

Araştırma Makalesi - Research Article

Endüstriyel Kazanlarda Yanma Veriminin Süreç Geliştirme Teknikleri Kullanılarak İyileştirilmesi

Ahmet Fevzi SAVAŞ^{1*}, Ceyda KOCABAŞ²

Geliş / Received: 09/09/2019

Revize / Revised: 12/11/2019

Kabul / Accepted: 16/11/2019

ÖZ

Endüstriyel kazanlardaki en önemli verim kayıplarından bir tanesi de yanma kaybıdır. Bu çalışmada, kazan yanma veriminin azalmasına neden olan riskler, Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) tekniği kullanılarak sıralanmıştır. Yanma kaybına neden olan çok fazla faktör olduğu görülmüştür. Hem bu faktörler arasındaki ilişkileri tespit etmek hem de yanma kaybına neden olan ana etkeni belirlemek amacıyla süreç geliştirme araçlarından biri olan ilişkiler diyagramından yararlanılmıştır. Bu değerlendirme neticesinde yanma kaybına neden olan ana faktörün düzgün olmayan O₂ / yakıt oranı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu soruna bir çözüm bulmak amacıyla Poka- Yoke hatasızlaştırma tekniği uygulanarak, O₂ /yakıt oranını sürekli optimize eden O₂/CO trimli yakma yönetim sistemi kullanılması önerilmiştir. Böylece; yanma kalitesi, iç ve dış şartlardan çok fazla etkilenmeden otomatik olarak optimum düzeyde tutulacaktır. Bu yatırımın getireceği yıllık enerji tasarruf miktarı hesaplanmış ve kendini yaklaşık 4 yıl içerisinde geri ödeyeceği belirlenmiştir. Bu çalışmanın endüstriyel kazan kullanan diğer sanayi kuruluşlarına da örnek teşkil edeceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler- Yanma Kaybı, Enerji Verimliliği, FMEA, İlişkiler Diyagramı, Poka-Yoke

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: ahmetfevzi.savas@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8376-9234>)

Alternatif Enerji kaynakları Teknolojisi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye

²İletişim: ceyda.pak@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8459-1650>)

Üretimde Kalite Kontrol Programı, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye

Improvement of Combustion Efficiency in Industrial Boilers Using Process Development Techniques

ABSTRACT

One of the most important efficiency losses in industrial boilers is combustion loss. In this study, the risks that reduce boiler combustion efficiency are listed by using the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) technique. There are many factors that cause combustion loss. The relationship diagram, which is one of the process development tools, has been used to research the relationships between these factors and determine the main factor causing combustion loss. As a result of this evaluation, it has been specified that the main factor causing combustion loss is the inappropriate O₂ / fuel ratio. To find a solution to this problem, the Poka-Yoke mistake-proofing technique has been applied and the O₂/CO trim combustion management system which continually optimizes O₂ / fuel ratio has been proposed. Thus, the combustion quality will be kept automatically at the optimum level without being affected by internal and external conditions. The annual energy saving of this investment has been calculated, and it has been determined that it will pay itself back in 4 years. This study is thought to be an example for other industrial organizations using industrial boilers.

Keywords- Combustion Loss, Energy Efficiency, FMEA, Relationship Diagram, Poka-Yoke

I.GİRİŞ

Kazanlar, yakıtta bulunan kimyasal enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek taşıyıcı akışkana ileten ve belirli bir basınç altında çalışan kapalı kaplardır [1]. Enerji kaynağı olan yakıtların ideal yanmalarını sağlayarak en az kayıpla yakıtı enerjiye dönüştürebilmek hayati bir önem arz etmektedir. Teorik olarak kayıpsız enerji kazancı mümkün görünse de pratik uygulamada pek mümkün değildir çünkü mutlaka bazı kayıplar meydana gelecektir. Fabrikaların enerjiyi en düşük maliyetle elde etmeleri ve fabrika giderlerini minimuma indirmek için bu kayıpları hesaplayarak en az seviyeye indirmeleri gerekmektedir [2]. Endüstriyel tesislerin % 95'inde % 40 varan miktarlarda enerji tasarrufu yapılmasının mümkün olduğu görülmektedir. Daha da çarpıcı olan konu ise bu işletmelerde hiç yatırımsız veya az yatırımlı önlemlerin uygulanması ile asgari % 10 oranında enerji tasarrufu elde edilebilmesidir [3]. Tekstil sektöründe buhar sistemi ve kazanlar enerji maliyetleri açısından ilk sırada incelenmesi gereken bölümdür [4].

