



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİNCİL YAKMA HAVASININ KATI YAKITLI KAZANIN ISIL PERFORMANS VE EMİSYONUNA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammed Halis GÜNDOĞDU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2013
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İKİNCİL YAKMA HAVASININ KATI YAKITLI KAZANIN ISIL PERFORMANS VE EMİSYONUNA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammed Halis GÜNDOĞDU

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Y.Doç.Dr. Selçuk DARICI

2013, 160 Sayfa

Jüri
Y. Doç. Dr. Selçuk DARICI
Prof. Dr. Şefik BİLİR
Y. Doç. Dr. Ahmet Ali SERTKAYA

Dik duman borulu bir sıcak su kazanında, uçucu gaz içeriği yüksek olan kömürün ısınması ile ortaya çıkan uçucuların yakılması için kullanılan ikincil havanın, kazan yanma verimi ve emisyonlar üzerine etkileri araştırılmıştır. Kazanda dört farklı özel yanma haznesi ile deneyler yapılmıştır. İkincil yakma havasının yanma haznesine, ne zaman, ne kadar süre ile, hangi konumda ve ne kadar debide verilmesi gerektiği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; ikincil havanın, yanmanın ilk aşamasında, yakıt içindeki suyun buharlaşarak beyaz duman şeklinde yanma haznesinden uzaklaşmasından hemen sonra, yakıt miktarına bağlı olarak kısa süre ile, uçucu oluşumu devam ettiği sürece, oluşan alevin hemen üzerinden, kazana temin edilen birincil hava debisinin yaklaşık % 30'u kadar, türbülanslı olarak yanma haznesine temin edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: alev, emisyon, ikincil hava, uçucu, verim, yanma

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF SECONDARY FIRING AIR EFFECTS ON BOILER THERMAL PERFORMANCE AND EMISSION OF SOLID FIRED BOILER

Muhammed Halis GÜNDOĞDU

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Asst. Prof. Dr. Selçuk DARICI

2013, 160 Pages

Jury
Asst. Prof. Dr. Selçuk DARICI
Prof. Dr. Şefik BİLİR
Asst. Prof. Dr. Ahmet Ali SERTKAYA

On a vertical, smoke tubed, hot water boiler; the effects of secondary air which is used for burning volatiles that appear with heating of a high volatile content coal, on boiler combustion efficiency and emissions have been investigated. Experiments were carried out in four different ,special combustion chambers, on the boiler. When, how much time, in which position and at which flow rate the secondary combustion air must be supplied to the combustion chamber have been investigated. According from to the results it is determined that; at the first stage of combustion, right after the water in the fuel evaporates and leaves the combustion chamber as a white smoke, turbulated secondary air must be supplied to the combustion chamber, nearly above the formed flame, approximately at a rate of 30 % of the supplied primary air for a short while according to the amount of fuel and as long as the formation of volatiles continues.

Keywords: flame, emission, secondary air, volatile, efficiency, combustion

ÖNSÖZ

Enerji, insan ve canlı yaşamının vazgeçilmez bir unsurudur. Enerji kullanımı için kömür, doğalgaz ve petrol gibi tabiatta bulunan doğal (birincil) kaynakların çeşitli aşamalardan geçmesi sonucunda elektrik ve ısı enerjisi gibi ikincil enerji taşıyıcıları elde edilmektedir. Kazanlar ve yakıcı sistemler birincil enerji taşıyıcılarındaki kimyasal enerjiyi ikincil ısı enerjisine dönüştürmektedir. Bu çalışmada, birincil enerji taşıyıcılarından kömür kullanılarak, ikincil enerji taşıyıcı elde edilmekte ve oluşan ısı enerjisi ile çalışma akışkanı olarak su ısıtılmaktadır.

Birincil enerji kaynaklarının gün geçtikçe azalması ve çevre kirliliğinin artması, bu konuda çalışan sanayici ve akademik çevreyi, enerji dönüşüm sistemlerinin verimli şekilde çalıştırılması ve emisyonların düşürülmesi konularında çalışma yapmaya zorlamaktadır. Kömür gibi uçucu madde içeriği oldukça yüksek yakıtların, kullanıldığı yakma sistemlerinde, yanma için sadece yakıtın altından verilen birincil hava yeterli olmamaktadır. Buna ek olarak alev üzerinden, yakıt uçucularını yakmak için ikincil hava temini gerekmektedir. Bu çalışmada, ikincil havanın yanma haznesine ne zaman, hangi miktarda, ne kadar süre ile ve hangi konumda verilmesi gerektiği deneysel olarak araştırılmıştır.

Tez konusunun temellerinin atılmasında, literatür araştırması yapılmasında, konunun teorik alt yapısının oluşturulmasında, deney setinin kurulmasında, deneylerin yapılmasında ve hazırlanan bu tezin kontrolünde, çalışmanın tüm aşamalarında bana yol gösteren, ışık tutan, fikir veren ve sürekli cesaretlendiren saygıdeğer danışmanım Y.Doç.Dr. Selçuk DARICI'ya, değerli işverenlerim Ali AKKAYA ve Ahmet Cevat AKKAYA'ya ve manevi desteği ile beni sürekli çalışmaya teşvik eden annem Emine GÜNDOĞDU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın konu ile ilgili tüm sanayicilere ve akademik çevreye yön göstermesi dileğimle.

Muhammed Halis GÜNDOĞDU
KONYA–2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tezin Amacı 1
1.2. Tezin Önemi 3

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **5**

3. KAZANLAR **11**

3.1. Kazan Tipleri 11
3.1.1. Kullanım alanına göre kazanlar 11
3.1.2. Kullanılan akışkan türüne göre kazanlar 12
3.1.3. Konstrüksiyon tipine göre kazanlar 14
3.2. Kazanlarda Verim 22

4. YANMA TEORİSİ **27**

4.1. Kömürün Yanması 27
4.2. Yakıt Bileşenlerinin Yanması ve Oluşturdukları Emisyonlar 31
4.2.1. Hidrojenin yanması 31
4.2.2. Karbonun yanması 33
4.2.3. Kükürdün yanması 37
4.2.4. Metanın yanması 38
4.2.5. Azotoksitler 39
4.3 Otomatik Yakma Yönetim Sistemleri 39

5. MATERYAL VE YÖNTEM **41**

5.1. Deney Düzeneği 41
5.2. Konstrüksiyon tip 1 42
5.3. Konstrüksiyon tip 2 50
5.4. Konstrüksiyon tip 3 53
5.5. Konstrüksiyon tip 4 54
5.6. Deneyin Yapılışı 55
5.6.1 Konstrüksiyon tip 1 deneyi 55
5.6.2 Konstrüksiyon tip 2 deneyi 58
5.6.3 Konstrüksiyon tip 3 deneyi 59
5.6.4 Konstrüksiyon tip 4 deneyi 60

5.7 Teorik Yanma Hesapları 61
5.8 Belirsizlik Analizi 67
5.8.1 Birincil hava kütlesel debi belirsizlik hesabı 69
5.8.2 İkincil hava kütlesel debi belirsizlik hesabı 70
5.8.3 Reynolds sayısı belirsizlik hesabı 72
5.9 İkincil Yakma Havası Kullanıldığı Durumda Sistemin Maliyet Analizi 73

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI 80

6.1. Konstrüksiyon Tip 1 Deney Sonuçları 80
6.2. Konstrüksiyon Tip 2 Deney Sonuçları 91
6.3. Konstrüksiyon Tip 3 Deney Sonuçları 100
6.4. Konstrüksiyon Tip 4 Deney Sonuçları 109
6.5 Baca Gazı Emisyon Değerleri 118
6.5.1 Hava fazlalık katsayısının baca gazı emisyon değerlerine etkisi 118
6.5.2 Ölçülen parametrelerin konstrüksiyon tipine göre değişimi 128
6.6 İkincil Havanın Sisteme Verilmesi için Gerekli Koşullar 152

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 156

7.1 Sonuçlar 156
7.2 Öneriler 157

8. KAYNAKLAR 158

ÖZGEÇMİŞ 160

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_2 : Yakıta özgü parametre

A_{boru} : Boru kesit alanı, (m^2)

AFR : Hava yakıt oranı

$A_{iç}$: Boru iç yüzey alanı, (m^2)

AT : Ortam sıcaklığı (^oC)

B : Kazana gönderilen yakıt debisi, (kg/h)

C : Yakıta özgü parametre

C_S : Sistemin toplam maliyeti, (TL)

C_W : Çıkış suyunun özgül ısısı, (kcal/kg.^oC)

D : Boru iç çapı, (m)

D_{11} : Birincil hava geçen borunun iç çapı, (m)

D_{12} : Birincil hava geçen borunun iç çapı, (m)

D_{21} : İkincil hava geçen borunun iç çapı, (m)

D_{22} : İkincil hava geçen borunun iç çapı, (m)

D_{23} : İkincil hava geçen borunun iç çapı, (m)

D_{24} : İkincil hava geçen borunun iç çapı, (m)

D_{25} : İkincil hava geçen borunun iç çapı, (m)

D_{26} : İkincil hava geçen borunun iç çapı, (m)

$D_{iç}$: Boru iç çapı, (m)

f : Yakıta özgü parametre

F_B : Bakım giderleri, (TL)

$F_İ$: İşletme giderleri, (TL)

F_K : Kazan ve aksesuarların maliyeti, (TL)

F_Y : Yakıt giderleri, (TL)

FT : Baca Gazı Sıcaklığı (^oC)

H : Yakıta özgü parametre

H_u : Yakıtın alt ısıl değeri (kcal/kg)

$K1$: Yakıta özgü parametre

K_{gr} : Yakıta özgü parametre

K_{net} : Yakıta özgü parametre

M : Yakıta özgü parametre

$\dot{m}$: Kütlesel debi, (kg/h)

$\dot{m}_{hava}$: Havanın kütlesel debisi, (kg/s)

$\dot{m}_{hava,21}$: İkincil hava kütlesel debisi, (kg/h)

$\dot{m}_{hava,22}$: İkincil hava kütlesel debisi, (kg/h)

$\dot{m}_{hava,23}$: İkincil hava kütlesel debisi, (kg/h)

$\dot{m}_{hava,24}$: İkincil hava kütlesel debisi, (kg/h)

$\dot{m}_{hava,25}$: İkincil hava kütlesel debisi, (kg/h)

$\dot{m}_{hava,26}$: İkincil hava kütlesel debisi, (kg/h)

$N_{\text{ürün}}$: Oluşan yanma ürünlerinin toplam mol miktarı, (kmol)

N_v : Oluşan su buharının mol miktarı, (kmol)

P : Kazan ısıl gücü, (kcal/h)

$P_{\text{ürün}}$: Oluşan yanma ürünlerinin kısmi basıncı, (kPa)

P_v : Oluşan su buharının kısmi basıncı, (kPa)

q : Yakıt sarfiyatı miktarı, (kg/h)

qA : Baca gazı kayıpları, (%)

Q_A : Baca gazları duyulur ısı kaybı oranı

Q_B : Kazana saatte verilen ısı miktarı, (kcal/h)

Q_{CO} : Baca gazlarındaki yanmamış gazlardan oluşan ısı kaybı oranı

Q_{Fr} : Kül ve cürufta yanmamış karbon kaybı oranı

Q_{gr} : Yakıta özgü parametre

Q_N : Kazan anma ısı gücü, (kcal/h)

Q_{net} : Yakıta özgü parametre

Q_{st} : Kazan dış yüzeylerinden iletim, taşınım ve ışınım ile ısı kaybı oranı

Re : Reynolds sayısı

$TC1$: 1 numaralı termo eleman ile ölçülen sıcaklık, (^{o}C)

$TC2$: 2 numaralı termo eleman ile ölçülen sıcaklık, (^{o}C)

$TC3$: 3 numaralı termo eleman ile ölçülen sıcaklık, (^{o}C)

$TC4$: 4 numaralı termo eleman ile ölçülen sıcaklık, (^{o}C)

$T_{ç}$: Kazan çıkış suyu sıcaklığı, (^{o}C)

$T_{çiy}$: Çiy noktası sıcaklığı, (^{o}C)

T_{doyma} : Doyma sıcaklığı, (^{o}C)

T_{g} : Kazan giriş suyu sıcaklığı, (^{o}C)

u_{11} : Birincil hava hızı, (m/s)

u_{12} : Birincil hava hızı, (m/s)

u_{21} : İkincil hava hızı, (m/s)

u_{22} : İkincil hava hızı, (m/s)

u_{23} : İkincil hava hızı, (m/s)

u_{24} : İkincil hava hızı, (m/s)

u_{25} : İkincil hava hızı, (m/s)

u_{26} : İkincil hava hızı, (m/s)

u_{hava} : Hava hızı, (m/s)

V_{CO} : Oluşan karbon monoksit emisyonu miktarı, (Nm^3/kg)

V_{CO2} : Oluşan karbondioksit emisyonu miktarı, (Nm^3/kg)

V_{g} : Toplam özgül duman gazı miktarı, (Nm^3/kg)

V_{go} : Teorik tam yanma halinde özgül duman gazı miktarı, (Nm^3/kg)

V_{ga} : Hava fazlalığı ile tam yanma halinde özgül duman gazı miktarı, (Nm^3/kg)

V_{gkr} : Özgül kuru duman gazı miktarı, (Nm^3/kg)

V_{H2O} : Oluşan su buharı emisyonu miktarı, (Nm^3/kg)

V_{ho} : Teorik hava ihtiyacı, (Nm^3/kg)

V_{O2} : Oluşan oksijen emisyonu miktarı, (Nm^3/kg)

V_{N2} : Oluşan azot emisyonu miktarı, (Nm^3/kg)

V_{SO2} : Oluşan kükürt dioksit emisyonu miktarı, (Nm^3/kg)

W : Kömür içerisindeki nem yüzdesi, (%)

w_{D} : Boru iç çapı ölçümünün belirsizliği, (m)

$W_{\dot{m}_{hava}}$: Havanın kütlesel debisinin belirsizliği, (kg/h)

$W_{\dot{m}_{hava},21}$: İkincil hava kütlesel debi hesabının belirsizliği, (kg/h)

$W_{\dot{m}_{hava},22}$: İkincil hava kütlesel debi hesabının belirsizliği, (kg/h)

$W_{\dot{m}_{hava},23}$: İkincil hava kütlesel debi hesabının belirsizliği, (kg/h)

$W_{\dot{m}_{hava},24}$: İkincil hava kütlesel debi hesabının belirsizliği, (kg/h)

$W_{\dot{m}_{hava},25}$: İkincil hava kütlesel debi hesabının belirsizliği, (kg/h)

$W_{\dot{m}_{hava},26}$: İkincil hava kütlesel debi hesabının belirsizliği, (kg/h)

W_{Re} : Reynolds sayısındaki belirsizlik

$w_{u_{hava}}$: Hava hızı ölçümünün belirsizliği, (m/s)

X : Yakıta özgü parametre

α : Karbonun yanması sonucu oluşan karbon monoksit miktarı

λ : Hava fazlalık katsayısı

μ : Dinamik viskozite, (kg/m.s)

η : Kazan yanma verimi, (%)

η_k : Kazan verimi, (%)

$\eta_{yakıt}$: Yakıt yanma verimi, (%)

ρ : Yoğunluk, (kg/m^3)

1. GİRİŞ

Kazan, içerisinde bulunan veya dolaşan çalışma akışkanına, sıcak akışkan, kızgın akışkan veya buhar olana kadar yanma haznesinde üretilen yanma ısısının transfer edilmesini sağlayan kapalı bir kaptır. Kazanlar ısıtma, elektrik enerjisi üretimi, pişirme, kızdırma, pastörizasyon, sterilizasyon vb. alanlarda endüstride ve konutlarda çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kazanlarda genellikle yanma haznesinde fosil kaynaklı bir yakıtın yakılması sonucu elde edilen ısı kullanılmaktadır. Dolaylı yoldan bir elektrikli ısıtıcı kullanılarak da gerekli ısı temin edilebilir.

Kazan içerisinde yakılan yakıtın yanması ile oluşan ısı, yanma haznesi dış cidarında bulunan çalışma akışkanına geçer. Hâlihazırda kullanılan kazanlarda, yanma ısısının temin edilmesi için fosil kaynaklı katı, sıvı ve gaz yakıtlar kullanılmaktadır. Günümüzde fosil kaynaklı yakıt rezervleri, verimsiz yakma sistemleri ve bilinçsiz tüketim yüzünden oldukça düşük seviyelere inmiştir. Yetersiz bilgilerle tasarlanmış yakma sistemlerinde fosil yakıtların yakılması sonucu yüksek miktarda zararlı emisyonlar çevreye salınmaktadır. Yayılan bu zararlı emisyonlar insan ve diğer canlıların sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir.

Türkiye enerji konusunda büyük oranda dışa bağımlı bir ülkedir. Bu nedenle enerji tüketen cihazların yüksek verimliliğe sahip olması ülkemiz için daha fazla önem taşımaktadır. Ülkemizde mevcut kaynaklar içerisinde en fazla rezerve sahip olan yakıt türü, katı fazındaki kömürdür. Özellikle doğal gazın ulaşmadığı yerlerde gerek büyük endüstriyel amaçlı, gerekse küçük ev tipi kazanlarda katı yakıt yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada gerçek servis şartlarında ev tipi bir sıcak su kazanı kullanılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Sıcak su, buhar ve kızgın akışkan (yağ, su vb.) elde etmek amacı ile kullanılan kazanlarda çalışma akışkanına transfer edilecek ısı, kazanların yanma haznelerinde fosil kaynaklı katı, sıvı ve gaz yakıtlar yakılarak sağlanmaktadır. Fosil yakıt rezervlerinin oldukça azaldığı ve çevre kirliliğinin arttığı günümüzde, kazanların sadece emniyetli çalışması yeterli olmamaktadır. Bunun yanında yanma verimi ve kazan verimi yüksek olmalı, yani aynı miktarda yakıttan daha yüksek ısı temin edilebilmeli, yanma sonucu çevreye atılan zararlı emisyon miktarı çok daha düşük olmalıdır. Zararlı yanma

emisyonlarının fazla olmasının, yanma verimi ve kazan veriminin düşük olmasının nedeni; iyi tasarlanmamış yanma haznesi, yakıt ile havanın uygun olmayan sıcaklıkta, zamanda ve yetersiz türbülans ile karıştırılması sonucu tam yanma olayının gerçekleştirilememesidir.

Yetersiz oksijen alan yakıt bileşeni yanma reaksiyonu sonucunda tam yanmamış yanma ürünü olarak nitelendirilmektedir. Hâlbuki yakıt bileşeni alabileceği miktarda oksijeni alırsa, egzotermik (ısı yayan) yanma reaksiyonu sonucu ortama daha fazla ısı enerjisi verir ve yanma sonucu oluşan emisyonların atmosfere ve çevreye zararı da oldukça azalır. Tam yanma gerçekleştirilemediğinden, hem yakıt verimsiz yanmakta hem de çevre kirliliğine neden olan emisyon miktarı artmaktadır. Aşırı miktarda oksijen fazlalığı da yakma sistemlerinde tercih edilmemektedir. Yanma haznesine, gerekli oksijenden daha fazlasının temin edilmesi durumunda daha soğuk hava (oksijen temini için hava kullanılıyorsa) ortamı doldurmakta, yanma haznesini soğutmakta ve yanma için gerekli ısı miktarını artırmaktadır. Dolayısıyla yakıt bileşeni ile reaksiyona giremeyen hava gereksiz yere ısıtılmakta ve ısı kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle, yanma haznesine temin edilen hava miktarı oldukça önem arz etmektedir.

Fosil kaynaklı yakıtların yanma haznesinde yanabilmesi için öncelikle gerekli şartlar altında tutuşturulması gerekmektedir. Yakıtın tutuşması için yeterli sıcaklık ve havanın yeterli sürede sağlanması gerekmektedir. Yakıtın tutuşması işleminden sonra sürekli yanmasını temin etmek için yanma haznesine hava yeterli miktarda, yeterli türbülansta ve yeterli sürede verilmelidir. Yanma haznesi içerisine gerekli miktarda yakma havası, yanma için yeterli sıcaklığın bulunduğu bölümlere uniform (düzgün dağılmış) bir şekilde dağıtılırsa, haznenin sadece belirli kısımlarını süpüren sıcak gazlar, haznenin en büyük hacmini doldurur ve içeride ani soğuma bölgeleri oluşmaz. Yanma için yeterli sıcaklığa ulaşmayan bölgelere temin edilen hava da, yanmaya iştirak edemediğinden, enerji kaybına neden olmaktadır.

Fosil yakıt kaynakları bilinçsiz ve verimsiz yanmadan dolayı gün geçtikçe azalmaktadır. Güç üretimi, endüstriyel ve konutlarda ısıtma, endüstriyel ürün olarak buhar üretiminde kullanılan kazanlarda mevcut sistemler üzerinde katı yakıtlı kazanların önemi, rezervi dolayısıyla çok daha fazladır. Alttan yakıt beslemeli ve tek hava kaynağı kullanılan yakma sistemlerinde, havanın yanma haznesine uniform ve yeterli miktarda taşınması oldukça zordur. Yanma haznesine, yakıtın tam yanması için gerekli miktardaki havanın uniform, türbülanslı ve yeterli sürede temin edilememesi nedeni ile verimsiz yanma meydana gelmektedir.

Kazanlarda birincil hava ile yakıtın büyük ölçüde saf karbon kısmı yakılır. Katı yakıtların içinde saf karbon dışında su, uçucular ve kül bulunmaktadır. Katı yakıt içerisindeki uçucu maddeleri yakabilmek için ikincil hava kullanmak gerekir. Birincil hava ile alev üzerindeki uçucuları yakmak tam olarak mümkün olmamaktadır. Yeterli sıcaklık mevcut ise ikincil hava alev üzerine uygun debilerde verilmelidir. Böylece yakıt içerisindeki uçucuların tam yanmaksızın yanma haznesini terk etme olasılığı en aza indirilmektedir.

Bu tez kapsamında hazırlanan deney seti ile yanma haznesine temin edilen ikincil havanın debisi ve konumunun yanma verimi ve emisyonlar üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca yanma haznesine verilen birincil havanın kütle debisinin yanma verimi ve emisyonlar üzerine etkisi de incelenmiştir. Ev tipi bir kazanın yanma haznesinde dört farklı tip uygulama yapılmış ve kazan yanma haznesi tasarımının yanma verimi üzerine etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmada amaçlanan, katı yakıt olarak kullanılan kömürün yanması ile birlikte oluşan uçucuların yanma haznesinden tam olarak yanmadan uzaklaşmasını engellemek, dolayısı ile yanma verimini yükseltmek ve zararlı emisyon miktarını azaltmaktır.

1.2. Tezin Önemi

Küresel ısınmanın ortaya çıktığı, iklim değişikliklerinin yaşandığı, çevreye gösterilmesi gereken özenin geçmişe göre çok daha önemli olduğu ve fosil yakıt rezervlerinin azaldığı günümüzde, ortaya çıkan bu ciddi problemlerin varlığında yapılan bu deneysel çalışmada, kazanlarda yanma verimini yükseltmek ve düşük zararlı emisyon değerleri sağlamak hedeflenmiştir. Yapılan deneylerde ülkemizde diğer yakıt türlerine göre daha fazla rezerve sahip katı yakıt olarak kömür tercih edilmiştir. Günümüzde kömürün yakıt olarak kullanıldığı alanlarda halen yüksek miktarda zararlı emisyon değerleri ile yüksek oranlarda çevre kirliliği oluşmaktadır. Kazanlarla ilgili yeni araştırma ve teknolojiler, rezervlerin fazla olmasından dolayı katı yakıtlar üzerine olmalıdır. Bu çalışmada, daha yüksek yanma verimi ve daha düşük zararlı emisyon değerleri elde edebilmek için ikincil havanın verileceği uygun konum ve debi ile konstrüksiyon tipi üzerinde çalışılmıştır. Yakıt olarak kömürün kullanıldığı yerlerde, şehirlerde çevre havası kirlendiğinden ve kömürün daha verimli yakılması ile daha düşük zararlı emisyonlar elde edileceğinden, böyle bir çalışma sonuçları açısından

literatüre katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada elde edilen bilimsel sonuçların, bu konuda faaliyet gösteren sanayicilere ve akademik çevreye de yararlı olması hedeflenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bilir (1982), yaptığı çalışmasında, Türkiye'de pişirme ve ısınma amaçlı olarak odunun bolca kullanılması ve ormanlarımızın yıllık gelişimi ile harcanması arasındaki açık yüzünden, yakacak odun tüketiminin azaltılması için bazı önlemler alınması gerektiğini belirtmiştir. Bu önlemlerden en kısa vadeli ve en etkin yöntemin odun sobalarının verimini artırmak olacağını ifade etmiştir. Bu amaçla odunu daha verimli ve dumansız yakabilmek için yapımı ve kullanımı kolay bir soba tasarlamaya çalışmıştır. Sonuç olarak geliştirdiği soba tipinde, % 84 verim elde etmiş ve sobaların havayı kirletme miktarını azaltmıştır.

Bilir'in çalışmasında, odunun yanma mekanizması hakkında verdiği bilgiler oldukça önemli, açıklayıcı ve yol gösterici olmuştur. Birincil havanın yakıtın altından beslenerek, yakıt içerisindeki saf karbonu yakmak için kullanılacağını, ikincil havanın yakıt içerisindeki uçucuları yakmak için, alevin üzerinden ve etrafından verilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Li ve ark. (2008), tavuk atıklarının emisyonlar üzerine etkilerini incelemek için yaptıkları çalışmada laboratuvar şartlarında küçük ölçekli bir akışkan yataklı yakıcıda, tavuk atıkları ile kömürü birlikte yakmışlardır. Testler esnasında CO, H_2S, SO_2, NO emisyonlarını ve yakıcı boyunca sıcaklık değerlerini ölçmüşlerdir. İkincil hava ve tavuk atıkları oranının yanma karakteristiğine etkilerini araştırmışlardır. Tavuk atıkları CO emisyonunu artırmış, SO_2 değerini azaltmıştır. Tavuk atıklarının artması ile H_2S/SO_2 oranı yükselmiştir. NO emisyonu da karışım yakıttaki tavuk atıkları oranına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Yakıcının alt kısımlarında sıcaklık değeri, tavuk atıklarındaki artış ile yükselmiştir. Yatak sıcaklığı için tersi de doğrudur, yani tavuk atıkları oranı azalınca sıcaklık azalmıştır.

İkincil havanın etkisini tespit etmek için, ikincil hava kullanılmadan dağıtıcı bölgesinde yapılan test sonuçları, ikincil hava kullanılarak yapılan deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Beklendiği gibi yakıt ile havanın yetersiz karışması sonucunda CO emisyonları artmıştır. İkincil hava kullanılmadığında NO seviyesi artmıştır. Bu nedenle yanma verimini arttırmak ve emisyonları azaltmak için ikincil hava kullanılmalıdır.

Kömürle birlikte yakılan tavuk atığı oranı arttırılınca, yatak sıcaklığı azalmış, dağıtıcıdaki sıcaklık artmıştır. Bunun nedeni, tavuk atığındaki düşük sabit karbon ve yüksek uçucu madde miktarıdır. SO_2 emisyonları, tavuk atığı ilavesiyle azalmıştır. H_2S / SO_2 oranı tavuk atığı miktarının düşmesi ile artmıştır. Çünkü tavuk atığından salınan

yüksek uçucu madde, H_2S'in oksidasyonunu bastıran güçlü düşürücü atmosferi oluşturmuştur. Tavuk atığı oranının azaltılması ile daha çok yakıt-azot verildiğinden NO emisyonları artmıştır. Buna rağmen yüksek oranlardaki tavuk atığı, NO oluşumunu bastıran uçucu madde salınımının yüksek miktarlarda olması ile, NO emisyonları düşebilmektedir. İkincil hava verilmesi, daha düşük emisyon değerlerinin oluşmasını sağlamıştır.

Prompubess ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcı kullanılarak, pirinç kabuğu ve kömürü birlikte yakmışlardır. Yakıt karışım oranlarının, birincil ve ikincil hava debilerinin yakıcı boyunca sıcaklık ve gaz konsantrasyonları üzerine etkilerini incelemişlerdir. İkincil hava enjektesi ile belirli yüksekliklerde, birincil hava ile yanmayan yakıtın yakılarak daha fazla ısıl enerji elde edilmesi ve böylece sıcaklığın artması sağlanmıştır. Daha yüksek ikincil hava ile daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Belirli bir yükseklikten sonra kararlı bir yanma olmadığı için sıcaklık değeri azalmıştır.

İkincil hava uygulanınca, uygulama noktası civarında sıcaklık artmıştır. İkincil havanın enjekte edildiği yerlerin üzerindeki noktalarda sıcaklık oldukça kararlıdır. Böylece daha verimli, etkili ısı ve kütle transferi olmuştur. Fakat ikincil hava verilmediğinde kararlı durum geçersizdir. İkincil hava verildiğinde CO oranı daha düşük olmuştur. 2 m/s birincil hava hızı ile 1.5 m/s birincil hava hızındaki sıcaklık profili yaklaşık olarak aynıdır. Sıcaklık ikincil hava enjekte noktasında yakıcının alt kısımlarında aniden artmış, daha sonra sabit kalmıştır. Bu durum, normal sirkülâsyonlu akışkan yataklı yakıcıya ve iyi bir katı yakıt uyumuna işarettir. Birincil hava hızında, ikincil hava kullanılmadığında bile sıcaklık artışı devam etmiştir. Bu sonuç, birincil havanın yeterli olduğunu göstermektedir. Bu durum, CO miktarının düşük konsantrasyonda olmasından da anlaşılmaktadır. Yakıcının altında yetersiz yanmadan dolayı CO seviyesi en yüksektir. İkincil hava enjekte noktasının üzerinde yanma için daha çok hava olduğundan CO miktarı azalmıştır. Bu noktanın üzerinde CO oranı yeniden artmıştır. $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ reaksiyonundan dolayı. 1.5 m/s' deki dönme noktasının üzerinde CO konsantrasyonu birincil hava hızının artmasıyla sabit kalmıştır. Bu durum $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ reaksiyonunun tamamlandığını ve bu durumda hava fazlalığını gösterir. Yakıcı boyunca CO konsantrasyonu hep azalmıştır. İkincil hava noktasının üzerinde ortalama konsantrasyon 1000 ppm' dir. 2 m/s birincil hava hızında değişken ikincil havada SO_2 emisyonlarına bakılmıştır. Yakıcı üstünde SO_2 artmaya meyil göstermiştir. 400–600 ppm arası SO_2 elde edilmiştir. Kömürde önce uçucu

maddeler yanar. Daha sonra katı kısmı yanar ki kükürt katı kısımdadır. Bundan dolayı kömür, yanma haznesinde ne kadar çok kalırsa kükürt o kadar çok yanar. NO_x yakıcı sıcaklığı ile orantılıdır. Konvansiyonel akışkan yatak yakıcılarına göre daha düşük NO_x oluşmuştur. Bunun nedeni, düşük yatak sıcaklığı ve ikincil havadır. Pirinç kabuğu kütle yüzdesi % 0, % 3.5 ve % 7 olarak kullanılmıştır. 2 m/s birincil hava hızında ikincil hava etkisiz olduğundan pirinç kabuğu, kömür karışımı sadece bu hızda yapılmıştır. Pirinç kabuğu oranındaki artış, sadece yakıtın verildiği noktanın üzerinde ortalama sıcaklığı artırmıştır. Pirinç kabuğu ilavesi tutuşma sıcaklığını yakıcı boyunca düşürerek yanma verimini iyileştirmiştir. Yakıcı altında CO emisyonları azalıp daha sonra artarak 1.3 m ve üzerinde 1000 ppm civarında sabit kalmıştır. Pirinç kabuğu, CO konsantrasyonunu etkilememiştir. Yüksek yatak sıcaklığı, düşük CO, tam yanmayı sağlar. Pirinç kabuğu, SO_2 emisyonlarını içerisinde az miktarda kükürt içerdiğinden düşürmüştür. NO_x emisyonları sadece % 3.5 pirinç kabuğu ilavesinde aniden azalmıştır. Pirinç kabuğu artınca, NO_x hafifçe azalmıştır.

Atımtay ve Varol (2009) yaptıkları çalışmada, 102 mm iç çapında ve 900 mm yüksekliğindeki kabarcıklı akışkan yatak kullanarak zeytin posası ve kömür karışımını yakmışlardır. Birlikte yanma testleri için Tunçbilek linyit kömürü zeytin posası ile birlikte kullanılmıştır. Zeytin posası ve kömür karışımının yanma performansları ve emisyon karakteristikleri araştırılmıştır. Kömür ile zeytin posasının birlikte yanma testleri zeytin posasının karışımdaki ağırlığının %25, %50 ve %75 olduğu karışım oranlarında yapılmıştır. Deneylerde bazı parametreler (fazla hava oranı, ikincil hava enjeksiyonu) değiştirilmiş ve bu parametrelerle kirlilik konsantrasyonları ve yanma verimindeki değişim incelenmiştir. Zeytin posası ve kömürün yanma sonuçları kıyaslanmıştır. O_2, CO, SO_2 ve NO_x, olan sıcak gaz konsantrasyonları ve toplam hidrokarbonlar yanma testleri esnasında ölçülmüştür. Bu çalışmada kurulan düzenek için %75 zeytin posası, %25 kömür karışımının yanması için NO_x, ve SO_2 emisyonlarına bakılarak optimum çalışma koşulları 1.35 hava fazlalık oranı ve 30 l/dk ikincil hava debisi olarak bulunmuştur. % 25 zeytin posası, % 75 kömür karışımının yanması için % 99.8 ile en yüksek yanma verimi 1.7 hava fazlalık oranı, 40 l/dk ikincil hava debisinde elde edilmiştir.

Varol ve Atımtay (2007), yaptıkları çalışmada zeytin posası ve kömürün yanma performansları ve emisyon karakteristiklerini kabarcıklı bir akışkan yatakta araştırmışlardır. O_2, CO, SO_2 ve NO_x gibi baca gazı konsantrasyonları ve toplam hidrokarbonlar (C_mH_n) yanma deneyleri esnasında ölçülmüştür. Hava fazlalık katsayısı

(λ) ve ikincil hava miktarı değiştirilmiş ve kirlilik konsantrasyonlarındaki değişim ve yanma verimi araştırılmıştır. Zeytin posası için yakıcı kolonu boyunca ölçülen sıcaklık profilleri çoğunlukla serbest yataktaki hidrokarbonların yanmasından dolayı kömüre göre serbest yatak içinde daha yüksek bulunmuştur. 1.12–2.3 hava fazlalık katsayısı ile zeytin posası için yanma verimi % 83.6–% 90.1 aralığında elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan düzenekle, optimum operasyon koşulları NO_x ve SO_2 emisyonlarına göre 1.2 hava fazlalık katsayısı ve 50 l/dk ikincil hava debisinde zeytin posasının yanması için bulunmuştur.

Li ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, 300 MW alttan yakmalı endüstriyel bir kazan kullanmışlardır. Elde edilen veriler, birincil hava ve kömür karışımı akışıyla gaz sıcaklığı dağılımları, O_2, CO, CO_2, NO_x gibi gaz bileşenleri ve duvar yakınındaki gaz sıcaklıklarıdır. Nozulların altından ikincil hava püskürtülmesi ile pulverize kömür ve birincil havanın tutuşturulduğu bölgede alev yanma haznesinde ileriye doğru götürülmüştür. Gaz sıcaklıkları yakıt yanma alanında artmış, yanmış yakıtın atıldığı bölgede azalmıştır. Sonuç olarak, baca gazı ile birlikte küldeki yanmamış karbon miktarı ve ocak çıkış sıcaklığının ikisi de azalmıştır.

Li ve ark. (2011), düşük uçuculu kömürler kullanılarak alttan yakmalı kazanın, uçan küldeki yüksek karbon içeriği probleminin üstesinden gelmek için, 660 MW alttan yakmalı kazanın yanma sisteminde düzenleme yapmışlardır. Nozulların altındaki ikincil havanın yönü yatay durumdan 20° meyilli olacak şekilde değiştirilmiştir. Deneyler, düzenleme öncesi ve sonrası yeniden yapılandırma etkilerini hesaplamak için endüstriyel tip kazan kullanılarak yapılmıştır. Duvar yakınındaki bölgenin gaz sıcaklıkları, O_2, CO, CO_2 ve NO_x gibi gaz kompozisyonları, ocak sıcaklığı, birincil hava ve kömür karışımı akışı boyunca gaz sıcaklığı dağılımları için veriler kaydedilmiştir. İki durum arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Nozulların altında açılı ikincil hava ile birincil hava ve pulverize kömür karışımının tutuşması ile alev kazan içinde ileriye alınmıştır. Yakıtın yanma alanında kalma süresi genişletilmiştir. Böylece uçan küldeki yanmamış karbon miktarı ve ocak çıkışındaki gaz sıcaklığı azalmış ve kazan verimi artmıştır.

Zandeckis ve ark. (2010), yaptıkları çalışmada pelet yakıt kullanılan kazanlarda NO_x miktarını azaltmak için baca gazının yeniden sirkülasyonu ve ikincil hava etkilerini test etmişlerdir. Çalışmada 15 kW kapasiteli bir kazan kullanılmıştır. Peletler yanma haznesi alt tarafından besleme yapılarak yakılmıştır, yani alttan beslemeli bir kazan kullanılmıştır. Yanma için gerekli hava bir santrifüj fan ile iki seviyeli olarak yanma

haznesine enjekte edilmiştir. Birinci seviye yakıcının altı, ikinci seviye yakıcının üstüdür. Yakıcıya enjekte edilen hava spiral şeklinde verilmiştir, böylelikle girdap oluşturulmuştur. Sadece baca gazı yeniden sirkülasyonu NO_x miktarını düşürmüştür. En yüksek düşüş miktarı % 21 olmuştur.

Afanas'ev ve ark. (2012), siklon-ocak reaktörünün üçüncü kademesi için ikincil havanın temininde değişik yöntemler kullanarak dört kademeli siklon-ocak reaktörünün aerodinamiğini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlar, katı yakıtın yanması esnasında oluşan kül partiküllerinde en düşük seviyedeki emisyon değerini sağlayan ikincil hava temini tahmin yöntemini mümkün kılmıştır. Külün yanma haznesinden uzaklaştırılması reaktör kademelerindeki toz-gaz karışım hareketinin aerodinamik karakteristiğine daha büyük oranda bağlı olmuştur. Bu bağlantıda, makalenin yazarları, farklı lokasyon ve farklı parametreler için dört kademeli siklon reaktör alanında hava hızını ölçüp analiz yapmışlardır.

Olgun (2012), yayımladığı makalesinde kazan ve fırın sistemleri ile bu sistemlerde kullanılan brülörlerin devreye alma ve periyodik bakım işlemlerinde, taşınması ve kullanımı kolay elektronik baca gazı analiz cihazlarının kullanıldığından bahsetmektedir. Bu cihazlar ile baca gazı içerisindeki O_2, CO_2, CO, SO_2, NO_x emisyon miktarı, gaz ve yakma havası sıcaklıkları, baca çekiş basıncı ölçülebilmekte; islilik testi yapılabilmekte; verim ve fazla hava oranı gibi parametreler anlık olarak izlenebilmekte; gerek elektronik ortamda gerek de rapor çıktısı olarak saklanabilmektedir. Bu sayede: çevre kirliliği ile ilgili yönetmeliklere (Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği) ve ilgili çevre mevzuatına uygun olarak emisyon oranlarını azaltmak, yanma veriminde iyileştirmeler yaparak yakıt tasarrufu sağlamak, kazan ve brülör bakım-onarım ve gerekirse ayarlama işlemlerini yapmak mümkün olabilmektedir.

Durmaz ve Atalay (1995), yaptıkları çalışmada kazan ısıl performans ve emisyon parametreleri başlığı altında kazan yapısının, yanma bölümü (radyasyon bölümü) ve ağırlıklı olarak konveksiyon ısı geçişinin olduğu ısıtma yüzeyi bölümü (konveksiyon bölümü) olmak üzere iki bölümde incelenebileceğinden bahsetmişlerdir. Enerji ekonomisi ve çevresel etki yönünden uygun kazan işletmesi için bu iki bölge arasında enerji dengesinin oluşturulması ve tüm işletme ömrü boyunca korunması gerektiğini belirtmişlerdir. Kazan boyutlandırılmasında maliyetin en aza düşürülmesinin, enerji dengesinin radyasyon bölgesine kaydırılmasıyla sağlanacağını

ifade etmişlerdir. Bunun da yanma odası sıcaklığının çok yükselmesine dolayısıyla aşırı NO_x emisyonu oluşumuna, kül ergime vb. çevresel ve işletme sorunlarının ortaya çıkmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Radyasyonla ısı geçişinin, partikül (kurum, is, kok) ve üç atomlu yanma gazları (özellikle CO_2, H_2O) yardımıyla oluştuğunu belirtmişlerdir. Kömürlü kazanların yanma ürünleri itibariyle ağırlıklı olarak radyasyonla ısı geçişine elverişli kazanlar olduğunu, taşınım ısı yüzeyleri ısı aktarım mekanizmasında en etken faktörün baca veya fan çekişi ile oluşturulan gaz hızları olduğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle, çekiş yüzeylerinde yanma gazı hızlarının olabildiğince yüksek (uygun baca ve emiş sistem tasarımı) ve yüzeylerin temiz tutulması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Topal ve Durmaz (1995), çalışmalarında ısıtma tesisatı için gerekli ısının ülkemizde, ekonomik ve teknolojik nedenlerle üç geçişli alev duman borulu geleneksel kazanlarda genelde linyit yakılarak sağlanmakta olduğundan bahsetmişlerdir. Avrupa kökenli olan kok, briket vb. yanıcı uçucu oranı düşük, olabildiğince homojen tane büyüklüklü yakıtların yakılması için geliştirilen bu kazanlar ızgara üzerinde yalnız kok yakma boyutunu dikkate alan bir yapıya sahiptir. İçerisinde nem, kül ve özellikle yanıcı uçucu oranı yüksek, homojen tane özelliği taşımayan linyitler bu kazanlarda yakıldığında, hacimde yanma özelliğine sahip yanıcı uçucular tam olarak yakılamamaktadır. Bu ise yanma veriminin düşmesine, eksik yanmadan kaynaklanan gaz ve partikül biçiminde hava kirletici yoğun emisyonların oluşmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada kömür yakılan alışılmış bir kalorifer kazanı yanma odası ve ızgara sisteminde yapılan tadilatlarla yanma verimi arttırılmış ve yanmadan kaynaklanan gaz ve partikül emisyonlarının azaltılması sağlanmıştır. Yanma odası ve ızgara sistemindeki değişikliğin birlikte uygulanması durumunda yakıt maliyetinde Tunçbilek linyiti için % 26, Soma linyiti için ise % 16 azalma sağlanmıştır. Hava kirletici emisyonlarda da büyük azalmalar görülmüştür.

3. KAZANLAR

Ev tipi ve endüstriyel amaçlı ısı transfer makineleri olan kazanlar ısıtma, pişirme, buhar elde etme, kızdırma, ergitme, kızartma vb. geniş uygulama alanlarına sahiptir. Kazanlar, genel anlamda içerisinde fosil kaynaklı bir yakıt yakılarak etrafındaki akışkanı ısıtmaya dayalı sistemlerdir. Günümüzdeki kazanlarda, ısı temininde kullanılan fosil yakıtlar katı, sıvı ve gaz fazında bulunmaktadır. Sıvı ve gaz yakıtların yakıldığı kazanlarda yakıcı olarak brülör kullanılmaktadır. Brülörler, sıvı ve gaz yakıtı kendi yapısı içerisinde karıştırıp, çıkışında tutuşturduktan sonra basınçlı bir şekilde yanma haznesine püskürterek alev çekirdeği oluşturmaktadır. Günümüzde modülasyonlu brülörler kullanılarak, kazanın ısı yüküne göre brülörün çalışması elektronik olarak gerçekleştirilmektedir. Katı yakıt yakmak için elle beslemeli veya otomatik beslemeli sistemler bulunmaktadır. Elle beslemeli sistemlerde, yakıt elle yanma haznesine beslendikten sonra doğal veya zorlanmış hava beslemesiyle yakılmaktadır. Otomatik beslemeli sistemlerde ise yakıt, yanma haznesine bir redüktör motoru vasıtasıyla temin edilmektedir. Hava, kazana zorlanmış akış ile sağlanmaktadır.

3.1. Kazan Tipleri

Kazanlar kullanım alanına, akışkan tipine, konstrüksiyon tipine, yakıt tipine vb. göre sınıflandırılabilir. Burada sadece uygulamada çok kullanılan kazan tiplerinden bahsedilecektir.

3.1.1. Kullanım alanına göre kazanlar

Kazanlar kullanım alanına göre ev tipi ve endüstriyel amaçlı olmak üzere ikiye ayrılabilir. Ev tipi kazanlar, ticari amaçlı olmayan, merkezi ısınma, bireysel ısınma veya sıcak su kullanımı amacıyla kullanılırlar. Endüstriyel kazanlar, çeşitli büyüklükteki işletmelerde pişirme, ergitme, kürleme, kızartma, sterilizasyon, ısıtma vb. amaçlarla kullanılan kazanlardır.

3.1.2. Kullanılan akışkan türüne göre kazanlar

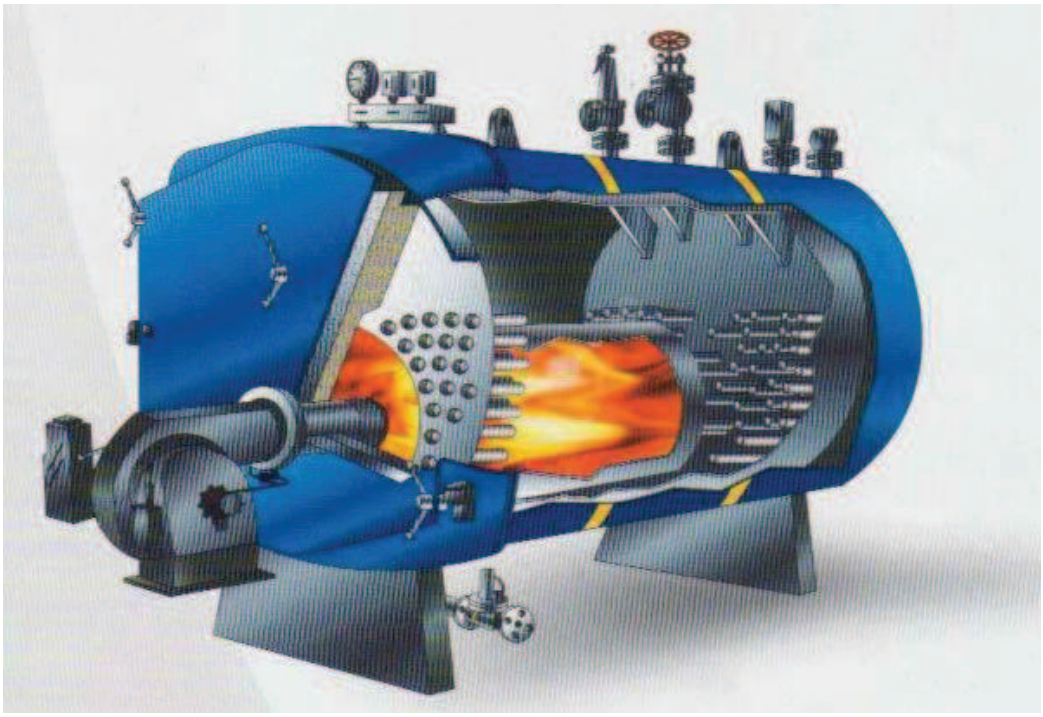
İçerisinde kullanılan akışkan türüne göre kazanlar genel olarak üç sınıfta incelenebilir:

- Buhar Kazanı
- Sıcak Su Kazanı
- Kızgın Akışkan Kazanı

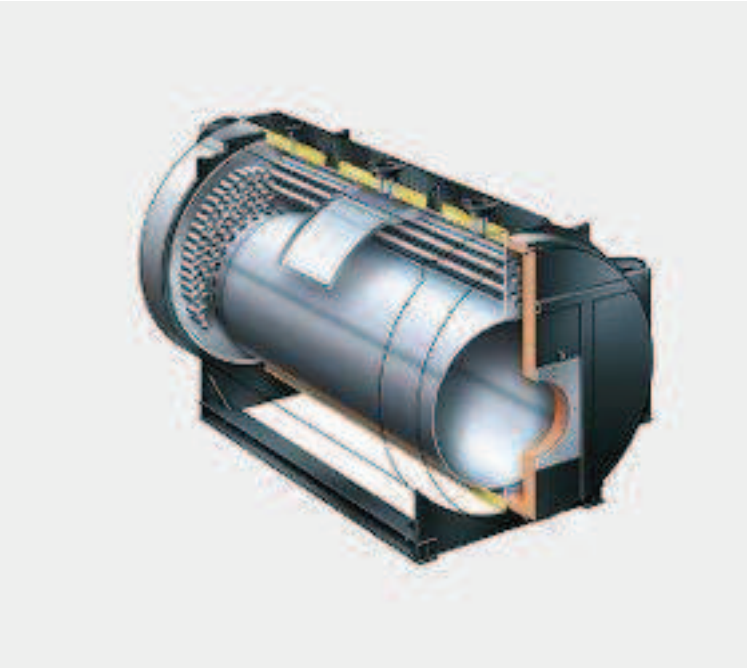
Buhar kazanları, ticari alanlarda ısıtma, ısınma, pişirme, sterilizasyon, ergitme, kürleme vb. amaçlarla kullanılan kazanlardır. Bu kazanlarda su seviyesi kontrolü yapılarak kazan içerisinde buhar oluşumu sağlanmaktadır. İstenilen özelliklere gelen buhar, kazandan tahliye edilmektedir.

Sıcak su kazanları, evlerde ve ticari alanlarda, ısıtma ve kullanım suyu amacıyla kullanılır. Sistem içerisinde sıcaklık kontrolü ile buhar oluşumuna izin verilmemektedir.

Kızgın akışkan kazanı, ticari alanlarda ısıtma, ısınma, kızartma vb. amaçlarla, kızgın su, kızgın buhar, kızgın yağ gibi bir akışkanın ürün olarak elde edildiği kazanlardır. Sabit basınçta doyma sıcaklığına ulaşmış akışkana, sabit basınçta ısı verilmesiyle sıcaklığının arttırılması prensibine göre çalışır.



Şekil 3.1. Buhar kazanı (http://www.resimyukle.com/buhar-kazani_1ia6)



Şekil 3.2. Sıcak su kazanı (http://www.savasdemirtas.com/wp-content/uploads/2012/01/Vitomax-100-LW-2.jpg)



Şekil 3.3. Kızgın Akışkan Kazanı (http://www.pirobloc.com/en/products/thermal-oil-heaters.php)

3.1.3. Konstrüksiyon tipine göre kazanlar

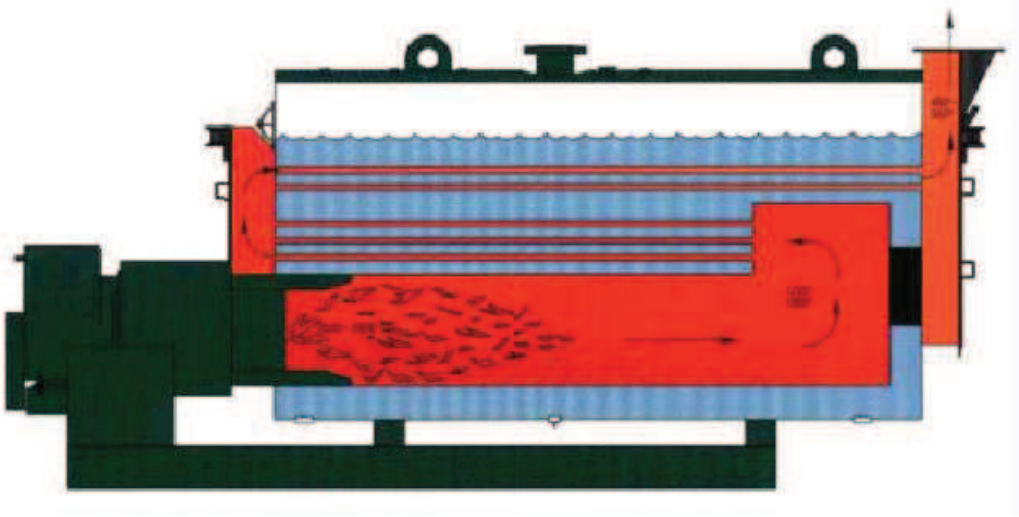
Konstrüksiyon tipine göre kazanlar temel olarak altı gruba ayrılır:

- Alev- duman borulu
- Su borulu
- Borusuz
- Döküm dilimli
- Paket tip
- Akışkan yataklı kazanlar.

3.1.3.1. Alev-duman borulu kazan

Alev-duman borulu kazanlar, içi su dolu bir dış örtünün içerisinde belirli sayıda düz borudan oluşmaktadır. Sıcak yanma gazları boruların içinden geçer. Yüksek kalınlıkta bir dış örtü gerekmemesi için alev-duman borulu kazanlar, düşük basınçlarda kullanılır. Genellikle 20 bar'a kadar imal edilirler. Bağımsız bir yanma haznesi ve yatay veya dikey sıralı duman borularından oluşur. Alev-duman borulu kazanların, imalatı ve nakliyesi kolaydır. Ayrıca bu kazanların ilk yatırım maliyeti düşük, yanma verimi yüksek ve kullanımları kolaydır.

Alev-duman borulu kazanda, sıcak gazlar (alev-duman) yanma haznesinden, tersinir yanma haznesinden ve duman borularından geçerken besi suyu veya sirkülasyon suyu bir dış örtü içerisinde, sıcak gazların geçtiği kısımların üzerinden dolaşarak ısınır ve kullanıma hazır hale gelir. Alev-duman borulu kazanlar genelde düşük kapasiteli sıcak su veya buhar üretiminde ve düşük işletme basınçlarında kullanılır. Alev-duman borulu kazanlar katı-sıvı-gaz yakıtlarla kullanılabilir. Ekonomik nedenlerden dolayı alev-duman borulu kazanların çoğunluğu tüm yakıt türlerine uyumlu paket tip olarak üretilmektedir. Paket tipte kazanlar tüm donanımlarıyla birlikte üretici tarafından temin edilerek kurulmaktadır.



Şekil 3.4. Alev-duman borulu bir kazanın kesit görünüşü
(http://www.foodtechinfo.com/FoodPro/GasTechnologies/boilers.htm)

3.1.3.2. Su borulu kazanlar

Su borulu kazanlar, fazla miktarda yerleştirilen su borularının etrafında sıcak yanma gazları dolaştırılabilmesi için tasarlanmıştır. Borular buhar dramı denen bir üst kollektör ile bir veya daha fazla alt kollektör ile birbirine bağlanır. Su borulu kazanlar, yüksek basınçlı uygulamalar için büyük boyutlarda imal edilebilir. Bunun nedeni, borunun içten basınca maruz kalmasıdır. Boyutları ve ağırlığından dolayı büyük kapasiteli su borulu kazanlar parçalar halinde imal edilerek kullanılacağı yerde monte edilmektedir.

Su borulu kazanların verimi alev-duman borulu kazanlara kıyasla daha yüksektir. Katı, sıvı ve gaz yakıtlarla kullanılabilirler. Su borulu kazanlar A, D, O tiplerinde tasarlanmaktadır. Bu harfler boru ve dramların genel şekillerine göre verilmektedir.

A tasarımında, iki adet küçük alt kollektör ve buhar-su ayrımını gerçekleştirmek için bir adet büyük üst dram bulunur.

D tasarımı en yaygın olan tiptir, ünite iki dramdan ve geniş hacimli yanma haznesinden oluşur. Sol ve sağ oryantasyonlu olabilir.

O tasarımında radyasyon ısısına maruz kalan en az boru yüzeyi mevcuttur. O tasarımında simetrik borular alt ve üst kolektörler arasındadır. Sirkülasyon daha kolaydır.

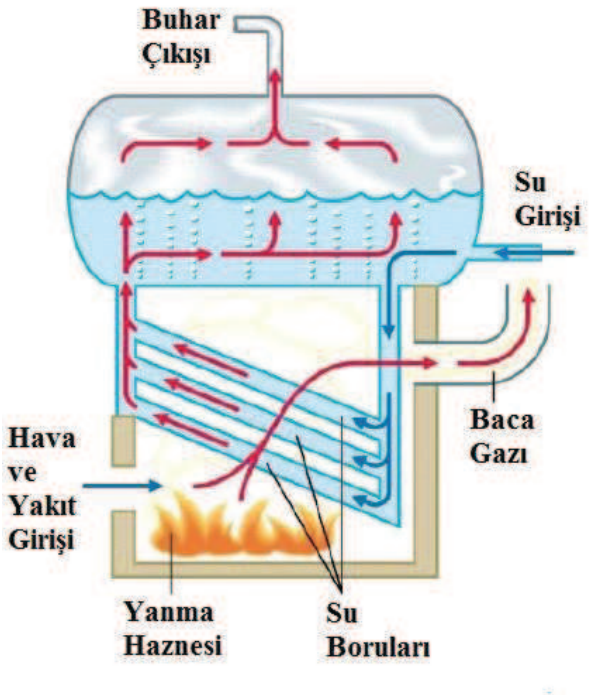
Su borulu kazanlarda, besi suyu borular içerisinde, yanma haznesi etrafında dolaşır ve kazan su haznesinde birikir. Sirkülasyon suyu, kazan su haznesinde, yanma

sonucu oluşan sıcak gazlarla ısıtılır. Buhar mesafesinden, sıvı fazındaki su, gaz fazındaki buhara dönüşür. Su borulu kazanlar, yüksek işletme basıncına ihtiyaç duyulduğu zaman kullanılır. Güç üretiminde kullanılan kazanlarda, yüksek işletme basıncına ihtiyaç duyulur.

Su borulu kazanların, hem işletme basıncı hem de buhar üretim kapasitesi aralığı alev-duman borulu kazanlara kıyasla oldukça yüksektir.

