

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA ANABİLİM DALI**

**BAZI YAKITLARIN KİMYASAL EKSERJİ DEĞERLERİNİN**  
**HESAPLANMASI**

**Kimyager Selçuk BİLGEN**

96816

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**“ Yüksek Lisans ( Kimya ) ”**  
**Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03.08.2000**

**Tezin Savunma Tarihi : 31.08.2000**

**Tez Danışmanı**

**: Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ**

**Jüri Üyesi**

**: Prof. Dr. Ayhan DEMİRBAŞ**

**Jüri Üyesi**

**: Y. Doç. Dr. Sevil YILMAZ**

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU**  
**DEĞERLENDİRME MERKEZİ**

**Enstitü Müdürü**

**: Prof. Dr. Asım KADIOĞLU**

**Trabzon 2000**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalında yapılmıştır.

Tez çalışmamı planlayan, yöneten ve her aşamasında yardımını esirgemeyen Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Fizikokimya Anabilim Dalı Başkanı sayın hocam Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



Selçuk BİLGİN

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ	VIII
SEMBOLLER DİZİNİ	IX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Yakıtlar	3
1.2.1. Katı Yakıtlar	3
1.1.1.1. Kömür	4
1.2.1.2. Linyit	6
1.2.1.3. Odun	7
1.2.2. Sıvı Yakıtlar	8
1.2.2.1. Petrol	8
1.2.2.2. Benzin	10
1.2.3. Gaz Yakıtlar	11
1.3. Termodinamik	13
1.3.1. Termodinamiğin Sıfıncı Yasası ( Termik Denge )	14
1.3.2. Termodinamiğin Birinci Yasası ( Enerjinin Korunumu )	15
1.3.3. Termodinamiğin İkinci Yasası	18
1.3.4. Termodinamiğin Üçüncü Yasası	21
1.3.5. Kimyasal Termodinamik	21
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	23
2.1. Ekserji Analizi	23

2.1.1. Ön Bilgiler	23
2.1.2. Ekserji Tanımı	23
2.1.3. Sistem ve Çevresi	24
2.1.4. Ölü Hal ve Sınırlı Ölü Hal	25
2.1.5. Ekserji Bileşenleri	25
2.1.6. Fiziksel Ekserji	26
2.1.7. Kapalı Sistemin Ekserji Dengesi	30
2.1.8. Kontrol Hacim Ekserji Dengesi	33
2.1.9. Kimyasal Ekserji	36
2.1.9.1. Standart Kimyasal Ekserji	37
2.1.9.2. Gazların ve Gaz Karışımlarının Standart Kimyasal Ekserjileri	38
2.1.9.3. Yakıtların Standart Kimyasal Ekserjileri	40
2.1.10. Ekserji Yıkımı ve Ekserji Kaybı	43
2.1.11. Ekserji Verimi	47
2.2. Kömürün Kimyasal Ekserjisinin Hesaplanması	48
2.3. Odunun Kimyasal Ekserjisinin Hesaplanması	56
2.4. Fuel – oil’ in Kimyasal Ekserjisinin Hesaplanması	58
3. BULGULAR	60
4. SONUÇ VE TARTIŞMA	72
5. ÖNERİLER	74
6. KAYNAKLAR	76

## ÖZET

Bu çalışmada ülkemizde kullanılan bazı katı ve sıvı yakıtların kimyasal ekserji değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlara göre yakıtlar kalite açısından birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Enerjinin korunumu prensibini ifade eden termodinamiğin birinci kanunu her ne kadar enerji analizlerinde gerekli ise de, bu kanun analizi bir enerji sisteminin çeşitli bileşenlerinin potansiyelleri ile kullanım sınırlamaları hakkında tam bir değerlendirme vermez. Bu durum enerji sistemlerinin tasarım ve imalatında istenen uyumluluğu sağlamaz. Halbuki termodinamiğin ikinci kanunu veya ekserji analizi enerji sistemlerinin tasarımında ve performans analizinde daha iyi sonuç verir. Ekserji veya kullanılabilir enerji, bir sistemin çevresi ile denge haline gelirken yapabileceği en fazla faydalı işi belirtir. Bu bakımdan ekserji, belirli bir çevre hali için sistemin iş yapabilme potansiyelinin bir ölçüsüdür. Ekserji analizi ısı sistemlerinin değerlendirilmesinde ve tasarımında giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, ülkemizin çeşitli yörelerinden çıkarılıp kullanılan çeşitli linyit ve taşkömürleri, bazı odun türleri ve fuel-oil yakıtların kimyasal ekserji değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler halinde verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek kimyasal ekserji değerine sahip yakıtlar; taşkömüründe Çatalağzı, linyitte Sorgun, biyokütlede melez kavak ve fuel-oil' de ise petrol kökenli olan 2 No' lu fuel-oil' dir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, Ekserji, Üst Isı, Kömür, Odun, Biyokütle, Fuel-Oil.

## SUMMARY

### Calculation of Chemical Exergy Values of Some Fuels

In this study, chemical exergy values of some solid and liquid fuels used in our country were calculated and the fuels are compared with each other depend on obtained exergy values.

The first law analysis of thermodynamics which explains energy conservation principle, although necessary, does not give a complete picture ( or evaluating ) of the limitations and potentialities of the various components of an energy system. This way result in the installation of equipment that is not properly designed and matched with one another. But, the second law of thermodynamics, or exergy analysis gives better result for performans analysis and design of the energy systems. Exergy or availability energy is the maximum theoretical useful work obtainable as the system interact to equilibrium with the environment only. Alternatively, exergy is the minimum theoretical useful work required to form a quantity of matter from substances present in the environment and to bring the matter to a spesified state. Therefore, the use of exergy analysis ( or second law of thermodynamics ) in thermal system design and performance calculations is using more and more gradually.

In the present study, the chemical exergy values of some hard coal, lignite, wood and biomass and other fuel-oil fuels used in our country were calculated by using exergy analysis method given in the literature and calculated results are given in tables and figures. According to the obtained chemical exergy calculations, the best fuels are Çatalağzı ( hard coal ) , Sorgun ( lignite ) , Hybride Poplar ( wood, biomass ) and No.2 fuel-oil.

**Key Words:** Energy, Exergy, Higher Heating Value, Coal, Wood, Biomass, Fuel-Oil.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kapalı sistem ve çevreden oluşan birleşik sistem	27
Şekil 2. Kararlı haldeki bir giriş, bir çıkış kontrol hacmi	36
Şekil 3. Bir gazın kimyasal ekserjisinin hesabı için cihaz	38
Şekil 4. Bir hidrokarbon yakıtın ( $C_aH_b$ ) kimyasal ekserjisinin hesabı için cihaz	40
Şekil 5. Isı transferi ve sürtünmenin ekserji yıkımı üzerine etkilerini tartışmak için kullanılan zıt akışlı değiştirici	45
Şekil 6. Bazı kömürlerin kimyasal ekserji değerleri	64
Şekil 7. Bazı kömürlerin spesifik kimyasal ekserji değerleri	65
Şekil 8. Bazı kömürlerin üst ısı değerleri	66
Şekil 9. Bazı odunların kimyasal ekserji değerleri	67
Şekil 10. Bazı odunların spesifik kimyasal ekserji değerleri	68
Şekil 11. Bazı odunların üst ısı değerleri	69
Şekil 12. Bazı fuel-oil yakıtların kimyasal ekserji değerleri	70
Şekil 13. Bazı fuel-oil yakıtların üst ısı değerleri	71

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Türkiye’ deki bazı kömürlerin kimyasal analizleri ( havada kuru )	50
Tablo 2. Türkiye’ deki bazı kömürlerin bileşimleri	51
Tablo 3. Çeşitli maddelerin 1 bar basınçta spesifik ısı, entalpi, mutlak entropi ve Gibbs Fonksiyonunun sıcaklıkla değişimi(kj / kmol veya kj / kmol.K)	52
Tablo 4. Bazı maddeler için $H^+$ , $S^+$ , a, c, d sabitleri	53
Tablo 5. Çeşitli maddelerin 298.15 K ve $p_0$ ’ da standart molar kimyasal ekserjileri	54
Tablo 6. Bazı odunların bileşimleri	57
Tablo 7. Bazı fuel-oil yakıtların bileşimleri	59
Tablo 8. Bazı Türk kömürlerinin $s_{DAF}$ , $(HHV)_{DAF}$ , $e_{DAF}^{CH}$ ve $e^{CH}$ değerleri	61
Tablo 9. Bazı odunların $s_{DAF}$ , $(HHV)_{DAF}$ , $e_{DAF}^{CH}$ ve $e^{CH}$ değerleri	62
Tablo 10. Bazı fuel - oil yakıtların $v_{CO_2}$ , $v_{H_2O}$ , $v_{SO_2}$ , $v_{N_2}$ , $v_{O_2}$ , $s_{DAF}$ , $(HHV)_{DAF}$ ve $e_{DAF}^{CH}$ değerleri	63



## SEMBOLLER DİZİNİ

- $c$  : Işık Hızı ( m / s )
- $c_p$  : Spesifik Isı ( kJ / kg.K )
- $\bar{c}_p$  : Molar Spesifik Isı ( kJ / kg.K )
- DAF : Kuru ve Külsüz Yakıt
- $E$  : Bir Sistemin Toplam Ekserjisi ( MJ )
- $E^{PH}$  : Bir Sistemin Fiziksel Ekserjisi ( MJ )
- $E^{CH}$  : Bir Sistemin Kimyasal Ekserjisi ( MJ )
- $E_{CV}$  : Kontrol Hacim Ekserjisi ( MJ )
- $E_D$  : Ekserji Yıkımı ( MJ )
- $E^{KN}$  : Bir Sistemin Kinetik Ekserjisi ( MJ )
- $E^{PT}$  : Bir Sistemin Potansiyel Ekserjisi ( MJ )
- $E_q$  : Isı ile Yapılan Ekserji Transferi ( MW )
- $E_w$  : İş ile Yapılan Ekserji Transferi ( MW )
- $\dot{E}$  : Enerji ( MJ )
- $\dot{E}_D$  : Ekserji Yıkım Hızı ( MW )
- $\dot{E}_{D,tot}$  : Sistemdeki Toplam Ekserji Yıkım Hızı ( MW )
- $\dot{E}_e$  : Çıkıştaki Ekserji Transfer Hızı ( MW )
- $\dot{E}_F$  : Yakıtın Ekserji Hızı ( MW )
- $\dot{E}_{F,tot}$  : Tüm Sisteme Sağlanan Yakıtın Ekserji Hızı ( MW )
- $\dot{E}_i$  : Girişteki Ekserji Transfer Hızı ( MW )
- $\dot{E}_L$  : Ekserji Kayıp Hızı ( MW )
- $\dot{E}_p$  : Ürünün ( ısı yada enerji ) Üretim Hızı ( MW )
- $\dot{E}_q$  : Isı ile Yapılan Ekserji Transfer Hızı ( MW )
- $\dot{E}_{q,j}$  : Birleşik Ekserji Transfer Hızı ( MW )
- $\dot{E}_w$  : İş ile Yapılan Ekserji Transfer Hızı ( MW )
- $e$  : Bir Sistemin Toplam Spesifik Ekserjisi ( MJ / kg )
- $e^{PH}$  : Bir Sistemin Spesifik Fiziksel Ekserjisi ( MJ / kg )

- $e^{CH}$  : Bir Sistemin Spesifik Kimyasal Ekserjisi ( MJ / kg )  
 $e^{-CH}$  : Kimyasal Ekserji ( MJ / kmol )  
 $e_{DAF}^{CH}$  : Kuru ve Külsüz Kömürün Kimyasal Ekserjisi ( MJ / kg )  
 $e_F^{-CH}$  : Yakıtın Kimyasal Ekserjisi ( MJ / kmol )  
 $e_k^{-CH}$  : k Gazının Kimyasal Ekserjisi ( MJ / kmol )  
 $e^{KN}$  : Bir Sistemin Spesifik Kinetik Ekserjisi ( MJ / kg )  
 $e^{PT}$  : Bir Sistemin Spesifik Potansiyel Ekserjisi ( MJ / kg )  
 $G$  : Gibbs Fonksiyonu ( MJ )  
 $g$  : Yer Çekimi İvmesi (  $m^2 / s$  )  
 $\bar{g}$  : Molar Gibbs Fonksiyonu ( MJ / kmol )  
 $\bar{g}_F$  : Yakıtın Molar Gibbs Fonksiyonu ( MJ / kmol )  
 $\bar{g}_f^o$  : Oluşumun Molar Gibbs Fonksiyonu ( MJ / kmol )  
 $H_a$  : Üst Isı Değeri ( MJ / kmol )  
 $\overline{HHV}$  : Üst Isı Değeri ( MJ / kmol )  
 $h$  : Spesifik Entalpi ( MJ / kg )  
 $h_e$  : Çıkıştaki Spesifik Entalpi ( MJ / kg )  
 $h_i$  : Girişteki Spesifik Entalpi ( MJ / kg )  
 $h_0$  : Kısıtlanmış Ölü Haldeki Spesifik Entalpi ( MJ / kg )  
 $\bar{h}^o$  : Molar Mutlak Entalpi ( MJ / kmol )  
 $\bar{h}_{RP}$  : Yanma Entalpisi ( MJ / kmol )  
 $K$  : Kömürleşme İndeksi  
 $KE$  : Kinetik Enerji ( MJ )  
 $k$  : Spesifik Hız Oranı  
 $m$  : Kütle ( kg )  
 $\dot{m}$  : Kütle Akış Hızı ( kg / s )  
 $\dot{m}_e \dot{e}_e$  : Çıkıştaki Ekserji Transferinin Zamanla Değişim Hızı ( MW )  
 $\dot{m}_i \dot{e}_i$  : Girişteki Ekserji Transferinin Zamanla Değişim Hızı ( MW )  
 $\dot{n}_F$  : Yakıtın Mol Sayısı ( kmol )  
 $PE$  : Potansiyel Enerji ( MJ )  
 $p$  : Basınç ( bars )

- $p_k$  : Kısmi Basınç ( bars )  
 $p_k^e$  : k Gazının Çevredeki Kısmi Basıncı ( bars )  
 $p_0$  : Dış Basınç ( bars )  
 $Q$  : Isı Transferi ( MJ )  
 $Q_c$  : Birleşik Sistemin Isı Transferi ( MJ )  
 $Q_c$  : Çıkan Isı ( MJ )  
 $Q_g$  : Giren Isı ( MJ )  
 $\dot{Q}$  : Isı Transfer Hızı ( MW )  
 $\dot{Q}_j$  : Sınırdaki Isı Transfer Hızı ( MW )  
 $q$  : Isı ( MJ )  
 $q'$  : Birim Uzunluk Başına Isı Transfer Hızı ( W / m )  
 $\bar{R}$  : Evrensel Gaz Sabiti ( kJ / kmol.K )  
 $S$  : Entropi ( MJ / K )  
 $S_c$  : Birleşik Sistemin Entropisi ( MJ / K )  
 $S^e$  : Çevrenin Entropisi ( MJ / K )  
 $S_{gen}$  : Entropi Oluşumu ( MJ / K )  
 $S_0$  : Kısıtlanmış Ölü Haldeki Sistemin Entropisi ( MJ / K )  
 $\dot{S}_{gen}$  : Entropi Oluşum Hızı ( W / K )  
 $s$  : Spesifik Entropi ( kJ / kg.K )  
 $s_e$  : Çıkıştaki Spesifik Entropi ( kJ / kg.K )  
 $\bar{s}_F$  : Yakıtın Molar Mutlak Entropisi ( kJ / kmol.K )  
 $s_i$  : Girişteki Spesifik Entropi ( kJ / kg.K )  
 $s_0$  : Kısıtlanmış Ölü Haldeki Spesifik Entropi ( kJ / kg. K )  
 $\bar{s}^o$  : Molar Mutlak Entropi ( kJ / kmol. K )  
 $T$  : Sıcaklık ( K )  
 $T_a$  : Termodinamik Ortalama Sıcaklık ( K )  
 $T_b$  : Enerji Transferinin Olduğu Sınırdaki Sıcaklık ( K )  
 $T_{ca}$  : Soğuk Akışlar İçin Termodinamik Ortalama Sıcaklık ( K )  
 $T_{ha}$  : Sıcak Akışlar İçin Termodinamik Ortalama Sıcaklık ( K )  
 $T_j$  : Ani Sıcaklık ( K )  
 $T_o$  : Dış Sıcaklık ( K )

- $t$  : Zaman ( h )
- $U$  : İç Enerji ( MJ )
- $U_c$  : Birleşik Sistemin İç Enerjisi ( MJ )
- $U^e$  : Çevrenin İç Enerjisi ( MJ )
- $U_o$  : Kısıtlanmış Ölü Haldeki İç Enerji ( MJ )
- $u$  : Spesifik İç Enerji ( MJ / kg )
- $u_o$  : Kısıtlanmış Ölü Haldeki Spesifik İç Enerji ( MJ / kg )
- $V$  : Hız ( m / s )
- $V$  : Hacim ( m<sup>3</sup> )
- $V^e$  : Çevrenin Hacmi ( m<sup>3</sup> )
- $V_o$  : Kısıtlanmış Ölü Haldeki Hacim ( m<sup>3</sup> )
- $v$  : Spesifik Hacim ( m<sup>3</sup> / kg )
- $v_o$  : Kısıtlanmış Ölü Haldeki Spesifik Hacim
- $W$  : İş ( MJ )
- $W_c$  : Birleşik Sistem Tarafından Yapılan İş ( MJ )
- $W_{c,max}$  : Birleşik Sistem Tarafından Yapılan Maksimum İş ( MJ )
- $W_ç$  : Çıkan İş ( MJ )
- $W_g$  : Giren İş ( MJ )
- $\dot{W}$  : İş Hızı ( MW )
- $\dot{W}_{cv}$  : Kontrol Hacimdeki İş Hızı ( MW )
- $x_k$  : Mol Fraksiyonu ( kmol / kmol )
- $x_k^e$  : k Gazının Çevredeki Mol Fraksiyonu ( kmol / kmol )
- $y_L$  : Ekserji Kayıp Oranı
- $y_D$  : Ekserji Yıkım Hızı
- $y_D^*$  : Ekserji Yıkım Hızı
- $z$  : Yükseklik ( m )
- $z_o$  : Kısıtlanmış Ölü Haldeki Yükseklik ( m )
- $\varepsilon$  : Ekserji Verimi
- $\eta$  : Verim

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Enerji, insan hayatının başlangıcından günümüze kadar giderek artan miktarlarda insan yaşamına girmiş ve insanların refah düzeyini yükseltmiştir. İnsanlar, önceleri ısınmak ve yiyeceklerini pişirmek için enerjiden yararlanmışlar, teknolojinin gelişmesiyle de enerjiyi çok değişik sahalarda kullanmaya başlamışlardır. Özellikle çağımızda kullanılma alanı oldukça yaygınlaşmış ve teknolojinin bugünkü seviyeye gelmesinde başlıca etken olmuştur. Bilindiği gibi ülkemizde enerji açığı oldukça fazladır ve tüketilen enerjinin yarısından fazlası ithal edilmektedir.

Her ne kadar enerji, Termodinamiğin birinci kanununa göre, kullanılmakla yok edilmez ise de, kullanım kolaylığından dolayı faydasız şekillere dönüştürülmektedir. Bundan dolayı da enerji kaynakları gittikçe azalmaktadır. Bu sorunu çözenin en iyi yaklaşımlarından birisi şüphesiz enerjiyi verimli bir şekilde kullanarak kayıpları azaltmaktır. Bunun başarılabilmesi için, sistemlerin kayıplarının ve verimlerinin tam ve doğru ölçülerle belirlenmesi gerekir.

Sistem değerlendirilmelerinde kayıp ve verim hesapları sıkça yapılır. Kayıp hesapları, sistemin enerji bütçesinin yapılması yanında verim tayini içinde geçerli olabilir. Büyük veya karışık sistemler için kayıp hesapları çeşitli parçalar veya işlemler için ayrı ayrı yapılabilir. Böylece, meydana gelen kayıpların kaynakları ortaya çıkarılarak gerekli önlemler alınabilir. Yakıt sistemlerinin karşılaştırılmasında enerji verimi yanında birde ekserji verimi dikkate alınır. Çünkü her zaman enerji verimi sistemin karşılaştırılmasında yeterli olmayabilir. Enerji veriminin eksiklikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- 1- Termodinamiğin ikinci kanunu ile özetlenen bilgileri içermemektedir.
- 2- Genel bir üst sınır yoktur. Bundan dolayı, verimi % 30 olan bir termik elektrik santralının ideal termodinamik veriminden ne kadar uzakta bulunduğu sadece enerji verimi bilgisinden anlaşılamaz.
- 3- Enerji veriminin genel tanımı yeterli olmadığından özel verim tanımlarına da ihtiyaç vardır.

Enerji veriminin giderilmesi gereken ilk eksikliği enerji türlerini eşit olarak değerlendirmesidir. Pratikte ise enerji farklı kalitelerde olabilir. Termodinamiğin ikinci kanununa göre ifade edilen bu duruma göre iş ısıdan, ısı da daha düşük sıcaklıktaki başka bir ısıdan daha değerlidir. Çünkü iş tümüyle ısıya dönüştürülebilir, fakat ısı tümüyle ve devamlı olarak işe çevrilemez ve çevrilebilme oranı sıcaklığa bağlıdır (Carnot çevriminde ifade edildiği gibi). Bir sistemden onu çevre şartlarına indirgeyerek elde edilebilecek maksimum faydalı iş miktarı o sistemin ( ve çevrenin ) bir özelliği olup ekserji olarak adlandırılır.

Bir sistem veya proses için enerji verimleri yerine ekserji verimleri hesaplanırsa, bu durumda enerjilerin kalitelerindeki farklar dikkate alınmış olur. Bundan dolayı, farklı sistemlerin değerlendirilmesi ekserji verimine göre yapılmalıdır.

Termodinamiğin ikinci kanununa göre, izole edilmiş sistemlerin ekserjisi artmaz. Bütün tersinmez işlemlerde ise azalır. Yani enerjinin aksine, ekserjinin korunumu değil de yok olması söz konusudur. Buna göre girdi ve çıktılar arasındaki ekserji farkı ( tersinmezlik ) ve oranı ( ekserji verimi ) işlemlerin ideal durumlarıyla karşılaştırılmasında en doğru ölçüler olarak ortaya çıkar. Böylece ekserji verimi;

$$\text{Ekserji verimi } (\varepsilon) = \frac{\text{Faydalanılan ekserji artışları toplamı}}{\text{Gerekli ekserji azalmaları toplamı}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{Ekserji kaybı}}{\text{Gerekli ekserji azalmaları toplamı}} \quad (2)$$

olarak verilir. Bu ifadeler hem kapalı hem de açık sistemler için geçerlidir. Kayıp ve azalmalar mutlak değer olarak alındıklarından ekserji verimi (  $\varepsilon$  ) her zaman pozitif ve idealde ekserji kaybı sifıra kadar düşebildiğinden verim en çok % 100 ( veya 1.0 ) değerine ulaşır. Böylece enerji veriminin kusurlu tarafları bu yeni verim kavramında giderilmiştir. Dolayısıyla, güç üretim sistemlerinde hem enerji hem de ekserji verim hesaplamaları yapılmalıdır.

Bu çalışmanın amacı, literatürde ekserji hesaplamaları ile ilgili verilen eşitlikleri kullanarak ülkemizdeki bazı yakıtların kimyasal ekserji değerlerinin hesaplanması ve yakıt kalitesi açısından karşılaştırılmasıdır.

## 1.2. Yakıtlar

Yanması ile fayda sağlayabilecek ısı meydana getiren bütün maddelere yakıt denir. Yakıtlar, kimyasal reaksiyonlar yoluyla ısı üretimine elverişlidirler. Yakıtların esas maddesini organik karbon teşkil eder. Isı, bu organik karbonun oksijen ile reaksiyonu sonucunda açığa çıkar. Sanayide ve ısıtmada bu reaksiyon ısısından faydalanılır [ 1,2 ].

