



T.C.
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

BİR KÖMÜR GAZLAŞTIRMA SİSTEMİNİN
ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

SANCAR GÜNGÖR

Eylül 2015

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

BİR KÖMÜR GAZLAŞTIRMA SİSTEMİNİN
ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

SANCAR GÜNGÖR

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Murat GÖKÇEK

Eylül 2015

Sancar GÜNGÖR tarafından **Doç. Dr. Murat GÖKÇEK** danışmanlığında hazırlanan “**BİR KÖMÜR GAZLAŞTIRMA SİSTEMİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makina Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Ünal AKDAĞ (Aksaray Üniversitesi)



Üye : Doç.Dr. Mahmut ALKAN (Niğde Üniversitesi)



Üye : Doç.Dr. Murat GÖKÇEK (Niğde Üniversitesi)



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

(İmza)

SANCAR GÜNGÖR

ÖZET

BİR KÖMÜR GAZLAŞTIRMA SİSTEMİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

GÜNGÖR, Sancar

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Murat GÖKÇEK

Eylül 2015, 42 sayfa

Bu yüksek lisans çalışmasında, sayısal modellemesi önceden hazırlanmış olan bir kömür gazlaştırma sisteminin her bir aşaması için ekserji analizi yapılmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan kömür gazlaştırma sistemi; bir adet gazlaştırma reaktörü ve bunu takip eden iki adet su gazı reaktöründen meydana gelmektedir. Gazlaştırma sistemi için geliştirilen sayısal model, sistemde kullanılacak kömürün içerisindeki karbonun tamamının gazlaştığını kabul ederek, sistem çıkışında hidrojen gazı miktarının karbon monoksit gazı miktarının iki katı olması durumuna göre optimum sistem işletme parametrelerini tespit etmektedir. Sistemde optimum işletme şartlarını tespit edebilmek amacıyla gazlaştırıcıdan hemen sonra bir baypas kullanılarak su gazı reaktörleri çıkışında gelen gaz ile gazlaştırıcı çıkışındaki gaz birleştirilmektedir. Bu çalışmada yapılan ekserji analizi ile, daha önce geliştirilen sayısal model çalışmasında önerilen çalışma şartı senaryolarının hangisinin daha verimli olduğu net şekilde vurgulanarak, sistemin optimum sonucu verirken en verimli şekilde çalışmasını sağlayacak işletme şartları net olarak ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Kömür gazlaştırma, modelleme, termodinamik analiz, ekserji

SUMMARY

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF A COAL GASIFICATION SYSTEM

GÜNGÖR, Sancar

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Murat GÖKÇEK

September 2015, 42 pages

In this MSc thesis study, the exergy analysis has been carried out for all phases of a previously designed numerical modelling of a coal gasifier. The mentioned coal gasifier is made up of a gasification reactor and two consequent vapour water gas shift reactors. The numerical model developed for the gasification system assumes that all carbon in the coal is gasified and defines the optimum working condition as the amount of hydrogen as the double of the amount of carbon monoxide at the gasification system exit. In order to achieve the optimum parameters, the gases of the gasifier and the gases of water gas shift reactors are combined with the aid of a bypass line. Through the exergy analysis carried out in this study, the most efficient and high-yield method for the operation conditions is emphasized and highlighted, which were suggested in the previous numerical modelling study, a crucial fact for minimizing operating and investment costs.

Keywords: Coal gasification, modeling, thermodynamic analysis, exergy

ÖN SÖZ

Kömür gazlaştırıcılarının tasarımı; kömürün yüksek bir verimle gazlaştırılması ve ürün gazlarının istenilen kompozisyonlarda ve miktarlarda elde edilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bir kömür gazlaştırma sisteminin termodinamik analizi, o sistemin en verimli şekilde çalıştırılmasını sağlayacak iyileştirmelerin yapılabilmesi için en doğru bilimsel yaklaşım olacaktır. Bu yüksek lisans çalışmasında, iki aşamalı su gazı yönlendirme reaktörü bulunan bir kömür gazlaştırma sisteminin her bir aşaması için ekserji analizi yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan ekserji analizi ile, böyle bir gazlaştırıcının en uygun şartlarda çalışmasını sağlayacak tasarım parametrelerinin tespiti mümkün olacaktır. Böylelikle, hem kendi öz kaynaklarımız daha verimli kullanılmış olacak, hem de gelecek nesillere yaşanabilir sürdürülebilir bir çevre temin edilmiş olacaktır.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Murat GÖKÇEK'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez çalışmam esnasında tecrübelerine başvurduğum Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR'e müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
ÇİZELGELER	viii
ŞEKİLLER.....	ix
SİMGE VE KISALTMALAR	x
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II GENEL BİLGİLER VE KÖMÜR GAZLAŞTIRICI MODELİ.....	3
2.1 Gazlaştırıcı Modeli	3
2.2 Çözüm Metodu	8
2.3 Model Bulguları	12
BÖLÜM III ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ.....	18
3.1 Termodinamik Kavramlar.....	19
3.2 Ekserji Bileşenleri.....	25
3.2.1 Fiziksel ekserji	26
3.2.2 Kimyasal ekserji.....	26
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA	29
BÖLÜM V SONUÇLAR.....	37
KAYNAKLAR	39
ÖZ GEÇMİŞ	42

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Gazlaştırıcı reaksiyon sabitleri	5
Çizelge 2.2. Gazlaştırıcı reaksiyon sabitleri	6
Çizelge 2.3. Hidrojenle gazlaştırma, su gazı ve Boudouard tepkimelerinin denge sabitleri.....	6
Çizelge 2.4. Kömür gazlaştırma modelinde kullanılan denklemler.....	7
Çizelge 2.5. SGY reaksiyonları denge sabitleri	9
Çizelge 2.6. Çalışmada kullanılan kömür çeşitleri	13
Çizelge 2.7. Gazlaştırıcıdan gelen sentez gazının kompozisyonu.....	13
Çizelge 2.8. Kömür tipi 1: Farklı buhar oranı çiftleri ile iki kademeli SGY reaktör sisteminin çıkışındaki sentez gazı bileşimi ve sıcak ve soğuk gaz verimlerinin değişimi.....	14
Çizelge 2.9. Geliştirilen program sonucunda elde edilen sonuçlar.....	17
Çizelge 3.1. Enerji ve ekserji arasındaki başlıca farklar.....	23
Çizelge 3.2. Özgül molar entropi değerleri.....	28
Çizelge 3.3. Özgül ısı değerlerinin sabit basınçta sıcaklıkla değişimi.....	28

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Sayısal model akış diyagramı	10
Şekil 2.2. Seri SGY reaktör sayısal modeli akış diyagramı	11
Şekil 2.3. Gazlaştırıcı şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.4. Beslenen kömürün 1 ton olması durumunda kömür gazlaştırıcısı model sonuçları.....	14
Şekil 3.1. Enerji, çevre ve sürdürülebilirliğin ekserji ile ilişkisi.....	24
Şekil 4.1. Gazlaşma sistemi.....	29
Şekil 4.2. By-pass oranı %10 olması durumunda model sonuçları.....	31
Şekil 4.3. By-pass oranı %30 olması durumunda model sonuçları.....	32
Şekil 4.4. By-pass oranı %50 olması durumunda model sonuçları.....	33
Şekil 4.5. By-pass oranlarına göre H ₂ mol oranları.....	34
Şekil 4.6. By-pass oranlarına göre CO mol oranları.....	35
Şekil 4.7. By-pass oranlarına göre sentez gazı mol miktarları.....	35
Şekil 4.8. By-pass oranlarına göre ekserji miktarları.....	36

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
\dot{Q}	Birim zamandaki net ısı geçişi (kW)
\dot{W}_{KH}	Kontrol hacmi için birim zamandaki net iş geçişi (kW)
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
h	Entalpi (kJ/kg)
V	Akışın hızı (m/s)
z	Yükseklik (m)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
T	Sıcaklık
δQ	Sistem ve çevre arasındaki diferansiyel ısı transferi
F	1Nm ³ gaz elde edebilmek için gerekli kuru yakıt miktarı
X_c	Yakıtın karbon oranını (kg karbon/kg yakıt)
A	Beslenen hava oranını (kg kuru hava/kg kuru yakıt)
V	Gazın hacimsel oranını (gaz hacmi/reaktör hacmi)
S	Hava ve su buharı ile beslenen toplam su buharı oranını (kg su buharı/kg kuru yakıt)
W	Yakıtın nem oranı (kg nem/kg kuru yakıt)
X_H	Yakıtın hidrojen oranını (kg hidrojen/kg kuru yakıt)
O_a	Havadaki oksijen oranını
X_O	Yakıtın oksijen oranı (kg oksijen/kg kuru yakıt)
X_N	Yakıtın azot oranını (kg azot/kg kuru yakıt)
N_a	Havadaki azot oranını
P	Kısmi basınç
E	Ekserji

Kısaltmalar	Açıklama
SGY (WGS)	Su Gazı Yönlendirme
SİMOD	Simülasyon ve Modelleme
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

BÖLÜM I

GİRİŞ

Gün geçtikçe artan enerji ihtiyacının karşılanmasında ülkemiz öz kaynaklarının kullanılması büyük bir önem taşımaktadır. Mevcut rezervler dikkate alındığında kömürün, ülkemiz enerji ihtiyacının karşılanmasındaki öneminin büyük olduğu görülmektedir. Kömürün enerjiye dönüştürülmesinde kullanılan teknolojilerden birisi de gazlaştırma teknolojisidir. Temiz kömür teknolojilerinden biri olan gazlaştırma; sınırlı miktarda oksijen, hava, hava-su buharı karışımı veya zenginleştirilmiş oksijen içerikli hava verilerek, sentez gazı olarak adlandırılan, yanabilen gaz bileşenlerin (CO, H₂, CH₄ vb.) oluşumunu sağlayan bir işlemdir. Günümüzde, farklı amaçlara yönelik ticarileşen pek çok gazlaştırma prosesi bulunmaktadır. Gazlaştırma ile kömürden elektrik, sıvı yakıt ve çeşitli kimyasal maddelerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Son zamanlarda gazlaşma prosesinin güç üretiminde kullanılması gelişmekte olan sektörlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Gazlaştırma teknolojisinin ülkemiz kömürlerine uygulanması, mevcut kaynaklarımızın verimli ve çevreci şekilde değerlendirilmesini sağlayacağı gibi, ülkemiz enerji ihtiyacının karşılanmasında dışa bağımlılığımızı azaltacağından stratejik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu tarafından 2013 yılında alınan bir karar ile ülkemizin öncelikli alanları arasında yer aldığı ve konu ile ilgili gerekli çalışmaların Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve TÜBİTAK öncülüğünde yapılmasına karar verilmiştir.

Bir kömür gazlaştırma sisteminin termodinamik analizi, o sistemin en verimli şekilde çalıştırılmasını sağlayacak iyileştirmelerin yapılabilmesi için en doğru bilimsel yaklaşım olacaktır. Özellikle termodinamiğin ikinci kanunu dikkate alınarak yapılan ekserji analizi ile kömürün temiz bir şekilde enerjiye dönüştürülmesini sağlayan gazlaştırma prosesinin her adımındaki kayıpların bir değerlendirilmesi yapılarak, sistemin optimum şartlarda çalışmasını sağlayacak değerlendirmeler yapılabilecektir. Yapılacak olan bu değerlendirmeler, özellikle gazlaştırıcı tasarımı esnasında çok önemli olacaktır. Bu sayede, hem ülke kaynaklarının rasyonel bir şekilde değerlendirilmesi mümkün olacak, hem de sürdürülebilir çevre ve enerji verimliliği dikkate alınmış olacaktır.

Bu çalışmada, sayısal modellemesi önceden hazırlanmış olan bir kömür gazlaştırma sisteminin her bir aşaması için ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan ekserji analizi ile, gazlaştırıcı için önerilen çalışma şartı senaryolarının hangisinin daha verimli olduğu vurgulanarak, sistemin en uygun sonucu verirken en verimli şekilde çalışmasını sağlayacak işletme şartlarının net olarak ortaya konması hedeflenmiştir.

BÖLÜM II

GENEL BİLGİLER VE KÖMÜR GAZLAŞTIRICI MODELİ

Kömür gazlaştırıcılarının tasarımı; kömürün yüksek bir verimle gazlaştırılması ve ürün gazlarının istenilen kompozisyonlarda ve miktarlarda elde edilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bununla beraber, bir gazlaştırıcı için optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespitinde, gerçek boyuttaki kömür gazlaştırıcılarla çalışmanın gerek zaman ve ekonomiklik, gerekse uygulama açısından pratik olmayacağı açıktır. Bu nedenle, geliştirilen bir model ile, bir kömür gazlaştırıcısında etkin olan tasarım ve işletme parametrelerinin tespiti ve sistemin optimum çalışmasını sağlayacak parametrelerin belirlenmesi mümkün olacaktır. Bu çalışmada, SİMOD grubu tarafından Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu bünyesinde bir Ar-Ge projesi olarak gerçekleştirilen “Türk Kömürlerinin Gazlaştırılmasının Sayısal Modellenmesi” isimli projede geliştirilmiş ve bazı sonuçları literatürde yayınlanmış olan sayısal model tanıtılmış ve kullanılmıştır (Güngör vd., 2011; Güngör vd., 2012; Özbayoğlu vd., 2013).

2.1 Gazlaştırıcı Modeli

Değişik kömür özelliklerinin ve süreç parametrelerinin değerlerinin geniş bir aralığa sahip olması enerji üretimi için en uygun sentez gazı bileşiminin elde edilmesini oldukça zor kılmaktadır. Sentez gazı bileşimini etkileyen çok sayıda parametre olması problemi daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, geliştirilen bir model ile en uygun sentez gazı bileşiminin elde edilmesi mümkün olacaktır.

