarı ve son üç baskısının da editörü, ISKAV bünyesinde yayınlanan “Endüstri Kazanları” kitabının bir bölümünün yazarı ve “Sıcak Su Kazanları” kitabının üç bölümün yazarı ve kitabın son baskısının editörüdür. İMSAD Yapı Malzemeleri Komisyonu ile birlikte “Yapı Malzemeleri Yönetmeliği Rehber Kitap” ve Çevre Dostu Malzemeler Komisyonu ile “Sürdürülebilir İnşaat Malzemeleri Sözlüğü” çalışmalarına katkı sağlamıştır. Yayınlanmış pek çok makalesi, teknik yazıları bulunmaktadır.