Su borulu kazanların özellikleri şunlardır:

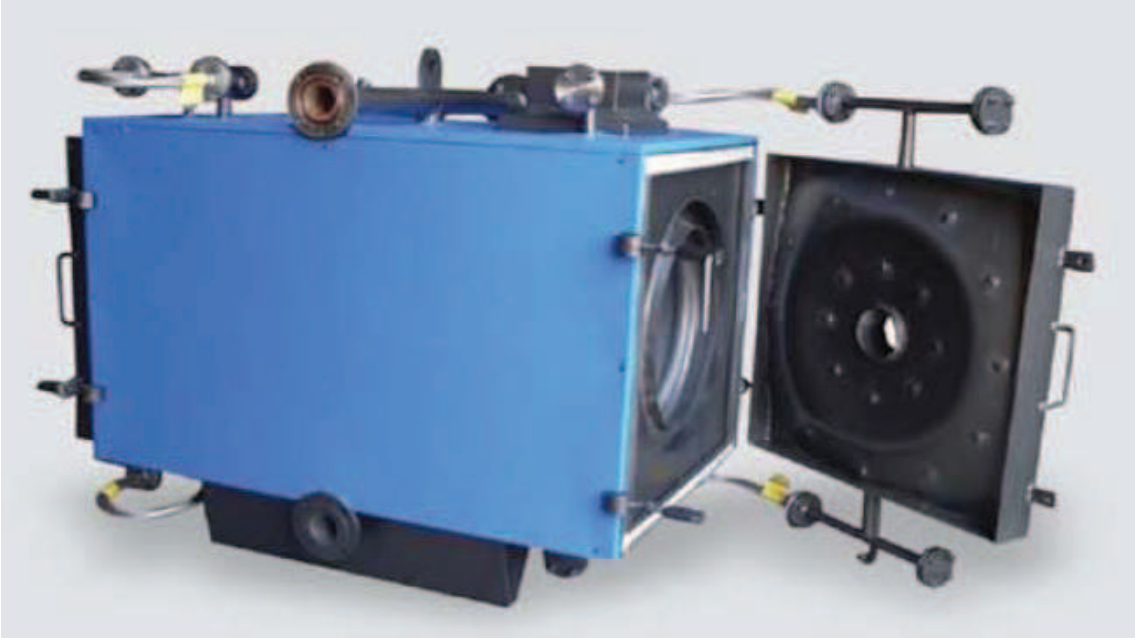
- Besi suyu tedarik ve sirkülasyonları ayarlanarak kazan verimi artırılabilir. Zorlanmış akışla yani pompa kullanarak akışkana hız ve basınç kazandırılır. Yüksek hızlardaki akışkan çeperiyle daha yüksek oranda ısı transferi katsayısına sahip olur. Isı transfer katsayısının artması suya daha çok ısının geçmesi anlamına gelir ki bu da kazanın etkinliğini arttırır.
- Akışkan boru içerisinde dolaştığı için suyun ekstra işlem görmesi gerekir ancak alev-duman borulu kazanlara göre daha toleranslıdır.
- Isıl verimin daha yüksek olma imkânı vardır.



Şekil 3.5. Su borulu bir kazanın basit görünüşü
(http://www.energyefficiencyasia.org/energyequipment/typesofboiler.html)

3.1.3.3. Borusuz kazanlar

Sistem içerisinde boru yoktur. Silindirik sektörlerden oluşmaktadır. Sektörler arası sıcak yanma gazları ve su bulunur. Sektörler, haddelenmiş plakaların kıvrılmasıyla elde edilen ürünler olduğu için içerisinde yüksek basınçlı akışkan bulunmamalıdır. Borusuz kazanlar düşük basınçlı sıcak su kazanı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.6. Borusuz kazan (http://www.akkaya.com.tr/urun/doc/ka/KA-KATALOG.pdf)

3.1.3.4. Döküm dilimli kazanlar

Bir çok döküm dilim cıvata ile birleştirilir. Düşük basınçlarda sıcak su kazanı olarak kullanılır. Küçük boyutlardadır. Su haznesi ile çevrili bir yanma haznesi vardır. Bu kazanda boru yoktur.



Şekil 3.7. Döküm dilimli kazan (http://www.rima.com.tr/pdf/RS_ManualTR.pdf)

3.1.3.5. Paket tip kazanlar

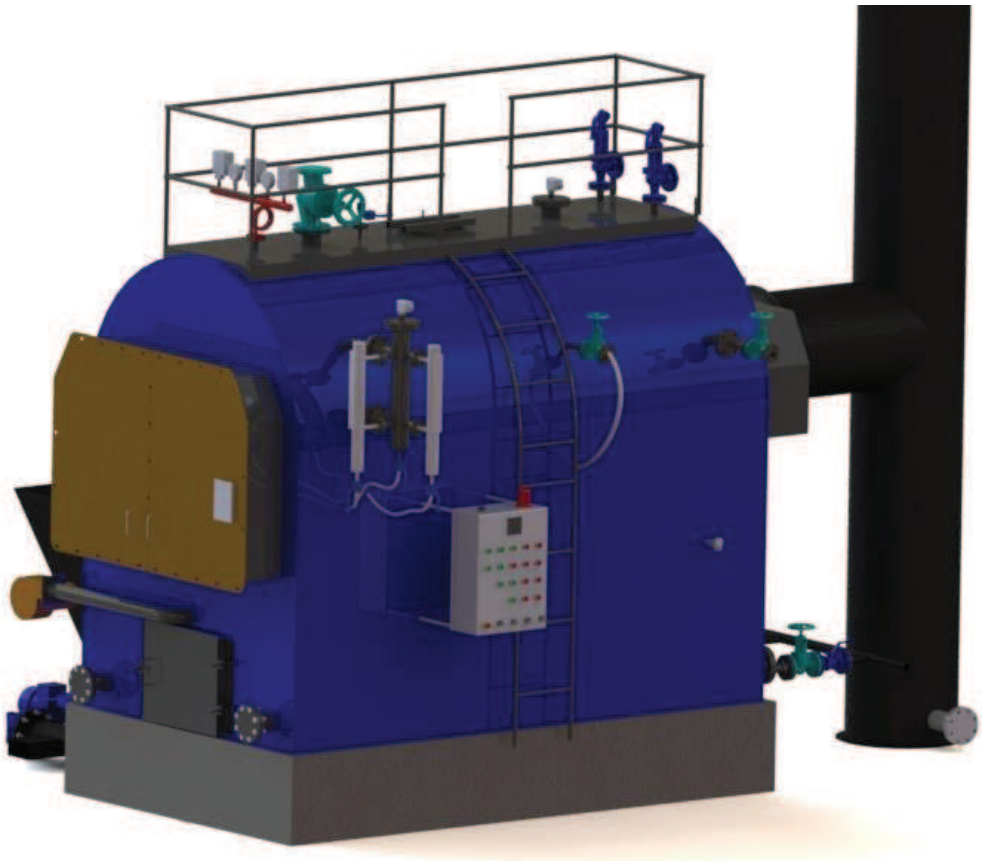
Komple paketi içermesi nedeniyle paket tip kazanlar, piyasada en çok tercih edilen kazanlardır. Sisteme buhar, sıcak su veya kızgın akışkan temin edebilmek ve dağıtabilmek için buhar, su, boru hatları, yakıt temini ve elektriksel bağlantılar sağlanmalıdır. Paket tip kazanlar genellikle skoç tip alev-duman borulu kazanlarla kullanılır.



Şekil 3.8. Paket tip karşı basınçlı buhar kazanı (http://www.akkaya.com.tr/urun-010.htm)



Şekil 3.9. Paket tip skoç buhar kazanı (Akkaya Isı Makinaları ve Doğalgaz San. Tic. A.Ş.'nin izni ile yayımlanmıştır.)



Şekil 3.10. Paket tip yarım silindirik buhar kazanı (Akkaya Isı Makinaları ve Doğalgaz San. Tic. A.Ş.'nin izni ile yayımlanmıştır.)

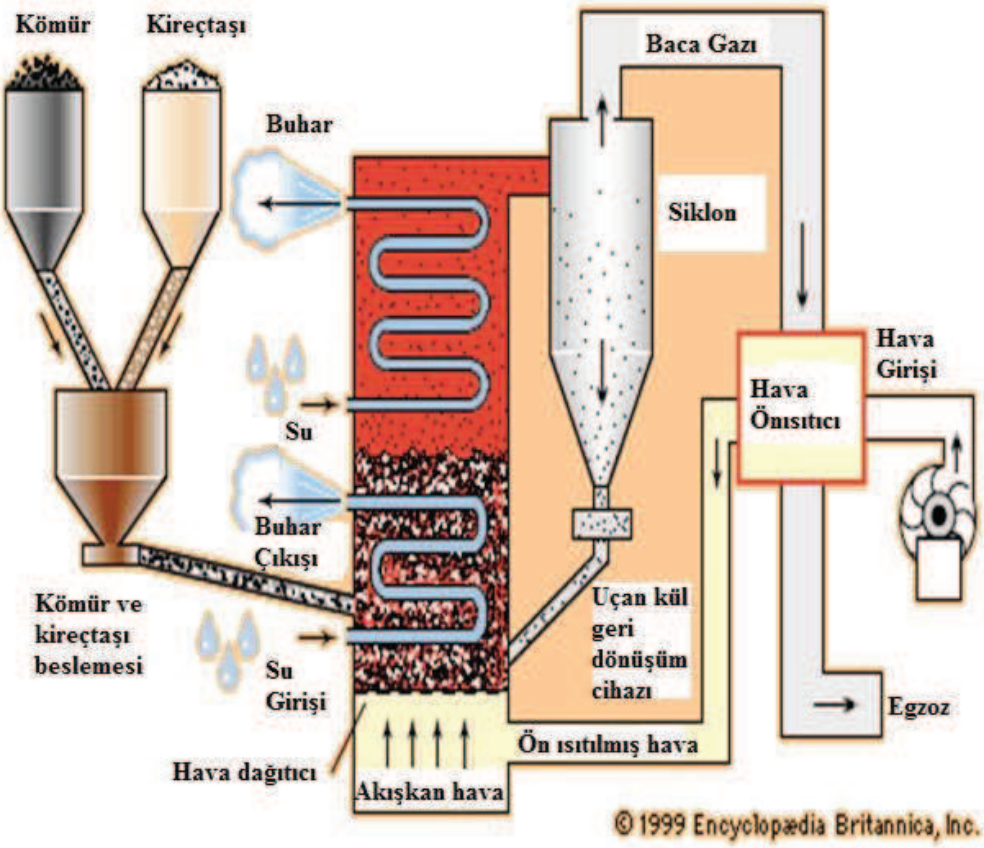
3.1.3.6. Akışkan yataklı kazanlar

Akışkan yataklı kazanlar, konvansiyonel ateşlemeli diğer sistemlere bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır ve faydalı birçok yönleri mevcuttur. Bunlar; kompakt kazan tasarımı, yakıtta esneklik sağlama, yüksek yanma verimi elde edebilme, hava kirliliğine neden olan NO_x ve SO_x gibi zararlı emisyonların azalmasıdır.

Bu tip kazanlarda kömür, yiyecek atıkları, pirinç kabuğu, küspe ve diğer tarımsal atıklar yakıt olarak kullanılabilir. Akışkan yataklı kazanlar 500 kg/h ile 100000 kg/h gibi geniş bir aralıktaki buhar üretim kapasitesinde üretilebilirler.

İnce gözenekli, kum destekli, ızgaralardan tam miktarda hava, yukarı doğru üflenir, böylece yataktaki katı parçacıkların yukarı hareketi sağlanır. Düşük hızlarda parçacıklar yere dağılır. Katı yakıt parçacıkları, hava akımı içinde akışkan görüntüsü, kaynama görüntüsü oluşturur. Bundan dolayı akışkan yataklı kazan denilmektedir. Hava akım hızının kademeli olarak hızlandırılmasıyla kabarcık oluşumu gözlenir. Kuvvetli türbülans, hızlı karışım ve yoğun yatak yüzeyi oluşur. Yatak yüzeyindeki katı parçacıklar kaynayan bir sıvıyı andırır ve akışkan görüntüsüne kavuşur.

Akışkan durumda, ızgara altındaki kum partiküller kömürün tutuşma sıcaklığına kadar ısıtılırsa ve kömür düzenli olarak yatağa temin edilirse kömür çabucak tutuşur ve yatakta uniform (eşit dağılmış) sıcaklık elde edilir. Akışkan yatakta yanma 840 ila 950 °C arasında bir değerde elde edilir. Bu sıcaklık külün füzyon sıcaklığının oldukça altındadır (külün ergime sıcaklığı yaklaşık 1480 °C'dir). Böylece külün ergimesi ile ilgili problemler çözülmüş olur. Su boruları ile yatak arasında efektif (etkili) ısı salınımı ve akışkan yataktaki hızlı karışımdan dolayı yüksek ısı transferi katsayısı sayesinde düşük yanma sıcaklığı elde edilir. Buhar elde edilmesinde kullanılan evaporatör vazifesindeki su boruları, direk akışkan yatak içerisine daldırıldığından dolayı yüksek ısı transfer oranı elde edilir. Bu durum aynı kapasiteyi elde ederken, boyutların ve maliyetin düşmesine sebep olur böylelikle yanma sıcaklığı düşer. Yanma sıcaklığının düşmesi NO_x oluşumunu düşürür. Kullanılan yakıtın, ızgara yüzeyinden yanma haznesi üst tarafına doğru kolaylıkla hareket edebilmesi için tane boyutunun küçük olması gerekmektedir. Küçük tane boyutunun kullanılması, ikincil havanın ızgara yüzeyine doğru bastırılabilme şansını da arttırmaktadır. Böylelikle yakıt taneciği çok yüksek sıcaklıklarda kazanı terk etmez, tam yanarak düşük sıcaklıklarda terk eder.



Şekil 3.11. Akışkan yataklı bir kazanın basit görünümü (http://www.britannica.com/EBchecked/media/113942/Schematic-diagram-of-a-fluidized-bed-combustion-boiler)

3.2. Kazanlarda Verim

Kazanlarda, kazan verimi ve yanma verimi olmak üzere iki tip verimden söz edilebilir. Kazan verimi, kazana giren ısı enerjisinin efektif (etkili) olarak buhar veya kızgın su/akışkan üretiminde kullanılması yüzdesine denir. Kazan verimini belirlemede iki yöntem kullanılır.

- Direkt yöntem, çalışma akışkanına aktarılan enerjinin kazanda kullanılan yakıtın yakılmasıyla elde edilen ısıya oranıdır.

- Dolaylı yöntem, kayıp ve girdi arasındaki farktan elde edilen verimdir.

Direkt yöntem girdi-çıktı yöntemi olarak da bilinir. Bu yöntemle verim hesaplamak için sadece faydalı çıktı ve ısı girdisi yeterlidir. Direkt yöntemle kazan verimi aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$Q_N = \dot{m}.C_W.(T_ç - T_g) \quad (3.1)$$

Q_N : Kazanın anma ısı gücü, (kcal/h)

C_W : Çıkış suyunun özgül ısısı, (kcal/kg^{o}C)

T_g : Kazan giriş suyu sıcaklığı, (^{o}C)

$T_ç$: Kazan çıkış suyu sıcaklığı, (^{o}C)

$\dot{m}$: Kütlesel debi, (kg/h)

$$Q_B = B.H_u \quad (3.2)$$

Q_B : Kazana saatte verilen ısı miktarı, (kcal/h)

B : Kazana saatte gönderilen yakıt miktarı, (kg/h)

H_u : Yakıtın alt ısıl değeri, (kcal/kg)

$$Kazan\ verimi\ (\eta_k) = (Q_N/Q_B).100 \quad (3.3)$$

Q_N : Kazan anma ısı gücü, (kcal/h)

B : Saatte kazana gönderilen yakıt miktarı, (kg/h)

H_u : Yakıtın alt ısıl değeri, (kcal/kg)

Dolaylı yöntemle kazan verimi aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır:

η_k: Dolaylı yöntemle bulunan kazan verimi

$$Q_N = B.H_u\eta_k \quad (3.4)$$

$$\eta_k = 100[1-(Q_A + Q_{CO} + Q_{Fr} + Q_{st})] \quad (3.5)$$

Q_A : Baca gazları duyulur ısı kaybı oranı

Q_{CO}: Baca gazlarındaki yanmamış gazlardan doğan ısı kaybı oranı

Q_{Fr}: Kül ve cürufta yanmamış karbon kaybı oranı

Q_{st} : Kazan dış yüzeylerinden iletim, taşınım ve ışınımla olan ısı kaybı oranı

Kazan yanma verimi, yakıt bileşenlerinin yeniden oksitlenebilir (tam yanmamış) ürünler üretmesinin, yeniden oksitlenemeyen (tam yanmış) ürünler üretebilmesine oranıdır. Yanma verimi yakıta özgü özellikler, baca gazı ürünleri, baca gazı sıcaklığı ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Yanma veriminin arttırılması kazan verimini de arttıracaktır. Yapılan bu çalışmada kazandaki yanma veriminin arttırılması araştırılmıştır. Yanma verimi hesabında iki temel yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlardan birincisine göre yanma verimi eş.(3.6) ve eş. (3.7) ile hesaplanır:

$$\eta=100-\left[\left[\frac{K_{gr}\ x\ (FT-AT)}{CO_2}\right]+\left[\frac{X\ x\ (2488+2.1\ x\ FT-4.2\ x\ AT)}{Q_{gr}\ x\ 1000}\right]+\left[\frac{K1\ x\ CO}{CO_2+CO}\right]\right] \quad (3.6)$$

$$\eta=100-\left[\left[\frac{K_{net}\ x\ (FT-AT)}{CO_2}\right]+\left[\frac{X\ x\ (210+2.1\ x\ FT-4.2\ x\ AT)}{Q_{gr}\ x\ 1000}\right]+\left[\frac{K1\ x\ Q_{gr}\ x\ CO}{Q_{net}\ x\ CO_2+CO}\right]\right] \quad (3.7)$$

FT : Baca Gazı Sıcaklığı (^oC)

AT : Ortam Sıcaklığı (^oC)

K_{gr}, K_{net}, K1 : Yakıta özgü parametreler Tablo 3.1'den okunur.

X : M + 9H

M, H : Yakıta özgü parametreler, Tablo 3.1'den okunur.

Qgr, Qnet : Yakıta özgü parametreler, Tablo 3.1'den okunur.

η : Kazan yanma verimi (%)

CO : Baca gazındaki % karbonmonoksit miktarı

CO_2 : Baca gazındaki % karbondioksit miktarı

(Testo flue gas analysis in industry, practical guide for emission and process measurements, 2.Edition)

Çizelge 3.1. Yakıta özgü parametreler
(Testo flue gas analysis in industry, practical guide for emission and process measurements, 2.Edition)

Yakıt	K_{gr}	K_{net}	CO_{2max}	K_1	K_2	H	M	Q_{gr}	Q_{net}	$O_{2\ ref}$	F Br	X
Doğalgaz	0,35	0,39	11,9	40	44,3	24,4	0	53,42	48,16	3	0,23	219,6
Fuel Oil Sınıf D	0,48	0,51	15,4	53	56,4	13	0	45,6	42,8	3	0,243	117
Fuel Oil Sınıf E,F,G	0,51	0,54	15,8	54	57,2	11,5	0,2	42,9	40,5	3	0,255	103,7
Kömür	0,62	0,65	18,4	63	66	4	13	26,75	25,5	6	0,256	49
Antrasit	0,67	0,69	19,1	65	66,5	3	12	29,65	28,95	6	0,255	39
Kok LPG	0,75	0,76	20,6	70	71,1	0,4	10	27,9	27,45	6	0,292	13,6
Propan LPG	0,42	0,45	13,8	48	51,8	18,2	0	50	46,3	3	0,234	163,8
Bütan	0,43	0,46	14,1	48	51,6	17,2	0	49,3	45,8	3	0,23	154,8
Fuel 1	0,35	0,39	11,9	40	44,3	24,4	0	53,42	48,16	3	0,23	219,6
Fuel 2	0,48	0,51	15,4	53	56,4	13	0	45,6	42,8	3	0,243	117

Yanma verimi hesabındaki diğer yaklaşıma göre verim hesaplanırken, öncelikle baca gazı kayıpları bulunur. Daha sonra kayıplar 100'den çıkarılarak yanma verimi eş. (3.8), (3.9) ve (3.10)'dan belirlenir. (Testo flue gas analysis in industry, practical guide for emission and process measurements, 2.Edition)

.

$$\eta = 100 - qA \tag{3.8}$$

η : Kazan yanma verimi

qA : Baca gazı kayıpları

$$qA = (FT - AT)x\left[\frac{A_2}{(21-O_2}\right] + C \tag{3.9}$$

FT : Baca Gazı Sıcaklığı (^oC)

AT : Ortam Sıcaklığı (^oC)

A_2, C : Yakıta özgü parametreler, Çizelge 3.2'den okunur.

O_2 : Baca gazındaki % oksijen miktarı

Katı yakıtlar için A_2 ve B yakıta özgü parametrelerinin değeri sıfırdır. Bu bilgileri ve f faktörünü kullanarak yukarıdaki formülasyon aşağıdaki Siegert formülasyonuna dönüştürülebilir.

$$qA = f\ x\ \frac{FT - AT}{CO_2} \tag{3.10}$$

Çizelge 3.2. Yakıta özgü parametreler
(Testo flue gas analysis in industry, practical guide for emission and process measurements, 2.Edition)

Yakıt	A_2	B	f	$CO_{2\ max}$
Fuel Oil	0,68	0,007	-	15,4
Doğalgaz	0,65	0,009	-	11,9
Sıvı gaz	0,63	0,008	-	13,9
Kok, odun	0	0	0,74	20
Briket	0	0	0,75	19,3
Kahverengi kömür	0	0	0,9	19,2
Sert kömür	0	0	0,6	18,5
Mutfak gazı	0,6	0,011	-	-
Şehir gazı	0,63	0,011	-	11,6

4. YANMA TEORİSİ

Yanma, yakıtın yeterli sıcaklıkta ve yeterli miktarda oksijenle buluşması ile meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda içerisindeki enerjiyi dış ortama bırakmasıdır. Yakıtın içerisinde birçok kimyasal bileşen vardır. Bu bileşenlerden bazıları oksijen ile yeterli sıcaklık ve sürede temas etmeleri halinde çeşitli kimyasal reaksiyonlar meydana getirmektedir. Dolayısı ile yakıt, oksijenle gerekli koşullar altında reaksiyon sonucu ısı açığa çıkaran madde olarak tanımlanabilir.

4.1. Kömürün Yanması

Yanma için kullanılan yakıtlar fiziksel hallerine bakılarak katı (kömür, odun, gıda atıkları vb.), sıvı (dizel, fuel-oil vb.) ve gaz olarak sınıflandırılabilir. Katı yakıtlar içerisinde sınıflandırılan kömürün yapısında karbon, hidrojen, oksijen, azot, kükürt ve kül bulunmaktadır.

Birim miktarda yakıtın tamamen yanabilmesi için belirli bir miktarda minimum ortam havasına ihtiyaç duyulur. Yakıtı tam yakmak için gerekli minimum hava miktarına stokiyometrik veya teorik hava denir. Tam yanma veya stokiyometrik yanma, yakıt içerisindeki bileşenlerin tamamının oksijenle uygun koşullar altında reaksiyona girmesini ve oksijenle tekrar reaksiyona giremeyecek ürünler oluşturmasını sağlar. Tam yanmanın gerçekleştirilebilmesi için gerekli üç önemli koşul şunlardır:

- Yeterli sıcaklık
- Yeterli zaman
- Yeterli türbülans.

Tam yanma olayının gerçekleştirilmesi, maksimum yanma verimi ve minimum zararlı emisyon oluşumunun göstergesidir. Bu nedenle yanma sistemlerinde her zaman tam yanma hedeflenmektedir. Oksijen, yanma haznesine yetersiz miktarda gönderilirse, yakıt içerisindeki hidrokarbonlar alabileceğinden daha az miktarda oksijenle buluşur. Bu durumda tam yanma gerçekleşmez, daha az ısı üretimi, verimsiz yanma ve yüksek zararlı emisyon oluşumu meydana gelir. Oksijenin fazla temininde ise yakıtın alabileceğinden fazla oksijen, yanma haznesinin soğumasına neden olur, bu durumda yanma verimi düşer.

Pratikte yanma haznesi içerisinde oksijen ve yakıtın mükemmel karışımı sağlanamadığından, yanma haznesine bir miktar oksijen fazlalığı sağlanır. Oksijen

temini için hava kullanıldığından buna hava fazlalığı denir. Literatürde hava fazlalığı eş. (4.1)'deki gibi ifade edilir.

$$\lambda = 100\ (\frac{Gerçek\ hava - Teorik\ hava}{Teorik\ hava}) \qquad (4.1)$$

Kömürün yanması, temel olarak birincil yanma ve ikincil yanma olaylarıyla gerçekleşmektedir. Sobalardaki birincil ve ikincil yanma olayı Ustaoğlu (1975) ve Bilir (1982)'in çalışmalarında detaylı olarak açıklanmıştır.

Ustaoğlu (1975), linyit sobaları hakkında araştırmalar yapmıştır. Yayımladığı tez çalışmasında kömürün yanması hakkında önemli bilgiler vermiştir. Bu bilgilerden bazıları şunlardır:

Yakıttaki hidrojenin tamamı hidrokarbon formundadır. Yeni yakıt ilave edildiğinde uçucu hidrokarbonların damıtımı, yanmanın birinci aşaması olarak gerçekleşir. Dumansız yanmanın gerçekleşmesi için bu kısmın, tamamen yanması gerekmektedir. Üstten beslemeli yanmada, taze kömür yakıt yatağına alevin üzerinden verilir. Yakıt yatağına bırakılan taze kömür genelde yeşil kömür olarak adlandırılır.

Yeşil kömür, alttan gelen ısı ile ısıtıldığında, nem buharlaşır ve uçucu maddeler, kömür parçacıklarından ayrılır. Üstten beslemeli yakıt yatağının en üst bölgesi, damıtma alanı olarak adlandırılır. Yanma için birincil hava (veya yanma havası), yakıt yatağının altından girer. İkincil hava (veya alev üstü hava) üstten girer. Birincil hava ızgara boşluklarından geçer, yukarı kül bölgesine doğru gider. Izgara etrafındaki gözenekli kül tabakası, yanma alanı içindeki birincil hava akışının kontrolüne yardım eder. Yatağa hava akışı oldukça kömür oksitlenir. Mevcut yanma teorilerine göre, karbon yanar ve birincil ürün olarak CO oluşur, daha sonra yakıtın alt kısımları civarındaki oksijen fazlalığı CO'i CO_2'e oksitler. Alt yanma alanı oksitleme alanı olarak adlandırılır.

Yakıt yatağının alt kısmından sıcak gazlar yükselip oksijen tükendiği zaman, kömürden oluşan CO_2 tekrar CO'e dönüşür. (Ustaoğlu, 1975) Çeşitli ebatlarda parçacıklar, kömürün üstünde bulunur. Bu bölgeye indirgeme bölgesi denir. CO_2, CO, N içeren yanma gazları damıtma bölgesinden geçer ve taze kömürden buharlaşan uçucu madde ve nem ile karışır. Bu nedenle, bu yanma gazları, oksijen ile uygun bir şekilde karıştırılmalıdır. Aşırı dumanı önlemek ve yüksek yanma verimi elde etmek için tutuşturulmalıdır. Türbülanslı ikincil hava, yakıt yatağının üst tarafında yanmanın tamamlanması için gereklidir.

$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 8113$ kcal/kg-C

$2C + O_2 \rightarrow 2CO + 2467$ kcal/kg-C

Yanmada karbon için yukarıda verilen iki reaksiyon meydana gelir. CO_2 oluşumunda, CO oluşumuna göre üç kat daha fazla ısıl enerji elde edilir. Tam yanma için CO'in tamamı CO_2'e dönüşmelidir. Tam yanma sonrası, CO, yanmamış hidrokarbon ve duman, baca gazında bulunmamalıdır. Diğer tüm doğal katı yakıtlar ve bazı işlenmiş olanlar gibi linyit ısıtıldığı zaman su buharı, hidrokarbonlar, hidrojen ve bazen CO ve CO_2'den oluşan gaz ürünleri açığa çıkar. Bu ürünlerin ağırlığı, doğrudan yakıtın uçucu madde oranıyla ilgilidir. Bunlardan sonra önemli bir miktar sabit karbon, yanmak için bulunur. Böylece linyitin tam yanması, gazların yanması ve katıların yanması şeklinde iki aşamada gerçekleşir.

Gazlarla karışması için hava temin edilmezse ve ocaktaki sıcaklık düşükse, dumanın çoğu, yoğuşmuş hidrokarbonlardan oluşan katran sisinden oluşur. Hava temin edilir fakat karışma yeterli olmaz ise ve ocağın sıcaklığı tutuşmaya neden olacak kadar yüksek ise, oksijenin mevcut olduğu bölgelerde yanma olur. Diğer bölgelerde, oksijen yetersizliğinden dolayı, hidrokarbonlar duman içerisinde görünen kurum veya karbon oluşumu ile çatlamaya neden olacak kadar yüksek sıcaklık radyasyonuyla hafifçe ısınır. Gerçekte, kurum ve katran, ocağın değişik bölümlerindeki gazlarla birlikte eş zamanlı olarak yayılır.

Bilir (1982), çalışmasında odunun üç aşamada yandığını belirtmektedir. İlk aşamada yakıt içerisindeki su buharlaşır, buharlaşan su yakıttan ayrılırken beyaz duman halinde görülür. Bu aşamada ısı kullanılır (1 kg suyun buharlaşması için 2320 kJ enerji kullanılır). Su buharı ortamı terk ederken çok az miktarda ısı açığa çıkar. Sıcaklık 100 °C'ye ulaştığında ortamdan su uzaklaşmıştır. Odundaki sıcaklık artmaya devam ettikçe, yanabilir katılar, öncelikle buharlaşır ve odunu gaz olarak terk ederler. Bu aşamada da ısı kullanılır. Bu gazlar yeterince yüksek bir sıcaklıkta hava ile birleşince (600 °C civarı) odundan kopan alevle yanarlar. Bu yanma ikincil yanma olarak nitelendirilmektedir.

Nem ve gazların büyük bir kısmı uzaklaştıktan sonra neredeyse saf karbon kalır. Yakıtın bu kısmına katran karası veya mangal kömürü denir. Katran karası, alev veya duman olmadan ve maksimum kullanılabilir ısıyı üreterek yavaşça yanar. Katran karasının yanması birincil yanma olarak adlandırılır. Yanan aleve daha fazla odun eklendiğinde, bu üç aşama aynı zamanda devam eder.

Isıtma yapıldığında, CO_2 ve su buharı odunun yüzey tabakasından uzaklaşır, yüzeyi kaplar ve odun ile temas halindeki oksijenin gelişini engeller. Bunun sonucunda duman oluşur fakat alev oluşmaz. Sıcaklık yükseldikçe, odun yüzeyi kurum bağlar. (katran karasının içinde yanar.) Aynı zamanda, odunun içine doğru ısı gönderilir. Bunun sonucunda odunun iç kısmındaki su serbest kalır. Daha sonra gazlar ve kurum serbest kalır. Bunlar odun yüzeyine yayılır. Kurum, katranla reaksiyona girerek uçucu gazları oluşturur. Bunlar oksijen varlığında alev oluştururlar. Uçucuların yanması oksijen gerektirir. Hava sadece yanan yakıtın üzerine doğru yönlendirilirse, gazların hiç birini yakamadan ortamdan uzaklaşır. Gazları yakmak için hava, alevin etrafına ve üzerine verilmelidir. Her gaz molekülü, tutuşmadan önce belirli bir miktar hava ve belirli bir miktar sıcaklık gerektirir. Daha fazla hava, gazların taşıyacağı ısıyı artırır. Fakat hava fazlalığı belirli bir sınırın üzerine çıkarsa odun tutuşmaz. Bu durumda gerekli ısı kaybını telafi etmek için reaksiyon bölgesinde birçok kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu durum oksijen eksikliğinde de meydana gelir. Katran karası çok az miktarda alevle veya alevsiz yanar. Radyasyon enerjisinin % 30'u odun tarafından yeniden emilir. Bu durum yanma sürecinin korunmasına yardım eder. Yanma hızlı gerçekleşirse büyük miktarlarda kurum ve tutuşabilir gazlar üretilir. Daha çok ısı çabucak üretilir. Bu durumda çok az katran karası üretilir. Yanma yavaş olursa, daha fazla CO_2, su buharı ve katran karası üretilir. Isı daha yavaş ve sabit bir oranda yayılır. Yanma haznesi içerisinde kömürün, saf karbon kısmının birincil hava ile yanması şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinde kömürün yanması

4.2. Yakıt Bileşenlerinin Yanması ve Oluşturdukları Emisyonlar

Hâlihazırda mevcut fosil yakıtların çoğunluğu karbon, hidrojen, oksijen, azot, kükürt, mineraller (kül) ve sudan oluşmaktadır. Yakıtın yanması, yakıt bileşenleriyle hava içerisindeki oksijen moleküllerinin reaksiyonu anlamına gelmektedir. Su buharı hariç CO_2, CO, NO_x, C_nH_m, SO_2 ve SO_3 gibi tüm yanma ürünleri zararlıdır. Baca gazının çevre ve canlı sağlığını tehdit etmesinden dolayı ürün başına yakıt tüketimi azaltılmalıdır.

Isı açığa çıkaran kimyasal reaksiyonlara egzotermik reaksiyon denir. Yakıt bileşenlerinin yanma haznesinde gerçekleştirdiği kimyasal reaksiyonlar da, egzotermik reaksiyonlardır. Yakıt bileşenleri kimyasal reaksiyon sonucu ısı dışında kimyasal yanma ürünleri de oluşturmaktadır. Bu kimyasal yanma ürünleri emisyon olarak adlandırılır. Yanma sonucu oluşan emisyonlardan bazıları çevreyi olumsuz etkilediği için zararlı emisyon olarak adlandırılmaktadır. Kömürün içerisinde bulunan yakıt bileşenlerine ait kimyasal reaksiyonlar, oluşan emisyonlar ve etkileri aşağıda detaylı olarak verilmektedir.

4.2.1. Hidrojenin yanması

Hidrojenin oksijenle kimyasal reaksiyonu egzotermik bir reaksiyondur ve yanma ürünü olarak su oluşur.

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 34650 \text{ kcal/kg-H}$$

Hidrojenin oksijenle yanması sonucu kütlesine kıyasla oldukça yüksek miktarda ısıl enerji üretilmektedir. Hidrojenin mol ağırlığı 1 g/mol, oksijenin mol ağırlığı 16 g/mol'dür. Yukarıdaki reaksiyona göre 4 g hidrojen (H_2), 32 g oksijenle (O_2) birleşerek 36 g su (H_2O) oluşturmaktadır. Dolayısıyla 1 g hidrojen (H_2), 9 g su (H_2O) oluşmaktadır, reaksiyon sonucu oluşan su, baca gazları içerisinde su buharı olarak kazanı terk etmektedir. Hidrojenin yanması sonucu oluşan emisyon su buharıdır ve çevreye olumsuz hiçbir etkisi bulunmamaktadır. Ancak oluşan su, SO_3 ile reaksiyona girerek H_2SO_4'ü oluşturması halinde çevreye oldukça zararlıdır. Oluşan suyun

buharlaşabilmesi için reaksiyon sonucu üretilen ısının bir bölümü kullanılmaktadır. Kullanılan ısı miktarı ise yakıtın alt ve üst ısıl değeri arasındaki farkı oluşturmaktadır. Yakıtın alt ısıl değeri, buharlaşan suyun baca gazından atıldığı durumda, buharlaşma ısısı hariç, yanma haznesine sağladığı ısı olarak değerlendirilirken, üst ısıl değer ise yanma sonucu oluşan suyun, buharlaşmadan yoğuşturulduğunda, yani kuru baca gazı, su buharı olmadan, baca gazı dış ortama verildiğinde yakıtın yanma haznesine sağladığı ısı olarak değerlendirilir.

Bütün gazların eşit hacimde eşit sayıda mol bulundurması Avagadro Kanunu olarak bilinektedir. Hidrojenin yanmasına ait kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ + ısı

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ + 34650 kcal/kg-H

1 mol H_2 + 0,5 mol $O_2 \rightarrow$ 1 mol H_2O + ısı

1 m^3 H_2 + 0,5 m^3 $O_2 \rightarrow$ 1 m^3 H_2O + ısı

Yanma için gerekli oksijen, hava kullanılarak karşılandığında hidrojenin yanma denklemi değişmektedir. Hava, içerisinde azot, oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit, sülfürdioksit vb. gazlar bulundurmaktadır. Hava içerisindeki azot ve oksijen içeriği diğer gazlara göre oldukça yüksek oranlardadır. Havanın hacimce % 79'u azot, % 21'i oksijen olarak kabul edilmektedir.

1 mol Hava $\rightarrow$ 0,21 mol O_2 + 0,79 mol N_2

1 m^3 Hava $\rightarrow$ 0,21 m^3 O_2 + 0,79 m^3 N_2

4,76 m^3 Hava $\rightarrow$ 1 m^3 O_2 + 3,76 m^3 N_2

2,38 m^3 Hava $\rightarrow$ 0,5 m^3 O_2 + 1,88 m^3 N_2

1 m^3 H_2 + 0,5 m^3 O_2 + 1,88 m^3 N_2 $\rightarrow$ 1 m^3 H_2O + 1,88 m^3 N_2 + ısı

1 m^3 H_2 + 2,38 m^3 Hava $\rightarrow$ 1 m^3 H_2O + 1,88 m^3 N_2 + ısı

Hidrojenin mol ağırlığı 1 g, Oksijenin mol ağırlığı 16 g'dır.

1 mol H_2 : 2 g

1 mol O_2 : 32 g

0,21 mol O_2 : 6,72 g

1 mol N_2 : 28 g

0,79 mol N_2 : 22,12 g

1 mol H_2O : 18 g

1 mol hava : 6,72 g + 22,12 g = 28,84 g

1 mol Hava → 0,21 mol O_2 + 0,79 mol N_2

2,38 mol Hava → 0,5 mol O_2 + 1,88 mol N_2

4,76 mol Hava → 1 mol O_2 + 3,76 mol N_2

28,84 g Hava → 6,72 g O_2 + 22,12 g N_2

1 mol H_2 + 0,5 mol O_2 → 1 mol H_2O + ısı

1 mol H_2 + 0,5 mol O_2 + 1,88 mol N_2 → 1 mol H_2O + 1,88 mol N_2 + ısı

1 mol H_2 + 2,38 mol Hava → 1 mol H_2O + 1,88 mol N_2 + ısı

2g H_2 + 16g O_2 + 52,64g N_2 → 18g H_2O + 52,64g N_2 + ısı

2g H_2 + 68,64g Hava → 18g H_2O + 52,64g N_2 + ısı

1g H_2 + 8g O_2 + 26,32g N_2 → 9g H_2O + 26,32g N_2 + ısı

1g H_2 + 34,32g Hava → 9g H_2O + 26,32g N_2 + ısı

1kg H_2 + 8kg O_2 + 26,32kg N_2 → 9kg H_2O + 26,32kg N_2 + ısı

1kg H_2 + 34,32kg Hava → 9kg H_2O + 26,32kg N_2 + ısı

1kg H_2 + 8kg O_2 + 26,32kg N_2 → 9kg H_2O + 26,32kg N_2 + 34650 kcal/kg-H

1kg H_2 + 34,32kg Hava → 9kg H_2O + 26,32kg N_2 + 34650 kcal/kg-H

4.2.2. Karbonun yanması

Karbonun yanması aşağıda belirtilen iki temel egzotermik reaksiyonla gerçekleşmektedir. Ayrıca yanma haznesi içerisinde karbon, karbondioksit ile birleşerek karbon monoksit oluşturabilir. Buna redüksiyon denklemi denir.

$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 8113$ kcal/kg-C

$2C + O_2 \rightarrow 2CO + 2467$ kcal/kg-C

$C + CO_2 \rightarrow 2CO$

Karbonun yanması sonucu emisyon olarak CO ve CO_2 üretilir. Karbonun, yanma haznesini CO olarak terk etmesi, tam yanmanın gerçekleşmediğinin göstergesidir. Bu nedenle baca gazında CO seviyesi mümkün olan en düşük seviyede olmalıdır. CO zehirli yapısı ile canlı sağlığı açısından oldukça zararlıdır. Endüstri Tesislerinden

Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'ne göre emisyonların üst değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelgede belirtilen sınır değerler geçilmemelidir.

Çizelge 4.1. Katı yakıt yakan tesislerde baca gazı emisyonları (Resmi gazete 22.07.2006 tarih ve 26236 sayılı endüstri tesislerinden kaynaklanan hava kirliliğinin kontrolü yönetmeliği, Sayfa 25, Tablo 5.1)

Kirletici parametreler	CO (mg/Nm^3)	NO (mg/Nm^3)	SO_x (mg/Nm^3)	HCI (mg/Nm^3)	HF (mg/Nm^3)	PM (mg/Nm^3)	TOC (mg/Nm^3)
500kW-15 MW	460	-	200	-	-	375	-
15MW-50 MW	460	-	200	200	30	375	30
>50 MW	460	400	200	200	30	280	30

4.2.2.1. Karbonun tam yanması

Karbon, yeterli oksijen, yeterli yanma sıcaklığı, yeterli zaman ve yeterli türbülans temin edilirse tam olarak yanar ve karbon dioksit oluşturur. Katı maddelerin hacimleri gazların yanında ihmal edilecek kadar küçüktür. Katı maddeler yakılırken reaksiyona giren madde olarak sadece gazların hacmi göz önüne alınır. Karbonun tam yanması ile emisyon olarak CO_2 oluşur. Yakıt içerisinde bulunan karbonun tamamının CO_2'e dönüşmesi beklenmektedir. CO_2, zehirsiz, renksiz ve kokusuz bir gazdır. CO_2 her ne kadar tam yanma ürünü olarak kabul edilse de, küresel ısınma ve iklim değişikliği oluşumuna katkı sağlamaktadır. Katı yakıtların yakılmasında, hava kirliliğinin kontrolü yönetmeliğine göre CO_2 için bir sınır değer belirtilmemiştir.

$C + O_2 \rightarrow CO_2 + ısı$

1 atom C + 1 m^3 $O_2 \rightarrow$ 1 m^3 CO_2 + ısı

1 atom C + 1 m^3 O_2 + 3,76 m^3 $N_2 \rightarrow$ 1 m^3 CO_2 + 3,76 m^3 N_2 + ısı

1 atom C + 4,76 m^3 Hava $\rightarrow$ 1 m^3 CO_2 + 3,76 m^3 N_2 + ısı

1 atom C : 12 g

1 mol O_2 : 32 g

0,21 mol O_2 : 6,72 g

1 mol N_2 : 28 g

0,79 mol N_2 : 22,12 g

1 mol CO_2 : 44 g

1 mol hava : 6,72 g + 22,12 g = 28,84 g

1 atom C + 1 mol $O_2 \rightarrow$ 1 mol CO_2 + ısı

1 atom C + 1 mol O_2 + 3,76 mol $N_2 \rightarrow$ 1 mol CO_2 + + 3,76 mol N_2 + ısı

1 atom C + 4,76 mol hava → 1 mol CO_2 + + 3,76 mol N_2 + ısı

12g C + 32g O_2 + 105,28g N_2 → 44g CO_2 + + 105,28g N_2 + ısı

12g C + 137,28g hava → 44g CO_2 + + 105,28g N_2 + ısı

1g C + 2,67g O_2 + 8,77g N_2 → 3,67g CO_2 + + 8,77g N_2 + ısı

1g C + 11,44g hava → 3,67g CO_2 + + 8,77g N_2 + ısı

1kg C + 2,67kg O_2 + 8,77kg N_2 → 3,67kg CO_2 + + 8,77kg N_2 + ısı

1kg C + 11,44kg hava → 3,67kg CO_2 + + 8,77kg N_2 + ısı

1kg C + 2,67kg O_2 + 8,77kg N_2 → 3,67kg CO_2 + + 8,77kg N_2 + 8113 kcal/kg-C

1kg C + 11,44kg hava → 3,67kg CO_2 + + 8,77kg N_2 + 8113 kcal/kg-C

4.2.2.2. Karbonun eksik yanması

Karbon, yanması sırasında yeterli oksijen bulamazsa tam yanmayı gerçekleştiremez ve yanma reaksiyonu sonucu ürün olarak karbondioksit yerine karbon monoksit oluşur. Karbon monoksit; renksiz, kokusuz, tatsız, yanıcı ve zehirleyici bir gazdır. Yoğunluğu havanın yoğunluğundan az olduğundan, atmosferin alt tabakalarında bulunur (Keçebaş, 2005).

Karbonun eksik yanması sonucu oluşan hacimsel yanma reaksiyonları aşağıdaki gibi olur:

2C + O_2→ 2CO + ısı

2 atom C + 1 mol O_2→ 2 mol CO + ısı

1 atom C + 0,5 mol O_2→ 1 mol CO + ısı

1 atom C + 2,38 mol Hava → 1 mol CO + 1,88 mol N_2 + ısı

1 atom C + 0,5 m^3 O_2→ 1 m^3 CO + ısı

1 atom C + 0,5 m^3 O_2 + 1,88 m^3 N_2 → 1 m^3 CO + 1,88 m^3 N_2 + ısı

1 atom C + 2,38 m^3 Hava → 1 m^3 CO + 1,88 m^3 N_2 + ısı

Karbonun eksik yanması sonucu aşağıdaki gibi kütlesel yanma reaksiyonları oluşur:

1 atom C : 12 g

1 mol O_2 : 32 g

0,21 mol O_2 : 6,72 g

1 mol N_2 : 28 g

0,79 mol N_2 : 22,12 g

1 mol CO_2 : 44 g

1 mol hava : 6,72 g + 22,12 g = 28,84 g

1 atom C + 0,5 mol O_2→ 1 mol CO + ısı

1 atom C + 2,38 mol Hava → 1 mol CO + 1,88 mol N_2 + ısı

12g C + 16g O_2→ 28g CO + ısı

12g C + 16g O_2 + 52,64g N_2 → 28g CO + 52,64g N_2 + ısı

12g C + 68,64g Hava → 28g CO + 52,64g N_2 + ısı

1g C + 1,33g O_2 + 4,39g N_2 → 2,33g CO + 4,39g N_2 + ısı

1g C + 5,72g Hava → 2,33g CO + 4,39g N_2 + ısı

1kg C + 1,33kg O_2 + 4,39kg N_2 → 2,33kg CO + 4,39kg N_2 + ısı

1kg C + 5,72kg Hava → 2,33kg CO + 4,39kg N_2 + ısı

1kg C + 1,33kg O_2 + 4,39kg N_2 → 2,33kg CO + 4,39kg N_2 + 2467 kcal/kg-C

1kg C + 5,72kg Hava → 2,33kg CO + 4,39kg N_2 + 2467 kcal/kg-C

4.2.2.3. Karbon monoksitin yanması

Karbonun eksik yanması sonucu, karbon monoksit oluştuğu yukarıda belirtilmişti. Karbon monoksit yeterli sıcaklık, zaman ve türbülanslı ortamda oksijenle yeniden buluşursa yanarak karbondioksit oluşturur. Alev üzerinden verilen ikincil hava ile yanma olayında indirgenmiş yani CO'e dönüşmüş karbon bu yolla yakılarak yeniden CO_2 oluşturulur. CO ve CO_2 emisyonlarının çevre üzerine etkileri, karbonun tam yanması ve eksik yanması kısımlarında belirtilmiştir.

$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ + ısı

2 mol CO + 1 mol O_2→ 2 mol CO_2 + ısı

1 mol CO + 0,5 mol O_2→ 1 mol CO_2 + ısı

1 mol CO + 0,5 mol O_2 + 1,88 mol N_2 → 1 mol CO_2 + 1,88 mol N_2 + ısı

1 mol CO + 2,38 mol Hava → 1 mol CO_2 + 1,88 mol N_2 + ısı

2 m^3 CO + 1 m^3 O_2→ 2 m^3 CO_2 + ısı

1 m^3 CO + 0,5 m^3 O_2→ 1 m^3 CO_2 + ısı

1 m^3 CO + 0,5 m^3 O_2 + 1,88 m^3 N_2 → 1 m^3 CO_2 + 1,88 m^3 N_2 + ısı

1 m^3 CO + 2,38 m^3 Hava → 1 m^3 CO_2 + 1,88 m^3 N_2 + ısı

1 atom C : 12 g

1 mol O_2 : 32 g

0,21 mol O_2 : 6,72 g

1 mol N_2 : 28 g

0,79 mol N_2 : 22,12 g

1 mol CO_2 : 44 g

1 mol hava : 6,72 g + 22,12 g = 28,84 g

1 mol CO + 0,5 mol O_2 + 1,88 mol N_2 → 1 mol CO_2 + 1,88 mol N_2 + ısı

1 mol CO + 2,38 mol Hava → 1 mol CO_2 + 1,88 mol N_2 + ısı

28g CO + 16g O_2 + 52,64g N_2 → 44g CO_2 + 52,64g N_2 + ısı

28g CO + 68,64g Hava → 44g CO_2 + 52,64g N_2 + ısı

1g CO + 0,57g O_2 + 1,88g N_2 → 1,57g CO_2 + 1,88g N_2 + ısı

1g CO + 2,45g Hava → 1,57g CO_2 + 1,88g N_2 + ısı

1kg CO + 0,57kg O_2 + 1,88kg N_2 → 1,57kg CO_2 + 1,88kg N_2 + ısı

1kg CO + 2,45kg Hava → 1,57kg CO_2 + 1,88kg N_2 + ısı

4.2.3. Kükürdün yanması

Kükürdün tam yanması sonucu SO_2 oluşmaktadır. Kükürdün oksijenle oluşturduğu SO_x reaksiyonları bulunmaktadır. SO_x 'ler çevre ve canlı sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir.

S + O_2→ SO_2 + ısı

1 atom S + 1 m^3 O_2→ 1 m^3 SO_2 + ısı

1 atom S + 1 m^3 O_2 + 3,76 m^3 N_2 → 1 m^3 SO_2 + 3,76 m^3 N_2 ısı

1 atom S + 4,76 m^3 Hava → 1 m^3 SO_2 + 3,76 m^3 N_2 ısı

1 mol O_2 : 32 g

0,21 mol O_2 : 6,72 g

1 mol N_2 : 28 g

0,79 mol N_2 : 22,12 g

1 mol CO_2 : 44 g

1 mol hava : 6,72 g + 22,12 g = 28,84 g

1 atom S: 32 g

1 atom S + 1 mol O_2→ 1 mol SO_2 + ısı

1 atom S + 1 mol O_2 + 3,76 mol N_2 → 1 mol SO_2 + 3,76 mol N_2 + ısı

1 atom S + 4,76 mol Hava → 1 mol SO_2 + 3,76 mol N_2 + ısı

32g S + 32g O_2 + 105,28g N_2 → 64g SO_2 + 105,28g N_2 + ısı

32g S + 137,28g Hava → 64g SO_2 + 105,28g N_2 + ısı

1g S + 1g O_2 + 3,29g N_2 → 2g SO_2 + 3,29g N_2 + ısı

1g S + 4,29g Hava → 2g SO_2 + 3,29g N_2 + ısı

1kg S + 1kg O_2 + 3,29kg N_2 → 2kg SO_2 + 3,29kg N_2 + ısı

1kg S + 4,29kg Hava → 2kg SO_2 + 3,29kg N_2 + ısı

4.2.4. Metanın yanması

Kömür içerisinde metan bulundurmaz. Metan, doğalgaz gibi gaz yakıtlarda bulunmaktadır. Metanın tam yanması sonucu CO_2 ve H_2O oluşur. Metanın tam yanma reaksiyonu aşağıdaki gibidir.

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ + ısı

1 mol CH_4 + 2 mol O_2 → 1 mol CO_2 + 2 mol H_2O + ısı

1 mol CH_4 + 2 mol O_2 + 7,52 mol N_2 → 1 mol CO_2 + 2 mol H_2O + 7,52 mol N_2 + ısı

1 mol CH_4 + 9,52 mol Hava → 1 mol CO_2 + 2 mol H_2O + 7,52 mol N_2 + ısı

1 m^3 CH_4 + 2 m^3 O_2 → 1 m^3 CO_2 + 2 m^3 H_2O + ısı

1 m^3 CH_4 + 2 m^3 O_2 + 7,52 m^3 N_2 → 1 m^3 CO_2 + 2 m^3 H_2O + 7,52 m^3 N_2 + ısı

1 m^3 CH_4 + 9,52 m^3 Hava → 1 m^3 CO_2 + 2 m^3 H_2O + 7,52 m^3 N_2 + ısı

1 mol O_2 : 32 g

0,21 mol O_2 : 6,72 g

1 mol N_2 : 28 g

0,79 mol N_2 : 22,12 g

1 mol CO_2 : 44 g

1 mol hava : 6,72 g + 22,12 g = 28,84 g

1 mol CH_4 : 16 g

1 mol H_2O : 18 g

16g CH_4 + 64g O_2 + 210,56g N_2 → 44g CO_2 + 36g H_2O + 210,56g N_2 + ısı

16g CH_4 + 274,56g Hava → 44g CO_2 + 36g H_2O + 210,56g N_2 + ısı

1g CH_4 + 4g O_2 + 13,16g N_2 → 2,75g CO_2 + 2,25g H_2O + 13,16g N_2 + ısı

1g CH_4 + 17,16g Hava → 2,75g CO_2 + 2,25g H_2O + 13,16g N_2 + ısı

$1kg\ CH_4 + 4kg\ O_2 + 13{,}16kg\ N_2 \rightarrow 2{,}75kg\ CO_2 + 2{,}25kg\ H_2O + 13{,}16kg\ N_2 + ısı$

$1kg\ CH_4 + 17{,}16kg\ Hava \rightarrow 2{,}75kg\ CO_2 + 2{,}25kg\ H_2O + 13{,}16kg\ N_2 + ısı$

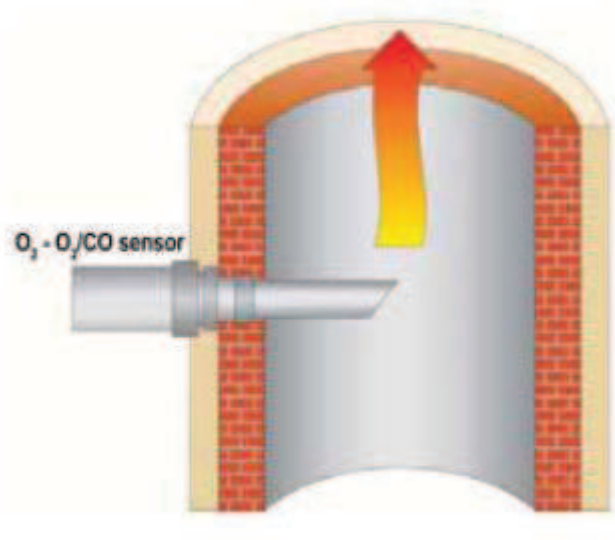
4.2.5. Azotoksitler

Yakıt içerisinde bulunan azot bileşeni egzotermik yanma reaksiyonu oluşturmamaktadır. Azot, yüksek sıcaklıklarda oksitlenerek NO_x' leri oluşturur. Azotoksitler çevre kirliliğine neden olurlar. Akışkan yatakta, yanma olayında yanma sıcaklıkları düşük olduğu için azotoksitler oluşmaz. Azotoksitler yanma haznesi sıcaklığını etkilemez.

4.3 Otomatik Yakma Yönetim Sistemleri

Her yanma haznesi tasarımının, maksimum yanma verimi sağladığı bir λ değeri bulunmaktadır. Yapılan deneysel çalışmadan ve literatürden elde edilen bilgilere göre, λ'nın belirli bir değerin üzerinde olmasının verimsiz yanma anlamına geldiği sonucuna varılmıştır. Yanmanın optimum λ değerinde, sabit hava-yakıt oranında, sürekli olarak sağlanması maksimum verim, minimum zararlı emisyon ve minimum enerji maliyeti anlamına gelmektedir.

Yakıt tüketiminin büyük değerlere ulaştığı yüksek kapasiteli kazanlarda, verimin kontrolü daha büyük önem arz etmekte ve bu iş için geliştirilmiş tam otomatik mikro modülasyonlu yakma yönetim ve oksijen trim kontrol sistemleri kullanılmaktadır (Şekil 4.2). Söz konusu sistem ile baca analizleri sürekli ve otomatik olarak yapılmakta, O_2, CO_2, CO ve baca gazı sıcaklığı gibi parametreler ile yanma verimi sürekli izlenmekte, yakıt karakterinde ve atmosferik şartlarda olabilecek değişikliklerin önceden ayarlanmış parametrelere etkisi sistemin yakıt/hava ayarına otomatik müdahalesi ile önlenebilmektedir. Gerektiğinde frekans konvertörlü brülör fanları ile eşgüdümlü çalışarak fan enerji tüketiminden tasarruf sağlanmakta, hassas ve oransal kontrol ile tam yanma sonucu sistem verimi yükseltilmekte ve yakıt tasarrufu sağlanmakta, ayrıca, sistem otomatik kalibrasyon ve hata tespitine imkan vermekte ve bina otomasyon sistemlerine de entegre edilebilmektedir (Bilgin, 2006).

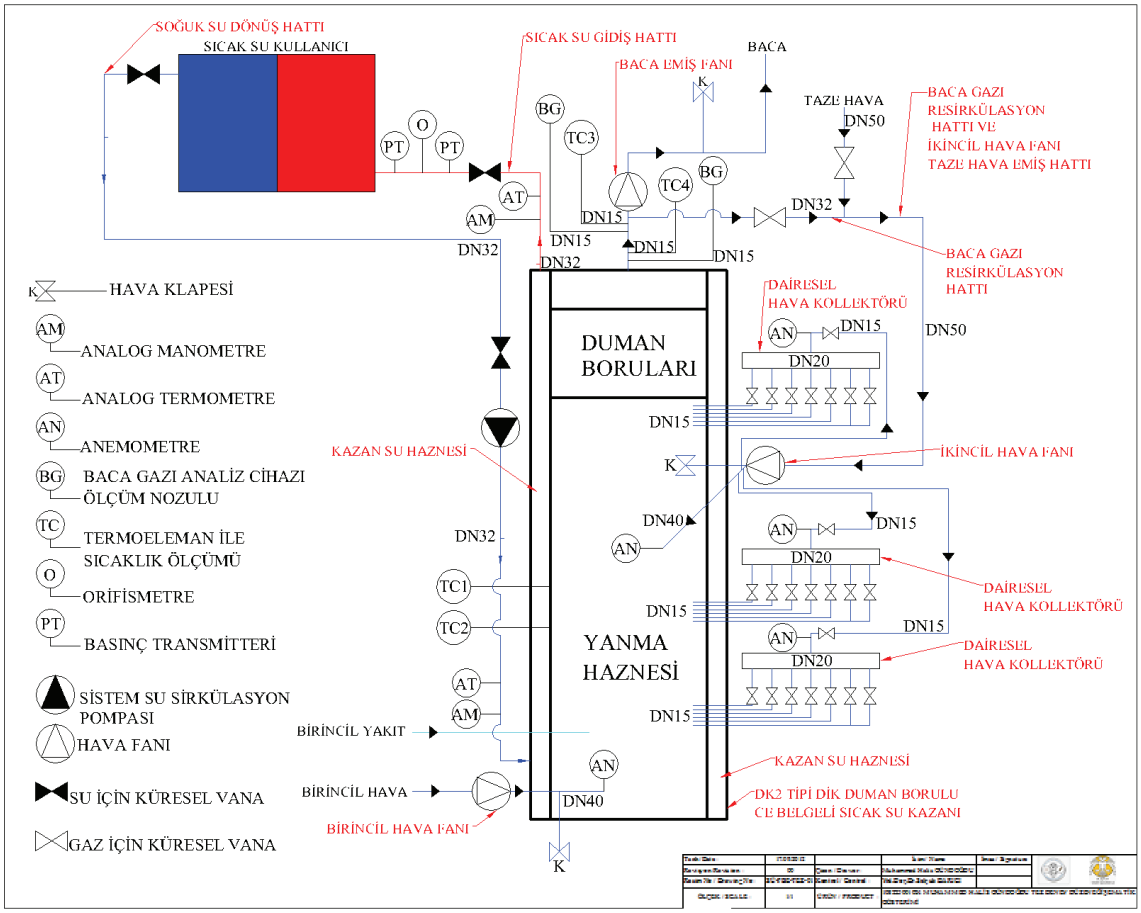


Şekil 4.2. Otomatik yakma yönetim sistemi O_2/CO sensörü uygulaması

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Deney Düzeneği

Daha önceden tasarlanmış ve imal edilmiş, dik duman borulu sıcak su kazanı bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Kurulan deney düzeneğinin şematik görünümü ve düzenek üzerinde ölçme elemanlarının yerleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Deney düzeneği şematik görünümü

Kazan konstrüksiyonunun, ikincil yakma havası temin konumunun ve miktarının, kazanın ısıl performans ve emisyonları üzerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada dört faklı konstrüksiyon tipi için deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan konstrüksiyon tiplerinin her biri ayrı ayrı aşağıda ele alınmıştır.