Kazanın yanma verimliliği, hem yanmanın kalitesine hem de yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin kazan içerisindeki akışkana transfer miktarına bağlı olarak değişmektedir [5]. Kazanlarda meydana gelen enerji kayıpları ve bunların azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirildiği bazı çalışmalara yer verecek olursak; Çınar (2008), yoğun enerji tüketimi olan altı adet tekstil fabrikası seçerek; bu fabrikaların iş ve enerji akış diyagramlarını oluşturmuş, enerji üretim ve tüketimiyle ilgili veriler toplayarak enerji etütleri yapmıştır. Spesifik enerji tüketimlerini hesaplayarak tesislerin gelecek enerji ihtiyaçlarını ortaya koymuştur. Kazanlarda ve yakıtın kullanıldığı diğer makinelerde baca gazı analizleri yapmıştır. Ölçüm sonuçlarını değerlendirerek baca gazındaki oksijen oranının daha aşağılara düşürülmesiyle birlikte sağlanması beklenen enerji tasarruf imkânlarını ve bu tasarruflardan doğacak mali kazançları hesaplamıştır [6]. Bilgin (2011), kazanlarda enerji verimliliği üzerine yaptığı çalışmada eksik yanma durumunda kaybedilen enerjinin önemine vurgu yapmıştır. Baca gazı bileşenleri ve baca gazı için kabul edilen ideal değerler hakkında bilgi vermiştir. Baca gazı analizörleri kullanılarak, baca gazının içerdiği bileşen oranlarının periyodik olarak izlenmesi ve zamanında müdahale edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Yakıt tüketiminin fazla olduğu yüksek kapasiteli kazanlar için yakma yönetim ve oksijen trim kontrol sistemlerinin geliştirilmiş olduğunu ifade etmiştir [5]. Durukan (1997), çalışmasında yanma konusundaki yeterince özümselememiş bazı temel bilgi ve kavramlar hakkında açıklamalarda bulunmuştur. Yanma ve yakıt kimyası üzerine eğilerek, yanmayla ilgili pratik hesap formülleri, yanma verimi tablosu gibi rehber nitelikli bazı bilgilere yer vermiştir. Baca gazı cihazlarının kullanımının önemini açıklayarak ölçüm sonuçlarının içerdiği anlamları ayrıntılı olarak ifade etmiş ve ideal yanma için baca gazı bileşenlerinin hangi oranlarda bulunması gerektiğinden bahsetmiştir [7]. Kanoğlu (2010), özellikle sanayi tesisleri için belli başlı enerji tasarruf yöntemlerini 13 ana başlık altında örnekler yardımıyla anlatmıştır. Kazanlarda hava-yakıt oranının periyodik olarak kontrol edilip modifiye edilmesinin yanma verimini artırmanın en kolay yollarından biri olduğunu ifade etmiştir. Fazla havanın aşağılara çekilmesiyle elde edilecek yakıt tasarrufunu hesaplamıştır. Aynı zamanda kazan yanma havasının ön ısıtılmasının sağlayacağı yakıt ve para tasarrufunu bir örnek üzerinden göstermiştir [8]. Ünlü (2009), kazanlarda enerjinin üretimi, dağıtımı ve tüketimi esnasında meydana gelen kayıplara değinmiştir. Çeşitli firmalarda 8 farklı konuda gerçekleştirilen enerji tasarrufu uygulama örneklerine yer vermiş, yapılan tasarrufların yıllık mali getirisini hesaplayarak gerekli yatırımların amortisman sürelerini ortaya koymuştur. Hava fazlalık katsayısının sürekli olarak minimum seviyede tutulması sağlanarak daha yüksek yanma performansı elde edilmesi için ileri teknoloji O₂ kontrollü yanma yönetim sistemi uygulanabileceğinden bahsetmiştir [3]. Bilgiç (2004), endüstri kazan dairelerinde yapılabilecek enerjinin etkin kullanılması için yapılması gerekenlerden bahsetmiş, yapılabilecek enerji tasarruflarını sıralamıştır. Baca kayıplarından ve bunları kayıpların nasıl azaltılacağı ile ilgili önerilerde bulunmuştur. Baca gazındaki O₂ miktarını kontrol eden bir oksijen trim sistemi kurarak % 1- 2 arasında değişen verim artışı elde edilebileceğini ve amortisman süresinin yaklaşık 1 ile 3 yıl arasında gerçekleştiğini belirtmiştir [9]. Kaya ve Güngör (2002), çeşitli sanayi kuruluşlarında gerçekleştirilmiş enerji tasarruf çalışmalarından örnekler vermiş, bu örneklerde tasarrufun miktarlarını, yatırım tutarlarını ve geri ödeme sürelerini hesaplamışlardır. Bu çalışmalardan birinde bir fabrikada kullanılan kazanlarda yanma havasının baca gazıyla ısıtılması durumunda yatırımın kendini 1 ay gibi kısa bir sürede geri ödeyebileceğini ortaya koymuşlardır [10]. Uylukçuoğlu (2009), otomotiv sektöründe ısı enerjisi ve elektrik enerjisinde yapılabilecek tasarruf olanaklarını bir tesis üzerinden örnekleyerek anlatmıştır. Baca gazı kayıplarını ve yüzeyden ısı kayıpları dikkate alarak kazan verimini hesaplamıştır. Tam yanmanın sağlanması için yanma kontrol sisteminin çalışılan firmada kullanıldığından bahsetmiştir. Yanma havasının ısıtılması ve ekonomizer kullanılması durumunda baca gazı sıcaklığının düşürülmesiyle birlikte elde edilecek tasarruf miktarını ortaya koymuştur [11].

Bu çalışmada tekstil sektöründe faaliyet göstermekte olan bir firmada bulunan buhar kazanında yanma kaybına yol açan riskler FMEA tablosu kullanılarak teker teker analiz edilmiş ve risk öncelik sayıları hesaplanmıştır. Yanma kaybına neden olan çok fazla etken olduğu görülmüş, bu etkenler arasında bir sebep sonuç ilişkisinin tespit edilmesi ve problemin netleştirilmesi amacıyla kalite geliştirmede kullandığımız araçlardan biri olan ilişkiler diyagramı çizilmiştir. Problemin çözümünde ise bir diğer iyileştirme tekniği olan Poka-Yoke kullanılmıştır. Daha önce kazan veriminin artırılmasına yönelik çalışmalarda FMEA ve kalitede kullanılan diğer iyileştirme tekniklerinin uygulandığı bir araştırmaya rastlanılmamıştır ve bu noktada yeni bir yaklaşım sunulmuş olmaktadır.

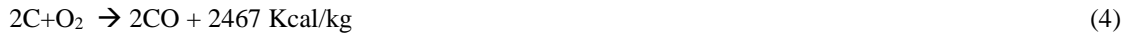
II.KAZANLARDA YANMA KAYBI

Yanma kaybı, brülörde yanmadan atılan yakıtın sahip olduğu ısı enerjisine bağlı kaybı ifade etmektedir. Yanma, yakıt içindeki yanıcı karbon (C) ve hidrojenin (H₂) hava içerisindeki oksijenle (O₂) hızlı bir kimyasal bileşim yapması olarak tanımlanabilir [7]. Yakıt tamamen yandığında, içerisindeki karbon (C) karbondioksit (CO₂), hidrojen (H₂) su buharına (H₂O), kükürt (S) kükürt-dioksit (SO₂) dönüşmektedir. İdeal - stokiyometrik koşullarda C ve H₂ nin tam yanması halinde yanma denklemi şu şekildedir [5]:

Tam Yanma



Eksik Yanma



Yanma denklemlerinden de fark edileceği gibi, oksijenin yetersiz olması nedeniyle karbonun karbondioksit dönüşmeden, karbonmonoksit olarak kalması sonucu kaybedilen enerji miktarı %70 civarında olmaktadır [5]. Yanma veriminde sağlanabilecek her % 1'lik bir artış, yakıt kullanımında % 1'lik bir tasarruf anlamına gelmektedir [8]. Bir kazanın yanma hücresinde iyi bir yanma oluşabilmesi için yakıt ve hava uygun oranlardaki karıştırılmış olarak ocak içerisine gönderilmelidir [1,9].