Geliştirilen sayısal model; verilen işletme sıcaklığını, basıncı, su buharı-yakıt ve hava-yakıt oranlarını giriş değeri olarak almakta ve gazlaşma işlemi sonucunda elde edilecek hidrojen, karbon monoksit, azot, metan, su buharı, karbondioksit ve 1 Nm^3 gaz elde edebilmek için gerekli yakıt miktarını hesaplayabilmektedir. Bunun yanında; karbon dönüşüm verimini, soğuk gaz verimini (elde edilen gazların çevre sıcaklığına soğutulması durumu için) hesap edebilmektedir. Geliştirilen model; işletme sıcaklığı, işletme basıncı, su buharı-yakıt ve hava-yakıt oranları gibi işletme parametrelerinin gazlaştırıcı verimi ve elde edilen gaz kompozisyonları üzerindeki etkilerini incelemeye de olanak sağlamaktadır. Geliştirilen model; gazlaştırıcı reaktör çıkışında elde edilmek

istenen H₂/CO değeri için optimum baypas oranı, 1. ve 2. SGY reaktörleri için optimum su buharı oranı ve optimum reaktör sıcaklığı değerini elde edecek şekilde geliştirilmiştir.

Geliştirilmiş olan sayısal modellemede, kömür gazlaştırma işlemi kinetik olarak modellenmiş ve gazlaştırıcı olarak hava ve su buharı kullanılmıştır. Modelde gazlaştırıcı için dikkate alınan reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:



Burada 2.1 numaralı eşitlik hidrojenle gazlaştırma tepkimesi, 2.5 numaralı eşitlik su gazı tepkimesi ve 2.7 numaralı eşitlik Boudouard tepkimesi olup, literatürde gazlaştırıcı reaktör içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar için reaksiyon sabitleri ise Çizelge 2.1-2’de verilmiştir.

Geliştirilen modelde kullanılmak üzere su gazı, Boudouard ve hidrojenle gazlaştırma tepkimelerinin denge sabitlerinin sıcaklıkla değişimleri Çizelge 2.3’de verildiği gibi dikkate alınmıştır.

Kömürlerin gazlaştırılmasıyla elde edilen gazların bileşim ve miktarı, kömürün tepkime yeteneğine, kullanılan gazların cinsine ve uygulanan gazlaştırma işlemine (basınç, sıcaklık, kömür ve gazın akış yönleri v.b.) bağlıdır (Canel, 1986).

Çizelge 2.1. Gazlaştırıcı reaksiyon sabitleri (Ray ve Thorpe, 2007)

Reaksiyonlar	Reaksiyon Sabitleri	Reaksiyon Isısı (kJ/mol)
<u>Oksitlenme</u> $C + O_2 \rightarrow CO_2$	$k = 5.67 \times 10^9 x \exp\left(-\frac{160 \times 10^3}{RT}\right) s^{-1}$	407.4
<u>Gazlaşma</u> Boudouard reaksiyonu: $C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$k = 1.6 \times 10^{12} x \exp\left(-\frac{22409.64}{T}\right) s^{-1}$	-173.8
Karbon-subuharı reaksiyonu: $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$k = 1.33 \times 10^3 T x \exp\left(-\frac{17500}{T}\right) s^{-1}$	-131.0
Su gazı yönlendirme reaksiyonu: $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$k = 5.14 \times 10^4 x \exp(3.995 \times 10^{-4} T) (kmol/m^3)^{-1} s^{-1}$	43.47
$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	$k = 2.63 \times 10^6 x \exp\left(3.995 \times 10^{-4} T - \frac{2762}{T}\right) (kmol/m^3)^{-1} s^{-1}$	-43.47

Çizelge 2.2. Gazlaştırıcı reaksiyon sabitleri (Kaushal vd., 2008)

Sayı	Kimyasal Reaksiyon
(1)	$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightleftharpoons CO + H_2O$
(2)	$C_2H_4 + 2O_2 \rightleftharpoons 2CO + 2H_2O$
(3)	$C_2H_6 + \frac{5}{2}O_2 \rightleftharpoons 2CO + 3H_2O$
(4)	$C_3H_8 \rightleftharpoons CH_4 + C_2H_4$
(5)	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons H_2O$
(6)	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons CO_2$
(7)	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$

Sayı	Reaksiyon Sabiti	Reaksiyon Katsayısı (k)
(1)	k_{CH_4}	$4.58 \times 10^{18} T^{0.5}$
	$[CH_4]^{0.7} [O_2]^{0.8}$	$\exp(-20,087/T)$
(2)	$k_{C_2H_4} [C_2H_4] [O_2]$	1.0×10^{12}
		$\exp(-20.844/T)$
(3)	$k_{C_2H_6} [C_2H_6] [O_2]$	$2.34 \times 10^{18} T^{0.5}$
		$\exp(-20,087/T)$
(4)	$k_{C_2H_5} [C_3H_5]$	$1.0 \times 10^{12} \exp(-21,145/T)$
(5)	$k_{H_2} [H_2]^{1.5} [O_2]$	$51.8 \times T^{3/2} \exp(-3420/T)$
(6)	$k_{CO} [CO]$	$3.25 \times 10^7 \exp(-15,098/T)$
	$[O_2]^{0.5} [H_2O]^{0.5}$	
(7)	$k_{chift} [CO] [H_2O]$	$0.03 \times \varepsilon \exp(-7249/T)$

Çizelge 2.3. Su gazı, Boudouard ve hidrojenle gazlaştırma tepkimelerinin denge sabitleri (Kotas, 1995)

Sıcaklık (K)	K_{pw} $C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$	K_{pb} $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$	K_{pm} $C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$
400	7.709×10^{-11}	5.225×10^{-14}	2.989×10^5
800	4.406×10^{-2}	1.090×10^{-2}	1.339×10^0
1500	6.081×10^2	1.622×10^3	2.505×10^{-3}

Çizelge 2.4. Kömür gazlaştırma modelinde kullanılan denklemler

<p>Karbon dengesi:</p> $\frac{FX_c}{12} = \frac{(V_{CO} + V_{CO_2} + V_{CH_4})}{22.4}$
<p>Hidrojen dengesi:</p> $F \left(\frac{S}{18} + \frac{X_H}{2} + \frac{W}{18} \right) = \frac{(V_{H_2} + V_{H_2O} + 2V_{CH_4})}{22.4}$
<p>Oksijen dengesi:</p> $F \left(\frac{S}{36} + \frac{X_O}{32} + \frac{W}{36} + \frac{AO_a}{32} \right) = \frac{(0.5V_{CO} + V_{CO_2} + 0.5V_{H_2O})}{22.4}$
<p>Azot dengesi:</p> $F \left(\frac{X_N}{28} + \frac{AN_a}{28} \right) = \frac{V_{N_2}}{22.4}$
<p>Hacim oranları toplamı:</p> $V_{CO} + V_{CO_2} + V_{H_2} + V_{CH_4} + V_{H_2O} + V_{N_2} = 1$
<p>Boudouard tepkimesi denge sabiti:</p> $K_{pb} = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = \frac{(V_{CO}P)^2}{V_{CO_2}P}$
<p>Su gazı tepkimesi denge sabiti:</p> $K_{pw} = \frac{P_{H_2}P_{CO}}{P_{H_2O}} = \frac{(V_{H_2}P)(V_{CO}P)}{V_{H_2O}P}$

Kömürün gazlaştırılması işleminde (2.1-9) numaralı reaksiyonlar dikkate alınmış ve Çizelge 2.4’de verilen denklem ve bağıntılardan yararlanılmıştır. Çizelge 2.4’te F; 1Nm³ gaz elde edebilmek için gerekli kuru yakıt miktarını, X_c; yakıtın karbon oranını (kg karbon/kg yakıt), A; beslenen hava oranını (kg kuru hava/kg kuru yakıt), V; gazın hacimsel oranını (gaz hacmi/reaktör hacmi), S; hava ve su buharı ile beslenen toplam su buharı oranını (kg su buharı/kg kuru yakıt), W; yakıtın nem oranı (kg nem/kg kuru yakıt), X_H; yakıtın hidrojen oranını (kg hidrojen/kg kuru yakıt), O_a; havadaki oksijen oranını, X_O; yakıtın oksijen oranı (kg oksijen/kg kuru yakıt), X_N; yakıtın azot oranını (kg azot/kg kuru yakıt), N_a; havadaki azot oranını, P; kısmi basıncı göstermektedir.

Geliştirilen modelde gazlaştırıcı reaktör içerisindeki karbon, hidrojen, oksijen ve azot dengeleri ve hacim oranları toplamının 1'e eşit olması kuralı dikkate alınarak çözüm yapılmıştır. Model çözümünün elde edilmesinde Çizelge 2.4'de verilen Boudouard ve su gazı tepkimelerinden yararlanılarak karbon dioksitin hacim oranı, karbon monoksit cinsinden; su buharı hacim oranı da hidrojen ve karbon monoksit cinsinden yazılmıştır.

2.2 Çözüm Metodu

Model sonuçlarının elde edilmesinde Newton-Raphson Metodu kullanılmıştır. Bu metotta; F fonksiyon vektörü ve X değişkenler vektörü için iterasyon kuralı;

$$X^{B+1} = X^B - \left(\frac{\partial F}{\partial X} \right)^{-1} F^B \quad (2.10)$$

Şeklin de yazılabilir. Burada $\partial F / \partial X$; F fonksiyon vektörünün X değişkenlerine göre türevlerinden oluşan Jakobiyen matrisidir. Bu Jakobiyen matris $MT=kompartıman$ sayısı şeklinde oluşturulan bir kare matris olup aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} B_1 & C_1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & A_3 & B_3 & C_3 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & & & & & & & \\ \cdot & & & & & & & \\ \dots & \dots & \dots & A_1 & B_1 & C_1 & \dots & \dots \\ \cdot & & & & & & & \\ \cdot & & & & & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & A_{MT-2} & B_{MT-2} & C_{MT-2} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & A_{MT-1} & B_{MT-1} & C_{MT-1} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & A_{MT} & B_{MT} \end{bmatrix}$$

Bura da matris elemanları A_i , B_i ve C_i sırasıyla F_i denklemler vektörünün $i-1$, i ve $i+1$ 'nci kompartımanlarına ait X_{i-1} , X_i ve X_{i+1} değişkenler vektörüne göre türevlerine eşittir ve

$$A_i = \frac{\partial F_i}{\partial X_{i-1}} \quad B_i = \frac{\partial F_i}{\partial X_i} \quad C_i = \frac{\partial F_i}{\partial X_{i+1}} \quad (2.11)$$

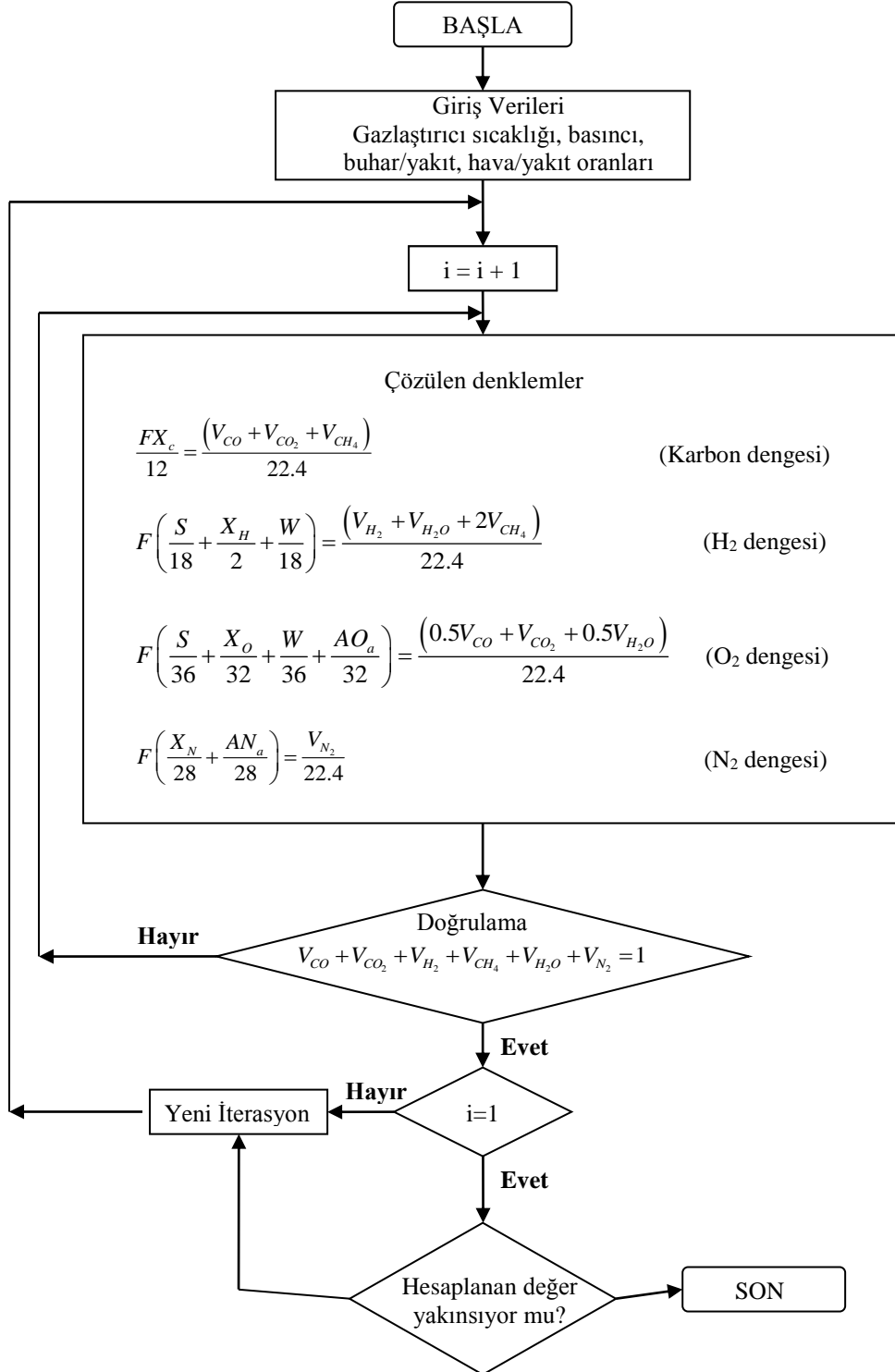
ifadelerinden bulunur. Çözümün elde edilmesinde F90 FORTRAN Programlama dili kullanılmıştır. Sayısal model akış diyagramı Şekil 2.1’de verilmiştir. Model çözümünde hata aralığı ∓ 0.000001 alınmıştır. Geliştirilen gazlaştırıcı modelinde gazlaştırıcı sıcaklığı, gazlaştırıcı basıncı, su buharı/yakıt oranı ve hava/yakıt oranı model giriş parametreleri olarak dikkate alınmaktadır. Modelde karbon dönüşüm verimi %100 kabul edilmiştir. Geliştirilen model, bir kömür gazlaştırıcı reaktör için 1 Nm^3 sentez gazı elde edebilmek için gerekli kuru yakıt miktarını ve elde edilen sentez gazı içerisindeki CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O ve N_2 gazlarının hacimsel yüzdelerini hesaplamaktadır. Geliştirilen modelde seri SGY reaktörlerinin çözümünde kullanılan sayısal model akış diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir. Geliştirilen modelde dikkate alınan gazlaştırma sistemi Şekil 2.3’de verilmiş olup gazlaştırıcıdan gelen sentez gazının rafine edilmesi işlemi için bu çalışmada önerilen iki aşamalı SGY reaktörü ve bu seri iki reaktörün çıkışında elde edilen son sentez gazının kompozisyonunun kontrolü için tasarlanan baypas hattı da gösterilmektedir.