5.2. Konstrüksiyon tip 1

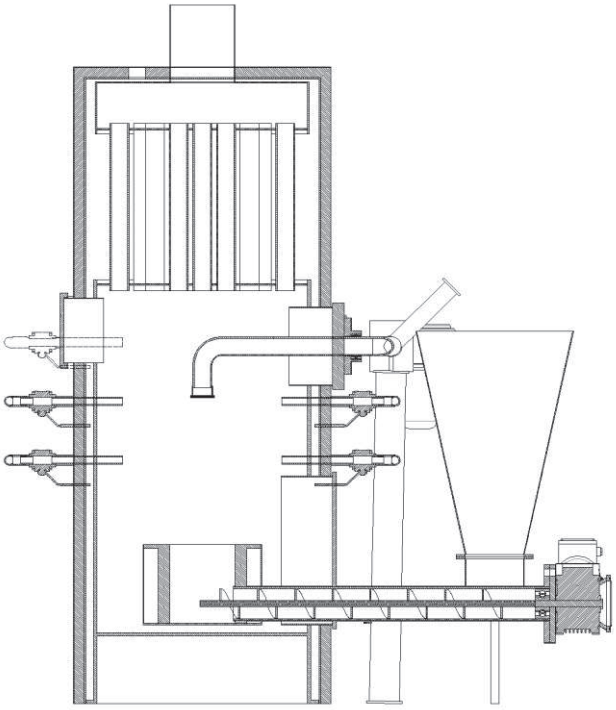
1 numaralı konstrüksiyon tipi Şekil 5.2 ve Şekil 5.3' de verilmiştir. Ayrıca konstrüksiyon tip 1 kesit görünüşü Şekil 5.4'deki gibidir. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de görülen deney kazanı, daha önceden tasarlanıp imal edilmiş ve dik alev-duman borulu tiptedir. Sistem, otomatik alttan yakıt beslemeli olarak çalışmaktadır. Otomatik yakma sisteminin bunkerinden (yakıt haznesi), yakıt borusuna dökülen yakıt, bir redüktör motoru ve helezon-mil mekanizması sayesinde yanma haznesine taşınmaktadır. Yakıt besleme motoru ve birincil hava motoru, kontrol panosu üzerindeki açma-kapama anahtarlarıyla kontrol edilmektedir. Otomatik yakma sistemi, yanma haznesinin en altına yerleştirilmiştir. Kazana ikincil hava, üst kül kapağına monte edilmiş düzenekle ve dairesel hava kollektörleri (halka kollektörler) vasıtasıyla verilmektedir. Bunun için bir adet ikincil hava fanı kullanılmıştır. Üstten, alev üzerine dik olacak şekilde hava veren ikincil hava borusunun iç çapı 42.4 mm, et kalınlığı 3 mm'dir. Bu borunun uç kısmına çıkan havayı yayması için yayıcı plaka tutturulmuştur. Üstten ikincil hava borusu, Şekil 5.5'de görüldüğü gibi stokerin üst yüzeyinden 36 cm yukarıdaki noktaya kadar indirilmiştir. Böylelikle uçucuları yakmak için gönderilen ikincil hava, alevin hemen üzerinden sisteme verilmiştir. Ayrıca yanma haznesine ikincil havayı çevresel olarak farklı yerlerden vermek amacıyla Şekil 5.6'da görülen 18 adet delik açılmıştır. Bu delikler Şekil 5.7' de görülen halka kollektörlere Şekil 5.8' de görüldüğü gibi bağlanmış, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10' daki halini almıştır. Böylece ikincil hava fanı ile yanma haznesine farklı debi ve konumlarda hava temin edilmiştir.



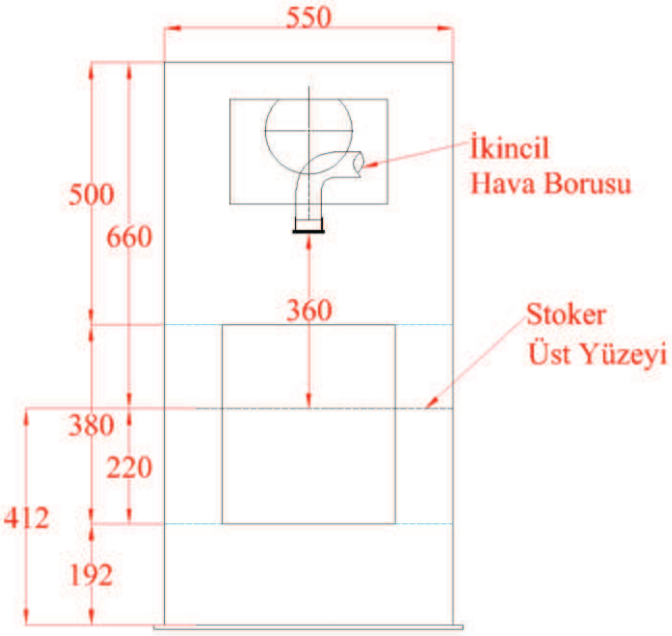
Şekil 5.2. Deney düzeneği arkadan görünüş



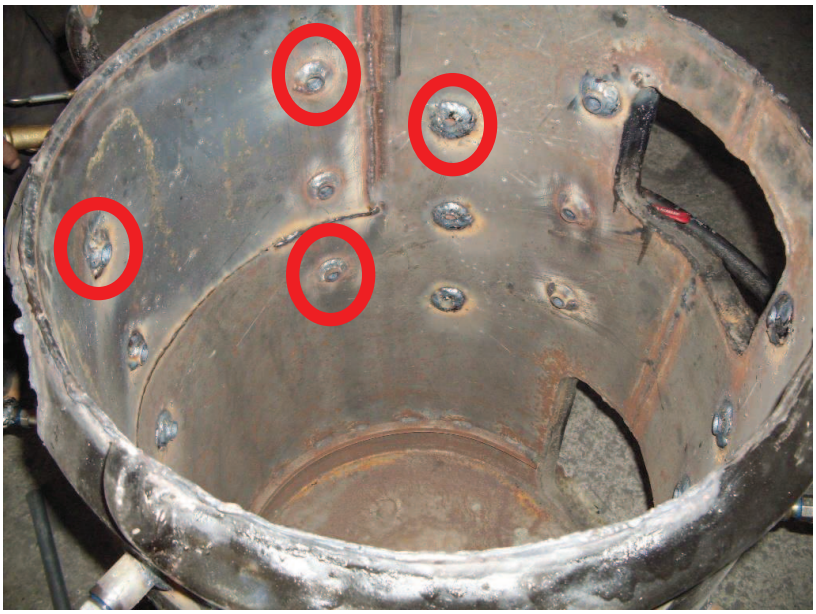
Şekil 5.3. Deney düzeneği önden görünüş



Şekil 5.4. Konstrüksiyon tip 1 kazan kesit görünüşü



Şekil 5.5. Alev üstü ikincil hava girişi şematik gösterim



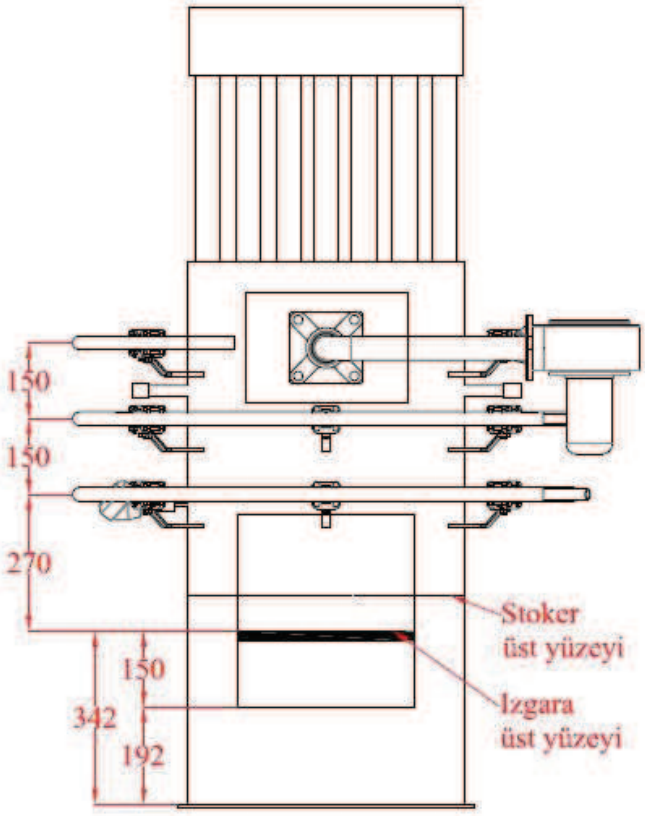
Şekil 5.6. Halka kollektörler için açılmış ikincil hava delikleri



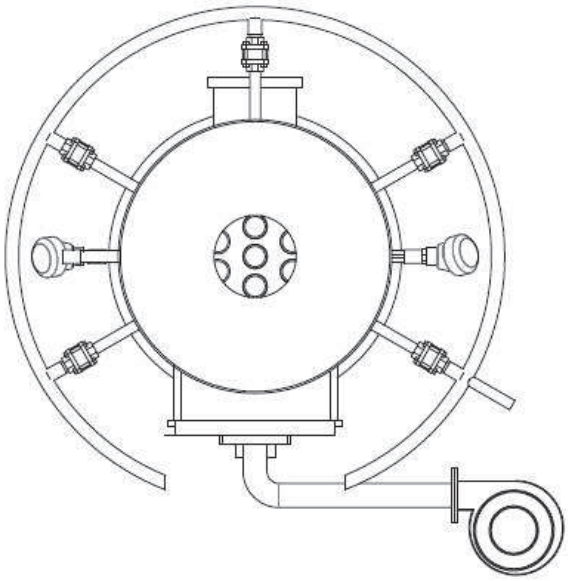
Şekil 5.7. Halka kollektörler



Şekil 5.8. Halka kollektörlerin yanma haznesine montajı



Şekil 5.9. Halka kollektörlerin önden görünüşleri



Şekil 5.10. Halka kollektörlerin üstten görünüşleri

Yanma haznesi, 534 mm iç çapta, 880 mm uzunluğunda, 4 mm karbon çelik sac malzemeden imal edilmiştir. Yanma haznesinin boş hacmi 197 litredir. Stoker kullanılarak yakma sistemi oluşturulduğunda yanma haznesi 534 mm iç çapta, 500 mm uzunlukta olup yanma hacmi 112 litreye düşmüştür. Yakıtı tutuşturma işleminden sonra oluşan alev ve sıcak gazlar, yanma haznesini geçerek duman borularına ulaşmaktadır. Duman boruları 3 mm et kalınlığında 42.4 mm iç çapta olup toplam 37 adettir. Duman boruları uzunluğu 426 mm'dir. Duman boruları toplam hacmi yaklaşık 22 litredir. Duman borularını geçen sıcak gazlar, üst duman sandığında toplandıktan sonra kazan duman çıkışından geçerek bacaya ulaşmaktadır. Üst duman sandığı 534 mm iç çapta, 130 mm uzunlukta, 4 mm karbon çelik sacdan imal edilmiştir. Üst duman sandığı hacmi yaklaşık 29 litredir. Üst duman sandığı ile yanma haznesi arasındaki duman borularını birbirine bağlayan aynalar, 5 mm kalınlığında karbon çelik sacdan imal edilmiştir. Bu konstrüksiyon tipinde toplam duman hacmi 163 litredir. Kazan duman çıkışı 2 mm kalınlığında karbon çelik sacdan imal edilmiştir. Bu konstrüksiyon tipinde kazan duman çıkışına, baca emiş fanı yerleştirilmiştir. Baca emiş fanının çalışması, Şekil 5.11'de görülen kontrol panosu üzerindeki anahtarı ile manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Baca emiş fanından sonra duman, kanaldan geçip baca girişine gelmiştir. Buradan duman bacaya iletilmiştir. Pratikte baca çekişi düşük olduğu durumlarda baca emiş fanı kullanılır. Baca emiş fanı, kazandan atılan yanma ürünü gazları emerek yüksek basınçla bacaya doğru gönderir. Baca çekişinin zayıf olduğu durumda kazanda yanma olayı tam

olarak gerçekleşemez. Az miktarda yanma sonucu oluşan gazlar, yanma haznesi ve duman borularında kalır. Bu durumda kurum ve tortu oluşumu artar, ısı transferi ve kazan verimi düşer. Baca gazları tersine oluşan akımla, uygun olmayan boşluklardan dışarıya sızmaya çalışır. Bu da kazanın tütmesiyle, kazan dairesinin ve binanın dumanla dolması gibi istenmeyen bir durumla sonuçlanır. Bu durumda baca çekişi olmadığından, tam yanma olayı da meydana gelemez. Ters yöndeki akım nedeni ile yanma için gerekli birincil hava yanma haznesine giremez. Mevcut kömür yanmadan kül ile birlikte dışarı atılır. Deneylerde baca emiş fanı, baca çekişinin yetersiz olduğu durumlarda kullanılmıştır.

Kazanda sıcak gazların içinden geçtiği hacimlerin dışında, çalışma akışkanı yani su vardır. Kazan çalışma akışkanı, sıcak yüzeylerle kazan dış örtüsü etrafında muhafaza edilmektedir. Kazan dış örtüsü 592 mm iç çapta, 1595 mm uzunluğunda 4 mm karbon çelik sacdan imal edilmiştir. Dış örtünün iç hacmi yaklaşık 439 litredir. Dış örtü hacmi içerisinde suyun dolmadığı hacim yaklaşık 291 litredir. Kazan içerisinde depolanan toplam su hacmi yaklaşık 148 litredir. Sıcak yüzeyler etrafında ısınan su, kazan üst duman sandığı üzerinden, basınçlı bir şekilde sıcak su kullanıcı sisteme verilmektedir. Sistemde basınç kaybına uğrayan dönüş suyu, sirkülasyon pompasından geçerek, kazana basınçlı bir şekilde basılmaktadır. Kazan su giriş ve çıkış boruları 35.2 mm iç çapta, 3.6 mm et kalınlığına sahip, karbon çelik malzemeden imal edilmiştir. Kazan su giriş ve çıkış boruları üzerine birer adet analog manometre ve termometre yerleştirilmiştir. Deneyler esnasında bu göstergelerden okunan değerler kaydedilmiştir. Kazan su çıkış borusu üzerine orifismetre düzeneği kurulmuştur. Orifismetre giriş ve çıkışına iki adet 4-20 mA çıkışlı basınç transmitteri yerleştirilmiştir. Basınç transmitterleri kontrol panosu üzerinde bulunan dijital proses kontrol cihazlarına bağlanmıştır. Orifismetre giriş ve çıkış basıncı kontrol panosu üzerindeki dijital proses kontrol cihazlarından dijital olarak okunmuştur.

Kazan yanma haznesi cidarına yakın iki ayrı noktaya J tipi termo eleman (sıcaklık ölçer) yerleştirilmiştir. Bu termo elemanlar ile, yanma haznesi civarındaki suyun sıcaklığı ölçülmüştür. Termo elemanlar dijital sıcaklık kontrol cihazlarına bağlanmıştır. Böylelikle algılanan sıcaklıklar, kontrol panosuna monte edilmiş dijital sıcaklık kontrol cihazı ekranından dijital olarak okunmuştur.

Kazan duman çıkışı üzerine de iki adet J tipi termo eleman yerleştirilmiştir. Bu termo elemanlar da, dijital sıcaklık kontrol cihazına bağlı olup, gösterdiği değerler, kontrol panosu üzerinden okunmuştur.

Kazan duman çıkış borusu üzerine, ½" manşon kaynatılmıştır. Bu manşondan baca gazı analiz cihazı takılarak, istenilen ölçümler yapılmıştır.

Kazan duman çıkış borusundan, ikincil hava fanı girişine 42.4 mm iç çapında 3 mm et kalınlığındaki karbon çelik borudan ve metal örgülü esnek hortumdan baca gazı yeniden sirkülasyonu hattı yapılmıştır.



Şekil 5.11. Kontrol panosu

5.3. Konstrüksiyon tip 2

2 numaralı konstrüksiyon tipi Şekil 5.12 ve Şekil 5.13' de görülmektedir. Konstrüksiyon tip 2 kesit görünüşü Şekil 5.14'de verilmiştir. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de görülen deney kazanı, konstrüksiyon tip 1'de de kullanılan, daha önceden tasarlanarak imal edilmiş ve dik alev-duman borulu tiptedir.

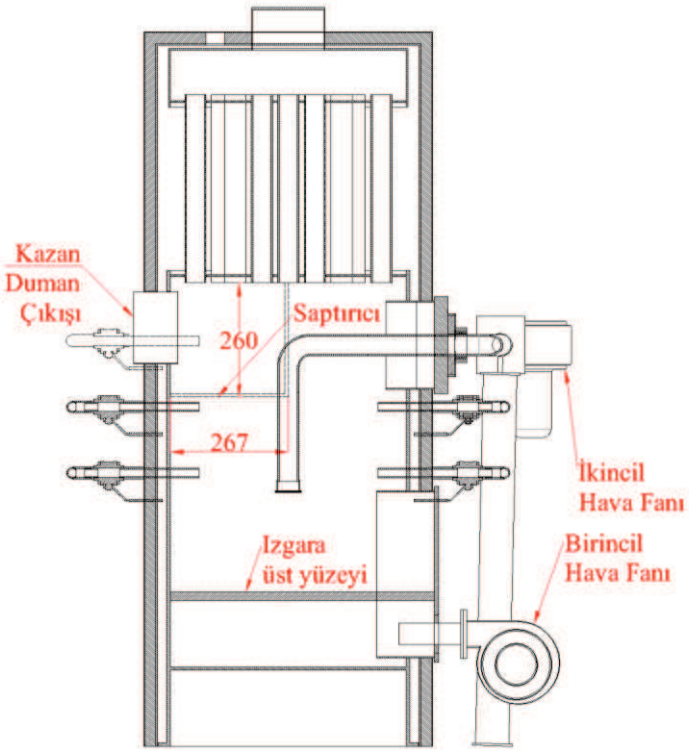
Bu kazan tipinde, yakıt besleme şeklinde değişiklik yapılmıştır. Kazanın yanma haznesi, oldukça küçük bir hacme sahiptir. Yanma haznesine otomatik yakma sisteminin montajı ile de bu hacim oldukça düşmüştür. Bu konstrüksiyon tipinde elle beslemeli, ızgaralı sisteme geçilerek, kazan yanma hacmi arttırılmıştır. Birincil hava temini için ise hava fanı alt kül kapağına monte edilmiştir. Birincil hava ızgaranın hemen altından yanma haznesine verilmiştir. İkincil hava temininde Şekil 5.15'de görüldüğü gibi üstten hava veren borunun uzunluğu arttırılmış ve ızgaranın 25 cm üzerinde, oluşan alevin üzerine gelecek şekilde yeniden monte edilmiştir. İlave edilen boru aynı özelliktedir. Sisteme ikincil hava veren halka kollektörlerin yerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.



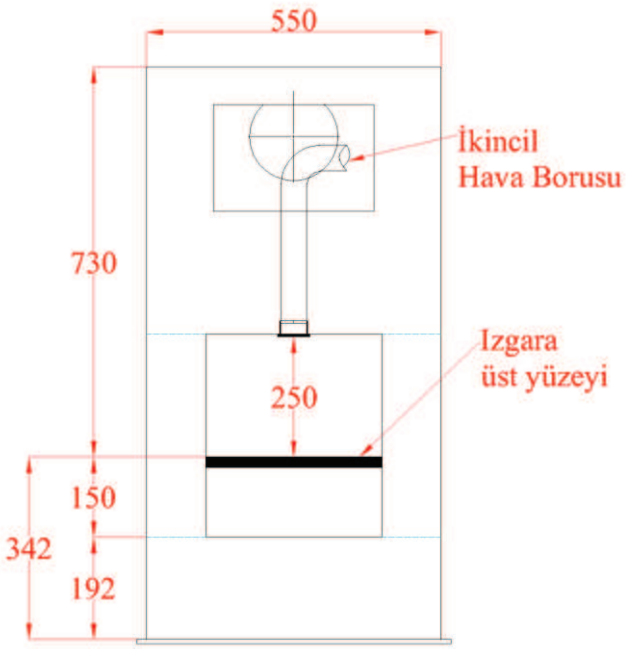
Şekil 5.12. Deney düzeneği kontrüksiyon tip 2 önden görünüş



Şekil 5.13. Deney düzeneği konstrüksiyon tip 2 arkadan görünüş



Şekil 5.14. Konstrüksiyon tip 2 kazan kesit görünüşü



Şekil 5.15. Alev üstü ikincil hava girişi şematik gösterim

Kazanda dumanın geçiş mesafesini arttırmak amacı ile yanma haznesi içerisine saptırıcı ilave edilmiştir. Saptırıcı ile birlikte kazan duman çıkışı, duman borusunun üstü kapatılarak, saptırıcının ucundaki patlama kapağına alınmıştır. Böylelikle sıcak gazların kazan içerisinde daha fazla dolaşması sağlanmıştır. Saptırıcı montajı ile yanmış sıcak gazların hepsi aynı anda duman borularından geçmemiştir. Yanmış sıcak gazlar, duman borusundan geçtikten sonra üst duman sandığından aşağıya doğru akarak, kalan duman borularından geçmiş ve duman çıkışından kazanı terk etmiştir. Bu konstrüksiyon tipinde baca emiş fanı kullanılmamıştır.

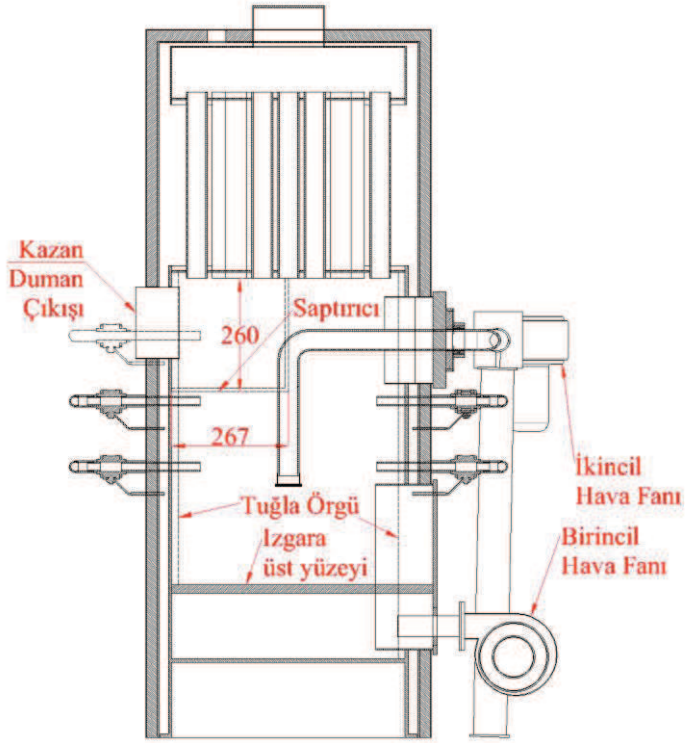
Konstrüksiyon tip 2'de kazan çalışma akışkanı sisteminde bir değişiklik yapılmamıştır. Çalışma akışkanı aynı yolu izlemiş olup ölçme ve kontrol sistemi de aynıdır.

Üst duman sandığı üzerindeki kazan duman çıkışına monte edilen termo elemanların yerleri aynıdır. Sadece kazan duman çıkış kanalının yeri değiştirildiği için termo elemanlar körlenen üst duman sandığının üst kısmına monte edilmiştir.

Bu konstrüksiyon tipinde de kazan duman çıkış borusu üzerine, ½" manşon kaynatılmıştır. Bu manşondan baca gazı analiz cihazı takılarak, istenilen ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu konstrüksiyon tipinde baca gazı yeniden sirkülasyon hattı kullanılmamıştır.

5.4. Konstrüksiyon tip 3

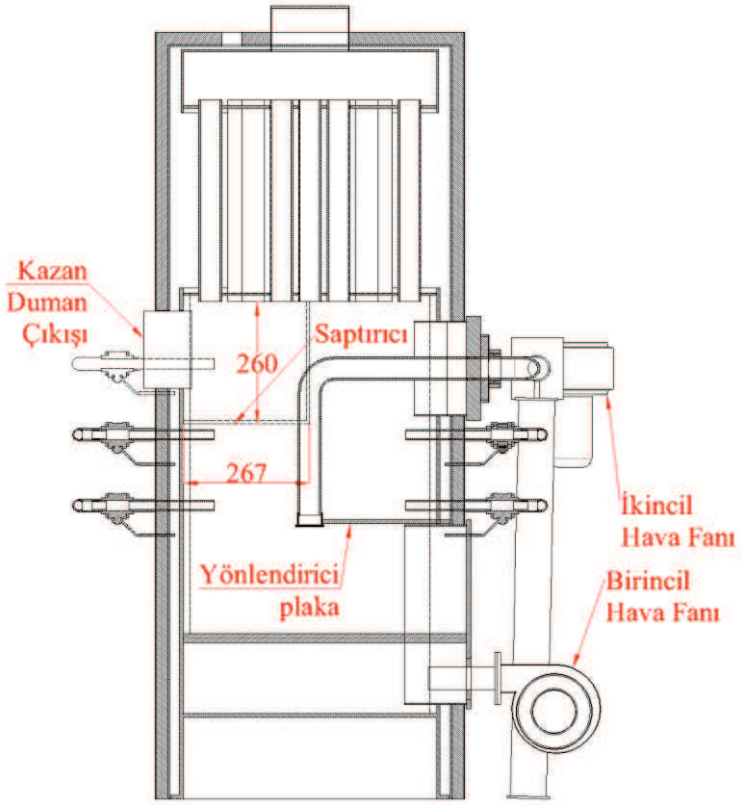
3 numaralı konstrüksiyon tipinin kesit görünüşü Şekil 5.16' da verilmiştir. Bu konstrüksiyon tipinin, 2 numaralı konstrüksiyon tipinden farkı, yanma haznesi iç cidarının 2 cm kalınlığındaki soba tuğlası ile örülmesidir. Bunun dışında 2 numaralı konstrüksiyon tipi ile 3 numaralı konstrüksiyon tipi arasında başka fark yoktur.



Şekil 5.16. Konstrüksiyon tip 3 kazan kesit görünüşü

5.5. Konstrüksiyon tip 4

4 numaralı konstrüksiyon tipinin kesit görünüşü Şekil 5.17' de verilmiştir. İç kısım olarak bu konstrüksiyon tipinin 3 numaralı konstrüksiyon tipinden farkı, Şekil 5.17'de görülen yanma haznesi iç cidarına sıcak gazların temasını arttırmak için konulan yönlendirici plakadır. Bunun dışında 4 numaralı konstrüksiyon tipi ile 3 numaralı konstrüksiyon tipi arasında başka fark yoktur.



Şekil 5.17. Konstrüksiyon tip 4 kazan kesit görünüşü

5.6. Deneyin Yapılışı

Dört farklı konstrüksiyon tipi için deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir konstrüksiyon tipinde yapılan işlemler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

5.6.1 Konstrüksiyon tip 1 deneyi

Yukarıda konstrüksiyon özelliklerinden bahsedilen kazanda, yanma haznesine sağlanacak ikincil havanın, alevin hemen üzerinden, yakıt içerisindeki uçucuları yakmak için verilmesi gerektiği literatürden bilinmektedir. Bu bilgiler ışığında, yanma haznesinin değişik yüksekliklerinde bulunan ikincil hava girişlerinin hepsi alev üzerine yerleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalarda, kazana ikincil havanın optimum koşullarda verilmesinden önce optimum birincil havanın verilmesi gerekmektedir. Bu nedenle optimum ikincil hava debisinin, optimum birincil hava debisi kullanılarak tespit edileceği aşikardır. Deneylerde 3 saat (180 dakika) süre içerisinde 18 kg yakıt kullanılması planlanmıştır. Yakılacak yakıt miktarı AND GF-1200 model hassas terazi ile tartılmıştır. 180 dakika içerisinde deneyde 18 kg (alt ısıl değeri 7760 kcal/kg) ithal kömür yakıldığı durumda, birincil hava, DN40 borudan stoker fanı vasıtasıyla yanma haznesine beslenmiştir. Öncelikle bir miktar yakıt stoker bunkerine dökülmüştür. Stoker redüktörü çalıştırılarak bunkerdeki kömürün, stoker potasına kadar dolması sağlanmıştır. Daha sonra yakıt üzerine odun, kâğıt konulmuş ve tutuşturulmuştur. Tutuşturma işleminden sonra, bacadan beyaz duman çıkışının bitmesi beklenmiştir. Beyaz duman çıkışının bitmesi ile birlikte ölçümler alınmaya başlanmıştır. Beyaz duman çıkışının olduğu esnada, baca gazı analiz cihazı yardımıyla ölçüm alınması durumunda çok yüksek CO çıkışının olduğu görülmüştür. Ölçümler esnasında, baca gazı analiz cihazı olarak, Testo 300M model cihaz kullanılmıştır.

İkincil hava kullanılmadan kazan çalıştığı sırada en yüksek kazan verimi, CO_2 emisyonu ve en düşük hava fazlalık katsayısı, CO ve O_2 emisyonu sağlandığı durumda birincil hava hızı anemometre yardımıyla ölçülerek 17 m/s olarak tespit edilmiştir.

Birinci konstrüksiyon tipinde, direkt olarak alevin üzerine, üstten DN40 boru ve ucundaki yayıcı plaka ile verilen ikincil havanın yüksekliği alevin biraz daha üzeri olan orta halka kollektör seviyesinin hemen üzerine getirilmiştir.

Deney esnasında iki dakika aralıklarla Şekil 5.1'de görülen ölçme noktalarından veriler okunmuş ve kaydedilmiştir. Suyun kazana giriş ve kazandan çıkış sıcaklığı analog termometrelerle, giriş ve çıkış basıncı ise analog manometrelerle ölçülmüştür. Orifis giriş-çıkış basıncı kontrol panosu üzerindeki dijital proses göstergelerinden okunmuştur. Kazan üzerine bağlı dört termo elemanın ölçtüğü sıcaklıklar da kontrol panosu üzerindeki dijital sıcaklık kontrolörü ekranından okunmuştur. Baca gazı değerleri de baca gazı analiz cihazı kullanılarak okunmuştur.

Yanma başlangıcında, beyaz duman çıkışının bitiminden sonra ölçümler alınmaya başlanmış ve çok yüksek λ değerinin elde edildiği görülmüştür. λ değeri yanmanın iyi olup olmadığının bir göstergesidir. λ 'nın yüksek olması oksijenin yanmada kullanılamadığını, sadece ocağı soğuttuğunu gösterir. İkincil hava, 2-6 dk zaman aralığında, en alt halka kollektörden alev üzerine DN15 borudan 25 m/s hız ile verilmiştir ve λ değerinde azalma görülmüştür. O_2 ve CO miktarında azalma, CO_2 miktarında, yanma haznesi cidar sıcaklığı, baca gazı sıcaklığında ve yanma veriminde artış görülmüştür. Elde edilen değerler, ikincil havanın olumlu sonuçlar verdiğinin göstergesidir. Bu dakikadan sonra verilen ikincil hava, λ değerini yeniden yükseltmeye başladığından, ikincil hava temini durdurulmuştur.

14-20.dk zaman aralığında, ikincil hava aynı debi ve konumdan tekrar verilmiş ancak olumsuz sonuçlar elde edilmiştir. λ ve O_2 oranı yükselmiş, CO_2 oranı, yanma verimi, yanma haznesi cidar sıcaklığı ve baca gazı sıcaklığı düşmüştür. Bu durum, ikincil havanın, yanma haznesine, sürekli verilmemesi gerektiğini göstermektedir. 14-20.dk zaman aralığında, yanma haznesine ikincil hava verilmesi ocak sıcaklığını düşürmüş ve baca gazı değerlerini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu durumu önlemek için 28.dk'da stoker üzerinde toplanan kül temizlenmiş ve taze kömür yanma haznesine açık duruma getirilmiştir. Taze kömürün yanmasıyla birlikte uçucu gazların oluşacağı düşünülerek, ikincil hava aynı debi ve konumda yeniden yanma haznesine verilmiştir. Bu durumda da ikincil havanın kazanın ısıl performans ve emisyonlar üzerine olumlu etkileri gözlenmiştir.

32.dk itibarı ile ikincil havanın ters etki oluşturduğu gözlenmiş, ancak ikincil havanın sisteme sürekli verilip verilmeyeceğini belirleyebilmek için 32-42.dk'lar arasında da aynı debi ve konumda ikincil hava beslemesine devam edilmiştir. 32-42.dk zaman aralığında λ, O_2, CO, CO_2, yanma verimi, yanma haznesi ve baca gazı sıcaklıkları olumsuz yönde etkilenmiştir.

48.dk itibarı ile sistemdeki baca gazı değerlerinin yeniden bozulduğu görülmüştür. Kül temizliği yeniden yapılmış ve taze yakıt ocağa açık yüzeye getirilmiştir. 54.dk'ya kadar sisteme ikincil hava verilmemiştir. İkincil havanın verilmediği bu sırada taze yakıt karışımının baca gazı değerlerini tek başına düzeltemediği görülmüştür. 54-58.dk'lar arası orta halka kollektörden DN15 boru ile 25 m/s hızda ikincil hava beslemesiyle baca gazı değerlerinin yeniden düşme eğilimine geçtiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, orta halka kollektörün en alt halka kollektöre göre daha az etkili olduğu gözlenmiştir. 58.dk sonrası baca gazı değerleri yeniden olumsuz yönde gidişine devam etmiştir.

84.dk itibarı ile baca gazı değerleri oldukça kötüleşmiştir. Bu durumda yeniden kül temizliği yapılmış ve 84-90.dk zaman aralığında, orta halka kollektörden aynı debide ikincil hava takviyesi yapılmıştır. Baca gazı değerlerinde iyileşme gözlenmiştir. 90.dk'dan itibaren baca gazı değerlerinde olumlu yönde gidiş devam etmiştir.

112.dk itibarı ile baca gazı değerlerindeki olumsuz yöndeki seyir yeniden devam etmeye başlamıştır. Kül temizliği yapılmış ve en üst halka kollektörden 25 m/s hızla 112-118.dk zaman aralığında ikincil hava beslemesi yapılmıştır ve baca gazı değerleri olumlu yönde etkilenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en üst halka kollektörün, orta halka kollektöre göre daha az etkili olduğu görülmüştür.

132.dk itibarı ile baca gazı değerlerindeki olumsuz yöndeki seyir yeniden devam etmeye başlamıştır. Bu durum 152.dk'ya kadar beklenmiş ancak sonuçlanmamıştır. Yeniden temizlik yapılarak üstten DN40 boru ile 10 m/s hızda 152-158.dk'lar arası ikincil hava beslemesi yapılmış ve baca gazı değerlerinde olumlu etkiler elde edilmiştir. Üstten ikincil hava beslemesinin orta halka kollektörden daha az etkili fakat en üst halka kollektörden daha etkili olduğu görülmüştür.

Bu konstrüksiyon tipi için elde edilen sonuçlara göre, ikincil havanın alevin hemen üzerinde ve mümkün olan en yakın mesafede olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca sürekli yakıt beslemesinin ve kül tahliyesinin olmadığı kazanlarda ikincil havanın sürekli olarak verilemeyeceği belirlenmiştir. Taze yakıt karışımının yanması ile beraber uçucuların meydana geldiği anda sisteme ikincil hava takviyesinin yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

5.6.2 Konstrüksiyon tip 2 deneyi

Konstrüksiyon tip 2 çalışmalarında da, ölçümler öncesi izlenilen prosedür konstrüksiyon tip 1'deki ile aynıdır. Konstrüksiyon tip 2 çalışmalarında da 18 kg/3 saat debiyle ithal kömür yakılmıştır. Birincil hava DN40 borudan birincil hava fanı ile sağlanmıştır. Bu konstrüksiyon tipi için 20 m/s birincil hava hızının optimum hız değeri olduğu tespit edilmiştir.

İkinci konstrüksiyon tipinde, alevin direk üzerine, üstten DN40 boru ve ucundaki yayıcı plaka ile verilen ikincil havanın yüksekliği alevin hemen üzeri olan en alt halka kollektör seviyesiyle yaklaşık aynı seviyeye getirilmiştir.

Konstrüksiyon tip 1'de stokerli yakma sisteminin kazan üzerinde yeterince etkili olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca sıcak gazların kazanı soğumadan terk ettiği ve baca gazı sıcaklıklarının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu konstrüksiyon tipinde ızgaralı, elle beslemeli sistem kullanılmış ayrıca sıcak gazların kazan içerisinde dolaşım yolu arttırılmıştır.

Ölçümler yapılırken izlenilen prosedür önceki konstrüksiyon tipleriyle aynıdır. Yanma işlemi başlayıp, beyaz duman çıkışının durması ile λ değeri yükselmeye başlamıştır. Bu nedenle 6-14.dk arası en alt halka kollektörden 30 m/s hızla ikincil hava beslemesi yapılmıştır. 14.dk itibarıyla CO değeri yükselmeye başlayıp, yanma kötüleştiği için ikincil hava kapatılmıştır. İkincil havanın verildiği bu periyotta λ, O_2 ve CO değerleri düşmüş, verim, yanma haznesi sıcaklığı ve baca gazı sıcaklığı değerleri başlangıca göre yükselmiştir. CO_2 değeri ise değişmemiştir.

60.dk' ya gelindiğinde λ değerinde çok az bir artış görülmüştür. Bu nedenle ızgara yüzeyi üzerindeki yakıt karıştırılmış ve en alt halka kollektörden 25 m/s hızla 60-64.dk' lar arası ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, O_2, CO, baca gazı sıcaklığı değerleri düşmüş, verim, CO_2 ve yanma haznesi cidar sıcaklığı değerleri başlangıca göre yükselmiştir. 64.dk itibarı ile λ değerinin yeniden yükselmeye başlamasıyla ikincil hava kapatılmıştır.

64.dk'dan 86.dk' ya kadar olan zaman aralığında λ değerinde sürekli bir yükseliş gözlenmiştir. Bu nedenle 86.dk' da yakıt karıştırılıp, en alt halka kollektörden 15 m/s hızla 86-92.dk 'lar arası ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında λ, O_2, baca gazı sıcaklığı ve verim değerlerinde çok az bir düşüş, CO ve CO_2 değerlerinde çok az bir yükseliş meydana gelmiştir.

92.dk'dan sonra 110. dakikaya yaklaşıldığında λ değerinde yeniden bir yükseliş gözlenmiştir. Bu sebeple 110. dakikada yakıt karıştırılarak, en alt halka kollektörden 40 m/s hızla 110-114.dakikalar arasında ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, O_2 ve verim değerleri düşmüş, CO, CO_2, baca gazı sıcaklığı ve yanma haznesi cidar sıcaklığı değerleri yükselmiştir.

168.dk'ya yaklaşırken λ değerinde yükseliş gözlenmiştir. Bu nedenle yakıt karıştırılarak en üst halka kollektörden 25 m/s hızla 168-176.dk' lar arası ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında λ, O_2, yanma haznesi sıcaklığı ve baca gazı sıcaklığı düşmüş, verim, CO ve CO_2 değerleri yükselmiştir.

5.6.3 Konstrüksiyon tip 3 deneyi

Konstrüksiyon tip 3 çalışmalarında da, ölçümler öncesi izlenilen prosedür öncekilerle aynıdır. Konstrüksiyon tip 3 çalışmalarında da 18 kg/3 saat debiyle aynı ithal kömür yakılmıştır. Birincil hava DN40 borudan birincil hava fanı ile temin edilmiştir. Bu konstrüksiyon tipi için de 20 m/s hız değeri optimum olarak alınmıştır.

Üçüncü konstrüksiyon tipinde, alevin direkt üzerine, üstten DN40 boru ve ucundaki yayıcı plaka ile verilen ikincil havanın konumu konstrüksiyon 2 ile aynı tutulmuş, yeri değiştirilmemiştir.

Ölçümler yapılırken izlenilen prosedür önceki konstrüksiyon tipleriyle aynıdır. Yanmanın başlamasıyla 4-12.dakikalar arası üst DN40 borudan 7 m/s hızla ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, O_2 ve CO değerleri düşmüş, CO_2, verim, baca gazı sıcaklığı ve yanma haznesi cidar sıcaklığı değerleri yükselmiştir.

40.dk itibarıyla λ değeri 1.57 seviyesine kadar yükselmiştir. Bu nedenle yanma haznesindeki yakıt karıştırılmış ve en alt halka kollektörden 30 m/s hızla 40-48.dk zaman aralığında ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, O_2 ve CO değerleri düşmüş, CO_2, verim ve baca gazı sıcaklığı değerleri yükselmiş, yanma haznesi cidar sıcaklığı değeri sabit kalmıştır.

48-58.dakika zaman aralığında λ değerinin azalması devam etmiştir. 60.dakika itibari ile λ değeri yükselişe geçmiştir. 68.dk' ya kadar beklenmiş ancak artış devam etmiştir. Bu nedenle ızgara yüzeyindeki kömür karıştırılarak taze kömürlerin üst yüzeye çıkması külün ızgara altına dökülmesi sağlanmıştır. 68-74.dk zaman aralığında en üst halka kollektörden 25 m/s hızla ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, CO_2 ve

verim değerleri düşmüş, CO, yanma haznesi cidar sıcaklığı ve baca gazı sıcaklığı değerleri yükselmiştir.

74-92.dk zaman aralığında λ değeri, 48-58.dk zaman aralığındaki gibi artış göstermiştir. Yakıt karıştırıldıktan sonra, 92-98.dk zaman aralığında üst DN40 borudan alev üzerine dik olacak şekilde 7 m/s hızla ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, O_2, CO ve verim değerleri düşmüş, CO_2 ve baca gazı sıcaklığı değerleri yükselmiş, yanma haznesi cidar sıcaklığı değeri sabit kalmıştır.

98-170.dk zaman aralığında da λ değeri artış göstermiştir. Bu kadar uzun zaman aralığında ikincil hava verilmediğinde yanmanın nasıl seyrettiği takip edilmiştir. İkincil hava verilmeyince ve yakıt karıştırılmayınca baca gazı değerlerinin kötüleştiği görülmüştür. 170-174.dk zaman aralığında en üst halka kollektörden 25 m/s hızla ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, O_2 ve CO değerleri düşmüş, CO_2, verim ve baca gazı sıcaklığı değerleri yükselmiş, yanma haznesi cidar sıcaklığı değeri sabit kalmıştır.

5.6.4 Konstrüksiyon tip 4 deneyi

Konstrüksiyon tip 4 çalışmalarında da, izlenen prosedür önceki konstrüksiyon tipleri ile aynıdır. Bu konstrüksiyon tipinde de 18 kg/3 saat debiyle ithal kömür kullanılmıştır. Birincil hava DN40 boru ile birincil hava fanı vasıtasıyla temin edilmiştir. 20 m/s hız değeri optimum hız olarak alınmıştır.

Dördüncü konstrüksiyon tipinde, alevin direk üzerine, üstten DN40 boru ve ucundaki yayıcı plaka ile verilen ikincil havanın konumu konstrüksiyon 2 ve 3 ile aynı tutulmuş, değiştirilmemiştir.

Ölçümler yapılırken izlenilen prosedür önceki konstrüksiyon tipleriyle aynıdır. Yanmanın başlamasıyla, 4-10.dk zaman aralığında, en alt halka kollektörden 30 m/s hızla ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, O_2 ve CO değerleri düşmüş, CO_2, verim, yanma haznesi cidar sıcaklığı ve baca gazı sıcaklığı değerleri yükselmiştir.

10-46.dk zaman aralığında yanma normal seyrinde devam etmiştir. Ancak 46.dk'dan sonra λ değeri yavaş yavaş artmaya başlamıştır. Bu yüzden 62.dk' da ızgara yüzeyindeki yakıt karıştırıldıktan sonra, orta halka kollektörden 25 m/s hızla 62-70.dk zaman aralığında ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, O_2 ve CO değerleri düşmüş, verim, yanma haznesi cidar sıcaklığı ve baca gazı sıcaklığı değerleri yükselmiş, CO_2 değeri sabit kalmıştır.

70-90.dk zaman aralığında λ değeri artışına devam etmiştir. Bu yüzden 90.dk' da ızgara yüzeyindeki yakıt karıştırıldıktan sonra, en üst halka kollektörden 25 m/s hızla 90-98.dk zaman aralığında ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında λ ve O_2 değerleri düşmüş, CO, CO_2, verim, ve baca gazı sıcaklığı değerleri yükselmiş, yanma haznesi cidar sıcaklığı değişmemiştir.

98-120.dk zaman aralığında λ değeri artışına devam etmiştir. Bu yüzden 120.dk' da ızgara yüzeyindeki yakıt karıştırıldıktan sonra, üstten DN40 boru ile alev üzerine dik olacak şekilde 7 m/s hızla 120-128.dk zaman aralığında ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, λ, O_2, CO, verim ve baca gazı sıcaklığı değerleri düşmüş, CO_2 ve yanma haznesi cidar sıcaklığı değerleri yükselmiştir.

128-174.dk zaman aralığında λ değeri azalarak devam etmiştir. Ancak 174.dk itibarıyla λ değeri artışa geçmiştir. Bu nedenle 174.dk' da ızgara yüzeyindeki yakıt karıştırıldıktan sonra, üstten DN40 boru ile alev üzerine dik olacak şekilde 7 m/s hızla 174-178.dk zaman aralığında ikincil hava verilmiştir. Bu zaman aralığında, baca gazı sıcaklığı azalmış, CO, verim ve yanma haznesi cidar sıcaklığı değerleri yükselmiş, λ, O_2 ve CO_2 değerleri ise değişmemiştir.

5.7 Teorik Yanma Hesapları

Yanma prosesi için gerekli teorik hava miktarı, teorik hava yakıt oranı, teorik baca gazı emisyon değerlerine ait eşitlikler ve hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

Yanma sonucu oluşan teorik emisyon hacimleri eş. (5.1-5.6) kullanılarak hesaplanır.

α: Karbonun yanması sonucu oluşan karbonmonoksit miktarı ($0 \leq \alpha \leq 1$)

λ: Hava fazlalık katsayısı

W: Kömür içindeki nem yüzdesi

$$V_{CO2} = 1{,}868 \times C \times (1 - \alpha) \quad (5.1)$$

$$V_{CO} = 1{,}868 \times C \times \alpha \quad (5.2)$$

$$V_{SO2} = 0{,}7 \times S \quad (5.3)$$

$$V_{H2O} = 1{,}244 \times C \times (W + 9 \times H) \quad (5.4)$$

$$V_{N2} = \lambda \times (7{,}1 \times C + 21{,}3 \times (H - (O/8) + 2{,}64 \times S) \quad (5.5)$$

$$V_{O2} = \lambda \times (1{,}868 \times C + 5{,}6 \times (H - (O/8)) + 0{,}7 \times S) - (1{,}868 \times C \times (1- (\alpha/2)) + 5{,}6 \times (H- (O /8)) + 0{,}7 \times S) \quad (5.6)$$

Toplam özgül duman gazı, V_g (Nm^3/kg) miktarı eş. (5.7)'deki gibi hesaplanır:

$V_g = \lambda$ x (8,89 x C + 26,9 x (H – (O/8)) + 3,34 x S) + (1,868 x C x (α/2))
– 5,6 x (H – (O/8)) + 1,244 x (W +9H) (5.7)

Teorik tam yanma halinde $\alpha = 0$ olacağından V_{go} özgül duman miktarı eş. (5.8)'deki gibi hesaplanır :

V_{go} = 8,89 x C + 21,3 x H – 2,66 x O + 3,34 x S +1,244 x (W+9H) (5.8)

Hava fazlalığı ile tam yanma halinde özgül duman miktarı eş. (5.9)'daki gibi hesaplanır:

$V_{g\alpha} = V_{go} + (\lambda - 1) V_{ho}$ (5.9)

Yanma gazları su buharı içermiyorsa bu gazlar kuru duman gazı olarak adlandırılır. Böylece özgül kuru duman gazı miktarı eş. (5.10)'daki gibi hesaplanır:

$V_{gkr} = V_g$ – 1,244 x (W+9H) (5.10)

Teorik hava ihtiyacı eş. (5.11)'deki gibi hesaplanır:

V_{ho} = 4,76 x (1,868 C + 5,6 (H –(O/8)) + 0,7 S) (5.11)

Bu hesapları yapabilmek için kömürün elementel analizinin bilinmesi gerekmektedir. Deneylerde kullanılan kömürün elementel analiz sonuçları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yakıt elementel analiz sonuçları

C, %	90,2
H, %	1,5
O, %	1,1
S, %	1,2
N, %	0,6
Nem, %	5,2
Uçucu, %	2,1
Kül, %	5,4
Sabit Karbon, %	N/A
LHV, kcal/kg	7760

Yukarıda verilen teorik yanma eşitlikleri ve bu eşitliklerle hesaplanan değerler Çizelge 5.2'de görülmektedir.

Çizelge 5.2. Teorik yanma eşitlikleri ve sonuçlar

Tipler	Birim	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4
α: Karbonun yanması sonucu oluşan karbonmonoksit miktarı ($0 \leq \alpha \leq 1$)	Yaklaşık	0,28	0,28	0,28	0,28
λ: Hava fazlalık katsayısı	Ortalama	3,01	1,76	1,82	1,72
W: Kömür içindeki nem yüzdesi	%	5,21	5,21	5,21	5,21
C oranı	-	0,902	0,902	0,902	0,902
S oranı	-	0,012	0,0117	0,0117	0,0117
H oranı	-	0,015	0,0154	0,0154	0,0154
O oranı	-	0,011	0,0114	0,0114	0,0114
N oranı	-	0,006	0,006	0,006	0,006
$VCO_2 = 1,868 \times C \times (1 - \alpha)$	Nm^3 / kg	1,21	1,21	1,21	1,21
$VCO = 1,868 \times C \times \alpha$	Nm^3 / kg	0,47	0,47	0,47	0,47
$VSO_2 = 0,7 \times S$	Nm^3 / kg	0,01	0,01	0,01	0,01
$VH_2O = 1,244 \times (W + 9 \times H)$	Nm^3 / kg	6,65	6,65	6,65	6,65
$VN_2 = \lambda \times (7,1 \times C + 21,3 \times (H - (O/8) + 2,64 \times S)$	Nm^3 / kg	22,15	12,95	13,39	12,66
$VO_2 = \lambda \times (1,868 \times C + 5,6 \times (H - (O/8)) + 0,7 \times S) - (1,868 \times C \times (1- (\alpha/2)) + 5,6 \times (H- (O /8)) + 0,7 \times S)$	Nm^3 / kg	3,80	1,58	1,69	1,51
$Vg = \lambda \times (8,89 \times C + 26,9 \times (H - (O/8)) + 3,34 \times S) + (1,868 \times C \times (\alpha/2)) - 5,6 \times (H - (O/8)) + 1,244 \times (W + 9H)$	Nm^3 / kg	32,20	21,65	22,16	21,32
$Vgo = 8,89 \times C + 21,3 \times H - 2,66 \times O + 3,34 \times S + 1,244 \times (W+9H)$	Nm^3 / kg	15,01	15,01	15,01	15,01
$Vg\alpha = Vgo + (\lambda - 1) Vho$	Nm^3 / kg	31,96	21,42	21,92	21,08
$Vgkr = Vg - 1,244 \times (W+9H)$	Nm^3 / kg	25,54	15,00	15,51	14,66
$Vho = 4,76 \times (1,868 C + 5,6 (H - (O/8)) + 0,7 S)$	Nm^3 / kg	8,43	8,43	8,43	8,43

Bu sonuçlara göre teorik yanma havası gereksinimi 8.43 Nm^3/kg olarak bulunmuştur. Yakıt için gerekli saatlik teorik hava ihtiyacı ise 50.54 Nm^3/h (61.91 kg/h) olarak hesaplanmıştır. Deneysel düzenekte en düşük zararlı emisyon ve en yüksek kazan verimi için hesaplanan yakma havası miktarı Çizelge 5.3'de görüldüğü gibi tip 1 için 71.47 kg/h, tip 2, 3 ve 4 için 84.08 kg/h'dır. Bu verilere göre teorik hava-yakıt oranı (AFR) 10.32 olarak bulunurken gerçek hava yakıt oranı 11.91 ve 14.01 olarak bulunur.

Çizelge 5.3. Teorik hava ihtiyacı

Tanım	Birim	Değer
Teorik Hava İhtiyacı	Nm^3 / kg	8,43
Yakılan yakıt miktarı	kg / h	6,00
Saatlik teorik hava ihtiyacı	Nm^3 / h	50,54
Havanın yoğunluğu, ρ	kg / m^3	1,2
Saatlik teorik hava ihtiyacı	kg / h	61,91
Gerçek hava ihtiyacı, Tip-1	kg / h	71,47
Gerçek hava ihtiyacı, Tip-2-3-4	kg / h	84,08
AFR Teorik	Birimsiz	10,32
AFR Gerçek Tip-1	Birimsiz	11,91
AFR Gerçek Tip-2-3-4	Birimsiz	14,01

Deney düzeneğinde belirlenen optimum birincil havaya ait debi değerleri Çizelge 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Optimum birincil hava debisi

Tanım- Terim	Birim	Tip-1	Tip-2-3-4
Optimum birincil hava hızı	m/s	17	20
Optimum birincil hava hızı	m / h	61200	72000
Havanın yoğunluğu, ρ	kg / m^3	1,2000	1,2000
Optimum birincil hava debisi	kg / h	71,4674	84,0793

Teorik yanma denklemlerinden hesaplanan baca gazı debileri Çizelge 5.5 görülmektedir.

Çizelge 5.5. Teorik yanma gazı debileri

TEORİK TAM YANMA HALİ	
HİDROJENİN YANMASI	
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ + ısı	
1kg H_2 + 34,32kg Hava $\rightarrow$ 9kg H_2O + 26,32kg N_2 + ısı	
H miktarı	0,092 kg/h
Oluşan H_2O	0,832 kg/h
Harcanan Hava	3,171 kg/h
Oluşan N_2	2,432 kg/h
KARBONUN TAM YANMASI	
$C + O_2 \rightarrow CO_2$ + ısı	
1kg C + 11,44kg hava $\rightarrow$ 3,67kg CO_2 + + 8,77kg N_2 + ısı	
C Miktarı* x 0,72	3,897 kg/h
Oluşan CO_2	14,301 kg/h
Harcanan Hava	44,578 kg/h
Oluşan N_2	34,174 kg/h
* 0,72 CO_2 oluşumu ve 0,28 CO oluşumu	
KARBONUN EKSİK YANMASI	
$2C + O_2 \rightarrow 2CO$ + ısı	
1kg C + 5,72kg Hava $\rightarrow$ 2,33kg CO + 4,39kg N_2 + ısı	
C Miktarı* x 0,28	1,515 kg/h
Oluşan CO	3,531 kg/h
Harcanan Hava	8,668 kg/h
Oluşan N_2	6,652 kg/h
* 0,72 CO_2 oluşumu ve 0,28 CO oluşumu	
KÜKÜRDÜN TAM YANMASI	
$S + O_2 \rightarrow SO_2$ + ısı	
1kg S + 4,29kg Hava $\rightarrow$ 2kg SO_2 + 3,29kg N_2 + ısı	
S Miktarı	0,070 kg/h
Oluşan SO_2	0,140 kg/h
Harcanan Hava	0,301 kg/h
Oluşan N_2	0,231 kg/h

Kazanda oluşan çiy noktası sıcaklığı ise Çizelge 5.6'da gösterildiği gibi 52 ℃ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.6. Çiy noktası sıcaklığı

ÇİY NOKTASI SICAKLIĞI		
P_v x $N_{ürün}$ = $P_{ürün}$ x N_v		
P_v	13,5523	kPa
$N_{ürün}$	0,342	kmol
$P_{ürün}$	100,400	kPa
N_v	0,046	kmol
T_{doyma}	52	^oC
$T_{çiy}$	52	^oC

5.8 Belirsizlik Analizi

Deneyleri yapan ve bu deney sonuçlarını kullanan araştırmacılar daima elde edilen verilerin geçerliliğini bilmek isterler. En basit bir ölçme şekli olan uzunluk ölçmesinde bile, kullanılan ölçme aletinin hassasiyeti bilinmelidir. Deney yapılırken, deneyi yapan kişi ne kadar tecrübeli ve dikkatli olsa da, yine de deney sonuçlarında bazı hatalar görülebilir (Genceli, 2008).

Belirli sayıda deney yapıldıktan sonra bu deneye ait hata oranlarının tespiti için pratikte birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan en çok kullanılanı "akılcı yaklaşım" diğeri ise "belirsizlik analizi" yöntemleridir. Son yıllarda, hata oranlarının tespitinde, araştırmacılar tarafından belirsizlik analizi daha çok tercih edilmektedir (Genceli, 2008).

Deney kapsamında kurulan sistemin şematik görünümü Şekil 5.1'deki gibidir. Deneylerde kullanılan ölçme cihazları ve özellikleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Kullanılan ölçme cihazları ve özellikleri

Ölçülen Değer	Cihazın Adı	Markası ve Modeli	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet	Doğruluk
Sıcaklık	Analog Sıcaklık Ölçer	Pakkens 100 402	0 / +120 ^{o}C	2 ^{o}C	± 4 ^{o}C
Sıcaklık	J Tipi Termo eleman	Emko TCKR-M06-L100.1.J	0 / +600 ^{o}C	1 ^{o}C	± 2 ^{o}C
Sıcaklık	Dijital On/Off Sıcaklık Kontrol Cihazı	Emko ESM-7710	0 / +800 ^{o}C	1 ^{o}C	± 2 ^{o}C
Basınç	Analog Basınç Ölçer	Pakkens 100 10 001 - MK	0 /10 bar	0,2 bar	± 0,4 bar
Basınç	Basınç Transmitteri	Trafag ECT10.0A 4-20 mA	0 / 10 bar	0,001 bar	± 0,002 bar
Basınç	Tek set Proses Göstergesi	Emko ESM-3700	0 / 10 bar	0,001 bar	± 0,002 bar
Hız	Anemometre	Kestrel 4300 Construction Weather Tracker	0 / 99 m/s	0,1 m/s	± 0,2 m/s
Ağırlık	Terazi	AND GF-1200	0 / 1210 g	0,01 g	± 0,02 g
Sıcaklık	Baca Gazı Analiz Cihazı	Testo 300M	-40 / +1200 ^{o}C	0,1 ^{o}C	±0,5 ^{o}C
Basınç	Baca Gazı Analiz Cihazı	Testo 300M	0 / 80 mbar	0,01 mbar	± 0,03 mbar
CO_2	Baca Gazı Analiz Cihazı	Testo 300M	0 / CO_{2max}	0,01% hacimsel	±0,2% hacimsel
CO	Baca Gazı Analiz Cihazı	Testo 300M	0 / 8000 ppm	1 ppm	±5 ppm
Verim	Baca Gazı Analiz Cihazı	Testo 300M	0 / 120 %	0,1%	± 0,2%
O_2	Baca Gazı Analiz Cihazı	Testo 300M	0 / 21%	0,1% hacimsel	± 0,2% hacimsel
Boyut	Dijital Kumpas	Mitutoyo	0/300 mm	0,01 mm	± 0,02 mm

Bu çalışma kapsamında hata oranlarının tespiti için uygulanan belirsizlik analizi aşağıda açıklanmaktadır. Birincil hava sisteme iki farklı hızda verilmiştir. Bu hızlara ait notasyonlar 11 ve 12 olarak belirtilmiştir. İkincil hava ise sisteme altı farklı hızda verilmiştir. Bu hızlara ait notasyonlar ise 21, 22, 23, 24, 25 ve 26 ile belirtilmiştir.