İyi bir yanmanın oluşup oluşmadığı, kazanı terk eden bacaya atılan duman gazlarındaki O₂, CO₂ ve CO değerleri ile baca gazı sıcaklıkları ölçülerek tespit edilebilir [9]. Baca gazında yüksek oranda CO₂ bulunması, iyi bir yanmanın göstergesi olmakla birlikte CO₂'in sera etkisine sebep olması nedeniyle emisyon olarak değerlendirilmektedir [1, 5]. Baca gazında CO bulunması eksik ya da yetersiz yanmanın en iyi göstergesidir [7]. Enerji kaybı ve kirlenme etkisi nedeniyle, baca gazları içerisinde CO olması istenilmez. Bu nedenle yakıtın verilen O₂ artırılarak, eksik yanma tamamlanmalı, CO mutlaka CO₂'e çevrilmelidir. Baca gazı ölçümlerinde 100 ppm değerine kadar CO bulunması normal olarak kabul edilir [1, 5].

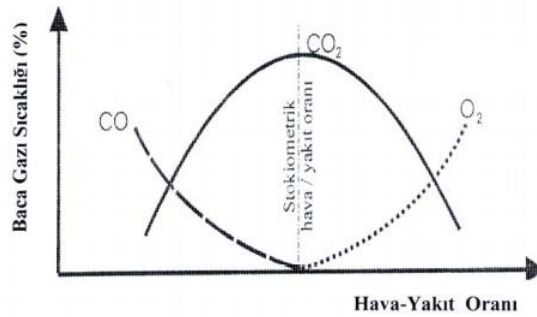
A. Yanma Verimini Etkileyen Faktörler

1) *Fazla Hava Oranı*: İdeal yanma, oksijen ve yakıtın teoride belirtilen tam oranlarında karıştırılmasıyla gerçekleşir [7]. Az hava ile yanmada oksijenin (O₂) yetersiz olması nedeniyle karbondioksit (CO₂) yerine karbonmonoksit (CO) oluşur. Karbon partikülleri is ve kuruma dönüşerek ısı transferini azaltır [3]. Bu sebeple, tam yanmanın oluşabilmesi için teorik ihtiyaçtan daha fazla hava brülöre verilir ve buna fazla hava denilmektedir [5]. Fazla hava miktarı gereğinden çok verilirse, bu durum baca gazı miktarını artırır. Fazla hava miktarı mümkün olduğu en düşük seviyede tutulmalıdır [11-12]. Kazanlarda doğalgaz için optimum fazla hava oranı %10 olarak kabul edilebilir. Bunun üzerinde çalışıldığı durumlarda önemli miktarda hava ısıtılarak atmosfere verilmiş olur [13]. Baca gazı analizinde ölçülen O₂ değerleri dikkate alınarak fazla hava oranı şu formül kullanılarak hesaplanabilmektedir [11- 12]:

$$\text{Fazla hava oranı (\%)} = \left(\frac{O_2}{21 - O_2} \right) * 100 \quad (5)$$

Fazla hava oranı yerine hava fazlalık katsayısı da hesaplanabilir. Birim miktarda yakıtı yakmak için verilen gerçek hava debisinin, teorik hava debisine oranına hava fazlalık katsayısı (λ) denir [7,11]. Optimum yanma, hava fazlalık katsayısı $\lambda=1$ değerinde iken sağlanır. Şekil 1'de görüldüğü gibi yetersiz hava olması durumunda CO miktarı hızla artmakta, yani yakıtın bir kısmı yanma reaksiyonuna girmeden atılmaktadır [14]. Bu durumda ısı ve yüksek CO emisyonu meydana gelir. Isı ve kurum ise alevin oluşmasını engelleyerek yanma verimini düşürür. Havanın aşırı fazla olması durumunda ise CO miktarı azalır ancak yanma dengesi bozularak yanma verimi düşer. Ayrıca, yanmaya dahil olmayan O_2 molekülleri ocak içinde bulunan ısıyı kendi içerisinde hapsederek alevin yanma sıcaklığını düşürür ve bu nedenle de yanma kötüleşir. Fazla oksijen, yanma sonucunda oluşan ısı enerjisinin bir miktarını kendi üzerinde taşıyarak, baca yoluyla enerji kaybına yol açar [7].

Baca gazının bileşimi haftada en azından bir defa kontrol edilerek O_2 seviyesi ölçülmeli ve hava -yakıt oranı modifiye edilmelidir. Verilen yakıtta göre hava miktarını ayarlanarak $\lambda=1$ bölgesinde çalışma sağlanmalıdır.



Şekil 1. Baca gazı sıcaklığı hava-yakıt oranına ilişkisi [14]

2) *Baca Çekişi*: Verimli bir yanma elde etmek için bir diğer önemli parametre ise bacanın çekiş basıncıdır. Baca çekiş basıncı, yanma gazlarının kazan içerisindeki geçiş hızını ve dışarıdan kazan içine emilecek ikincil hava miktarını belirler [7]. Baca çekişinin aşırı olması durumunda baca gazı miktarı artar ve artan bu miktardaki hava, baca gazı sıcaklığına kadar ısınıp enerji alacağı için çok daha fazla ısının bacadan atılmasına sebep olur. Ayrıca baca gazı miktarının artması, gaz debisinin dolayısıyla hızının artmasına ve ısı transferinin düşmesine neden olmaktadır [11]. Baca çekişinin yetersiz olması durumunda ise içeriye giren hava miktarı azalır. Bu durum; yanmanın kötüleşmesine, yoğun duman oluşmasına ve yüksek miktarda CO emisyonuna neden olur [7]. Bu nedenlerle kazan dairesine yeterli ve sabit basınçta hava temin edilmeli, brülöre giren gaz basıncı sabit tutulmalıdır. Baca çekiş basıncı sürekli kontrol edilmeli, bacanın kesiti ve yüksekliği ayarlanabilir olmalı, çatıdaki tıkanmalar giderilmelidir [1].