Her yakıtın bileşimi analiz sonucu tespit edilir. Yakıtlarda genellikle karbon C, hidrojen H ve kükürt S bulunur. Yanıcı maddeler olarak; oksijen O ve azot N diğer bileşenleri teşkil eder. Katı yakıtlarda ayrıca yanıcı olmayan organik bileşenler vardır. Bunlar yanma sonucu kül denilen oksitler olarak ortaya çıkarlar.

Yakıtlar içinde yanma ve taşıma bakımından en fazla güçlük çıkaranları katı yakıtlardır. Yanma sırasında kül bırakırlar, ızgaralara gereksinim gösterirler. Çoğu zaman yanma tam olmaz. Ortaya çıkan kurum nedeniyle tesisatın sık sık temizlenmesi gerekir. Akaryakıtlar kolay alevlenirler, taşınmaları kolaydır. Büyük miktarlar uzağa pipe-line denilen boru hattıyla, küçük miktarlar ise sıvılaştırılmış olarak tüpler içinde nakledilirler. Gaz yakıtlar yanma ortamında hacimce kolay yayılabildiklerinden yanmada fazla havaya çok az gerek gösterirler ve bundan dolayı çoğu zaman yanma tam olur.

Yakıtları kökeni itibari ile doğal ve yapay, faz durumları bakımından da katı, sıvı ve gaz yakıtlar olarak sınıflandırmak mümkündür [ 2 ].

### 1.2.1. Katı Yakıtlar

Katı yakıtlar esas olarak doğal katı yakıtlar ve yapay katı yakıtlar olarak iki gruba ayrılırlar. Doğal katı yakıtlara fosil kömürü diye adlandırılan antrasit, taşkömürü, esmer kömür, linyit, trub ve bunlardan farklı olan odun gibi yakıtlar dahildir. Yapay yakıtlara ise kok, semikok, odun kömürü, briket, petrol koku, koloidal yakıt ve pulverize kömür gibi yakıtlar örnek verilebilir [ 3 ].

Katı yakıtlardan en önemli olanı doğal katı yakıt olarak adlandırdığımız fosil kömürleridir. Bu kömürler oluşum devirlerine göre antrasit, taşkömürü, esmer kömür, linyit ve turb sırasını takip eder. Doğadan elde edilen fosil kömürlerden ya doğrudan doğruya ya da kok veya briket şeklinde, işleme tabi tutularak, yakıt olarak yararlanılır.

Antrasit, yüksek kalorili bir kömürdür. Pahalı olduğu için ancak mahdut işlerde kullanılır. Taşkömürü, sanayide en çok kullanılan kömür cinsidir. Linyit ve esmer kömür ısıtma kuvveti bakımından diğerleri kadar zengin değildir. Çoğu zaman çıkarıldıkları yerde kullanılırlar [ 1 ].

### 1.2.1.1. Kömür

Kömür, gerek rezerv bakımından gerekse coğrafi bakımından dünyanın bilinen en geniş maden yataklarını oluşturan ve aynı zamanda yer altı kaynakları içinde de en fazla üretilen madendir. Kömür, enerji kaynaklarının en önemlilerinden birini oluşturur. Fosil kökenli olan bu yakıt, insanlığın gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır. Günümüzde diğer yakıtlar kömürün yerini kısmen alsa da, en fazla rezervi olan bir enerji maddesi olarak kömür, uzun yıllar boyunca insanlığın hizmetinde olacaktır.

Demir-çelik endüstrisinde kömüre dayalı teknolojinin kullanılması ve buhar makinesinin bulunması, 19. yüzyılda İngiltere'deki sanayi devriminin temelini oluşturulmuştur. Kömürden, enerji özelliğinin yanı sıra aydınlanma amacıyla da faydalanılması, 1824 yılında, İngiltere, Batı Avrupa ve Amerika'da gerçekleştirilmiştir. 19. yüzyılın ilk yarısına kadar artarak devam eden kömür üretimi, dünya enerji gereksiniminin % 94' ünü karşılarken, Türkiye'nin de içinde bulunduğu birçok ülkede, kullanımındaki rahatlık, kolaylık ve ucuzluk nedeniyle yerini petrole bırakmaya başlamıştır. Ancak, 1973 yılından sonra petrole yapılan sürekli zamlar sonrasında kömüre dönme fikri yeniden canlanmıştır.

Kömür teknolojisi, kömürün ocaktan çıkarılmasıyla başlamakta ve kimyasal madde üretiminin en son aşamasına kadar sürmektedir. Gelişen kömür teknolojisi sayesinde kömürü, basit yakıt olarak değil, naftalinden benzene kadar on bine yakın ürünün elde edilebileceği çok kıymetli ham madde olarak tanımlamak gereklidir. Petrolden elde edilen ürünleri, kömürden de elde etmek mümkündür.

1994 yılında, dünya görünür taş kömürü rezervleri, antrasit ve bitümlüler dahil olmak üzere, 519.73 milyar ton; linyit rezervleri ise, yarı bitümlüler dahil olmak üzere, 524.13 milyar ton olarak belirlenmiştir. Dünya kömür rezervlerinin, 1994 yılı üretimi göz önüne alındığında, diğer yakıt cinslerine göre daha uzun kullanılabilirliği görülmekte, genel olarak kömür rezervlerinin kullanılabilir sürelerinin 235 yıl olabileceği hesaplanmaktadır. Bu süre, petrol ve doğal gaz oranla 4-5 kat fazladır. 1994 yılında dünya



kömür üretimi; 3181 milyon tonu taş kömürü, 1270 milyon tonu linyit olmak üzere 4451 milyon ton olarak gerçekleştirilmiştir.

Dünya kömür üretiminin % 80' i, Avustralya, Çin, Almanya, Polonya, Rusya Federasyonu, Güney Afrika Cumhuriyeti ve ABD tarafından yapılmaktadır. Taş kömürü üreticisi ülkelerin başında, 1110 milyon ton üretim( % 34.9 ) ile Çin gelmektedir. Linyit üretiminde ise ilk sırada 330 milyon ton ile ABD bulunmaktadır.

Ülkemizde taşkömürüne olan gereksinme 18. yüzyılın sonlarına doğru başlamıştır. O tarihlerde, ülkemizdeki taş kömürünün varlığı bilinmediği için, gereksinimin ithalat yoluyla karşılanmasına çalışılmıştır.

Kömür; turba, linyit, taşkömürü ve antrasit gibi ara sınıflara ayrılmaktadır. Bu kömürler farklı kullanım alanlarına sahiptir. Kömür, tarih boyunca çeşitli dönemlerde cinslerine göre ısıtmada, yiyeceklerin pişirilmesinde, metallerin ergitilmesinde ve metallere şekil verilmesinde kullanılmıştır. Sanayi devrimi ile kömürün önemi daha da artmış ve kömür; buharlı makinelerin buhar ihtiyacının karşılanmasında, demir-çelik sanayisine yönelik olarak kok üretiminde, özellikle linyit kömürleri termik santrallerde enerji üretimde, çimento sanayisinde, ısınma sektöründe ve son dönemlerde de katı, sıvı ve gaz yakıt üretiminde ana ham madde olarak kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde daha çok bir enerji kaynağı olarak tüketilen kömür, gelişmiş ülkelerde, özellikle kimya sanayinde, boyadan ilaca, gübreden plastiğe kadar çok geniş bir alanda, önemli bir ham madde olarak yer almaktadır [ 4 ].

Kömürlerde elementel olarak karbon, hidrojen, oksijen, azot, fosfor, kükürt ve gereksiz maddeler olarak da su ve kül bulunur. Kömürün oluşma zamanı büyüdükçe bünyesindeki karbon miktarı artar, buna karşılık oksijen, azot ve hidrojen miktarları azalma gösterir. Bu husus, elementel bileşim üzerinden tanımlanmış kömürleşme indeksi

$$K = 1 - \frac{42h + 2,1o + 3n}{7c} \quad (3)$$

ile belirlenmektedir. Burada h, o, n, c kömürün bünyesindeki hidrojen,oksijen,azot ve karbonun kütle yüzdeleri cinsinden konsantrasyonlarıdır. Kömürleşme indeksi, bu formüle göre, odun için  $K \approx 0$  ve grafit için de  $K=1$  değerlerini almaktadır. Diğer katı yakıtlar için  $0 < K < 1$  geçerlidir. Bu tanım kömürün yaşı hakkında bilgi vericidir.

Taşkömürü az miktarda kükürt içerdiğinden tercih edilen yakıtlardan birisidir. Rengi siyah olup az veya çok parlaktır. Taşkömürleri kullanıldığı amaca göre beş grupta incelenir.

Alev kömürü: % 75-80 karbon ihtiva etmekle birlikte kok üretimi için elverişli değildir. Koku toz halindedir. Uzun alevle yanar. Bunlar % 40-55 arasında gaz ürün verdiklerinden şehir gazı üretiminde kullanılırlar.

Gaz alev kömürü: % 10-15 oranında oksijen ihtiva eder ve ısıl işleme tabi tutulduğunda % 35-45 oranında uçucu bileşenler verirler. Gaz alev kömürü ancak uygun kömürlerle karıştırılarak koklaştırmaya tabi tutulur.

Gaz kömürü: % 30-40 oranında gaz ürün verdiklerinden şehir gazı üretiminde en fazla kullanılan kömürdür. Ereğli kömürleri bu cinslerdir.

Yağlı kömürler: Çok parlak alevle yanarlar. Bunlar % 18-32 oranında gaz ürün verirler. Hem gaz hem de kok üretiminde kullanılırlar. Yanarken çok is verdiklerinden tesislerde kullanılmazlar.

Yağsız kömürler: Kısa alevde yanarlar. % 8-12 gibi düşük oranda gaz neşrederler. Koklaştırmada takriben % 90 oranında kok elde edilir. Ancak bu kok toz halindedir. Dolayısıyla yağsız kömürler kok ve gaz üretimi için pek elverişli değildirler. Bu gruba antrazitler dahildir [ 2 ].

### **1.2.1.2. Linyit**

Ülkemizde linyit madenciliğinin geçmişi oldukça eski tarihlere uzanmakla birlikte, bu alandaki asıl gelişmeler 1970' li yılların başlarından itibaren gerçekleştirilmiş ve linyit madenciliği, 1980' li yıllarda en dikkate değer gelişmenin başladığı madencilik alanı olmuştur. Bu dönemde, bir çok yeni linyit sahası üretime alınmış, oldukça kısa sayılabilecek sürede linyit, birincil enerji kaynakları içerisinde önemli bir yer kazanmıştır.

Bilindiği gibi linyit üretimi, kamu kesimi ve özel sektör tarafından yapılmaktadır. Isıl değeri düşük linyitler termik santrallerde değerlendirilirken, daha kaliteli olanları konutların ısıtılmasında ve çeşitli sanayi dallarında tüketilmektedir.

Ülkemiz elektrik enerjisi üretiminin % 60' ının termik santrallerden sağlandığı ve üretilen linyitin de yaklaşık % 70' inin santrallerde tüketildiği göz önüne alındığında, elektrik enerjisi sektöründe linyitin önemi açıkça görülmektedir. Özellikle 1980' li yıllarda,

ülkenin enerji açığının büyük ölçüde kapatılarak, bundan kaynaklanan sorunların aşılabilmesi bu önemli kaynağa ağırlık verilmesi ile sağlanmıştır.

Yerli kaynaklarımız içerisinde önemli bir yere sahip olan linyit yataklarına, ülkemizin hemen hemen bütün bölgelerinde rastlanmaktadır. En çok bilinen linyit yataklarımız; Afşin-Elbistan, Muğla, Soma, Tunçbilek, Seyitömer, Konya, Beybazarı, Adana, Tufanbeyli ve Sivas havzalarını oluşturmaktadır. Bu bölgeler içinde en büyük bölümü, 3400 milyon ton ile Elbistan linyitleri teşkil etmektedir. Linyitlerimizin büyük bir bölümünün ısı değeri düşük; nem, kül ve kükürt içeriği yüksektir ve ne yazık ki büyük bir çoğunluğu da çıkarıldığı gibi tüketime sunulmaktadır.

Genel olarak karasal iklimin egemen olduğu ülkemizde, nüfus artışına paralel olarak yakacak ihtiyacı da artmaktadır. Ülkemizdeki kömür rezervlerinin 1.3 milyar tonu taşkömürü, 8 milyar tonu linyit olmak üzere, toplam 9.3 milyar tondur. 1994 yılında 51.2 milyon ton olan linyit üretiminin 32 milyon tonu konut ısıtılmasında kullanılmıştır [ 4 ].

### 1.2.1.3. Odun

Bitkiler içinde çok yayılmış bir madde olup esas olarak selüloz ve lignin ihtiva eder. Diğer önemli kolay tutuşan bileşenler reçineler ve mumlardır. Odunun diğer önemli bileşeni su kolay tutuşmaz. Odun, selüloz ve kağıt sanayinin temel maddesini teşkil eder. Ayrıca kömürün ve ısıtma yağlarının bulunmadığı yerlerde yakıt olarak kullanılır.

Susuz ve külsüz odunun elementel bileşimi % 49-51 C, % 5,9-6,2 H, % 45-53 O dir. Yaş odunun su miktarı % 30-60 arasında değişmektedir. Ayrıca % 0,5 oranında kül ihtiva etmektedir. Organik bileşenlerin oranlarındaki değişimler; odunun kalorifik değerlerinde gözlenen değişimleri ifade ederler. Saf selülozun kalorifik değeri 4150 cal / g dir. Odun reçinesi ve odun mumunda bu değer 9450 cal / g' a yaklaşır. Çoğu odundaki reçinelerin ve mumların oranı küçüktür.

Doğadaki odunun oluşumu endotermik bir prosestir. Bu esnada yaklaşık olarak 555 cal / g lık bir ısı absorblanır. Bu ısı karbonizasyon ve yanma boyunca yaklaşık olarak 270 °C' da salıverilir.

Odunun ısı değeri, bünyesindeki nem oranı artıkça düşüş göstermektedir. Aynı neme sahip iki odun cinsinden lignini daha fazla olanın ısı değeri daha yüksektir. Çünkü ligninin ( %65 C ) ısı değeri  $H_a = 6100$  kcal / kg olup saf selüloza ( % 44 C,  $H_a = 4300$  kcal / kg ) oranla daha yüksektir. Reçinenin ısı değeri ise  $H_a = 8500-9000$  kcal / kg

olduğundan çam gibi iğne yapraklı ağaçların ısı değeri, lignin ve reçine az olan geniş yapraklı ağaçlara oranla daha yüksektir.

Odun bir yakıt olarak yakılabilir veya ilk önce odun kömürü veya gaz ürüne çevrilebilir. Odun yaygın olarak yarı tropikal veya tropikal ülkelerde kullanılır ki bu ülkelerde ormanlar bol olarak bulunur ve kömür de ucuz değildir. Odunun kolaylıkla tutuşması, büyük kısımlarının kolaylıkla yanmaması, aşırı havada uzun, dumansız bir alev üretmesi ve kolaylıkla yanan talaşlardan 0.3-0.7 ton / cm<sup>2</sup> basınçta tutkalsız briketler yapılması onun yanma karakteristiklerindedir [ 1 ].

### 1.2.2. Sıvı Yakıtlar

Yakılarak ısıtma kuvvetinden yararlandığımız sıvı maddelere “akaryakıt” adı verilir. Akaryakıtları doğal akaryakıtlar ve yapay akaryakıtlar olarak iki kısma ayırabiliriz. Doğal akaryakıtlar, ham petrolün destillenme ürünleridir. Yapay akaryakıtlar ise elde edildikleri kaynağa göre 3 gruba ayrılır. Bunlardan birincisi taşkömürü, linyit, odun ve bitüm ile asfaltın destillenmesinden elde edilen ürünler ikincisi ağır petrol fraksiyonlarının kralingi ile elde edilen ürünler üçüncüsü ise sentez ile yapılan sıvı yakıtlardır [ 1 ].

#### 1.2.2.1. Petrol

Petrol, çeşitli hidrokarbonların karışımıdır. Bütün petrolerin esas bileşenleri parafinler, naftenler ve aromatik hidrokarbonlardır. Ortalama bir petrolü % 30 parafinler, % 40 naftenler, % 25 aromatik hidrokarbonlar oluşturur. Geride kalan % 5' lik kısmı ise oksijen, azot ve kükürt bileşikleridir [ 2 ].

Doğal akaryakıt olan ham petrol bulunduğu memlekete göre değişen bileşimler gösterir. Mesela Amerika'da, bilhassa Pennsylvania bölgesinde çıkan petroler daha ziyade hidrokarbon sınıfından olan bileşikleri; Rus petroleri, fena kokulu naften sınıfına giren bileşikleri; Romanya petroleri ise bu ikisinin bir karışımını ihtiva ederler [ 1 ].

Petrolde bulunan elementlerin kütlece yüzde bileşim yaklaşık olarak % 82-85 C, % 10-15 H, % 1-30 N ve % 0,5-1.5 S dür. Kül içeriği % 0-0.10 dur. Ham petrolün çoğu için spesifik özgül ağırlık 0.85-0.95 arasındadır [ 3 ].

Çoğu uçucu fraksiyonlarla önemli yakıt bileşimleri elde edilir. Ham petrol, rafinerilerde destile edilerek bir kısım fraksiyonlara ayrıldıktan sonra kullanılır. Bu fraksiyonlar, bir fikir vermek üzere aşağıda kısaca özetlenmiştir [ 1,3 ].

70 °C ye kadar geçen fraksiyona 'petrol eteri' adı verilir. Bunun özgül ağırlığı 0.65 dir.

70-150 °C arasında geçen fraksiyonun özgül ağırlığı 0.65-0.75 arasında olup, aşağıdaki sınıflara ayrılabilir.

Benzin	Nafta :	80 - 100 °C
	Ligroin :	100 - 120 °C
Motor Benzini	Uçak Benzini :	90 - 115 °C
	Oto Benzini :	110 - 130 °C
	Ağır makine Benzini :	125 - 135 °C
White Spirit	Hafif :	130 - 180 °C
	Yarı Hafif :	140 - 195 °C
	Ağır :	140 - 250 °C

150 –180 °C arasındaki fraksiyona 'lamba petrolü' ya da 'kerosin' adı verilir. Bunun spesifik ağırlığı 0.79 – 0.82 arasındadır. 'Gaz yağı' adını verdiğimiz fraksiyonun özgül ağırlığı bundan daha yüksek olup 0.85 – 0.88 arasındadır.

280 °C ye kadar olan destilasyon ürününe 'mazut – fuel oil – astatkipakura' adları verilmektedir. Özgül ağırlığı 0.89 – 0.98 arasındadır.

280 – 320 °C fraksiyonuna dizel yağı adı verilir ve özgül ağırlığı 0.80 – 0.85 arasındadır.

320 – 360 °C arasındaki fraksiyon ise 'makine yağları' nı teşkil eder.

Yapay akaryakıtlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

**A . Taşkömürü katranından elde edilen akaryakıtlar :** Taşkömürü katranının özgül ağırlığı 1.1 – 1.2 arasında olup alevlenme noktası 40 – 100 °C arasında değişir. Kısmi destillenme yapılarak 170 °C ye kadar hafif yağlar, 230 °C ye kadar orta yağlar, 270 °C ye kadar ağır yağlar, 320 °C ye kadar antrasen yağları ve bakiyeden de zift elde edilir.

Hafif yağların en önemli kısmını benzen teşkil eder. Ticarete benzenin muhtelif fraksiyonları satılır. Bunlar arasında adi benzen, ksilen, toluen ve çözücü nafta bulunur. Katran yağı ve naftalin de yakıt olarak kullanılırlar.

Esmer kömürden elde edilen akaryakıtların en önemlilerini sabir yağı, parafin ve krezot teşkil eder.

B . Ağır petrol fraksiyonlarının krakingi ile elde edilen akaryakıtlar : Petrolün ihtiva ettiği ağır hidrokarbonlar, katalizörlü veya katalizörsüz olarak daha az karbonlu ufak moleküllere parçalanırlar.

C . Sentez yolu ile elde edilen sıvı yakıtlar : Petrolün git gide azalması, suni olarak sentetik yakıtların elde edilmesini gerektirmiştir. Bununla ilgili olarak geliştirilen yöntemler şunlardır :

- a. Taşkömürünün hidrojenlenmesi ile elde edilen akaryakıtlar.
- b. Bitkisel yağların krakingi ile elde edilen akaryakıtlar.
- c. Odundan elde edilen akaryakıtlar.
- d. Etilenden elde edilen akaryakıtlar.
- e. Asetilenden elde edilen akaryakıtlar.
- f. Su gazının kondenzasyonu ile elde edilen akaryakıtlar [ 1 ].

Petrol içinde bulunan hidrokarbonlar iki grupta toplanmaktadır. Bunlar; n-parafin serisi (  $C_nH_{2n+2}$  ) ve olefin serisini (  $C_nH_{2n}$  ) içeren açık zincirli veya alifatik hidrokarbonlar ve naften serisi (  $C_nH_{2n}$  ) ile aromatik seri veya benzen serisini (  $C_nH_{2n-6}$  ) içeren halkalı bileşiklerdir [ 3 ].

Petrol, özellikle motorlu ve tepkili ulaşım araçlarının gerekli yakıtını, makine yağlarının üretimini ve asfalt gereksinimini karşılamakta, bundan başka fuel - oil olarak ısıtmada kullanılmaktadır.

Ham petrolde metandan başlayıp asfalta kadar yüzlerce birbirinden farklı bileşikler bulunur. Bu bileşiklerin hepsinin özgül ağırlığı birden küçüktür. Kaynama sıcaklıkları ise  $-125$  °C ile  $600$  °C arasında değişir. Bu bileşiklerden istenilen özelliklerde yakıtların elde edilmesi için petrol tasfiye edilir [ 2 ].

#### 1.2.2.2. Benzin

Benzin, parafinlerin ( doymuş hidrokarbonlar,  $C_nH_{2n+2}$ ,  $5 \leq n \leq 12$  ), naftenlerin ( doymamış hidrokarbonlar,  $C_nH_{2n}$ ,  $5 \leq n \leq 12$  ) ve  $C_6H_6$ ,  $C_7H_8$ ,  $C_8H_{10}$ ,  $C_9H_{12}$ ,  $C_{10}H_{14}$ ,  $C_{11}H_{16}$ ,  $C_{12}H_{18}$  formülleri ile belirli aromatik hidrokarbonların karışımıdır. Motordaki benzinin buharlaşma sıcaklığı  $40 - 150$  °C arasındadır. Benzinde, vuruntu olayını kısmen



önlemek bakımından, hidrojeni az doymamış hidrokarbonların yani naftenlerin fazla bulunması tercih edilir.

Bir motorun silindirine püskürtülen benzin-hava karışımı, elektriksel kıvılcımla tutuşturulur. Yanma, kıvılcımın düştüğü yerde başlar ve diğer kısımlara doğru ilerler. Henüz yanmamış karışım ısınma nedeniyle sıkışır ve bu artık karışım patlar. Vuruntu denilen bu darbeler enerji kaybına ve yetersiz yanmaya, dolayısıyla yanmamış karbon teşekkülüne yol açarlar. Basıncın yüksek ve ani olması motorun elastik parçalarının yorulmasına, pistonun bir süre sonra çökmesine neden olur. Vuruntuyu önlemek için motor benzinine alkol, kurşun tetraetil gibi bileşikler katılır.

Benzinin mukavemeti oktan sayısı ile ölçülür. Bir benzin, hacimce % 70 izooktan ve % 30 normal heptan karışımı ile aynı vuruntu mukavemetini gösteriyorsa, bu benzinin oktan sayısı 70' dir. Motor benzinlerinde uygun olan oktan sayısı 85' dir ve bunu elde etmek için benzine litre başına 0.84 g. kurşuntetraetil katılır. Uçak benzininde oktan sayısı 100, süper benzinde ise 95' dir.

Dizel yağları için ölçü olarak setan sayısı kullanılır. Yakıtlar standart motorlarda yakılarak setan ve  $\alpha$  - metil naftalin karışımıyla karşılaştırılır. Dizel motorlarında kullanılan yağların setan sayısı takriben 70 olmalıdır. Dizel motorlarında hava 30 - 40 atmosfere kadar sıkıştırılır ve bu suretle ısıtılmış havaya akaryakıt püskürtülerek yanma temin edilir. Kullanılan akaryakıtın yani dizel yağının yanma yeteneğinin yüksek olması ( püskürtmeyle ateş alma arasındaki zamanın kısa olması ) gereklidir [ 2 ].