5.8.1 Birincil hava kütlesel debi belirsizlik hesabı

$$\dot{m}_{hava} = \rho . u_{hava} . A_{boru} \quad (5.12)$$

$$A_{boru} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.13)$$

$$\dot{m}_{hava} = \rho . u_{hava} . \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.14)$$

$$\dot{m}_{hava} = f(u_{hava}, D) \quad (5.15)$$

$\rho = 1{,}2\ kg/m^3$

$\pi = 3{,}1415$

$D = 0{,}0352\ m$ (Tip 1,2,3 ve 4 için)

$u_{hava} = 17\ m/s$ (Tip 1 için)

$u_{hava} = 20\ m/s$ (Tip 2,3 ve 4 için)

$$\dot{m}_{hava} = 0{,}9425 . u_{hava} . D^2 \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial u_{hava}} = \rho . \frac{\pi D^2}{4} = 0{,}9425 . D^2 \quad (5.17)$$

$\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial u_{hava}} = 0{,}00117\ kg/m$ (Tip 1, 2, 3 ve 4 için)

$$\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial D} = 2 . \rho . u_{hava} . \frac{\pi}{4} . D = 1{,}8849 . u_{hava} . D \quad (5.18)$$

$\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial D} = 1{,}1279\ kg/m.s$ (Tip 1 için)

$\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial D} = 1{,}3269\ kg/m.s$ (Tip 2,3 ve 4 için)

$w_{u_{hava}} = 0{,}2\ m/s$

$w_D = 0{,}02\ mm = 0{,}00002\ m$

$$W_{\dot{m}_{hava}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial u_{hava}} . w_{u_{hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial D} . w_D \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.19)$$

$W_{\dot{m}_{hava}} = 2{,}3508 . 10^{-4}\ kg/s$ (Tip 1 için)

$W_{\dot{m}_{hava}} = 2{,}355 . 10^{-4}\ kg/s$ (Tip 2,3 ve 4 için)

$W_{\dot{m}_{hava}} = 0{,}8463\ kg/h$ (Tip 1 için)

$W_{\dot{m}_{hava}} = 0{,}8478\ kg/h$ (Tip 2,3 ve 4 için)

$\dot{m}_{hava} = 71{,}4653\ kg/h$ (Tip 1 için)

$\dot{m}_{hava} = 84{,}0768\ kg/h$ (Tip 2,3 ve 4 için)

$$Hata = \frac{W_{\dot{m}_{hava}}}{\dot{m}_{hava}} . 100 \quad (5.20)$$

$\boldsymbol{Hata = \%\ 1{,}182}$ (Tip 1 için)

$\boldsymbol{Hata = \%\ 1{,}006}$ (Tip 2, 3 ve 4 için)

5.8.2 İkincil hava kütlesel debi belirsizlik hesabı

$$\dot{m}_{hava} = \rho . u_{hava} . A_{boru} \quad (5.21)$$

$$A_{boru} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.22)$$

$$\dot{m}_{hava} = \rho . u_{hava} . \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.23)$$

$$\dot{m}_{hava} = f(u_{hava}, D) \quad (5.24)$$

İkincil hava sisteme aşağıdaki hızlarla verilmiştir:

$$u_{21} = 15\ m/s$$
$$u_{22} = 25\ m/s$$
$$u_{23} = 30\ m/s$$
$$u_{24} = 40\ m/s$$
$$u_{25} = 7\ m/s$$
$$u_{26} = 10\ m/s$$

İkincil havanın sisteme verildiği boru çapları aşağıdaki gibidir:

$$D_{21} = D_{22} = D_{23} = D_{24} = 0{,}0157\ m$$
$$D_{25} = D_{26} = 0{,}0352\ m$$
$$w_{u_{hava}} = 0{,}2\ m/s$$
$$w_D = 0{,}02\ mm = 0{,}00002\ m$$

$$\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial u_{hava}} = \rho . \frac{\pi D^2}{4} = 0{,}9425 . D^2 \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial D} = 2 . \rho . u_{hava} . \frac{\pi}{4} . D = 1{,}8849 . u_{hava} . D \quad (5.26)$$

$$W_{\dot{m}_{hava}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial u_{hava}} . w_{u_{hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_{hava}}{\partial D} . w_D \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.27)$$

$$W_{\dot{m}_{hava},21} = 0{,}1703\ kg/h$$
$$W_{\dot{m}_{hava},22} = 0{,}1755\ kg/h$$
$$W_{\dot{m}_{hava},23} = 0{,}1791\ kg/h$$
$$W_{\dot{m}_{hava},24} = 0{,}1877\ kg/h$$
$$W_{\dot{m}_{hava},25} = 0{,}8415\ kg/h$$
$$W_{\dot{m}_{hava},26} = 0{,}8422\ kg/h$$

$$\dot{m}_{hava,21} = 12{,}5444\ kg/h$$

$$\dot{m}_{hava,22} = 20{,}9074\ kg/h$$

$$\dot{m}_{hava,23} = 25{,}0889\ kg/h$$

$$\dot{m}_{hava,24} = 33{,}4518\ kg/h$$

$$\dot{m}_{hava,25} = 29{,}4269\ kg/h$$

$$\dot{m}_{hava,26} = 42{,}0384\ kg/h$$

$$Hata = \frac{W_{\dot{m}_{hava}}}{\dot{m}_{hava}}.100 \qquad (5.28)$$

$$Hata_{21} = \%\ 1{,}3575$$

$$Hata_{22} = \%\ 0{,}8396$$

$$Hata_{23} = \%\ 0{,}7137$$

$$Hata_{24} = \%\ 0{,}5612$$

$$Hata_{25} = \%\ 2{,}8596$$

$$Hata_{26} = \%\ 2{,}0033$$

Birincil ve ikincil hava kütlesel debilerinin hesaplanması sonucunda bulunan belirsizlik değerleri Çizelge 5.8'de verilmektedir.

Çizelge 5.8. Kütlesel debilerdeki belirsizlik değerleri

Notasyon	Debi (kg/h)	∂m/∂u	∂m/∂D	W_m	Hata,%
11	71,4653	0,0012	1,1279	0,8447	1,182
12	84,0768	0,0012	1,3270	0,8462	1,006
21	12,5444	0,0002	0,4439	0,1703	1,357
22	20,9074	0,0002	0,7398	0,1755	0,840
23	25,0889	0,0002	0,8878	0,1791	0,714
24	33,4518	0,0002	1,1837	0,1877	0,561
25	29,4269	0,0012	0,4644	0,8414	2,859
26	42,0384	0,0012	0,6635	0,8421	2,003

5.8.3 Reynolds sayısı belirsizlik hesabı

$$Re = \frac{\rho . u_{hava} . D}{\mu} \tag{5.29}$$

$$Re = f(u_{hava}, D) \tag{5.30}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial u_{hava}} = \frac{\rho . D}{\mu} \tag{5.31}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial D} = \frac{\rho . u_{hava}}{\mu} \tag{5.32}$$

$$\rho = 1{,}2\ kg/m^3$$

$$\pi = 3{,}1415$$

$$\mu = 1{,}789 . 10^{-5}\ kg/m.s$$

$$w_{u_{hava}} = 0{,}2\ m/s$$

$$w_D = 0{,}02\ mm = 0{,}00002\ m$$

$$W_{Re} = [(\frac{\partial Re}{\partial u_{hava}} . w_{u_{hava}})^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial D} . w_D\right)^2]^{1/2} \tag{5.33}$$

Reynolds sayılarının hesabındaki belirsizlik değerleri Çizelge 5.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9. Reynolds sayısı tespiti belirsizlik analizi sonuçları

Notasyon	Re	∂Re/∂u	∂Re/∂D	W_{Re}	Hata,%
11	40139	2361,1	1140301,8	38,2695	0,0953
12	47222	2361,1	1341531,6	40,7961	0,0864
21	15797	1053,1	1006148,7	28,7433	0,1820
22	26328	1053,1	1676914,5	39,3199	0,1493
23	31593	1053,1	2012297,4	45,1772	0,1430
24	42124	1053,1	2683063,2	57,4523	0,1364
25	16528	2361,1	469536,1	32,1345	0,1944
26	23611	2361,1	670765,8	33,5322	0,1420

5.9 İkincil Yakma Havası Kullanıldığı Durumda Sistemin Maliyet Analizi

Ekonomik analiz, bir ısıl sistemin yatırım, işletme, bakım ve yakıt maliyetlerinden oluşan giderlerin, yani toplam sistem maliyetinin parasal olarak değerlendirilmesini kapsamaktadır. Genel olarak, bir sistemin toplam maliyeti, işçi giderleri, zaman tarifeli satın alma, sistemin kurulması, işletmesi ve bakımı, finansal kaynaklar, vergi oranları, yakıt masrafları, enflasyon oranı, sigorta giderleri, faizler, ürün satışından elde edilen gelirler vb. daha da çeşitlendirilebilecek pek çok etkene bağlıdır. Bu etkenlerin sayıca fazla olmasına karşın, günümüzde çeşitli yaklaşımlar/yöntemler ile bir ısıl sistemin maliyetinin belirlenmesi veya tahmini bir değer biçilmesi mümkündür. Mühendislik uygulamalarının çoğunda, nihai kararın ekonomik değerlendirmeye göre verildiği düşünüldüğünde, sistemlerin yapılabilirlik analizleri için maliyet tahmini oldukça önemli olmaktadır (Eryener, 2003).

Toplam sistem maliyetini belirlemek için gerekli parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Sistemin toplam maliyetinin kazan ve aksesuarları, işletme, bakım ve yakıt maliyetlerinin bir fonksiyonu olduğu eş. (5.34) ile ifade edilebilir.

$$C_S = f(F_K + F_B + F_{\text{İ}} + F_Y) \tag{5.34}$$

Burada;

C_S : Sistemin toplam maliyeti

F_K : Kazan ve aksesuarların maliyeti

F_B : Bakım giderleri

$F_{\text{İ}}$: İşletme giderleri

F_Y : Yakıt giderleridir.

Burada dikkat edilmesi gereken, ikincil yakma havasının tüm parametreler içerisinde bir etkiye sahip olduğudur. İkincil yakma havası maliyetinin, pratikte hâlihazırda imal edilen kazanlara ait ekonomik analizi aşağıda adımlar halinde sunulmuştur.

Adım 1. Kazan ve Aksesuarların Maliyetleri

Kazan ve Aksesuarların Yatırım Maliyeti

DK2 Yatırım Maliyeti	: 2000 Euro	= 2.6203 x 2000	= 5240 TL + KDV
YSB15 Yatırım Maliyeti	: 22000 Euro	= 2.6203 x 22000	= 57646 TL + KDV
YSB30 Yatırım Maliyeti	: 33400 Euro	= 2.6203 x 33400	= 87518 TL + KDV
YSB60 Yatırım Maliyeti	: 47600 Euro	= 2.6203 x 47600	= 124726 TL + KDV
YSB80 Yatırım Maliyeti	: 55450 Euro	= 2.6203 x 55450	= 145295 TL + KDV
YSB120Yatırım Maliyeti	: 63950 Euro	= 2.6203 x 63950	= 167568 TL + KDV

Kazanların Isıl Kapasiteleri (P)

DK2	: 30264 kcal/h
YSB15	: 187500 kcal/h
YSB30	: 375000 kcal/h
YSB60	: 750000 kcal/h
YSB80	: 1000000 kcal/h
YSB120	: 1500000 kcal/h

Yakıt Değerleri

H_u (Alt Isıl Değeri) : 7760 kcal/kg,

$\eta_{yakıt}$ (Yakıt Yanma Verimi) : % 65 olarak kabul edilirse

$\eta_{yakıt}$ H_u : 7760 kcal/kg x 0.65 = 5044 kcal/kg

Yakıt Sarfiyatı Hesabı

q : Yakıt sarfiyatı, kg/h

$$q = \frac{p}{\eta_{yakıt} \; x \; Hu} \qquad (5.35)$$

DK2	: 6 kg/h
YSB15	: 37.17 kg/h
YSB30	: 74.35 kg/h
YSB60	: 148.69 kg/h
YSB80	: 198.25 kg/h
YSB120	: 297.38 kg/h

İdeal Hava Yakıt Oranı

Gerekli hava miktar oranı : 14.31

Kazanların Yanma Havası Gereksinimleri

DK2 : 6 kg/h x 14.31 =85.86 kg/h

YSB15 : 37.17 kg/h x 14,31 = 531.9 kg/h

YSB30 : 74.35 kg/h x 14,31 = 1063.95 kg/h

YSB60 : 148.69 kg/h x 14,31 = 2127.75 kg/h

YSB80 : 198.25 kg/h x 14,31 = 2836.96 kg/h

YSB120 : 297.38 kg/h x 14,31 = 4255.51 kg/h

Kazanların İkincil Hava Fanı Gereksinimi

İkincil hava debisi, birincil hava debisinin % 30'u kadar olmalıdır.

DK2 : 85.86 kg/h x 0.3 = 25.76 kg/h

YSB15 : 531.9 kg/h x 0.3 = 160 kg/h

YSB30 : 1063.95 kg/h x 0.3 = 319 kg/h

YSB60 : 2127.75 kg/h x 0.3 = 638 kg/h

YSB80 : 2836.96 kg/h x 0.3 = 851 kg/h

YSB120 : 4255.51 kg/h x 0.3 = 1277 kg/h

Seçilen ikincil hava fanları

DK2 : 650 kg/h

YSB15 : 650 kg/h

YSB30 : 650 kg/h

YSB60 : 650 kg/h

YSB80 : 1350 kg/h

YSB120 : 1350 kg/h

İkincil hava fanı maliyeti

650 kg/h, 0.25 kW trifaze fan maliyeti: 350 TL+KDV = 350 x 1.18 = 413 TL (KDV dâhil)

1350 kg/h,0.37 kW trifaze fan maliyeti: 400 TL+KDV = 400 x 1.18 = 472 TL (KDV dâhil)

Kazanların KDV Dâhil İlk Yatırım Maliyeti

DK2 İlk Yatırım Maliyeti : 6183 TL
YSB15 İlk Yatırım Maliyeti : 68022 TL
YSB30 İlk Yatırım Maliyeti : 103271 TL
YSB60 İlk Yatırım Maliyeti : 147176 TL
YSB80 İlk Yatırım Maliyeti : 171448 TL
YSB120 İlk Yatırım Maliyeti : 197730 TL

İkincil Hava Fanın Maliyetinin İlk Yatırım Maliyetine Oranı

DK2 İlk Yatırım Maliyeti : 413 TL / 6183 TL = % 6.68
YSB15 İlk Yatırım Maliyeti : 413 TL / 68022 TL = % 0.61
YSB30 İlk Yatırım Maliyeti : 413 TL / 103271 TL = % 0.40
YSB60 İlk Yatırım Maliyeti : 413 TL / 147176 TL = % 0.28
YSB80 İlk Yatırım Maliyeti : 472 TL / 171448 TL = % 0.28
YSB120 İlk Yatırım Maliyeti : 531 TL / 197730 TL = % 0.27

Adım 2. Bakım Maliyeti

Evsel büyük çaplı ve sanayi tipi kazanların periyodik altı aylık genel bakımları yapılmaktadır. Bu genel bakımlar içerisinde ikincil hava ekstra bir bakım masrafı oluşturmamaktadır. Altı aylık periyodik kontrollerin günlük maliyeti yaklaşık 5 TL civarındadır. Değerlendirmeye alınan kapasiteler arasında, bakım masrafı farkı bulunmamaktadır.

Adım 3. İşletme Giderleri

İkincil Hava Fanı İşletme Gideri

Elektrik kullanım fiyatları aşağıdaki gibidir:

Sanayide 34.98 KR/kWh

0.25 kWh x 0.3498 TL/kWh= 0.087 TL/h

0.37 kWh x 0.3498 TL/kWh= 0.129 TL/h

Günlük 16 saat çalıştığı kabul edilirse 0.087 x 16 = 1.392 TL/16h

Günlük 16 saat çalıştığı kabul edilirse 0.129 x 16 = 2.064 TL/16h

Yıllık işletme maliyeti = 1.392 x 365 = 508.08 TL

Yıllık işletme maliyeti = 3.072 x 365 = 1121.28 TL

Kazanların ortalama günlük işletme maliyetini, kazan dairesi görevlisi (50 TL/gün), kimyasal ve su maliyeti (kazan kapasitesine göre değişir) ve elektrik maliyetlerinin oluşturduğu kabul edilebilir. İşletme maliyetleri de aşağıdaki gibidir:

DK2 = 60 TL/16h

YSB15 = 75 TL/16h

YSB30 = 85 TL/16h

YSB60 = 95 TL/16h

YSB80 = 110 TL/16h

YSB120 = 125 TL/16h

Adım 4. Yakıt Giderleri

Yıllık Yakıt Maliyeti

Yakıt maliyeti 0.66 TL/kg olarak kabul edilirse,

DK2 : 6 kg/h x 0.66 TL/kg =3.96 TL/h

YSB15 : 52.45 kg/h x 0.66 TL/kg = 34.62 TL/h

YSB30 : 104.89 kg/h x 0.66 TL/kg = 69.23 TL/h

YSB60 : 209.79 kg/h x 0.66 TL/kg = 138.46 TL/h

YSB80 : 279.72 kg/h x 0.66 TL/kg = 184.62 TL/h

YSB120 : 419.58 kg/h x 0.66 TL/kg = 276.92 TL/h

Kazanların günlük 16 saat çalıştığı kabul edilirse, yakıt maliyetleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

DK2 : 3.96 TL/h x 16 = 63 TL

YSB15 : 34.62 TL/h x 16 = 554 TL

YSB30 : 69.23 TL/h x 16 = 1108 TL

YSB60 : 138.46 TL/h x 16 = 2215 TL

YSB80 : 184.62 TL/h x 16 = 2954 TL

YSB120 : 276.92 TL/h x 16 = 4431 TL

Adım 5. İkincil Havanın Maliyete Etkisi

Yapılan deneysel çalışma ile ikincil havanın yanma verimini yaklaşık % 1 arttırdığı görülmüştür. Verimdeki % 1 artışın yakıt maliyetini % 1 düşüreceği varsayılırsa;

DK2 = 63 TL x 0.99 = 62 TL/gün
YSB15 = 554 TL x 0.99 = 548 TL/gün
YSB30 = 1108 TL x 0.99 = 1096 TL/gün
YSB60 = 2215 TL x 0.99 = 2192 TL/gün
YSB80 = 2954 TL x 0.99 = 2924 TL/gün
YSB120 = 4431 TL x 0.99 = 4386 TL/gün

Buradan kazanlarda ikincil hava kullanıldığında günlük yakıt maliyetine etkisi aşağıdaki gibi olur:

DK2 = 63 TL/gün – 62 TL/gün = 1 TL/gün
YSB15 = 554 TL/gün - 548 TL/gün = 6 TL/gün
YSB30 = 1108 TL/gün – 1096 TL/gün = 12 TL/gün
YSB60 = 2215 TL/gün - 2192 TL/gün = 23 TL/gün
YSB80 = 2954 TL/gün - 2924 TL/gün = 30 TL/gün
YSB120 = 4431 TL/gün - 4386 TL/gün = 45 TL/gün

İkincil havanın getireceği günlük kazanç aşağıdaki gibi olur:

YSB15 = 6 TL/gün – 1,4 TL/gün = 4.6 TL/gün
YSB30 = 12 TL/gün - 1,4 TL/gün = 10.6 TL/gün
YSB60 = 23 TL/gün - 1,4 TL/gün = 21.6 TL/gün
YSB80 = 30 TL/gün – 2,1 TL/gün = 27.9 TL/gün
YSB120 = 45 TL/gün – 2,1 TL/gün = 42.9 TL/gün

İkincil hava uygulamasının kendini geri ödeme süresi ise aşağıdaki gibi olur:

YSB15 = 413 TL / 4.6 TL/gün = 89.8 gün
YSB30 = 413 TL / 106 TL/gün = 38.9 gün
YSB60 = 413 TL / 21.6 TL/gün = 19.1 gün
YSB80 = 472 TL / 27.9 TL/gün = 16.9 gün
YSB120 = 472 TL / 42.9 TL/gün = 11.0 gün

Buradan görüldüğü gibi, ikincil hava fanının ekonomik ömrünün en az 10 yıl olduğu düşünülürse, kazanda kömür yakılmasında ikincil hava kullanımı, kazan kapasitesi büyüdükçe kendini kısa sürede geri ödeyen çok karlı bir yatırımdır.

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Her bir konstrüksiyon tipi için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, her konstrüksiyon tipi için açılan başlık altında verilmiştir.

6.1. Konstrüksiyon Tip 1 Deney Sonuçları

Konstrüksiyon tip 1 için deneyler sonucunda elde edilen değerler 180 dk.'lık bir periyot için Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Konstrüksiyon tip 1 deney sonuçları

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	η, %	TC1, °C	TC2, °C	TC3, °C	TC4, °C	Tg, °C	Tç, °C
0	3,62	15,20	474	5,66	72,40	40	33	229	256	20	32
2	4,16	15,90	754	4,90	68,50	44	36	225	203	20	34
4	3,09	14,20	573	6,64	75,60	44	36	262	227	20	34
6	2,44	12,40	399	8,40	77,20	49	37	304	273	20	34
8	2,53	12,70	386	8,10	76,50	51	39	308	273	20	34
10	2,48	12,50	596	8,20	77,60	54	43	273	297	24	34
12	2,44	12,30	444	8,30	77,00	55	44	278	304	24	34
14	2,36	12,10	319	8,69	77,40	57	46	282	311	24	34
16	2,52	12,80	338	8,00	76,00	57	46	284	331	26	34
18	2,64	13,00	182	7,80	73,90	33	29	242	335	26	36
20	2,78	13,20	437	7,60	78,60	57	46	249	297	26	36
22	2,71	13,20	404	7,60	77,80	57	46	250	297	26	36
24	2,67	13,10	399	7,70	77,80	58	47	257	302	26	36
26	2,66	13,10	361	7,70	77,40	60	49	271	301	26	36
28	2,76	13,40	314	7,40	76,50	60	49	272	304	26	36
30	2,63	13,00	620	7,90	77,80	58	48	292	289	25	36
32	2,63	13,20	552	7,80	77,30	58	49	294	292	25	36
34	2,66	13,20	534	7,60	77,20	58	49	294	290	25	36
36	2,72	13,40	598	7,50	76,50	59	49	288	278	28	36
38	2,74	13,30	650	7,40	77,00	59	50	288	276	28	38
40	2,72	13,30	644	7,50	77,80	59	50	289	275	28	38
42	2,73	13,30	629	7,50	77,00	60	50	291	274	30	40
44	2,64	13,00	182	7,80	73,90	33	29	242	335	30	40
46	2,52	12,80	338	8,00	76,00	57	46	284	331	30	40
48	2,63	13,00	128	7,80	74,70	34	29	241	330	30	40
50	2,78	13,30	269	7,40	75,00	57	46	278	324	30	40
52	2,92	13,90	252	7,00	75,00	57	46	273	317	30	40
54	3,15	14,40	264	6,40	73,00	56	47	254	291	30	40
56	3,10	14,10	263	6,60	74,80	47	40	270	253	30	40
58	3,07	14,20	273	6,70	74,30	48	41	274	254	30	40
60	3,11	14,30	267	6,60	73,90	48	41	275	255	30	42

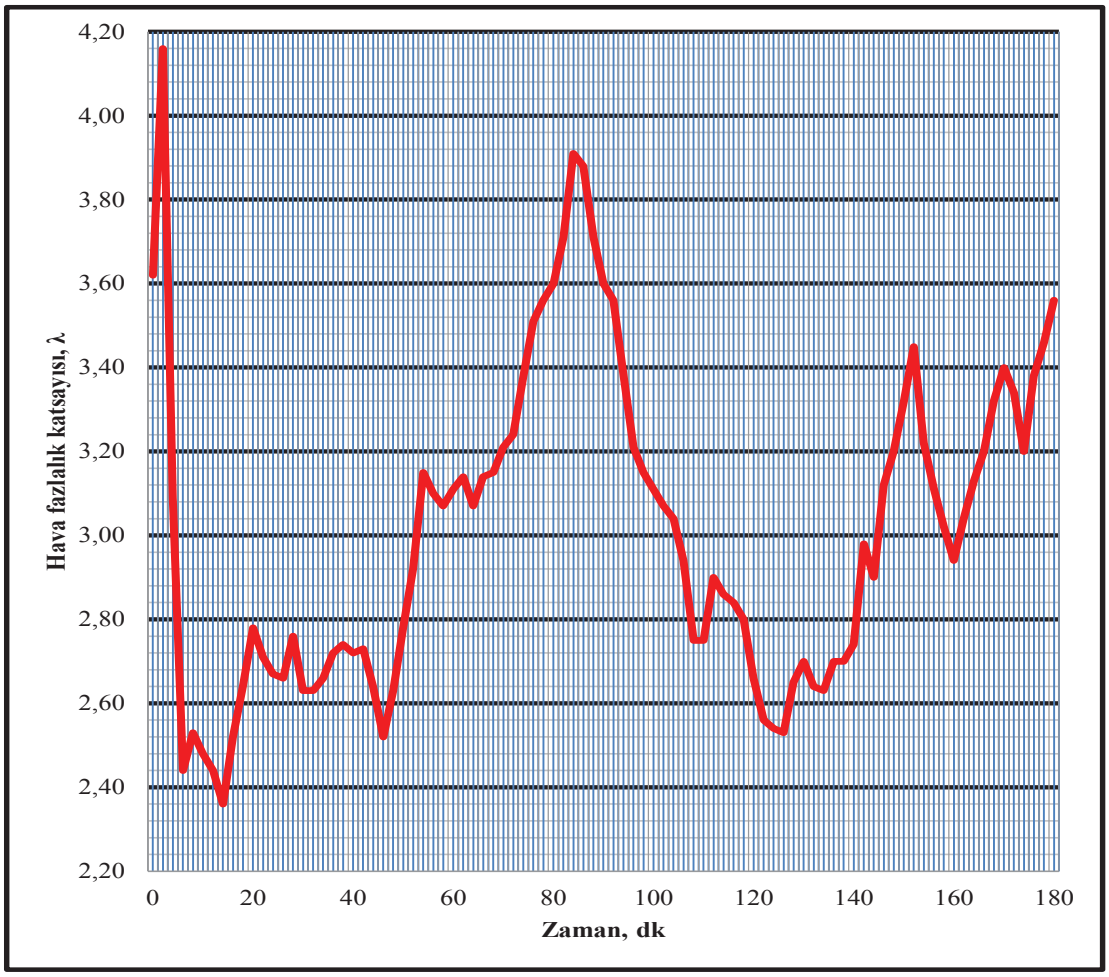
Çizelge 6.1.'in devamı

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, °C	TC2, °C	TC3, °C	TC4, °C	Tg, °C	Tç, °C
62	3,14	14,30	280	6,50	73,50	49	42	276	256	30	42
64	3,07	14,10	305	6,70	73,50	49	43	278	262	30	42
66	3,14	14,30	305	6,50	72,80	49	43	277	263	30	42
68	3,15	14,30	319	6,50	72,20	50	43	276	266	30	44
70	3,21	14,40	320	6,40	72,30	50	44	276	264	30	44
72	3,24	14,50	343	6,40	72,40	50	44	277	261	32	44
74	3,38	14,70	374	6,10	71,60	50	44	271	260	32	44
76	3,51	15,00	361	5,80	71,10	50	44	266	258	32	44
78	3,56	15,10	365	5,70	70,90	50	44	264	255	32	44
80	3,60	15,10	390	5,70	71,00	50	44	262	252	30	42
82	3,71	15,40	410	5,40	70,30	50	44	261	250	30	42
84	3,91	15,60	422	5,20	68,40	49	44	258	249	30	42
86	3,88	15,50	276	5,20	72,50	41	35	294	285	30	42
88	3,71	15,40	410	5,40	70,30	50	44	261	250	30	42
90	3,60	15,10	390	5,70	71,00	50	44	262	252	30	42
92	3,56	15,10	365	5,70	70,90	50	44	264	255	32	42
94	3,38	14,70	374	6,10	71,60	50	44	271	260	32	42
96	3,21	14,40	320	6,40	72,30	50	44	276	264	30	42
98	3,15	14,30	319	6,50	72,20	50	43	276	266	30	42
100	3,11	14,30	267	6,60	73,90	48	41	275	255	30	40
102	3,07	14,20	273	6,70	74,30	48	41	274	254	30	40
104	3,04	14,10	174	6,70	70,10	37	35	286	317	30	40
106	2,94	14,00	184	7,60	71,50	44	39	300	326	32	40
108	2,75	13,40	198	7,50	73,40	39	33	309	297	30	40
110	2,75	13,40	198	7,50	73,40	39	33	306	294	30	40
112	2,90	13,70	167	7,10	71,70	42	39	242	335	30	40
114	2,86	13,66	154	7,21	74,60	40	38	252	332	30	40
116	2,84	13,61	150	7,26	73,90	39	38	262	327	30	40
118	2,80	13,50	148	7,37	73,30	39	37	272	324	30	40
120	2,66	13,11	160	7,76	73,40	39	37	284	320	28	40

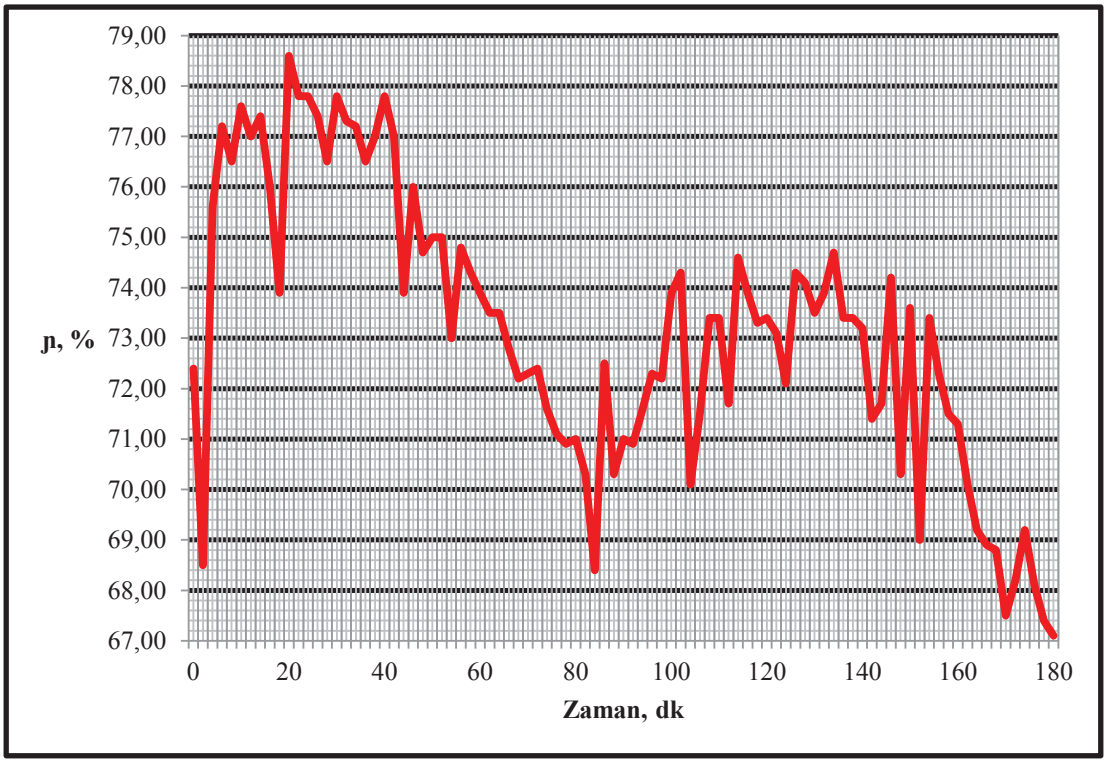
Çizelge 6.1'in devamı

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, °C	TC2, °C	TC3, °C	TC4, °C	Tg, °C	Tç, °C
122	2,56	12,79	170	8,06	73,10	38	36	296	319	28	40
124	2,54	12,73	180	8,12	72,10	38	35	312	318	28	42
126	2,53	12,70	214	8,10	74,30	37	34	322	317	28	42
128	2,65	13,08	176	7,78	74,10	35	32	276	324	28	42
130	2,70	13,30	147	7,70	73,50	32	28	241	330	28	42
132	2,64	13,00	182	7,80	73,90	33	29	242	335	28	42
134	2,63	13,00	128	7,80	74,70	34	29	241	330	28	40
136	2,70	13,20	139	7,60	73,40	37	31	240	236	28	40
138	2,70	13,20	149	7,60	73,40	39	33	242	333	28	40
140	2,74	13,30	150	7,50	73,20	41	35	244	329	28	40
142	2,98	13,90	244	6,90	71,40	41	40	223	317	28	40
144	2,90	13,70	167	7,10	71,70	42	39	242	335	28	40
146	3,12	14,27	171	6,61	74,20	42	39	238	328	28	40
148	3,20	14,40	176	6,40	70,30	42	39	234	320	30	40
150	3,32	14,67	206	6,21	73,60	42	39	230	316	30	40
152	3,45	14,90	228	5,90	69,00	42	39	226	309	30	40
154	3,22	14,48	230	6,41	73,40	40	38	238	314	30	42
156	3,11	14,25	234	6,63	72,30	39	37	249	316	30	42
158	3,02	14,05	237	6,83	71,50	38	36	272	317	30	42
160	2,94	13,90	238	7,00	71,30	37	35	284	318	30	42
162	3,04	14,10	174	6,70	70,10	37	35	286	317	30	42
164	3,13	14,30	155	6,50	69,20	38	35	283	316	30	42
166	3,20	14,50	156	6,40	68,90	39	35	279	310	30	42
168	3,32	14,67	164	6,21	68,80	39	35	277	305	30	44
170	3,40	14,80	172	6,00	67,50	39	35	276	303	30	44
172	3,34	14,71	224	6,17	68,20	39	35	281	302	30	44
174	3,20	14,40	247	6,40	69,20	39	35	285	302	30	44
176	3,38	14,80	279	6,10	68,10	39	36	281	294	30	44
178	3,46	14,93	283	5,96	67,40	39	36	279	291	32	44
180	3,56	15,10	285	5,80	67,10	39	36	276	287	32	44

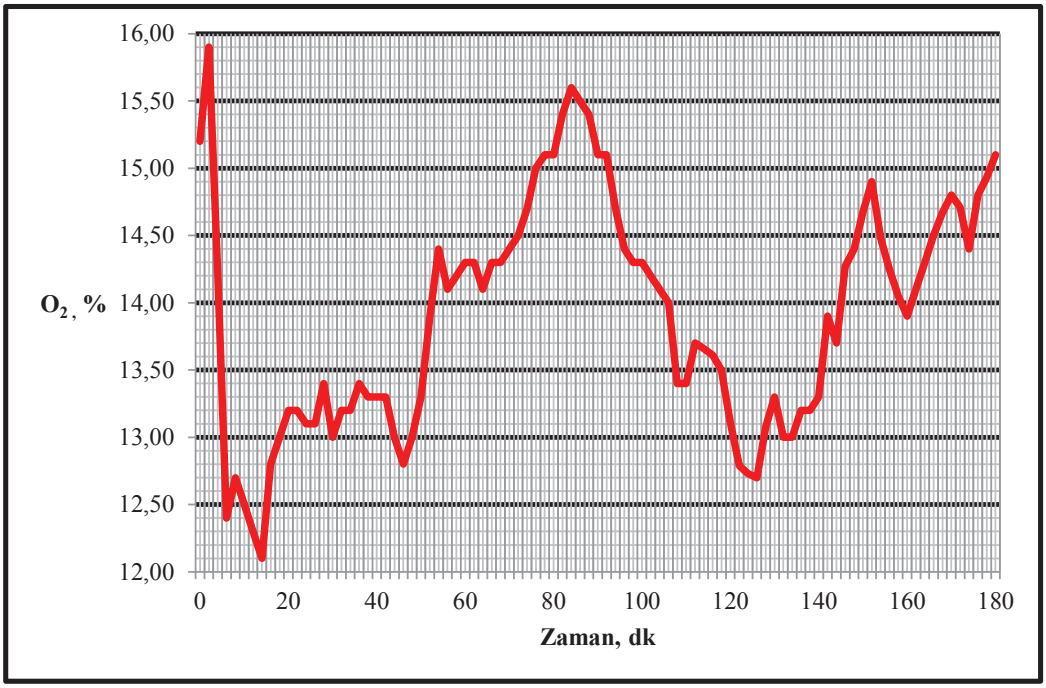
Deney sonuçlarına göre bazı parametrelerin zamana göre değişimi grafik olarak çizilmiş ve aşağıda verilmiştir (Şekil 6.1-6.11).



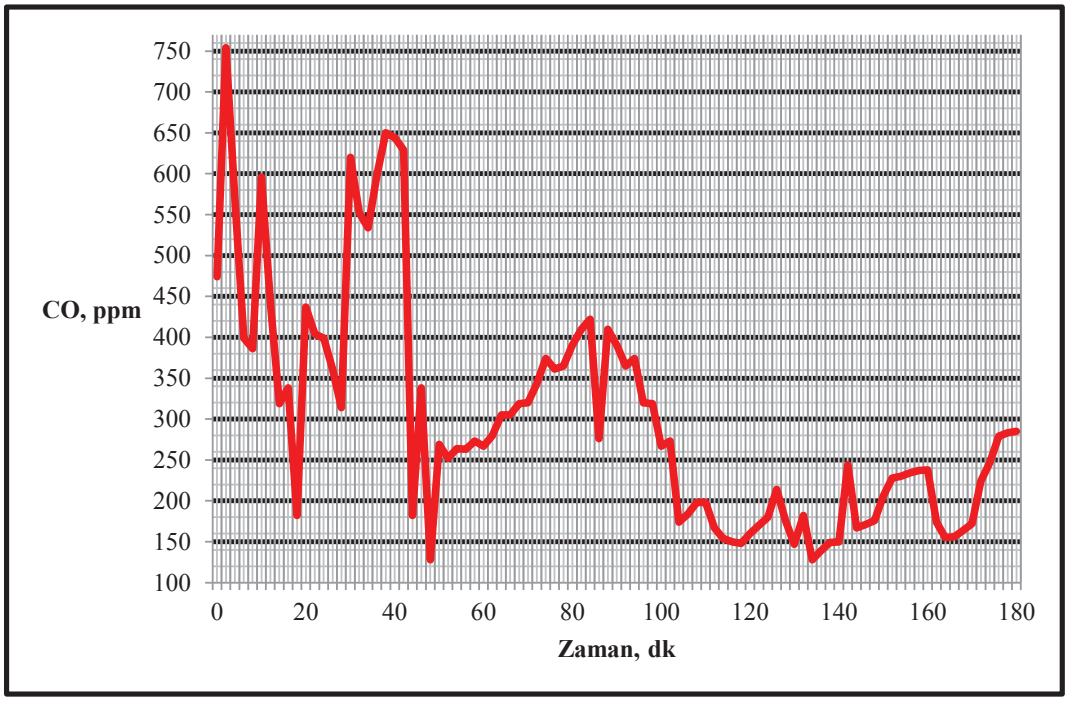
Şekil 6.1. Konstrüksiyon tip 1 için hava fazlalık katsayısının zamanla değişimi



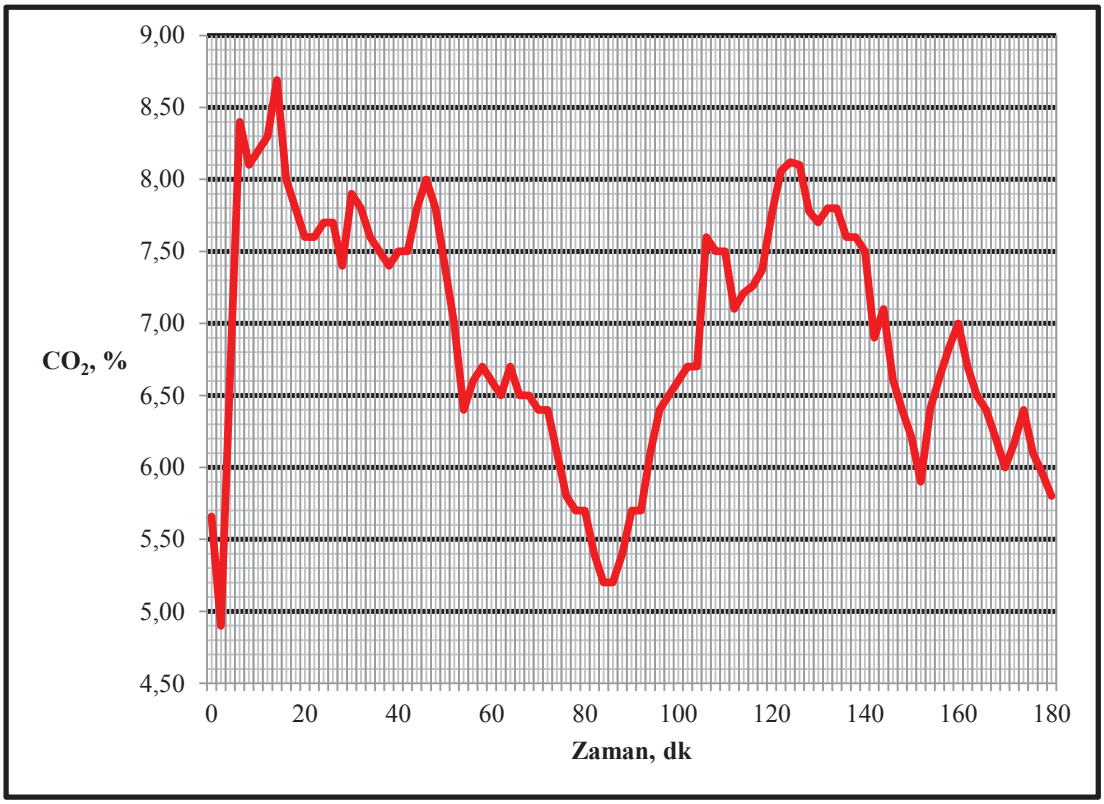
Şekil 6.2. Konstrüksiyon tip 1 için yanma veriminin zamanla değişimi



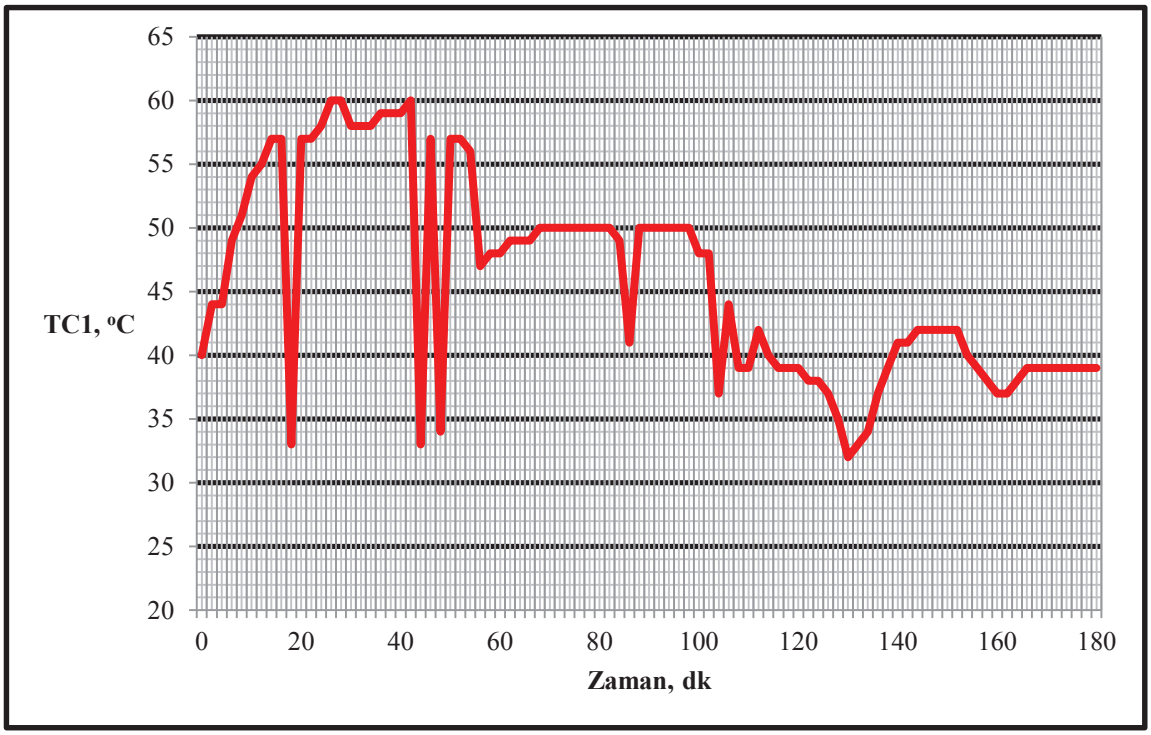
Şekil 6.3. Konstrüksiyon tip 1 için O_2 emisyonunun zamanla değişimi



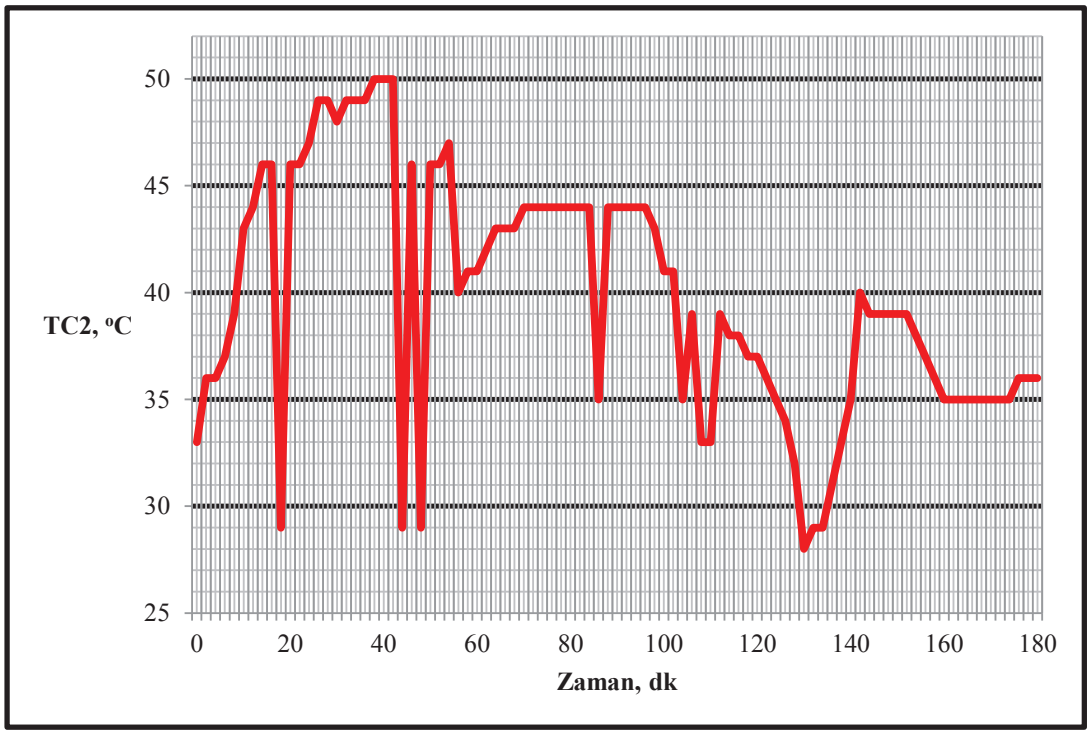
Şekil 6.4. Konstrüksiyon tip 1 için CO emisyonunun zamanla değişimi



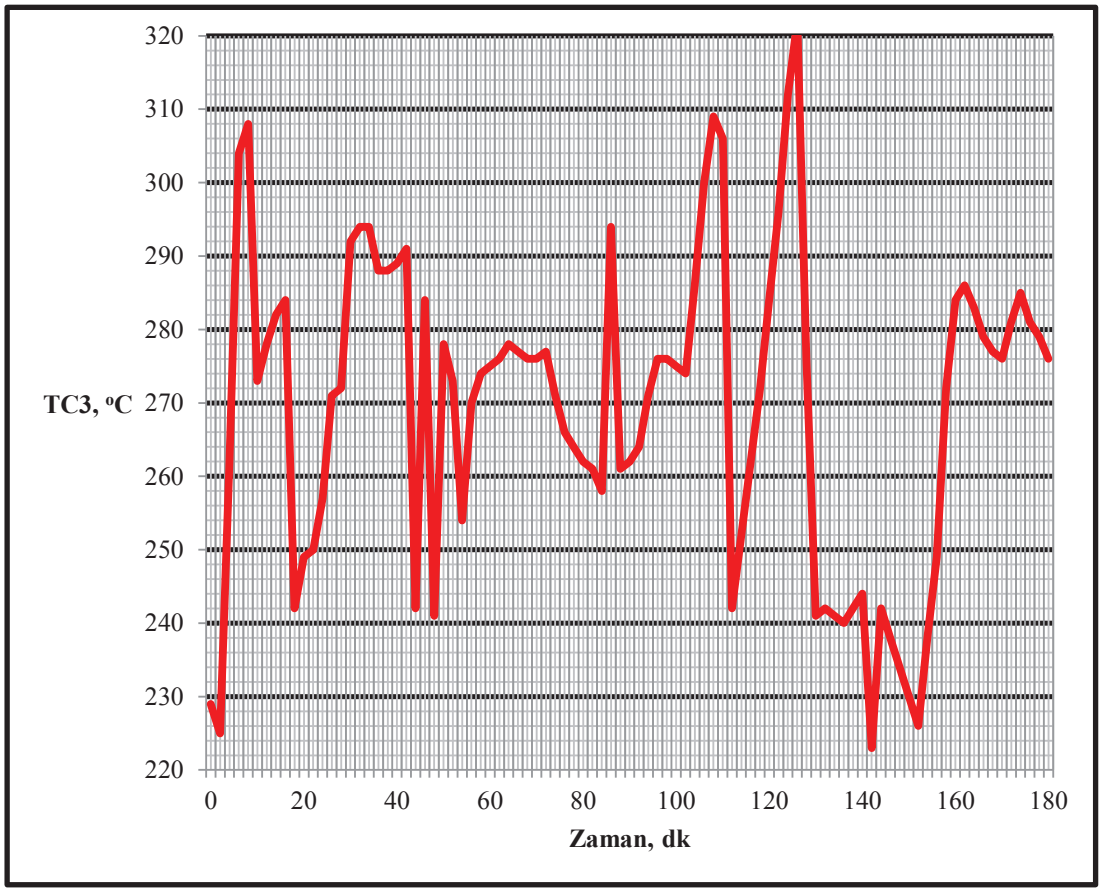
Şekil 6.5. Konstrüksiyon tip 1 için CO_2 emisyonunun zamanla değişimi



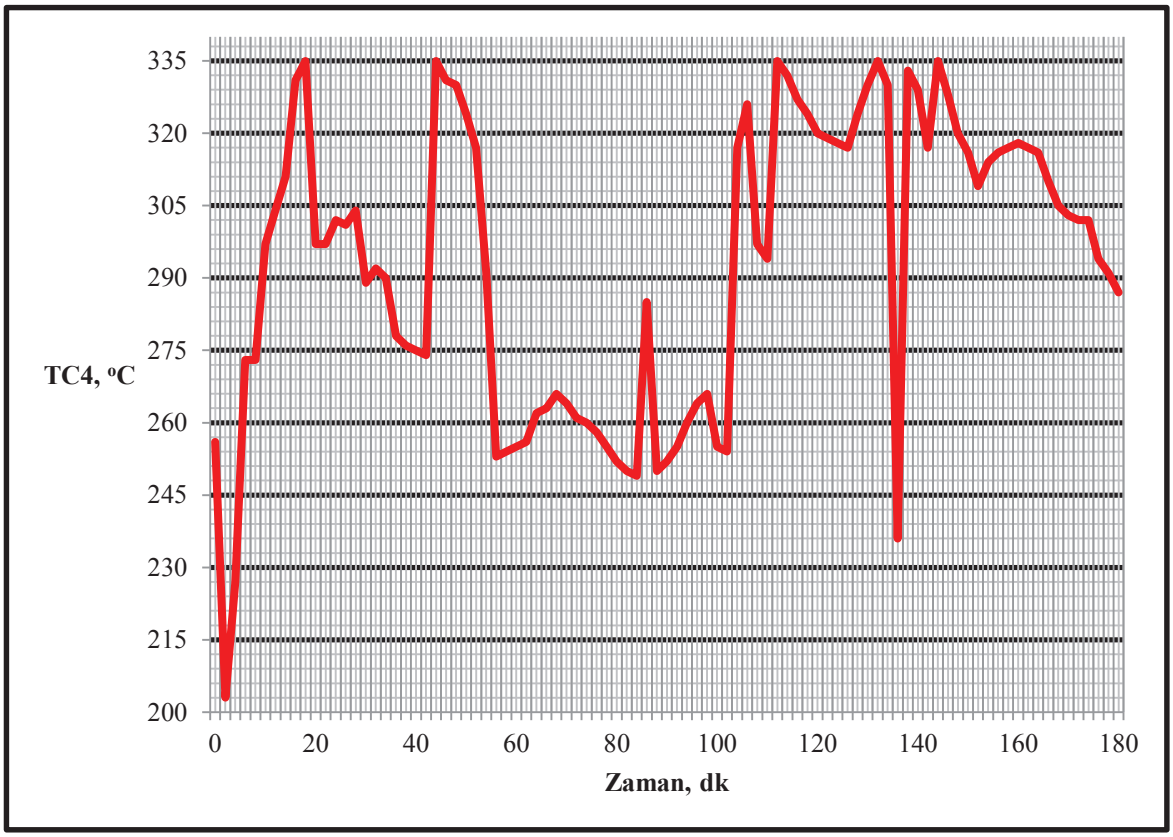
Şekil 6.6. Konstrüksiyon tip 1 için 1 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



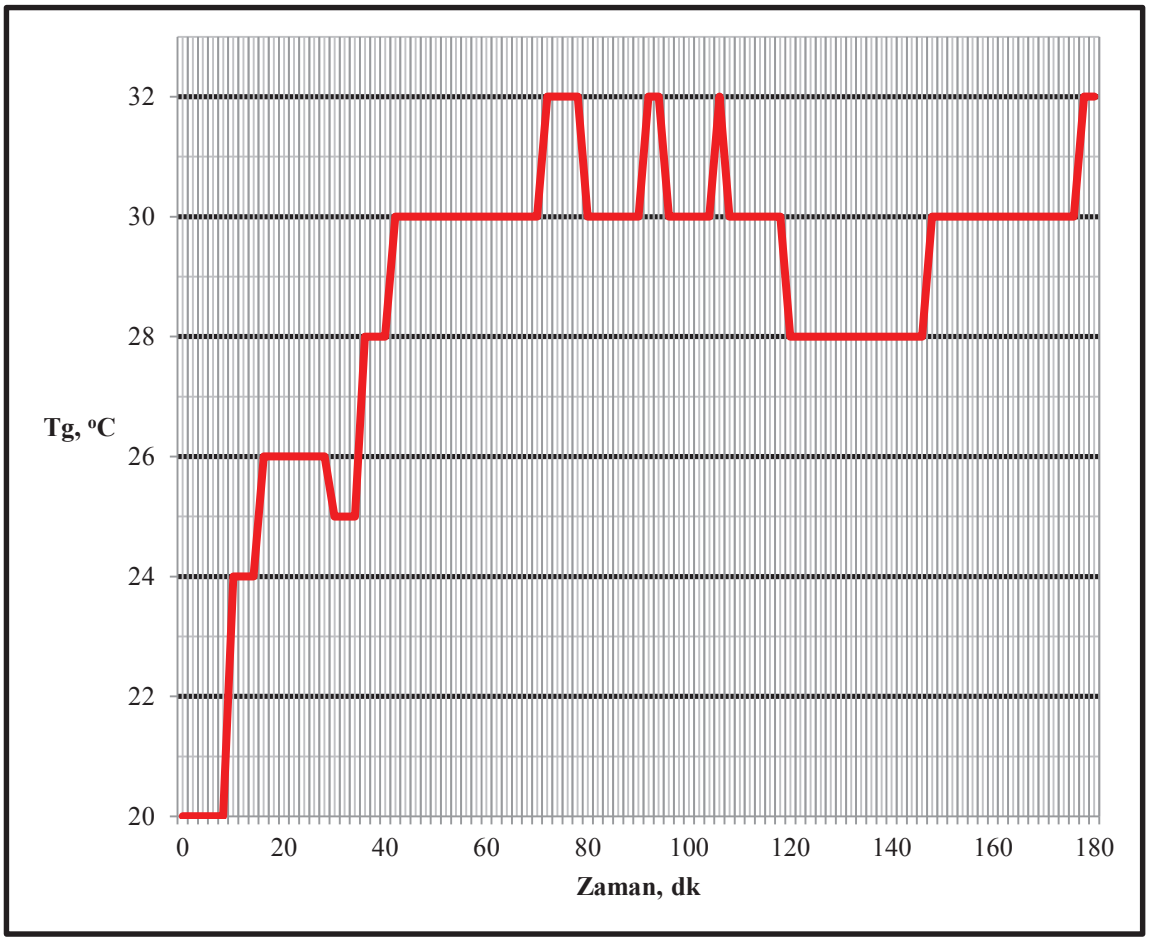
Şekil 6.7. Konstrüksiyon tip 1 için 2 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