3) *Hava Kaçakları*: Brülör ve kazan niteliğinden kaynaklanan hava kaçakları yakıt / O_2 dengesinin bozulmasına dolayısıyla eksik yanmaya neden olur. Bu nedenle; brülör bağlantı flanşı contalı olmalı, patlama kapakları kasıtlı olmamalı, contalı ve tam kapanabilir olmalıdır [1,5]

4) *Yakıt Sıcaklık ve Basıncı*: Brülörlerde kullanılan yakıt basıncının ve sıcaklığının arzu edilen değerde olmaması, yakıtın yeterince atomize olmamasına buda eksik yanmaya sebep olur [1]. Ateşleme için gerekli sıcaklığın altına düşüldüğünde o noktadaki yanma son bulabilir. Yakıt basıncının uygun değerlerde olması durumunda yakıt / O_2 dengesi bozulur, yanma verimsizleşir [7].

5) *Dış Sıcaklık Değişimi*: Ortam sıcaklığı değiştikçe çekilen fazla hava miktarı da değişmekte dolayısıyla yanma süreci dış hava sıcaklığındaki değişimlerden etkilenmektedir. Genellikle firmalarca brülör ayarları dış sıcaklık değişimini dikkate alarak yaz ve kış ayarı olmak üzere yılda iki kez yaptırılmaktadır. Eğer brülör ayarları yaz şartlarına göre yapılmış olup dış hava sıcaklıklarında düşüş yaşanır ise çekilen fazla hava oranı artarak yanma verimi düşer ve baca gazı sıcaklığı yükselir (Ünlü, 2009). Tam tersi durumda ise, brülör ayarı kış şartlarına göre yapılmış olup dış hava sıcaklığının artması durumunda, çekilen hava miktarı azalır ve dolayısıyla

hava fazlalık katsayısı düşer, yakıtın bir kısmı ise yanmadan dışarı atılır. Bu durumda hem yanma verimi düşer hem de çevreye verilen emisyon miktarında artış olur. [3].

B. Yanma Verimini Etkileyen Faktörler

Elektronik baca gazı analiz cihazlarında kullanılan yanma formüllerden biri Siegert formülü olup yüksek hassasiyette sonuç vermektedir. Siegert formülüyle bacada ölçülen oksijen değeri ve sıcaklık farkları (ortam havası ve baca gazı sıcaklıkları) kullanarak kazanın yanma verimliliği hesaplanabilir. Bu formüle göre O₂'nin %1 oranında düşürülmesi, yanma verimliliğini yaklaşık olarak doğalgazda % 0.60, motorinde % 0.70 ve fuel oilde % 0.75 arttırır [15]. Siegert Formülü şu şekildedir [7,15]:

$$Q_s = (T_f - T_a) * \left[\frac{A_2}{21 - O_2} + B \right] \quad (6)$$

$$\eta = 100 - Q_s \quad (7)$$

Q_s= Bacadaki ısı kaybı (%)

T_f = Baca gazlarının sıcaklığı (°C)

T_a = Yanma havası sıcaklığı (°C)

η = Yanma verimi

O₂= Ölçülen O₂ değeri (%)

A₂ = 0,66 (Doğalgaz için tipik yakıt değeri)

B = 0,009 (Doğalgaz için tipik yakıt değeri)

C. FMEA Çalışması

Firmada bulunan 5 t/h doymuş buhar kapasiteli ve 9 bar çalışma basınçlı buhar kazanının yanma verimini etkileyen riskler için hazırlanan FMEA çalışması Tablo 1' de verilmiştir. Şiddet, Olasılık ve Saptanabilirlik değerlerinin derecelendirilmesinde 1-10 arası ölçeklendirme tablosu kullanılmıştır. “Şiddet” derecesi, enerji tüketimin artmasına, prosesin kötüye gitmesine, can güvenliğinin tehlikede olup olmamasına bağlı olarak değişmektedir. “Olasılık” değeri, firmada bu riskle bu zamana kadar hangi sıklıkta karşılaşıldığı araştırılarak tespit edilmiştir. Firmada bu riskle karşılaşırsa bu riskli durumun hangi metotla veya hangi ölçüm aletleriyle tespit edildiğini ortaya konarak bu kullanılan yöntemin hatayı tespitteki başarısının bir ölçüsü olarak “Saptanabilirlik” değeri belirlenmiştir. Sonrasında bu üç değer çarpılarak Risk Öncelik Sayıları (RÖS) hesaplanmıştır. RÖS puanı 40'ın altında kalanlar önemsiz risk sınıfına girmekte olup yeşil renk ile gösterilmiştir. 40- 100 arasında olanlar sarı, 100'den çok olanlar ise kırmızıyla gösterilmiştir. Yüksek RÖS puanına sahip kırmızı alanlar iyileştirme çalışmasına başlamada öncelikli alanlardır. Tablo 1' de verilen ve yanma kaybına yönelik hazırlanan FMEA tablosuna göre “yetersiz fazla hava” ve “aşırı fazla hava” durumları yüksek riske sahiptir ve bu konular üzerine gidilerek öneriler geliştirilebilir.

Tablo 1. Yanma kaybına yönelik FMEA çalışması.