Su gazı yönlendirme reaktörü tasarımına yönelik sentez gazı bileşiminin tayininde kullanılan denge sabitleri Çizelge 2.5’de verilmiştir.

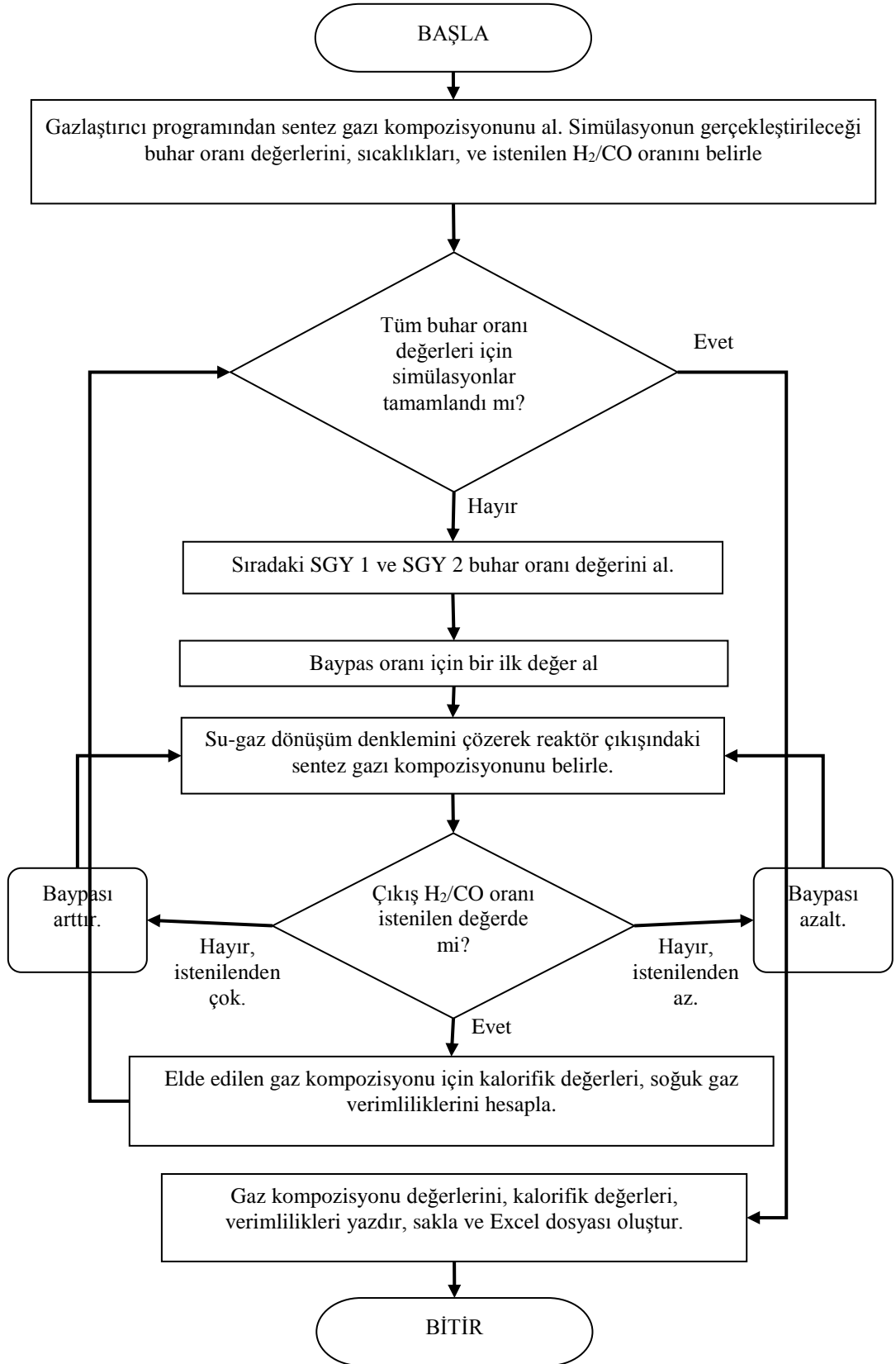
Çizelge 2.5. SGY reaksiyonları denge sabitleri (Lowry, 1963; Tsui vd., 2002)

Temperature (K)	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$
298.16	1.2337(69)	1.0100(-21)	1.0013(-16)	9.9126(4)	7.916(8)
600	2.5167(34)	1.8669(-6)	5.0500(-5)	2.7050(1)	1.000(2)
700	3.1826(29)	2.6729(-4)	2.4076(-3)	9.0072	8.972
800	6.7080(25)	1.0893(-2)	4.3988(-2)	4.0380	1.413
900	9.2570(22)	1.925(-1)	4.2483(-1)	2.2059	3.250(-1)
1000	4.7511(20)	1.8985	2.6176	1.3787	9.829(-2)
1100	6.3451(18)	1.2206(1)	1.1578(1)	0.94850	3.677(-2)
1200	1.7376(17)	5.6966(1)	3.9945(1)	0.70120	1.608(-2)
1300	8.2517(15)	2.0831(2)	1.1404(2)	0.54742	7.932(-3)
1400	6.0484(14)	6.2856(2)	2.7954(2)	0.44473	4.327(-3)
1500	6.2903(13)	1.6224(3)	6.0805(2)	0.37478	2.557(-3)
1750	5.744(11)	1.0565(4)	2.851(3)	0.2699	—
2000	2.241(10)	4.189(4)	9.029(3)	0.2155	—
2250	1.575(9)	1.200(5)	2.194(4)	0.1828	—
2500	1.892(8)	2.704(5)	4.435(4)	0.1640	—

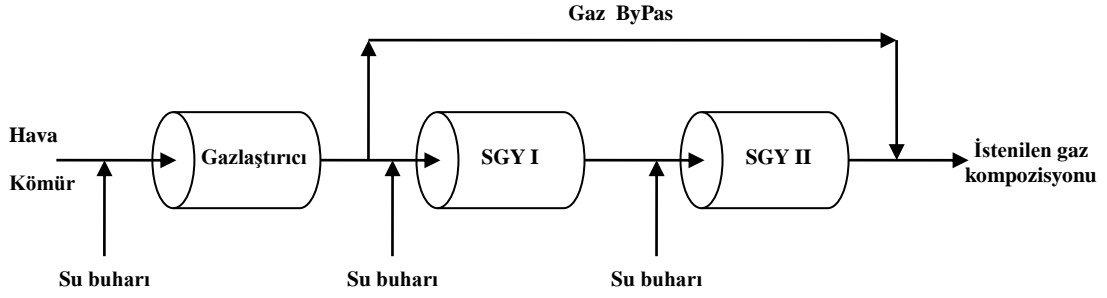
(Parantez içindeki sayılar 10 'un katlarıdır)



Şekil 2.1. Sayısal model akış diyagramı



Şekil 2.2. Seri SGY reaktör sayısal modeli akış diyagramı



Şekil 2.3. Gazlaştırıcı şematik gösterimi

2.3 Model Bulguları

Bu kısımda, bu tez çalışmasının temeli olarak kullanılan geliştirilmiş gazlaştırıcı modelinin nasıl çalıştığını göstermek amacı ile model çalışma şartları ve bunun neticesinde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Kömür gazlaştırma işlemi için geliştirilen modelleme çalışmasında sentez gazı üretimi için üç değişik kömür numunesi kullanılmıştır. Kullanılan kömürlere ait elementel analiz, nem ve kömürlerin kalorifik değerleri Çizelge 2.6’de sunulmuştur. Bu kömürlerden elde edilen sentez gazlarının kompozisyonları Çizelge 2.7’de gösterilmektedir. Bu kompozisyonlar birinci reaktöre girdi olarak kullanılmaktadır. Sentez gazı kompozisyonu için optimum H_2/CO değeri, kullanılan parametrelere bağlı olarak elde edilen sentez gazının kullanım amacına göre değişebilir. Yapılan çalışmada, metanol üretiminde kullanılabilecek bir durumun örnek alındığı bir ortam düşünülmüş ve H_2/CO oranı 2 olarak seçilmiştir. Kömür tipi 1 için farklı buhar oranı çiftleri ile iki kademeli SGY reaktör sisteminin çıkışındaki sentez gazı bileşimi ve soğuk gaz verimlerinin değişimi Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.6. Çalışmada kullanılan kömürlere ait elementel analiz, nem ve kömürlerin kalorifik değerleri

Yüzde (%)			
Bileşenler	Kömür 1	Kömür 2	Kömür 3
Nem	13,51	38,44	17,42
Kül	30,15	24,50	18,67
C	41,81	27,85	48,71
H	4,28	2,17	3,53
N	2,16	0,95	1,53
O	8,09	6,09	10,14
Alt Isıl Değeri (LHV) – MJ/kg	22,69	26,63	18,44
Üst Isıl Değeri (HHV) – MJ/kg	23,97	27,71	19,64

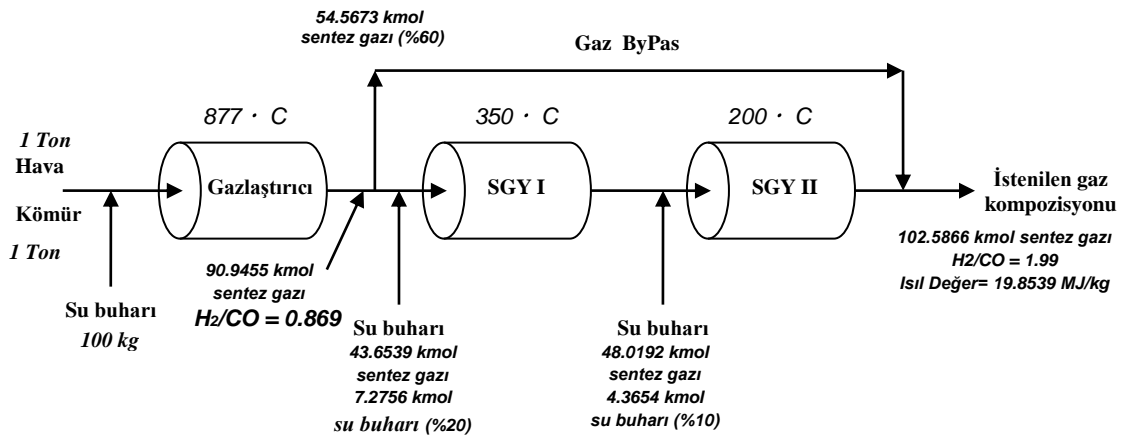
Çizelge 2.7. Gazlaştırıcıdan gelen sentez gazlarının kompozisyonları

Hacimsel Yüzde (%)			
Sentez Kompozisyonu	Kömür 1	Kömür 2	Kömür 3
H_2	28,55	39,72	21,86
CO	33,71	28,88	37,74
CO_2	0,37	0,27	0,46
N_2	32,28	30,64	32,27
H_2O	0,40	0,48	0,34
CH_4	4,69	0	7,33
H_2/CO	0,846879	1,3751	0,5792
<ul style="list-style-type: none"> Hava/Yakıt = 1, Buhar/Yakıt = 0,1 , P = 1 atm ve T = 1150 K 			

Çizelge 2.8. Kömür tipi 1: Farklı buhar oranı çiftleri ile iki kademeli SGY reaktör sisteminin çıkışındaki sentez gazı bileşimi ve sıcak ve soğuk gaz verimlerinin değişimi

SGY ₁ Buhar Oranı	SGY ₂ Buhar Oranı	$\dot{n}_{\text{sentez gaz}}$	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	H ₂ O	H ₂ /CO	η_c	η_h
		[kmol]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
1,0	0,0	0,1245	29,95	14,97	9,62	23,28	18,79	2,00	0,82	0,85
0,9	0,1	0,1276	29,22	14,61	9,38	22,72	20,76	2,00	0,82	0,85
0,8	0,2	0,1300	28,68	14,34	9,21	22,30	22,24	2,00	0,82	0,85
0,7	0,3	0,1317	28,30	14,15	9,09	22,00	23,25	2,00	0,82	0,85
0,6	0,4	0,1328	28,08	14,04	9,02	21,83	23,85	2,00	0,82	0,85
0,5	0,5	0,1331	28,01	14,00	8,99	21,78	24,05	2,00	0,82	0,85
0,4	0,6	0,1328	28,08	14,04	9,02	21,83	23,85	2,00	0,82	0,85
0,3	0,7	0,1317	28,30	14,15	9,09	22,00	23,25	2,00	0,82	0,85
0,2	0,8	0,1300	28,68	14,34	9,21	22,30	22,24	2,00	0,82	0,85
0,1	0,9	0,1276	29,22	14,61	9,38	22,72	20,76	2,00	0,82	0,85
0,0	1,0	0,1245	29,95	14,97	9,62	23,28	18,79	2,00	0,82	0,85

Şekil 2.4'de 1 ton kömür beslenmesi durumunda kömür gazlaştırıcısı için geliştirilen model kullanılarak H₂/CO oranının 2 olması istendiğinde elde edilecek gaz kompozisyonları ve işletme parametreleri verilmektedir.