### 1.2.3. Gaz Yakıtlar

Akaryakıtlar gibi gaz yakıtların da katı yakıtlara göre birçok üstünlükleri vardır. Bunlar,

- Taşınmalarının kolay ve ucuz oluşu.
- Hava ile iyice karışabildiğinden, yanmada çok az hava fazlasına gerek göstermeleri.
- Yakılmalarının kolay ve cihazların basit oluşu.
- Yanma hızlarının yüksek oluşu nedeniyle ocakların az yer tutması.
- Kül, cüruf, gibi artık bırakmamaları.

Gaz yakıtlar doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal olanı yer gazıdır ( doğal gaz ). Hidrojen, asetilen, koklaştırmadan ve kömürün gazlaştırılmasından elde

edilen gazlar, ağır yağların kısmi oksidasyonundan ve kömürün hidrojenlenmesinden üretilen gazlar, naftanın kraklanmasından elde edilen gazlar ise yapay gaz yakıtlardır [ 2 ].

Doğal gaz, diğer gaz yakıtlarından çok farklıdır. Doğal gazın içeriği, genelde petrolünkine benzer olduğuna inanılmaktadır. Dünyada doğal gazın yaklaşık 2/5' i petrole aynı yataktan, geriye kalan 3/5' i ise petrole rastlanmayan yataklardan üretilmektedir [ 3 ].

Doğal gazın bileşiminde çoğunlukla metan bulunur. Bunun yanı sıra homolog parafinler, CO<sub>2</sub>, hidrojen-sülfür ( H<sub>2</sub>S ) ve azot ( N<sub>2</sub> ) gibi anorganik bileşikler de bulunur. Doğal gazın bileşimi çıktığı yere göre değişmektedir. Doğal gazdaki CH<sub>4</sub> oranı % 56.3 ile % 99.2 , C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> oranı % 0.7 ile % 20 , CO<sub>2</sub> oranı ise % 0 ile % 10.1 arasında değişmektedir [ 2 ].

Doğal gaz kolayca mavi alev şeklinde yanar. Doğal gaz, kapalı ortamda havayla % 5-15 oranında karıştığında, patlama ve yanma özelliği gösterir. Tek başına zehirleyici etkisi yoktur, ancak kapalı ortamda oksijen oranını azalttığı için boğulmaya yol açabilir. Doğal gaz endüstride ve konutlarda ısıtma için ve içten yanmalı motorların yanması için idealdir. Doğal gazın büyük bir kısmı elektrik enerjisi üretiminde kullanılan buharı elde etmek için kalorifer kazanlarında yakılır.

Doğal gazın üst ısı değeri, 1 atm ve 15 °C' deki ölçümlerde genellikle 37-41 MJ / m<sup>3</sup> dür. Gazın özgül ağırlığı bağıl olarak 0.60 ile 0.65 arasında değişmektedir [ 3 ].

Diğer bir gaz yakıt olarak hidrojen, suni akaryakıt üretiminde, roket yakıtı olarak, amonyak sentezinde ve yağların hidrojenlenmesinde kullanılan önemli bir gazdır. Saf hidrojen ancak elektroliz yoluyla elde edilir. Su buharının demir tarafından indirgenmesi, su gazının ekstraksiyonu, kok fırını gazlarının ekstraksiyonu gibi diğer yöntemler gaz karışımı vermektedir.

Bir diğer gaz yakıt olan şehir gazı-1, ısı değeri yüksek olan kok fırını gazının doğrudan doğruya kullanıldığı gibi koktan elde edilmiş su gazıyla karıştırılıp elde edilir.

Bileşimi takriben % 55 H<sub>2</sub>, % 27 CH<sub>4</sub>, % 6 CO, % 10N<sub>2</sub>, % 2 CO<sub>2</sub> olan kok fırını gazı, kömürün yüksek sıcaklık koklaştırılmasında özellikle indirekt ısıtmada elde edilir. Şehir gazı-2 ise kok fırını gazıyla koktan elde edilmiş jeneratör gazının karışımıdır.

Jeneratör gazı ( Havagazı ), kızgın kömür üzerine yalnız havanın üflenmesiyle elde edilen gaz karışımıdır. Saf karbonmonoksitten oluşan ideal bir jeneratör gazında % 35 CO ve % 65 N<sub>2</sub> bulunur. Bu ideal durumda teorik gazlaştırma verimi % 70 'dir. Bu demektir ki kömürün ısı değerinin % 70 'i bağıl ısı şeklinde jeneratör gazında bulunmakta, % 30 'u ise hissedilir ısı şeklinde gaz karışımıyla dışarı çıkmaktadır.



Su gazı, yüksek alev sıcaklığını gerektiren durumlarda ve amonyak, metanol, yapay benzin üretiminde sentez gazı olarak kullanılır. Kızgın kömür içerisinde su buharının geçirilmesiyle elde edilir.

Kuvvet gazı, su gazı ve jeneratör gazının karışımıdır. Bu gaz karışımını elde etmek için jeneratöre su buharı ve hava aynı zamanda gönderilir [ 2 ].

### 1.3. Termodinamik

Yoktan enerji üretmek ve ısıyı işe dönüştürmek için yapılan çalışmalar sonucu termodinamik bilim dalı ortaya çıkmıştır. Fiziksel ve kimyasal olaylardaki denge konumu termodinamik ile incelenir. Olaylar sırasındaki her türden enerji alışverişi ve olayların kendiliğinden olma eğilimi termodinamik ile belirlenir [ 8 ].

Tabiattaki en önemli olgulardan biri tüm değişme ve dönüşmelere eşlik eden enerjidir. Oluşan her türlü hareket ve kimyasal reaksiyon sırasında enerji absorpsiyonu, enerji yayılması ve bir enerji türünün bir başka enerji türüne dönüşmesi söz konusudur. Bir sistemdeki değişik enerji türleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi termodinamiğin konusunu meydana getirir.

Termodinamik bir fiziksel veya kimyasal dönüşüm sırasında sistemin iç enerji, entalpi ve serbest enerji değerlerini tayin eder ve bunların reaksiyon şartlarına bağlılığını inceler. Kimyasal reaksiyonlara eşlik eden termal olayların ve reaksiyona giren maddelerin termal özelliklerinin, özellikle entropi ve ısı kapasitelerinin incelenmesi reaksiyonların istemliliği hakkında genel bir kriter ortaya koymamıza ve denge hakkında bilgi edinmemize yardımcı olur. Termodinamik denge halindeki sistemlerle ilgilenir. Bir değişimin meydana gelip gelemeyeceği hakkında fikir ileri sürer. Fakat oluşum mekanizmasını ve hızını söyleyemez. Dönüşümün oluşma zamanıyla değil, bu dönüşüm esnasında sistemin ilk ve son halleri ile ilgilenir [ 9 ].

Termodinamik, deneylerimizden elde ettiğimiz bazı sonuçların genelleştirilmesi ile elde edilen dört temel yasa üzerine kurulmuştur. Bu yasaların iki tanesi doğrudan doğruya enerji ile ilgilidir. Termodinamiğin birinci yasası enerjinin bir bölgeden diğer bir bölgeye iletilmesi veya herhangi bir bölgede şekil değiştirmesi halinde toplamının sabit kaldığını ifade eder ve enerjinin korunması yasası adını alır. Termodinamiğin ikinci yasası ise belirli koşullar altında dengede bulunan bir sistemin sınırlayıcı etkenler ortadan kaldırıldığı zaman hangi yönlerde değişikliğe uğrayabileceğini saptar ve belirli enerji şekillerinin

insanlar için daha faydalı olan işe dönüştürülmesine bazı sınırlar getirir. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının belirli sistemlere uygulanması sonucunda bu sistemleri oluşturan maddelerin özelliklerini içeren denklemler elde edilir. Bu özelliklerden bazılarının değerlendirilebilmesi için de hal postulatı ile birlikte termodinamiğin sıfıncı ve üçüncü yasalarına gereksinim vardır. Diğer bir deyişle termodinamiğin sıfıncı ve üçüncü yasaları doğrudan doğruya enerji ile ilgili olmayıp cisimlerin fiziksel özellikleri ile ilgilidir.

Termodinamik yasaların doğruluğunu matematik olarak kanıtlamak veya uygun deneylerle kesin olarak göstermek olanaksızdır. Bununla beraber bu yasalara ve bunların sonuçlarına dayanılarak yapılmış olan bütün hesaplar deneylerimizle doğrulanmış ve bugüne kadar termodinamik yasalarına aygırı düşen bir olaya rastlanmamıştır.

Özet olarak söylemek gerekirse termodinamiğin konusunu enerji, enerjinin şekil değiştirmesi ve kullanılması ile fiziksel ve kimyasal etkilerin cisimlerin özellikleri üzerinde meydana getirdikleri değişikliklerin incelenmesi oluşturur.

Uygulamada sistemlerin denge konumlarının ve bir denge konumundan diğer bir denge konumuna verilmiş bir yol ile gidilmesi halinde çevre ile sistem arasındaki ısı ve iş alışverişinin bilinmesi yanında bu hal değişiminin ne kadar zamanda gerçekleşebileceğinin bilinmesi de büyük önem taşır. Termodinamik, hal değişim hızı hakkında bize hiçbir bilgi vermez. Örneğin; termodinamik yasaları kullanılarak verilmiş bir kimyasal reaksiyonun gerçekleşip gerçekleşmeyeceği ve gerçekleşmesi halinde elde edilebilecek maksimum ürün miktarı önceden söylenebilirse de birim zamanda elde edilebilecek ürün miktarı hakkında hiçbir şey söylenemez. Sistem hal değiştirirken çevresi ile momentum, ısı ve madde alışverişinde bulunur ve kimyasal reaksiyona uğrar. hal değişim zamanının hesaplanabilmesi için termodinamik dışında akışkanlar mekaniği, ısı transferi, kütle transferi ve kimyasal kinetik konularında bilgi sahibi olunması gerekir [ 10,11].

### **1.3.1. Termodinamiğin Sıfıncı Yasası (Termik Denge) :**

Bir sistemin çeperlerinin şeklinin değiştirilemediğini varsayalım ( Rijit sistem ). Böyle bir sistem atmosfer içerisinde kendi kendine bırakılırsa genel olarak özelliklerinin sabit kalmadığı ve sürekli olarak değiştiği görülür. Bu taktirde sistemle çevresi arasında termik etkileşim vardır denir. Değişme bir süre devam eder ve sonra durur. Bu sonuncu halde sistem, çevresi ile termik denge halindedir.

Sistemi içerisinde alan ve şeklini değiştirmeyen kap ince metal levhalardan yapılmışsa termik denge oldukça çabuk oluşur. Kabın çeperleri daha iletken bir malzemeden ve daha ince yapılırsa termik dengenin oluşması için geçen zaman azalır. Termik dengenin en kısa zamanda sağlandığı en ideal halde sistemin sınırları diatermal duvarlardan meydana gelmiştir denir. Buna karşılık sistemi çevreleyen duvarlar örneğin mantarla kaplanırsa sistemle çevresi arasında termik denge çok yavaş kurulur. Bu duvarları gittikçe artan kalınlıkta mantar levhalarla kaplamak suretiyle termik dengenin oluşması istenildiği kadar yavaşlatılabilir. En ideal halde ne kadar beklenirse beklenilsin sistemin özelliklerinde bir değişme gözlenemeyecektir. Bu taktirde sistemin sınırları adyabatik duvarlarda yapılmıştır denir. Sınırları adyabatik olan ve şeklini değiştirmeyen bir sistemin özellikleri manyetik ve elektrik etkiler dışında kalan herhangi bir dış etki ile değiştirilemez. Dolayısıyla adyabatik duvarlarla çevrilmiş bulunan ve rijit adyabatik bir duvar aracılığıyla temas haline getirilen iki sistemin özellikleri birbirinden bağımsız olarak değiştirilebilir. Buna karşılık böyle iki sistem birbirlerinden rijit diatermal bir duvar yardımıyla ayrılmışsa sistemlerden herhangi birinin özellikleri değiştirilirse diğerinin özellikleri de hemen değişmeye başlar ve bu durum iki sistem arasında yeniden denge kuruluncaya dek devam eder [ 11 ].

### 1.3.2. Termodinamiğin Birinci Yasası (Enerjinin Korunumu):

Yoktan enerji üretmek ya da var olan enerjiyi yok etmek için yapılan çalışmaların başarısızlıkla sonuçlanmasından birinci yasa ortaya çıkmıştır. İşin ısıya dönüşümü Benjamin Thomson ve James Prescott Joule tarafından nicel olarak incelenmiştir. Diğer enerji türlerinin tümüyle ısıya dönüştüğünü deneysel yoldan gösteren Joule, 1 cal' lik ısının 4.184 J değerindeki işe eşit olduğunu bulmuştur. Bu alandaki benzer çalışmalar da göz önüne alınarak evrendeki enerji sabittir şeklinde özetlenebilen termodinamiğin birinci yasası kabul edilmiştir. Bu yasaya göre enerji var iken yok, yok iken de var edilemez. Ancak bir halden diğer bir hale dönüştürülebilir. Enerjinin yaratılamayacağı ve yok edilemeyeceği düşünülerek tüm fiziksel ve kimyasal olaylar için enerji denklikleri yazılır.

Albert Einstein tarafından kuramsal yoldan bulunan enerji ile kütle arasındaki  $E = mc^2$  ilişkisi daha sonraları deneysel yoldan da doğrulanmıştır. Çok özel ve çok zor koşullarda olsa bile kütle ile enerjinin birbirine dönüşebileceğini ortaya koyan bu bağıntı uyarınca kütleyle enerjinin yoğunlaşmış şekli olarak bakılabilir. Buna göre, kütleinin

korunumu yasası da termodinamiğin birinci yasası kapsamı içerisinde düşünülebilir. Maddenin korunumu yasası uyarınca kütle ve mol denklıkları yazılır. Tüm sistem ve sistemdeki bileşenlerden her biri için yazılabilen bu denklıklar yardımıyla bilinmeyen madde miktarları bulunur. Kimyasal olaylarda molar miktarlar değişeceğinden dolayı stokiyometrik tepkime göz önüne alınarak madde ve enerji denklıkları yazılır. Bir sistem için yazılan madde ve enerji denklıklarının ortak çözümünden tüm stokiyometrik hesaplamalar yapılabilir [ 8 ].

Birinci yasanın en önemli sonuçlarından biri toplam enerji adı verilen enerjinin varlığının ortaya konması ve tanımının yapılmasıdır. Kapalı bir sistemin belirli iki hal arasındaki tüm adyabatik hal değişimleri için net işin aynı olması, net işin sadece ilk ve son hallere bağlı olduğunu, bu nedenle de sistemin bir özelliğindeki değişimle ilişkili olması gerektiğini göstermektedir. Bu özellik toplam enerjidir. Birinci yasanın, sistemin verilen bir haldeki toplam enerjisinin değeriyle ilgili olmadığını vurgulamak gerekir. Birinci yasa sadece, adyabatik bir hal değişimi sırasında, sistemin toplam enerji değişiminin net işe eşit olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle bir referans hali belirleyip, toplam enerjiye bu halde herhangi bir değer atanabilir.

Birinci yasanın özü toplam enerji adı verilen özelliğin ortaya konmasıdır. Bununla birlikte birinci yasa genellikle, enerjinin korunumu ilkesinin bir ifadesi olarak görülür. Birinci yasanın prensiplerine göre kapalı bir sistemde adyabatik hal değişimi sırasında yapılan iş, sistemin toplam enerji değişimine eşittir.

$$Q = 0 \text{ olması durumunda } -W = \Delta E \quad (4)$$

Eğer bir hal değişimi sırasında hem iş hem de ısı etkileşimi oluyorsa, sonuç her birinin katkısı toplanarak elde edilecektir. Kapalı sistem olarak tanımlanan, belirli sınırlar içinde bulunan sabit bir kütle için termodinamiğin birinci yasasına göre sistemden veya sisteme ısı veya iş olarak net enerji geçişi, sistemin toplam enerjisindeki net artış veya azalmaya eşittir.

$$Q - W = \Delta E \quad (5)$$

Q : Sistem sınırlarından net ısı geçişi (  $\sum Q_g - \sum Q_q$  )

$W$  : Değişik biçimleri kapsayan net iş (  $\sum W_g - \sum W_\varphi$  )

$\Delta \dot{E}$  : Sistemdeki toplam enerji değişimi (  $\dot{E}_2 - \dot{E}_1$  )

$g$  ve  $\varphi$  alt indisleri ise sistem sınırından giren ve çıkan ısıyı veya işi göstermektedir.

Sistemin toplam enerjisi üç parçadan oluşmaktadır: İç enerji,  $U$ ; kinetik enerji,  $K\dot{E}$  ve potansiyel enerji,  $P\dot{E}$ . Bu nedenle bir hal değişimi sırasında sistemin toplam enerjisinin değişimi; iç enerji, kinetik enerji ve potansiyel enerjisindeki değişimlerin toplamı olarak ifade edilebilir.

$$\Delta \dot{E} = \Delta U + \Delta K\dot{E} + \Delta P\dot{E} \quad (6)$$

(5) eşitliğiyle birleştirildiğinde,

$$Q - W = \Delta U + \Delta K\dot{E} + \Delta P\dot{E} \quad (7)$$

Uygulamada karşılaşılan sistemlerin çoğu hareketsizdir. Bu nedenle hızlarında veya kütle merkezlerinin bulunduğu noktada hal değişimi sırasında bir değişiklik olmaz. Böylece, hareketsiz kapalı sistemlerin kinetik ve potansiyel enerjilerindeki değişimler göz ardı edilebilir(  $\Delta K\dot{E} = \Delta P\dot{E} = 0$  ). Birinci yasa sadeleştirilerek [ 12 ],

$$Q - W = \Delta U \quad (8)$$

**Enerji** : Bir sistemin iş yapabilme kapasitesine enerji adı verilir. Buna göre, iş tapan bir sistemin enerjisi azalırken iş alan bir sistemin enerjisi artar. Benzer şekilde ısı salan bir sistemin enerjisi azalırken ısı alan bir sistemin enerjisi artar. Sistem ile ortam arasındaki sıcaklık farkından doğan enerji akışına ısı, basınç farkından doğan enerji akışına ise iş adı verilir. Tüm enerji türlerinin ana kaynağı güneştir. En çok kullandığımız enerji türlerini ısı, elektrik enerjisi ve mekanik enerji şeklinde sıralayabiliriz.

Kömür ve petrol türevleri yakılarak konutların ve endüstrinin gereksinimi olan ısı sağlanmaktadır. Bu fosil yakıtların yakılması sırasında kimyasal enerji tümüyle ısıya dönüşmektedir. Işıma ile ısı salan güneş en büyük ısı kaynağımızdır.

Elektrik enerjisi termoelektrik, nükleer ve hidroelektrik enerji santrallerinde üretilmektedir. Kimyasal enerji yanma ile ısıya, bir kazandaki su buharının sıcaklık ve basıncını yükselten bu ısının bir kısmı mekanik enerjiye ve türbinden geçirilen buharın mekanik enerjisi de elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Termoelektrik santrallerde uygulanan bu işlem ısının nükleer yakıtlardan sağlandığı nükleer santrallerde de aynıdır. Hidroelektrik santrallerde ise suyun potansiyel enerjisi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Elektrik enerjisi aydınlanma yanında çeşitli aygıtlar yardımıyla ısı ve mekanik enerjiye dönüştürülmektedir.

Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine doğrudan ve çok büyük bir verimle çeviren düzeneklere pil adı verilmektedir. Son yıllarda küçük enerjiler üretebilen bu pillere benzer şekilde büyük enerji üretebilen yakıtlı hücreler geliştirilmiştir [ 8 ].

### **1.3.3. Termodinamiğin İkinci Kanunu :**

Termodinamiğin birinci kanunu izah edilirken çeşitli olaylar esnasında enerjinin bir şeklinin diğer enerji şekillerine dönüşebileceği, işlem sonunda toplam enerjinin değişmeyeceği ifade edildi. Ancak bu değişimin yönünün ne olacağı hakkında bir yorum yapılmadı. Genel olarak ifade etmek gerekirse, gerçek bir dönüşümde, değişimin yönü doğal kabul edilen dönüşüm yönüdür. Söz konusu dönüşümün tersi ise doğal kabul edilmeyen yöndür. Bunu tabiatta pek çok olayda görmek mümkündür. Nehirlerin yukarıdan aşağıya doğru kendiliğinden akması doğal olan akma yönüdür. Bunun tersi yani nehrin deniz seviyesinden yukarılara doğru akması ise doğal olmayan yöndür. Nehrin bu yönde akması söz konusu olamaz. Bu şekilde değişmelerin doğal yönde meydana gelmesi, doğal olmayan yönde meydana gelmemesi olayına canlı hayatından da pek çok örnek verilebilir. Bir bitkinin tohumdan yeşermesi, büyümesi, çiçek açması ve nihayet kuruması doğal olan bir değişme yönüdür. Kuru bir bitkinin ters yönden tekrar tohum haline gelmesi mümkün olmayan bir dönüş yoludur.

Bu ve benzeri olaylar hangi yönde düşünülürse düşünülün, sonuçta toplam enerjide herhangi bir değişme olmaz, yani termodinamiğin birinci kanununa uyulur. Burada verilen örneklerde değişimin hangi yönde istemli olduğunu tahmin etmek zor değildir. Bunlarda olayın oluş yönü tecrübe ile bellidir, doğal olmayan yönde değişimin olması beklenemez, hiçbir zaman da gözlenmemiştir. Ancak bazı olaylarda, özellikle kimyasal değişmelerde değişimin hangi yönde istemli olduğunu tahmin etmek güçtür. Bir



sistem doğal bir değişmeye uğradığı zaman değişmenin olduğu yönde, doğal olmayan değişme durumunda da bunun aksi yönünde değişen bir ya da daha fazla özelliğin bulunması, değişmenin meydana geldiği yönün tespiti bakımından son derece faydalı olacaktır. Sistemin entropi adı verilen böyle bir özelliği vardır [ 9 ].

Isıyı işe dönüştürmek için yapılan çalışmaların sonucu olarak termodinamiğin ikinci yasası ortaya konulmuştur. Bu yasa, hal değişimlerinin hangi yönde gerçekleşebileceklerini belirler ve enerjinin niceliği yanında niteliği de olduğunu vurgular. Kendiliğinden olma ya da olmama eğilimleri bu yasaya göre açıklanmaktadır. Enerjinin niteliğini korumak mühendisleri başlıca tasarılarından biridir. İkinci yasa enerjinin niteliğini ve bir hal değişimi sırasında bu niteliğin nasıl azaldığını hesaplamak için somut yöntemler ortaya koyar. Termodinamiğin ikinci yasası, ayrıca, ısı makineleri (motorlar) ve soğutma makineleri gibi temel mühendislik sistemlerinin verimlerinin üst ve kuramsal sınırını ve kimyasal reaksiyonların hangi oranda tamamlanacaklarını belirler [ 8,10 ].

Isının bir kısmının işe dönüştürülmesi için yapılan çalışmalar sonunda ortaya konulan termodinamiğin ikinci yasası için birbirleri ile eş anlamlı olan aşağıdaki tanımlar verilebilir:

- Sıcaklığı her tarafında aynı olan bir ısı deposundan ısı alarak dışarıya iş vermek üzere sürekli olarak çalışan bir makine yapılamaz. Böyle bir makinenin yapılabilmesi için farklı sıcaklıkta ikinci bir ısı deposuna ihtiyaç vardır. Bu tanım olanaksız makine ve Carnot makinesi göz önüne alınarak yapılmıştır. Carnot makinesi Sadi Carnot tarafından önerilen, sıcaklıkları birbirinden farklı olan iki ısı deposu kullanılarak dışarıya iş vermek üzere sürekli olarak çalışan ( tersinir olarak ) bir makinedir.
- Carnot makinesinin verimine dayanılarak yapılan tanıma göre ise, makineden alınan işin mutlak değerinin makineye gelen ısının mutlak değeriyle oranlanması ile  $\eta = |w| / |q_2|$  şeklinde tanımlanan verim daima birden küçüktür. Bu tanım ısının tümünün işe dönüştürülemeyeceğini söylemektedir.
- Max Planck tarafından yapılan tanıma göre, sıcak depodan alınan ısının bir çevrin ile işe dönüştürülmesi aynı zamanda sıcak depodan soğuk depoya ısı aktarımı olmadan olanaksızdır.