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)							
Riskler/ İyileştirmeye açık alanlar	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Tespit	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	Risk Öncelik Sayısı
Yüksek CO emisyonu	Alevin yanma odasındaki soğuk yüzeylere çarpması	Yanmanın eksik ve yetersiz olduğunun bir göstergesi olup çevre kirliliğine neden olur. Isı ve kuruma neden olarak ısı transferini güçleştirir.	6 ayda bir baca gazı analizi	6	1	6	36
	Baca çekişinin düşük olması						
	Yetersiz fazla hava						
Yetersiz fazla hava	Uygun olmayan O ₂ /yakıt oranı	Üretilen enerji düşer. İslilik başlar. Isı ve kurum alevin oluşmasını engelleyerek yanma verimini düşürür.	6 ayda bir baca gazı analizi	7	3	6	126
	Baca çekişinin düşük olması						
Aşırı fazla hava	Uygun olmayan O ₂ /yakıt oranı	Yanmaya iştirak etmeyen hava ocakta ısıtılarak bacadan atılır, yanma dengesi bozulur ve yanma verimi düşer. Soğuk hava ile seyreltmeyle birlikte gelen enerji kayıpları yaşanır.	6 ayda bir baca gazı analizi	7	4	6	168
	Yetersiz yakıt temini						
	Aşırı baca çekişi						
Brülörde eksik yanma	Yakıt basıncının ve sıcaklığının istenen değerde olmaması	Yanma verimi düşer.	Göstergelerle kontrol, 6 ayda bir baca gazı analizi	8	1	5	40
	Hava kaçakları						
Yüksek dış hava sıcaklığı	Brülör ayarının kış şartlarına göre yapılmış olması	Hava miktarı azalarak hava fazlalık katsayısı ve dolayısıyla yanma verimi düşer.	6 ayda bir baca gazı analizi	8	2	6	96
Düşük dış hava sıcaklığı	Brülör ayarının yaz şartlarına göre yapılmış olması	Çekilen fazla hava oranı artar ve baca gazı sıcaklığı yükselir.	6 ayda bir baca gazı analizi	8	2	6	96

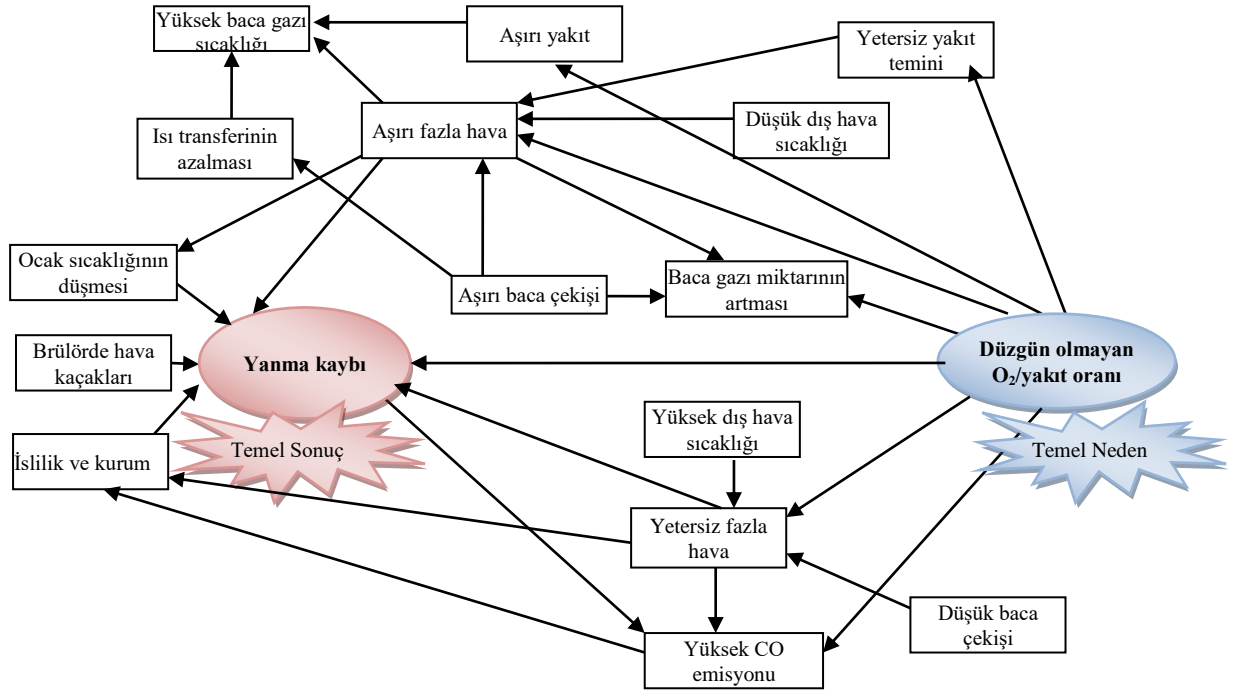
D. İlişki Diyagramı

Bir ilişki şeması, problemin kök nedenin tanımlanması için geliştirilmiş bir araç olup aynı zamanda karmaşık ve kafa karıştırıcı bir problemle karşılaşıldığında mantıksal ilişkileri tanımlamak için de kullanılmaktadır. Bir ilişkilendirme diyagramı oluşturma süreci, karmaşık bir durumun farklı yönleri arasındaki bağlantıların analiz edilmesine yardımcı olabilmektedir [16].

İlişki diyagramında, dikkate alınan etkenler veya sorunun kaynakları dikdörtgen veya elips şekilleriyle gösterilir. Etkenleri tanımlarken seçilen sözcüklerin kısa, net ve herkesce kolay anlaşılabilir olmasına dikkat edilmelidir. Etkenler arasındaki geçişler, neden-sonuç ilişkilerini belirtecek şekilde oklarla ifade edilir. Ok, nedenden sonuca doğru çizilir ve okun ucu sonucu gösterir [17]. Daha sonra diyagram analiz edilir. Her fikre ait giriş ve çıkış okları sayılır. En fazla oka sahip fikirler ana fikirlerdir. Kendisinden en fazla ok çıkan fikir problemin temel sebebi, kendisine gelen ok sayısı en fazla olan fikir ise temel sonucu göstermektedir. Anahtar fikirler daha kolay tanımlanabilirleri açısından etrafları kalın çizgilerle çizilebilir veya içleri gölgelendirilebilir.