Şekil 2.4. Beslenen kömürün 1 ton olması durumunda kömür gazlaştırıcısı model sonuçları

Yapılan çalışma neticesinde geliştirilen fortran programı sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 2.9'da verilmiştir. Bu amaçla, gazlaştırıcı reaktörün 1 atm basınç, 877°C sıcaklık, su buharı/yakıt oranı %10 ve hava/yakıt oranı %100 şartlarında çalıştırılması sonucunda elde edilen sentezgazı kompozisyonu ikinci aşamada kullanılacak ard arda sıralı iki adet SGY reaktörüne girmiştir. SGY reaktörlerine girmeden önce gazlaştırıcı reaktörden gelen sentez gazının bir kısmı bypass yapılmıştır. İlk yaklaşım olarak H₂/CO oranını 2 olmasını sağlayacak bypass ve su buharı miktarları tespit edilmiştir. Aşağıda geliştirilen model sonuçları gazlaştırıcı reaktörü, SGY reaktörü 1 ve SGY reaktörü 2 için verilmiştir.

Çizelge 2.9. Geliştirilen program sonucunda elde edilen sonuçlar

Gazlaştırıcı Reaktörü Model Sonuçları

```

REAKTOR SICAKLIĞINI GIRINIZ (400-1500 K ARASINDA):
1150
REAKTOR SICAKLIĞI:*** K ***** C ***
      1150.00  876.85
-----
REAKSIYON SABITLERI:-----KPB-----KPW-----KPH
------(BOUDOUARD)------(SHIFT)------(METHANE)-----
      487.9300      184.262      .068
-----
REAKTORE VERILEN:---SU BUHARI/YAKIT ORANI---HAVA/YAKIT ORANI---HAVA BASINCI
      -----(kg/kg coal)------(kg/kg coal)------(atm)-----
      .10      1.00      1.0
-----
CIKAN GAZ MOL MIKTARI: .0909 (kmol gas/kg coal)
-----
STEAM      1 Nm3 syngas için      2.037180E-01
-----
AIR      1 Nm3 syngas için      2.037180
-----
H2
CO (0.8-1) = 8.689983E-01
-----
CARBON CONVERSION EFFICIENCY: 100.00
-----
COLD GAS EFFICIENCY:      .826
-----
***** FUEL ***** VH2 ***** VCO ***** VN2 ***** VCH4 ***** VCO2 ***** VH2O *****
      .491      .2976      .3425      .3187      .0404      .0002      .0006
***** TOPLAM *****      1.000000

```

SGY 1 Reaktörü Model Sonuçları

REAKTOR SICAKLIĞINI GIRINIZ (°C OLARAK):	350
BYPASS ORANINI GIRINIZ (0-100 ARASI):	61.2075
STEAM/SYNGAS ORANINI GIRINIZ (% OLARAK) (0-100 ARASI):	25.77818
REAKTOR SICAKLIĞI:*** K ***** °C ***	623.15 350.00
***** MOL ORANLARI *****	
** CO IN **** CO OUT **** H ₂ IN ***** H ₂ OUT1***** CO ₂ IN **** CO ₂ OUT *** H ₂ O IN *** H ₂ O OUT1**	
.27230 .09857 .23663 .41036 .00019 .17392 .20539 .03166	

SGY 2 Reaktörü Model Sonuçları

REAKTOR SICAKLIĞINI GIRINIZ (°C OLARAK):	200
STEAM/SYNGAS ORANINI GIRINIZ (% OLARAK) (0-100 ARASI):	25.77818
REAKTOR SICAKLIĞI:*** K ***** C ***	473.15 200.00
***** MOL ORANLARI *****	
** CO IN **** CO OUT **** H ₂ IN ***** H ₂ OUT1***** CO ₂ IN **** CO ₂ OUT *** H ₂ O IN *** H ₂ O OUT1**	
.07884 .00001 .32824 .40707 .13912 .21795 .23152 .15269	
***** BYPASS EKLENMESİ DURUMUNDA MOL ORANLARI *****	
*** CO BYPASS *** CO ₂ BYPASS *** H ₂ BYPASS *** H ₂ O BYPASS*** CH ₄ BYPASS *** N ₂ BYPASS***	
.17154 .10891 .35225 .07649 .03303 .26080	

Geliştirilen sayısal modele göre gazlaştırıcı çıkışında hidrojen/karbon monoksit değerinin 2 olabilmesi için; gazlaştırıcı reaktörden çıkan 100 mol sentez gazı durumunda SGY 1 ve SGY 2 reaktörlerinde su buharı/sentez gazı değerinin %25.77818 ve bypass oranının %61.2075 olması gerektiği görülmüştür.

Sayısal model çalışmasında, sentez gazı rafine prosesi için baypas ve buhar beslemeli iki seviyeli bir seri SGY reaktör modeli test edilmiştir. Model başarımının ölçülmesi amacıyla üç değişik kömür numunesi kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucu gözlemlenen önemli bir sonuç, basıncın etkisinin önemli olmamasından ötürü rafine

prosesi için çalışma basıncının atmosferik basınç olarak seçilmesidir. Bunun yanı sıra, elde edilen sonuçlar, sentez gazı kompozisyonunun belirlenmesinde üç önemli parametrenin (buhar oranları, ikinci SGY reaktörü sıcaklığı ve baypas oranı) önemli olduğunu göstermiştir.

BÖLÜM III

ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Literatüre bakıldığında, kömür gazlaştırma sistemlerinin enerji ve ekserji analizi ile ilgili pek çok bilimsel çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar dikkate alındığında; El-Emam vd. (2012), bir kömür gazlaştırma sistemine eklenen katı oksit yakıt pili ile enerji üretimi yapan bir tesis için detaylı bir enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Gnanapragasam vd. (2010), yapmış oldukları çalışmada CO_2 tutma ve depolama ünitesinin yer aldığı bir kömür gazlaştırma sisteminde hidrojen üretiminin maksimum seviyede tutulması durumu için sistemin çalışma şartlarını belirleyebilmek amacıyla sistemin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Liszka vd. (2012), yılında yapmış oldukları çalışmada, hidrojen üretimi amaçlı tasarlanan ve aynı zamanda CO_2 tutma ve yakalama ünitesine sahip bir kömür gazlaştırma sistemi için enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Öztürk vd. (2012), yapmış oldukları çalışmada farklı tip kömürlerin gazlaştırılması işleminin sürdürülebilir yaklaşımla irdelenmesini yapmak amacıyla enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Prins ve Patinski (2005), yaptıkları çalışmada karbonun oksitlenmesi ve gazlaştırılması işlemlerinin enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Prins vd. (2007), bir diğer çalışmalarında ise kömür ve biyokütle gazlaştırma sistemlerinin karşılaştırmalı enerji ve ekserji analizlerini yaparak, her iki sistemin birbirine göre avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır. Xu vd. (2012), yapmış oldukları çalışmada, aynı anda hem hidrojen hem de elektrik üretimi yapan ve bünyesinde CO_2 tutma ve yakalama ünitesinin olduğu bir kömür gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Literatür incelendiğinde, bu çalışmada ele alınan gazlaştırma sisteminin ekserji analizi ile ilgili bir çalışmanın henüz yapılmadığı ortaya çıkmaktadır. Buradan hareketle, bu çalışmada iki aşamalı su gazı yönlendirme reaktörü bulunan bir gazlaştırma sisteminin ekserji analizi yapılmıştır. Gazlaştırma sistemi için daha önceden geliştirilmiş olan sayısal model, istenilen ürün gazını elde etmek için sistem bileşenlerinin gerekli optimum işletme parametrelerini farklı çalışma koşulları için vermektedir. Bu çalışma ile, sayısal modelden elde edilen optimum işletme parametrelerinin hangisinin en verimli olduğunu tespit etmek mümkün olacaktır. Böylelikle, böyle bir gazlaştırıcının imalatı için en uygun tasarım parametrelerinin seçimi mümkün olacaktır. Bu sayede ülkemizin öz

kaynakları verimli bir şekilde enerjiye dönüştürülürken, sürdürülebilir çevre dikkate alınmış olacaktır.

3.1 Termodinamik Kavramlar

Geleneksel termodinamik analizleri temel olarak enerjinin korunumu ilkesini belirten Termodinamiğin Birinci Yasası temel alınarak yapılmaktadır. Bir enerji tesisinin enerji analizi esas olarak sisteme giren ve çıkan enerjiler hesaplanarak yapılır. Sistemlerin karşılaştırılması için genellikle sistemdeki giren ve çıkan enerji oranlarından bulunan verim parametresi kullanılmaktadır. Ancak, enerji verimleri sistem performansının ideale ne kadar yaklaştığına dair bir ölçüt sağlamamaktadır. Ayrıca, performansın idealden sapmasına yol açan termodinamik sistem kayıpları da enerji analizinde değerlendirilmemektedir. Bu yüzden enerji analizi sonuçları teknolojik verimi gerçeğinden farklı olarak yansıtabilmektedir.

Ekserji analizi ise bir sisteme giren ‘ısının tümünün iş olarak çıkmasının imkansız olduğunu’ ifade eden ve enerjinin miktarının yanında kalitesi ile de ilgilenen Termodinamiğin İkinci Yasasını esas alarak, enerji analizindeki noksanlıkları tamamlamaktadır. Sistemdeki gerçek verimsizliklerin nerede ve ne kadar olduklarını belirleyerek mevcut bir sistemdeki iyileştirmelerin yapılması veya yeni yapılacak bir tasarımın geliştirilmesi ve optimizasyonu için kullanışlı bir araçtır.

Güç santrallerinin enerji ve ekserji analizi yapılırken kontrol hacmi yani açık sistem kabulü yapılır. Ayrıca bu kontrol hacimlerinde sürekli akış olduğu varsayılır. Süreklilikten kastedilen hal, zamana bağlı olarak değişim göstermeyen madde özellikleri anlamını içermektedir. Kontrol hacmi içerisinde farklı noktalardaki özellikler birbirinden farklı olabilirken, bir noktanın tüm zamanlardaki özellikleri sabit kabul edilmektedir. Ayrıca sürekli akış halinde, kontrol hacmi içerisinde kütle ve enerji sabit kalmaktadır (Çengel ve Boles, 2007).

Birden çok giriş ve çıkışı olan bir kontrol hacminde ve sürekli akış kabulü yapıldığında Termodinamiğin Birinci Yasası kullanılarak genel enerji dengesi;

$$\dot{Q} - \dot{W}_{KH} = \sum_{\dot{m}_\zeta} \dot{m}_\zeta (h_\zeta + \frac{V_\zeta^2}{2} + gz_\zeta) - \sum_{\dot{m}_g} \dot{m}_g (h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g) \quad (3.1)$$

Şeklin de yazılır. Burada, \dot{Q} birim zamandaki net ısı geçişi (kW), \dot{W}_{KH} kontrol hacmi için birim zamandaki net iş geçişi (kW), g ve ζ indisleri giriş ve çıkış, \dot{m} kütleli debi (kg/s), h entalpi (kJ/kg), V akışın hızı (m/s), z yükseklik (m), ve g yerçekimi ivmesi (m/s^2) olarak ifade edilmiştir. Termal güç tesislerinin enerji analizlerinde genellikle, kinetik ve potansiyel enerji ihmal edildiğinden Denklem 3.1 aşağıdaki hali alır;

$$\dot{Q} - \dot{W}_{KH} = \sum_{\dot{m}_\zeta} \dot{m}_\zeta h_\zeta - \sum_{\dot{m}_g} \dot{m}_g h_g \quad (3.2)$$

Termodinamiğin ikinci yasasının öngörmüş olduğu “Entropi” kavramı maddenin mikroskopik doğası ve istatistik yaklaşımlar gözönünde bulundurulduğunda, mikroskopik düzensizliliğin bir ölçüsü olmakta ve mikroskopik durum ile ilgili kararsızlığı ifade etmektedir. Entropi tanımı, Clausius eşitsizliği ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (3.3)$$

Denklem 3.3 eşitsizliğinde T sistem sınırındaki sıcaklığı, δQ ise sistem ve çevre arasındaki diferansiyel ısı transferini vermektedir. Yukarıda bahsedildiği üzere, entropi tersinmezliklerle ilgili olup tersinmez proseslerde üretilmektedir. Kapalı sistemlerde entropi değişimi ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\Delta S_{sistem} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{\text{üretim}} \quad (3.4)$$

Denklem 3.3 ve 3.4’den anlaşılacağı üzere ‘entropinin korunumu ilkesi’ gibi bir kavramın yerine ‘entropinin artışı’ ilkesinden bahsedilebilir. Yani, ideal ve imkânsız bir durum olan tersinir proseslerde entropi üretilmezken, gerçek tüm proseslerde entropi üretimi pozitifdir. Entropi üretimi, proseste görülen tersinmezliklerin bir ölçüsü olmakta ve mühendislik sistemlerinin verimlerinin ölçülmesi için önemli bir kavram olarak kullanılmaktadır.

Sürekli akış kabulü dahilinde bir kontrol hacmi ile T_0 sıcaklığındaki çevre arasındaki entropi dengesi aşağıdaki gibi yazılır;

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \sum_{\dot{m}_c} \dot{m}_c s_c - \sum_{\dot{m}_g} \dot{m}_g s_g + \sum \frac{\dot{Q}_{\text{cev}}}{T_0} \geq 0 \quad (3.5)$$

Burada $\dot{S}_{\text{üretim}}$ birim zamanda gerçekleşen entropi üretimini \dot{m}_g ve \dot{m}_c sırasıyla birim zamanda sisteme giren ve sistemden çıkan kütle miktarını, s_g ve s_c sırasıyla sisteme kütle akışına bağlı olarak birim zamanda giren ve çıkan entropileri belirtmektedir. \dot{Q}_{cev} ısı geçişini, T_0 sistem sınırındaki sıcaklığı, $\frac{\dot{Q}_{\text{cev}}}{T_0}$ terimi ısı geçişi nedeniyle oluşan entropi transferini, ifade etmektedir. Denklem 3.2'deki ısı geçiş terimi Denklem 3.5'de yerine koyulduğunda, birim zamandaki kullanılabilir iş aşağıdaki gibi bulunur;

$$\dot{W} = \sum_{\dot{m}_g} \dot{m}_g (h_g - T_0 s_g) - \sum_{\dot{m}_c} \dot{m}_c (h_c - T_0 s_c) - T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (3.6)$$

Tersinir iş, yani maksimum kullanılabilir iş ise $\dot{S}_{\text{üretim}}$ teriminin sıfıra eşit olması durumudur;

$$\dot{W}_{tr} = \sum_{\dot{m}_g} \dot{m}_g (h_g - T_0 s_g) - \sum_{\dot{m}_c} \dot{m}_c (h_c - T_0 s_c) \quad (3.7)$$

Tersinmezlik \dot{I} ise, tersinir iş ile kullanılabilir iş arasındaki farktır ve yerine koyulduğunda;

$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} - \dot{W} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (3.8)$$

Şeklin de ifade edilir.