- Emmanuel Clausius tarafından yapılan tanıma göre, soğuk bir depodan sıcak bir depoya ısı aktarımı aynı zamanda belirli miktardaki işi ısıya dönüştürmeden olanaksızdır [ 8 ].

Eğer bir hal değişimi gerçekleştikten sonra hem sistem hem de çevre ilk hallerine döndürülebilirlerse, hal değişimi tersinirdir. Tüm diğer hal değişimleri tersinmezdir. Sürtünme, sanki dengeli olmayan genişleme veya sıkıştırma ve sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi hal değişimlerinin tersinmez olmasına yol açar ve tersinmezlik diye adlandırılır.

Carnot çevrimi, ikisi sabit sıcaklıkta, ikisi adyabatik dört tersinir hal değişiminden oluşan tersinir bir çevrimdir. Carnot ilkeleri, aynı ısıl enerji depoları arasında çalışan tersinir ısı makinelerinin verimlerinin eşit olduğunu ve aynı ısıl enerji depoları arasında çalışan ısı makinelerinden en yüksek verime tersinir makinenin sahip olduğunu belirtir. Bu ilke, termodinamik sıcaklık ölçeğinin veya diğer adıyla Kelvin ölçeğinin temelini oluşturur [ 10,12 ].

**Entropi :** Verilmiş bir sistem için birbirlerinden farklı iki tersinir adyabatik süreç düşünelim ve bunların ortak bir halden geçtiklerini varsayalım. Bu varsayım doğru ise bir tek ısı kaynağından ısı çekerek bunu tamamen işe çeviren tersinir bir makine tasarlamak olanağı doğar. Bu ise termodinamiğin ikinci yasasına aykırıdır. O halde iki tersinir adyabatik sürecin ortak bir hallerinin bulunması söz konusu değildir. Dolayısıyla bir sistemin tersinir adyabatik süreçlerini gösteren eğriler hiçbir zaman birbirlerini kesemezler. Aynı şey sabit sıcaklık, sabit hacim, sabit basınç eğrileri gibi herhangi bir özelliğin sabit tutulması sonucunda elde edilen eğriler için de söz konusudur. O halde tersinir adyabatik bir süreci gösteren bir eğri boyunca maddenin özelliklerinden bir tanesi sabit kalmaktadır. Seçilen herhangi bir nokta için bu özelliğe bir değer verilirse bu noktadan geçen tersinir adyabatik eğri boyunca bu değer sabit kalır ve bütün diğer tersinir adyabatik eğriler boyunca söz konusu özelliğin değerleri belirlenmiş olur [ 11 ].

Maddenin tersinir adyabatik bir eğri boyunca sabit kalan özelliğine entropi adı verilir. Enerjinin tersine, entropi miktarı korunan bir özellik değildir. Bir işlem esnasındaki entropi değişmesi, işlemin tersinir olarak yapılmasındaki ısı alışverişinin mutlak sıcaklığa oranı olarak ifade edilir [ 10,11 ].

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q_{ter}}{T} \quad (9)$$



### 1.3.4. Termodinamiğin Üçüncü Kanunu :

Maddelerin çok düşük sıcaklıklardaki davranışlarını deneysel olarak araştıran Hermann Nernst, ısı teoremi denilen ve entropinin mutlak değerinin belirleyen termodinamiğin üçüncü yasasını ortaya koymuştur. Termodinamiğin üçüncü yasasına göre, element ya da her türden bileşiğin saf ve hatasız kristallerinin mutlak sıfırdaki mutlak entropileri sıfırdır. Mutlak sıfırdaki değeri sıfır olan entropinin herhangi bir sıcaklıktaki mutlak değeri mutlak sıfır ile bu sıcaklık arasındaki entropi artışına eşittir. Mutlak sıfır ile herhangi bir sıcaklık arasındaki tersinir yollar izlenerek termodinamiğin ikinci yasasına göre hesaplanan entropi artışlarının toplamı mutlak entropiyi vermektedir [ 8 ].

Termodinamiğin üçüncü kanunu diğer kanunlardaki genellemelerden yoksundur. Çünkü sadece saf ve kristal halindeki belli bir sınıf maddeye uygulanır, diğerlerine uygulanmaz. Bu sınırlamaya rağmen üçüncü kanun son derece faydalıdır [ 9 ].

### 1.3.5. Kimyasal Termodinamik

Saf olarak elde edilebilen ve belli bir kimyasal formülü bulunan maddelere bileşen denir. Kapalı bir sistemde yürüyen fiziksel olaylar sırasında değişmeyen bileşen sayısı kimyasal olaylar sırasında değişir. Bir başka deyişle, maddelerin sayısı ve kimyasal formülleri fiziksel olaylar sırasında aynı kalırken kimyasal olaylar sırasında değişir. Bileşenlerin molar miktarları fiziksel olaylar sırasında aynı kaldığı halde kimyasal olaylar sırasında değişir. Fiziksel olaylarda aynı kalan toplam molar miktar çoğu kimyasal olaylarda değişir. Diğer taraftan, kapalı sistemlerde yürütülen fiziksel ve kimyasal olayların tümünde maddenin sakımı yasası uyarınca toplam kütle sabit kalacağı açıktır. Kimyasal olaylar için sabit oranlar yasası ve katlı oranlar yasası geçerlidir.

Toplam kütle sabit kalırken bileşenlerin niteliğini ve niceliğini değiştiren kimyasal olaylara kısaca kimyasal tepkime adı verilir. Kimyasal tepkimelerin sabit oranlar yasasına uyularak bileşenlerin kimyasal formülleri ile gösterilmesine kimyasal denklem denir. Tüm stokiyometrik hesaplamalar bu denklemler göz önüne tutularak yapılır. Stokiyometrik denklemler genellikle tepkimeye giren veya çıkan bileşenlerden herhangi birinin katsayısı bir ( 1 ) olacak şekilde yazılır.

Termodinamiğin temel yasalarının kimyasal olaylara uygulanmasından ortaya çıkan bilim dalına kimyasal termodinamik adı verilir. Fiziksel olaylarda olduğu gibi kimyasal

olaylar sırasında da hal değişkenlerindeki değişmeler ölçülerek hal fonksiyonlarındaki değişmelere geçilir. Kimyasal tepkimeler sırasındaki hacim değişimi, iç enerji değişimi, entalpi değişimi, entropi değişimi, serbest iç enerji değişimi, serbest entalpi değişimi, tepkime oranı ve denge sabiti gibi niceliklerin bulunması yanında bu niceliklerin sıcaklık ve basınca bağlılıkları belirlenerek kimyasal olaylar termodinamik olarak incelenir. İç enerji ve entalpi değişimleri yanında ısı ve iş alışverişleri de belirlenerek kimyasal tepkimelerin yalnızca termodinamiğin birinci yasası uyarınca incelenmesine termokimya adı verilir. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları birlikte uygulanarak tasarlanan tepkimelerin sıcaklık ve basınçta kendiliğinden olup olmayacağı belirlenir. Bu yasalara göre denge konumunun incelenmesi kimyasal denge başlığı altında yapılır.

Kimyasal termodinamik, başlangıçtan denge konumuna gelene dek geçen süre içinde olan olaylar hakkında bir bilgi vermez. Bu süre içinde olan olaylar yani tepkime mekanizması, tepkime hızı ve bu hızın değiştirilmesi kimyasal kinetik adı altında incelenir [ 8 ].

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Ekserji Analizi**

#### **2.1.1. Ön Bilgiler**

Fuel oil, doğal gaz ve kömür gibi enerji kaynaklarını etkili bir şekilde kullanan ve yüksek verimle ısı üreten enerji sistemlerinin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Etkili kullanma termodinamiğin hem birinci ve hem de ikinci kanunu ile belirlenir. Yakıt, elektrik ve bunlar gibi madde akışıyla bir ısıl sisteme giren enerji, elde edilen ürünler ve yan ürünlerle değerlendirilir. Termodinamiğin birinci kanununa göre enerji yok edilemez. Bir şeyin yok edilebileceği görüşü ısıl sistemlerin tasarımı ve analizi için kullanışlıdır. Bu düşünce enerjiye uygulanamaz. Fakat ikinci kanundan dolayı ekserjiye uygulanır. Ekserji, enerjiden farklıdır. Ekserji kaliteyi daha iyi ölçer. Örneğin, termik santral de su soğutularak bir kJ'lük enerjiye karşılık 1 kJ değerinde elektrik üretilir. Elektriğin daha büyük kalite ve ekonomik değere sahip olduğu açıktır.

Ekserji analiz metodu enerji kaynaklarının daha etkili bir şekilde kullanım hedefi için uygundur. Ekserji analizi; yer, durum ve belirtilen enerji kayıp ve atığının gerçek miktarını daha iyi belirlediğinden enerji analizine göre daha faydalıdır. Bu bilgi yeni enerji-etkili sistemlerin tasarımında ve mevcut sistemin veriminin artmasında kullanılabilir. Ekserji analizi birinci kanun yaklaşımından enerjinin korunumu ile ilgili kavramların daha iyi anlaşılmasını sağlar [ 13-20 ].

#### **2.1.2. Ekserji Tanımı**

İki farklı sistem bir araya getirildiğinde hem verim artar ve hem de kullanışlı bir iş oluşur. İki sistemden birisi ideal olarak çevre ve diğeri de ilgilendiğimiz sistem olduğundan ekserji teorik olarak kullanılabilen maksimum iştir. Böyle bir sistemde sadece çevre ile ısı transferi oluşur. Alternatif olarak ifade edecek olursak ekserji; çevrede bulunan maddelerden iş oluşturmak ve işi belirli bir hale getirmek için gerekli teorik olarak kullanılabilen minimum iştir.

Ekserji, sistemin halinin çevrenin halinden sapmasının bir ölçüsüdür. Bu durum sistem ve çevrenin birlikte olan bir özelliğidir. Çevre belirlendiğinde; sadece sistem için özel değerlerin terimlerinde ekserji için bir değer tayin edilebilir. Bu yüzden ekserji; sistemin yaygın bir özelliği ile ilgili olabilir.

Ekserji yok edilebilir ve genellikle korunmaz. Eğer bir sistem elde edilen iş için koşulsuz olarak kendiliğinden çevre ile dengeye getirilmiş ise ekserji tamamen yok edileceği zaman limit bir durum oluşur. Kendiliğinden olan proseslerde, başlangıçta meydana gelen işi geliştirme kabiliyeti tamamen boşa harcanacaktır. Üstelik hiçbir iş böyle bir kendiliğinden değişmeyi etkilemeye ihtiyaç duymadığı için ekserji değerinin en az sıfır, yani negatif olamayacağı sonucuna varılabilir [ 13,14 ].

### 2.1.3. Sistem ve Çevresi

Termodinamikte herhangi bir olayı incelediğimiz zaman dikkatimizi olayın meydana geldiği belirli bir bölge üzerinde toplar ve olaya doğrudan doğruya ilgili bulunan bir cisimler topluluğunu tasarladığımız bir yüzey yardımı ile bütün cisimlerden ayırarak göz önüne alınır. Açıkça belirtilen bir yüzey yardımı ile sınırlanarak göz önüne alınan bu bölgeye sistem adı verilir. Sistemi çevreleyen yüzey ise sistemin sınırını oluşturur. Sistemin sınırı verilmiş sabit bir yüzeyden ibaret olacağı gibi zamanla şekil değiştiren bir yüzeyden meydana gelebilir. Sistemin dışında kalan bütün diğer cisimlere sistemin çevresi adı verilir. Sistemle çevresi aralarında oluşabilecek kütle ve enerji alışverişleri üzerinde sadece sistemin sınırına çok yakın bulunan bazı cisimlerin etkisi vardır. Bundan dolayı çevre olarak yalnız bunları göz önünde bulundurmak yeterlidir.

Bu tezde çevre, büyük boyutlarda ve uniform sıcaklık  $T_0$  ve basınç  $p_0$  da basit bir sıkıştırılabilir sistem olarak dikkate alınmaktadır. Sonraki analizler için gerekli  $p_0$  ve  $T_0$  için değerler tipik çevresel durumlardaki gibi  $T_0$  için  $25\text{ }^\circ\text{C}$  ,  $p_0$  için 1 atm alınır. Bununla birlikte pratikteki uygulamalar için  $T_0$  sıcaklığı ve  $p_0$  basıncı farklı şekilde belirlenebilir.  $T_0$  ve  $p_0$ ; işlemlerin düşünüldüğü sistemdeki yer için sırasıyla ortalama çevre sıcaklığı ve basıncı olarak alınabilirler. Örneğin; eğer sistem atmosferik havayı kullanırsa  $T_0$ ; ortalama hava sıcaklığı olarak belirlenmiş olur. Eğer doğal çevreden hem hava hem de suyu kullanırsa  $T_0$ ; hava ve su için ortalama sıcaklıklardan daha düşük olarak belirlenmiş olacaktır [ 14 ].

#### 2.1.4. Ölü Hal ve Sınırlı Ölü Hal

Bir sistemin basıncı, sıcaklığı, bileşimi, sistemdeki işlemin oluşum hızı ve sistemin boyutu çevresinden farklı ise, aralarındaki etkileşimden dolayı meydana gelen işin artırılması mümkündür. Sistem, çevresinin bulunduğu hale doğru bir değişim gösterirken sistem ve belirlenmiş referans çevre aralarındaki etkileşimle kombine olarak dengeye ulaştıklarında iş yapabilme imkanları önce azalır, sonra da tamamen ortadan kalkar. İşte sistemin bu denge haline, ölü hal denir [ 14,15 ].

Ölü halde iken çevre ile sistem arasında mekaniksel, ısı ve kimyasal denge şartları oluşmuş durumdadır. Ayrıca, bu halde sistemde ve çevrede yer alan maddelerin sıcaklık, basınç ve kimyasal potansiyelleri de eşit olmak zorundadır. Bu şartlar altında, sistem veya çevre içerisindeki kendiliğinden ne bir değişimin meydana gelme ihtimalinden ne de aralarında bir işin yapılmasıyla ortaya çıkan bir etkileşimden söz edilemez.

Ölü hal; işlemde kullanılan referans hal gibi işlev gördüğünden ve de ekserji analizini etkilediğinden dolayı termodinamiğin ikinci kanun analizinde önemli bir yer tutar.

Sistem ile çevresi arasındaki bir başka denge türü sınırlı ölü haldir. Bu tür denge ise sadece ısı ve mekaniksel şartların olduğu bir denge durumudur. Sistemin bu haline sınırlı ölü hal denir. Sınırlı ölü halde çevrenin  $T_0$  sıcaklığı ve  $p_0$  basıncıda sistemle çevre arasında bir kütle akışının olmadığı ve madde miktarının sabit kaldığı düşünülebilir [ 15 ].

#### 2.1.5. Ekserji Bileşenleri

Nükleer, manyetik, elektriksel ve yüzey gerilim etkilerinin olmadığı bir  $E$  sisteminin toplam ekserjisi dört bileşenden oluşmuştur: Fiziksel ekserji  $E^{PH}$ , kinetik ekserji  $E^{KN}$ , potansiyel ekserji  $E^{PT}$  ve kimyasal ekserji  $E^{CH}$  [ 13 ].

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \quad (10)$$

Siyahla yazılanlar (41), (42), (43), (44) eşitliklerindeki gibi madde akışları ile ilişkili transferleri içeren bir sistemin toplam ekserjisini ve fiziksel ekserjisini diğer ekserji türlerinden ayırırlar. Ayrıca kinetik, potansiyel ve fiziksel ekserjilerin toplamı literatürde termokimyasal ekserji olarak bilinmektedir.

Her ne kadar ekserji kapsamlı bir özellik ise de, çoğu zaman onunla mol veya kütle biriminde çalışmak daha uygundur. Kütle birimine göre toplam spesifik ekserji,  $e$ , aşağıdaki gibi verilir.

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (11)$$

Çevre dikkate alınarak bir sistemin potansiyel ve kinetik enerjileri hesaplandığında, sistemin çevresi ile ilişkisi olmadan da bu enerjiler tamamen işe çevrilebilirler. Bu yüzden kinetik ve potansiyel enerjiler aşağıdaki gibi ifade edilirler:

$$e^{KN} = \frac{1}{2} V^2 \quad (12)$$

$$e^{PT} = gz \quad (13)$$

Burada  $V$  ve  $z$ ; sırasıyla çevredeki koordinatlarla ilişkili hız ve yüksekliği gösterir. böylece aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$e = e^{PH} + \frac{1}{2} V^2 + gz + e^{CH} \quad (14)$$

Çevre ile ilişkili olmayan bir sistem düşündüğümüzde ( $e^{KN} = e^{PT} = 0$ ), fiziksel ekserji; sıcaklığı,  $T$ , basıncı,  $p$ , olan başlangıç halinden sıcaklığı,  $T_0$ , basıncı,  $p_0$  olan kısıtlanmış ölü hale sistem geçerken elde edilen maksimum teorik kullanışlı iştir. Kimyasal ekserji, sistemin kısıtlanmış ölü halden onun tamamen çevre ile dengede olduğu ölü hale geçerken elde edilen maksimum teorik kullanışlı iştir [ 13-17 ].

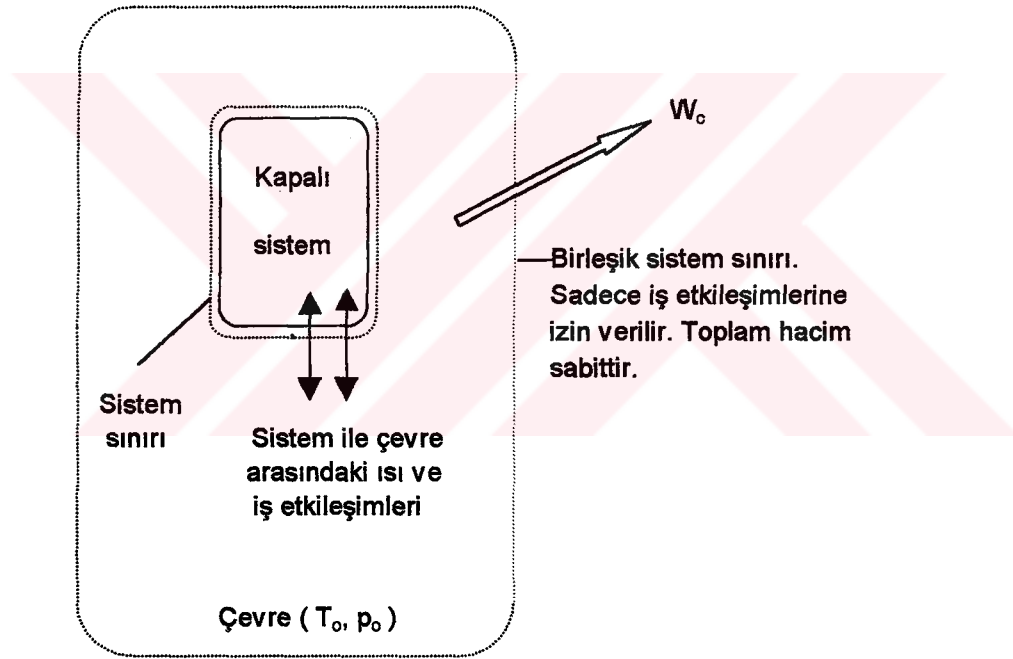
### 2.1.6. Fiziksel Ekserji

Belirli bir haldeki kapalı bir sistemin fiziksel ekserjisi aşağıdaki formülle verilir:

$$E^{PH} = (U - U_0) + p_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0) \quad (15)$$

Burada  $U$ ,  $V$  ve  $S$  sırasıyla belirli haldeki sistemin;  $U_0$ ,  $V_0$ ,  $S_0$  ise kısıtlanmış ölü haldeki sistemin iç enerjisini, hacmini ve entropisini gösterirler.

Kapalı bir sistem ile çevresini içeren Şekil 1’ de gösterilen birleşmiş sisteme enerji ve entropi dengelerinin uygulanmasıyla fiziksel ekserji için (15) eşitliği türetilebilir. Sistemin çevre ile ilişkisi yoktur. Birleşmiş sistem tarafından geliştirilmiş maksimum işi hesaplamak amaç olduğunda birleşmiş sistemin sınırı sadece ona karşı yapılan iş ile enerji transferine izin verir. Bu durum gelişmiş işin kapalı sisteme veya kapalı sistemden ısı transferiyle etkilenmemesi sağlandığında olur. Sistem ve çevrenin hacimleri değişebildiği halde birleşmiş sistemin sınırı, toplam hacim sabit kalacak şekilde kurulur. Bu durum, geliştirilen işin kullanışlı olmasını sağlar [ 13 ].



Şekil 1. Kapalı sistem ve çevreden oluşan bileşik sistem

Birleşik sistem için enerji dengesi

$$\Delta U_c = Q_c - W_c \quad (16)$$

$$W_c = -\Delta U_c \quad (17)$$



Burada  $W_c$  , birleşik sistem tarafından yapılan iş ve  $\Delta U_c$  da sistemin iç enerji değişimidir; yani kapalı sistem ve çevresinin iç enerji değişimlerinin toplamıdır. Başlangıç olarak kapalı sistemin iç enerjisi  $U$  ile belirtilir. Kısıtlanmış ölü halde sistemin iç enerjisi  $U_o$  ile gösterilir. Buna bağlı olarak  $\Delta U_c$  , aşağıdaki gibi ifade edilebilir [ 13 ].

$$\Delta U_c = (U_o - U) + \Delta U^e \quad (18)$$

Burada  $\Delta U^e$  , çevrenin iç enerji değişimini gösterir.  $T_o$  ,  $p_o$  ve çevrenin bileşimi sabit kaldığında  $\Delta U^e$  , çevrenin entropisi  $S^e$  ve hacmi  $V^e$  deki değişimlerle ilgilidir.

$$\Delta U^e = T_o \Delta S^e - p_o \Delta V^e \quad (19)$$

Son üç eşitliğin birleştirilmesiyle

$$W_c = (U - U_o) - (T_o \Delta S^e - p_o \Delta V^e) \quad (20)$$

Birleşmiş sistemin toplam hacmi sabit olduğunda çevrenin hacmindeki değişme kapalı sistemin hacmine zıt yönde eşittir:  $\Delta V^e = - (V_o - V)$  . Daha sonra iş için ifade aşağıdaki şeklini alır.

$$W_c = (U - U_o) + p_o (V - V_o) - T_o \Delta S^e \quad (21)$$

Bu eşitlik sadece çevre ile etkileşme oluyorken kapalı sistemden kısıtlanmış ölü hale geçişte birleşmiş sistem tarafından geliştirilmiş işi verir. İş için maksimum teoriksel değer aşağıdaki gibi kullanılan entropi dengesiyle ifade edilir. Onun sınırına karşı ısı transferi olmadığı için birleşik sistem için entropi dengesi aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta S_c = S_{gen} \quad (22)$$

Burada  $S_{gen}$  , kapalı sistem çevre ile dengeye geliyorken birleşmiş sistem içerisindeki entropi üretimini gösterir. Birleşik sistemin entropi değişimi ,  $\Delta S_c$  , sırasıyla kapalı sistem ve çevre için entropi değişimlerinin toplamıdır.



$$\Delta S_c = (S_o - S) + \Delta S^e \quad (23)$$

Burada  $S$  ve  $S_o$ ; sırasıyla verilen halde ve kısıtlanmış ölü halde kapalı sistemin entropisini gösterirler. Son iki eşitlik birleştirildiğinde,  $\Delta S^e$  için çözüldüğünde ve  $W_c$  için sonuçlar ifadeye sokulduğunda aşağıdaki eşitlik oluşur.

$$W_c = (U - U_o) + p_o (V - V_o) - T_o (S - S_o) - T_o S_{gen} \quad (24)$$

$(U - U_o) + p_o (V - V_o) - T_o (S - S_o)$  teriminin değeri, kapalı sistemin iki hali ( başlangıç hali ve kısıtlanmış ölü hal ) ile belirlenir ve bu hallere bağlı prosesin ayrıntılarından bağımsızdır. Bununla birlikte  $S_{gen}$  değeri kapalı sistemden kısıtlanmış ölü hale geçildiğinde prosesin yapısına bağlıdır. İkinci kanuna göre bu terim, tersinmezlikler mevcut olduğunda pozitifdir. Tersinmezliklerin olmadığı durumda ise değişir. Böylece birleşmiş sistem işi için maksimum teoriksel değer ;  $S_{gen}$  yerine sıfır (0) konulmasıyla elde edilir.

$$W_{c,max} = (U - U_o) + p_o (V - V_o) - T_o (S - S_o) \quad (25)$$

Tanıma göre, fiziksel ekserji  $E^{PH}$  ; bu maksimum değerdir. Eşitlik (15) ; bir sistemin fiziksel ekserjisi hesaplamak için yaklaşık ifade olarak elde edilir. Bir sistem belirlenmiş bir halden kısıtlanmış ölü hale geçtiğinde yapılan işin gelişimini görmek için idealize edilmiş çeşitli araçlara müracaat edilebilir.