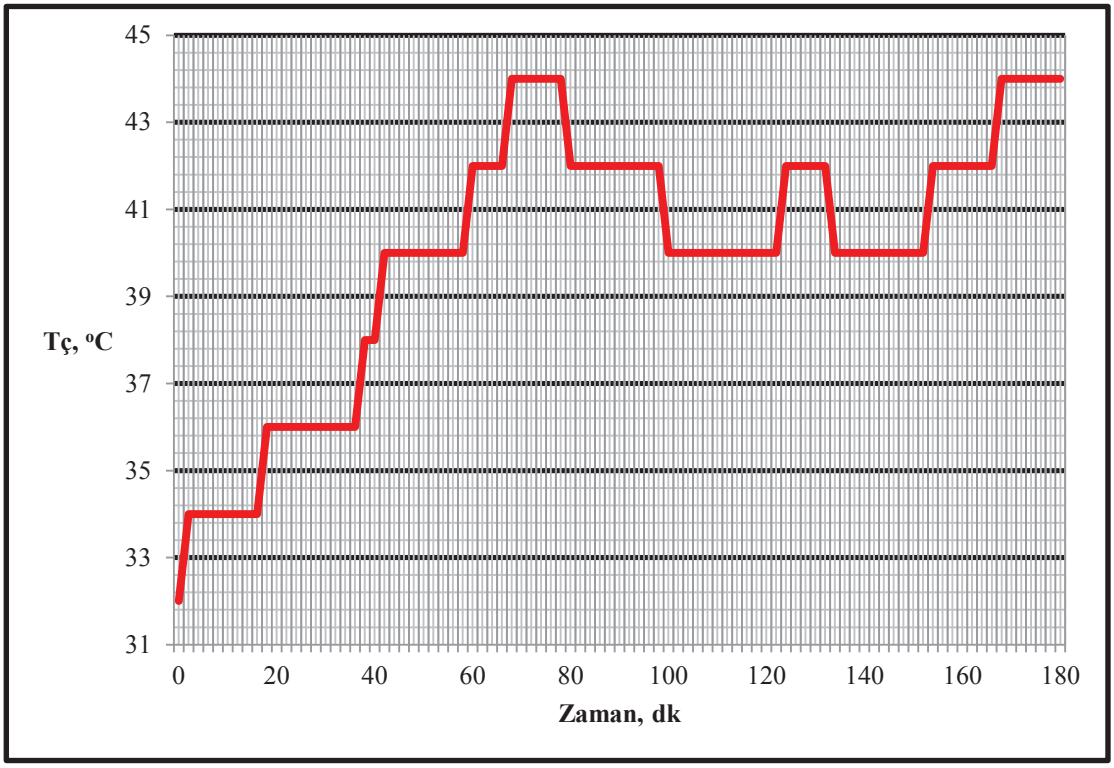
Şekil 6.8. Konstrüksiyon tip 1 için 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



Şekil 6.9. Konstrüksiyon tip 1 için 4 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



Şekil 6.10. Konstrüksiyon tip 1 için kazan su giriş sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 6.11. Konstrüksiyon tip 1 için kazan su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi

6.2. Konstrüksiyon Tip 2 Deney Sonuçları

Konstrüksiyon tip 2 deneyleri sonucunda elde edilen değerler 180 dk.'lık bir periyot için Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Konstrüksiyon tip 2 deney sonuçları

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, ^oC	TC2, ^oC	TC3, ^oC	TC4, ^oC	Tg, ^oC	Tç, ^oC
0	2,14	11,40	1050	9,15	87,60	16	19	169	245	18	24
2	2,06	10,80	760	9,43	87,60	17	21	159	206	18	24
4	2,12	11,20	811	9,33	87,40	17	21	160	206	18	24
6	2,39	12,10	745	8,67	85,40	18	21	161	209	18	24
8	2,19	11,50	875	8,86	87,70	19	22	156	189	18	24
10	2,04	10,80	800	9,90	87,60	19	23	161	197	18	24
12	2,19	11,30	738	9,05	85,40	19	23	163	200	18	24
14	1,91	9,90	1190	10,30	87,30	19	23	167	211	18	24
16	1,86	9,70	1178	10,60	87,50	19	23	167	211	18	24
18	1,86	9,90	1130	10,50	87,60	19	23	167	213	18	24
20	1,86	9,80	1120	10,90	88,20	19	23	168	214	18	24
22	1,84	9,60	1010	10,70	88,10	19	24	168	215	18	24
24	1,83	9,50	910	10,80	88,30	19	24	168	216	18	24
26	1,78	9,30	875	11,20	88,60	19	24	169	216	18	24
28	1,78	9,30	925	11,10	88,70	19	24	169	217	18	24
30	1,74	9,10	740	11,60	87,80	20	24	171	216	18	24
32	1,69	8,60	890	11,50	88,30	20	24	173	218	18	24
34	1,67	8,30	772	12,20	88,80	20	24	176	220	18	24
36	1,65	8,20	882	12,20	88,80	20	24	176	221	18	24
38	1,64	8,10	776	12,10	88,60	20	24	177	221	18	24
40	1,63	8,10	968	12,20	88,70	20	24	178	221	19	25
42	1,64	8,20	859	12,00	88,80	20	24	178	222	19	25
44	1,62	8,00	640	12,40	88,90	20	24	179	223	19	25
46	1,57	7,90	579	12,40	89,00	20	24	180	224	19	25
48	1,57	7,70	643	12,50	89,10	20	24	180	225	19	25
50	1,57	7,50	369	12,60	88,50	21	26	189	229	20	26
52	1,57	7,70	440	12,70	88,40	21	26	190	229	20	26
54	1,57	7,60	403	12,60	88,50	21	26	190	227	20	26
56	1,57	7,60	370	12,50	88,20	21	26	189	227	20	26
58	1,57	7,70	217	12,50	88,40	21	26	189	227	20	26
60	1,60	7,90	223	12,50	87,80	21	26	189	224	20	26

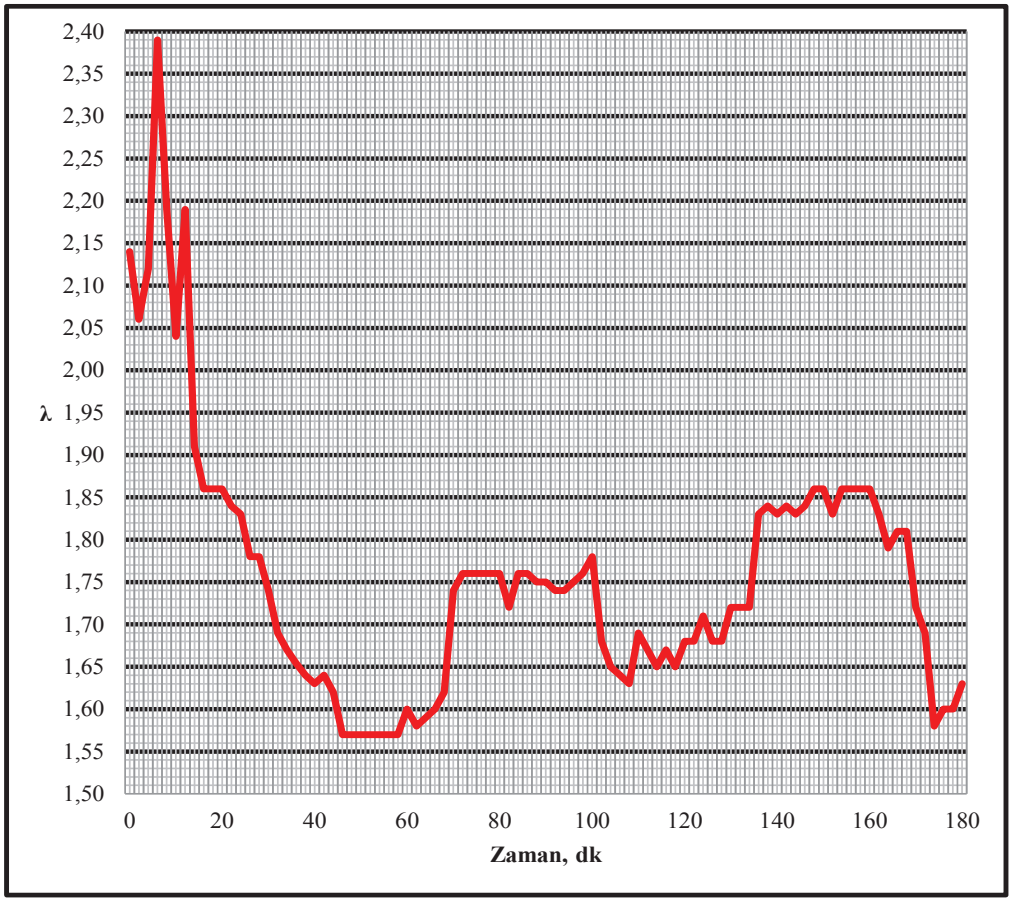
Çizelge 6.2. Devam

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, °C	TC2, °C	TC3, °C	TC4, °C	Tg, °C	Tç, °C
62	1,58	7,90	259	12,50	87,70	21	26	190	223	20	26
64	1,59	7,80	210	12,50	88,60	22	26	189	222	21	27
66	1,60	7,80	219	12,50	87,70	22	26	189	222	21	27
68	1,62	7,70	241	12,50	87,80	22	26	188	215	21	27
70	1,74	8,20	335	11,40	87,00	22	26	189	217	21	27
72	1,76	9,10	68	11,20	87,30	22	26	192	218	21	27
74	1,76	9,10	56	11,20	86,50	22	26	194	218	21	27
76	1,76	9,20	42	11,20	86,90	22	26	194	218	21	27
78	1,76	9,10	40	11,20	87,10	22	26	194	218	21	27
80	1,76	9,10	37	11,20	87,00	22	27	194	218	21	27
82	1,72	8,90	98	11,50	87,30	22	27	194	218	22	28
84	1,76	9,10	104	11,20	87,40	23	28	186	218	22	28
86	1,76	9,00	105	11,20	87,30	23	28	186	220	22	28
88	1,75	9,00	100	11,30	87,60	23	28	185	219	22	28
90	1,75	9,00	114	11,30	87,40	23	28	185	215	22	28
92	1,74	8,90	116	11,40	87,10	23	28	185	212	22	28
94	1,74	9,00	128	11,30	87,50	23	28	185	211	22	28
96	1,75	9,00	126	11,20	87,70	23	28	185	211	22	28
98	1,76	9,10	139	11,30	87,70	23	28	186	210	22	28
100	1,78	8,90	128	11,20	87,10	23	28	186	210	22	28
102	1,68	8,20	101	12,10	87,90	23	28	187	210	22	30
104	1,65	8,30	97	11,90	87,80	23	28	190	212	22	30
106	1,64	8,30	91	12,10	87,90	23	29	191	212	22	30
108	1,63	8,20	72	12,20	87,90	23	29	191	212	22	30
110	1,69	8,70	72	11,60	87,60	23	29	191	211	22	30
112	1,67	8,50	70	11,80	87,60	24	29	192	212	22	30
114	1,65	8,30	113	11,90	87,50	24	29	192	212	22	30
116	1,67	8,40	82	11,90	87,20	25	30	194	228	23	31
118	1,65	8,40	88	11,90	87,80	25	30	195	226	23	31
120	1,68	8,40	76	11,90	87,40	25	30	195	224	23	31

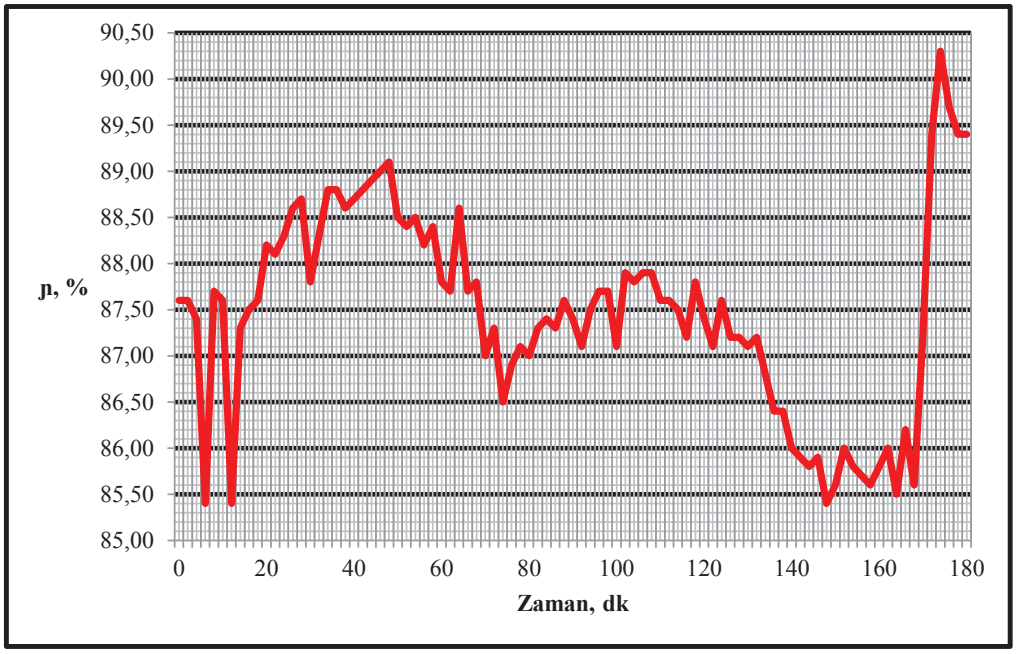
Çizelge 6.2. Devam

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, ^oC	TC2, ^oC	TC3, ^oC	TC4, ^oC	Tg, ^oC	Tç, ^oC
122	1,68	8,50	72	11,60	87,10	25	30	196	224	23	31
124	1,71	8,60	79	11,80	87,60	25	30	196	225	23	31
126	1,68	8,60	77	11,70	87,20	25	30	197	225	23	31
128	1,68	8,50	83	11,70	87,20	25	30	197	224	23	31
130	1,72	8,70	85	11,70	87,10	25	30	197	224	23	31
132	1,72	8,80	96	11,40	87,20	25	30	197	223	23	31
134	1,72	8,80	102	11,50	86,80	25	30	198	223	23	31
136	1,83	9,40	192	10,80	86,40	26	31	197	220	22	32
138	1,84	9,50	189	10,80	86,40	26	31	197	219	22	32
140	1,83	9,50	207	10,80	86,00	26	31	197	219	22	32
142	1,84	9,60	202	10,80	85,90	26	31	197	218	22	32
144	1,83	9,50	212	10,80	85,80	26	31	196	218	22	32
146	1,84	9,00	214	10,80	85,90	26	31	197	218	22	32
148	1,86	9,60	216	10,70	85,40	26	31	197	218	22	32
150	1,86	9,70	220	10,80	85,60	26	31	197	218	22	32
152	1,83	9,50	219	10,80	86,00	26	31	197	218	22	32
154	1,86	9,60	214	10,80	85,80	26	31	197	219	22	32
156	1,86	9,70	218	10,70	85,70	26	31	197	218	22	32
158	1,86	9,60	219	10,60	85,60	26	31	197	218	22	32
160	1,86	9,60	217	10,90	85,80	26	31	197	217	22	32
162	1,83	9,50	201	10,80	86,00	26	31	197	216	22	32
164	1,79	9,30	187	10,90	85,50	26	31	197	216	22	32
166	1,81	9,50	195	10,90	86,20	26	31	197	216	22	32
168	1,81	9,40	190	10,90	85,60	26	31	196	215	22	32
170	1,72	8,80	1480	11,40	87,20	24	28	176	203	22	29
172	1,69	8,60	1530	11,70	89,40	21	25	146	188	21	26
174	1,58	7,70	1900	12,70	90,30	21	25	153	198	21	26
176	1,60	8,00	1639	12,50	89,70	22	25	159	205	21	26
178	1,60	7,90	1345	12,20	89,40	22	25	162	208	21	26
180	1,63	7,90	1090	12,40	89,40	22	25	163	210	21	26

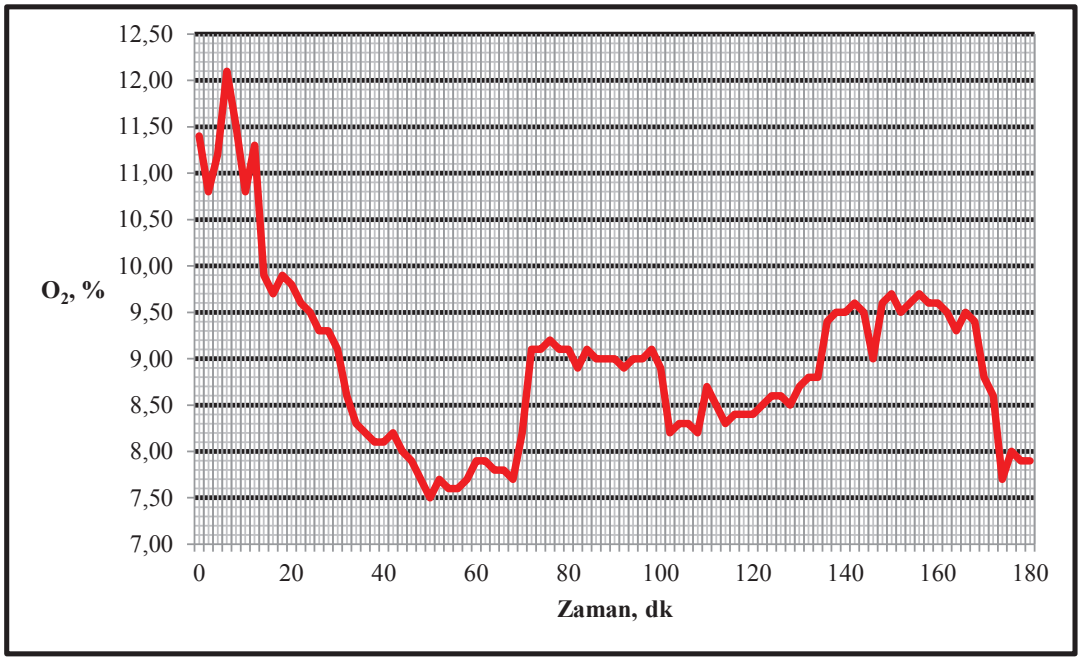
Konstrüksiyon tip 2 için deney sonuçları ile zamana bağlı olarak çizilen grafikler aşağıda verilmiştir (Şekil 6.12-6.22).



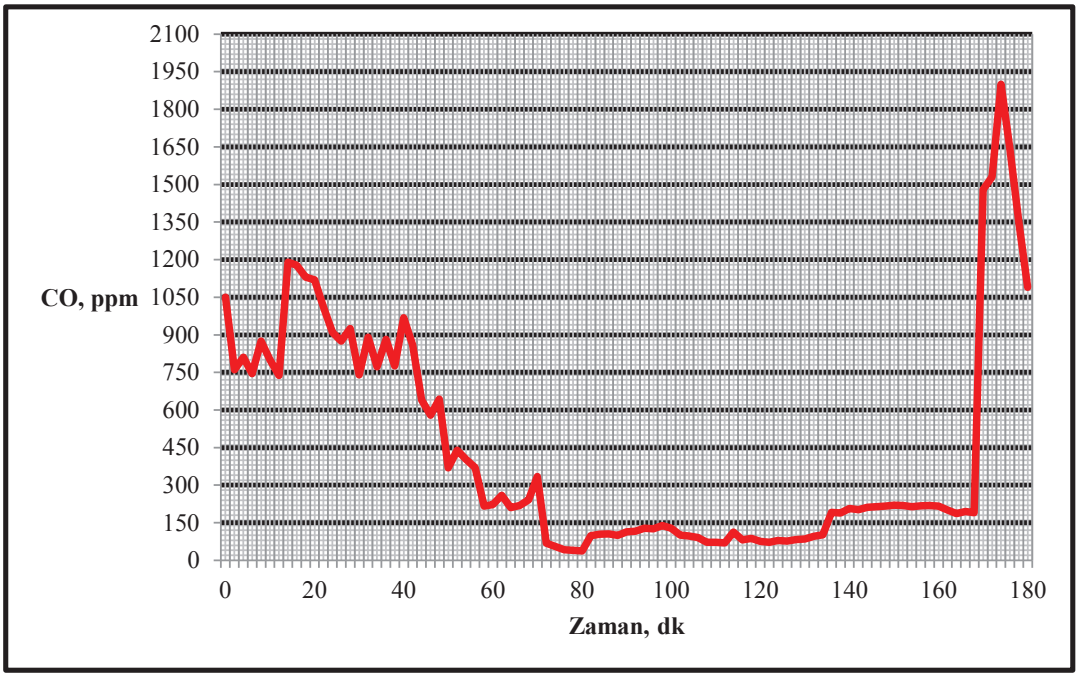
Şekil 6.12. Konstrüksiyon tip 2 için hava fazlalık katsayısının zamanla değişimi



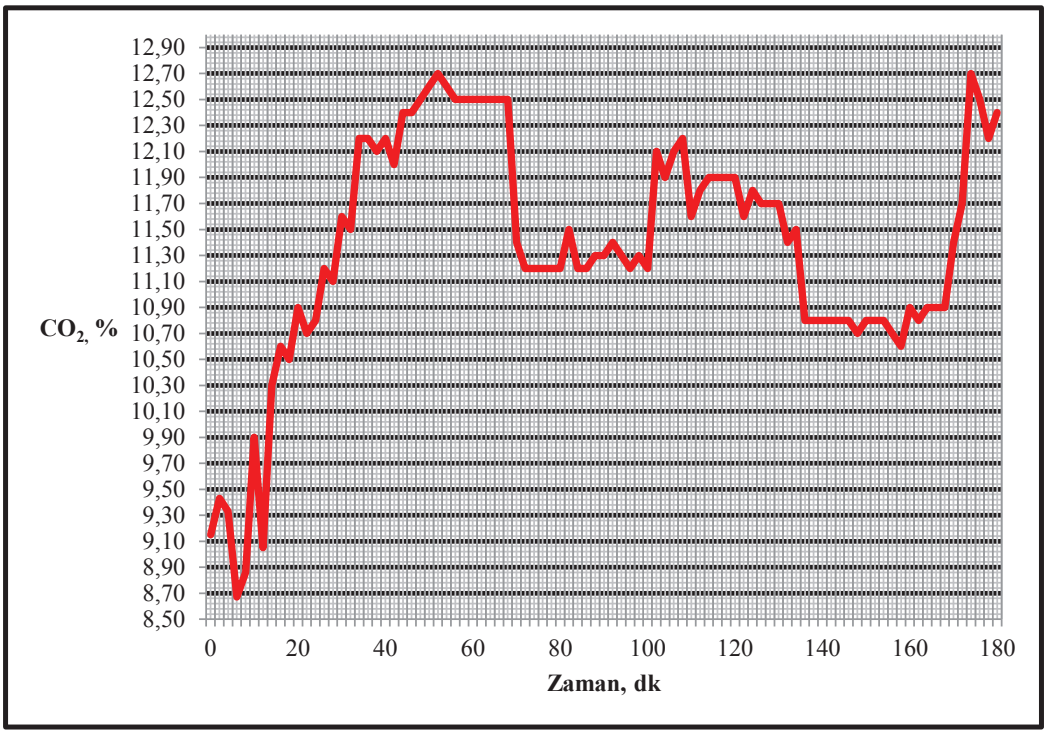
Şekil 6.13. Konstrüksiyon tip 2 için yanma veriminin zamanla değişimi



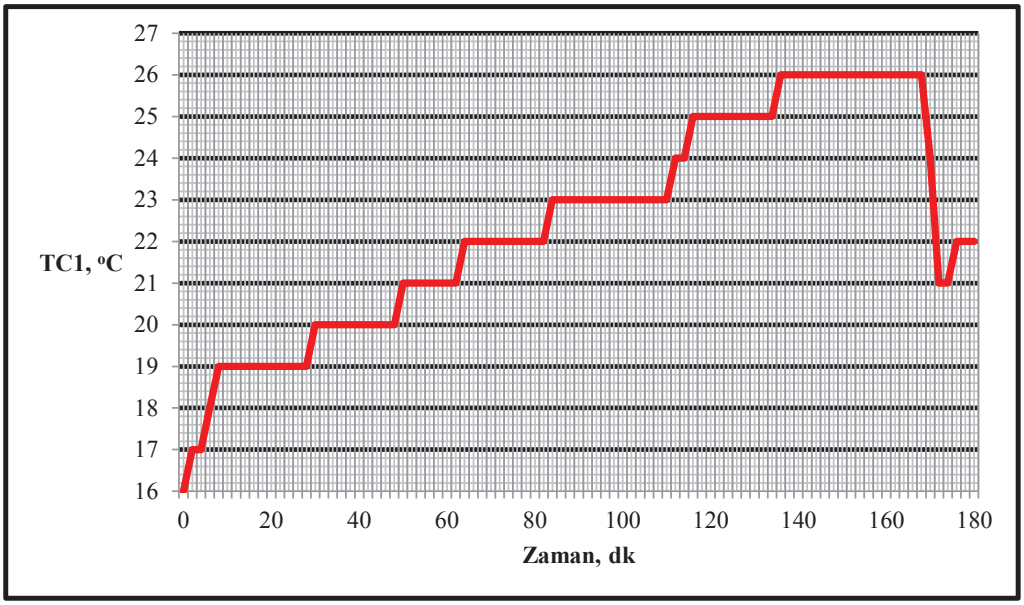
Şekil 6.14. Konstrüksiyon tip 2 için O_2 emisyonunun zamanla değişimi



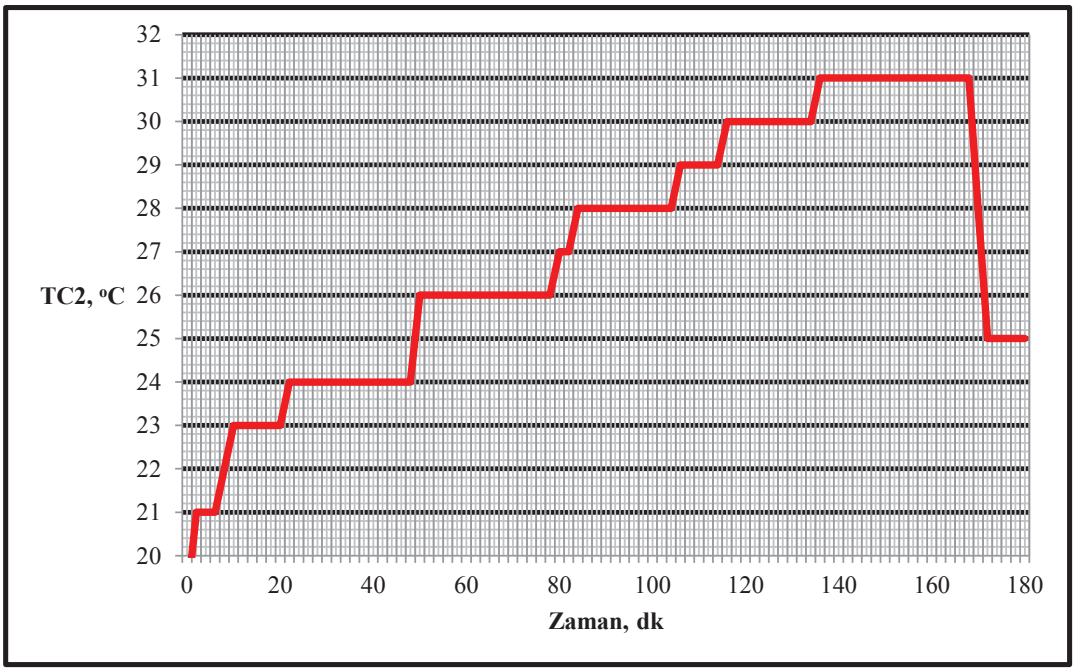
Şekil 6.15. Konstrüksiyon tip 2 için CO emisyonunun zamanla değişimi



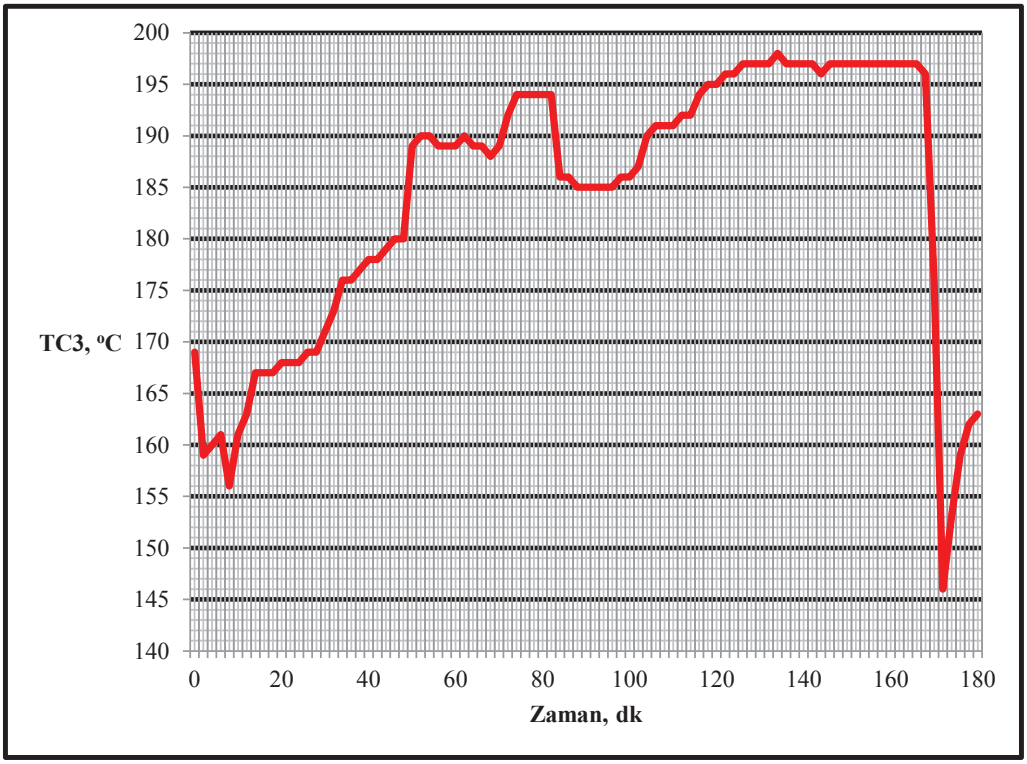
Şekil 6.16. Konstrüksiyon tip 2 için CO_2 emisyonunun zamanla değişimi



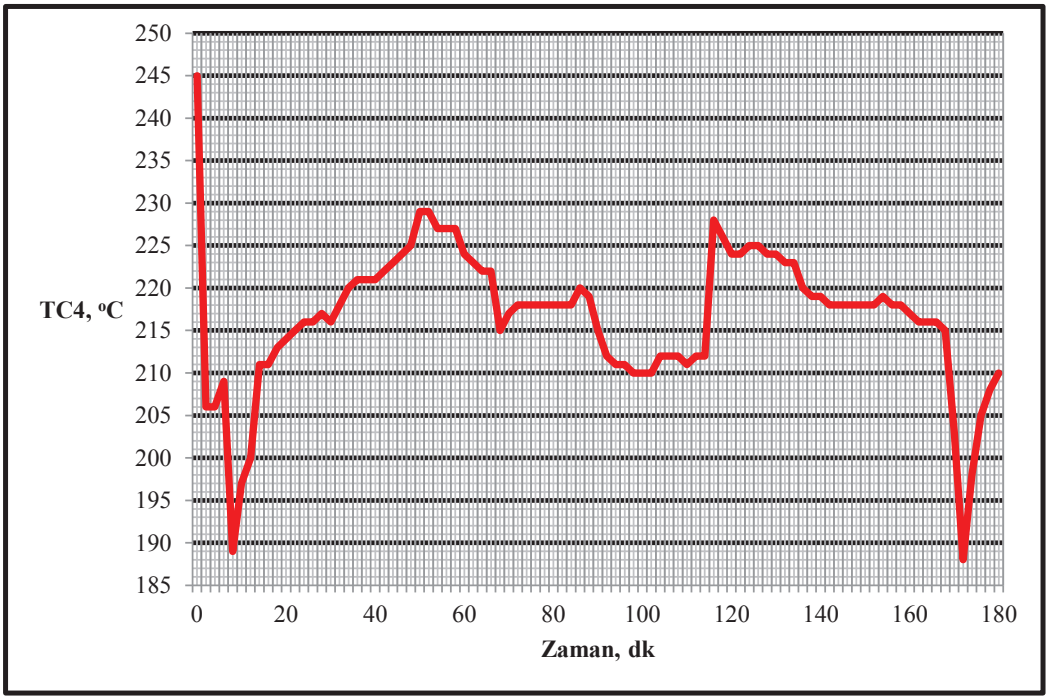
Şekil 6.17. Konstrüksiyon tip 2 için 1 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



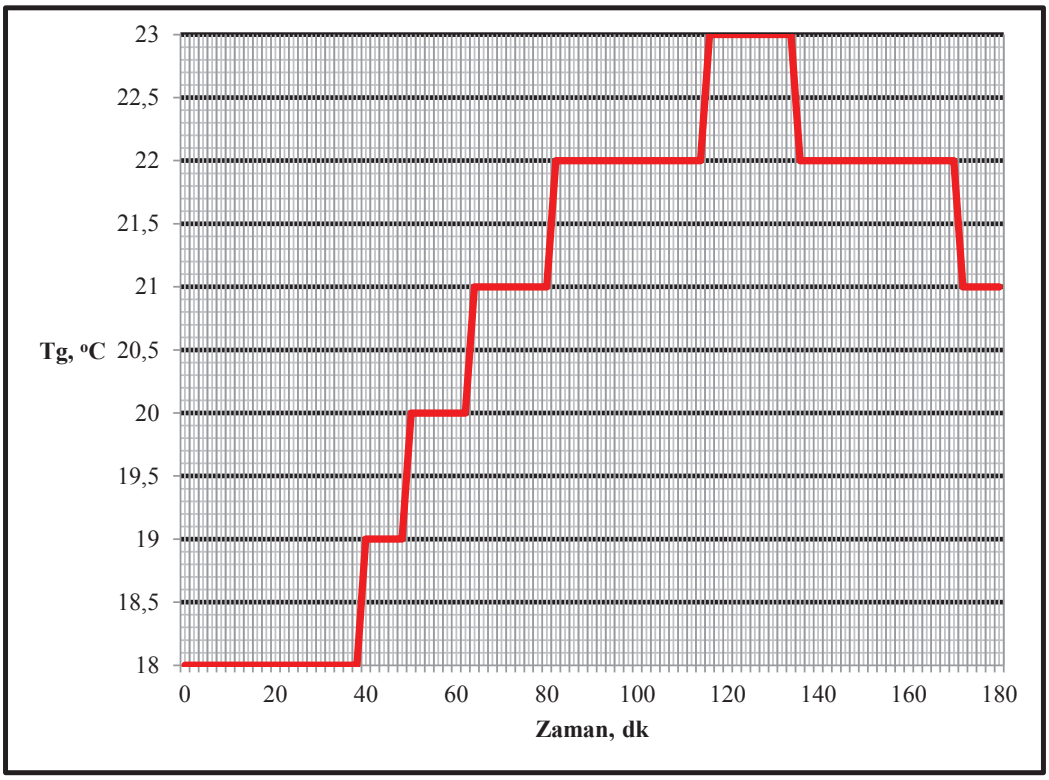
Şekil 6.18. Konstrüksiyon tip 2 için 2 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



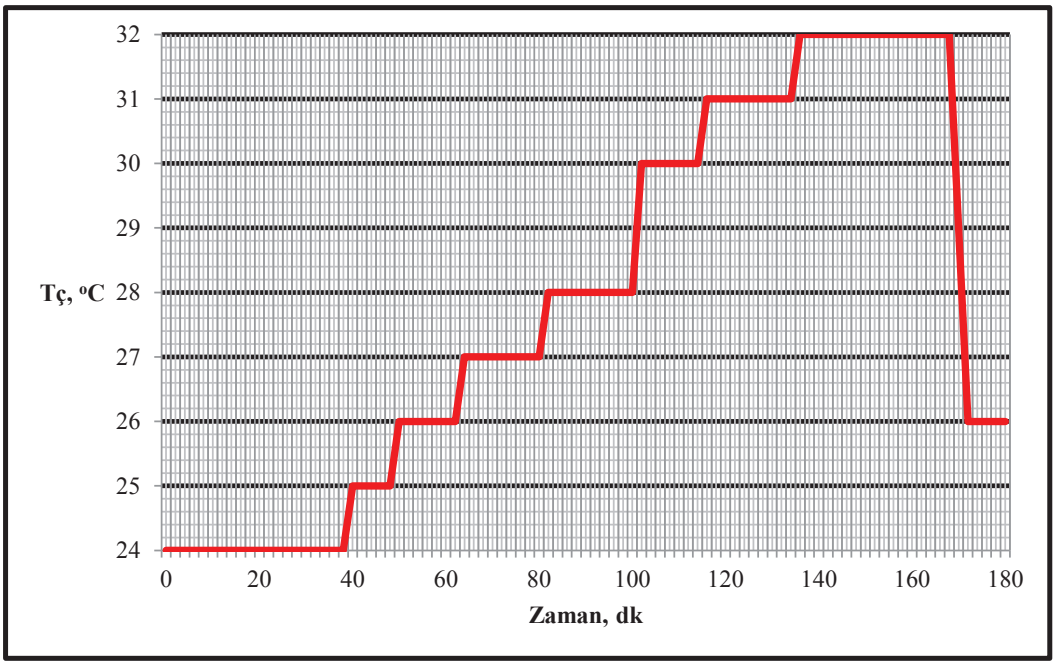
Şekil 6.19. Konstrüksiyon tip 2 için 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



Şekil 6.20. Konstrüksiyon tip 2 için 4 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



Şekil 6.21. Konstrüksiyon tip 2 için kazan su giriş sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 6.22. Konstrüksiyon tip 2 için kazan su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi

6.3. Konstrüksiyon Tip 3 Deney Sonuçları

Konstrüksiyon tip 3 deneyleri sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.3'de 180 dk.'lık bir periyot için verilmiştir.

Çizelge 6.3. Konstrüksiyon tip 3 deney sonuçları

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, ^oC	TC2, ^oC	TC3, ^oC	TC4, ^oC	Tg, ^oC	Tç, ^oC
0	2,00	9,90	1480	9,62	90,10	21	25	126	173	20	26
2	2,50	12,60	1490	7,92	89,70	21	25	113	142	20	26
4	1,52	6,80	1290	13,20	89,40	23	28	154	180	22	28
6	1,47	6,70	1472	13,70	89,50	24	28	164	200	22	28
8	1,46	6,30	1397	13,60	89,70	24	28	169	205	22	28
10	1,45	6,30	1240	13,80	89,70	24	28	169	206	22	28
12	1,45	6,50	1041	13,70	89,90	24	28	171	209	22	28
14	1,46	6,60	775	13,60	89,80	24	28	172	210	22	28
16	1,44	6,60	705	13,80	89,70	24	28	173	211	22	28
18	1,46	6,70	616	13,40	89,70	24	28	173	211	22	28
20	1,48	6,90	520	13,30	89,20	24	28	174	211	22	28
22	1,48	6,70	465	13,40	88,80	24	28	174	212	22	28
24	1,49	6,90	390	13,20	89,00	24	28	174	212	22	28
26	1,51	7,10	360	13,00	88,80	24	28	175	211	22	28
28	1,54	7,30	227	12,60	88,60	24	28	176	210	22	28
30	1,53	7,30	224	13,10	88,70	24	28	176	210	22	28
32	1,54	7,30	207	12,80	88,30	24	29	177	212	22	29
34	1,53	7,20	195	13,10	88,90	25	29	177	212	22	29
36	1,51	7,10	180	12,90	88,80	25	29	178	212	22	29
38	1,54	7,40	162	12,90	88,50	25	29	177	212	22	29
40	1,57	7,60	154	12,60	88,40	25	29	178	212	22	29
42	1,56	7,40	109	12,80	87,90	25	29	180	215	22	29
44	1,53	7,20	113	12,90	88,50	25	29	182	217	22	29
46	1,53	7,30	101	12,80	88,60	25	29	182	218	22	29
48	1,54	7,30	110	12,90	88,70	25	29	183	219	22	29
50	1,53	7,20	105	12,90	87,80	25	29	184	219	22	29
52	1,50	7,20	101	13,10	87,70	25	29	184	220	22	29
54	1,54	7,40	101	12,90	87,70	25	29	185	220	22	29
56	1,52	7,30	99	13,00	88,40	26	29	185	221	22	29
58	1,52	7,10	95	12,90	88,00	26	29	186	221	22	29
60	1,53	7,30	83	12,90	87,40	26	29	187	221	22	29

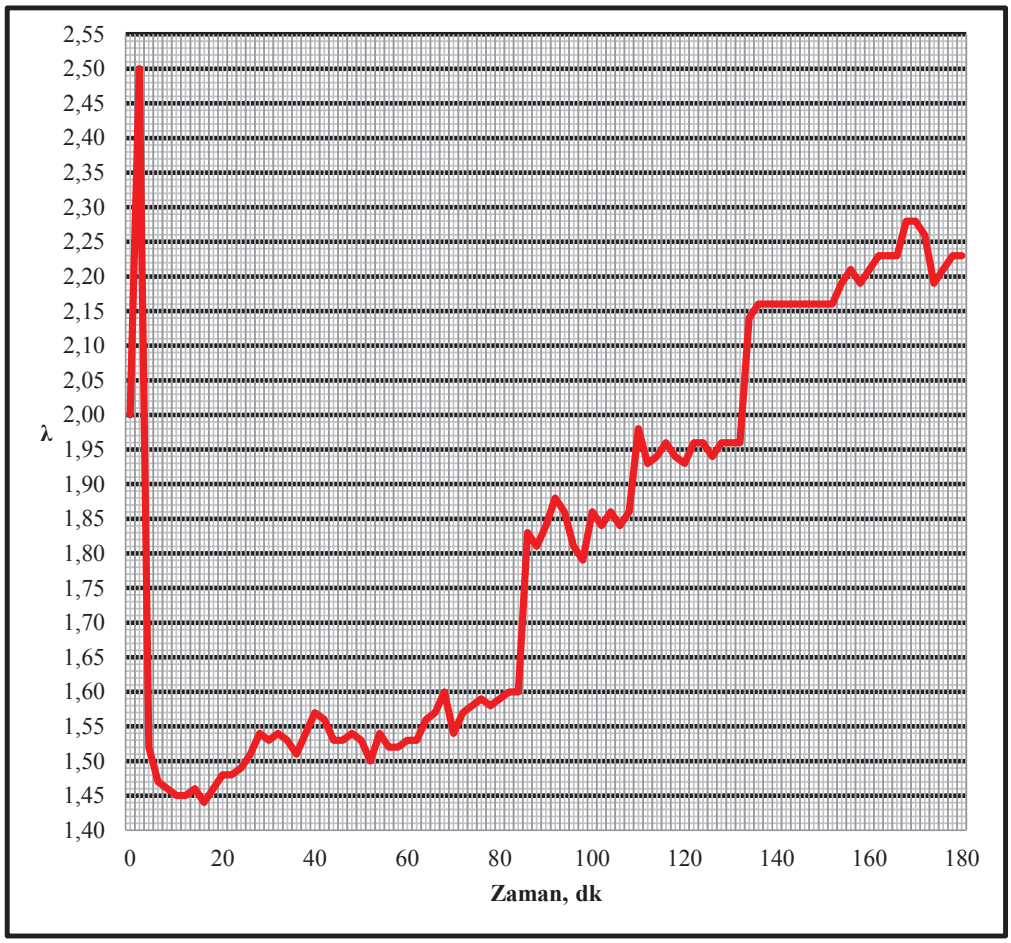
Çizelge 6.3 Devam

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, °C	TC2, °C	TC3, °C	TC4, °C	Tg, °C	Tç, °C
62	1,53	7,30	81	12,80	87,70	26	30	187	221	22	29
64	1,56	7,50	81	12,70	87,30	26	30	187	221	22	29
66	1,57	7,70	75	12,50	86,40	26	30	193	227	24	30
68	1,60	7,50	67	12,60	86,50	26	30	195	229	24	30
70	1,54	7,50	66	12,80	86,80	26	30	196	230	24	30
72	1,57	7,60	71	12,60	86,70	26	30	196	231	24	30
74	1,58	7,70	77	12,50	86,30	26	30	196	231	24	30
76	1,59	7,80	67	12,50	86,30	26	31	197	231	24	30
78	1,58	7,60	70	12,50	86,60	27	31	197	231	24	30
80	1,59	7,90	68	12,50	86,90	27	31	198	231	24	30
82	1,60	7,80	73	12,50	86,50	27	31	198	231	24	30
84	1,60	8,00	72	12,20	86,70	27	31	198	231	24	30
86	1,83	9,30	85	10,80	85,80	28	32	192	209	25	32
88	1,81	9,30	86	11,00	85,90	28	32	194	210	25	32
90	1,84	9,50	85	10,80	85,90	28	32	194	210	25	32
92	1,88	9,90	93	10,90	85,30	28	32	195	210	25	32
94	1,86	9,70	112	10,80	84,90	28	32	196	211	25	32
96	1,81	9,40	102	10,90	85,50	28	32	196	212	25	32
98	1,79	9,60	91	11,00	84,30	28	32	196	212	25	32
100	1,86	9,70	100	10,50	84,30	28	32	197	213	24	32
102	1,84	9,90	116	10,80	84,60	28	32	198	213	24	32
104	1,86	9,60	111	10,40	83,80	28	32	198	213	24	32
106	1,84	9,90	121	10,80	84,50	28	33	199	213	24	32
108	1,86	9,70	110	10,60	84,20	28	33	199	213	24	32
110	1,98	10,00	134	10,20	83,50	29	33	197	211	25	32
112	1,93	10,10	126	10,10	84,10	29	33	195	209	25	32
114	1,94	10,30	127	10,20	82,90	29	33	194	209	25	32
116	1,96	10,30	128	10,20	83,40	29	33	194	209	25	32
118	1,94	10,20	125	10,30	83,40	29	33	194	209	25	32
120	1,93	10,30	127	10,20	83,00	29	33	194	208	25	32

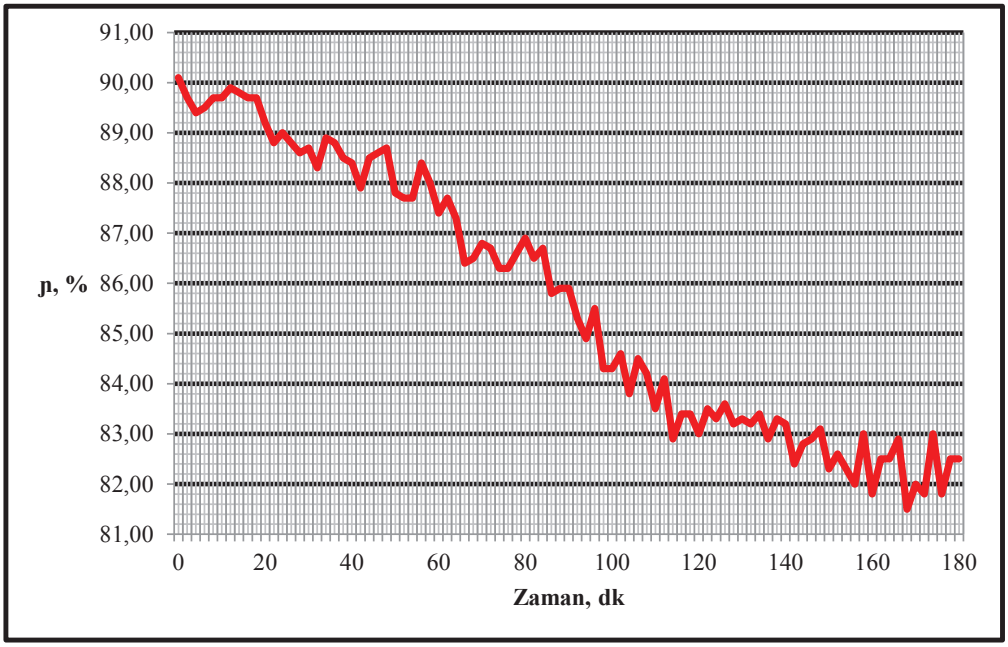
Çizelge 6.3 Devam

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, °C	TC2, °C	TC3, °C	TC4, °C	Tg, °C	Tç, °C
122	1,96	10,20	125	10,10	83,50	29	33	193	208	25	32
124	1,96	10,30	122	10,20	83,30	30	34	193	208	25	32
126	1,94	10,20	120	10,20	83,60	30	34	193	208	25	32
128	1,96	10,30	123	10,10	83,20	30	34	193	208	25	32
130	1,96	10,30	124	10,20	83,30	30	34	193	207	25	32
132	1,96	10,30	128	10,10	83,20	30	34	193	207	25	32
134	2,14	11,20	170	9,24	83,40	30	34	193	201	24	32
136	2,16	11,30	178	9,15	82,90	30	34	193	200	24	32
138	2,16	11,20	179	9,05	83,30	30	35	192	200	24	32
140	2,16	11,30	180	9,15	83,20	30	35	192	200	24	32
142	2,16	11,30	180	9,15	82,40	30	35	192	200	24	32
144	2,16	11,30	185	9,05	82,80	30	35	192	199	24	32
146	2,16	11,40	185	9,05	82,90	30	35	192	199	24	32
148	2,16	11,40	185	9,15	83,10	31	35	192	198	24	32
150	2,16	11,30	183	9,05	82,30	31	36	192	198	24	32
152	2,16	11,30	185	9,24	82,60	31	36	192	198	24	32
154	2,19	11,50	195	9,05	82,30	31	36	189	197	24	32
156	2,21	11,50	201	8,96	82,00	32	37	189	196	24	32
158	2,19	11,40	204	8,96	83,00	32	37	189	196	24	32
160	2,21	11,50	205	8,86	81,80	32	37	189	196	24	32
162	2,23	11,60	215	8,86	82,50	32	37	188	195	24	32
164	2,23	11,60	223	8,86	82,50	32	38	188	195	24	32
166	2,23	11,60	226	8,77	82,90	32	38	188	195	24	32
168	2,28	11,70	227	8,77	81,50	32	38	188	195	24	32
170	2,28	11,80	255	8,77	82,00	32	38	188	195	24	32
172	2,26	12,00	248	8,39	81,80	32	38	188	194	24	32
174	2,19	11,40	204	8,96	83,00	32	38	189	196	24	32
176	2,21	11,50	205	8,86	81,80	33	39	189	196	24	32
178	2,23	11,60	215	8,86	82,50	33	39	188	195	24	32
180	2,23	11,60	223	8,86	82,50	33	39	188	195	24	32

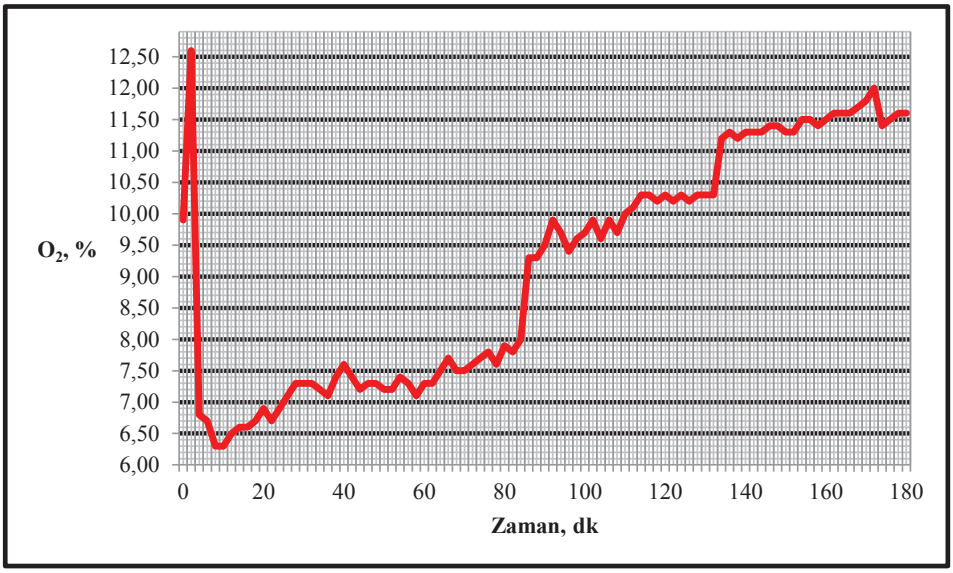
Konstrüksiyon tip 3 için elde edilen deney sonuçları ile zamana bağlı olarak çizilen grafikler aşağıda verilmiştir (Şekil 6.23–6.33).