Ekserji ile ilgili çeşitli tanım ve isimlendirilmeler yapılmıştır. Kullanılabilirlik, essergi, kullanılabilir enerji, iş yeteneği, ekserji vb. gibi tanımlar arasından en çok ekserji kelimesi benimsenmiş ve kullanılmaktadır. Kuramsal olarak, bir sistemden en çok işin elde edilebilmesi, iki koşulun yerine getirilmesi ile mümkündür. Bu koşullar; işin bir sistemin başlangıç halinden son haline tersinir bir hal değişimi ile getirilerek elde edilmesi ve sistemin son halinin çevre ile dengede olmasıdır (Eryener, 2003). Farklı

sistemlerin potansiyellerinin değerlendirilmesinde çevre referans olarak alınmaktadır. Ekserji metodunda çevre kavramı, sonsuz büyüklükte ve kusursuz denge halinde bir madde veya ortam olarak düşünülmektedir. Çevrenin bir bütün olduğu ve herhangi bir gradyana veya farklılığa sahip olmadığı, her noktasında basınç, sıcaklık, kimyasal, kinetik ve potansiyel enerji değerlerinin aynı olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, herhangi iki noktası arasında iş ya da herhangi bir yoldan bir etkileşim olmayacağı kabul edilmiştir. Uygulamalarda çevre; atmosfer, denizler ve dünya kabuğu ile ifade edilmektedir. Çevre, bir sistem ile üç farklı şekilde etkileşmektedir. Bunların Kotas'da (1995) ;

- a. T_0 sıcaklığındaki bir termal enerji deposu olarak termal etkileşim yolu ile,
- b. Kullanılamaz iş deposu olarak mekanik etkileşim yolu ile,
- c. Denge halinde düşük kimyasal potansiyele sahip olan bir madde olarak kimyasal etkileşim yolu ile olduğu belirtilmiştir.

Çevresi ile dengede olan ve herhangi bir etkileşimde bulunmasına imkan olmayan bir sistemin bu haline “ölü hal” denilmektedir. Yani ölü halde bulunan bir sistemden iş elde edilemez, sistem ile çevre arasında mekanik, termik ve kimyasal denge mevcuttur. Sistemin çevresi ile denge durumunu açıklayan bir başka tanımda “sınırlı ölü hal” durumu hakkındadır. Sınırlı ölü hal, çevre ile sadece mekanik ve ısı denge hali yani sistem basıncı ve sıcaklığının, çevre basıncı ve sıcaklığına eşit olduğu durumu ifade etmektedir.

Bu bilgiler ışığında ekserji, belirli bir başlangıç halinden ölü hale ulaşıncaya kadar, bir sistemden elde edilebilecek en fazla teorik yararlı iş olarak tanımlanmaktadır. Yani ekserji, bir sistemin belirli bir halinden çevre haline nekadar yaklaştığının bir ölçüsü olmaktadır (Çengel ve Boles, 2007; Güngör vd., 2013; Bayrak ve Güngör, 2011).

Kısaca ekserji bir akım ölü duruma ulaştığında, kazanılabilen en fazla iştir (Bejan, 1988). Daha anlaşılır bir tanımlama ile ekserji, enerjinin belirli termodinamik koşullar altında diğer bir tür enerji şekline dönüşebilen bölümüdür. Tersinmez işlemlerde her zaman belirli bir miktar entropi artışı ile birlikte iş kaybı oluşmasına karşın, en fazla iş sadece tersinmez işlemlerde elde edilir. Ekserji, ideal veya tersinir işlemler dışında, enerji gibi korunan bir büyüklük değildir. Bu nedenle, enerjinin korunumu yasasına uymaz. Gerçek işlemlerde, tersinmezlikler nedeni ile ekserji tüketilir veya yok edilir.

İşlem süresince gerçekleşen ekserji tüketimi, işleme ilişkin tersinmezlikler nedeni ile yaratılan entropi ile orantılıdır. Enerji ve ekserji kavramları çizelge 3.1’de karşılaştırılmıştır (Çengel vd., 2002; Hepbaşlı, 2003).

Çizelge 3.1. Enerji ve ekserji arasındaki başlıca farklar (Çengel vd., 2002; Hepbaşlı, 2003)

ENERJİ	EKSERJİ
Sadece kütle veya enerji akışının özelliklerine bağlıdır. Ortam özelliklerinden bağımsızdır.	Kütle veya enerji akışının özellikleri ile birlikte, ortamın özelliklerine de bağlıdır.
Sıfırdan farklı değerlere sahiptir. Einstein yasasına göre mc^2 değerine eşittir.	Ortam ile denge durumunda sıfıra eşittir.
Bütün işlemler için Termodinamiğin Birinci Yasasını dikkate alır.	Sadece tersinir işlemler için Termodinamiğin Birinci Yasasını dikkate alır. Tersinmez işlemlerde tamamen veya kısmen ekserji tüketilir.
Tersinir işlemlerde dahil olmak üzere, bütün işlemler için Termodinamiğin İkinci Yasası ile sınırlıdır.	Termodinamiğin İkinci Yasası nedeni ile tersinir işlemler için sınırlı değildir.
Hareket veya hareket üretme yeteneğidir.	İş veya iş üretme yeteneğidir.
Bir işlemde sürekli olarak korunur. Diğer bir deyişle, ne yok olur, ne de üretilebilir.	Sadece tersinir bir işlemde sürekli olarak korunur. Tersinmez bir işlemde sürekli olarak tüketilir.
Miktarın bir ölçütüdür.	Entropi nedeniyle, hem kalite hem de miktarın bir ölçütüdür.

Çengel ve Boles (2007), ekserjinin sadece kullanılabilir enerji kavramından ibaret olmadığını, aynı zamanda geniş resimde çevreye zarar veren enerji kaynaklarının tüketiminin azaltılması ve çevre dostu kaynakların kullanılması konularında mükemmel bir ölçüt olduğunu ve geniş kapsamlı bir mühendislik yaklaşımı içerdiğini ifade etmektedirler.



Şekil 3.1. Enerji, çevre ve sürdürülebilirliğin ekserji ile ilişkisi

Dinçer (2002), ekserjinin çevre ve enerji politikalarının belirlenmesindeki rolü üzerinde durduğu makalesinde ekserjinin çevre, sürdürülebilir gelişim ve enerji ile ilişkisini Şekil 3.2 ile ifade etmiştir. Bu kapsamda ekserji, çevre teknolojilerini de temel alan üç kavramı incelemektedir. Bunlar;

- a. Çevresel etkilerin minimum, enerji ve enerji kaynaklarının ise maksimum koşullarda işletilebileceği teknolojiler,
- b. Çevreyi kirlenme potansiyelleri yüksek olan maddelerin çevresel davranışları
- c. Çevresel değerlendirme, enerji ve toplum güvenliği kavramlarıdır (Dinçer ve Rosen, 2007).

Ekserji analizi, bu bölümün başında da belirtildiği üzere, sistemdeki gerçek verimsizliklerin nerede ve ne kadar olduklarını belirleyerek mevcut bir sistemdeki iyileştirmelerin yapılması veya yeni yapılacak bir tasarımın geliştirilmesi ve optimizasyonu için kullanışlı bir araçtır. Ekserji analizi ile termal sistemlerin değerlendirilmesi birçok fayda sağlamaktadır, bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır (Dinçer ve Rosen, 2007).

1. Ekserji verimleri, enerji verimlerinin sağlayamadığı ideal noktaya sistemin ne kadar yaklaşabildiğini ölçebilmekte ve sistemlerin değerlendirilmesinde daha anlamlı mesajlar verebilmektedir. Ayrıca, ekserji kayıpları, sistemin idealden sapmasını, yani kusurlarını, yer ve miktar belirterek açıkça tanımlayabilmektedir.
2. Farklı ürün veya akışkanların çalıştığı karmaşık sistemlerin analizlerinde, ekserji metodu, farklı karakteristikte olan ürünleri ortak paydada değerlendirmeye imkan tanımakta ve enerji kalitesinin belirlenmesini sağlamaktadır.

3. Ekserji yöntemi, termal sistemlerin tasarım ve Ar-Ge faaliyetlerinde sistemlerin uygulanabilirliği, ön tasarımı ve mevcut tasarımların iyileştirilmesi konuları hakkında eksergoekonomik, termoeekonomik ve çevreekonomik uygulamaları ile yol gösterici olabilmektedir.

4. Ayrıca ekserji, enerjinin korunumu ve enerji krizleri hakkındaki problemlere daha tatmin edici cevaplar sağlayabilmektedir.

Ekserji analizleri, bir sistemde, sisteme giren ve çıkan ekserjilerin belirlenmesi, sistemde ortaya çıkan tersinmezliklerin ve sistem verimlerinin hesaplanması ile yapılmaktadır. Ekserji çevre şartlarına bağlı bir büyüklük olduğundan hesaplanabilmesi için çevre şartlarının bilinmesi gereklidir.

3.2 Ekserji Bileşenleri

Nükleer, manyetik, elektriksel ve yüzey gerilme etkilerinin yokluğunda bir sistemin toplam ekserjisi E dört ayrı bileşene bölünebilir: fiziksel ekserji E^{PH} , kinetik ekserji E^{KN} , potansiyel ekserji E^{PT} ve kimyasal ekserji E^{CH} .

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \quad (3.9)$$

Enerji yaygın bir özellik olmasına rağmen özgül ekserji ile çalışmak daha faydalı olmaktadır.

Dolayısıyla özgül ekserji aşağıdaki şekilde tanımlanır (Bejan,1996).

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (3.10)$$

Bir sistemin basıncı sıcaklığı, hızı veya seviyesi çevreden farklı olduğu zaman işin ortaya çıkması için iyi bir fırsat vardır. Sistem çevre koşullarına doğru değişirken bu fırsat azalır, ikisi dengeye gelirken bu fırsat biter. Sistemin bu hali ölü hal olarak tanımlanır. Sistem ile çevre ile başka çeşit denge tanımlanır. Bu tanım ise sadece mekanik ve ısı denge sağladığı dengenin sınırlı biçimidir. Sistemin bu hali ise sınırlı ölü hal olarak adlandırılır.

Çevreye göre göreceli ve dinlenmeli halinde olan bir sistem göz önüne alındığı zaman fiziksel ve kimyasal ekserjiler ihmal edilebilir ($e^{KN} = 0$, $e^{PT} = 0$) (Bejan, 1996).

3.2.1 Fiziksel ekserji

Saf maddelerin fiziksel ekserjisi genel olarak,

$$e^{PH} = (u - u_0) - P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3.11)$$

Şeklinde verilir. Burada u_0 ve s_0 sırasıyla, bir madde akımının ısı kaynağı olarak kabul edilen T_0 sıcaklığı ve P_0 basıncındaki özgül iç enerji ve entropi değerleridir.

Fiziksel ekserji kısaca:

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3.12)$$

Şeklinde yazılabilir.

Toplam fiziksel ekserji akısı ise:

$$\dot{E}^{PH} = \dot{m} \cdot e^{PH} \quad (3.13)$$

3.2.2 Kimyasal ekserji

Kimyasal ekserjiyi değerlendirirken (kimyasal kompozisyonu çevresinden farklı olarak ayrılan ekserji komponenti), sistemden ayrılan maddeler çevredeki stabil durumda var olan eş maddeleri ile karıştırılmamalıdır.

Kimyasal ekserjiyi değerlendirirken çeşitli alternatif teoriler ortaya atılmıştır. Çevre ortamını termodinamik düşünceden farklılaştırmak üzere ekserji referans çevresi ve termodinamik çevre tanımları kullanılır. Bu yüzden kolaylık açısından standart kimyasal ekserji tanımları standart bir çevre kabulü üzerine kurulur. Standart kimyasal ekserjiler, sıcaklığı T_0 ve basıncı P_0 olan ($298\text{K} = 25^\circ\text{C}$ ve 1 bar) standart bir çevreye dayandırılır.

Saf maddeler için standart kimyasal ekserji değerleri ilgili çizelgelerden okunarak hesaplamalarda kullanılabilir. Gaz karışımları için ise aşağıdaki eşitlikten yararlanılır (Bejan, 1996).

$$e^{-CH} = \sum x_k e_k^{-CH} + \bar{R}T_0 \sum x_k \ln x_k \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3.14)$$

Bu çalışmada gazlaştırıcıya giren kömür katı halde olup, gazlaştırıcı çıkışında gazlaştırıcı sayısal modellemesinde karbon dönüşümü %100 alındığından, karbonun tamamı gaza dönüşmektedir. Diğer komponentler gaz halinde olup, her bir gazlaşma ünitesindeki mol miktarları ve sıcaklıkları sayısal model sonuçlarından elde edilmektedir.

Bu çalışmada, ekserji hesabı yapılırken kömürün içerisindeki katı karbon, metan ve hidrojen gazlarının ekserji değerleri dikkate alınmıştır. Katı haldeki karbonun özgül ısı değeri Abbott ve Van Ness (1972), tarafından aşağıda verilen eşitlikten hesap edilmiştir (Abbott ve Van Ness, 1972);

$$c_C = 17.166 + 4.271 \frac{T}{1000} - \frac{8.79 \cdot 10^5}{T^2} \quad (3.15)$$

Katı karbon için entropi değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$(s_T)_C = (s_{T_0}^0)_C + \int_{T_0}^T c_C \left(\frac{dT}{T} \right) \quad (3.16)$$

Burada $s_{T_0}^0$ özgül molar entropi olup, katı karbon için 5.74 kJ/kmol K olarak alınabilir (Balmer, 1990).