Diğer taraftan fiziksel ekserji  $E^{PH}$  ; kütle veya molar birimleriyle de ifade edilebilir. Kütle birimi için aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz:

$$e^{PH} = (u - u_o) + p_o (v - v_o) - T_o (s - s_o) \quad (26)$$

Bir ideal gaz ile sabit spesifik ısı oranı  $k$  'nın özel durumu için Eşitlik (26) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{e^{PH}}{c_p T_o} = \frac{T}{T_o} - 1 - \ln \frac{T}{T_o} + \frac{k-1}{k} \left[ \ln \frac{p}{p_o} + \frac{T}{T_o} \left( \frac{p_o}{P} - 1 \right) \right] \quad (27)$$

Kimyasal bir reaksiyon içermeyen pratikteki uygulamalar için bir sistemin değişik hallerindeki fiziksel, kinetik ve potansiyel ekserjileri bilmek yeterlidir. Kimyasal ekserjinin kesin bir şekilde hesaplaması gerekli değildir. Çünkü kimyasal ekserji değeri ilgilenilen bütün hallerde aynıdır ve bundan dolayı ekserji değeri haller arasındaki ekserji değerlerindeki farklar hesaplandığında iptal edilir. Kapalı sistemler ve kontrol hacimleriyle hesaplamalarda benzer olay gözlenir. Böyle özel uygulamalarda çevrenin kimyasal bileşiminin bilinmesi gerekli değildir. Sadece sıcaklık  $T_o$  ve basınç  $p_o$ 'ın belirtilmesi gereklidir. Bundan başka kapalı bir sistemin iki hali arasındaki ekserji değişmesi eşitlik (10) ve (15) den aşağıdaki gibi hesaplanır [ 13-16 ]:

$$E_2 - E_1 = (U_2 - U_1) + p_o (V_2 - V_1) - T_o (S_2 - S_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) \quad (28)$$

Bu eşitliklerde  $p_o$  ve  $T_o$  'ın belirtilmesi gerekir fakat çevre bileşiminin belirtilmesi gerekmez. Bazı mühendislik hesaplamaları için kinetik ve potansiyel ekserji değişmeleri ihmal edilebilir.

### 2.1.7. Kapalı Sistemin Ekserji Dengesi

Kapalı sistem için ekserji dengesi, enerji ve entropi dengelerinin birleştirilmesiyle aşağıdaki gibi oluşturulur [ 13 ].

$$(U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) = \int_1^2 \delta Q - W \quad (29)$$

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_b + S_{gen} \quad (30)$$

Burada  $W$ ; iş ile enerji transferini,  $Q$ ; çalışan sistem ve onun çevresi arasındaki ısıyı,  $T_b$ ; ısı oluşmasıyla enerji transferinin olduğu sınırdaki sıcaklığı ve  $S_{gen}$ ; İç tersinmezlikler nedeniyle entropi oluşumunu gösterir. Entropi dengesinin  $T_o$  sıcaklığıyla çarpılması ve sonucun enerji dengesinden çıkarılması aşağıdaki ifadeyi verir.

$$(U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) - T_0 (S_2 - S_1) \\ = \int_1^2 \delta Q - T_0 \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_b - W - T_0 S_{gen} \quad (31)$$

$\delta Q$  içeren terimler birleştirildiğinde ve eşitlik (28)' nin sol tarafına ilave edildiğinde bu ifade tekrar aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(E_2 - E_1) - p_0 (V_2 - V_1) = \int_1^2 \left( 1 - \frac{T_0}{T_b} \right) \delta Q - W - T_0 S_{gen} \quad (32)$$

Yeniden düzenlendiğinde, kapalı sistem ekserji dengesi aşağıdaki gibi sonuçlanır :

$$\underbrace{(E_2 - E_1)}_{\text{Ekserji değişimi}} = \underbrace{\int_1^2 \left( 1 - \frac{T_0}{T_b} \right) \delta Q - [W - p_0 (V_2 - V_1)]}_{\text{Ekserji transferleri}} - \underbrace{T_0 S_{gen}}_{\text{Ekserji yıkımı}} \quad (33)$$

Belirlenmiş son haller için eşitlik (33)' ün sol tarafındaki ekserji değişimi prosesin yapısı dikkate alınmaksızın eşitlik (28)' den hesaplanabilir. Bununla birlikte eşitlik (33)' ün sağ tarafındaki terimler prosese bağlıdır. Sağ taraftaki birinci terim proses boyunca sisteme veya sistemden ısı transferi ile birleştirilir ve ısıyla enerji transferi ile birleştirilmiş ekserji transferi olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$E_q = \int_1^2 \left( 1 - \frac{T_0}{T_b} \right) \delta Q \quad (34)$$

Sağ taraftaki ikinci terim net kullanışlı iş ile birleştirilir ve iş tarafından enerji transferi ile birleştirilmiş ekserji transferi olarak yorumlanabilir:

$$E_w = W - p_0 (V_2 - V_1) \quad (35)$$

Sağ taraftaki üçüncü terim sistem içinde tersinmezlikler olduğundan ekserji yıkımını gösterir. Ekserji yıkımı  $E_D$  aşağıdaki ifadede görüldüğü gibi entropi üretimiyle ilgilidir:

$$E_D = T_0 S_{gen} \quad (36)$$

Sistemin uğradığı hallerdeki ekserji değerleri için ise ısı ve iş ile birleştirilmiş ekserji transferleri, ekserjiyi tanımlamak için kullanılan çevre ile ilişkili olarak hesaplanırlar. Böylece  $[1 - (T_0 / T_b)]$  terimi, Carnot verimi olarak bilinirken, eşitlik (34)' de görülen  $[1 - (T_0 / T_b)] \delta Q$  miktarı iş olarak yorumlanabilir ki bu iş,  $T_b$  sıcaklığında ısı transferi  $\delta Q$  tarafından enerjiyi alan tersinir bir güç devri ile ve  $T_0$  sıcaklığında ( $< T_b$ ) çevreye ısı transferiyle enerji boşalmasıyla üretilebilir. Ayrıca not edilmelidir ki,  $T_b$ ;  $T_0$  dan daha küçük olduğundan, ekserji transferinin işareti, ısı transferinin zıt işaretlisi olacaktır. Bu yüzden ısı transferi ve birleştirilmiş ekserji transferi zıt olacak şekilde yöneltilecektir. İş ile birleştirilmiş ekserji transferi, ayrıca çevre ile ilişkili olarak hesaplanır: Ekserji transferi sistem işi olup ( $W$ ), elde edilen bu iş,  $p_0$  basıncında uniform olan çevre ile yer değiştirmesi gerekli olan işten daha azdır ve değeri ( $p_0 \Delta V$ )' dir. Bu da eşitlik (35) den elde edilen enerji ( $W - p_0 \Delta V$ ) ifadesine eşit olacaktır [ 10,14 ].

Ekserji dengesi, özel uygulamalar için farklı şekillerde ifade edilebilir. Kapalı sistemler için ekserji dengesinin uygun bir ifadesi aşağıda verilen hız eşitliğidir:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left( \dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt} \right) - \dot{E}_D \quad (37)$$

Burada  $dE / dt$ , ekserjinin zamanla değişme hızıdır.  $[1 - (T_0 / T_j)] \dot{Q}_j$  terimi, ani sıcaklığın  $T_j$  olduğu sınırdaki oluşan  $\dot{Q}_j$  hızındaki ısı transferi ile birleştirilmiş ekserji transferinin zamanla değişme hızını gösterir.  $\dot{W}$  terimi, iş tarafından enerji transferinin zamanla değişme hızını gösterir ve birleşmiş ekserji terimi  $\dot{W} - p_0 dV / dt$  ile verilir. Burada  $\dot{E}_D$ , sistem içinde tersinmezlikler olduğundan ekserji yıkımının zamanla değişim hızını gösterir ve  $\dot{E}_D = T_0 \dot{S}_{gen}$  ile sistem içindeki entropi üretiminin hızı ile ilişkilidir.  $dV / dt$  ise sistem hacminin zamanla değişme hızıdır.

### 2.1.8. Kontrol Hacim Ekserji Dengesi

Daha önceki bilgiler ışığında biz şimdi kontrol hacimlerine uygulanabilir bir ekserji dengesinin değişik ifadelerini tanıtabiliriz. Eğer bu ekserji dengelerinin kullanımı gerekirse bu takdirde kimyasal ekserjiyi kullanabilmek için,  $T_0$  sıcaklığına ve  $p_0$  basıncına ilaveten çevrenin kimyasal yapısını da belirtmeliyiz.

**Genel Form:** Kütle, enerji ve entropi gibi ekserji de yaygın bir özelliktir. Bundan dolayı, ekserji madde giriş ve çıkış akışlarının bulunduğu bir kontrol hacminin içine veya dışına aktarılabilir. Kontrol hacimlerine uygulanabilen (37) eşitliğinin karşılığı olarak verilen aşağıdaki ifadede görüldüğü gibi ekserji transferleri için yapılan hesaplamalarda ilave terimler gerekir [ 14-16 ].

$$\underbrace{\frac{dE_{cv}}{dt}}_{\text{Ekserji değişim hızı}} = \underbrace{\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e}_{\text{Ekserji transfer hızları}} - \underbrace{\dot{E}_D}_{\text{Ekserji yıkım hızı}} \quad (38)$$

Kontrol hacim hız dengeleri gibi i ve e alt indisleri, sırasıyla girişleri ve çıkışları gösterirler.

(38) eşitliğinde  $dE_{cv} / dt$  terimi, kontrol hacim ekserjisindeki zamanla değişme hızıdır.  $\dot{Q}_j$  terimi; ani sıcaklığın  $T_j$  olduğu kontrol hacim sınırı üzerindeki ısı transferinin zamanla değişme hızını gösterir ve birleşmiş ekserji transferi aşağıdaki gibi verilir:

$$\dot{E}_{qj} = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j \quad (39)$$

Kontrol hacmindeki enerji hız dengesi  $\dot{W}_{cv}$ ; diğer akış içinden iş vasıtasıyla enerji transferinin zamanla değişme hızını gösterir. Birleşmiş ekserji transferi aşağıdaki gibi verilir:

$$\dot{E}_w = \dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt} \quad (40)$$

Burada ( $dV_{cv} / dt$ ), kendiliğinden, kontrol hacminin zamanla değişme hızıdır.  $\dot{m}_i e_i$  terimi, girişteki (i) ekserji transferinin zamanla değişme hızını gösterir. Benzer şekilde  $\dot{m}_e e_e$ , çıkıştaki (e) ekserji transferinin zamanla değişme hızını gösterir. Sonraki tartışmalarda kontrol hacim girişlerindeki ve çıkışlarındaki ekserji transfer hızları sırasıyla,  $\dot{E}_i = \dot{m}_i e_i$  ve  $\dot{E}_e = \dot{m}_e e_e$  olarak gösterilir. Sonuç olarak  $\dot{E}_D$ ; kontrol hacmi içerisinde tersinmezlikler olduğundan ekserji yıkımının zamanla değişme hızını gösterir.  $\dot{E}_D = T_0 \dot{S}_{gen}$

**Kararlı Hal Durumu :** Kararlı halde  $dE_{cv} / dt = 0$  ve  $dV_{cv} / dt = 0$  dır. Bu yüzden eşitlik (38) aşağıdaki eşitliğe indirgenir [ 13 ]:

$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}_D \quad (41)$$

Bu eşitlik bize, kontrol hacmine transfer edilen ekserjideki hızın dışarıya transfer edilen hızı aşması gerektiğini gösterir. Tersinmezliklerden dolayı fark, kontrol hacmi içerisinde yok edilen ekserjideki hızdır. Ekserji transfer ve yıkımının zamanla değişme hızının terimlerinde ifade edildiğinde eşitlik (41) aşağıdaki formu alır.

$$0 = \sum_j \dot{E}_{q,j} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e - \dot{E}_D \quad (42)$$

**Giriş Ve Çıkışlardaki Ekserji Transferi :** Kontrol hacim ekserji dengesinin tanıtımını tamamlamak için ifadeler, (38) ve (41) eşitliklerinde görülen  $e_i$  ve  $e_e$  terimleriyle gösterilmiş girişlerdeki ve çıkışlardaki ekserji transferlerini hesaplamayı gerektirirler. Diğer ekserji transferleri gibi bu terimler, ekserjiyi ifade etmekte kullanılan çevre ile ilişkili olarak hesaplanmalıdırlar. Bir kontrol hacmine giren veya çıkan bir madde akışı ile birleştirilmiş ekserji, maksimum teorik iştir ki bu elde edilebilir iş, çevre ile sadece ısı transferi oluşurken akışı ölü hale getirir. Bu iş aşağıdaki gibi iki aşamada hesaplanabilir.

Birinci aşamada, akış kısıtlanmış ölü hale ikinci aşamada, kısıtlanmış ölü halden ölü hale getirilir. İkinci adımın geliştirilmiş işe katkısı, açık bir şekilde, kimyasal ekserjidir. Birinci adımın katkısı, prensipte Şekil 2' de gösterilen cihaz ile elde edilebilir. Bununla

birlikte güncel uygulamalarda, cihazın girişindeki akış özellikleri  $h$ ,  $s$ ,  $V$  ve  $z$  iken çıkıştaki özellikler  $h_o$ ,  $s_o$ ,  $V_o = 0$  ve  $z_o = 0$  dır ki burada  $h_o$  ve  $s_o$ , kısıtlanmış ölü haldeki spesifik entalpi ve spesifik entropi dir. Üstelik çevre ile sadece ısı transferi oluşuyorken ısı transferinin oluştuğu  $T_b$  sıcaklığı  $T_o'$  a uyar. Böylece birinci adımda geliştirilmiş iş olarak kullanılan eşitlik, birim kütle akışı,  $(h - h_o) - T_o (s - s_o) + \frac{1}{2} V^2 + gz$  dir. Birim kütle esasına göre madde akışı ile birleştirilmiş toplam ekserji transferi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$e = (h - h_o) - T_o (s - s_o) + \frac{1}{2} V^2 + gz + e^{CH} \quad (43)$$

Eşitlik (43)' deki  $(h - h_o) - T_o (s - s_o)$  terimi, bir madde akışı ile birleştirilmiş ekserji transferinin fiziksel bileşeni olarak ifade edilir ( $e^{PH}$ ).

$$e^{PH} = (h - h_o) - T_o (s - s_o) \quad (44)$$

Fiziksel ekserji, bir madde akışının sıcaklık ve basıncı ile birleştirilir.

Sabit spesifik ısı oranı  $k$  ile bir ideal gazın özel durumu için eşitlik (44) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [ 13,20 ].

$$\frac{e^{PH}}{c_p T_o} = \left[ \frac{T}{T_o} - 1 - \ln \frac{T}{T_o} \right] + \ln \left( \frac{p}{p_o} \right)^{(k-1)/k} \quad (45)$$

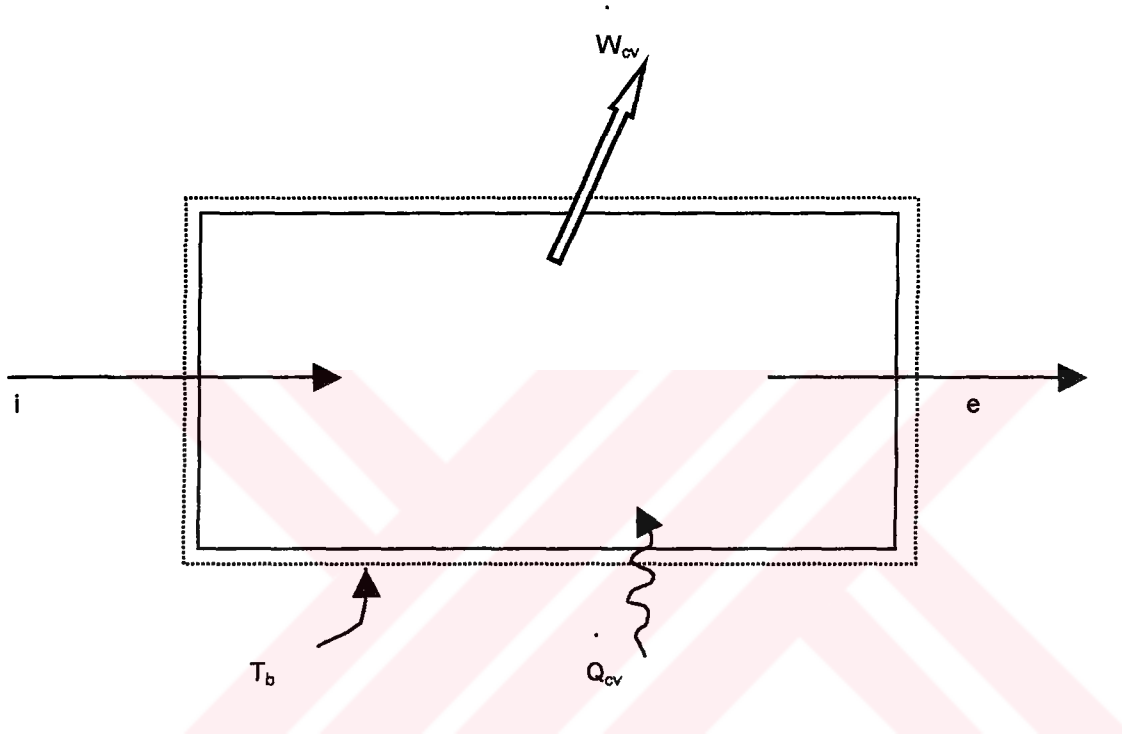
Fiziksel ekserji terimi kısıtlanmış ölü halde yok olur ve  $p < p_o$  olduğunda negatif olabilir. Sonuç olarak dikkat edilmelidir ki (45) eşitliğinin sağ tarafındaki iki terim, sadece, sıcaklığa ve basınca bağlıdır. Bu terimlerin her biri boyutsuz durumda ideal gaz akışı ile birleştirilmiş ekserjinin ısıl ve mekaniksel bileşenlerini gösterebilirler. Bununla birlikte genelde fiziksel ekserji bu iki bileşenin terimlerinde gösterilemez. (43) eşitliğiyle verilen ekserji transfer teriminin karakteri aşağıdaki alternatif ifadeyle diğer bir bakış açısından görülebilir.

$$e = e + (p v - p_o v) \quad (46)$$

Burada  $e$ ; bir kontrol hacmine giren veya çıkan maddenin toplam spesifik enerjisidir ve (14) ve (26) eşitliklerinden hesaplanmıştır.  $p v$  terimi; girişteki ve çıkıştaki



spesifik akış işidir ve  $(pv - p_0v)$ ; akış işi ile birleştirilmiş ekserji transferini gösterir. Böylece ekserji transfer terimi  $e$ ; basitçe iki katkının toplamıdır ki bunlar akan maddenin ekserjisi ve akış işi ile birleştirilmiş ekserji transferidir. (46) eşitliğinin birinci terimi  $e$ ; asla negatif olmayacağından  $p < p_0$  olduğunda ikinci terim negatiftir.



Şekil 2. Kararlı haldeki bir giriş, bir çıkış kontrol hacmi

### 2.1.9. Kimyasal Ekserji

Kimyasal ekserji hesaplanacağı zaman sistemi içeren maddeler; uygun şekilde seçilmiş çevresel maddelerin özelliklerini göstermelidir. Çevrenin kısımları arasındaki fiziksel veya kimyasal etkileşimlerden elde edilen iş ihtimali hariç tutulduğunda bu referans maddeler; karşılıklı olarak dengede olma ihtiyacı duyacaklardır. Ayrıca önceki çevre tartışmalarında kabul edildiği gibi çevrenin sıcaklığı, basıncı ve diğer yoğun özellikleri zamanla uniform olarak değişmektedir. Buna uygun olarak fiziksel gerçeklik ve termodinamik teoremin gereksinimleri arasında önemli bir şekilde uzlaşma gereklidir. Böyle düşünceler; kimyasal ekserjiyi hesaplamak için alternatif modellere izin verirler. Ekserji referans çevresi ve termodinamik çevre terimleri, çoğu zaman , termodinamik kavramını doğal çevreden ayırmak için kullanılır.

### 2.1.9.1. Standart Kimyasal Ekserji

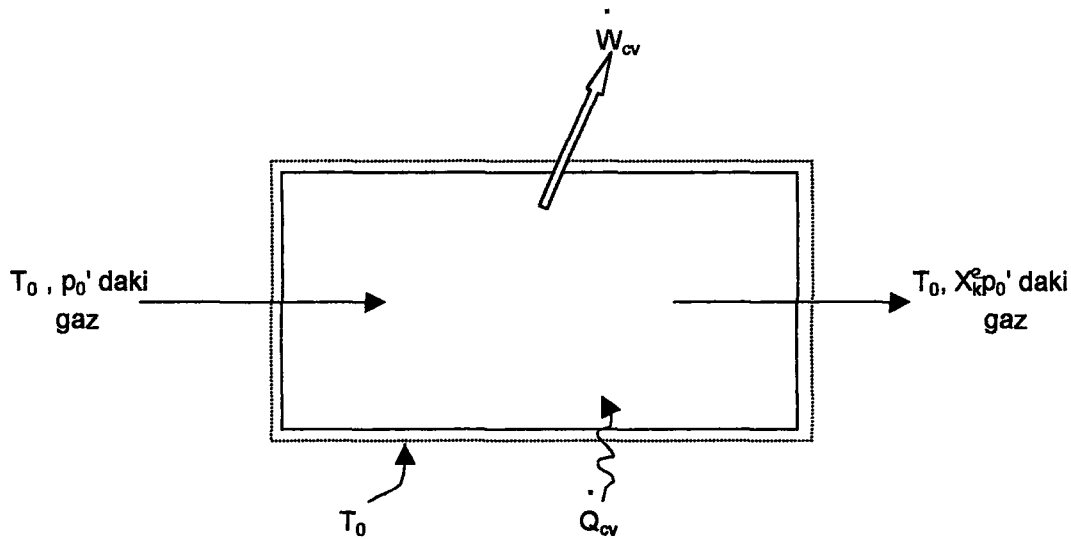
Standart kimyasal ekserjiler, çevresel sıcaklık  $T_0$  ve basınç  $p_0$  standart değerlerine bağlıdır. Örneğin;  $T_0$  ve  $p_0$ , sırasıyla, 298.15 K ( 25°C ) sıcaklık ve 1 atmosfer basınçtır. Standart çevre yaklaşık olarak doğal çevrenin kimyasal yapısını yansıtan standart konsantrasyonlar ile bir seri referans maddeleri içerir. Referans maddeler genellikle üç bölüme ayrılırlar: Atmosferin gazlı bileşenleri, yerküreden katı maddeler ve okyanuslardan iyonik ve iyonik olmayan maddeler. İki alternatif standart ekserji referans çevreleri mühendislik hesaplamaları için kabul edildiler. Bunlar model 1 ve model 2 olarak adlandırılırlar [ 17,18 ].