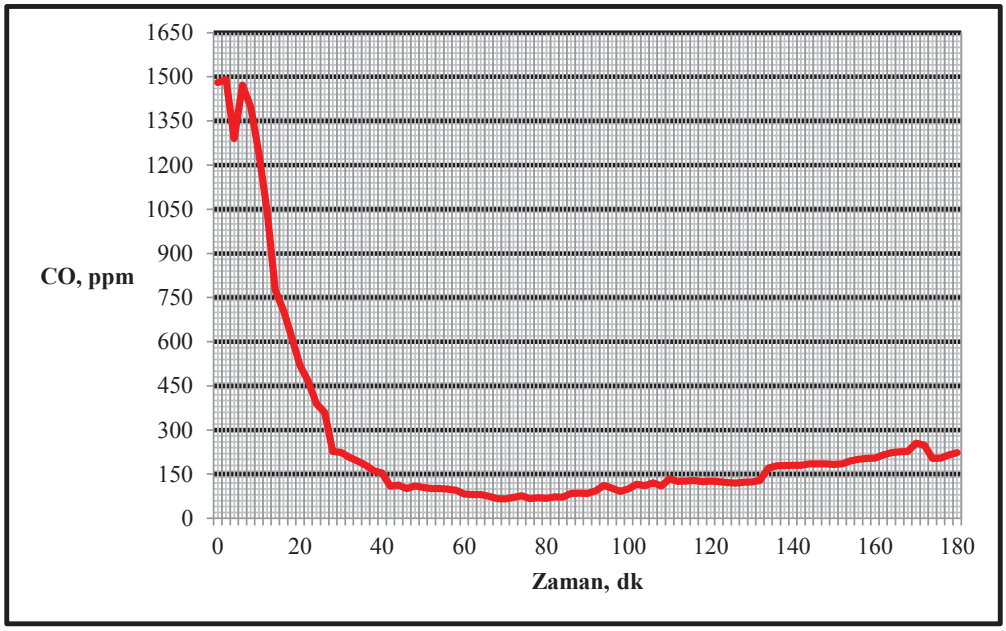
Şekil 6.23. Konstrüksiyon tip 3 için hava fazlalık katsayısının zamanla değişimi



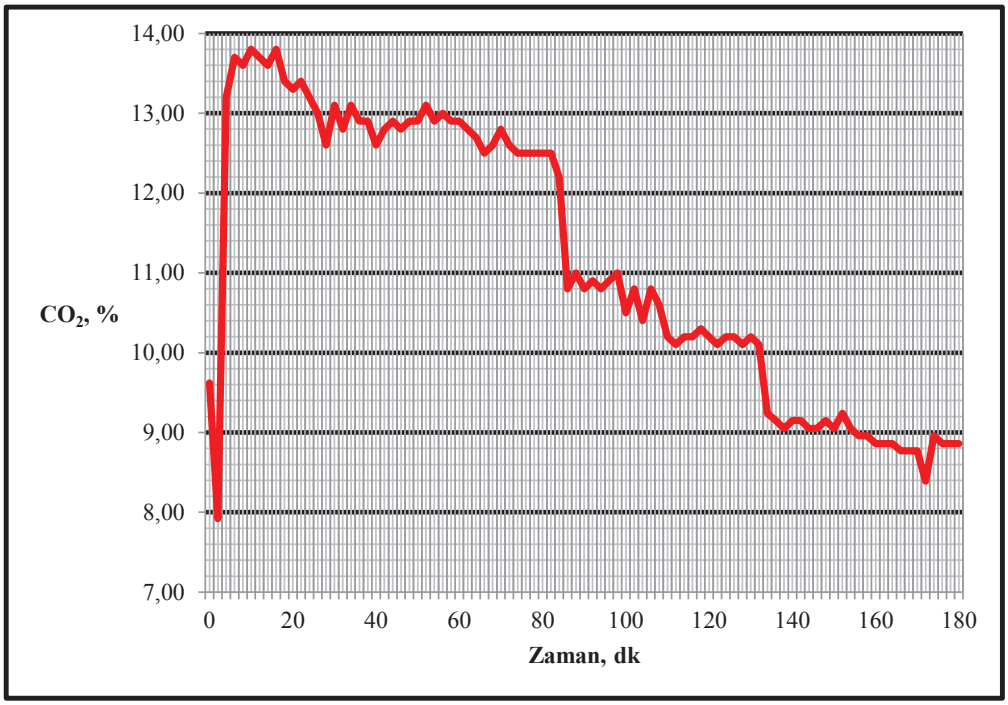
Şekil 6.24. Konstrüksiyon tip 3 için yanma veriminin zamanla değişimi



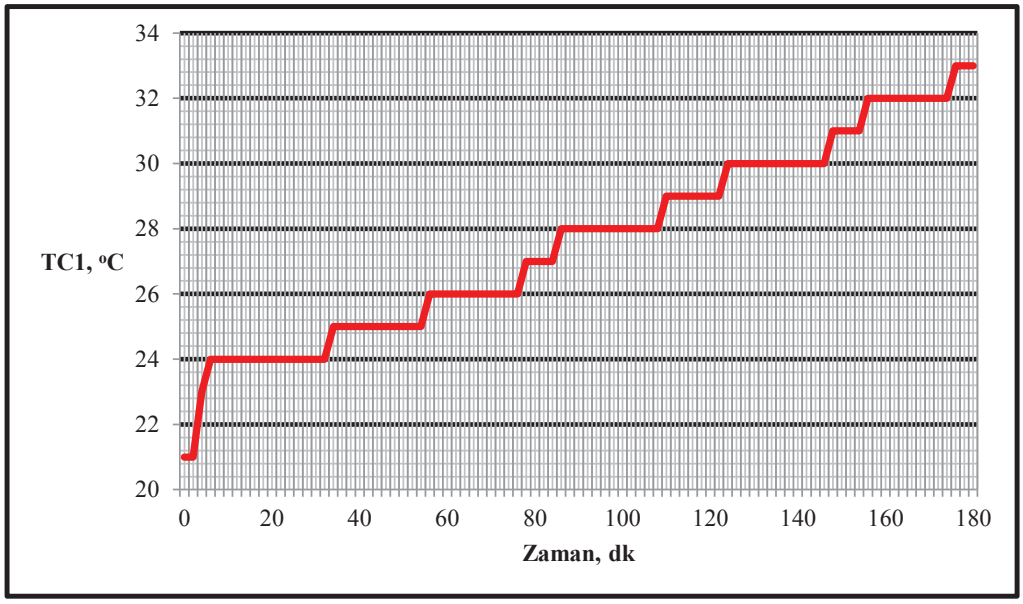
Şekil 6.25. Konstrüksiyon tip 3 için O_2 emisyonunun zamanla değişimi



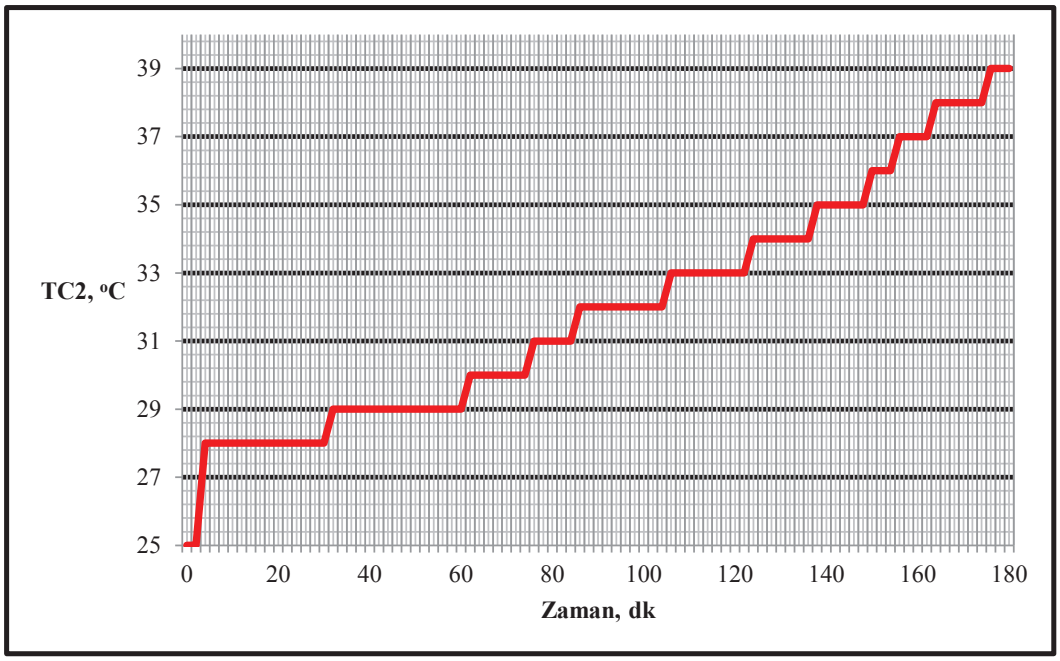
Şekil 6.26. Konstrüksiyon tip 3 için CO emisyonunun zamanla değişimi



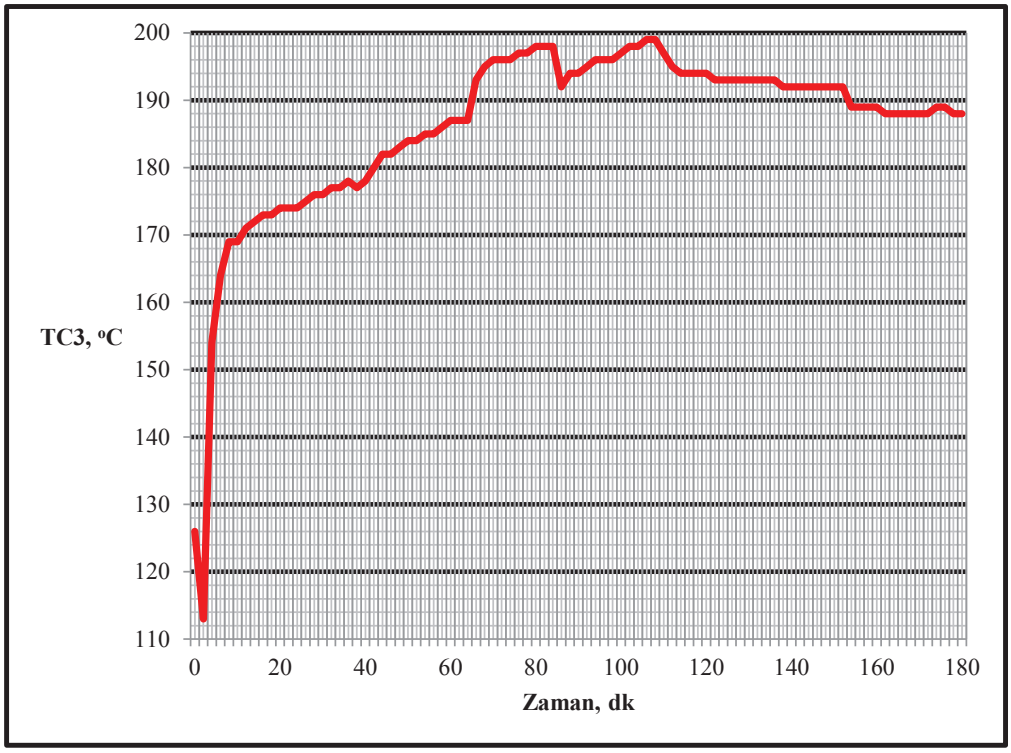
Şekil 6.27. Konstrüksiyon tip 3 için CO_2 emisyonunun zamanla değişimi



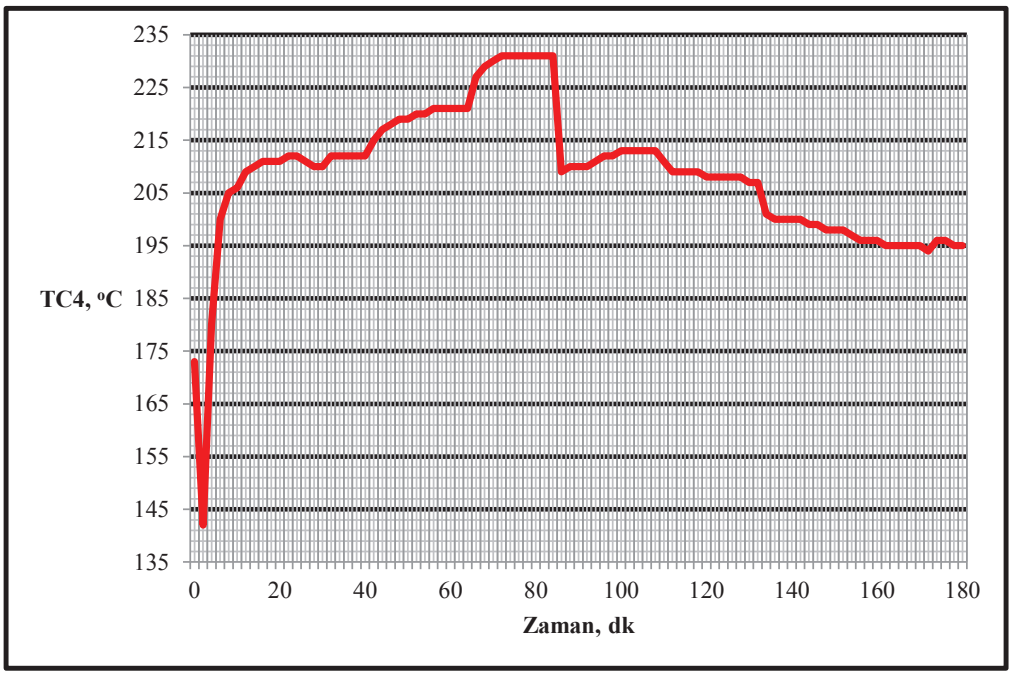
Şekil 6.28. Konstrüksiyon tip 3 için 1 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



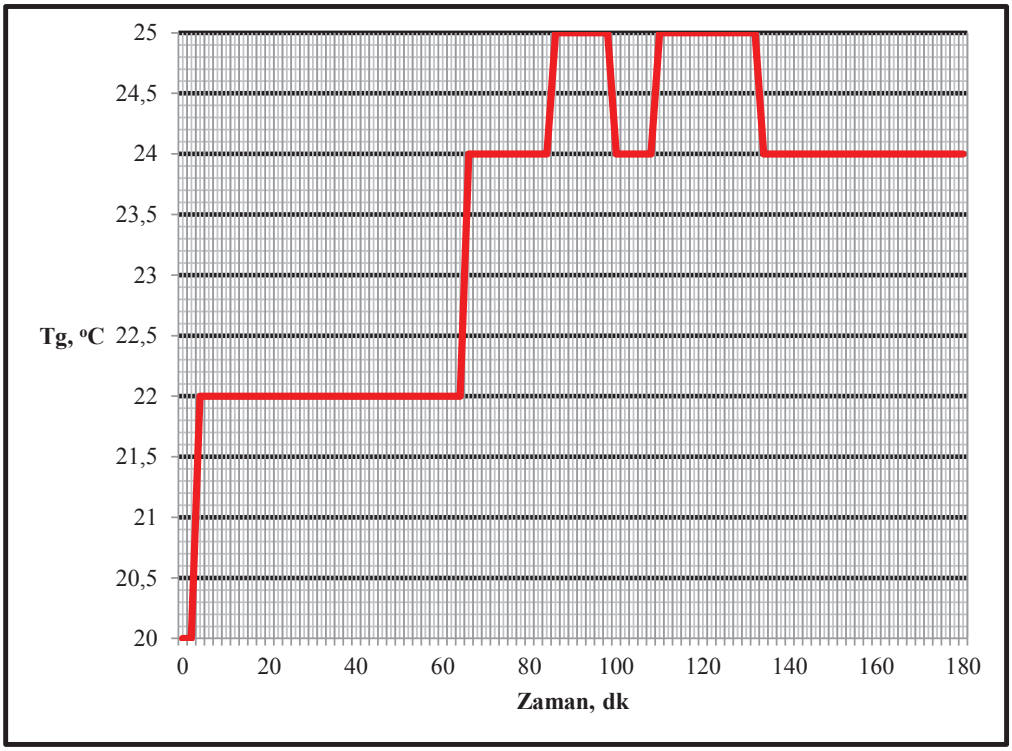
Şekil 6.29. Konstrüksiyon tip 3 için 2 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



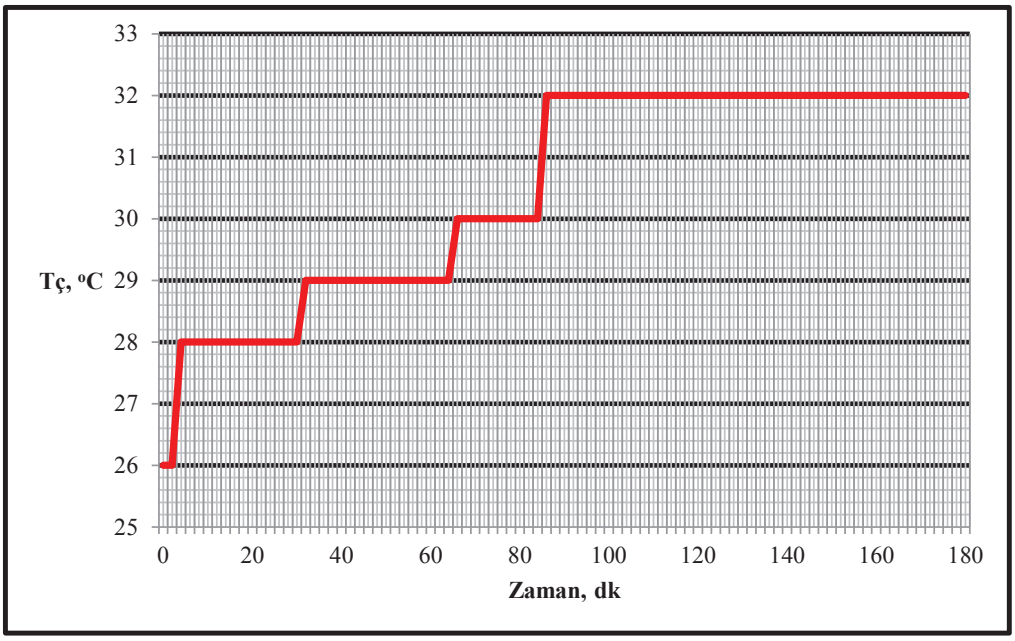
Şekil 6.30. Konstrüksiyon tip 3 için 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



Şekil 6.31. Konstrüksiyon tip 3 için 4 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



Şekil 6.32. Konstrüksiyon tip 3 için kazan su giriş sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 6.33. Konstrüksiyon tip 3 için kazan su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi

6.4. Konstrüksiyon Tip 4 Deney Sonuçları

Konstrüksiyon tip 4 deneyleri sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.4'te 180 dk.'lık bir periyot için sunulmuştur.

Çizelge 6.4. Konstrüksiyon tip 4 deney sonuçları

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, °C	TC2, °C	TC3, °C	TC4, °C	Tg, °C	Tç, °C
0	1,89	9,70	2417	10,50	90,30	19	22	125	170	20	28
2	3,28	11,30	1387	9,00	81,60	21	23	124	148	20	28
4	2,09	11,10	640	9,50	89,10	22	24	133	161	20	30
6	2,04	10,90	677	9,60	89,50	22	24	127	162	20	30
8	2,07	10,60	660	9,80	89,10	22	24	126	162	20	30
10	1,81	9,40	446	10,90	90,20	22	25	128	168	20	30
12	2,28	11,60	428	8,86	86,40	23	25	128	168	20	30
14	1,83	9,50	400	10,80	88,70	23	25	130	166	20	30
16	1,75	8,90	269	11,30	89,70	23	25	130	168	20	30
18	1,69	8,70	310	11,50	91,20	24	26	136	172	20	32
20	1,71	8,90	188	11,60	89,30	24	26	136	173	22	32
22	1,80	9,40	210	11,10	91,30	24	26	136	172	22	32
24	1,42	6,20	55	14,10	88,60	25	26	154	178	22	32
26	1,40	6,00	56	13,71	88,90	25	26	156	180	22	32
28	1,40	6,00	55	13,71	88,80	25	26	158	182	22	32
30	1,40	6,00	59	13,71	88,60	25	26	161	183	22	32
32	1,38	5,78	62	14,14	88,80	25	26	162	184	22	32
34	1,38	5,78	58	14,14	88,70	25	26	164	185	22	32
36	1,38	5,78	54	14,14	88,60	25	26	165	186	22	32
38	1,37	5,67	55	14,24	88,60	25	26	167	190	22	32
40	1,37	5,70	56	14,20	88,50	25	26	168	193	22	32
42	1,37	5,70	55	14,50	88,40	26	26	172	197	22	32
44	1,37	5,70	59	14,50	88,30	26	26	178	203	22	34
46	1,51	7,09	72	12,92	87,20	26	27	181	204	22	34
48	1,51	7,09	92	12,92	87,00	26	27	184	207	22	34
50	1,51	7,20	108	13,20	87,80	26	27	187	209	22	34
52	1,52	7,18	127	12,84	86,70	26	27	188	211	23	35
54	1,54	7,36	138	12,67	86,60	26	27	188	212	23	35
56	1,56	7,40	141	12,90	87,20	26	27	188	213	23	36
58	1,56	7,54	123	12,51	86,50	26	27	189	214	23	36
60	1,51	7,09	118	12,92	86,80	26	27	189	216	23	36

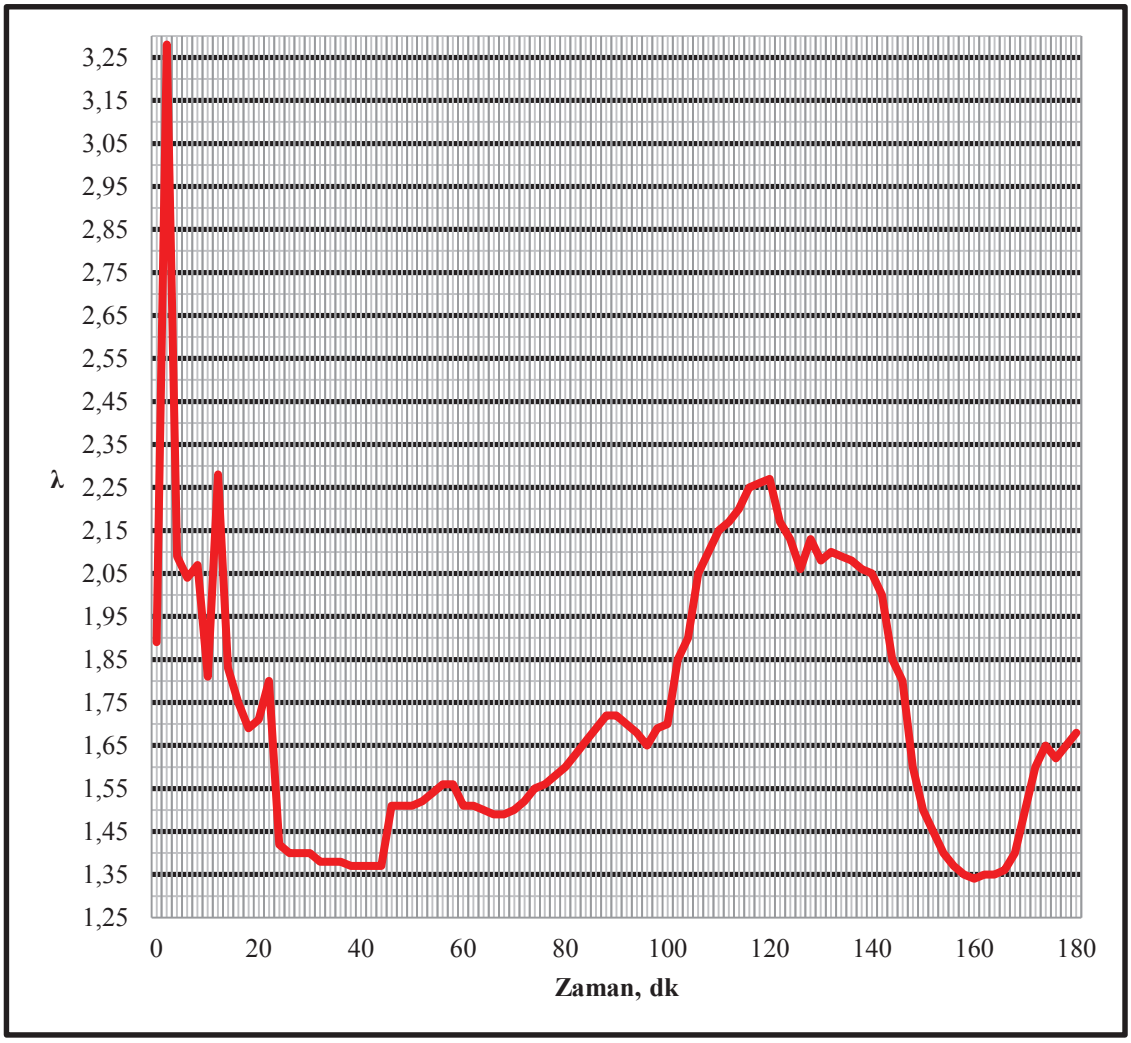
Çizelge 6.4 Devam

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, ^oC	TC2, ^oC	TC3, ^oC	TC4, ^oC	Tg, ^oC	Tç, ^oC
62	1,51	7,00	108	13,20	87,00	26	27	189	217	24	36
64	1,50	7,00	103	13,01	86,80	26	27	190	218	24	36
66	1,49	6,90	97	13,20	87,10	27	27	190	219	24	36
68	1,49	6,90	49	13,30	86,90	27	28	192	220	25	36
70	1,50	7,10	37	13,20	87,10	27	28	193	219	25	38
72	1,52	7,20	70	13,00	86,70	28	28	195	220	25	38
74	1,55	7,45	67	12,59	86,30	28	28	195	220	25	38
76	1,56	7,54	68	12,51	86,20	28	28	195	220	25	38
78	1,58	7,71	67	12,35	86,10	28	29	195	220	25	38
80	1,60	7,88	66	12,19	85,90	28	29	196	220	25	39
82	1,63	8,12	65	11,97	85,80	28	29	196	220	25	39
84	1,66	8,35	63	11,75	85,60	28	29	196	220	25	39
86	1,69	8,60	61	11,50	84,60	28	30	197	220	25	39
88	1,72	8,80	53	11,50	84,40	28	30	199	219	25	39
90	1,72	8,90	51	11,40	84,10	28	30	201	219	25	39
92	1,70	8,65	82	11,48	85,10	28	30	201	219	26	40
94	1,68	8,50	127	11,61	85,20	28	30	201	219	26	40
96	1,65	8,50	141	12,00	85,30	28	30	201	220	26	40
98	1,69	8,60	141	11,50	84,70	28	30	200	220	26	40
100	1,70	8,70	92	11,70	84,30	29	30	200	221	26	40
102	1,85	9,65	127	10,55	84,30	29	31	198	218	26	40
104	1,90	9,95	132	10,27	84,10	30	32	197	215	26	40
106	2,05	10,76	142	9,52	83,30	30	32	197	214	26	40
108	2,10	11,00	147	9,29	83,10	30	32	196	212	26	40
110	2,15	11,23	159	9,07	82,80	30	32	195	210	26	40
112	2,17	11,32	178	8,99	82,80	30	32	194	206	26	40
114	2,20	11,45	186	8,87	82,60	30	32	194	202	26	40
116	2,25	11,67	192	8,67	82,50	30	32	194	200	26	40
118	2,26	11,71	222	8,63	82,30	30	32	193	198	26	40
120	2,27	11,80	243	8,80	82,50	31	32	193	197	26	41

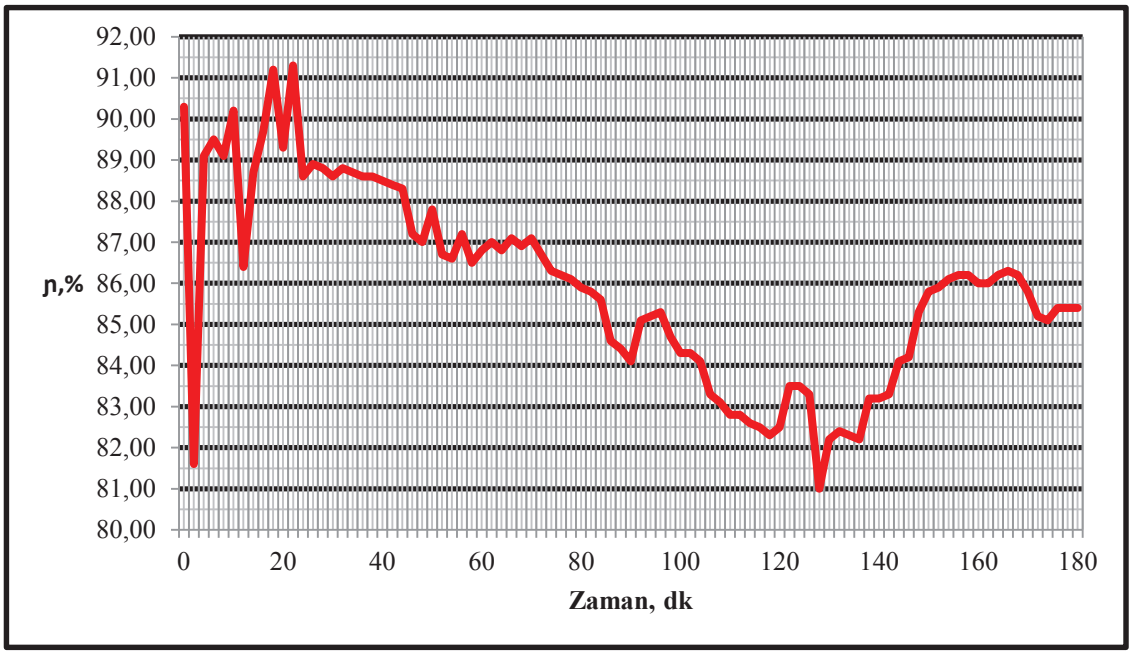
Çizelge 6.4 Devam

Zaman,dk	λ	O_2, %	CO, ppm	CO_2, %	ɲ, %	TC1, °C	TC2, °C	TC3, °C	TC4, °C	Tg, °C	Tç, °C
122	2,17	11,10	199	9,30	83,50	31	32	189	193	27	41
124	2,13	11,10	202	9,30	83,50	31	33	190	194	27	41
126	2,06	10,80	178	9,30	83,30	31	33	192	195	27	41
128	2,13	11,10	199	9,30	81,00	31	33	192	196	27	41
130	2,08	10,90	200	9,52	82,20	31	33	194	198	27	41
132	2,10	10,80	215	9,52	82,40	31	33	194	200	27	41
134	2,09	10,95	218	9,33	82,30	31	33	194	200	27	41
136	2,08	11,00	222	9,43	82,20	31	33	195	201	27	41
138	2,06	10,81	220	9,47	83,20	32	33	196	203	27	42
140	2,05	10,76	216	9,52	83,20	32	33	198	205	27	42
142	2,00	10,50	210	9,76	83,30	32	34	200	206	27	42
144	1,85	9,65	200	10,55	84,10	32	34	202	210	27	42
146	1,80	9,33	195	10,84	84,20	32	34	204	212	27	42
148	1,60	7,88	186	12,19	85,30	32	35	206	214	27	42
150	1,50	7,00	184	13,01	85,80	32	35	208	216	27	42
152	1,45	6,52	182	13,46	85,90	32	35	213	220	28	42
154	1,40	6,00	180	13,94	86,10	33	35	215	225	28	42
156	1,37	5,67	150	14,24	86,20	33	35	218	227	28	42
158	1,35	5,44	120	14,45	86,20	33	35	220	232	28	43
160	1,34	5,33	116	14,56	86,00	33	35	225	234	28	43
162	1,35	5,44	115	14,45	86,00	33	35	223	236	28	43
164	1,35	5,44	120	14,45	86,20	33	35	221	234	28	43
166	1,36	5,56	122	14,35	86,30	33	35	216	232	28	43
168	1,40	6,00	130	13,94	86,20	33	35	212	227	28	43
170	1,50	7,00	132	13,01	85,80	33	35	209	225	29	43
172	1,60	7,88	147	12,19	85,20	33	36	208	224	29	43
174	1,65	8,27	152	11,82	85,10	33	36	205	223	29	43
176	1,62	8,04	157	12,04	85,40	33	36	203	220	29	43
178	1,65	8,27	160	11,82	85,40	34	36	200	218	29	43
180	1,68	8,50	162	11,61	85,40	34	36	196	212	29	43

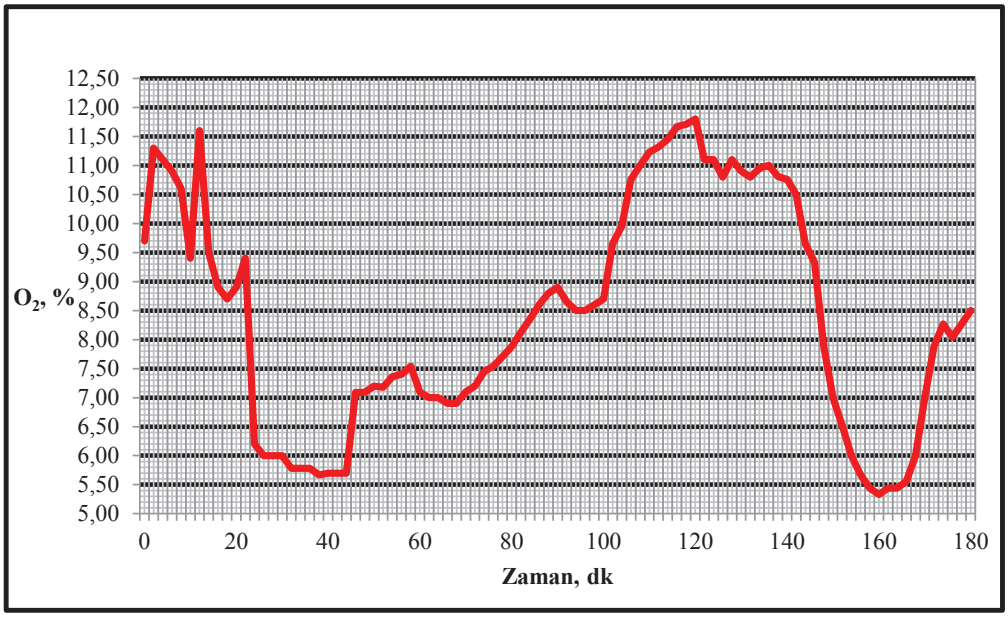
Konstrüksiyon tip 4 için elde edilen deney sonuçları ile zamana bağlı olarak çizilen grafikler Şekil 6.34–6.44'te verilmiştir.



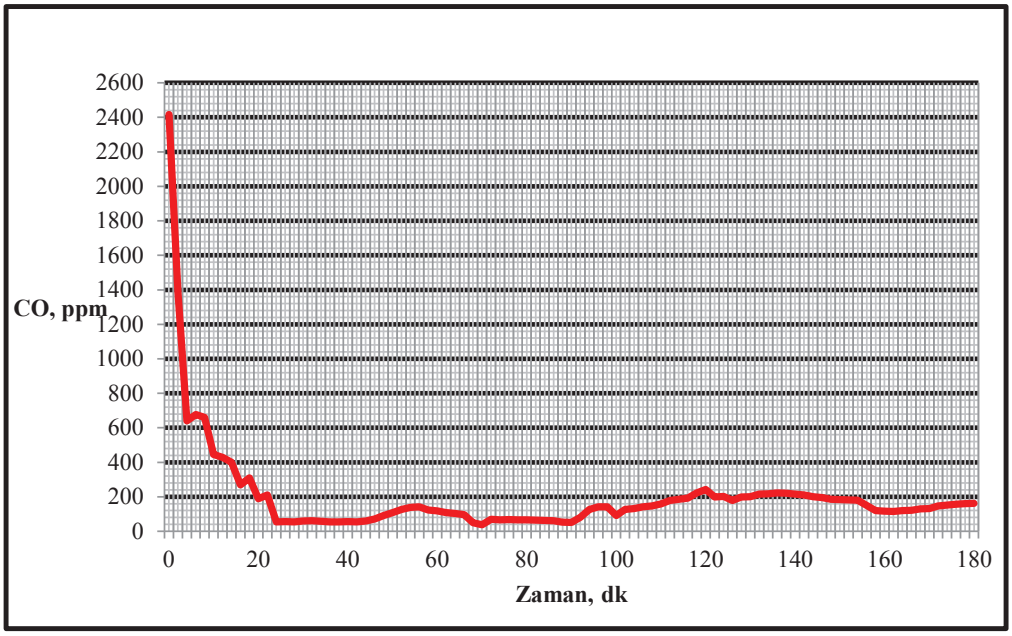
Şekil 6.34. Konstrüksiyon tip 4 için hava fazlalık katsayısının zamanla değişimi



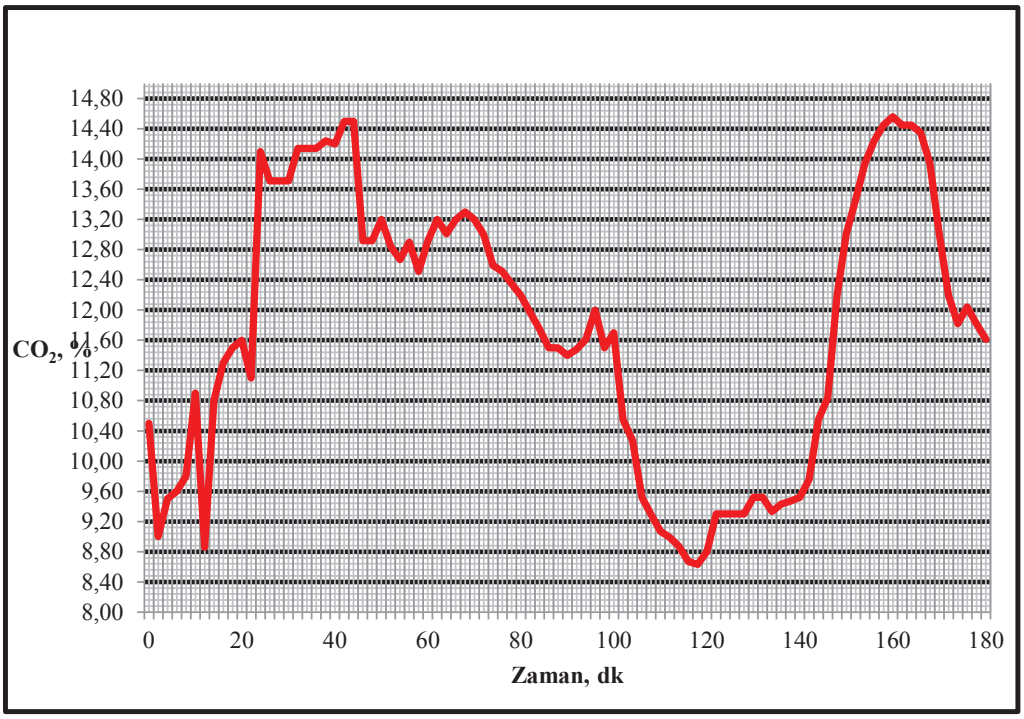
Şekil 6.35. Konstrüksiyon tip 4 için yanma veriminin zamanla değişimi



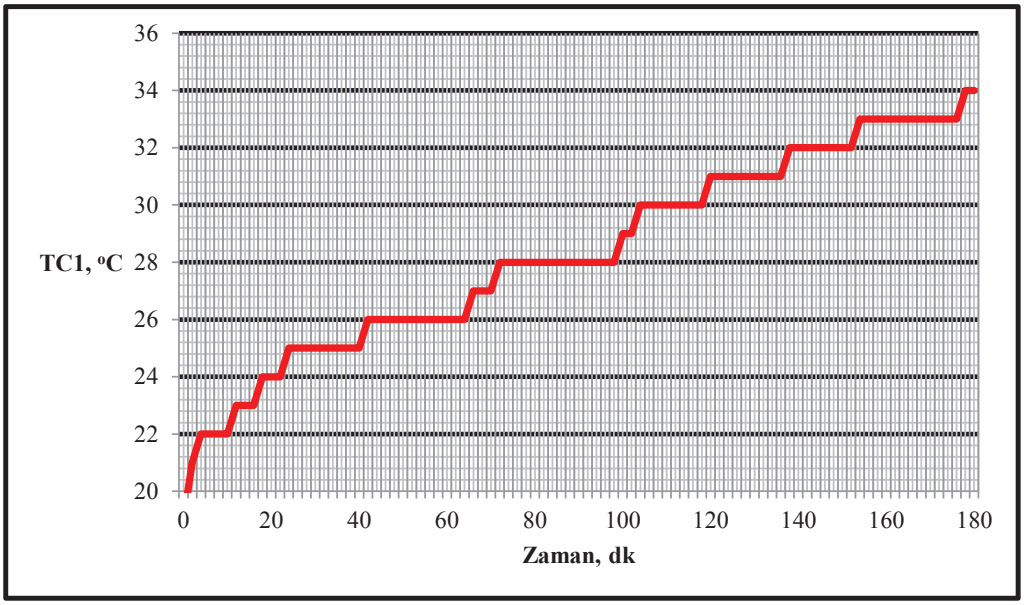
Şekil 6.36. Konstrüksiyon tip 4 için O_2 emisyonunun zamanla değişimi



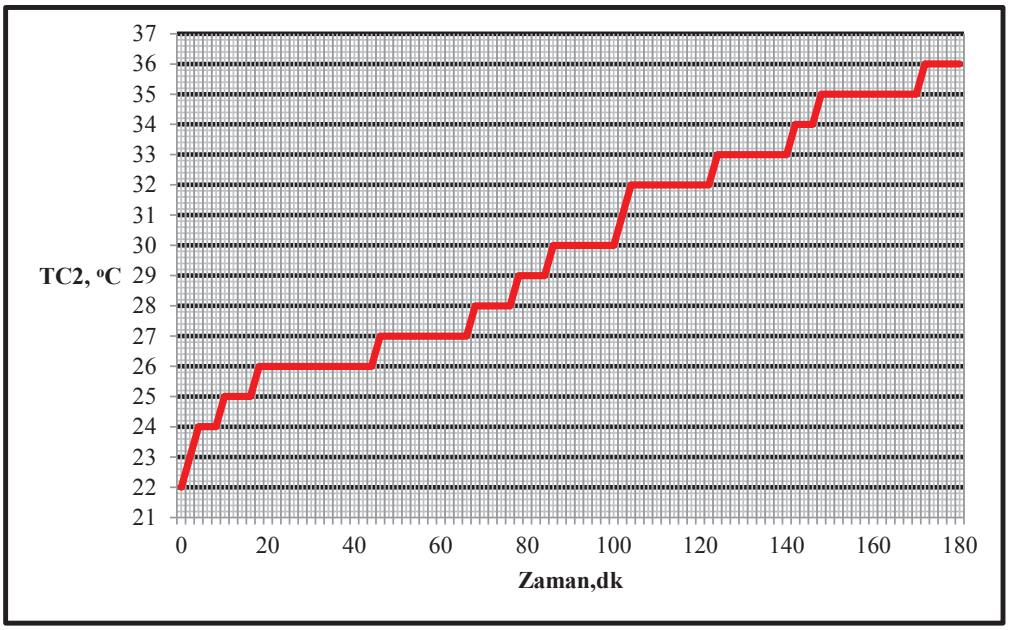
Şekil 6.37. Konstrüksiyon tip 4 için CO emisyonunun zamanla değişimi



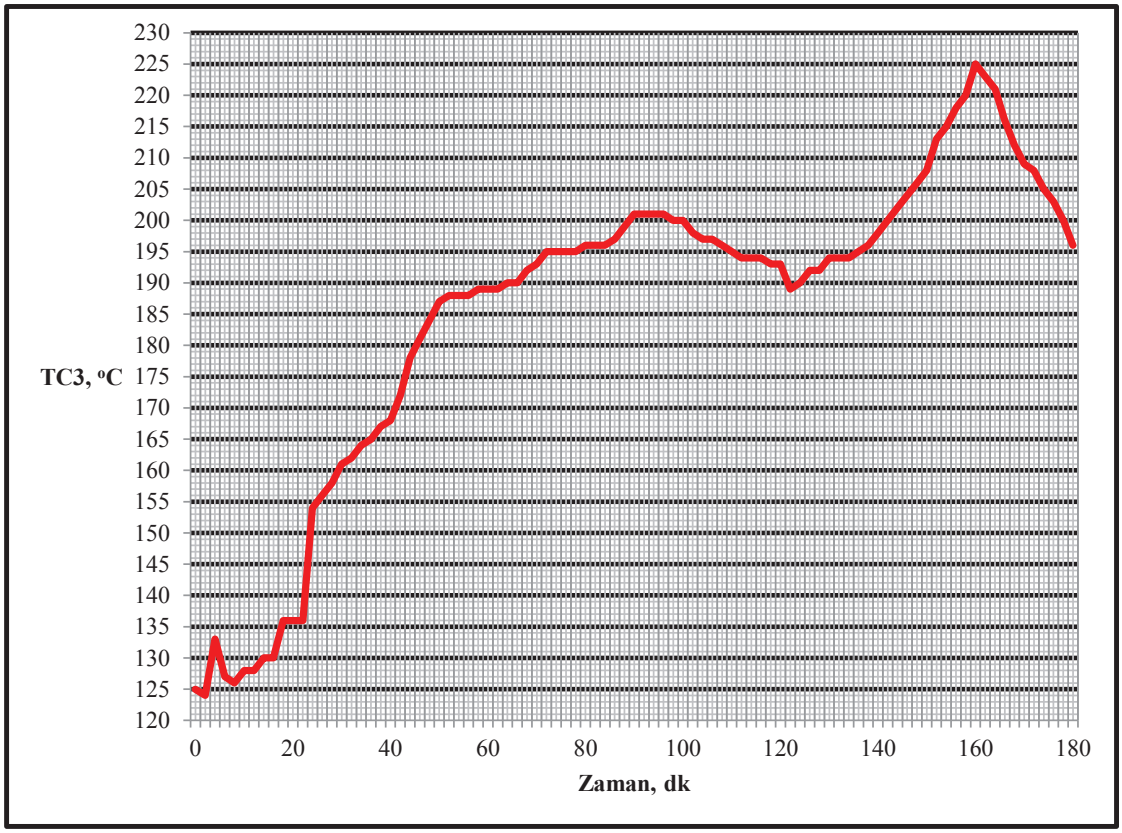
Şekil 6.38. Konstrüksiyon tip 4 için CO_2 emisyonunun zamanla değişimi



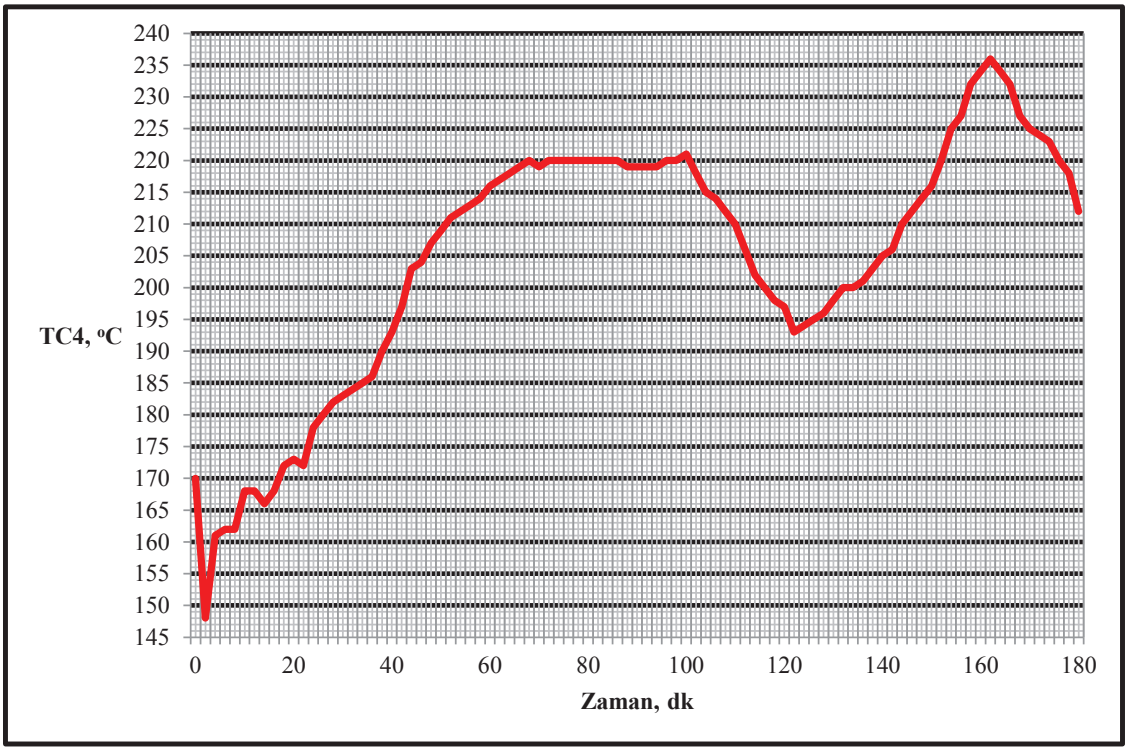
Şekil 6.39. Konstrüksiyon tip 4 için 1 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



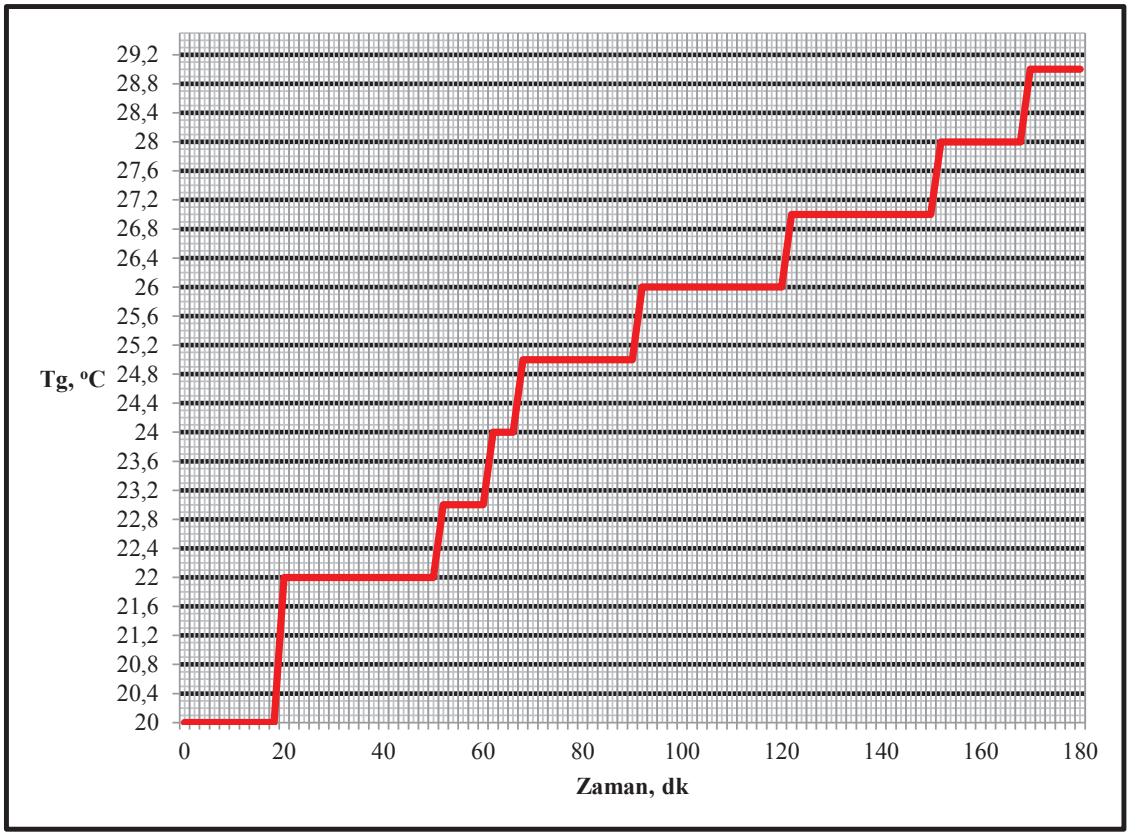
Şekil 6.40. Konstrüksiyon tip 4 için 2 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



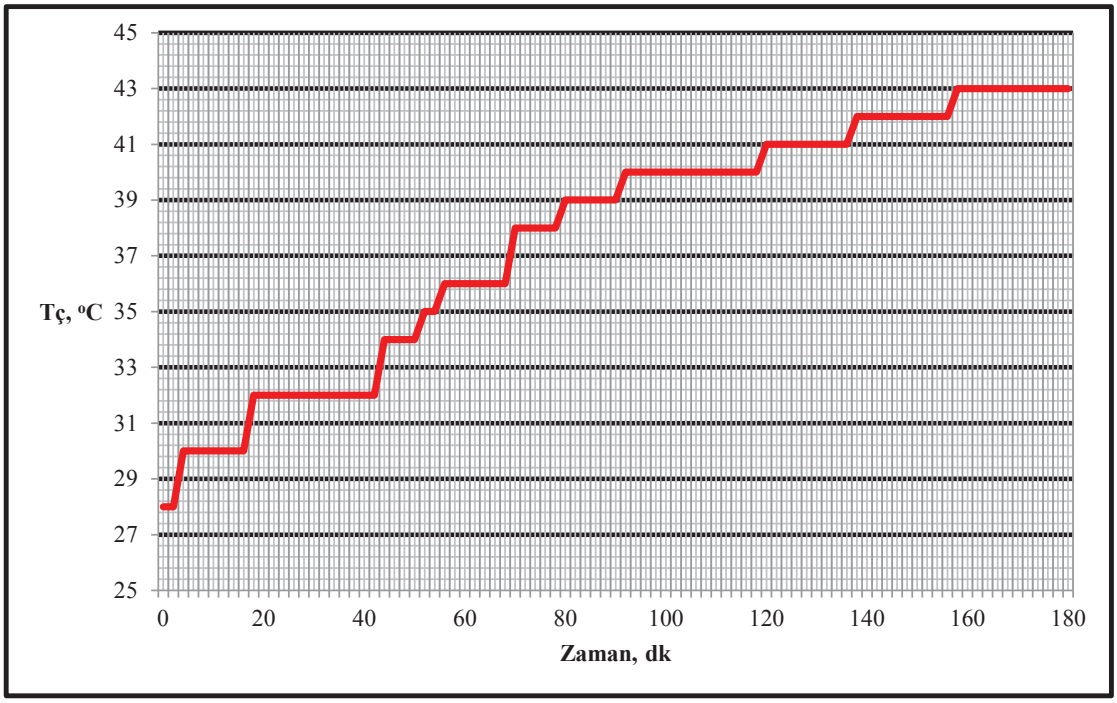
Şekil 6.41. Konstrüksiyon tip 4 için 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



Şekil 6.42. Konstrüksiyon tip 4 için 4 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi



Şekil 6.43. Konstrüksiyon tip 4 için kazan su giriş sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 6.44. Konstrüksiyon tip 4 için kazan su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi

6.5 Baca Gazı Emisyon Değerleri

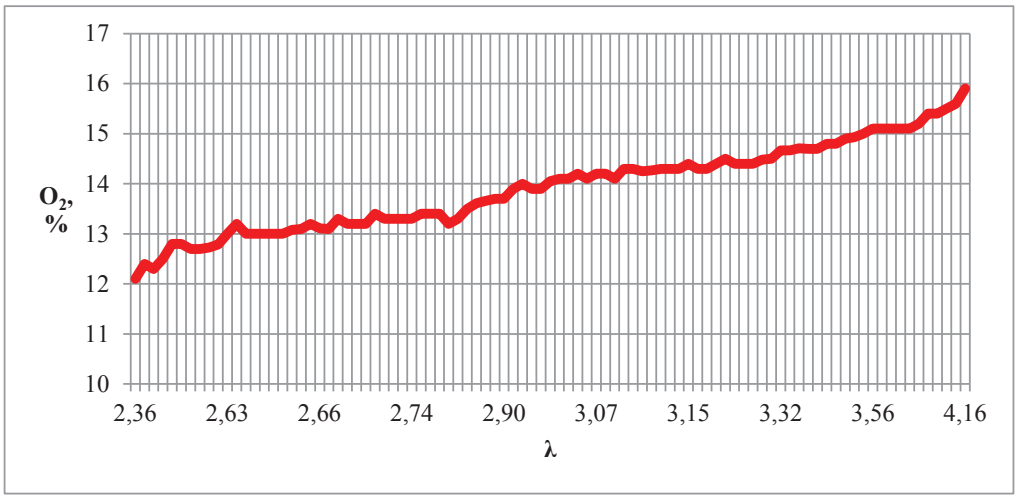
6.5.1 Hava fazlalık katsayısının baca gazı emisyon değerlerine etkisi

Hava fazlalık katsayısı, λ, yanma analizlerinde, yanma karakteristiği hakkında bilgi veren çok önemli bir veridir. Hava fazlalık katsayısı mümkün olduğunca 1'e yakın olmalıdır. Hava fazlalık katsayısının yüksek olması, yanma için verilen havanın, yanma prosesinde kullanılmadığını gösterir. Yanma prosesinde kullanılmayan hava, yakıt içerisindeki yanabilen elementleri yakamadığı gibi, ortam ısısından çalarak, yanma haznesi sıcaklığını düşürür ve yanmayı kötüleştirir. Yanmanın kötüleşmesi demek yanma veriminin düşmesi, zararlı emisyon miktarının artması, tam yanma olayının gerçekleşmemesidir.

Hava fazlalık katsayısı yanma prosesinde bu kadar büyük önem taşıdığı için yanma olayında dikkate alınan, ölçülen diğer parametrelerin hava fazlalık katsayısına göre davranışlarının bilinmesi yanma analizi için büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle hava fazlalık katsayısının ölçülen diğer parametrelere göre değişim grafikleri her bir konstrüksiyon tipine göre ayrı ayrı oluşturulmuştur.

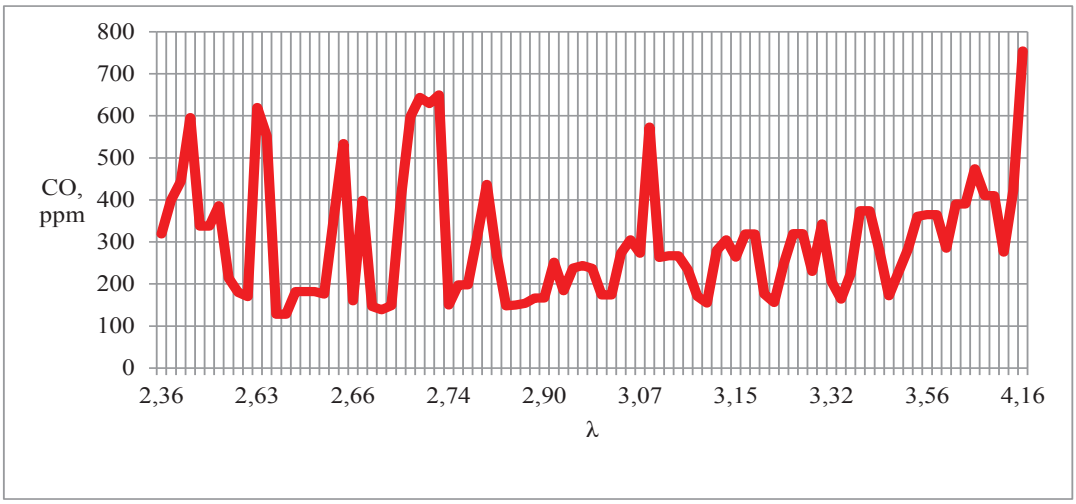
6.5.1.1 Konstrüksiyon tip 1 için hava fazlalık katsayısının baca gazı emisyon değerlerine etkisi

Konstrüksiyon tip 1 için O_2 emisyonunun hava fazlalık katsayısı ile değişimi Şekil 6.45'de gösterilmiştir. Hava fazlalık katsayısı, oksijen fazlalığını ifade ettiği için O_2 emisyonu ile hava fazlalık katsayısı arasında doğrusal ilişki vardır. Hava fazlalık katsayısı artarsa O_2 emisyonu artar, hava fazlalık katsayısı azalırsa O_2 emisyonu azalır.



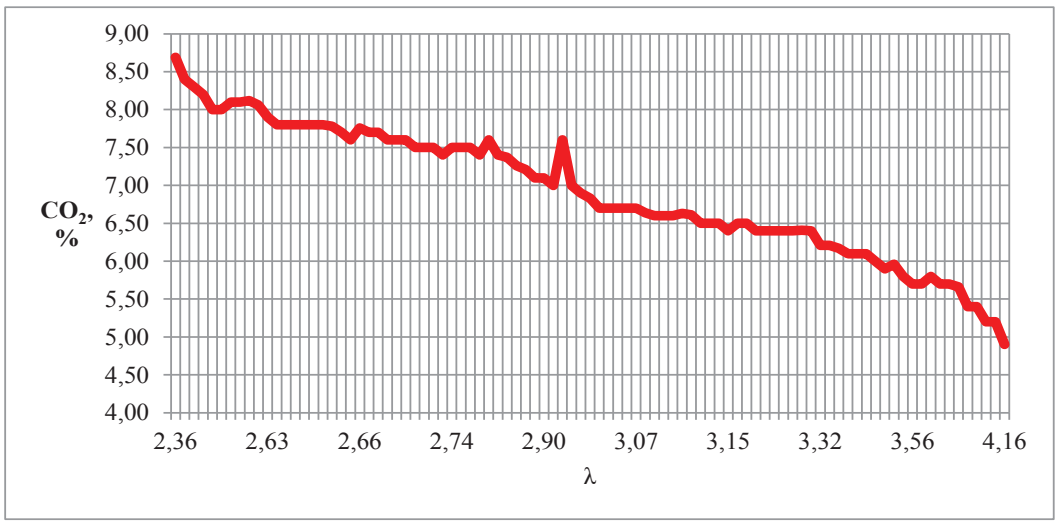
Şekil 6.45. Konstrüksiyon tip 1 için O_2 emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi

Konstrüksiyon tip 1 için karbon monoksit emisyonunun hava fazlalık katsayısı ile değişimi Şekil 6.46'da görülmektedir. CO emisyonunun fazla olması, tam yanma olmadığını gösterir. Hava fazlalık katsayısının da yüksek olması yanmanın kötü olduğunu gösterir. Bu nedenle, hava fazlalık katsayısı optimum değerinden sonra yükselmeye devam ederse CO emisyonu da yanma kötüleştiği için yükselecektir. Şekilde görüldüğü gibi, hava fazlalık katsayısının artışı ile CO emisyonu da artış eğilimine geçmiştir.



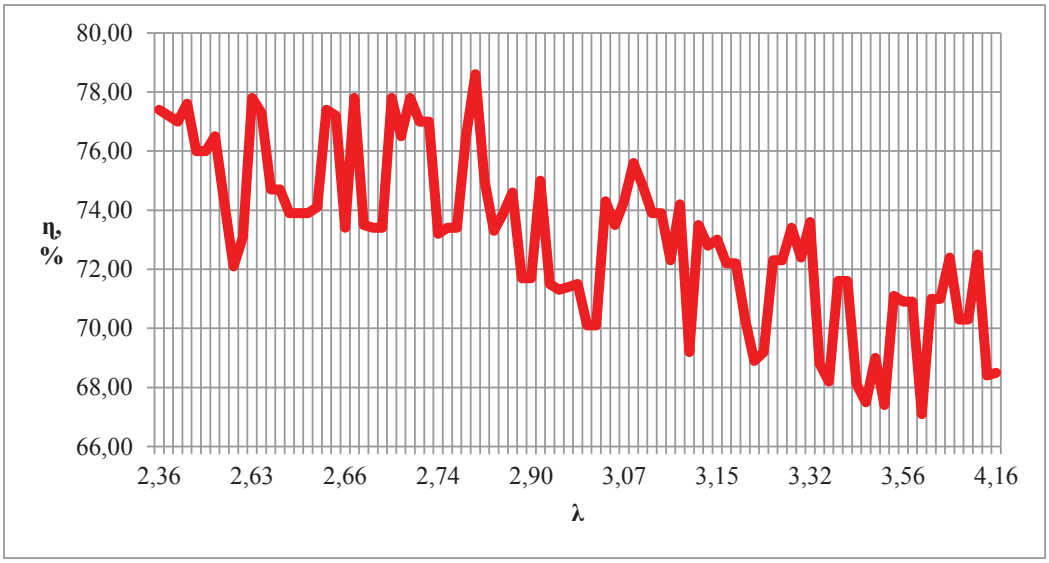
Şekil 6.46. Konstrüksiyon tip 1 için CO emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi

Konstrüksiyon tip 1 için karbondioksit emisyonunun hava fazlalık katsayısı ile değişimi Şekil 6.47'de çizilmiştir. CO_2 emisyonu, karbonun alabileceği kadar oksijeni alıp tam yanma gerçekleştiğinde ortaya çıkar. Bu nedenle CO_2 emisyonunun fazla olması, tam yanmanın gerçekleştiğini gösterir. Hava fazlalık katsayısının da düşük olması yanmanın iyi olduğunu gösterir. Bu nedenle yanma olayında hava fazlalık katsayısı arttıkça CO_2 emisyonunun azalması beklenir. Şekil 6.47'de de görüldüğü gibi, konstrüksiyon tip 1 için hava fazlalık katsayısının artışı ile CO_2 emisyonu azalmaya başlamıştır.