Bu çalışmada gazlar için entropi değeri, aşağıdaki eşitlikten hesap edilmiştir (Balmer, 1990) ;

$$(s_T)_i = (s_{T_0}^0)_i + \int_{T_0}^T c_{p,i} \left(\frac{dT}{T} \right) - R \ln \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \quad (3.17)$$

burada $(s_{T_0}^0)_i$ her bir gaz komponent için özgül molar entropi değeri olup, her bir gazın aldığı değerler Çizelge 3.2’de verilmekte, her bir gaz için özgül ısı değeri Balmer (1990), tarafından verilen eşitliklerdeki gibi alınmış olup Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Özgül molar entropi değerleri (Balmer, 1990)

Substance	$S_{T_0}^0$ (kJ/(kmol K))
CO	197.653
CO ₂	213.795
CH ₄	186.256
C(s)	5.740
H ₂	130.684
N ₂	191.610
O ₂	205.138
H ₂ O(g)	188.833

Çizelge 3.3. Özgül ısı değerlerinin sabit basınçta sıcaklıkla değişimi (Balmer, 1990)

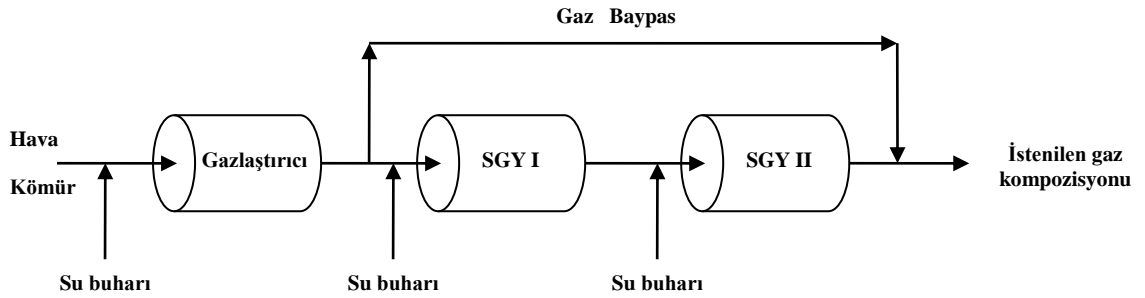
Gas $c_p = \frac{kJ}{kmolK}, \theta = \frac{T(Kelvin)}{100}$
$N_2 \quad c_p = 39.060 - 512.79\theta^{-1.5} + 1072.7\theta^{-2} - 820.40\theta^{-3}$
$O_2 \quad c_p = 37.432 + 0.020102\theta^{1.5} - 178.57\theta^{-1.5} + 236.88\theta^{-2}$
$H_2 \quad c_p = 56.505 - 702.74\theta^{-0.75} + 1165.0\theta^{-1} - 560.70\theta^{-1.5}$
$CO \quad c_p = 69.145 - 0.70463\theta^{0.75} - 200.77\theta^{-0.5} + 176.76\theta^{-0.75}$
$H_2O \quad c_p = 143.05 - 183.54\theta^{0.25} + 82,751\theta^{0.5} - 3.6989\theta$
$CO_2 \quad c_p = -3.7357 + 30.529\theta^{0.5} - 4.1034\theta + 0.024198\theta^2$
$CH_4 \quad c_p = -672.87 + 439.74\theta^{0.25} - 24.875\theta^{0.75} + 323.88\theta^{-0.5}$

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, dikkate alınan gazlaşma sistemindeki her bir noktadaki ekserji değerleri, önceki bölümlerde verilen eşitlikler dikkate alınarak hesaplanmış ve SİMOD grubu tarafından geliştirilen sayısal model sonuçlarının, termodinamik açıdan değerlendirilmesi yapılmak üzere sonuçlar irdelenmiştir. Gazlaştırma sistemi için geliştirilen model, farklı işletme şartları için karbon dönüşüm oranının %100 olması durumunda optimum işletme şartlarını bulmak üzere tasarlanmıştır. Bu işletme şartları, gazlaştırma sistemi çıkışında metanol ve pek çok petro-kimya ürünlerinin üretilmesi için, arzu edilen H_2/CO oranı olan 2'nin elde edilmesi için verilen baypas oranı için SGY reaktörleri su buharı miktarları veya verilen SGY reaktörleri su buharı miktarları için optimum baypas oranı değerlerinin tahmin edilmesini kapsamaktadır.

Bu çalışmada, gazlaştırıcıya giriş noktasında kömür, su buharı ve hava 1 atm basınç ve $25^\circ C$ sıcaklıkta gazlaştırıcıya girmektedir. Gazlaşma sistemi Şekil 4.1'de verilmiştir. Sistem atmosfer basıncında çalıştırılmaktadır. Gazlaştırıcı $877^\circ C$ sıcaklıkta, SGY I reaktörü $350^\circ C$ ve SGY II reaktörü $200^\circ C$ sıcaklıkta çalışmaktadır. Gazlaştırma sistemi çıkışında H_2/CO oranı 2 alınmıştır.

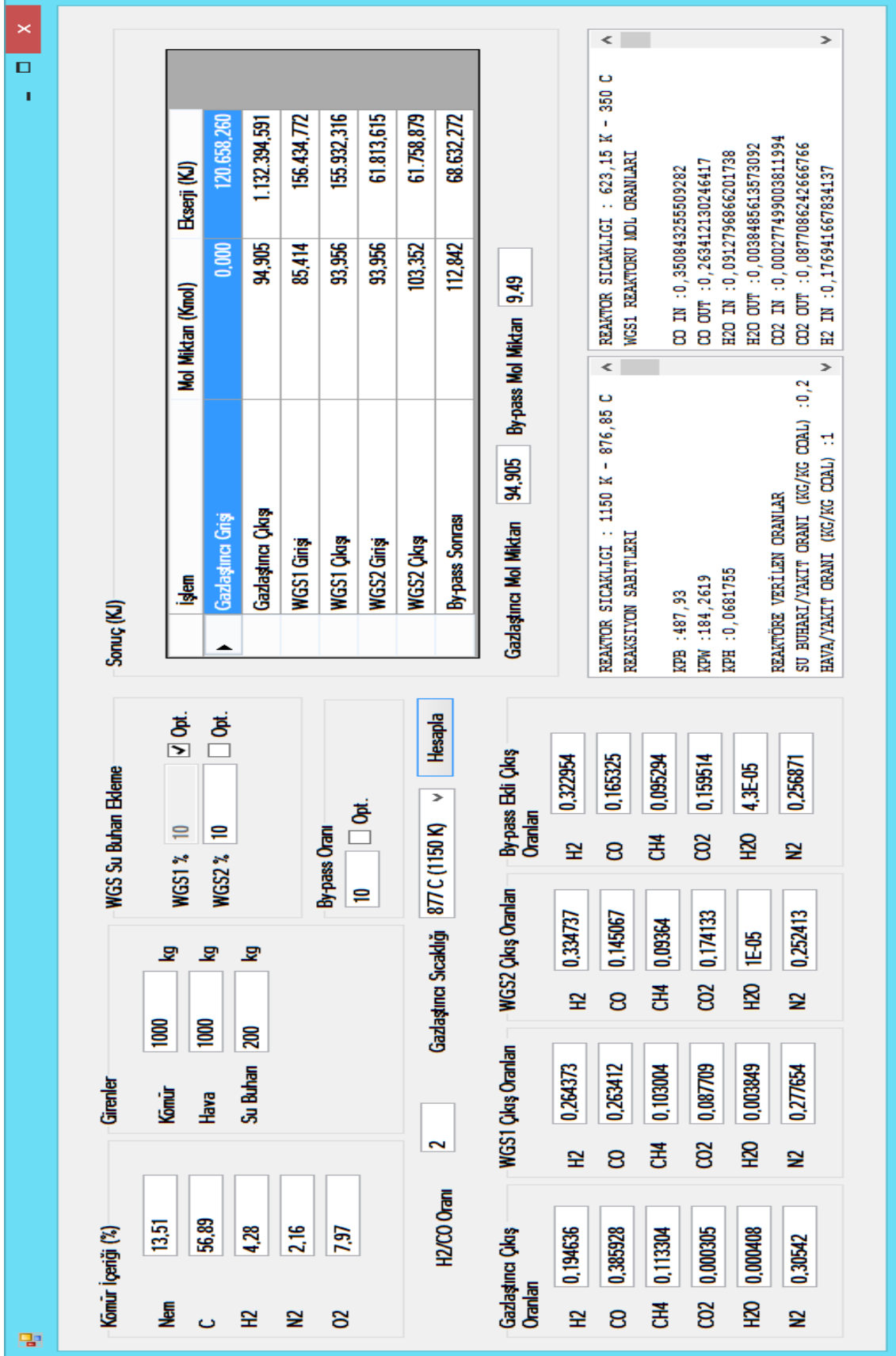


Şekil 4.1. Gazlaşma sistemi

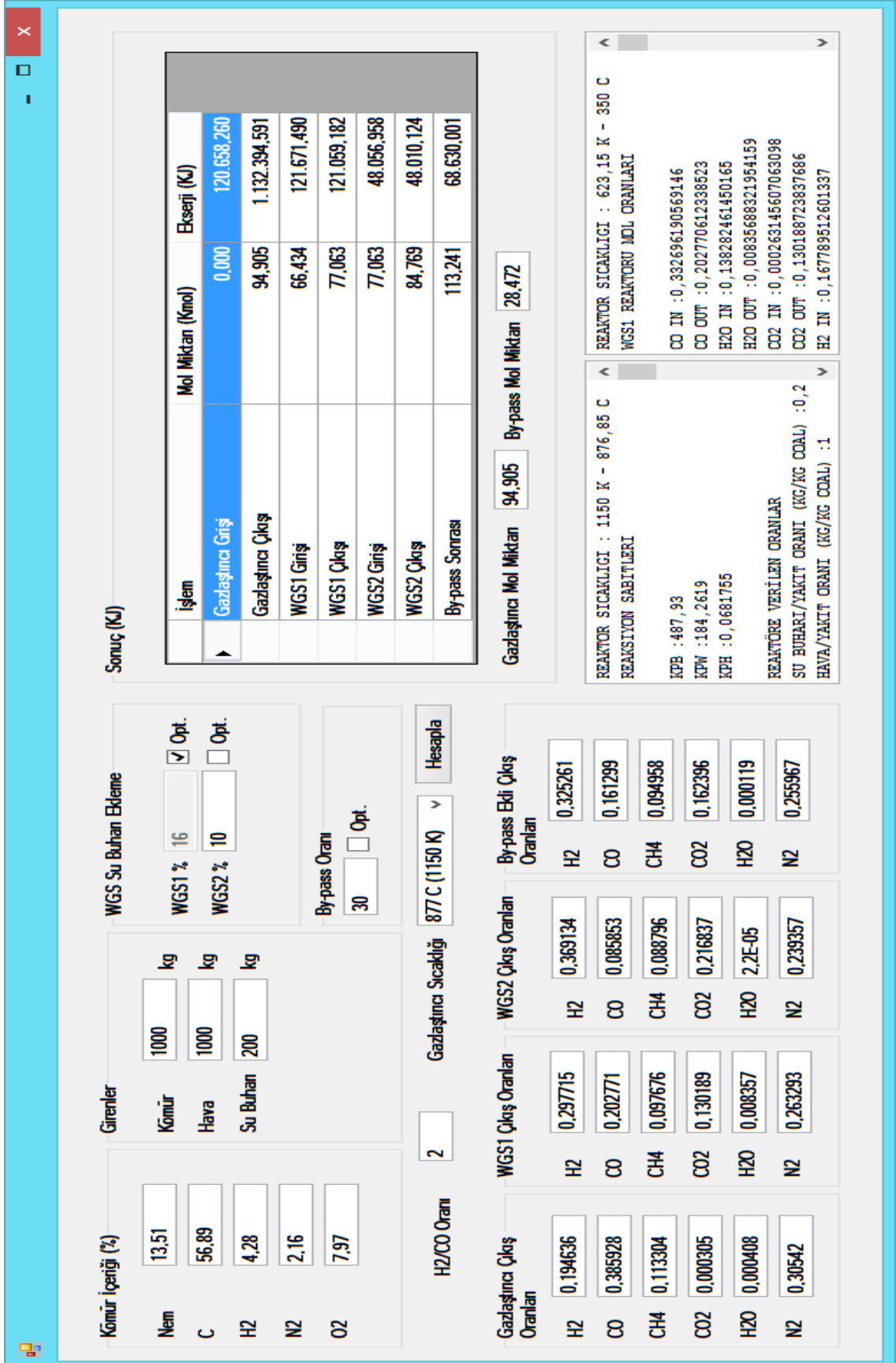
Bu çalışmada, aynı kömür tipi kullanıldığında, SGY II reaktörü su buharı miktarının reaktöre giren sentez gazına oranı %10 olduğunda, üç farklı baypas oranı kullanılarak aynı sonucun elde edilmesinde SGY I reaktörü için optimum su buharı oranının tahmin edilmesinde, gazlaştırma sisteminin her bir ünitesi giriş çıkışındaki ekserji değerleri hesap edilmiştir. Yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ve sistem bilgileri, MATLAB programı kullanılarak geliştirilen bir arayüz yardımıyla elde edilmiştir.

Çalışma sonuçları Şekil 4.2-4'te verilmiştir. Bu inceleme yapılırken, gazlaştırıcı çıkışından sonra baypas oranları sırasıyla %10, %30 ve %50 olarak alınmıştır. Şekillerden de açıkça görüleceği gibi gazlaştırıcı girişinde sadece kömürün ekserji değeri dikkate alınmıştır. Baypas oranı arttıkça SGY I reaktörü için gerekli su buharı miktarının da arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, gazlaştırıcı sistemi çıkışında istenilen H₂/CO oranınının 2'yi bulmasıdır.