Referans 17' de gösterilmiş olan model 1 için referans maddeler, nitrik asit ve nitratlar için kabul edilen kimyasal denge ile atmosfer, okyanuslar ve taşkürenin bir kısmının diğer bütün kimyasal bileşenleri için kısıtlanmış termodinamik dengenin kabul edilmesiyle ifade edilirler. Farklı bir yaklaşım, referans 18' de gösterilmekte olan model 2 de kullanılır: Maddeler tamamen karşılıklı kararlı dengede olmadıkları halde düşünülen ve doğal çevrede bolca mevcut elementi içeren maddeler arasından her bir kimyasal element için farklı bir madde seçilir. Bu yaklaşım için altı çizilen nokta, doğada bolca bulunan maddelerin az bir ekonomik değere sahip olmalarıdır. Model 1, termodinamik teoremin denge gereksinimlerini sağlamaya çalışır. Ayrıca bu modelin gaz fazının kimyasal bileşimi memnun edici bir tarzda doğal atmosferin bileşimine yaklaşır. Bununla birlikte toplam bir temel üzerinde model 2' nin ekserji referans çevresinin kimyasal bileşimi doğal çevrenin bileşimine daha yakın olur ama denge ihtiyacı genellikle tatmin edici değildir. Referans maddelerin spesifik seçenekleri, standart kimyasal ekserjileri hesaplamak için gerekli metodlar, standart ekserjilerin tabloları ve iki yaklaşımın karşılaştırmaları hakkındaki ilave ayrıntılar referans 17 ve 18' de verilmektedir. Tablo 5; model 1 ve model 2 nin kullanılmasıyla elde edilmiş seçilmiş maddeler için standart kimyasal ekserjileri verirler. Verilen hesaplamalar için sadece kimyasal ekserji değerleri; kullanılabilen aynı modele uyar [13-17 ].

### 2.1.9.2. Gazların ve Gaz Karışımlarının Standart Kimyasal Ekserjileri

Standart ekserji referans çevrelerinin yaygın bir özelliği; havayı göstermek için tasarlanmış  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O(g)$  ve diğer gazları içeren bir gaz fazıdır. Bu gaz fazında mevcut k. gaz  $T_0$  sıcaklığındadır ve kısmi basınç  $p_k^e = x_k^e p_0$ 'dır. Burada e üst indisi çevreyi gösterir ve  $x_k^e$  çevresel gaz fazındaki k gazının mol fraksiyonudur. Şekil 3' de gösterilen kararlı haldeki cihaz ile ilişkili olarak çevresel gaz fazında mevcut bir gaz için standart kimyasal ekserjinin hesabı aşağıdaki gibi verilebilir:  $T_0$  sıcaklığında ve  $p_0$  basıncındaki k. gaz girişleri, sadece çevre ile ısı transferi sonucu oluşan izotermal genleşmeler ve  $T_0$  sıcaklığı ile  $x_k^e p_0$  kısmi basıncında çevreye çıkışlar. k'nın birim molü başına maksimum teoriksel iş, genleşme tersinmezlikler olmaksızın oluşturulduğunda geliştirilebilecektir. Bununla birlikte k gazının birim molü başına kimyasal ekserji aşağıdaki gibi ifade edilir :

$$\begin{aligned} e_k^{CH} &= -\bar{R}T_0 \ln \frac{x_k^e p_0}{p_0} \\ &= -\bar{R}T_0 \ln x_k^e \end{aligned} \quad (47)$$



Şekil 3. Bir gazın kimyasal ekserjisinin hesaplanması için gerekli düzenek

Eşitlik (47)' nin bir uygulaması olarak model 1 de olduğu gibi  $x_{CO_2}^o = 0.00328$  ve  $T_0 = 298.15$  K deki  $CO_2$  yi düşünelim. Değerler eşitlik (47)' da yerine konulduğunda yuvarlatılarak:

$$\bar{e}_{CO_2}^{-CH} = 14,179 \text{ kJ / kmol}$$

olarak bulunur. Bu değer, model 1 için Tablo 5' de verilmiş olan  $CO_2$ ' in değerine eşittir. Model 2' deki  $CO_2$  nin mol fraksiyonu  $x_{CO_2}^o = 0.00033$  dür. Böylece model 2 kullanıldığında  $CO_2$  nin kimyasal ekserjisi için elde edilen değerden farklı bir değer elde edilir:

$$\bar{e}_{CO_2}^{-CH} = 19,871 \text{ kJ / kmol.}$$

Her biri çevresel gaz fazında mevcut olan azot gazlarının bir karışımının kimyasal ekserjisi benzer şekilde elde edilebilir. Böyle bir durumda , karışımdaki her bir gaz için Şekil 3' de gösterildiği gibi N cihazlarının bir serisini düşünebilir.  $T_0, p_0$ ' daki gaz karışımında mol fraksiyonu  $x_k$  olan k gazı,  $T_0$  ve kısmi basınç  $x_k p_0$  da sisteme girer ve  $T_0$  ve kısmi basınç  $x_k^o p_0$  da sistemden çıkar. Önceki gelişmelere paralel olarak k' nın birim molü başına iş  $-\bar{R}T_0 \ln(x_k^o / x_k)$  dir. Bütün bileşenlerin toplanmasıyla karışımın birim molü başına kimyasal ekserji [ 13 ]:

$$\bar{e}^{-CH} = -\bar{R}T_0 \sum x_k \ln \frac{x_k^o}{x_k} \quad (48)$$

Doğal logaritma terimi  $x_k$  (  $\ln x_k^o - \ln x_k$  )olarak ifade edilip Eşitlik(47)' de yerine konulduğunda bu alternatif olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\bar{e}^{-CH} = \sum x_k \bar{e}_k^{-CH} + \bar{R}T_0 \sum x_k \ln x_k \quad (49)$$

Eşitlik (49), referans çevrede mevcut olan gazları içeren karışımlar için, örneğin; gaz yakıtlar için geçerlidir. Bu eşitlik, ayrıca, karışımlar ve çözeltiler için genişletilebilir, fakat bu durum ideal gaz modeline uymaz. Böyle hesaplamalarda  $\bar{e}_k^{-CH}$  terimleri, standart kimyasal ekserji değerlerini veren bir tablodan seçilirler.

### 2.1.9.3. Yakıtların Standart Kimyasal Ekserjileri

Premsipte çevrede mevcut olmayan bir maddenin standart kimyasal ekserjisi, bir maddenin ideal bir reaksiyonunun kimyasal ekserjileri bilinen diğer maddeler ile düşünülmesiyle hesaplanabilir.  $T_0$ ,  $p_0$  da saf bir hidrokarbon yakıt  $C_aH_b$  durumunda bunu göstermek için Şekil (4)' deki sistemden yararlanılır. Burada yakıt oksijen ile karbondioksit ve su oluşturmak için reaksiyona giriyor. Bütün maddelerin  $T_0$ ,  $p_0$  da karışmadan girdiği ve çıktığı kabul edilir ve ısı transferi sadece  $T_0$  sıcaklığında oluşur.

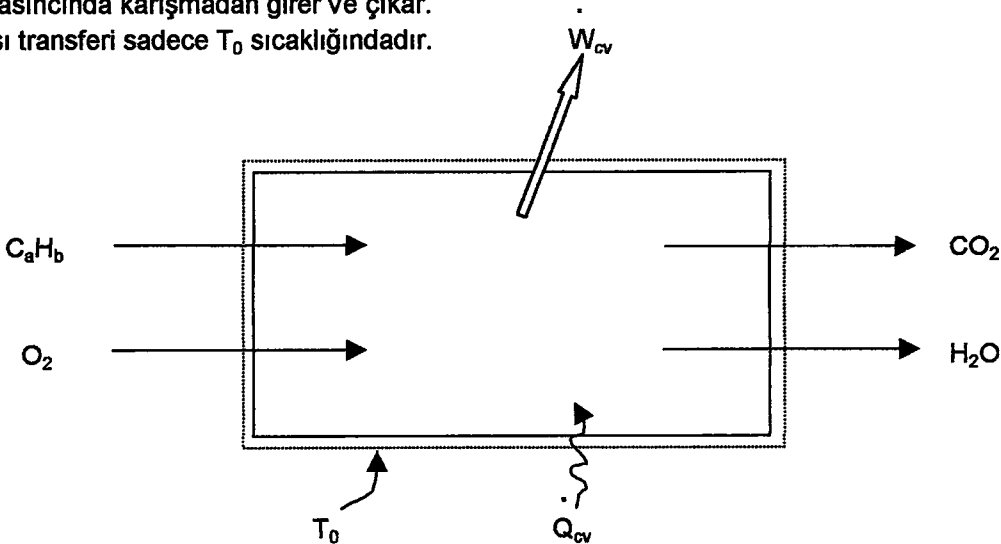
Tersinmezliklerin olmadığı kabul edildiğinde sistem için bir ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir [ 13,18 ]:

$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \frac{\dot{Q}_j}{\dot{n}_F} - \left( \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{n}_F} \right)_{intrev} + e_F^{-CH} + \left( a + \frac{b}{4} \right) e_{O_2}^{-CH} - a e_{CO_2}^{-CH} - \frac{b}{2} e_{H_2O(l)}^{-CH} - \dot{E}_D \quad (50)$$

Burada F alt indisi yakıtı gösterir. Yakıt kimyasal ekserji için çözüldüğünde

$$e_F^{-CH} = \left( \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{n}_F} \right)_{intrev} + a e_{CO_2}^{-CH} + \frac{b}{2} e_{H_2O(l)}^{-CH} - \left( a + \frac{b}{4} \right) e_{O_2}^{-CH} \quad (51)$$

Bütün maddeler  $T_0$  sıcaklığında ve  $p_0$  basıncında karışmadan girer ve çıkar. Isı transferi sadece  $T_0$  sıcaklığındadır.



Şekil 4. Bir hidrokarbon yakıtın ( $C_aH_b$ ) kimyasal ekserjisinin hesabı için gerekli düzenek

Referans 13 ' de verilmiş olan aşağıdaki (52) eşitliği kullanıldığında ve  $-\bar{h}_{RP}$  molar yüksek ısı değeri  $\overline{HHV}$  olarak gösterildiğinde önceki ifadedeki iş terimi aşağıdaki (53) eşitliğine dönüştürülebilir [ 13 ]:

$$\left( \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{n}_F} \right)_{int rev} = -\bar{h}_{RP}(T,p) - T \left[ \bar{s}_F + (a + 1/4b) \bar{s}_{O_2} - a \bar{s}_{CO_2} - 1/2b \bar{s}_{H_2O} \right] (T,p) \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \bar{e}_F^{-CH} = \overline{HHV}(T_0,p_0) - T_0 \left[ \bar{s}_F + \left( a + \frac{b}{4} \right) \bar{s}_{O_2} - a \bar{s}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O(l)} \right] (T_0,p_0) \\ + \left\{ a \bar{e}_{CO_2}^{-CH} + \frac{b}{2} \bar{e}_{H_2O(l)}^{-CH} - \left( a + \frac{b}{4} \right) \bar{e}_{O_2}^{-CH} \right\} \end{aligned} \quad (53)$$

Benzer şekilde referans 13' de verilen aşağıdaki (54) eşitliği kullanılarak (55) eşitliği ile verilen alternatif ifade elde edilir.

$$\left( \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{n}_F} \right)_{int rev} = \left[ \bar{g}_F + (a + 1/4b) \bar{g}_{O_2} - a \bar{g}_{CO_2} - 1/2b \bar{g}_{H_2O} \right] (T,p) \quad (54)$$

$$\bar{e}_F^{-CH} = \left[ \bar{g}_F + \left( a + \frac{b}{4} \right) \bar{g}_{O_2} - a \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O(l)} \right] (T_0,p_0) + \left\{ a \bar{e}_{CO_2}^{-CH} + \frac{b}{2} \bar{e}_{H_2O(l)}^{-CH} - \left( a + \frac{b}{4} \right) \bar{e}_{O_2}^{-CH} \right\} \quad (55)$$

Gibbs fonksiyonlarını içeren bu ifadenin ilk terimi daha doğru bir şekilde  $-\Delta G$  olarak yazılabilir: Reaksiyon için Gibbs fonksiyonundaki değişimin negatif olması. Eşitlik (55)' in kullanımını göstermek için metan gazını düşünelim.  $a = 1$  ,  $b = 4$  , Gibbs fonksiyon verisi ve Tablo 5' den  $CO_2$ ,  $H_2O(l)$  ve  $O_2$  için standart kimyasal ekserjiler ile eşitlik (55); 824,720 kJ / kmol sonucunu verir. Bu, yaklaşık olarak Tablo 5' de metan için listelenmiş değer ile aynıdır.

(53) , (55) eşitlikleri ile  $C_aH_b$  hidrokarbonunun standart kimyasal ekserjisi, seçilmiş özel verilerle birlikte  $O_2$  ,  $CO_2$  ve  $H_2O (l)$  nun standart kimyasal ekserjilerinin

kullanılmasıyla hesaplanabilir. Gerekli yakıt verilerinin eksikliğinde (örneğin; kömür, char ve fuel oil durumlarında ) Eşitlik (53)' ün yaklaşımı için ölçülmüş veya hesaplanmış yakıt ısı değerine ve literatürde tartışılmış metotlarla ifade edilmiş yakıtın mutlak entropisinin hesaplanmış değerine müracaat edilebilir. Bu tür bir gösterim kısım (2.2) de verilmektedir.

Eşitlik (55)' e öncülük eden hidrokarbon yakıtlar için yukarıda verilen gelişmeye paralel olarak prensipte çevrede mevcut olmayan herhangi bir maddenin standart kimyasal ekserjisi ifade edilebilir. Böyle bir madde ile kimyasal standart ekserjileri bilinen diğer maddeleri (genellikle referans maddeler) içeren maddenin bir reaksiyonunu dikkate alarak aşağıdaki ifade yazılabilir [ 13,14 ]:

$$e^{-CH} = -\Delta G + \left\{ \sum_P n e^{-CH} - \sum_R n e^{-CH} \right\} \quad (56)$$

Her bir madde ayrı olarak dikkate alındığında burada  $\Delta G$ ,  $T_0$  sıcaklığında ve  $p_0$  basıncında reaksiyon için Gibbs fonksiyonundaki değişmedir. Kıvrımlı parantezlerdeki terim, (53) , (55) eşitliklerinin kıvrımlı parantezlerindeki terimlere uyar ve  $n$ ' in kimyasal ekserjisi, hesaplanmakta olan maddenin birim molü başına bu giren ve ürünlerin mollerini vermesi ile birlikte bilinen standart kimyasal ekserjilerin kullanılmasıyla hesaplanır.

Eşitlik (56)' nın kullanımını göstermek için amonyak,  $NH_3$ , durumunu düşünelim. (53) , (55) eşitliklerine yol gösteren gelişmede  $NH_3$  ün hidrokarbon rolünü oynamasına izin verildiğinde biz standart kimyasal ekserjileri bilinen diğer maddeleri içeren herhangi bir  $NH_3$  reaksiyonunu düşünebiliriz.

Örneğin;  $NH_3 + 3/4 O_2 \rightarrow 1/2 N_2 + 3/2 H_2O(l)$  reaksiyonunu düşündüğümüzde eşitlik (56) aşağıdaki hale dönüşür [ 13 ].

$$e_{NH_3}^{-CH} = \left[ g_{NH_3}^{-CH} + \frac{3}{4} g_{O_2}^{-CH} - \frac{1}{2} g_{N_2}^{-CH} - \frac{3}{2} g_{H_2O(l)}^{-CH} \right] (T_0, p_0) + \frac{1}{2} e_{N_2}^{-CH} + \frac{3}{2} e_{H_2O(l)}^{-CH} - \frac{3}{4} e_{O_2}^{-CH} \quad (57)$$

Tablo 3' den Gibbs fonksiyon verileri ve Tablo 5' den (model 1 )  $O_2$  ,  $N_2$  ve  $H_2O(l)$  için standart kimyasal ekserjiler kullanıldığında  $e_{NH_3}^{-CH} = 336,650$  kJ / kmol olarak bulunur. Bu yaklaşık olarak, bu model için Tablo 5' de listelenmiş amonyakın değerine uyar.



### 2.1.10. Ekserji Yıkımı ve Ekserji Kaybı

Ekserji analizi çoğu zaman performans ölçümlerinin hesabını içerir. Bu performanslar; ekserji yıkım oranları, ekserji kayıp oranları ve ekserjetik etkilerdir.

Herhangi bir termodinamik analizde birinci adım; sistem veya kontrol hacmini tanımlamaktır. Sistem tanımı özellikle ekserji analizinde önemlidir. Çünkü, eğer ısı transferlerinin etkileri bir ekserji yıkımı veya bir ekserji kaybı olarak yüklenebilirse sınır seçimi ifade edilebilir.

Ekserji, kontrol hacmine  $i$  girişinde  $\dot{E}_i = \dot{m} e_i$  hızında girer ve  $e$  çıkışında daha düşük bir hız  $\dot{E}_e = \dot{m} e_e$  de çıkar. Burada  $\dot{m}$ , kütle akış hızını gösterir ve sırasıyla girişteki ve çıkıştaki  $e_i$  ve  $e_e$  terimleri eşitlik (43)'den hesaplanır. Ekserji yıkımı ve ekserji kaybı nedeniyle çıkıştaki ekserji hızı girişteki ekserji hızından daha azdır. Bu ekserji miktarları kararlı halde

$$\dot{E}_i = \dot{E}_e + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (58)$$

olarak ifade edilebilen ekserji hız dengesiyle ilişkilidirler. Burada  $\dot{E}_D$  ve  $\dot{E}_L$  sırasıyla ekserji yıkım ve ekserji kayıp hızlarını gösterirler. (58) eşitliğinin gözden geçirilmesi ile ekserji yıkımı ve ekserji kaybının toplamının, verilen giriş ve çıkış hallerinde sabit kalacağı açıktır. Bununla birlikte  $\dot{E}_D$  ve  $\dot{E}_L$ 'nin özel değerleri açıkça sınır seçimine bağlıdır.

Ekserji kaybı  $\dot{E}_L$ 'nin hızı; ısı transferi ile birleştirilmiş ekserji transfer hızına eşittir ve böylece

$$\dot{E}_q = \int_i^e \left( 1 - \frac{T_0}{T_b} \right) q' dL \quad (59)$$

burada  $q'$ ; boru uzunluğu  $L$ 'nin birim ünitesi başına ısı transfer hızıdır. Ekserji ayrıca sürtünme etkileri sayesinde bu kontrol hacmi içerisinde yok edilir.

Eşitlik (59) vasıtasıyla ekserji transferini hesaplamak, sınırın her bir kısmına karşı ısı transferi  $q'$ 'nin hızını ve ısı transferlerinin olduğu sınırdaki  $T_b$  sıcaklığının bilinmesini gerektirir. Pratikte ise bu ekserji transferi hesaplama için uygun değildir. Özel durumlarda ise hesaplama termodinamik ortalama sıcaklık kullanılarak yapılır.

**Termodinamik Ortalama Sıcaklık :** İç tersinmezliklerin yokluğunda, kararlı haldeki giriş ve çıkış kontrol hacmi ile oluşan ısı transferi referans 13' de verilen aşağıdaki (60) eşitliği ile verilir.

$$\left( \frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{m}} \right)_{int.rev} = \int_1^2 T ds \quad (60)$$

Termodinamik bir ortalama sıcaklıkta ( $T_a$ ) oluşan böyle bir ısı transferi  $(\dot{Q}_{CV} / \dot{m})_{int.rev} = T_a(s_e - s_i)$  şeklinde ifade edilebilir. Burada  $T_a$  aşağıdaki gibi verilir [ 13 ]:

$$T_a = \frac{\int_i^e T ds}{s_e - s_i} \quad (61)$$

veya referans 13' de verilen aşağıdaki (62) eşitliği ile (63) eşitliği elde edilir.

$$dh = T ds + v dp \quad (62)$$

$$T_a = \frac{(h_e - h_i) - \int_i^e v dp}{s_e - s_i} \quad (63)$$

Isı değiştiriciler ve diğer önemli ekipmanları içeren hesaplamalar için ısı transferi ideal olarak sabit basınçta oluşur. Böylece Eşitlik (63) aşağıdaki şekle indirgenir.

$$T_a = \frac{h_e - h_i}{s_e - s_i} \quad (\text{sabit basınç}) \quad (64)$$

Termodinamik ortalama sıcaklığın terimlerinde ısı transfer hızı  $\dot{Q}$  ile ilişkili olan ekserji transfer hızı basitçe aşağıdaki gibi ifade edilir:

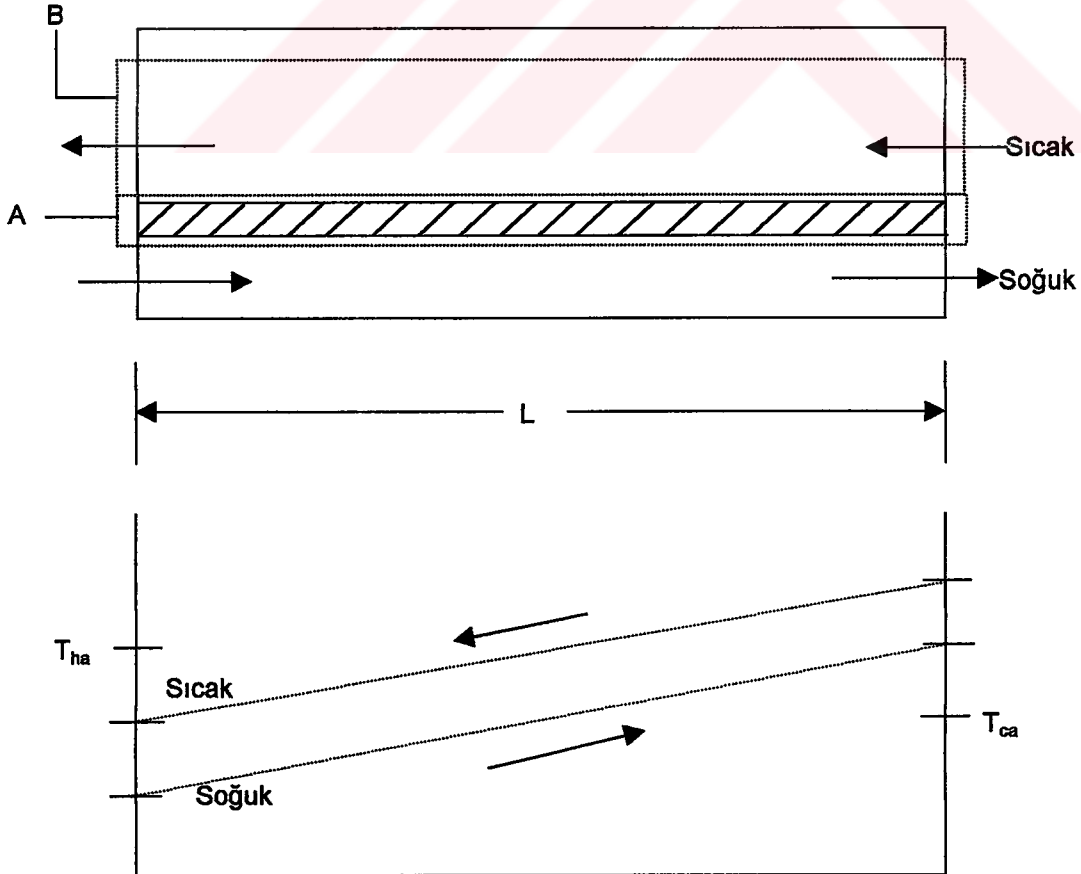
$$\dot{E}_q = \left( 1 - \frac{T_o}{T_a} \right) \dot{Q} \quad (65)$$

**Isı Transferi ve Sürtünme İçerisindeki Ekserji Yıkımı:** Termodinamik ortalama sıcaklık kavramı, ekserji yıkımı üzerine ısı transferi ve sürtünmenin etkilerini ifade etmede kullanılabilir. Şekil (5)' in ters akışlı ısı değiştiricisinden söz edildiğinde  $T_{ha}$  ve  $T_{ca}$  sırasıyla sıcak ve soğuk akışlar için termodinamik ortalama sıcaklıkları gösterirler. A ve B olarak tanımlanan iki alt sistem şekil üzerinde gösterilmektedir.