Şekil 6.47. Konstrüksiyon tip 1 için CO_2 emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi

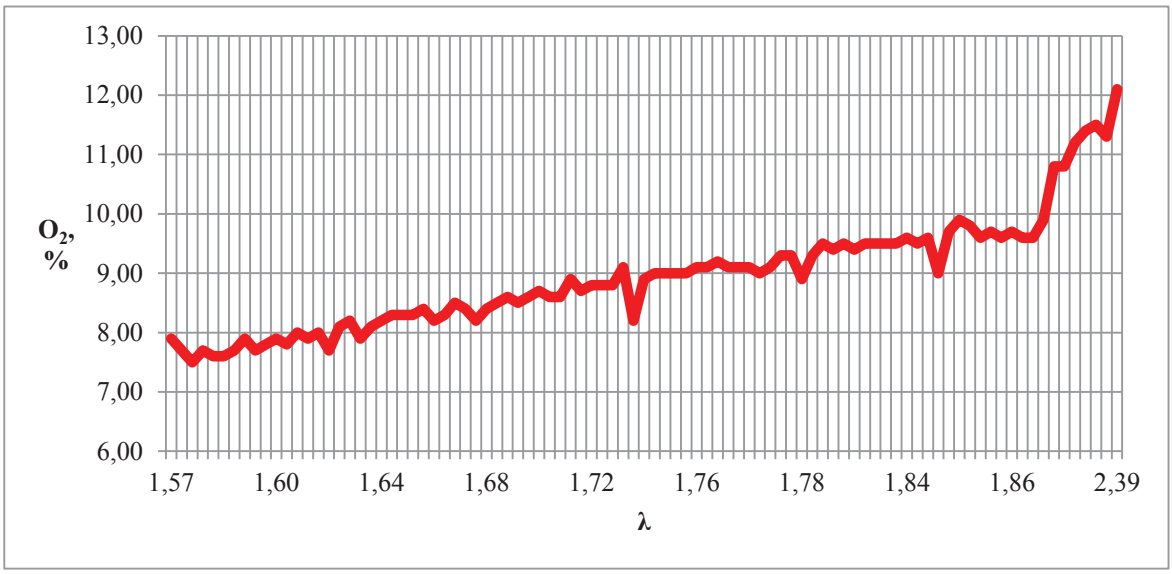
Konstrüksiyon tip 1 için yanma veriminin hava fazlalık katsayısı ile değişimi Şekil 6.48'de görülmektedir. Yanma verimi, tam yanma gerçekleştiğinde yüksek değerlere ulaşır. Hava fazlalık katsayısının düşük olması da yanmanın iyi olduğunu gösterir. Bu nedenle hava fazlalık katsayısı arttıkça yanma veriminin düşmesi beklenir. Şekil 6.48'de de görüldüğü gibi konstrüksiyon tip 1 için hava fazlalık katsayısının yükselmesiyle yanma veriminin azaldığı belirlenmiştir.



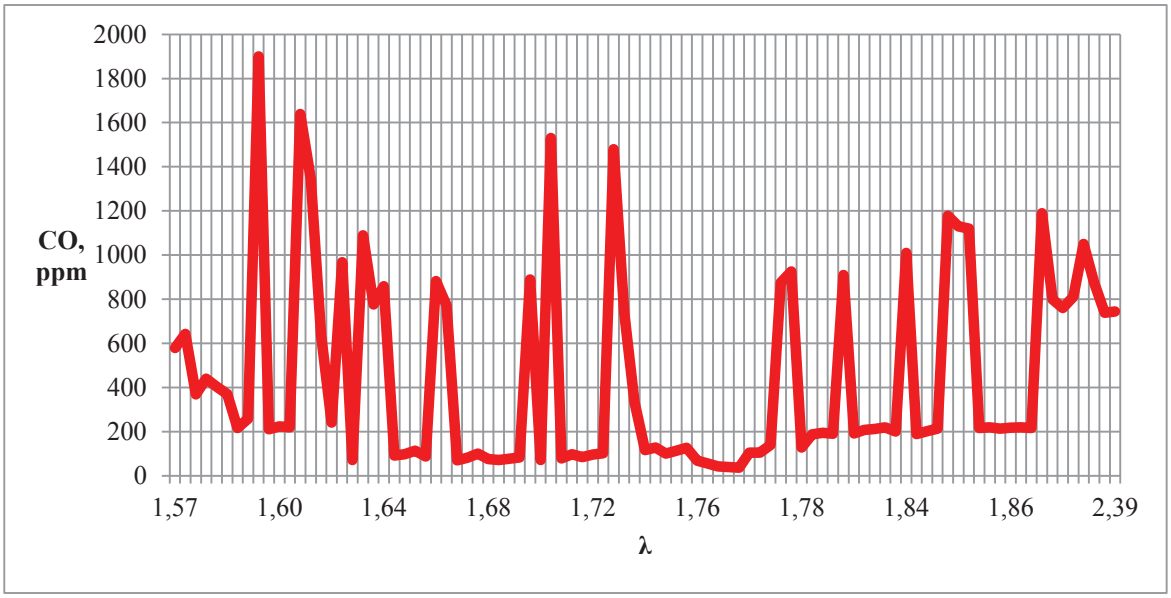
Şekil 6.48. Konstrüksiyon tip 1 için yanma veriminin hava fazlalık katsayısıyla değişimi

6.5.1.2 Konstrüksiyon tip 2 için hava fazlalık katsayısının baca gazı emisyon değerlerine etkisi

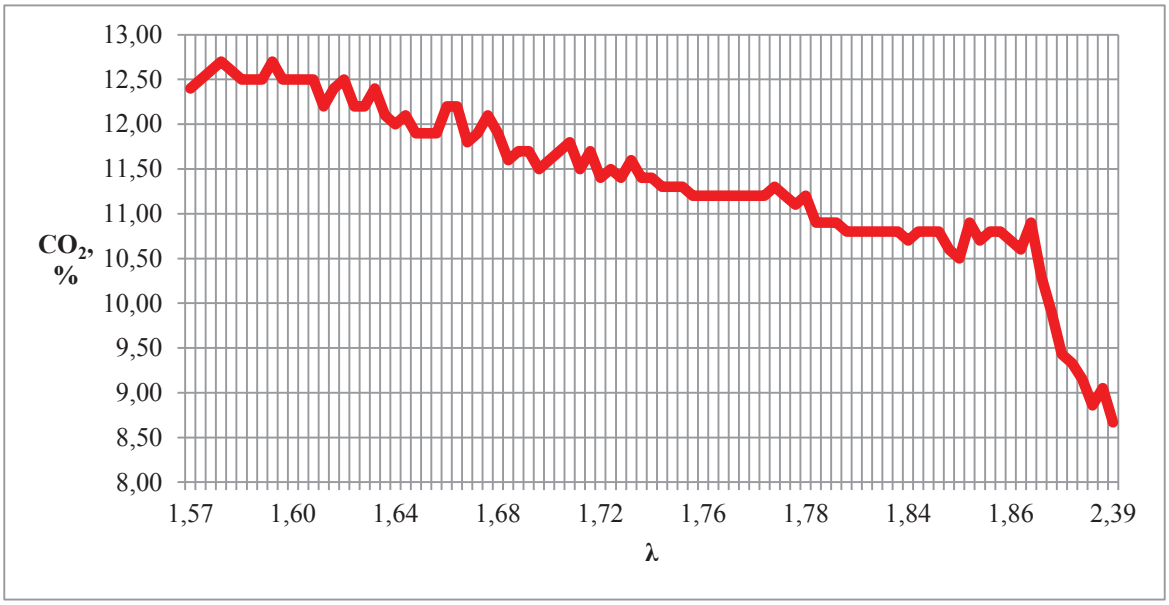
Şekil 6.49–6.52'de görüldüğü gibi, hava fazlalık katsayısının O_2, CO ve CO_2 emisyonlarına ve yanma verimine etkileri konstrüksiyon tip 1 ile aynı karakterdedir.



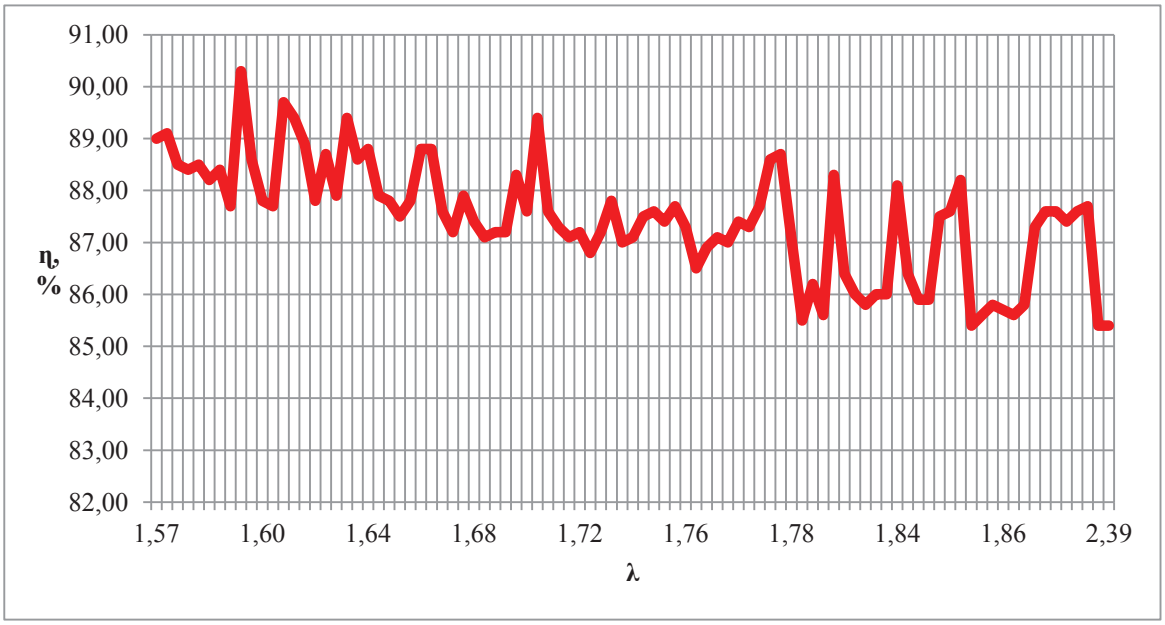
Şekil 6.49. Konstrüksiyon tip 2 için O_2 emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi



Şekil 6.50. Konstrüksiyon tip 2 için CO emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi



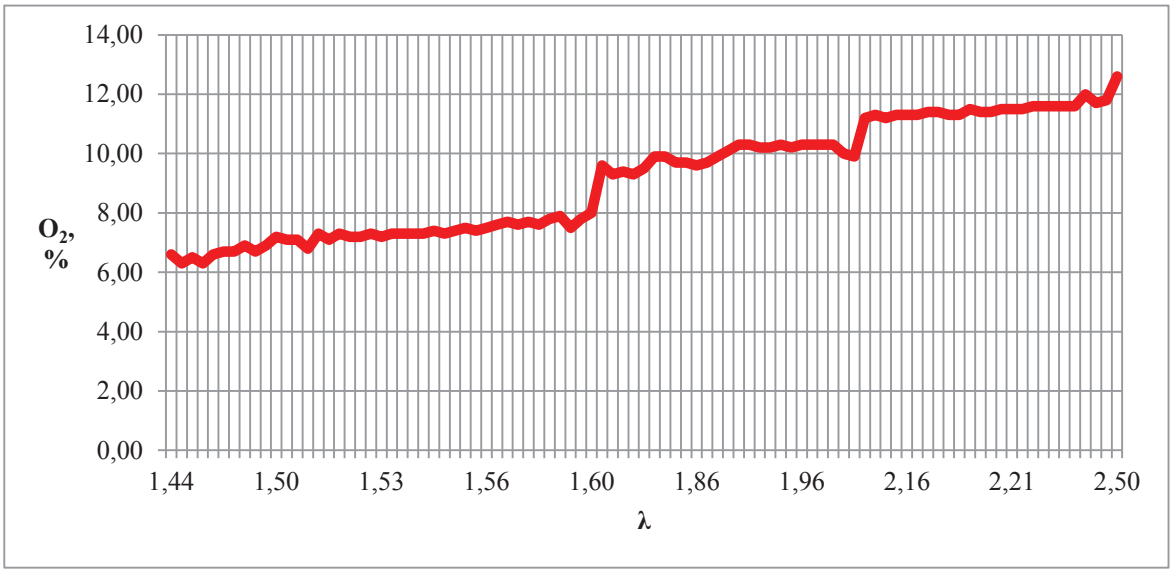
Şekil 6.51. Konstrüksiyon tip 2 için CO_2 emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi



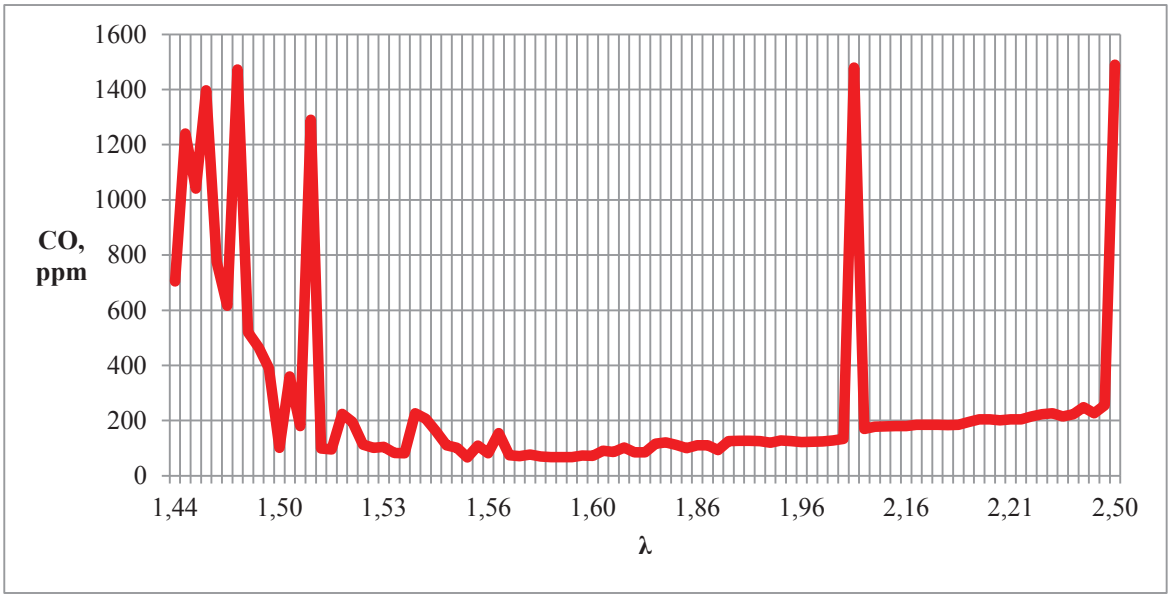
Şekil 6.52. Konstrüksiyon tip 2 için yanma veriminin hava fazlalık katsayısıyla değişimi

6.5.1.3 Konstrüksiyon tip 3 için hava fazlalık katsayısının baca gazı emisyon değerlerine etkisi

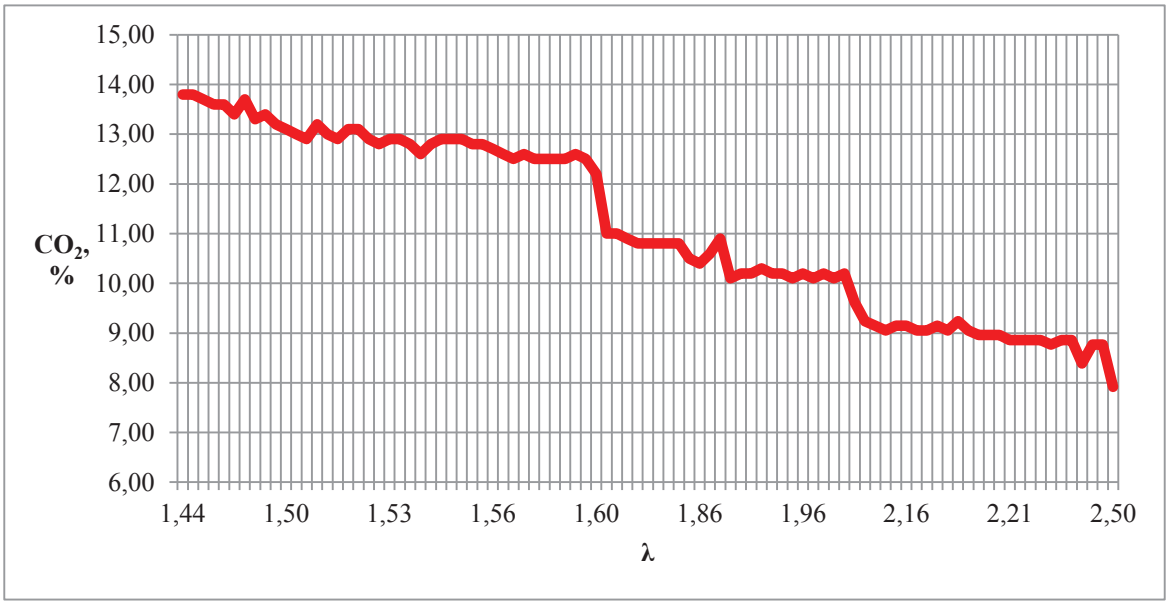
Şekil 6.53-6.56'da görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısının O_2, CO ve CO_2 emisyonlarına ve yanma verimine etkileri konstrüksiyon tip 1 ve konstrüksiyon tip 2 sonuçları ile aynı karakterdedir.



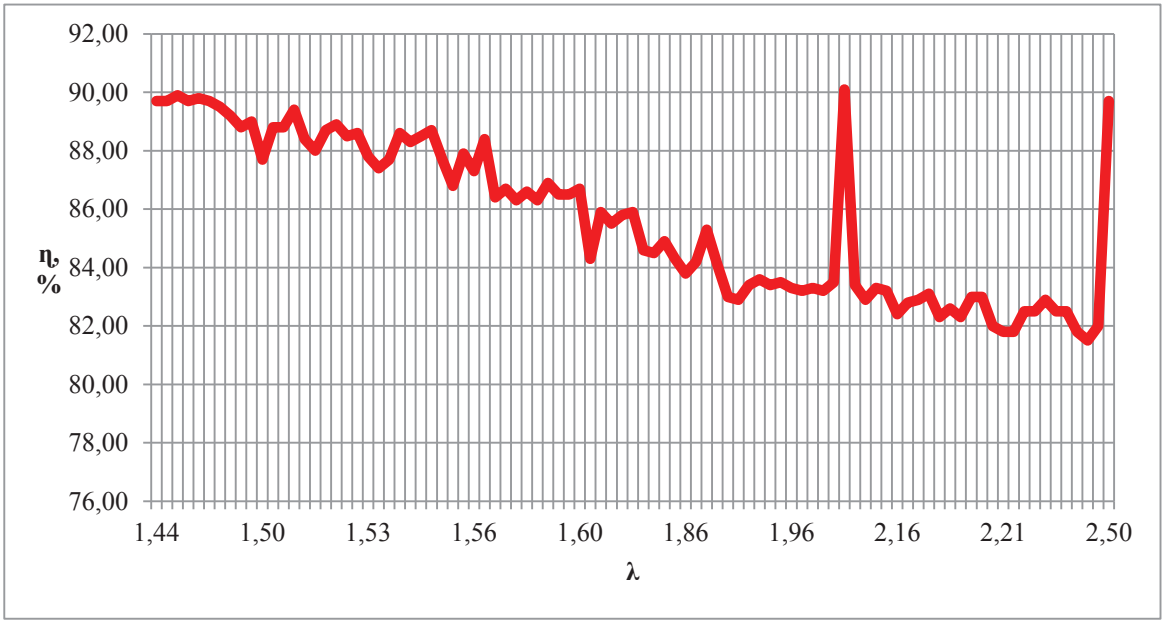
Şekil 6.53. Konstrüksiyon tip 3 için O_2 emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi



Şekil 6.54. Konstrüksiyon tip 3 için CO emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi



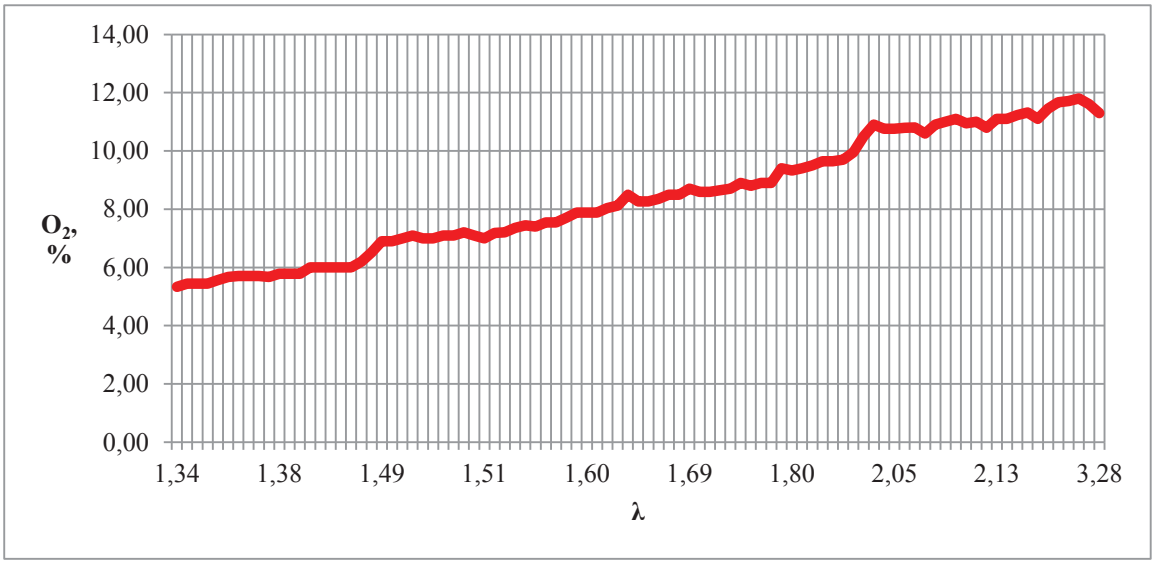
Şekil 6.55. Konstrüksiyon tip 3 için CO_2 emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi



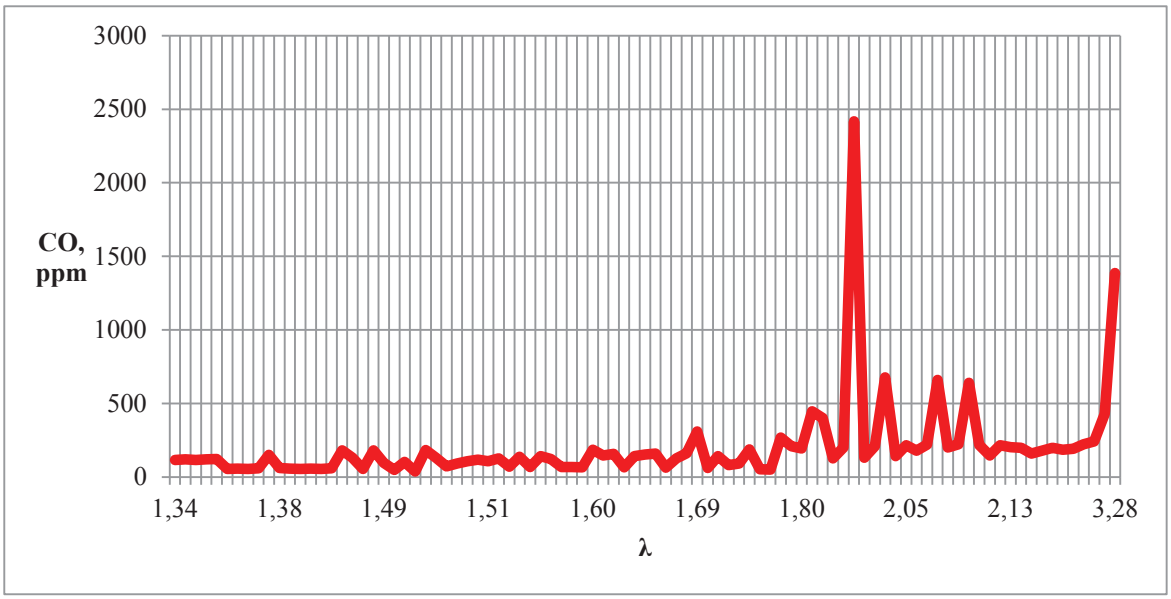
Şekil 6.56. Konstrüksiyon tip 3 için yanma veriminin hava fazlalık katsayısıyla değişimi

6.5.1.4 Konstrüksiyon tip 4 için hava fazlalık katsayısının baca gazı emisyon değerlerine etkisi

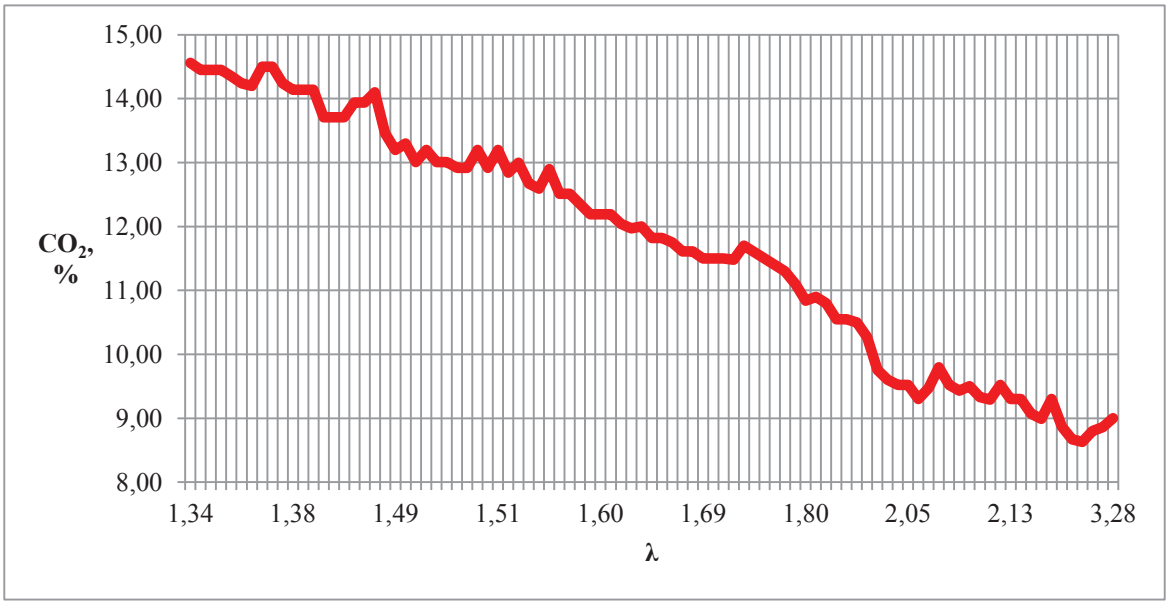
Şekil 6.57-6.60'da görüldüğü üzere hava fazlalık katsayısının O_2, CO ve CO_2 emisyonlarına ve yanma verimine etkileri diğer konstrüksiyon tipleri ile benzer niteliktedir.



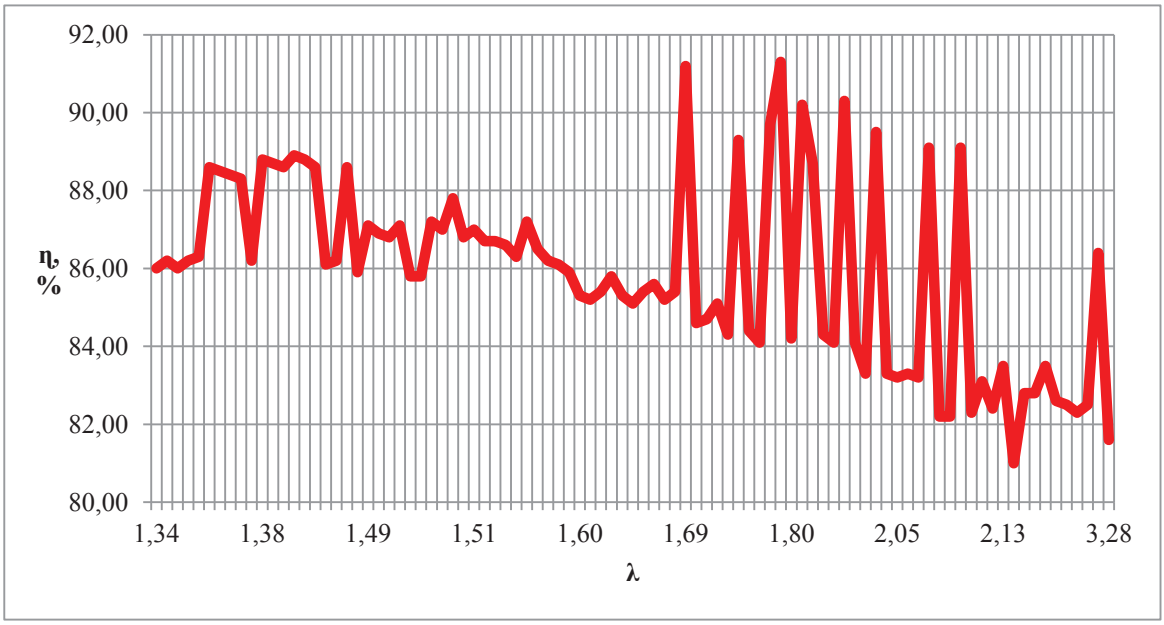
Şekil 6.57. Konstrüksiyon tip 4 için O_2 emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi



Şekil 6.58. Konstrüksiyon tip 4 için CO emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi



Şekil 6.59. Konstrüksiyon tip 4 için CO_2 emisyonunun hava fazlalık katsayısıyla değişimi



Şekil 6.60. Konstrüksiyon tip 4 için yanma veriminin hava fazlalık katsayısıyla değişimi

6.5.2 Ölçülen parametrelerin konstrüksiyon tipine göre değişimi

Bu bölümde deneylerde ölçülen parametrelerin, konstrüksiyon tiplerine göre değişimleri çizelge ve grafikler halinde verilmiştir. Dört farklı konstrüksiyon tipi için karşılaştırma yapılan ve deneylerde ölçülen parametreler aşağıda verilmiştir.

- Hava fazlalık katsayısı, λ
- Yanma verimi, η
- O_2 emisyonu
- CO emisyonu
- CO_2 emisyonu
- 1 numaralı termo eleman sıcaklık değeri, TC1
- 2 numaralı termo eleman sıcaklık değeri, TC2
- 3 numaralı termo eleman sıcaklık değeri, TC3
- 4 numaralı termo eleman sıcaklık değeri, TC4
- Kazan su giriş sıcaklık değeri, Tg
- Kazan su çıkış sıcaklık değeri, Tç

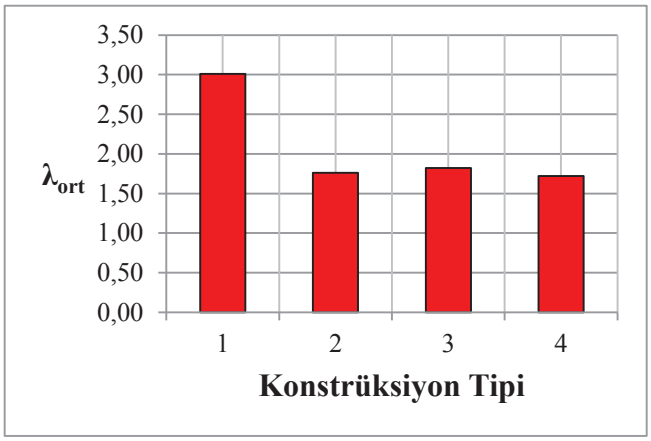
6.5.2.1 Hava fazlalık katsayısının değişimi

Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık periyot içerisinde elde edilen sonuçlara göre hava fazlalık katsayısının ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.5, ve Şekil 6.61-6.64'de verilmiştir. 180 dakikalık periyotta ortalama hava fazlalık katsayıları değerlendirildiğinde en düşük değerin tip 4, en yüksek değerin ise tip 1 için elde edildiği görülmektedir. En yüksek hava fazlalık katsayıları değerlendirmesinde, en yüksek değerin tip 1, en düşük değerin ise tip 2'de elde edildiği görülmektedir. En düşük hava fazlalık katsayıları değerlendirmesinde ise en yüksek değerin tip 1, en düşük değerin ise tip 4 için elde edildiği görülmektedir.

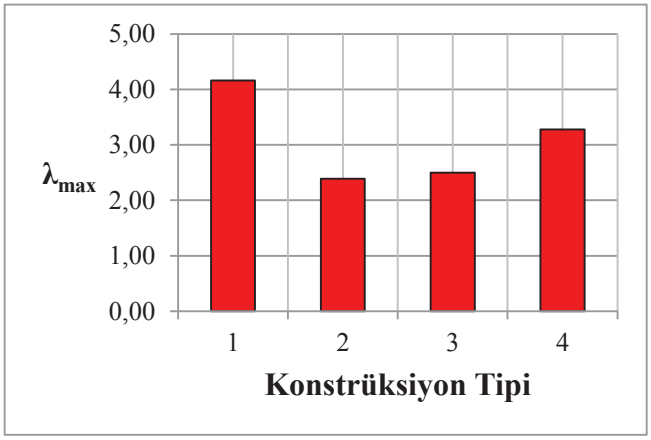
Konstrüksiyon tip 4'de sıcak gazların diğer tiplere göre kazan içerisinde daha fazla yol alması ile suya daha fazla ısı transfer edildiğinden tip 4'deki yanmanın diğerlerine kıyasla daha iyi olması ile hava fazlalık katsayısının daha düşük olması doğaldır.

Çizelge 6.5. Konstrüksiyon tiplerine göre hava fazlalık katsayıları

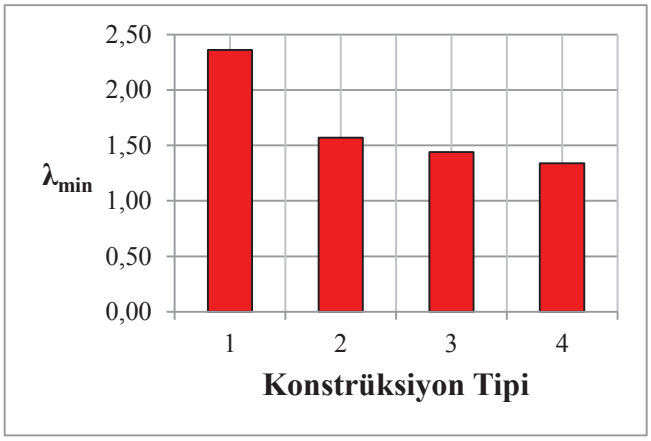
	λ_{min}	λ_{max}	λ_{ort}
Tip 1	2,36	4,16	3,01
Tip2	1,57	2,39	1,76
Tip3	1,44	2,50	1,82
Tip4	1,34	3,28	1,72



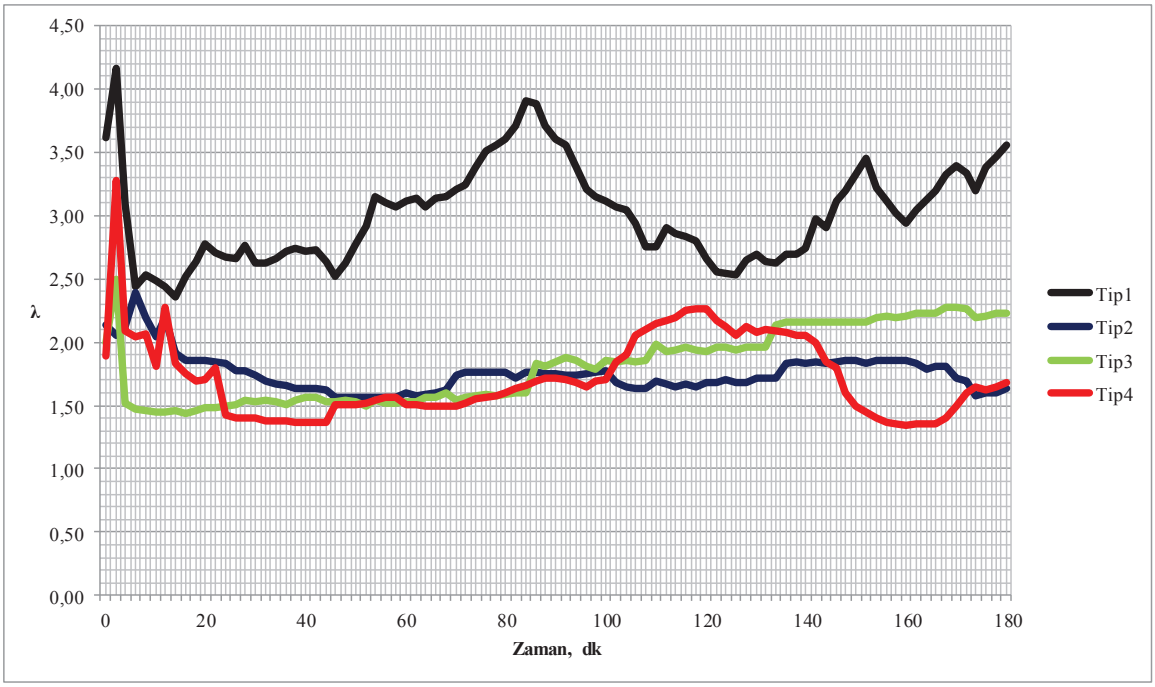
Şekil 6.61. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama hava fazlalık katsayısı değerleri



Şekil 6.62. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek hava fazlalık katsayısı değerleri



Şekil 6.63. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük hava fazlalık katsayısı değerleri



Şekil 6.64. Konstrüksiyon tiplerine göre hava fazlalık katsayısının zamanla değişimi

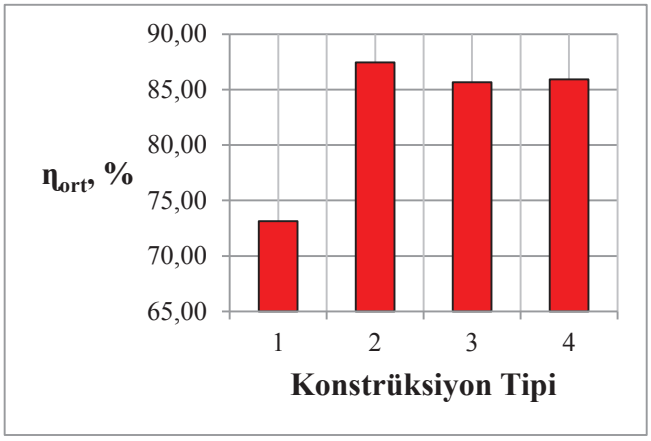
6.5.2.2 Yanma veriminin değişimi

Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık zaman içerisinde elde edilen sonuçlara göre yanma veriminin ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.6 ve Şekil 6.65-6.68'de verilmiştir. 180 dakikalık periyotta ortalama yanma verimi değerlendirmesinde en düşük değerin tip 1, en yüksek değerin ise tip 2 için elde edildiği görülmektedir. En yüksek yanma verimi değerlendirmesinde, en yüksek değerin tip 4'de, en düşük değerin ise tip 1'de elde edildiği görülmektedir. En düşük yanma verimi değerlendirmesinde en

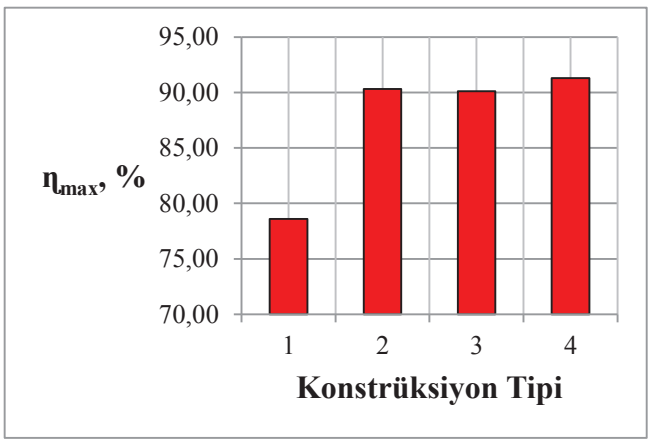
yüksek değer tip 2'de, en düşük ise tip 1'de elde edilmiştir. Hava fazlalık katsayısının artması ile yanma veriminin azaldığı hatırlanırsa en yüksek yanma veriminin tip 4'de elde edileceği sonucuna ulaşılır.

Çizelge 6.6. Konstrüksiyon tiplerine göre yanma verimleri

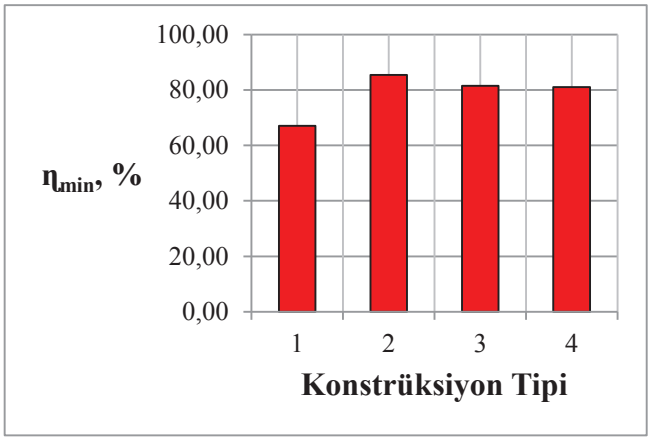
	η_{min}, %	η_{max}, %	η_{ort}, %
Tip 1	67,10	78,60	73,13
Tip2	85,40	90,30	87,46
Tip3	81,50	90,10	85,66
Tip4	81,00	91,30	85,93



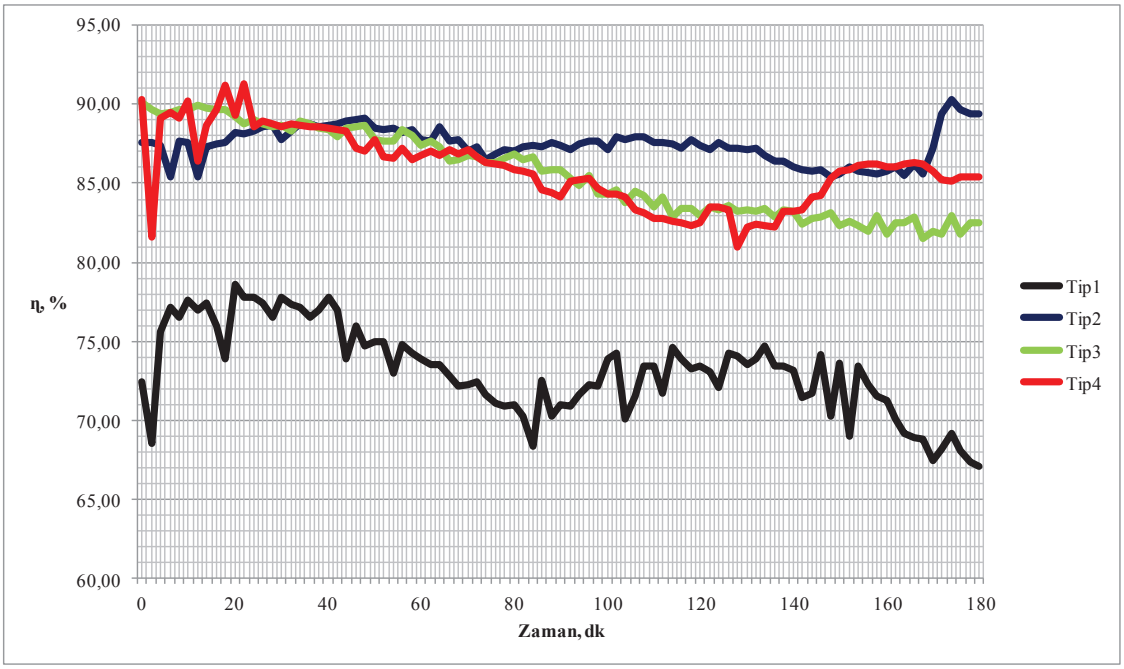
Şekil 6.65. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama yanma verimi değerleri



Şekil 6.66. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek yanma verimi değerleri



Şekil 6.67. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük yanma verimi değerleri



Şekil 6.68. Konstrüksiyon tiplerine göre yanma veriminin zamanla değişimi

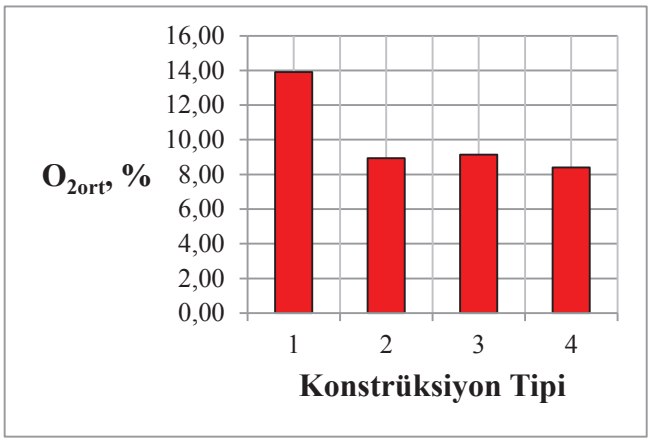
6.5.2.3 Oksijen emisyonunun değişimi

Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık periyot içerisinde elde edilen sonuçlara göre O_2 emisyonunun ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.7 ve Şekil 6.69-6.72'da verilmiştir. 180 dakikalık periyotta ortalama O_2 emisyonu değerlendirildiğinde, en düşük değerin tip 4, en yüksek değerin ise tip 1'de elde edildiği görülmektedir. En yüksek O_2 emisyonu değerlendirmesinde en yüksek değer tip 1, en düşük değer ise tip 4'de elde edilmektedir. En düşük O_2 emisyonu değerlendirmesinde en yüksek değerin tip 1, en düşük değerin tip 4'de elde edildiği görülmektedir. Hava fazlalık katsayısı,

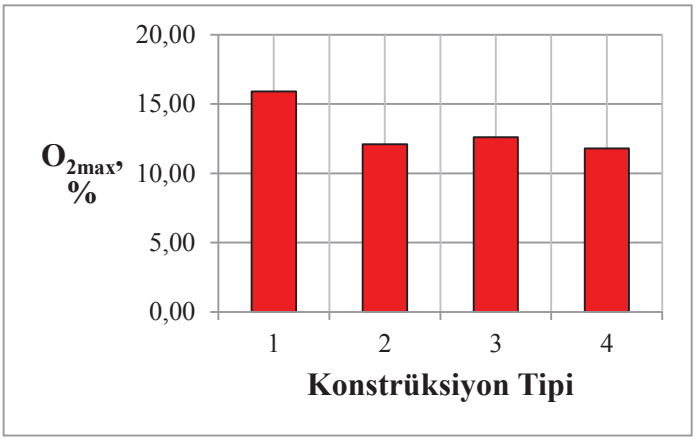
yanma haznesine giren O_2'e bağlı bir değişkendir. Hava fazlalık katsayısı arttığında O_2 emisyonu artacak, hava fazlalık katsayısı azaldığında O_2 emisyonu azalacaktır. Bu nedenle en düşük O_2 emisyonu değeri tip 4'te elde edilmelidir.

Çizelge 6.7. Konstrüksiyon tiplerine göre O_2 emisyonları

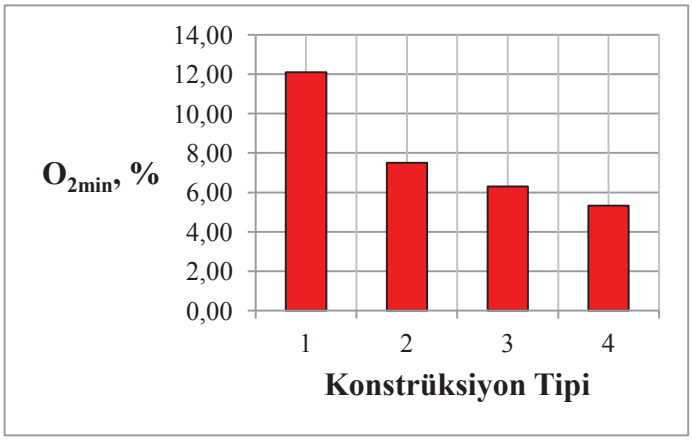
	O_{2min}, %	O_{2max}, %	O_{2ort}, %
Tip 1	12,10	15,90	13,91
Tip2	7,50	12,10	8,94
Tip3	6,30	12,60	9,14
Tip4	5,33	11,80	8,40



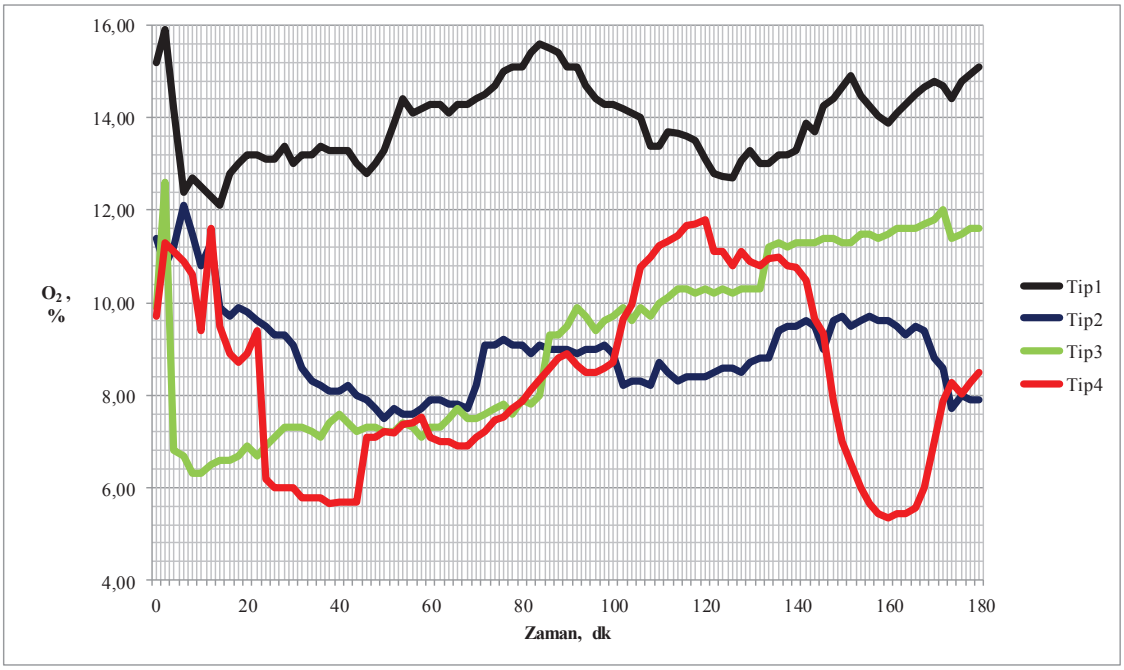
Şekil 6.69. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama O_2 emisyonu değerleri



Şekil 6.70. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek O_2 emisyonu değerleri



Şekil 6.71. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük O_2 emisyonu değerleri



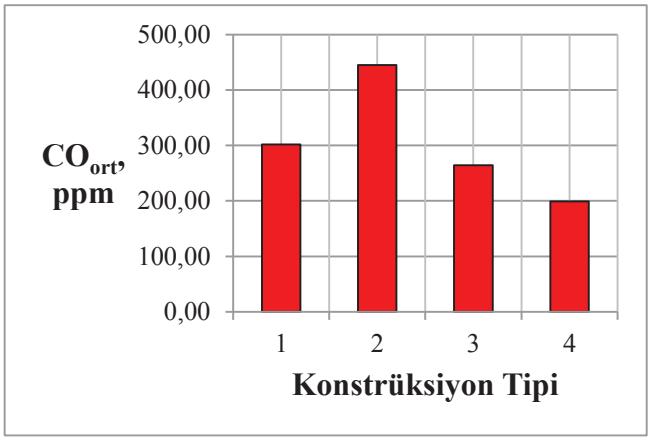
Şekil 6.72. Konstrüksiyon tiplerine göre O_2 emisyonunun zamanla değişimi

6.5.2.4 Karbon monoksit emisyonunun değişimi

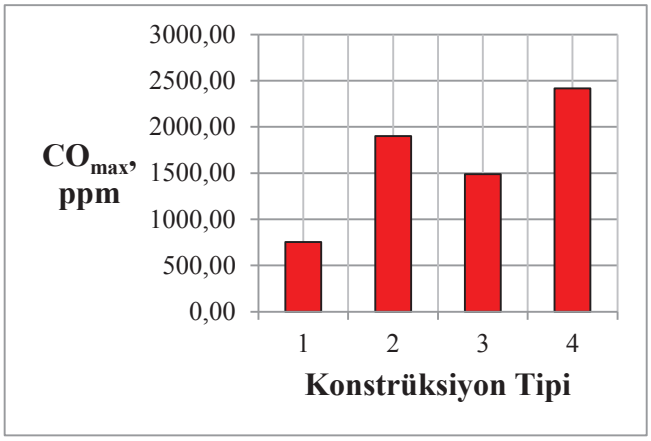
Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık periyot içerisinde elde edilen sonuçlara göre CO emisyonunun ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.8 ve Şekil 6.73-6.76'da verilmiştir. 180 dakikalık periyotta ortalama CO emisyonunun en düşük değerinin tip 4, en yüksek değerinin ise tip 2'de elde edildiği görülmektedir. En yüksek CO emisyonu değerlendirmesinde en yüksek değerin tip 4, en düşük değerin tip 1'de elde edildiği görülmektedir. En düşük CO emisyonu değerlendirilmesinde ise en yüksek değerin tip 1, en düşük değerin tip 4'de elde edildiği görülmektedir. CO emisyonunun yüksek olması yanmanın kötü olduğunun, eksik yanma gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Bu nedenle konstrüksiyon tip 4'te ortalama CO emisyonu değerinin en düşük olması gerekmektedir. CO emisyonunun en düşük ve en yüksek değerleri anlık değerler içerisindeki uç noktalarıdır.

Çizelge 6.8. Konstrüksiyon tiplerine göre CO emisyonları

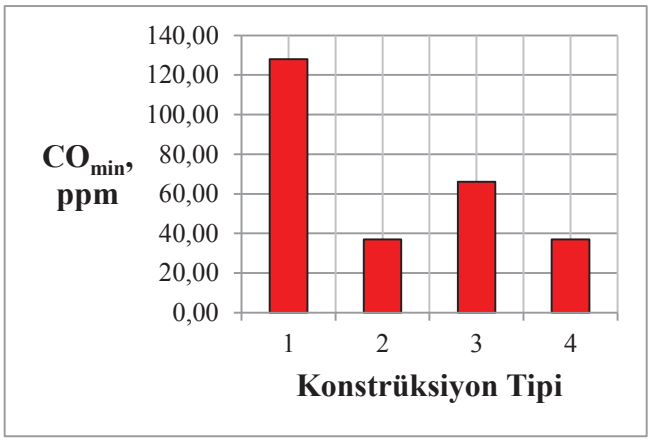
	$CO_{min,}$ ppm	$CO_{max,}$ ppm	CO_{ort}, ppm
Tip 1	128,00	754,00	301,86
Tip2	37,00	1900,00	445,11
Tip3	66,00	1490,00	264,31
Tip4	37,00	2417,00	198,90



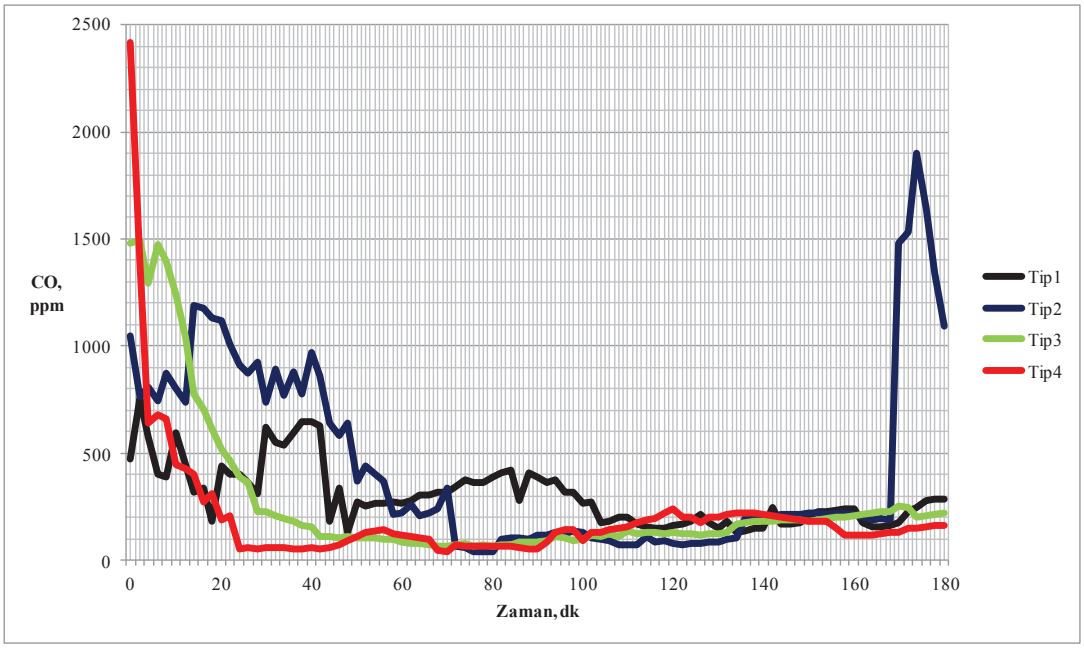
Şekil 6.73. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama CO emisyonu değerleri



Şekil 6.74. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek CO emisyonu değerleri



Şekil 6.75. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük CO emisyonu değerleri



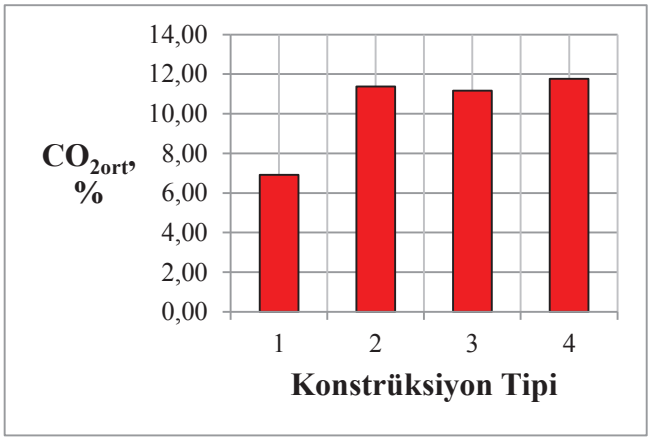
Şekil 6.76. Konstrüksiyon tiplerine göre CO emisyonunun zamanla değişimi

6.5.2.5 Karbondioksit emisyonunun değişimi

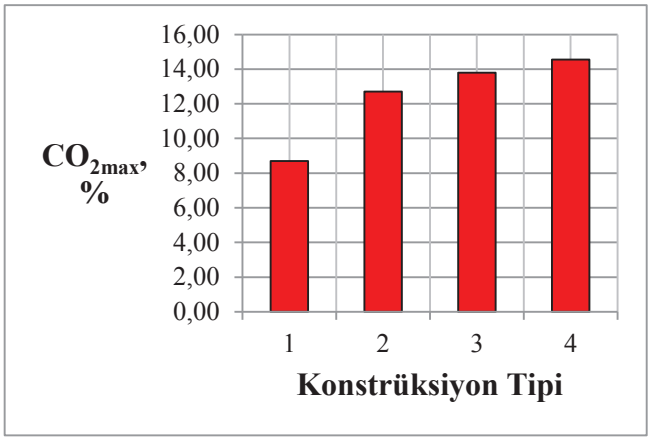
Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık periyotta elde edilen sonuçlara göre CO_2 emisyonunun ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.9 ve Şekil 6.77-6.80'de verilmiştir. 180 dakikalık periyotta ortalama CO_2 emisyonu değerlendirildiğinde en düşük değerin tip 1, en yüksek değerin ise tip 4'de elde edildiği görülmektedir. En yüksek CO_2 emisyonu değerlendirilmesinde en yüksek değerin tip 4, en düşük değerin tip 1'de elde edildiği sonucuna varılmaktadır. En düşük CO_2 emisyonu değerlendirilmesinde ise en yüksek değerin tip 2, en düşük değerin tip 1'de elde edildiği gözlenmektedir. Hava fazlalık katsayısı arttığında, yanma kötüleşeceği için CO_2 emisyonu azalacak, hava fazlalık katsayısı azaldığında, yanma iyileşeceği için CO_2 emisyonu artacaktır. Bu nedenle ortalama CO_2 emisyonunun en yüksek değeri tip 4'te elde edilmelidir.