Literatür ve hazırlanan FMEA tablosu incelendiğinde kazanlardaki yanma kaybına ilişkin birbiriyle bağlantılı çok fazla etken olduğu ve problemin karmaşık bir yapı içerdiği sonucuna varılmıştır. Yanma kaybını azaltmaya yönelik yapılacak iyileştirme çalışmasını belirleyebilmek için öncelikle bu etkenler arasındaki ilişkileri tanımlamak ve problemin asıl kaynağına ulaşmak gerekmektedir. Bu sebeple ilişki diyagramı kullanılmasına karar verilmiş ve yanma kaybında söz konusu olan riskler ve aralarındaki ilişkiler Şekil 2' de verilen ilişki diyagramında çizilerek gösterilmiştir. Bu diyagrama göre kendinden çıkan ok sayısı en fazla olan sorun “düzensiz olmayan O₂/yakıt oranı” olarak tespit edilmiştir. Bu duruma göre yanma kaybıyla ilgili problemin temel nedeni “düzensiz olmayan O₂/yakıt oranı”dır. Kendisine gelen ok sayısı en fazla olan sorun “yanma kaybı” olarak tespit edilmiştir ve problemin temel sonucunun “yanma kaybı” olduğunu göstermektedir.

Bu doğrultuda şu çıkarımda bulunulabilir: Düzgün olmayan O₂/yakıt oranı nedeniyle yanma kaybı gerçekleşmektedir. Sistemle ilgili iyileştirme yapılmak istenirse; O₂/yakıt oranının sürekli ve düzenli bir şekilde kazana temin edilmesine yönelik çalışmalara öncelik vermek gerekmektedir.



Şekil 2. Yanma kaybı ilişkiler diyagramı

E. Yanma Kaybını Azaltmak Amacıyla Günümüzde Yapılan Başlıca Uygulamalar

1) *Baca Gazı Ölçümü*: Kazanlarda yüksek yanma verimi elde edilmesi, bunun sürekliliğinin sağlanması ve aynı zamanda emisyonların azaltılabilmesi için baca gazı analizörleri yardımıyla, baca gazı bileşenleri periyodik olarak izlenebilir. Böylece baca gazı sıcaklığı ve baca gazı bileşim değerleri kontrol edilerek yakma havası ayarlanabilmekte, optimum yanma oluşması için yanmaya etki eden parametrelere zamanında müdahale edilmesi sağlanmaktadır [3,5,9].

2) *Yanma Havaasının Isıtılması*: Kazanlarda yanma havası olarak verilen havanın ısıtılmasıyla yanma kalitesinin artmasından dolayı kazan yanma veriminde artış ve yakıt tasarrufu sağlamak mümkün olmaktadır. Baca sistemine yerleştirilecek bir reküperatör vasıtasıyla yüksek sıcaklıkta kazanı terk eden egzoz gazları kullanılarak giriş havası ısıtılabilir. Yanma havası sıcaklığındaki her 28 °C'lik artış yanma verimini yaklaşık %1 oranında artırmaktadır [8, 11- 12]. Ayrıca, yanma havasının baca gazlarıyla ısıtılması durumunda bacadan atılan enerji miktarı azalacağından kazan verimi yükselecektir [13].

3) *Yakma Yönetim Sistemleri*: Tam yanmanın sağlanabilmesi amacıyla piyasada sunulan ürünlerden biri de yakma kontrol sistemleridir. Bu sistemlerde yakıt/hava karışımındaki ayarlama, hava fanı klapesi ve yakıt debisindeki kontrolör kullanılarak yanma hücresine hava ve yakıtın uygun miktarlarda temin edilmesiyle gerçekleştirilmektedir [11]. Bahsedilen sistemle baca gazı ölçümleri sürekli ve otomatik şekilde yapılmakta; oksijen, karbonmonoksit ve karbondioksit değerleri, baca gazı sıcaklığı ile yanma verimi sürekli olarak takip edilmekte, yakıt karakterinde ve dış hava şartlarında olabilecek değişikliklerin etkisi sistemin yakıt/hava ayarına otomatik müdahalesiyle önlenmektedir. Ayrıca frekans konvertörlü brülör fanları da sisteme ilave edildiğinde fan enerji tüketiminden de tasarruf elde edilmekte, hassas ve oransal kontrol sayesinde tam yanma

gerçekleştirilerek kazan verimi artırılmakta ve yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir [5]. Söz konusu sistem, aynı zamanda çevreye atılan emisyonların azaltılmasında da önemli bir etkiye sahiptir.

F. Poka-Yoke

Japonca bir kavram olup poka (hata) ve yoke (sakınma, azaltma) kelimelerinden oluşmakta ve hatadan sakınma anlamına gelmektedir. Amacı, hataları mümkün olduğunca erken önleyerek veya düzelterek bir ürün veya sistemdeki kusurları gidermektir [18]. Yaygın kullanılan bir süreç geliştirme aracıdır. Bu teknikte, bir hatanın meydana gelmesini imkânsız kılan ya da bir kez meydana geldiğinde hatayı hemen belirginleştiren herhangi bir otomatik cihaz veya yöntem kullanılır [16, 19].

İlişkiler diyagramında öne çıkan O_2 /yakıt oranının sürekli optimum değerlerde çalıştırılmasının sürekliliğini ve devamlılığını sağlamak adına çözümler düşünülmüştür. Bu çözümlerden ilk akla gelen çözüm baca gazı analizörü temin ederek baca gazı değerlerini haftalık olarak kontrol ederek kazana müdahale etmek olmuştur. Ancak yetersiz sayıda personel olması ve mevcut personellerin kazana müdahale edecek yetkinliklerinin olmaması dolayısıyla bu fikir çözüm önerileri arasından çıkarılmıştır. Diğer bir çözüm önerisi olan yakma havasının ön ısıtılması firmada hâlihazırda buhar kazanında bulunan ekonomizer vasıtasıyla uygulanmaktadır.

Yanma verimi; kazanlarda kullanılan enerji tüketimini büyük oranda etkilediğinden burada insan hatasından bağımsız, çevresel etkenlerden çok da fazla etkilenmeyecek hata önleyici Poka- Yoke tekniği uygulanması çok yerinde olacaktır. Bu amaçla yanma konusundaki en güncel uygulama olarak yakma yönetim sistemleri öne çıkmaktadır. Bu sistem kazan sistemlerine adapte edildiğinde, her koşulda yanma verimini; insanın yanlış müdahalesine veya havanın sızması riskine karşı sürekli optimize eder. Cihaz; "Öğrenme Eğrisi" mantığıyla hava yakıt oranını hiç durmadan kendisi denetlediği için optimizasyon eğrisinin oluşumunu teknik ekibin iradesine teslim etmez. En düşük CO değerindeki O_2 değerini yeniden ve sürekli olarak düzeltme özelliği sayesinde atık gaz içerisindeki en düşük oksijen değerini temin ederek en yüksek seviyede yanma verimi elde edilmesini sağlar [20].