A alt sistemi, sıcak ve soğuk akışları ayıran zarı içeren kapalı bir sistemdir. Enerji  $\dot{Q}$  hızında duvar içinden ısı transferi ile akar. Alt sistem A daki ekserji yıkımı sadece ısı transferi ile gerçekleşir. Kararlı halde kapalı sistem ekserji hız eşitliği şöyledir [ 13,14,18 ]:

$$0 = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ha}}\right) \dot{Q} - \left(1 - \frac{T_0}{T_{ca}}\right) \dot{Q} - \dot{E}_D \quad (66)$$

Burada  $\dot{E}_D$ , ısı transferi olduğu için A alt sistemindeki ekserji yıkımını gösterir.



Şekil 6. Ekserji yıkımı üzerine ısı transferi ve sürtünmenin etkilerini tartışmak için kullanılan zıt akışlı ısı değiştirici

Eşitlik (66) basitleştirilince aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\dot{E}_D = T_0 \dot{Q} \frac{T_{ha} - T_{ca}}{T_{ha} T_{ca}} \quad (67)$$

Isı transfer hızı akışlar arasındaki sıcaklık farkı ile orantılı olduğu için  $[\dot{Q} \propto (T_{ha} - T_{ca})]$  aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\dot{E}_D \propto \frac{T_0 (T_{ha} - T_{ca})^2}{T_{ha} T_{ca}} \quad (68)$$

Alt sistem B, sıcak akım akışı içerisindeki kanalı çevreleyen bir kontrol hacmidir. Sürtünme sadece bu sistemin tersinmezliğidir. Kararlı halde kontrol hacim ekserji hız ifadesi yani Eşitlik (41), Eşitlik (43) yardımıyla aşağıdaki ifadeyi verecek şekilde oluşur:

$$\dot{E}_D = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ha}}\right) \dot{Q} + \dot{m} [(h_i - h_e) - T_0(s_i - s_e)] \quad (69)$$

Burada  $\dot{E}_D$ , sürtünme nedeniyle alt sistem B deki ekserji yıkımını gösterir. Bunu yazarken giriş ve çıkış kanallarındaki kimyasal ekserji ile kinetik ve potansiyel ekserji terimleri ihmal edilir. Ekserji hız dengesinden  $[\dot{Q} = \dot{m} (h_e - h_i)]$  eşitliği ile ekserji yıkımı için ifadeyi aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$\dot{E}_D = T_0 \dot{m} \left[ (s_e - s_i) - \frac{h_e - h_i}{T_{ha}} \right] \quad (70)$$

$T_{ha}$ , termodinamik ortalama sıcaklığı gösterdiği için son eşitlik, Eşitlik (63) kullanılarak tekrar aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}_D = \frac{-T_0 \dot{m} \int_i^e v dp}{T_{ha}} \quad (71)$$

**Ekserji Yıkım ve Ekserji Kayıp Oranları :** Ekserji yıkımı  $\dot{E}_D$  ve ekserji kaybı  $\dot{E}_L$  nin hız değerleri, sistem ve tersinmezliklerin termodinamik ölçümlerini sağlarlar. Bu ölçümler, sırasıyla ekserji yıkım oranları  $y_D$  ve  $y_D^*$  ile ekserji kayıp oranı  $y_L$  dir.

Bir sistem bileşenindeki ekserji yıkım hızı, tüm sisteme sağlanan yakıtın ekserji hızıyla ( $\dot{E}_{F,tot}$ ) karşılaştırılabilir ki bu da bize aşağıda ifade edilen ekserji yıkım oranını verir [ 13,14 ]:

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (72)$$

Alternatif olarak, bileşen ekserji yıkım hızı, sistemdeki toplam ekserji yıkım hızıyla ( $\dot{E}_{D,tot}$ ) karşılaştırılabilir ki bu oran aşağıdaki gibi verilir:

$$y_D^* = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{D,tot}} \quad (73)$$

İki ekserji yıkım oranı, aynı sistemin çeşitli bileşenleri arasındaki karşılaştırmalar için kullanışlıdır.

Benzer şekilde, ekserji kayıp oranı, ekserji kaybı ile bütün sistemi sağlayan yakıtın ekserjisinin karşılaştırılmasıyla elde edilen Eşitlik (72) ile tanımlanır.

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (74)$$

### 2.1.11. Ekserji Verimi

Termodinamik açıdan ekserji verimi (İkinci Kanun verimi), herhangi bir enerji sisteminin performansının gerçek bir ölçümünü sağlar.

Ekserjetik verimi tanımlamada analiz edilen termodinamik sistem için hem ürünü ve hem de yakıtı belirlemek gereklidir. Ürün, sistem tarafından üretilmiş istenen sonuçları gösterir. Bununla birlikte ürünün tanımı, kazanılan veya kullanılan sistemin amacı ile tutarlı olmalıdır. Yakıt, elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan çok çeşitli kaynakları

gösterir ve doğal gaz, fueloil ve kömür gibi çok kullanılan bir yakıtla sınırlandırılmasına gerek yoktur. Hem ürün hem de yakıt ekserji terimlerinde ifade edilir.

Ekserji analizi açısından kararlı halde bulunan bir sistem düşünelim. Bu sistemde yakıtın temini ve ürünün (ısı yada enerji) üretim hızları sırasıyla,  $\dot{E}_F$  ve  $\dot{E}_P$  dir. Sistem için ekserji hız dengesi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (75)$$

Burada  $\dot{E}_D$  ve  $\dot{E}_L$  sırasıyla ekserji yıkım ve ekserji kayıp hızlarını gösterirler. Ekserji verimi  $\varepsilon$ , elde edilen ürünün tüketilen yakıtı orandır.

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad (76)$$

Ekserji verimi, ürün ekserjisinde bulunan bir sisteme sağlanan yakıt ekserjisinin yüzdesini gösterir. Yüzde olarak ifade edildiğinde ekserji veriminin gerçek değeri ile teorik verim ( %100 ) arasındaki fark, ekserji yıkımı ve ekserji kaybı olarak bu sistemde atılmış yakıt ekserjisinin yüzdesidir.

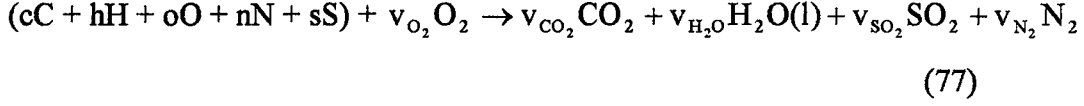
## 2.2. Kömürün Kimyasal Ekserjisinin Hesaplanması

Bu kısımda, kimyasal analizleri Tablo 1' de verilen bazı Türk kömürlerinin kimyasal ekserjilerinin hesaplanması verilmektedir [ 26-32 ].

Kısım (2.1.9.3)' de verilen yöntem, saf hidrokarbon yakıtların kimyasal ekserjisini ifade etmede kömür, odun kömürü ve fuel-oil için kullanılabilir. Özellikle Eşitlik (53), ölçülen veya hesaplanan yakıt ısı değerini ve yakıtın mutlak entropisi için hesaplanan değeri kullanır. Şimdi bu durum  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  ve  $p_0 = 1 \text{ atm}$  değerlerini kullanarak Tablo 1' de verilen kömürler için gösterilecektir.

Bu kömürlerin kimyasal ekserjisini hesaplamak için Şekil (4)' de gösterilen yanma sistemi dikkate alınmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi  $T_0, p_0$ ' da sisteme giren kuru ve külsüz kömür,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O} (l)$  oluşturmak üzere oksijen ile reaksiyona girer. Ayrıca kömürdeki azot  $T_0, p_0$ ' da  $\text{N}_2$  olarak çıkar. Bütün ısı transferleri  $T_0$  sıcaklığında oluşur.

Sisteme giren kuru ve külsüz (DAF) kömürün 1 kg'ının yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.



Kuru ve külsüz kömür için kullanılan bu eşitlikteki c, h, o, n, s değerlerinin her biri kmol / kg' da olup Tablo 2' den alınmaktadır. Tablo 2' de verilen bu değerleri bulurken aşağıda açıklanan yöntem izlenmektedir.

Tablo 2' de verilen kuru ve külsüz kömürlerin kütle fraksiyonlarının yüzdeleri, 100 gram kömürde bulunan her bir bileşenin gram miktarlarıdır. Bu miktardan mol / g 'a geçmek için 1 g kömürde bulunan her bir bileşenin gram miktarı bulunur ve her bir bileşen molekül ağırlığına bölünür. Bulunan bu değer aynı zamanda Kmol / kg birimindeki değere eşit olur.

(77) eşitliğinin dengelenmesiyle aşağıdaki eşitlikler bulunur.

$$v_{CO_2} = c, \quad v_{H_2O} = \frac{1}{2}h, \quad v_{SO_2} = s, \quad v_{N_2} = n, \quad v_{O_2} = c + \frac{1}{4}h + s - \frac{1}{2}o \quad (78)$$

Böylece, Eşitlik (53) aşağıdaki hali alır.

$$e_{DAF}^{CH} = (HHV)_{DAF} - T_0 \left[ s_{DAF} + v_{O_2} \bar{s}_{O_2} - v_{CO_2} \bar{s}_{CO_2} - v_{H_2O} \bar{s}_{H_2O} - v_{SO_2} \bar{s}_{SO_2} - v_{N_2} \bar{s}_{N_2} \right] \\ + \left[ v_{CO_2} \bar{e}_{CO_2}^{CH} + v_{H_2O} \bar{e}_{H_2O}^{CH} + v_{SO_2} \bar{e}_{SO_2}^{CH} + v_{N_2} \bar{e}_{N_2}^{CH} - v_{O_2} \bar{e}_{O_2}^{CH} \right] \quad (79)$$

Eşitlik (79)' daki  $(HHV)_{DAF}$  değeri, eğer elde deneysel bir değer yoksa, MJ / kg cinsinden aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$(HHV)_{DAF} = [152.19H + 98.767] \left[ \frac{C}{3} + H - \frac{O - S}{8} \right] \quad (80)$$

Buradaki kütle fraksiyonları H, C, O ve S; Tablo 2' den alınır.



Tablo 1. Türkiye'deki bazı kömürlerin nitelikleri (Havada kuru) [ 26-32 ].

Bölge	Türü	NİTELİKLER										
		Rutubet (%)	Kül (%)	Uçucu madde (%)	Sabit karbon (%)	Üst ısı değeri (cal / gr)	Alt ısı değeri (cal / gr)	Karbon C (%)	Hidrojen H (%)	Oksijen O (%)	Azot N (%)	Kükürt S (%)
Armutçuk	Taş kömürü	2.2	9.3	34.2	54.3	7250	7050	75.1	4.1	7.2	1.2	0.9
Amasra	Taş kömürü	3.0	14.1	35.5	47.4	6250	6050	70.1	4.0	6.1	1.2	1.5
Zonguldak	Taş kömürü	2.0	13.2	27.7	57.1	7150	6950	75.1	3.8	4.1	1.0	0.8
Çatalağzı	Taş kömürü	2.1	13.1	27.9	56.9	7150	6950	75.0	4.0	4.0	1.0	0.8
Tunçbilek	Linyit	20.1	8.3	32.8	38.8	3250	3000	51.4	3.9	12.1	1.9	2.3
Beypazarı	Linyit	12.9	22.4	35.0	29.7	2800	2500	40.4	3.4	13.6	1.4	5.9
Yatağan	Linyit	26.3	16.8	28.7	28.2	2750	2500	37.2	2.9	12.8	0.9	3.1
Afşin	Linyit	45.7	17.5	27.5	9.3	1200	1050	18.7	2.0	13.2	1.5	1.4
Çayırhan	Linyit	13.8	16.3	39.1	30.8	3750	3500	38.9	3.3	20.0	1.7	6.0
Soma	Linyit	16.0	14.0	32.9	37.1	2500	2200	43.8	3.6	18.9	1.9	1.8
Çan	Linyit	16.0	7.5	39.3	37.2	3200	2950	51.0	3.9	15.6	1.3	4.7
Sorgun	Linyit	7.0	13.8	35.2	44.0	4400	4100	55.8	3.3	10.0	1.6	8.5

Tablo 2. Bazı Türk kömürlerinin bileşimleri

Bölge	Cinsi	Kabul edilen kütle fraksiyonu (%)										Kuru ve külsüz (DAF)									
		C	H	O	N	S	Kül	Su	C	H	O	N	S	c	h	o	n	s			
		Kütle fraksiyonu (%)										Kmol /kg (DAF)									
Armutçuk	Taşkömrü	75.1	4.1	7.2	1.2	0.9	9.3	2.2	84.9	4.6	8.1	1.4	1.0	0.07075	0.04600	0.00506	0.00100	0.000310			
Amasra		70.1	4.0	6.1	1.2	1.5	14.1	3.0	84.6	4.8	7.4	1.4	1.8	0.07050	0.04800	0.00463	0.00100	0.000560			
Zonguldak	Linyit	75.1	3.8	4.1	1.0	0.8	13.2	2.0	88.6	4.5	4.8	1.2	0.9	0.07383	0.04500	0.00300	0.00086	0.000280			
Çatalağzı		75.0	4.0	4.0	1.0	0.8	13.1	2.1	88.5	4.7	4.7	1.2	0.9	0.07375	0.04700	0.00294	0.00086	0.000280			
Tunçbilek		51.4	3.9	12.1	1.9	2.3	8.3	20.1	71.8	5.4	16.9	2.7	3.2	0.05983	0.05400	0.01056	0.00193	0.001000			
Beypazarı		40.4	3.4	13.6	1.4	5.9	22.4	12.9	62.4	5.3	21.0	2.2	9.1	0.05200	0.05300	0.01312	0.00157	0.002844			
Çayırhan		38.9	3.3	20.0	1.7	6.0	16.3	13.8	55.7	4.7	28.6	2.4	8.6	0.04642	0.04700	0.01788	0.00171	0.002688			
Afşin		18.7	2.0	13.2	1.5	1.4	17.5	45.7	50.8	5.4	35.9	4.1	3.8	0.04233	0.05400	0.02244	0.00293	0.001188			
Soma		43.8	3.6	18.9	1.9	1.8	14.0	16.0	62.6	5.1	27.0	2.7	2.6	0.05217	0.05100	0.01688	0.00193	0.000812			
Yatağan		37.2	2.9	12.8	0.9	3.1	16.8	26.3	65.4	5.1	22.5	1.6	5.4	0.05450	0.05100	0.01406	0.00114	0.001688			
Çan		51.0	3.9	15.6	1.3	4.7	7.5	16.0	66.7	5.1	20.4	1.7	6.1	0.05558	0.05100	0.01275	0.00121	0.001906			
Sorgun		55.8	3.3	10.0	1.6	8.5	13.8	7.0	70.5	4.2	12.6	2.0	10.7	0.05875	0.04200	0.00788	0.00143	0.003344			

Kuru ve külsüz kömür için mutlak entropi, KJ / Kg . K cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$s_{DAF} = c \left[ 37.1653 - 31.4767 \exp \left( -0.564682 \frac{h}{c+n} \right) + 20.1145 \frac{o}{c+n} \right. \\ \left. + 54.3111 \frac{n}{c+n} + 44.6712 \frac{s}{c+n} \right] \quad (81)$$

Buradaki c, h, o, n ve s; Tablo 2' den alınmaktadır.

$p_o$  (1 atm) ve  $p_{ref}$  (1 bar) arasındaki küçük farkın ihmal edilmesiyle, yakıtların ekserji değerlerinin hesaplanması için gerekli mutlak entropi değerleri Tablo 3'de aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \bar{s}_{O_2} &= 205.15 \text{ KJ / kmol.K} & \bar{s}_{CO_2} &= 213.79 \text{ KJ / kmol.K} \\ \bar{s}_{H_2O} &= 69.95 \text{ KJ / kmol.K} & \bar{s}_{SO_2} &= 284.09 \text{ KJ / kmol.K} \\ \bar{s}_{N_2} &= 191.61 \text{ KJ / kmol.K} & & \end{aligned} \quad (82)$$

Tablo 3. Çeşitli maddelerin 1 bar basınçta spesifik ısı, entalpi, mutlak entropi ve gibbs fonksiyonunun sıcaklıkla değişimi (kJ / kmol veya kJ / kmol.K) [ 13 ].

1. Sıcaklığın $T_{ref} = 298.15 \text{ K}$ ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), basıncın $p_{ref} = 1 \text{ bar}$ olduğu şartlarda					
Madde	Formül	$\bar{c}_p^\circ$ kJ / kmol.K	$\bar{h}^\circ$ kJ / kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ / kmol.K	$\bar{g}^\circ$ kJ / kmol
Karbon (grafit)	C (s)	8.53	0	5.740	- 1711
Kükürt	S (s)	22.77	0	32.058	- 9558
Azot	N <sub>2</sub> (g)	28.49	0	191.610	- 57128
Oksijen	O <sub>2</sub> (g)	28.92	0	205.146	- 61164
Hidrojen	H <sub>2</sub> (g)	29.13	0	130.679	- 38961
Karbon monoksit	CO (g)	28.54	- 110528	197.648	- 169457
Karbon dioksit	CO <sub>2</sub> (g)	35.91	- 393521	213.794	- 457264
Su (gaz)	H <sub>2</sub> O (g)	31.96	- 241856	188.824	- 298153
Su (sıvı)	H <sub>2</sub> O (l)	75.79	- 285829	69.948	- 306685
Metan	CH <sub>4</sub> (g)	35.05	- 74872	186.251	- 130403
Kükürt dioksit	SO <sub>2</sub> (g)	39.59	- 296833	284.094	- 370803
Hidrojen sülfür	H <sub>2</sub> S (g)	33.06	- 20501	205.757	- 81847
Amonyak	NH <sub>3</sub> (g)	35.59	- 46111	192.451	- 103491

2. Sıcaklık  $298.15 < T \leq T_{\max}$ , basınç  $p_{\text{ref}} = 1$  bar ve  $y = 10^{-3} T$  durumları için

$$\bar{c}_p^\circ = a + by + cy^{-2} + dy^2 \quad (83)$$

$$\bar{h}^\circ = 10^3 \left[ H^+ + ay + \frac{b}{2}y^2 - cy^{-1} + \frac{d}{3}y^3 \right] \quad (84)$$

$$\bar{s}^\circ = S^+ + a \ln T + by - \frac{c}{2}y^{-2} + \frac{d}{2}y^2 \quad (85)$$

$$\bar{g}^\circ = \bar{h}^\circ - T\bar{s}^\circ \quad (86)$$

Tablo 4' de (83), (84), (85), (86) eşitlikleri için gerekli  $H^+$ ,  $S^+$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ve  $d$  sabitleri verilmiştir. Maksimum sıcaklık,  $T_{\max}$ , C(s) için 1100 K; S(s) için 368 K; H<sub>2</sub>O(l) için 500 K; CH<sub>4</sub>(g), SO<sub>2</sub>(g) ve H<sub>2</sub>S(g) için 2000 K; NH<sub>3</sub>(g) için 1500 K ve geriye kalan diğer bütün maddeler için 3000 K' dir.  $p$  basıncının  $p_{\text{ref}} = 1$  bar' dan farklı olduğu hallerdeki mutlak entropiyi yaklaşık olarak hesaplamak için referans 13' de verilmiş olan (87), (88) eşitlikleri kullanılabilir.

Tablo 4. Bazı maddeler için  $H^+$ ,  $S^+$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  sabitleri [ 13 ].

Madde	Formül	$H^+$	$S^+$	$a$	$b$	$c$	$d$
Karbon (grafit)	C (s)	-2.101	-6.540	0.109	38.940	-0.146	-17.385
Kükürt	S (s)	-5.242	-59.014	14.795	24.075	0.071	0
Azot	N <sub>2</sub> (g)	-9.982	16.203	30.418	2.544	-0.238	0
Oksijen	O <sub>2</sub> (g)	-9.589	36.116	29.154	6.477	-0.184	-1.017
Hidrojen	H <sub>2</sub> (g)	-7.823	-22.966	26.882	3.586	0.105	0
Karbon monoksit	CO (g)	-120.809	18.937	30.962	2.439	-0.280	0
Karbon dioksit	CO <sub>2</sub> (g)	-413.886	-87.078	51.128	4.368	-1.469	0
Su	H <sub>2</sub> O (g)	-253.871	-11.750	34.376	7.841	-0.423	0
Su	H <sub>2</sub> O (l)	-289.932	-67.147	20.355	109.198	2.033	0
Metan	CH <sub>4</sub> (g)	-81.242	96.731	11.933	77.647	0.142	-18.414
Kükürt dioksit	SO <sub>2</sub> (g)	-315.422	-43.725	49.936	4.766	-1.046	0
Hidrojen sülfür	H <sub>2</sub> S (g)	-32.887	1.142	34.911	10.686	-0.448	0
Amonyak	NH <sub>3</sub> (g)	-60.244	-29.402	37.321	18.661	-0.649	0

$$\bar{s}(T,p) = \bar{s}^{\circ}(T) - \bar{R} \ln \frac{p}{p_{ref}} \quad (\text{ideal gaz}) \quad (87)$$

$$\bar{s}_k(T,p_k) = \bar{s}_k^{\circ}(T) - \bar{R} \ln \frac{x_k}{p_{ref}} \quad (88)$$

Tablo 5. Çeşitli maddelerin 298.15 K ve  $p_0$ ' da standart molar kimyasal ekserjileri [ 13 ].

Madde	Formül	Model 1	Model 2
Azot	N <sub>2</sub> (g)	639	720
Oksijen	O <sub>2</sub> (g)	3,951	3,970
Karbon dioksit	CO <sub>2</sub> (g)	14,176	19,870
Su	H <sub>2</sub> O (g)	8,636	9,500
Su	H <sub>2</sub> O (l)	0,045	900
Karbon (grafit)	C (s)	404,589	410,260
Hidrojen	H <sub>2</sub> (g)	235,249	236,100
Kükürt	S (s)	598,158	609,600
Karbon monoksit	CO (g)	269,412	275,100
Kükürt dioksit	SO <sub>2</sub> (g)	301,939	313,400
Azot monoksit	NO (g)	88,851	88,900
Azot dioksit	NO <sub>2</sub> (g)	55,565	55,600
Hidrojen peroksit	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	133,587	-
Hidrojen sülfür	H <sub>2</sub> S	799,890	812,000
Amonyak	NH <sub>3</sub> (g)	336,684	337,900
Oksijen	O (g)	231,968	233,700
Hidrojen	H (g)	320,822	331,300
Azot	N (g)	453,821	-
Metan	CH <sub>4</sub> (g)	824,348	831,650
Asetilen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	-	1,265,800
Etilen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	-	1,361,100
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	1,482,033	1,495,840
Propilen	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)	-	2,003,900
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	-	2,154,000
n- Bütan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	-	2,805,800
n- Pentan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	-	3,463,300
Benzen	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)	-	3,303,600
Oktan	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l)	-	5,413,100
Metanol	CH <sub>3</sub> OH(g)	715,069	722,300
Metanol	CH <sub>3</sub> OH (l)	710,747	718,000
Etil alkol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (g)	1,348,328	1,363,900
Etil alkol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (l)	1,342,086	1,375,700

(78) , (81) , (82) eşitliklerinden elde edilen değerlerden yararlanılarak (79) eşitliğinin birinci parantezli teriminin değeri bulunur.

Eşitlik (79)' un ikinci parantezli teriminin değerini bulmak için Tablo 5' de verilen model 1 deki verilerden yararlanır.

$$e_{O_2}^{-CH} = 3.951 \text{ MJ / kmol}$$

$$e_{CO_2}^{-CH} = 14.176 \text{ MJ / kmol}$$

$$e_{H_2O}^{-CH} = 0.045 \text{ MJ / kmol}$$

$$e_{SO_2}^{-CH} = 301.939 \text{ MJ / kmol}$$

$$e_{N_2}^{-CH} = 0.639 \text{ MJ / kmol}$$

(89)

Böylece, (79) eşitliğinin ikinci parantezli terimi bulunmuş olur.

Son olarak, elde ettiğimiz tüm değerleri (79) eşitliğinde yerine koyduğumuzda ve  $T_0 = 298.15 \text{ K}$  olarak aldığımızda seçmiş olduğumuz kömürlerin kimyasal ekserjilerini MJ / kg (DAF) cinsinden hesaplamış oluruz.