Çizelge 6.9. Konstrüksiyon tiplerine göre CO_2 emisyonları

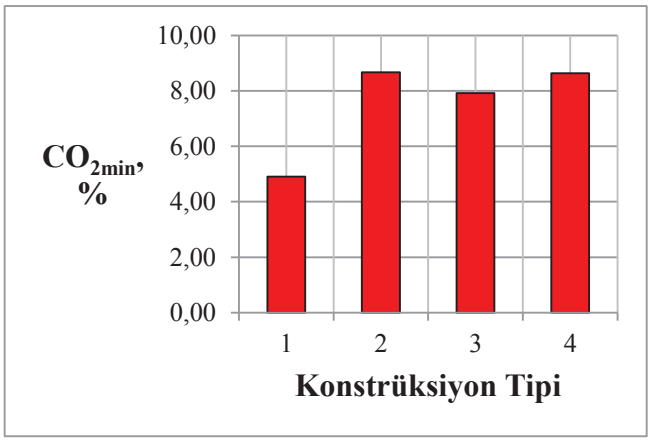
	CO_{2min}, %	CO_{2max}, %	$CO_{2ort,}$ %
Tip 1	4,90	8,69	6,92
Tip2	8,67	12,70	11,37
Tip3	7,92	13,80	11,16
Tip4	8,63	14,56	11,77



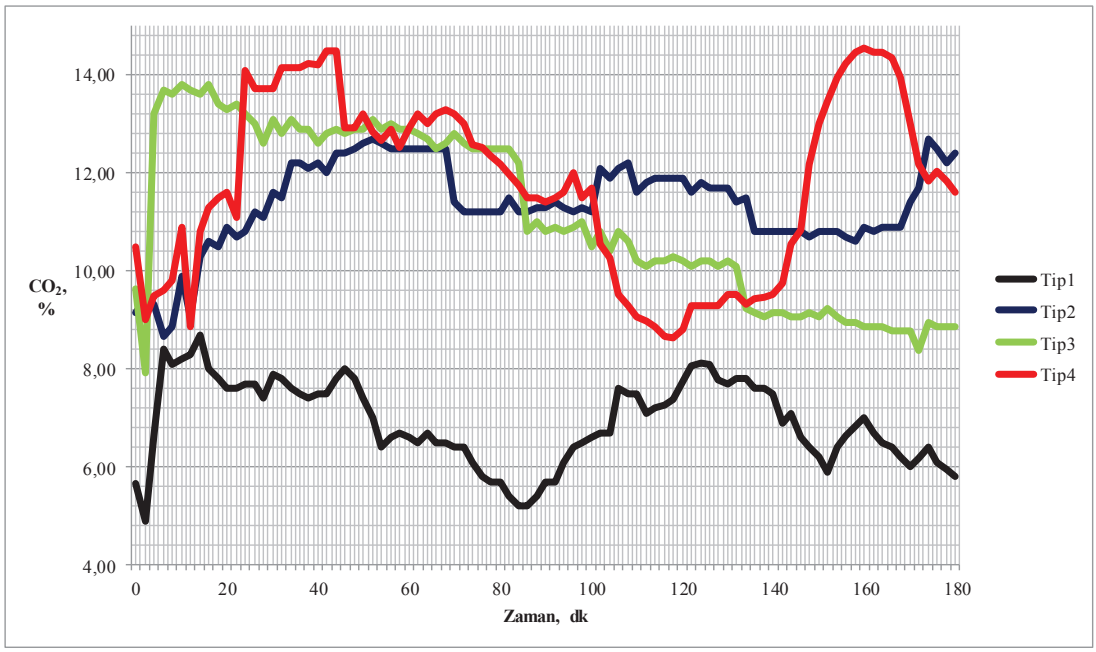
Şekil 6.77. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama CO_2 emisyonu değerleri



Şekil 6.78. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek CO_2 emisyonu değerleri



Şekil 6.79. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük CO_2 emisyonu değerleri



Şekil 6.80. Konstrüksiyon tiplerine göre CO_2 emisyonunun zamanla değişimi

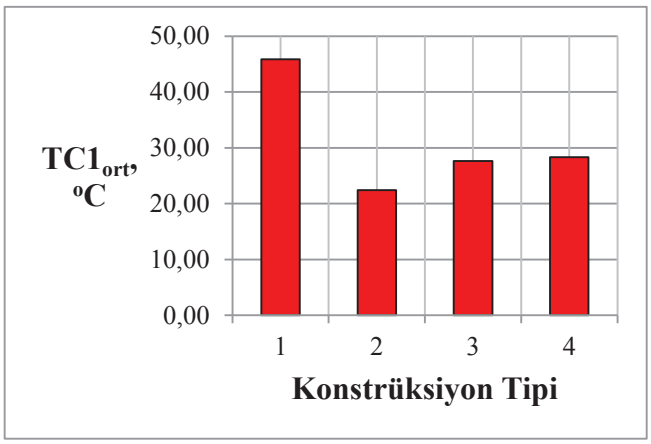
6.5.2.6 Termo eleman 1 ile ölçülen sıcaklığın değişimi

Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık periyot içerisinde elde edilen sonuçlara göre 1 numaralı termo eleman ile ölçülen sıcaklık değerinin (TC1) ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.10 ve Şekil 6.81–6.84'de verilmiştir. 1 numaralı termo eleman kazan yanma haznesi cidar sıcaklığını, yaklaşık olarak o bölgedeki sirkülasyon suyunun sıcaklığını göstermektedir.

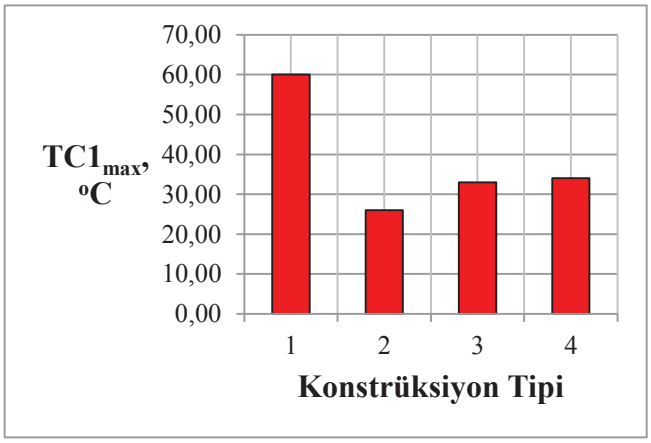
180 dakikalık periyotta ortalama TC1 sıcaklığı için en düşük değerin tip 2, en yüksek değerin ise tip 1'de elde edildiği görülmektedir. En yüksek TC1 sıcaklığı için en yüksek değerin tip 1, en düşük değerin tip 2'de elde edildiği görülmektedir. En düşük TC1 sıcaklığı olarak en yüksek değerin tip 1, en düşük değerin tip 2'de elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.10. Konstrüksiyon tiplerine göre 1 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri

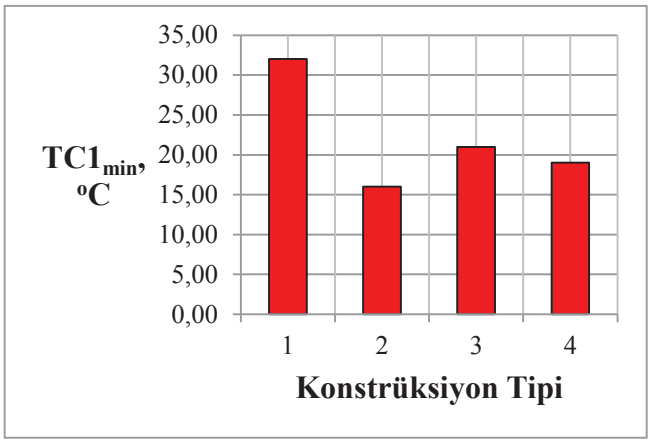
	$TC1_{min}$, °C	$TC1_{max}$, °C	$TC1_{ort}$, °C
Tip 1	32,00	60,00	45,84
Tip2	16,00	26,00	22,40
Tip3	21,00	33,00	27,60
Tip4	19,00	34,00	28,31



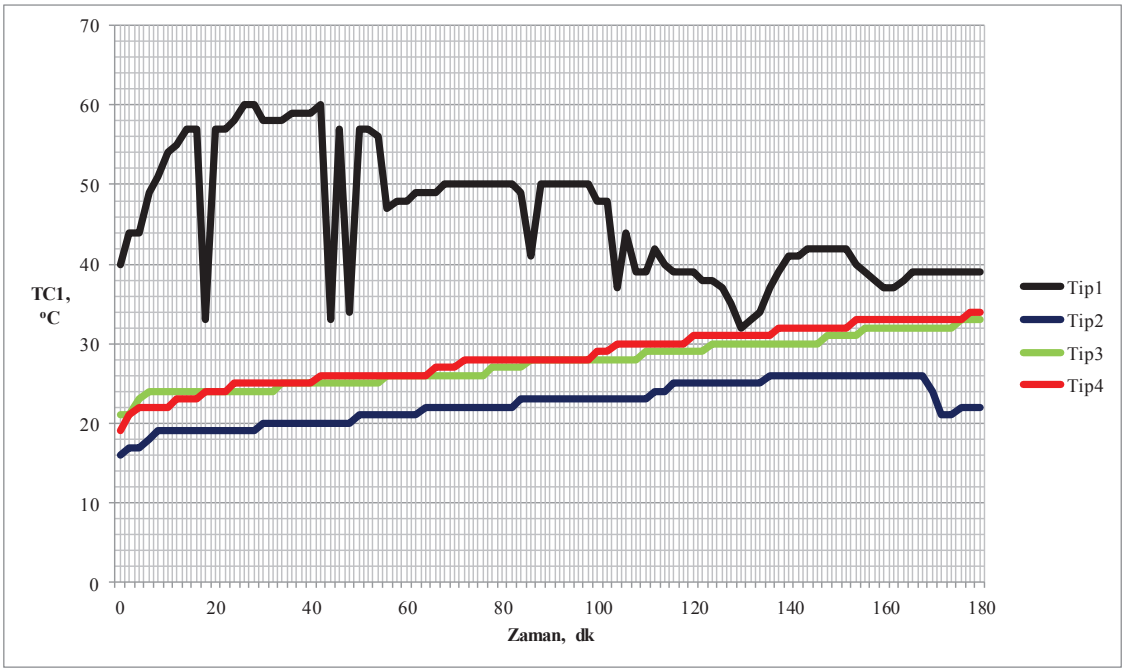
Şekil 6.81. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama 1 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.82. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek 1 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.83. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük 1 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.84. Konstrüksiyon tiplerine göre 1 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi

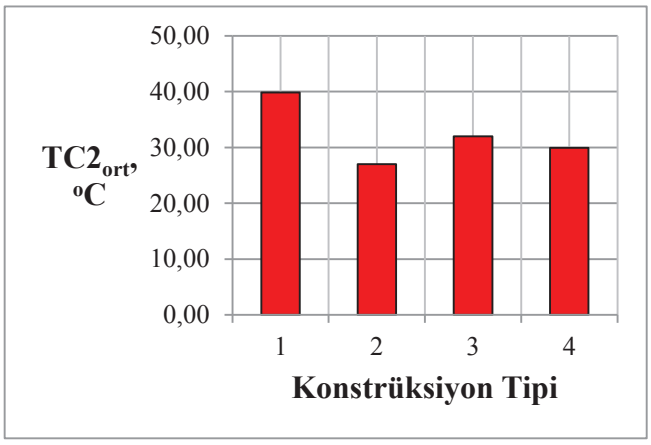
6.5.2.7 Termo eleman 2 ile ölçülen sıcaklığın değişimi

Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık periyot içerisinde elde edilen sonuçlara göre 2 numaralı termo eleman ile ölçülen sıcaklığın (TC2) ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.11 ve Şekil 6.85-6.88'de görülmektedir. 2 numaralı termo eleman, kazan yanma haznesi cidar sıcaklığını, yaklaşık olarak o bölgedeki sirkülasyon suyunun sıcaklığını ölçmektedir.

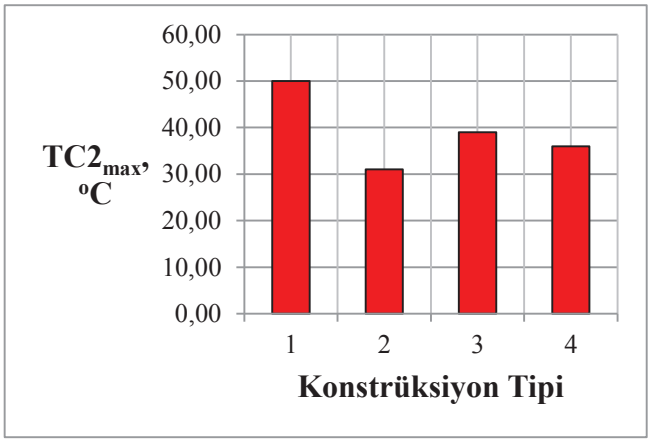
180 dakikalık zamanda ortalama TC2 sıcaklığı için en düşük değer tip 2, en yüksek değer ise tip 1'de elde edilmektedir. En yüksek TC2 sıcaklığında en yüksek değer tip 1, en düşük değer ise tip 2'de elde edilmektedir. En düşük TC2 sıcaklığının en yüksek değeri tip 1, en düşük değeri ise tip 2'de elde edilmektedir.

Çizelge 6.11. Konstrüksiyon tiplerine göre 2 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri

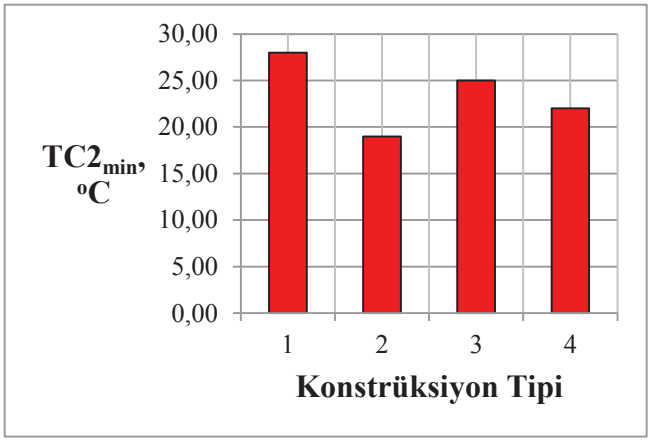
	$TC2_{min}$, °C	$TC2_{max}$, °C	$TC2_{ort}$, °C
Tip 1	28,00	50,00	39,82
Tip2	19,00	31,00	26,98
Tip3	25,00	39,00	31,96
Tip4	22,00	36,00	29,93



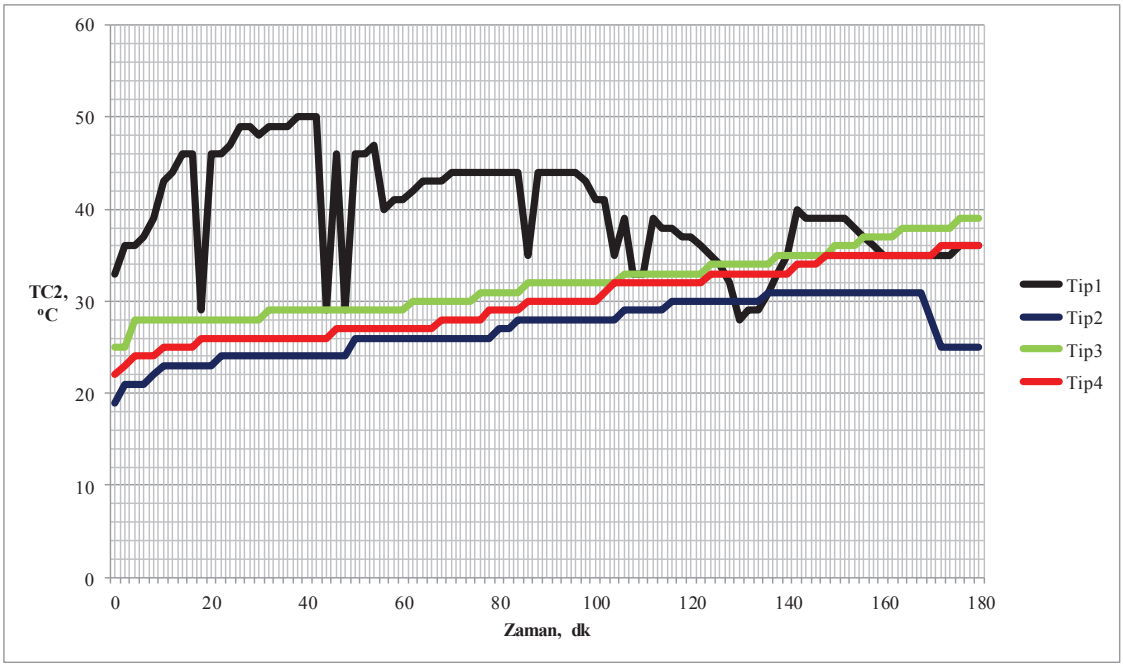
Şekil 6.85. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama 2 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.86. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek 2 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.87. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük 2 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.88. Konstrüksiyon tiplerine göre 2 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi

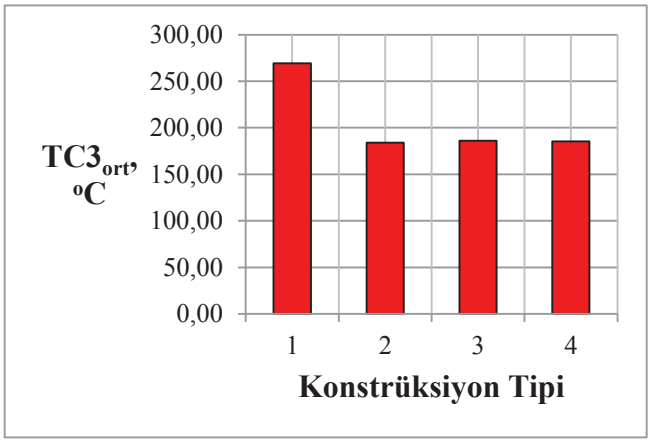
6.5.2.8 Termo eleman 3 ile ölçülen sıcaklığın değişimi

180 dakikalık deney süresince ölçülen değerlere göre 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin (TC3) ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.12 ve Şekil 6.89-6.92'da verilmiştir. 3 numaralı termo eleman, kazan duman çıkış kanalı sıcaklığını, yani baca gazı sıcaklığını ölçmektedir.

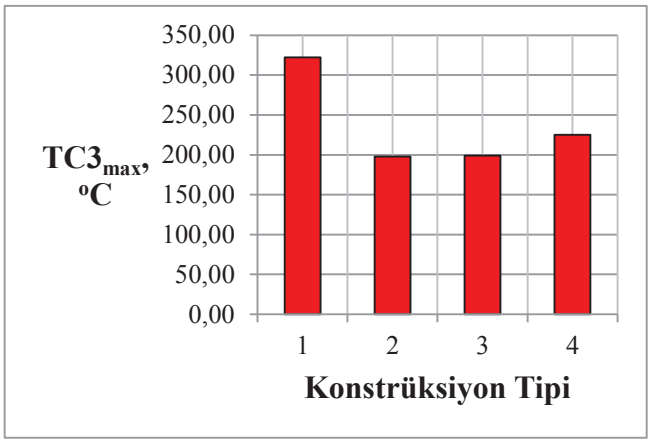
180 dakika süre içinde ortalama TC3 sıcaklığı için en düşük değer tip 2, en yüksek değer ise tip 1'de elde edilmektedir. En yüksek TC3 sıcaklığı olarak en yüksek değer tip 1, en düşük değer ise tip 2'de elde edilmektedir. En düşük TC3 sıcaklığı için en yüksek değerin tip 1, en düşük değerin ise tip 3'de elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.12. Konstrüksiyon tiplerine göre 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri

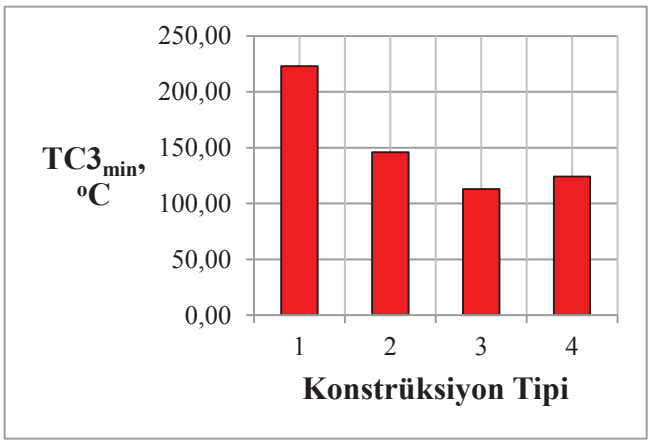
	$TC3_{min}$, °C	$TC3_{max}$, °C	$TC3_{ort}$, °C
Tip 1	223,00	322,00	269,41
Tip2	146,00	198,00	184,11
Tip3	113,00	199,00	186,11
Tip4	124,00	225,00	185,37



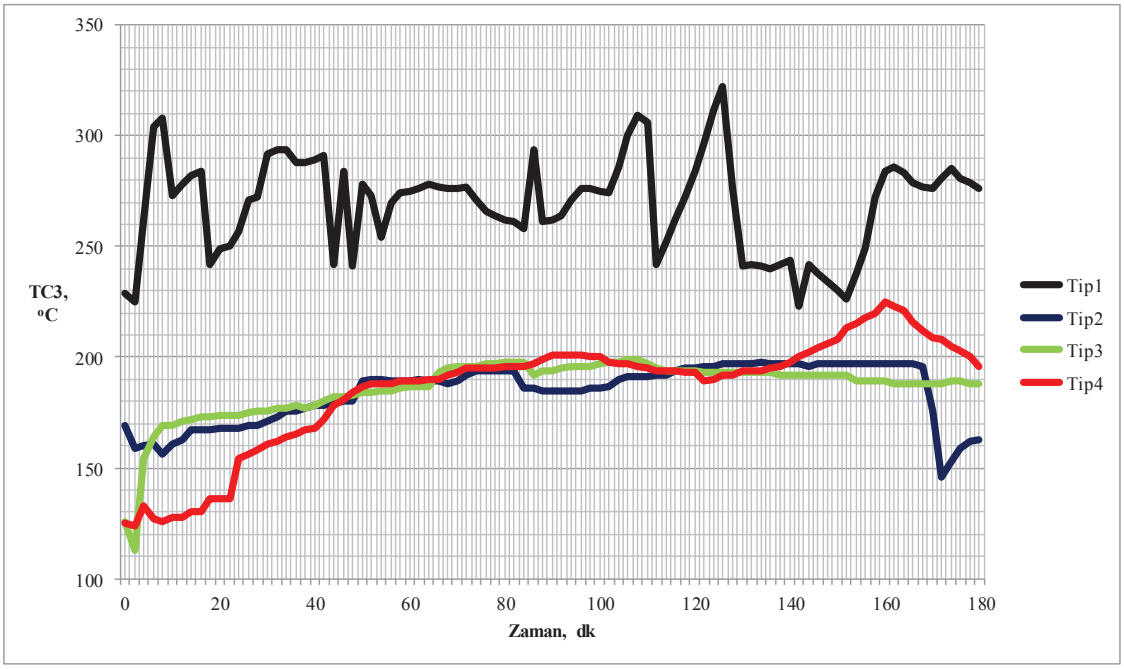
Şekil 6.89. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.90. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.91. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.92. Konstrüksiyon tiplerine göre 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla değişimi

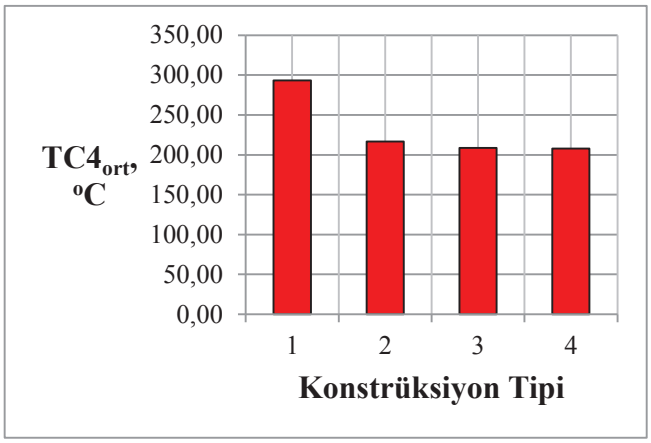
6.5.2.9 Termo eleman 4 ile ölçülen sıcaklığın değişimi

Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık periyot içerisinde elde edilen sonuçlara göre 4 numaralı termo eleman ile ölçülen sıcaklık değerinin (TC4) ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.13 ve Şekil 6.93-6.96'de 'de verilmiştir. 4 numaralı termo eleman, kazan duman çıkış kanalı sıcaklığını, yani baca gazı sıcaklığını ölçmektedir.

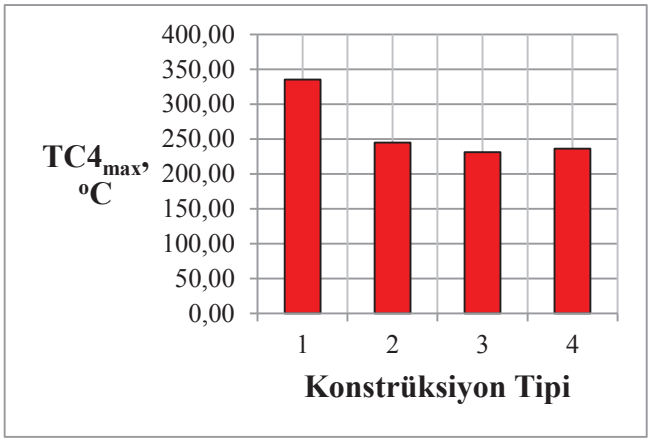
180 dakikalık periyotta ortalama TC4 sıcaklığı için en düşük değer tip 4, en yüksek değer ise tip 1'de elde edilmiştir. En yüksek TC4 sıcaklığı olarak ise en yüksek değerin tip 1, en düşük değerin tip 4'de elde edildiği gözlenmiştir. En düşük TC4 sıcaklığında en yüksek değerin tip 1, en düşük değerin ise tip 3'de elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.13. Konstrüksiyon tiplerine göre 4 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri

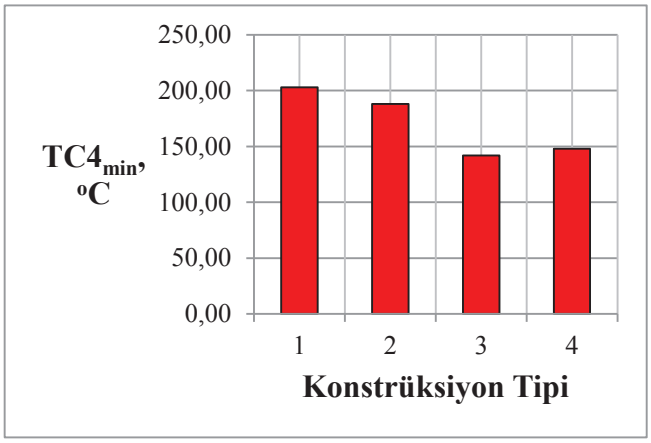
	$TC4_{min}$, °C	$TC4_{max}$, °C	$TC4_{ort}$, °C
Tip 1	203,00	335,00	293,10
Tip2	188,00	245,00	216,62
Tip3	142,00	231,00	208,55
Tip4	148,00	236,00	207,74



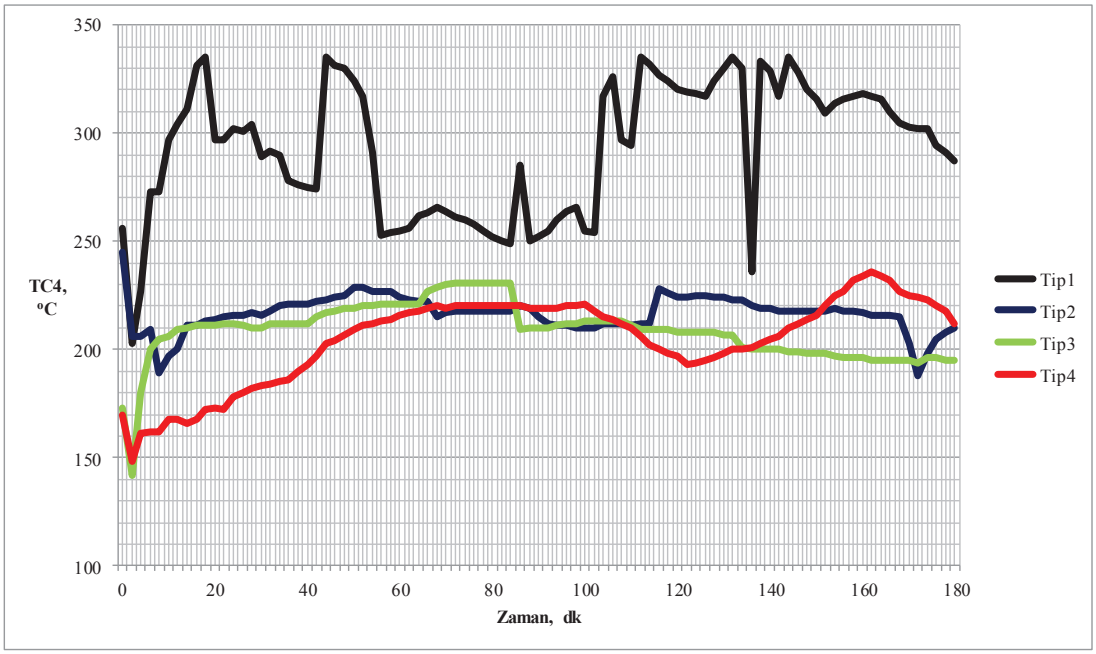
Şekil 6.93. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama 4 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.94. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek 4 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.95. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük 4 numaralı termo eleman sıcaklık değerleri



Şekil 6.96. Konstrüksiyon tiplerine göre 3 numaralı termo eleman sıcaklık değerinin zamanla

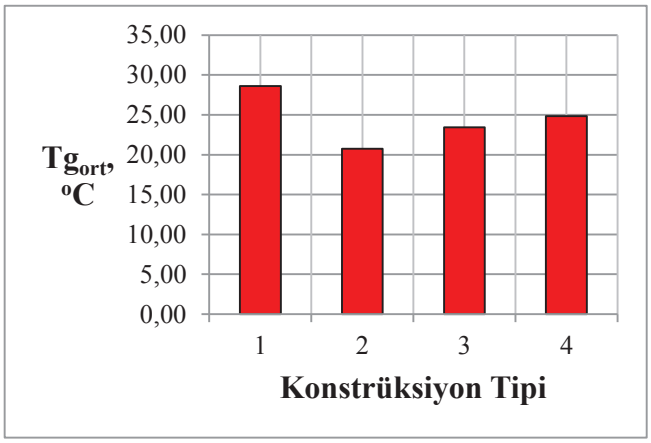
6.5.2.10 Kazan su giriş sıcaklığının değişimi

Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık periyot içerisinde elde edilen sonuçlara göre kazana, suyun giriş sıcaklık değerinin (Tg) ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.14 ve Şekil 6.97-6.100'de verilmiştir.

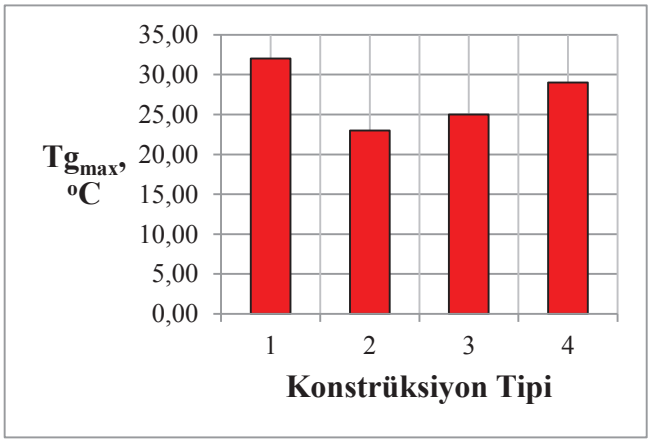
180 dakikalık periyotta ortalama Tg sıcaklığı için en düşük değer tip 2, en yüksek değer ise tip 1'de elde edilmiştir. En yüksek Tg sıcaklığı değerlendirmesinde en yüksek değer tip 1, en düşük değer tip 2 de elde edilmiştir. En düşük Tg sıcaklığı değerlendirmesinde en düşük değerinin tip 2, en yüksek değerin ise tip 1, 3 ve 4'de elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.14. Konstrüksiyon tiplerine göre kazan su giriş sıcaklık değerleri

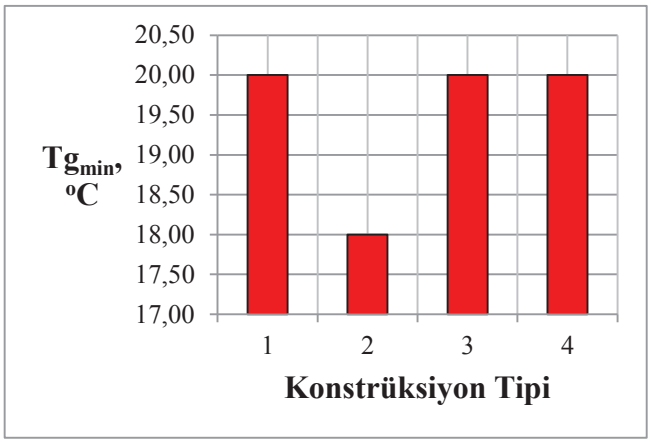
	Tg_{min}, °C	Tg_{max}, °C	Tg_{ort}, °C
Tip 1	20,00	32,00	28,60
Tip2	18,00	23,00	20,76
Tip3	20,00	25,00	23,44
Tip4	20,00	29,00	24,84



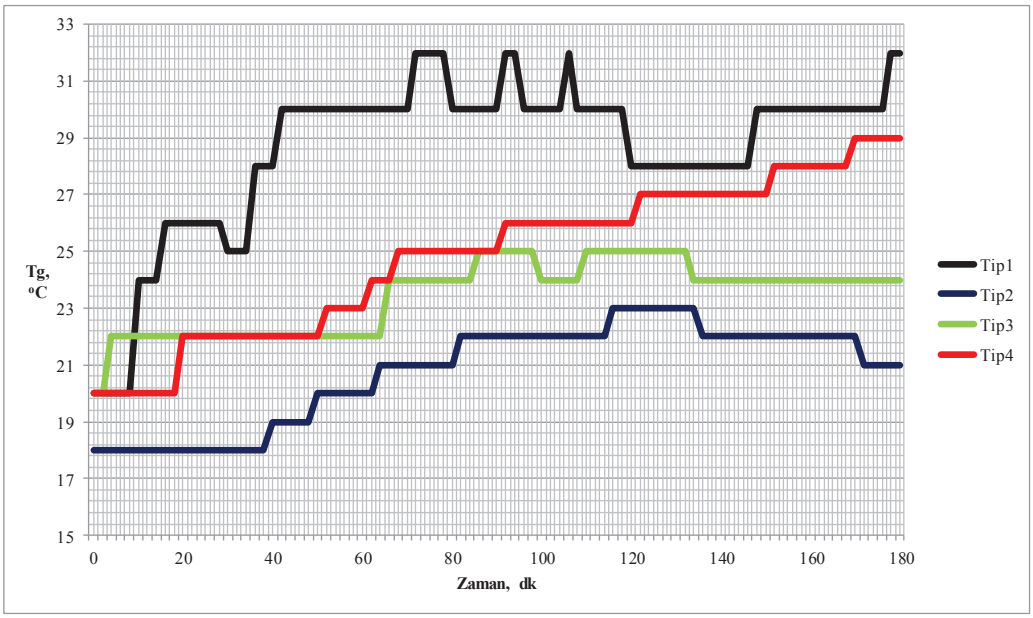
Şekil 6.97. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama kazan su giriş sıcaklık değerleri



Şekil 6.98. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek kazan su giriş sıcaklık değerleri



Şekil 6.99. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük kazan su giriş sıcaklık değerleri



Şekil 6.100. Konstrüksiyon tiplerine göre kazan su giriş sıcaklık değerinin zamanla

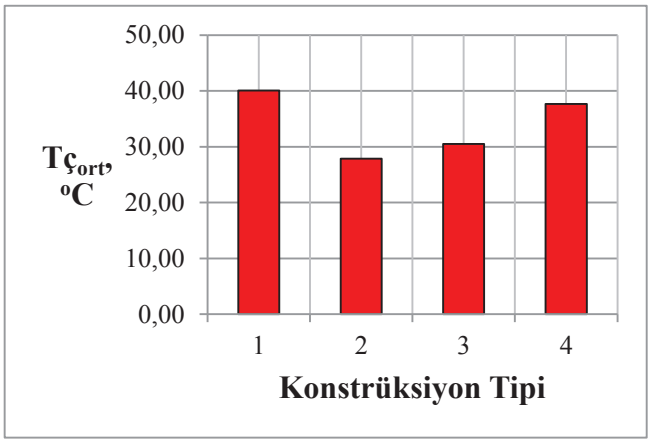
6.5.2.11 Kazan su çıkış sıcaklığının değişimi

Deneylerin yapıldığı 180 dakikalık periyot içerisinde elde edilen sonuçlara göre kazan su çıkış sıcaklık değerinin (Tç) ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri Çizelge 6.15 ve Şekil 6.101–6.104'de verilmiştir.

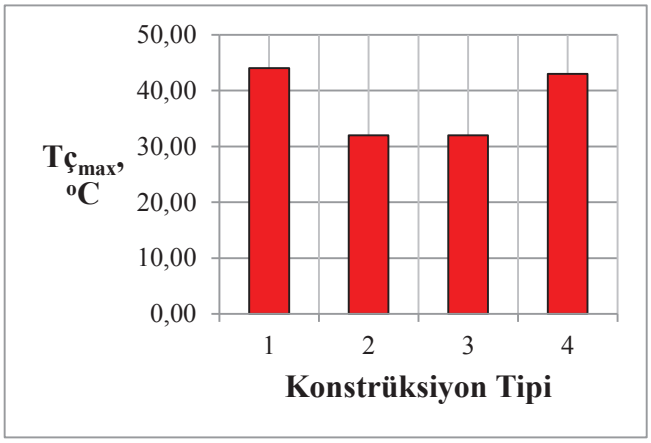
180 dakikalık periyotta ortalama Tç sıcaklığı için en düşük değerin tip 2, en yüksek değerin ise tip 1'de elde edildiği görülmektedir. En yüksek Tç sıcaklığı olarak en yüksek değer tip 1, en düşük değer ise tip 2 ve tip 3'de elde edilmiştir. En düşük Tç sıcaklığı değerlendirmesinde en yüksek değer tip 1, en düşük değer ise tip 2'de elde edilmiştir.

Çizelge 6.15. Konstrüksiyon tiplerine göre kazan su çıkış sıcaklık değerleri

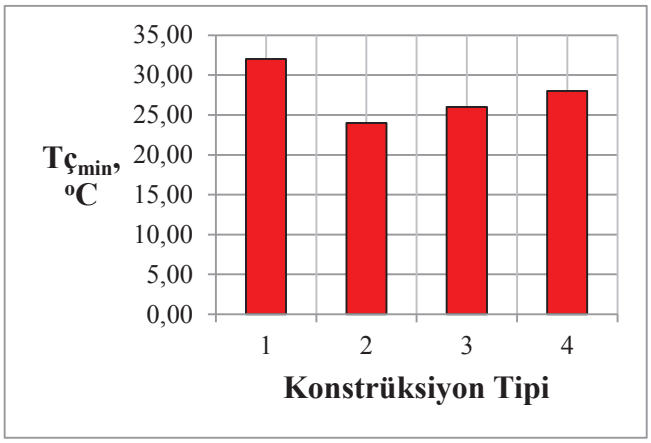
	$T_{ç_{min}}$, °C	$T_{ç_{max}}$, °C	$T_{ç_{ort}}$, °C
Tip 1	32,00	44,00	40,04
Tip2	24,00	32,00	27,84
Tip3	26,00	32,00	30,47
Tip4	28,00	43,00	37,68



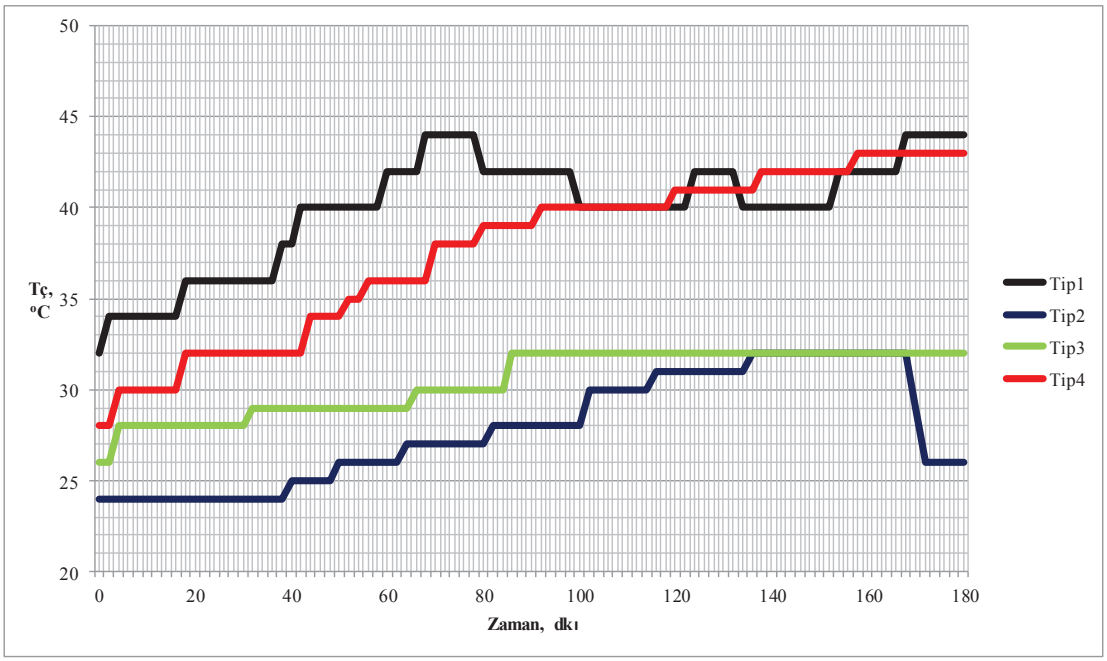
Şekil 6.101. Konstrüksiyon tiplerine göre ortalama kazan su çıkış sıcaklık değerleri



Şekil 6.102. Konstrüksiyon tiplerine göre en yüksek kazan su çıkış sıcaklık değerleri



Şekil 6.103. Konstrüksiyon tiplerine göre en düşük kazan su çıkış sıcaklık değerleri



Şekil 6.104. Konstrüksiyon tiplerine göre kazan su çıkış sıcaklık değerinin zamanla

6.6 İkincil Havanın Sisteme Verilmesi için Gerekli Koşullar

Deney düzeneğinde, yanma haznesine ikincil havanın verilmesi ile yanma veriminin arttırılması ve zararlı emisyon miktarının azaltılması hedeflenmiştir. Alev üzerinden yanma haznesine temin edilen ikincil havanın, yakıt içerisindeki uçucuları yakarak, baca gazı içerisinde tam yanmamış, zararlı emisyon miktarını azaltması beklenmiştir. İkincil havanın yanma hacmine verilmesi ile baca gazı ölçümlerinde, λ, CO emisyonu ve O_2 emisyonu değerleri düşmeli, yanma verimi ve CO_2 emisyonu değerleri yüksek çıkmalıdır. Yapılan çalışmada, ikincil havanın yanma haznesine temini ile beklenen bu etkiler sağlanmıştır. Ancak hangi koşullarda ikincil hava verilmesinin en olumlu etki verdiğinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla ikincil havanın verilmesi gerekli en uygun konum, zaman ve debi araştırılmıştır.

İkincil hava için uygun konum araştırılırken tüm konstrüksiyon tiplerinde, halka kolektörlerle ve üstten DN40 tek bir boru ile ikincil hava verilmesi yöntemlerinin hepsinde, hava, alevin üzerinden yanma haznesine temin edilmiştir. Çizelge 6.16 incelendiğinde aleve daha yakın mesafedeki konum olan en alt halka kolektörün istenilen şartları en iyi sağladığı görülmektedir. İstenilen şartlar, λ, CO emisyonu, O_2 emisyonu değerleri azalırken yanma verimi ve CO_2 emisyonu değerlerinin aynı anda artmasıdır. Alevi dağıtacak şekilde, alev üzerinden verilen ikincil hava baca gazı değerlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Alev üzerinden uzaklaştıkça ortam sıcaklığı düşeceğinden, ikincil havanın alev üzerine mümkün olan en yakın konumdan verilmesi gerekmektedir.

Yakıt içerisinde bulunan uçucuların, birincil hava ile yakılamayacağı, alev üzerinden verilen ikincil hava ile yakılacağı literatürden bilinmektedir. Yapılan deneysel çalışmada baca gazı değerleri kötüleştiği esnada, yakıt karıştırılmış, kül temizliği yapılmış ve taze yakıt sisteme verilmiştir. İşte tam bu esnada yüksek CO emisyonu salınımı gerçekleşirken, yakıttan beyaz duman halinde su buharı tahliyesi yapılmaktadır. Beyaz duman çıkışının kesilmesiyle sisteme verilen ikincil havanın istenilen şartları sağladığı, deney sonuçları incelendiğinde tüm konstrüksiyon tiplerinde görülmüştür. Ancak yakıt içerisindeki uçucular ikincil hava ile yanıp bittikten sonra, sisteme ikincil hava teminine devam edildiğinde, yanmaya iştirak edemeyen fazla hava ocak sıcaklığını düşürüp, tam yanma egzotermik reaksiyonlarını engellemekte ve baca gazı değerlerini olumsuz etkilemektedir. Sürekli yakıt beslemesi yapılmayan sistemlerde bu yüzden ikincil hava sisteme sürekli verilmemelidir. Yapılan deneysel

çalışmada, verilen yakıt miktarına bağlı olarak bu süre 6–10 dk. arası tespit edilmiştir. Ancak daha büyük kapasiteli kazanlarda bu süre verilen yakıt debisi ve yakıtın içerdiği uçucu miktarına göre değişiklik gösterecektir.

Her yakıtın içerdiği belirli bir miktar uçucu vardır. Bu miktar, yakıt elementel analizi yapılarak tespit edilebilir. 6 kg/h debide, % 2.1 uçucu içeren, 7760 kcal/kg alt ısıl değere sahip yakıt kullanıldığında sisteme verilmesi gerekli ikincil hava, birincil hava debisinin yaklaşık %30'u olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen tüm optimum koşullar, otomatik yakma yönetim sitemleri kullanılarak otomasyon ile çok rahat tespit edilebilir.

Çizelge 6.16. İkincil havanın yanma parametrelerine etkisi

Konum	Hız (m/s)	İç çap (m)	Yoğunluk (kg/m^3)	Debi (kg/h)	λ, (Değişim, ±)	O_2, (Değişim, ± %)	CO, (Değişim, ± ppm)	CO_2, (Değişim ± %)	ɲ, (Değişim, ± %)	Uygulama Süresi (dk)
En alt halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-1,72	-3,50	-355	3,50	8,70	6
En alt halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	0,42	1,10	118	-1,09	1,20	8
En alt halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	0,10	0,10	77	-0,30	-0,30	12
En alt halka kollektör	30	0,0157	1,20	25,09	-0,48	-2,20	445	1,63	1,90	10
En alt halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-0,01	-0,10	-13	0,00	0,80	6
En alt halka kollektör	15	0,0157	1,20	12,54	-0,02	-0,10	11	0,20	-0,20	8
En alt halka kollektör	40	0,0157	1,20	33,45	-0,04	-0,40	41	0,30	-0,10	6
En alt halka kollektör	30	0,0157	1,20	25,09	-0,03	-0,30	-44	0,30	0,30	10
En alt halka kollektör	30	0,0157	1,20	25,09	-0,28	-1,70	-194	1,40	1,10	8
Orta Halka Kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-0,08	-0,20	9	0,30	1,30	6
Orta Halka Kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-0,31	-0,50	-32	0,50	2,60	8
Orta halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-0,01	0,10	-71	0,00	0,10	10

Çizelge 6.16. Devam

Konum	Hız (m/s)	İç çap (m)	Yoğunluk (kg/m^3)	Debi (kg/h)	λ, (Değişim, ±)	O_2, (Değişim, ± %)	CO, (Değişim, ± ppm)	CO_2, (Değişim ± %)	ɲ, (Değişim, ± %)	Uygulama Süresi (dk)
En üst halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-0,10	-0,20	-19	0,27	1,60	8
En üst halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-0,21	-1,40	1449	1,60	4,10	10
En üst halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-0,02	0,20	10	-0,10	-0,20	8
En üst halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-0,09	-0,40	-51	0,19	1,00	6
En üst halka kollektör	25	0,0157	1,20	20,91	-0,03	-0,30	90	0,10	0,60	10
Üstten DN40	10	0,0352	1,20	42,04	-0,43	-0,85	9	0,93	2,50	8
Üstten DN40	7	0,0352	1,20	29,43	-0,07	-0,30	-249	0,50	0,50	10
Üstten DN40	7	0,0352	1,20	29,43	-0,09	-0,30	-2	0,10	-1,00	8
Üstten DN40	7	0,0352	1,20	29,43	-0,14	-0,70	-44	0,50	-1,50	10
Üstten DN40	7	0,0352	1,20	29,43	-0,03	-0,23	5	0,22	0,30	6

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Dik duman borulu kazanın yanma haznesinde oluşturulan dört farklı konstrüksiyon tipi için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- İkincil havanın, alevin bitiminin hemen üzerine tatbik edilmesi gerekmektedir
- İkincil hava, optimum birincil hava debisinde, birincil hava debisinin yaklaşık % 30'u kadar verilmelidir. Ancak ikincil hava debisi yakıtın uçucu içeriğine bağlı olarak değişecektir.
- İkincil hava, uçucuları yaktığı için sisteme taze yakıt verildiği sırada, yakıt miktarına bağlı olarak sisteme sürekli olarak değil, belirli bir sürede verilmelidir. Sisteme sürekli olarak ikincil hava verildiği durumda ocak sıcaklığı azalmakta ve yanma kötüleşmektedir.
- İkincil havanın sisteme tatbikini, otomatik yakma yönetim sistemi kullanarak otomatik kontrolle yapmak, maksimum verim artışı ve minimum zararlı emisyon salınımı sağlayacaktır.
- İkincil hava uygulanılan noktada en az 600 ℃ sıcaklık temin edilmelidir.
- Katı yakıt kullanılan büyük kapasiteli kazanlarda, yüksek uçuculu yakıtlar kullanıldığında kazana ikincil hava uygulaması kesinlikle yapılmalıdır.
- Kazana ikincil hava uygulaması yapılırken 6.6'da belirtilen koşullara dikkat edilmesi gerekmektedir.

Deneysel çalışmada ikincil havanın CO, O_2 ve λ değerlerinin yükseldiği anda verilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Büyük kapasiteli ve sürekli yakıt beslemesi yapılan kazanlarda ve yanma haznesinin tamamında, küçük tanecikli yakıtların yakılmasıyla, uniform yanma elde edilen akışkan yataklı kazanlarda, ikincil hava, sürekli uçucu üretimi sağlandığından dolayı sürekli kullanılabilmektedir. Ancak sürekli yakıt beslemesinin sağlanmadığı, küçük ve orta büyüklükteki ev tipi ve endüstriyel kazanlarda ikincil havanın sürekli kullanımı doğru olmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı, ikincil hava beslemesinin, otomasyon ile, kazana gerektiği anlarda verilmesi gerekmektedir. Yanma haznesine yerleştirilecek, CO, O_2 ve λ sensörleriyle sürekli ölçümler alınarak, yükselmeleri halinde ikincil hava fanına sinyal gönderilerek açılması,

düşüşün durması ve yeniden yükselmenin başlamasıyla ikincil hava fanının kapatılması sağlanabilir. Böylelikle ikincil hava etkin bir şekilde kullanılmış olur.

7.2 Öneriler

İkincil hava kullanımı, büyük sistemlerde otomatik yakma yönetim sistemleriyle yapılmalıdır. Sonuçlar kısmında belirtilen hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu konuda yapılacak çalışmalarda, ikincil havanın otomatik yakma yönetim sistemleri ile birlikte uygulanması konusuna ağırlık verilmelidir.

8. KAYNAKLAR

Afanas'ev, Y.O., Shilyaev, M.I., Bogomolov, A.R., Afanas'ev, K.Yu., 2012, The influence of secondary air supply on the aerodynamics of a cyclone furnace reactor, *Thermal Engineering,* 59 (8), 593-597.

Arısoy, A., Genceli, O., Onat, K., 2007, Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları, *Birsen Yayınevi,* 4.Baskı, İstanbul.

Asiltürk, İ., 1999, Katı yakıt ocaklarında (soba) ısıl verim ve emisyon davranışının deneysel olarak incelenmesi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,* Kayseri.

Atalay, Y., Durmaz A., 1995, Kömürlü kalorifer kazanlarında tasarım ve işletme parametrelerinin deneysel incelenmesi, *95'Teskon/ENE 034, Makine Mühendisleri Odası,* Ankara.

Atimtay, A., Varol, M., 2009, Investigation of co-combustion of coal and olive cake in a bubbling fluidized bed with secondary air injection, *Fuel* 88, 1000-1008.

Bilgin, A., 2006, Kazanlarda enerji verimliliği, *Tesisat Mühendisliği Dergisi,* 95, 13-18.

Bilir, Ş., 1982, Optimization of the unit wood burner stove, Yüksek Lisans Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,* Ankara.

Eryener, D., 2003, Türbülanslı cebri konveksiyonla ısı geçişi sağlayan ısıl sistemlerin ekserji ekonomik analizi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,* Edirne.

Genceli, O.F., 2008, Ölçme Tekniği (Boyut, Basınç, Akış ve Sıcaklık Ölçmeleri), *Birsen Yayınevi,* İstanbul.

Keçebaş, A., 2005, Üstten ve alt yandan beslemeli kömür sobasının hava kirliliğine etkisinin karşılaştırılması, Bilim uzmanlığı tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı,* Karabük.

Li, S., Wu, A., Deng, S., Pan, W., 2008, Effect of co-combustion of chicken litter and coal on emissions in a laboratory-scale fluidized bed combustor, *Fuel Processing Technology*, 89, 7-12.

Li, Z., Ren, F., Chen, Zhi., Chen, Zha., Wang, J., 2010, Influence of declivitous secondary air on combustion characteristics of a down-fired 300-MW_e utility boiler, *Fuel* 89, 410-416.

Li, Z., Ren, F., Liu, G., Shen, S. and Chen, Z., 2011, Influence of Angled Secondary Air on Combustion Characteristics of a 660-MW_e Down-Fired Utility Boiler, *Combust. Sci. and Tech.,* 183:238-251.

Olgun, B., Özil, E., 2012, Doğalgaz yakıtlı kazanlarda yanma verimi ve yanma gazı analizi, *Termoklima,* Ağustos 2012, 134-136.

Prompubess, C., Meksasut, L., Piumsomboon, P. And Kuchontara, P., 2007, Co-combustion of coal and biomass in a circulating fluidized bed combustor, *Korean J. Chem. Eng.* 24(6), 989-995.

Topal, H., Durmaz, A., 1995, Isıtma tesisatında yapısal kazan tadilatının emisyonlar ve yakıt tüketimine etkisi, *95'Teskon/ENE 035, Makine Mühendisleri Odası,* Ankara.

Ustaoğlu, C., 1975, Optimization of unit coal burner stove, Yüksek Lisans Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,* Ankara.

Varol, M., Atimtay, A., 2007, Combustion of olive cake and coal in a bubbling fluidized bed with secondary air injection, *Fuel* 86, 1430-1438.

Zandeckis, A., Blumberga, D., Rochas, C., Veidenbergs, I., Silins, K., 2010, Methods of Nitrogen Oxide Reduction in Pellet Boilers, *Scientific Journal of Riga Technical University, Environmental and Climate Technologies,* 4, 123-129.

http://www.akkaya.com.tr/urun-010.htm

http://www.akkaya.com.tr/urun/doc/ka/KA-KATALOG.pdf

http://www.britannica.com/EBchecked/media/113942/Schematic-diagram-of-a-fluidized-bed-combustion-boiler

http://www.energyefficiencyasia.org/energyequipment/typesofboiler.html

http://www.foodtechinfo.com/FoodPro/GasTechnologies/boilers.htm

http://www.pirobloc.com/en/products/thermal-oil-heaters.php

http://www.resimyukle.com/buhar-kazani_1ia6

http://www.rima.com.tr/pdf/RS_ManualTR.pdf

http://www.savasdemirtas.com/wp-content/uploads/2012/01/Vitomax-100-LW-2.jpg

Resmi gazete 22.07.2006 tarih ve 26236 sayılı endüstri tesislerinden kaynaklanan hava kirliliğinin kontrolü yönetmeliği, Sayfa 25, Tablo 5.1

Testo flue gas analysis in industry, practical guide for emission and process measurements, 2.Edition

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed Halis GÜNDOĞDU
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Kulu ve 09.07.1988
Telefon : 0 506 752 88 04
Faks : -
e-mail : mh_gundogdu@hotmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**Anadolu Lisesi, Ereğli, Konya**	**2006**
Üniversite	:	**Çukurova Üniv. MMF Mak.Müh., Adana**	**2010**
Yüksek Lisans	:		
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2011- halen	**Akkaya Isı Mak. ve Doğ. San.Tic.A.Ş.**	**Proje Mühendisi ve Yönetim Temsilcisi**

UZMANLIK ALANI **Kazanlar, Kaynaklı imalat, Ürün projelendirme ve CE belgelendirilmesi, NDT, Kalite Yönetim Sistemi,**

YABANCI DİLLER **İngilizce**

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

Almış Olduğu Mesleki Sertifikalar

- ISO 14731 Kaynak Koordinatörlüğü
- EN473 Uluslararası Ultrasonik Test Seviye 1
- EN473 Uluslararası Manyetik Parçacık Test Seviye 2
- ISO 9001 İç Tetkik
- ISO 9001 Dokümantasyon
- ISO 9001 Temel Eğitim
- Solidworks Uluslararası CSWA
- Genel Metroloji
- Ölçüm Belirsizliği

YAYINLAR