III. İYİLEŞTİRME İÇİN ÖNERİLEN SİSTEM

A. O_2 /CO Trim Kontrollü Yakma Yönetim Sistemi

Hava/yakıt ayar kontrolünü sağlamak amacıyla günümüzde kullanılan en son teknoloji kapalı kontrol mantığı ile çalışan mikroprosesör tabanlı **O_2 /CO trimli yakma yönetim sistemidir**. Bu sistem ile hava fazlalık katsayısı sürekli minimum değerde sabit tutularak, maksimum performans elde edilir [3]. Bacaya monte edilen baca gazı sensörü ve transmidi sayesinde baca gazındaki O_2 (oksijen) ve CO (karbonmonoksit) miktarı ölçülerek optimum hava/yakıt oranını sağlayacak şekilde oluşturulan "Yanma Optimizasyon eğrisi", sistemde bulunan CO sensörü vasıtasıyla sürekli olarak denetlenerek en ideal eğri biçimini otomatik olarak kendisi optimize eder. Yakma teknolojisinde bu yöntem "Trim Kontrollü Yakma Yönetim Sistemi" olarak tanımlanmaktadır [20].

Bu sistem; yakıt servo motorları, hava klapesi, taze hava fanı frekans konvertör kontrolü vasıtasıyla mevsimsel değişen barometrik koşullardan, dış hava sıcaklığından, yakıtın teknik değerlerindeki farklılıklardan, kazan karşı basıncının değişmesinden dolayı oluşan gerekli oksijen değerinden sapmalardan vb. tüm girdi şartlarından bağımsız ve otomatik olarak kendi oluşturduğu düzeltilmiş-optimizasyon eğrisini sürekli takip ederek yanmanın her aşamasını denetler ve yanmanın ideal şekilde gerçekleştirilmesini sağlar [20].

B. İyileştirme Önerisinin Ekonomik Analizi

Firmada bulunan buhar kazanına bu sistemin adapte edilmesi durumunda elde edilecek enerji tasarruf miktarı ve emisyondaki azalma Tablo 2 ve Tablo 3' te sunulmuştur. Bu tablolara göre yıllık 26000 TL enerji tasarrufu ve 10 ton CO_2 tasarrufu elde edileceği öngörülmektedir. Bahsedilen sisteme inverter kontrollü brülör fanları ilave edilerek fan enerji tüketiminden de ilave tasarruf edilirse toplam tasarruf miktarı 33500 TL ' ye ulaşabilecektir. Şekil 3' te fayda-maliyet analizi grafiği çizilerek yapılacak yatırımın yanında elde edilecek

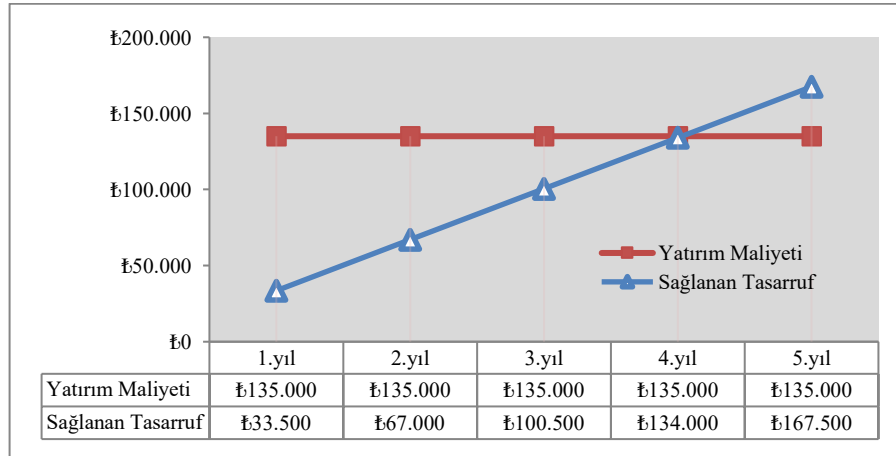
tasarrufun yıllara göre getireceği mali tasarruf gözler önüne serilmiştir. Son olarak yatırımın yaklaşık 4 yılda kendini geri ödeyeceği hesaplanmıştır.

Tablo 2. Baca gazı analizi veri tablosu

Mevcut Baca Gazı O ₂ değeri:		
Düşük yükte	3,9%	O ₂
Orta yükte	2,6%	O ₂
Tam yükte	1,9%	O ₂
O ₂ / CO Trim kontrollü O ₂ değeri:		
Düşük yükte	2,0%	O ₂
Orta yükte	1,3%	O ₂
Tam yükte	1,2%	O ₂
Yakma havası sıcaklığı:		
Yaz	118	°C
Kış	118	°C
Toplam işletim süresi:		5760 saat/yıl

Tablo 3. O₂ / CO Trim kontrollü ile yapılan tasarruf tablosu

	Toplam
O ₂ / CO Trim ile yapılan Toplam tasarruf (TL/yıl)	₺26000
İnverter kontrol ile ilave tasarruf (TL/yıl)	₺7500
Toplam tasarruf miktarı TL/yıl)	₺33500
O₂ / CO Trim ile yapılan Toplam CO₂ tasarrufu (ton/yıl)	10



Şekil 3. Yatırım fayda-maliyet analizi grafiği

Yapılan çalışmanın geri ödeme süresi ise toplam yapılan yatırım tutarının elde edilen enerji kazancına oranı ile bulunur [21].