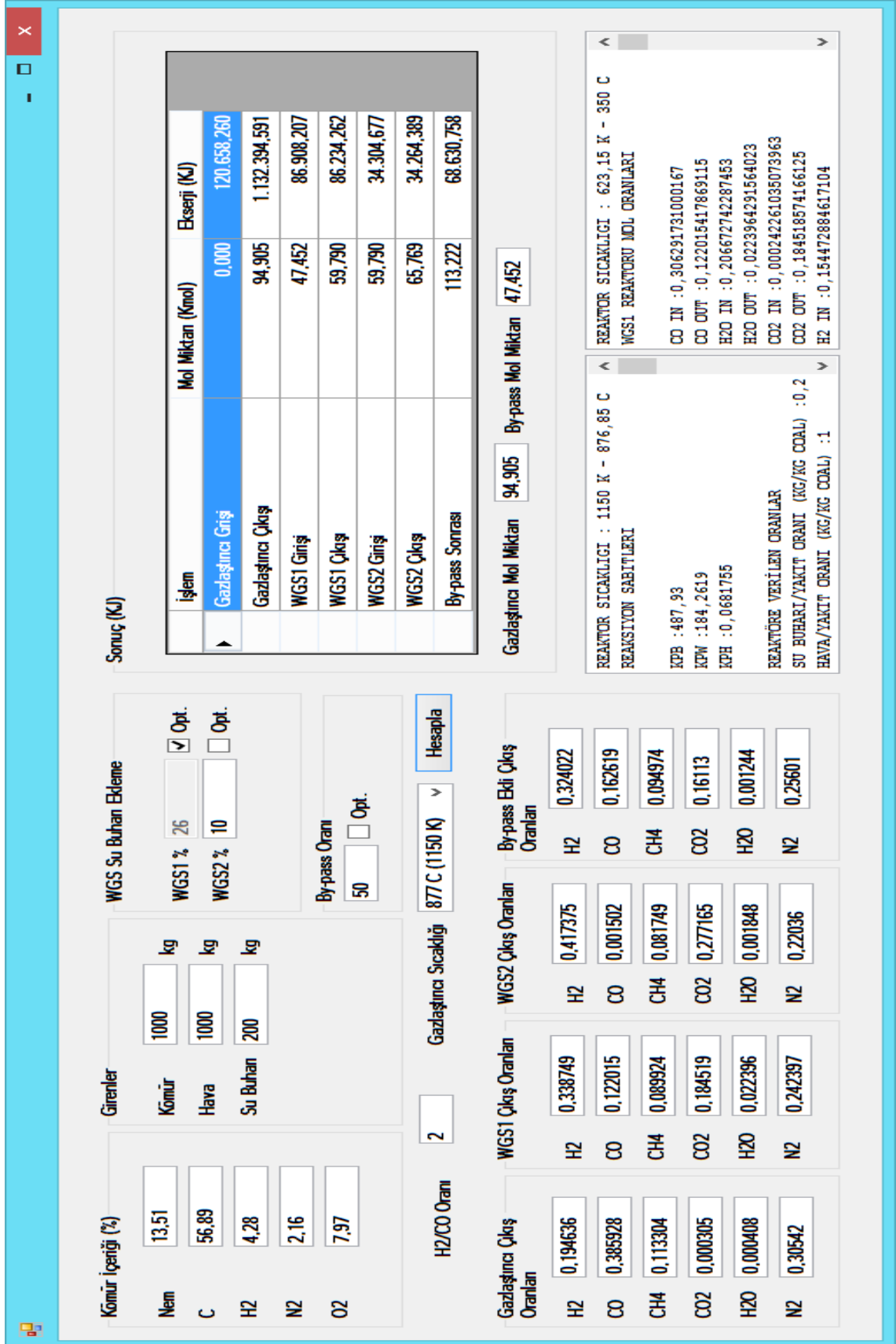
Bu çalışmanın en önemli sonuçlarından birisi de baypas oranı arttıkça SGY I reaktörü için gerekli su buharı oranı artmasına rağmen, yapılan ekserji analizi neticesinde aynı sonuca ulaşabilmek için en az enerji gereksinimi olan işletme koşullarının en yüksek baypas oranı olduğu zaman elde edilmesinin tespit edilmesidir. Su buharını elde etmek için enerji harcamak gerekse bile su buharı oranı arttıkça gazlaştırma sisteminde ekserji değerlerinin gazlaştırıcı reaktörden sonra düşüş göstermesi, artan baypas oranı ile SGY reaktörlerine giren sentez gazı miktarının azalması ile açıklanabilir. İstenilen sentez gazı kompozisyonunu elde edebilmek için en verimli yol, beklenenin aksine baypas oranının değiştirilmesi ile elde edilmektedir. Gazlaştırma ünitesi çıkışında hedeflenen H₂/CO = 2 değerinin elde edilmesinde en az enerji gereksinimi, baypas oranının en büyük tutulduğu %50 oranında sağlanmıştır. Baypas oranı basit bir vana ile ayarlanabildiğinden gazlaştırma sistemi enerji gereksinimi de beklenenden düşük olacaktır. SGY I reaktörü için gereken su buharı miktarı, baypas oranı arttıkça artış göstermekle beraber, termodinamik açıdan bakıldığında en düşük ekserji miktarları bu durum için elde edilmiştir. Böyle bir çalışmanın yapılmaması durumunda, istenilen çıkış değerini elde edebilmek için en uygun işletme şartlarının seçiminde, SGY I reaktörü için en düşük buhar oranına sahip işletme şartlarının seçilme olasılığı oldukça yüksek olacaktır. Bu çalışmada temel olarak kullanılan gazlaştırıcı modeli çalışmasında, istenilen çıkış şartlarına göre farklı baypas oranları kullanılarak optimum işletme şartlarının tespit edilmesini sağlamakla beraber, hangi işletme şartlarının en az enerji gereksinimi ile gerçekleştirilebileceği belirli değildir. SIMOD tarafından yapılmış olan modelleme çalışması başarılı olmakla beraber, bu tip bir gazlaştırıcının en ucuz maliyetle ve çevreye zarar vermeden çalıştırılabilmesi için en uygun işletme parametrelerinin tespitinde termodinamik kanunlarının önemi bir kez daha ispatlanmış olmaktadır. Özellikle, pratikte halen yaygın olarak kullanılmayan termodinamiğin ikinci kanununun, böyle kritik öneme sahip kararlar almada ne denli yardımcı olduğu ve sonucu hızlı bir şekilde net olarak ortaya koyduğu, yapılan bu çalışma ile ispat edilmiştir.



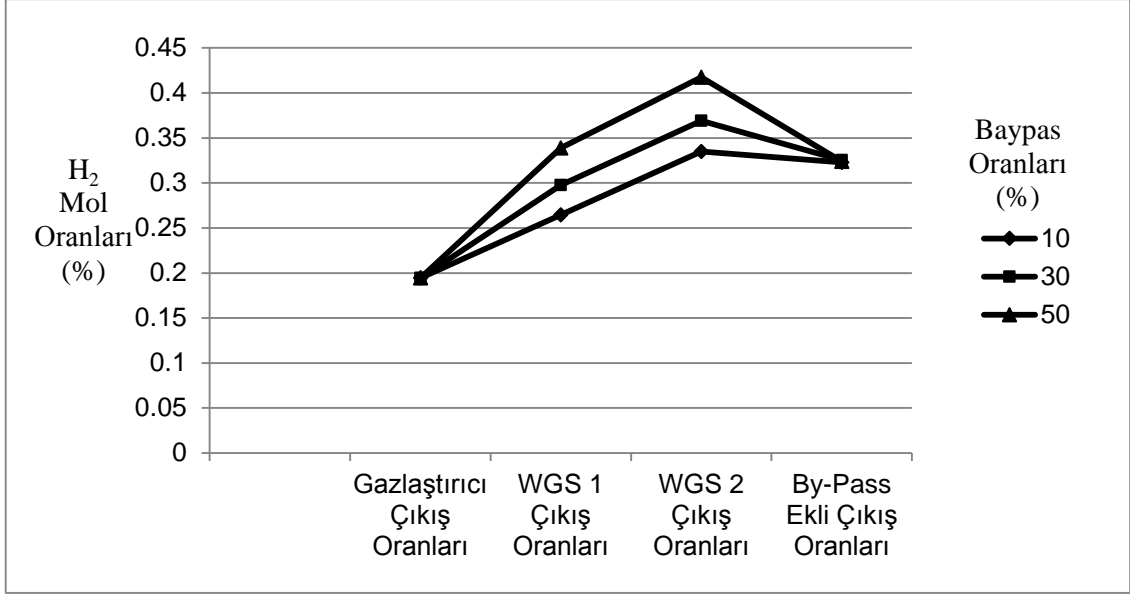
Şekil 4.2. By-pass oranı %10 olması durumunda model sonuçları



Şekil 4.3. By-pass oranı %30 olması durumunda model sonuçları



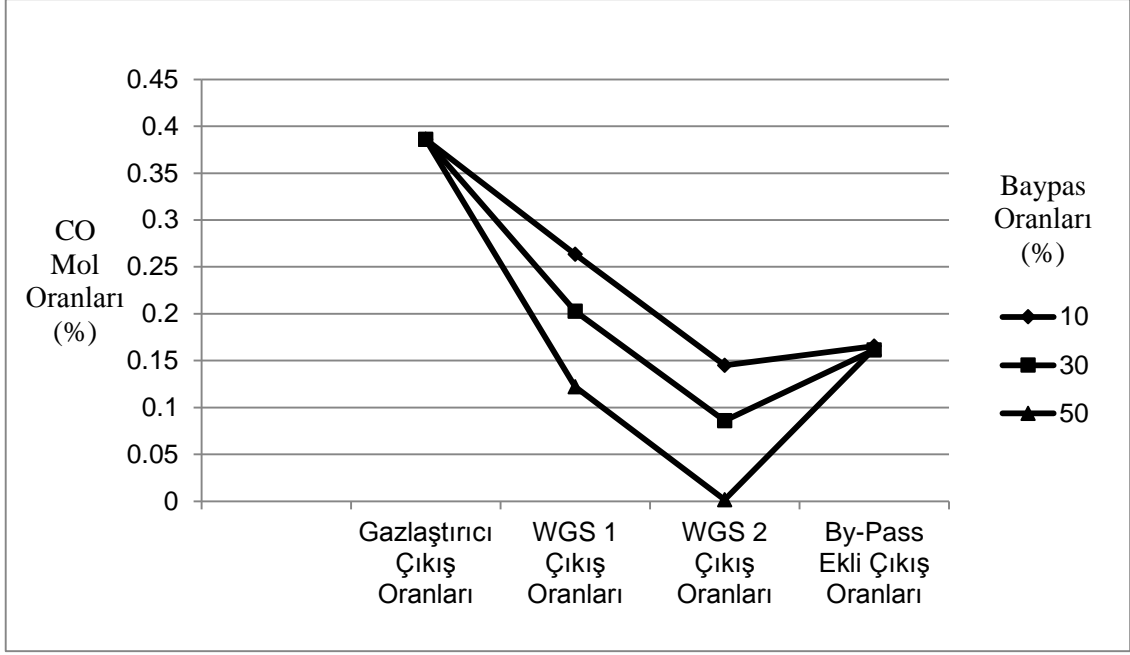
Şekil 4.4. By-pass oranı %50 olması durumunda model sonuçları



Şekil 4.5. By-pass oranlarına göre H₂ mol oranları

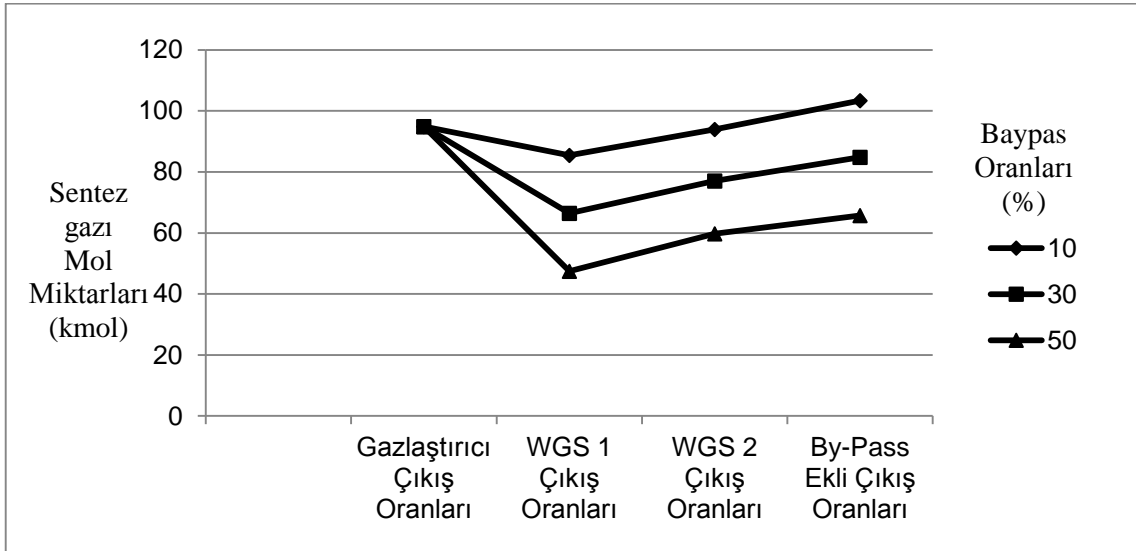
Yukarıda verilen grafikte gazlaştırıcı çıkış oranı, WGS 1 çıkış oranı ve WGS 2 çıkış oranının yarısına kadar her üç baypas oranı için hidrojen mol oranlarında artış söz konusudur. Baypas oranı arttıkça hidrojen miktarında görülen artış, sugazı yönlendirme reaktörlerinde hidrojen üretiminin etkin olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Özellikle sugazı yönlendirme reaktörlerine giren sentez gazı miktarının azalması, hidrojen miktarı üzerinde olumlu bir etkiye sebep olmaktadır. Ancak her üç baypas oranına bağlı olarak mol miktarının WGS 2 çıkışında ani bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi, gazlaştırıcı sisteminin çıkış değeri olarak H₂/CO değerinin 2 olarak ayarlanmasındandır.