Geri ödeme süresi: (Yatırım Tutarı/ Yıllık Enerji Tasarruf Miktarı)

Geri ödeme süresi: (135000 /33500) = 4,03 yılda yatırım kendini amorti etmiş olacaktır.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sanayi sektöründe enerjinin en yoğun kullanıldığı ekipmanlardan biri olan kazanlarda enerji verimliliği çalışmaları yapılması oldukça önem arz etmektedir. Kazanlarda çok çeşitli kayıplar olmakla birlikte bu çalışmada özellikle yanma kaybı üzerinde durulmuştur. Yanma prosesi üzerinde etkili olan faktörler araştırılarak FMEA tekniğiyle bu faktörlerin her birinin risk dereceleri hesaplanarak önemli riskler ortaya konmuştur. Yanma verimini etkileyen çok fazla faktör olması ve bu faktörlerin arasındaki ilişkilerin karmaşıklığı nedeniyle kalite geliştirmede kullandığımız araçlardan biri olan ilişki diyagramı çizilmiştir. Bu diyagrama göre yanma verimi etkileyen ana sebep “düzgün olmayan O₂ / yakıt oranı” olarak tespit edilmiş ve görsel olarak ortaya konmuştur. Problemin çözümü için ise insan hatasından izole bir öneri geliştirmek için Poka-Yoke tekniğinden faydalanılmıştır. Bu doğrultuda O₂ / CO trim kontrollü yakma sistemi önerilerek hava/yakıt karıştırma işlemi insandan ve insanın yaptığı kontrol ve ölçümlerden bağımsız sadece baca gazına yerleştirilen duyarga vasıtasıyla anlık ve otomatik olarak kendini güncelleyebilen sistemle gerçekleştirilecektir. Bu sayede yıllık 33500 TL enerji tasarrufu ve 10 ton CO₂ emisyon değerinde azalma sağlanacaktır. Firma bu yatırımı 4 yıl gibi çok da uzun olmayan bir sürede amorti edebilecektir.

Bu çalışmanın; kazan yanma verimiyle ilgili literatüre katkı yapması beklenmektedir. Kazan kullanan diğer çeşitli endüstriyel kuruluşlarda burada önerilen yöntemleri uygulayarak yanma veriminde artış elde edebilirler. Ayrıca FMEA, ilişki diyagramı, Poka-Yoke gibi kalite geliştirmede kullanılan yöntemlerin enerji verimliliği çalışmalarında için de kullanışlı birer araç olabileceklerini göstermesi bakımından mevcut çalışma önem arz etmektedir.

PROJE DESTEKLERİ

Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2019-01.BŞEÜ.07-01, 2019).

KAYNAKLAR

- [1] Kaya, D. & Öztürk, H. (2014). *Sanayide Enerji Yönetimi ve Enerji Verimliliği, Uygulamalı Örneklerle*. Umuttepe Yayınları, Kocaeli, 524.
- [2] Çakır, M. (2019). *Baca Gazı Analizi*. LM Elektrik, <http://www.lmelektrik.com/baca-gazi-analizi,1,341#prettyPhoto>, (07.05.2019).
- [3] Ünlü, O. (2009). Sanayide Enerji Tasarrufu Çalışmalarının Önemi ve Buhar Sistemleri ile İlgili Uygulama Örnekleri. *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 6-9 Mayıs, İzmir, 67-80.
- [4] Öztürk, E. (2012). *Tekstil sektöründe enerji tasarrufu olanaklarının araştırılması ve uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [5] Bilgin, A. (2011). Kazanlarda enerji verimliliği ve emisyonlar. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 122, 59-65.
- [6] Çınar, T. (2008). *Tekstil sanayisinde enerji yönetimi ve enerji verimlilik analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

- [7] Durukan, M. (1997). Yanma gaz analizleri ve doğalgaz uygulamalarındaki önemi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 18.
- [8] Kanoğlu, M. (2010). *Enerji Verimliliği Örnek Projeleri*. Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, http://www.tskb.com.tr/i/content/486_1_mehmet-kanoglu-enerji-verimliliği-ornek-projeleri.pdf, (24.04.2019).
- [9] Bilgiç M. (2004). Endüstri kazan dairelerinde enerjinin etkin kullanılması için; yakttan baca gazına kadar dikkate alınması gereken hususlar, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, Dergi Eki 31, 8.
- [10] Kaya, D. & Güngör, C. (2002). Sanayide Enerji Tasarruf Potansiyeli-II. *Mühendis Makina*, 515.
- [11] Uylukçuoğlu, Ö. E. (2009). *Otomotiv sanayinde enerji verimliliği ve enerji tasarruf olanaklarının belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ). (1997). *Sanayide Enerji Yönetimi Esaslar, Cilt III*. EİEİ Yayınları, Ankara.
- [13] Çanka Kılıç, F. (2017). Endüstriyel kazanlarda enerji verimliliği ve emisyon azalımı fırsatları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 147-158.
- [14] İlbaş, M. & Yılmaz, İ. (2002). Farklı ısı güçlerindeki kazanlarda yanma ve emisyon davranışının araştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(1-2), 18-27.
- [15] DÇD Baltur. (2010). *Yeni Teknolojiler Eğitim Kitabı 4*. <https://www.dcdbaltur.com.tr/madmin/lib/images/dosyalar/603-servis-egitim-dokumani.pdf>.
- [16] ASQ. (2019). *Relations Diagram*, <https://asq.org/quality-resources/relations-diagram>, (01.09.2019).
- [17] Anagün, A.S. & Soy, E. (1999). Toplam Verimli Bakıma Geçişte İlişki Diyagramının Kullanımı, *IV. Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu*, 14-16 Mayıs, 435-447.
- [18] Tekin M. & Arslandere, M. (2017). Üretimde hata önleme aracı olarak poka-yoke sistemi ve bir uygulama örneği, *Kesit Akademi Dergisi*, 11, 339-350.
- [19] Bay, M. & Çiçek, E. (2007). Tam zamanında üretim sistemlerinde hata önleyiciler: Poka-Yokeler, *Selçuk Üniversitesi Karaman İ.İ.B.F. Dergisi*, Yerel Ekonomiler Özel Sayısı, 53-62.
- [20] Yalçın, K. (2007). LAMTEC Karbonmonoksit denetimli oksijen (CO/0₂) trimli yakma yönetim sistemi, <http://www.lamtecturkey.com/wp-content/uploads/2014/09/Lamtec-BMS-O2CO.rev0-.pdf>, (19.06.2019).
- [21] Çarkacı, E. (2014). EÜAŞ ambarlı fuel oil ve doğalgaz kombine çevrim santralinde kalite yönetim sisteminin uygulaması ve enerji verimliliği üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.