Şekil 4.6 detaylı olarak incelenecek olursa %10 baypas oranında CO mol oranı WGS 2 çıkışına kadar azalmakta daha sonra hafif bir artış göstermektedir. %30 baypas oranında ise %10 baypas oranıyla paralel bir değişim söz konusudur. %50 baypas oranı ise diğer oranlara göre daha farklı bir değişim göstermektedir. Bu durum, gazlaştırıcı sistemi boyunca hidrojen gazı mol oranı değişimini veren Şekil 4.5 ile uyumludur. Karbon monoksit oranının düşmesi, sugazı reaksiyonu sonucunda hidrojen oluşumu ile alakalıdır. Karbon monoksit yüzdesi, WGS 2 çıkışına kadar hızlı bir şekilde azalır WGS 2 çıkışının ortalarında sifira ulaşıp ardından hızlı bir artış göstermiştir.

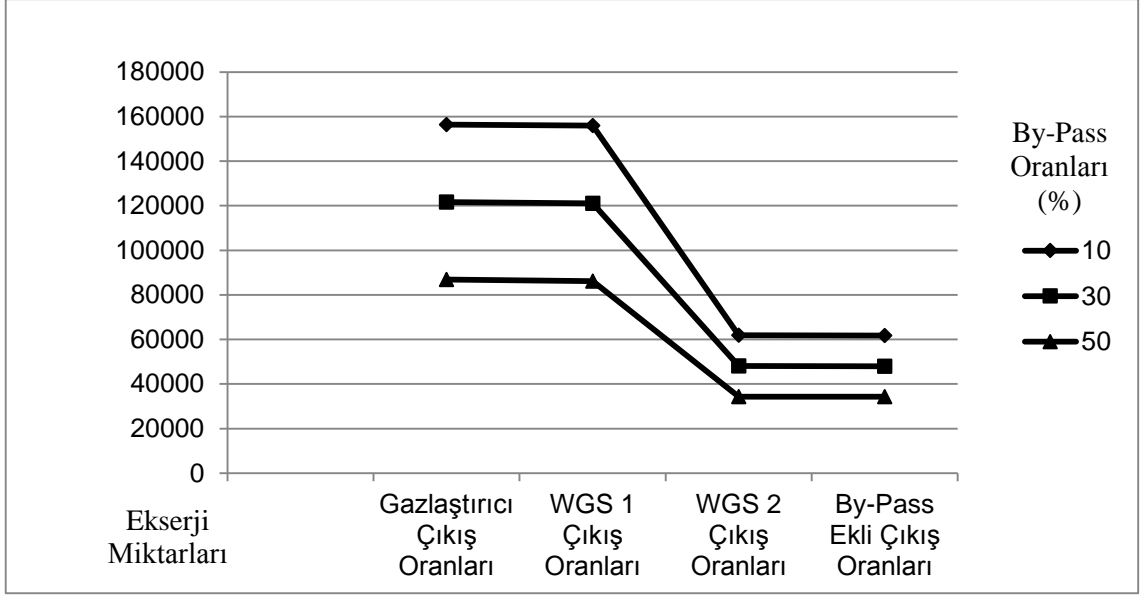


Şekil 4.6. By-pass oranlarına göre CO mol oranları

Gazlaştırıcı sistemi boyunca sentez gazı mol miktarı değişimi Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi sentez gazı mol miktarları gazlaştırıcı çıkışından başlayarak WGS 1 çıkışına kadar her üç by-pass oranı içinde azalmıştır. Bu noktadan sonra da paralel olarak hareket eden by-pass oranları mol miktarında artış göstermiştir.



Şekil 4.7. By-pass oranlarına göre sentez gazı mol miktarları



Şekil 4.8. By-pass oranlarına göre ekserji miktarları

Gazlaştırma sistemi boyunca elde edilen sentez gazı ekserji miktarları Şekil 4.8’de verilmiştir. Ekserji miktarları her üç baypas oranı için gazlaştırıcı çıkışı ve WGS 1 çıkışının yarısına kadar sabit kalmıştır. Daha sonra ise WGS 2 çıkışının ortalarına kadar hızlı bir azalma göstermiştir. Sentez gazı ekserjisinde gözlemlenen bu düşüş, gazlaştırıcı sistem işletme sıcaklığının azalmasından kaynaklanmaktadır.

Özetle bu çalışma göstermiştir ki, enerji üretim sistemlerinin sayısal modellemeleri yapıp, uygun deneylerle bu modellerin geçerliliği sağlandıktan sonra, bir üst aşama olan gerçek sistem tasarımına geçmeden önce, detaylı bir termodinamik analizin yapılması, gerçekleştirilecek tasarımın daha çevreci ve daha verimli olmasını sağlayacaktır.

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Yerli kaynaklarımız arasında yeralan kömür rezervlerinin yüksek verimlilikle değerlendirilmesinin bir yoluda, kömürün gazlaştırılarak kullanılabilir düzeyde ısı değeri içeren gaz ürünlere dönüştürülmesidir. Temiz kömür teknolojileri arasında yeralan gazlaştırma işleminin, ülkemiz kömürlerine uygulanması yerli kaynaklarımızın çevre sorunu yaratmaksızın değerlendirilmesini sağlayacaktır. Ayrıca bu teknolojinin yaygın kullanımının ülkemizin enerji üretiminde önemli katkı sağlayacağı kaçınılmazdır.

Bu çalışmada, sayısal modellemesi önceden hazırlanmış olan bir kömür gazlaştırma sisteminin her bir aşaması için ekserji analizi yapılmıştır. Dikkate alınan gazlaşma sistemindeki her bir noktadaki ekserji değerleri, önceki bölümlerde verilen eşitlikler dikkate alınarak hesaplanmış ve SIMOD grubu tarafından geliştirilen sayısal model sonuçlarının, termodinamik açıdan değerlendirilmesi yapılmak üzere sonuçlar irdelenmiştir. Gazlaştırma sistemi için geliştirilen model, farklı işletme şartları için karbon dönüşüm oranının %100 olması durumunda optimum işletme şartlarını bulmak üzere tasarlanmıştır. Gazlaştırıcıya giriş noktasında kömür, su buharı ve hava 1 atm basınç ve 25°C sıcaklıkta gazlaştırıcıya girmektedir. Sistem atmosfer basıncında çalıştırılmaktadır. Gazlaştırıcı 877°C sıcaklıkta, SGY I reaktörü 350°C ve SGY II reaktörü 200°C sıcaklıkta çalışmaktadır. Gazlaştırma sistemi çıkışında H₂/CO oranı 2 alınmıştır. Gazlaştırıcı çıkışından sonra baypas oranları sırasıyla %10, %30 ve %50 olarak alınmıştır. Yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ve sistem bilgileri, MATLAB programı kullanılarak geliştirilen bir arayüz yardımıyla elde edilmiştir. Gazlaştırma ünitesi çıkışında hedeflenen H₂/CO = 2 değerinin elde edilmesinde en az enerji gereksiniminin, baypas oranının en büyük tutulduğu %50 oranında sağlandığı görülmüştür. Ayrıca baypas oranı arttıkça su gazı reaktörlerinde hidrojen gazı yüzdesinin arttığı gözlemlenmiştir. Su gazı reaktörlerine giren sentez gazı miktarı azalmasına rağmen, hidrojen gazı mol oranının artış göstermesi dikkat çekici bir durumdur. Bu sonuç, su gazı yönlendirme reaktörleri ile ilgili daha detaylı sayısal ve deneysel çalışmalar yapılması gerektiğini göstermektedir. Baypas oranı basit bir vana

ile ayarlanabildiğinden gazlaştırma sistemi enerji gereksinimi de beklenenden düşük olacaktır. SGY I reaktörü için gereken su buharı miktarı, baypas oranı arttıkça artış göstermekle beraber, termodinamik açıdan bakıldığında en düşük ekserji miktarları bu durum için elde edilmiştir. Böyle bir çalışmanın yapılmaması durumunda, istenilen çıkış değerini elde edebilmek için en uygun işletme şartlarının seçiminde, SGY I reaktörü için en düşük buhar oranına sahip işletme şartlarının seçilme olasılığı oldukça yüksek olacaktır. Bu çalışma, bu tip bir gazlaştırıcının en ucuz maliyetle ve çevreye zarar vermeden çalıştırılabilmesi için en uygun işletme parametrelerinin tespitinde termodinamik kanunlarının önemi bir kez daha ispatlanmış olmaktadır. Özellikle, pratikte halen yaygın olarak kullanılmayan termodinamiğin ikinci kanununun, böyle kritik öneme sahip kararlar almada ne denli yardımcı olduğu ve sonucu hızlı bir şekilde net olarak ortaya koyduğu, yapılan bu çalışma ile ispat edilmiştir. Bu çalışma ile ekserji analizinin sistem tasarımındaki kilit rolü tekrar vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

Abbott, M. and Van Ness, H., "Thermodynamics", *McGraw-Hill* book company, Singapore 1972.

Balmer, R.T., "Thermodynamics", In: Paul ST., editor. *New York, Los Angeles, San Francisco: West Publishing Company*; 1990.

Bayrak, M. and Güngör, A., "Fossil Fuel Sustainability: Exergy Assessment Of A Cogeneration System", *International journal of energy research* 35, 162-168, 2011.

Bejan, A., "Advanced Engineering Thermodynamics", *Wiley, New York* 1988.

Bejan, A., "Entropy Generation Minimization", CRC Press: *Boca Raton* 1996.

Canel, M., "Kömürün Gazlaştırılması." *Madencilik* 25 (2), 35-41, 1986.

Çengel, Y. A., Byard, W. and Dinçer, İ., "Is Bigger Thermodynamically Beter. Exergy", *An International Journal* 2, 687-702, 2002.

Çengel, Y. and Boles, M.A., "Thermodynamics: An Approach", 5th.Edt., *McGraw – Hill, Inc.*, 2007.

Dinçer, I., "The role of exergy in energy policy making", *Energy Policy* 30, 137-149, 2002.

Dinçer, I. and Rosen, M.A., "Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development", Elsevier Ltd., *Jordan Hill, Oxford*, 2007.

El-Emam, R.S., Dincer, İ. and Naterer G.F., "Energy and exergy analyses of an integrated SOFC and coal gasification system", *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 1689-1697, 2012.

Eryener, D., “Cebri Konveksiyonla Isı Geçişi Sağlayan Isıl Sistemlerin Ekserji Ekonomik Analizi”, Doktora Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 2003.

Gnanapragasam N.V., Reddy B.V. and Rosen M.A., “Hydrogen production from coal gasification for effective downstream CO₂ capture”, *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 4933-4943, 2010.

Güngör, A., Ozbayoglu, M., Kasnakoglu, C., Biyikoglu, A. and Uysal, B.Z., “Determination Of Air/Fuel And Steam/Fuel Ratio For Coal Gasification Process To Produce Synthesis Gas”, *Journal of Environmental Science and Engineering* 5, 799-804, 2011.

Güngör A., Ozbayoglu M., Kasnakoglu C., Biyikoglu A. and Uysal B.Z., “A Parametric Study On Coal Gasification For The Production Of Syngas”, *Chemical Papers* 66, 677-683, 2012.

Güngör A., Bayrak M. and Beylergil B., “In View Of Sustainable Future Energetic-Exergetic And Economic Analysis Of A Natural Gas Cogeneration Plant”, *International Journal Of Exergy* 12, 109-118, 2013.

Hepbaşı, A., “Güneş Enerjili Sistemlerde Ekserji Analizinin Gerekliliği ve uygulanması.” *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi*, Mersin, Bildiriler Kitabı 197-206, 20-21 Haziran 2003.

Kaushal, P., Pröll, T. and Hofbauer, H., “Model for biomass char combustion in the riser of a dual fluidized bed gasification unit: Part 1 Model development and sensitivity analysis”, *Fuel Processing Technology* 89, 651- 659, 2008.

Kotas, T.J., “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Kreiger Publishing Company, *Malabar, Florida*, 1995.

Liszka M., Malik T. and Manfrida G., “Energy and exergy analysis of hydrogen-oriented coal gasification with CO₂ capture”, *Energy* 45, 142-150, 2012.

Lowry, H.H., “Chemistry of Coal Utilization Supplementary Volume”, John Wiley and Sons Inc., *New York*, 1963.

Özbayoğlu, M., Kasnakoğlu, C., Güngör, A., Bıyıkoğlu, A. and Uysal, B.Z., “A Two-Stage Water-Gas Shift Reactor Model To Obtain Desired Synthesis Gas Characteristics With Adjustable Reactor Parameters”, *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University* 28, 339-351, 2013.

Öztürk M., Özek N. and Yüksel Y.E., “Gasification of various types of tertiary coals: A sustainability approach”, *Energy Conversion and Management* 56, 157-165, 2012.

Prins M.J. and Ptasiński K.J., “Energy and exergy analyses of the oxidation and gasification of carbon”, *Energy* 30, 982-1002, 2005.

Prins M.J., Ptasiński K.J. and Janssen F.J.J.G., “From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency”, *Energy* 32, 1248-1259, 2007.

Ray, R. and Thorpe, R.B., “A Comparison of Gasification with Pyrolysis for the Recycling of Plastic Containing Wastes”, *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 5, 2007.

Tsui, H., Yavuzkurt, S. and Scaroni, A., “Thermodynamic analysis of the gasification of coal water slurry fuels for a circulating fluidized bed gasifier, Proc Instn Mech Engrs”, *J Power and Energy* 216, 343-353, 2002.

Xu Y., Zang G., Chen H., Dou, B. and Tan C., “Co-production system of hydrogen and electricity based on coal partial gasification with CO₂ capture”, *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 11805-11814, 2012.

ÖZ GEÇMİŞ

Sancar Güngör 31.03.1977 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlk orta ve lise öğretimini Kayseri'de tamamladı. 1995 yılında girdiği Niğde Üniveristesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 1999'da mezun oldu. 2000-2002 yılları arasında askerlik görevini tamamladı. 2002-2003 yılları arasında Birlik Mensucatta, 2003-2004 yılları arasında Kayseri MMO'da mühendis olarak çalıştı. 2004-2007 yılları arasında Niğde Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında 2007-2010 yılları arasında Aksaray Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında 2010 yılından itibaren de Gazi Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında çalışmakta ve yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir. Bilim dalındaki ilgi alanı enerjidir.