Kömürün spesifik kimyasal ekserjisi ise aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$e^{CH} = (\%m_{DAF}) \cdot e_{DAF}^{-CH} + (\%m_{H_2O} / M_{H_2O}) \cdot e_{H_2O(l)}^{-CH} \quad (90)$$

Bu formülde,

$e^{CH}$  = yakıtın spesifik kimyasal ekserjisi

$\%m_{DAF}$  = Kuru ve külsüz yakıtın yüzde bileşimi

$e_{DAF}^{-CH}$  = Kuru ve külsüz yakıtın kimyasal eksejisi

$\%m_{H_2O}$  = Yakıtta bulunan suyun yüzde bileşimi

$M_{H_2O}$  = Suyun molekül ağırlığı

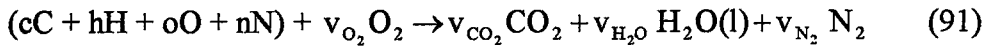
$e_{H_2O(l)}^{-CH}$  = Suyun (sıvı) standart molar kimyasal ekserjisi

Kömürler için gerekli değerler yerine konduğunda her bir kömür için spesifik kimyasal ekserji değerleri bulunur. Bu hesaplamalar yapılırken suyun ve külün kimyasal ekserjileri ihmal edilmiştir.

### 2.3. Odunun ( Biyokütle ) Kimyasal Ekserjisinin Hesaplanması

Bu kısımda, kimyasal bileşimi Tablo 6' da verilen odunların kimyasal ekserjilerinin hesaplanması ile ilgili ekserji hesaplamaları tartışılacaktır [ 21-25 ].

Odunun kimyasal ekserjisini hesaplariken, kömür için kullandığımız yaklaşımlardan yararlanırız. Gerek kömür, gerek odun, gerek ise fuel-oil için yapacağımız hesaplamalarda yakıt içerisindeki bileşimi binde birden daha düşük olan bileşimler ihmal edilerek hesaplar yapılacaktır. Dolayısıyla, odunun kimyasal ekserjisini hesaplariken odunun çok düşük olan kükürt içeriğini ihmal edeceğiz. Odunun yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.



Bu formüldeki c, h, o ve n değerleri kmol / kg' da (DAF), Tablo 6' dan sağlanır. Reaksiyonun dengelenmesi ile,

$$v_{CO_2} = c, \quad v_{H_2O} = 1/2h, \quad v_{N_2} = 1/2n, \quad v_{O_2} = 1/4h + c - 1/2o \quad (92)$$

Bu durumda, Eşitlik (53) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$e_{DAF}^{CH} = (HHV)_{DAF} - T_0 \left[ s_{DAF} + v_{O_2} \bar{s}_{O_2} - v_{CO_2} \bar{s}_{CO_2} - v_{H_2O} \bar{s}_{H_2O} - v_{N_2} \bar{s}_{N_2} \right] \\ + \left[ v_{CO_2} \bar{e}_{CO_2}^{CH} + v_{H_2O} \bar{e}_{H_2O}^{CH} + v_{N_2} \bar{e}_{N_2}^{CH} - v_{O_2} \bar{e}_{O_2}^{CH} \right] \quad (93)$$

Bu eşitlikteki  $(HHV)_{DAF}$  değeri, kömürde olduğu gibi Eşitlik (80)' den hesaplanır. Odundaki kükürt bileşeni ihmal edildiğinden S (kükürt) = 0 alınır. Eşitlik (80)' daki H, C ve O değerleri Tablo 6' dan sağlanır.

Kuru ve külsüz odun için (DAF) mutlak entropi  $s_{DAF}$ , KJ / kg . K cinsinden Eşitlik (81)' den hesaplanır. Odundaki kükürt ihmal edildiğinden bu eşitlikteki  $44.6712 [ s / ( c + n ) ]$  terimi sıfır olarak alınır.

Kömürde olduğu gibi odunda da Eşitlik (79)' un birinci parantezli teriminin değerini bulmak için Tablo 3' deki verilerden, ikinci parantezli terimin değerini bulmak için ise Tablo 5' deki verilerden yararlanır ve  $T_0 = 298.15$  K alınır.



Tablo 6. Bazı odunların bileşimleri [ 21-25 ].

	Kabul edilen kütle fraksiyonu (%)										Kuru ve külsüz				
	Kütle fraksiyonu (%)										Kmol / kg (DAF)				
	C	H	O	N	KÜL	SU	C	H	O	N	c	h	o	n	
Huş ağacı	45.2	5.2	42.6	0.2	0.2	6.6	48.5	5.6	45.7	0.2	0.040417	0.056	0.028562	0.000143	
Söğüt ağacı	46.8	5.5	39.3	0.5	1.7	6.1	50.8	6.0	42.5	0.6	0.042333	0.060	0.026562	0.000428	
Şeker kamışı	43.7	5.7	42.7	0.3	1.6	6.0	47.3	6.2	46.2	0.3	0.039417	0.062	0.028875	0.000214	
Zeytin atığı	44.6	5.8	39.4	0.4	2.1	7.7	49.5	6.3	43.7	0.5	0.041250	0.063	0.027312	0.000357	
Saman yığını	40.8	5.3	40.3	0.4	6.2	7.0	47.0	6.1	46.4	0.5	0.039167	0.061	0.029000	0.000357	
Mısır koçanı	40.2	5.5	41.0	0.3	1.0	12.0	46.2	6.3	47.2	0.3	0.038500	0.063	0.029500	0.000214	
Zeytin kabuğu	45.5	5.3	35.3	1.3	3.6	9.0	52.1	6.0	40.4	1.5	0.043417	0.060	0.025250	0.001071	
Buğday samanı	38.5	4.9	35.4	0.2	8.0	13.0	48.7	6.2	44.8	0.3	0.040583	0.062	0.028000	0.000214	
Pirinç kabuğu	33.4	4.1	30.6	0.4	20.2	11.3	48.7	6.0	44.7	0.6	0.040583	0.060	0.027938	0.000428	
Pirinç samanı	33.4	4.6	32.3	0.8	18.7	10.2	47.0	6.4	45.5	1.1	0.039167	0.064	0.028438	0.000786	
Melez kavak	45.4	5.6	36.6	0.5	2.7	9.2	51.6	6.3	41.5	0.6	0.043000	0.063	0.025938	0.000428	
Pamuk sapı	39.9	5.3	39.8	0.5	6.7	7.8	46.7	6.2	46.5	0.6	0.038917	0.062	0.029062	0.000428	

Elde edilen bütün bu sonuçlar Eşitlik (79)' da yerine konulduğunda her bir odunun kimyasal ekserjisi bulunmuş olur.

Odunların spesifik kimyasal ekserjileri ise Eşitlik (90)' dan hesaplanır. Bu formül için gerekli değerler Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 9' dan sağlanır.

#### 2.4. Fuel oil' in Kimyasal Ekserjisinin Hesaplanması

Bu kısımda, bileşimi Tablo 7' de verilen bazı fuel-oil yakıtların kimyasal ekserjisinin hesaplanması ile ilgili ekserji hesaplamaları tartışılacaktır [ 33 ].

Kısım (2.3)' de belirtildiği gibi, yakıt içerisindeki yüzdeleri binde birden düşük olan bileşimler ihmal edildi. Dolayısıyla hesaplamalarda ele aldığımız fuel-oil yakıtların hepsinin kuru ve külsüz (DAF), bazısının ise kükürt, azot veya oksijen ihtiva etmediklerini kabul ederiz.

Fuel-oil' in kimyasal ekserjisini hesaplariken kömür için kullanılan yol izlenir. Fuel-oil'in yanma reaksiyonu Eşitlik (77)' deki gibi ifade edilir. Bu eşitlikteki c, h, o, n ve s değerleri kmol / kg cinsinden Tablo 7' dan sağlanır.

Fuel-oil' in kimyasal ekserjisi Eşitlik (79)' dan hesaplanır. Bu eşitlikteki  $(HHV)_{DAF}$  değerleri Eşitlik (80) ve Tablo 7' den yararlanılarak bulunur.

Fuel-oil' in mutlak entropisini KJ / kg.K cinsinden hesaplamak için Eşitlik (81) kullanılır. Bu formüldeki c, n, s, h ve o değerleri Tablo 7' den alınır.

Hesapladığımız diğer yakıtlarda olduğu gibi Eşitlik (79)' un birinci parantezli teriminin değerini bulmak için Tablo 3' deki verilerden, ikinci parantezli teriminin değerini bulmak için Tablo 5' deki verilerden yararlanılır. Yine  $T_0 = 298.15$  K alınır ve bulunan değerler yerine konur. Böylece, her bir odun için kimyasal ekserji değerleri bulunmuş olur.

Tablo 7. Bazı fuel-oil yakıtların bileşimleri [ 33 ].

	Kabul edilen kütle fraksiyonu										Kmol / kg				
	C	H	O	N	S	c	h	o	n	s					
Petrol kökenli fuel-oil yakıtlar	1 No'lu Fuel-oil (41.5° API)	86.40	13.60	0	0	0	0.072000	0.1360	0	0	0				
	2 No'lu Fuel-oil (33° API)	87.20	12.58	0	0	0.22	0.072667	0.1258	0	0	0.000069				
	4 No'lu Fuel-oil (23.2° API)	86.62	11.54	0.27	0.24	1.33	0.072183	0.1154	0.000169	0.000171	0.000416				
	Az kükürtlü 6 No'lu F.O. (12.8° API)	87.69	10.54	0.64	0.28	0.85	0.073075	0.1054	0.000400	0.000200	0.000266				
	Çok kükürtlü 6 No'lu F.O. (15.5° API)	84.48	11.00	0.38	0.18	3.96	0.070400	0.1100	0.000238	0.000128	0.001238				
Kömür kökenli fuel-oil yakıtlar	H-Coal oil, ASO	87.18	10.51	1.60	0.38	0.33	0.072650	0.1051	0.001000	0.000271	0.000103				
	H-Coal oil, ASB	87.80	10.00	1.60	0.44	0.16	0.073167	0.1000	0.001000	0.000314	0.000050				
	H-Coal oil, ASB( yapay ham )	87.84	10.10	1.60	0.34	0.12	0.073200	0.1010	0.001000	0.000243	0.000038				

### 3. BULGULAR

Bölüm 2.2' de verilen hesaplama yöntemi kullanılarak bazı taşkömürü ve linyitlerin  $(HHV)_{DAF}$ ,  $e_{DAF}^{CH}$  ve  $e^{CH}$  değerleri hesaplanarak Tablo 8 ve Şekil 6,7,8' de verilmiştir.

Bölüm 2.3' de verilen hesaplama yöntemi kullanılarak bazı odun ve biyokütle türleri için  $(HHV)_{DAF}$ ,  $e_{DAF}^{CH}$  ve  $e^{CH}$  değerleri hesaplanarak Tablo 9 ve Şekil 9,10,11' de verilmiştir.

Bölüm 2.4' de verilen hesaplama yöntemi kullanılarak bazı fuel-oil yakıtlar için  $(HHV)_{DAF}$  ve  $e_{DAF}^{CH}$  değerleri hesaplanarak Tablo 10 ve Şekil 12,13' de verilmiştir.

Tablo 8. Bazı Türk kömürlerinin  $s_{DAF}$ ,  $(HHV)_{DAF}$ ,  $e_{DAF}^{CH}$  ve  $e^{CH}$  değerleri

Bölge	Cinsi	$s_{DAF}$ KJ /Kg (DAF).K	$(HHV)_{DAF}$ MJ / Kg (DAF)	$(HHV)_{DAF}$ cal / gr	$e_{DAF}^{CH}$ MJ / Kg (DAF)	$e_{DAF}^{CH}$ cal / gr	$e^{CH}$ MJ / Kg (DAF)	$e^{CH}$ cal / gr
Armutçuk	Taşkömürü	1.246539	33.858898	8100.2148	34.418732	8234.1464	30.460633	7287.2328
Amasra	Taşkömürü	1.271339	34.261295	8196.4821	34.865258	8340.9708	28.903374	6914.6828
Zonguldak	Taşkömürü	1.208396	35.429616	8475.9847	35.964998	8604.0665	30.498368	7296.2603
Çatalağzı	Taşkömürü	1.231431	35.721496	8545.8124	36.235375	8668.7500	30.727650	7351.1124
Tunçbilek	Linyit	1.424758	29.550220	7069.4306	30.297875	7248.2954	21.693781	5189.8998
Beypazarı	Linyit	1.458665	26.294289	6290.4998	27.603039	6603.5978	17.859488	4272.6048
Çayırhan	Linyit	1.435656	21.996039	5262.2103	23.383744	5594.1971	16.345582	3910.4263
Afşin	Linyit	1.514550	19.600591	4689.1366	20.573579	4921.9089	7.572219	1811.5356
Soma	Linyit	1.437972	24.412825	5840.3888	25.188569	6025.9734	17.632398	4218.2770
Yatağan	Linyit	1.414683	26.379167	6310.8055	27.391193	6552.9170	15.586246	3728.7670
Çan	Linyit	1.408122	27.213642	6510.4407	28.269124	6762.9483	21.625880	5173.6555
Sorgun	Linyit	1.312913	28.879285	7090.9199	30.368128	7265.1024	24.051732	5754.0029

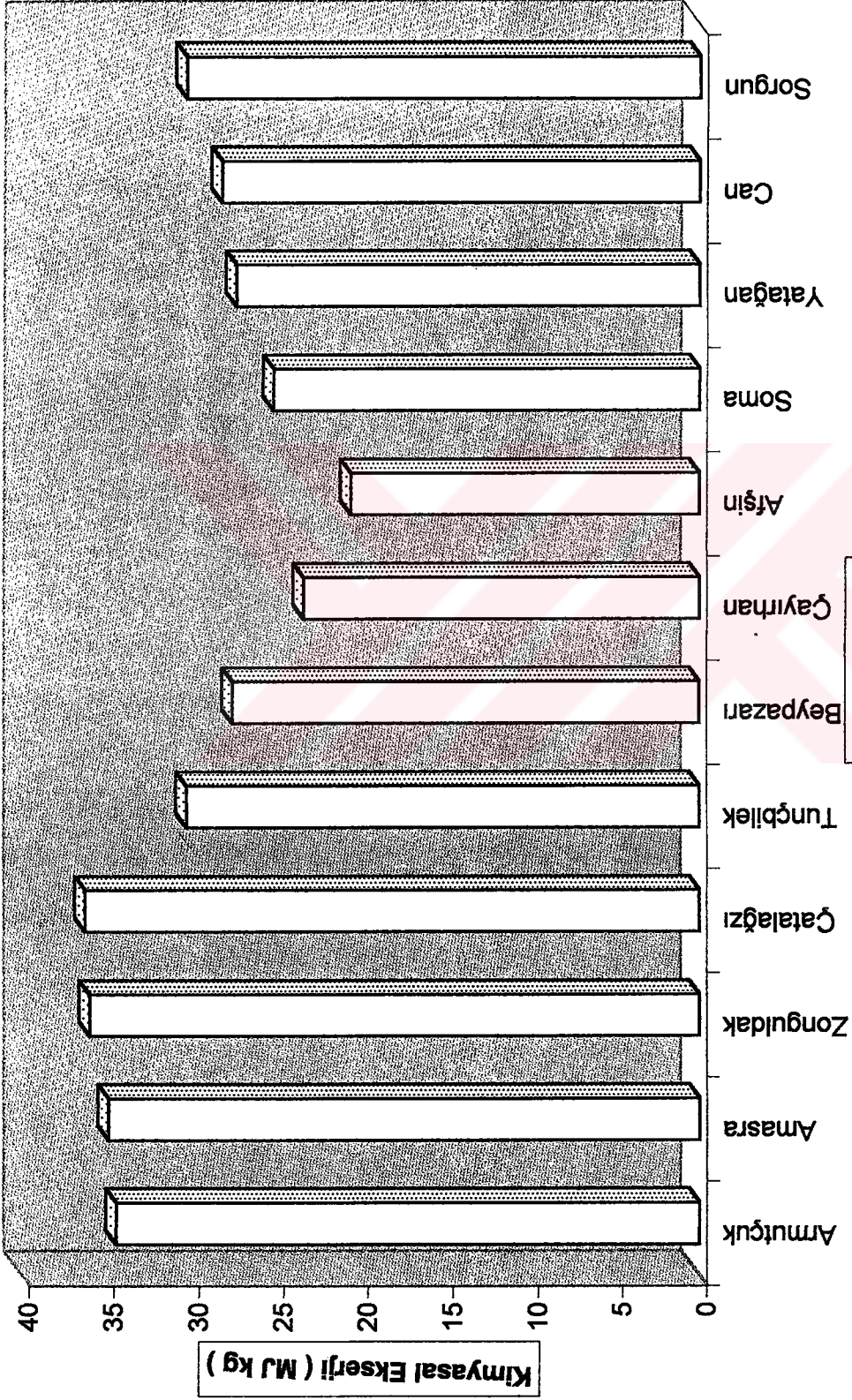
Tablo 9. Bazı odunların  $s_{DAF}$ ,  $(HHV)_{DAF}$ ,  $e_{DAF}^{CH}$  ve  $e^{CH}$  değerleri

	$s_{DAF}$ KJ / Kg(DAF).K	$(HHV)_{DAF}$ MJ / Kg (DAF)	$(HHV)_{DAF}$ cal / gr	$e_{DAF}^{CH}$ MJ / Kg (DAF)	$e_{DAF}^{CH}$ cal / gr	$e^{CH}$ MJ / Kg (DAF)	$e^{CH}$ cal / gr
Huş ağacı	1.498942	17.224450	4120.6818	17.902593	4282.9170	16.685382	3991.7182
Söğüt ağacı	1.521924	19.012597	4548.4682	19.628186	4695.7383	18.097340	4329.5072
Şeker kamışı	1.541296	17.519833	4191.3476	18.149787	4342.0543	16.770553	4012.0940
Zeytin atığı	1.544764	18.786043	4494.2687	19.385811	4637.7538	17.487925	4183.7141
Saman yığını	1.537194	17.252077	4127.2911	17.894053	4280.8739	15.532213	3715.8404
Mısır koçanı	1.549050	17.120085	4095.7141	17.750508	4246.5330	15.443242	3694.5555
Zeytin kabuğu	1.527918	19.763318	4728.0665	20.366880	4872.4593	17.800878	4258.5833
Buğday samanı	1.538541	18.214134	4357.4483	18.831346	4505.1067	14.877088	3559.1120
Pirinç kabuğu	1.528206	17.960588	4296.7914	18.596702	4448.9718	12.739023	3047.6132
Pirinç samanı	1.559304	17.772561	4251.8089	18.384581	4398.2251	13.071692	3127.1990
Melez kavak	1.541094	19.842504	4747.0105	20.423112	4885.9120	17.992991	4304.5433
Pamuk sapı	1.544432	17.262851	4129.8687	17.897738	4281.7555	15.302761	3660.9476

Tablo 10. Bazı fuel-oil yakıtların  $V_{CO_2}$ ,  $V_{H_2O}$ ,  $V_{SO_2}$ ,  $V_{N_2}$ ,  $V_{O_2}$ ,  $S_{DAF}$ ,  $(HHV)_{DAF}$ ,  $e_{DAF}^{CH}$  değerleri

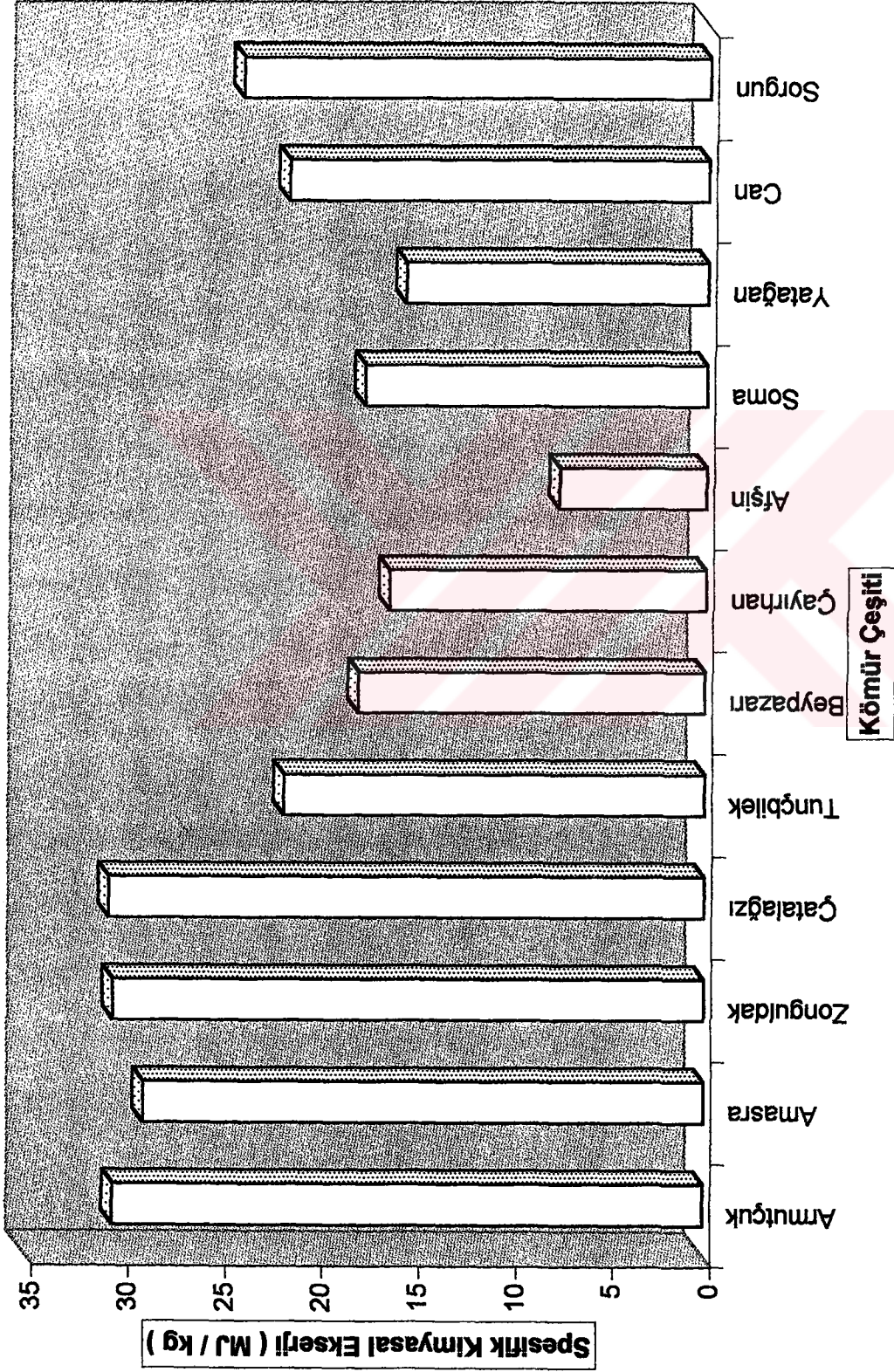
	$V_{CO_2}$	$V_{H_2O}$	$V_{SO_2}$	$V_{N_2}$	$V_{O_2}$	$S_{DAF}$	$(HHV)_{DAF}$ MJ / Kg (DAF)	$(HHV)_{DAF}$ cal / gr	$e_{DAF}^{CH}$ MJ / Kg (DAF)	$e_{DAF}^{CH}$ cal / gr
1 No'lu Fuel-oil (41.5° API)	0.072000	0.06800	0	0	0.106000	1.895903	50.65309	12113.66	50.21678	12013.58
	0.072667	0.06290	0.000069	0	0.104186	1.843228	52.34922	12523.74	52.01879	12444.69
	0.072183	0.05770	0.000416	0.000086	0.101364	1.790722	47.16686	11283.94	47.02858	11250.86
	0.073075	0.05270	0.000266	0.000100	0.099491	1.725614	45.68921	10930.43	45.60012	10909.12
Çok kükürlü 6 No'lu Fuel-oil (12.8° API)	0.070400	0.05500	0.001238	0.000064	0.099019	1.764872	45.74979	10944.93	45.89311	10979.21
	0.072650	0.05255	0.000103	0.000136	0.098528	1.725980	45.22920	10820.38	45.10552	10790.79
H-Coal oil, ASO	0.073167	0.05000	0.000050	0.000157	0.097717	1.690533	44.55333	10658.69	44.46073	10636.54
	0.073200	0.05050	0.000038	0.000122	0.097988	1.695543	44.73646	10702.50	44.63108	10677.29



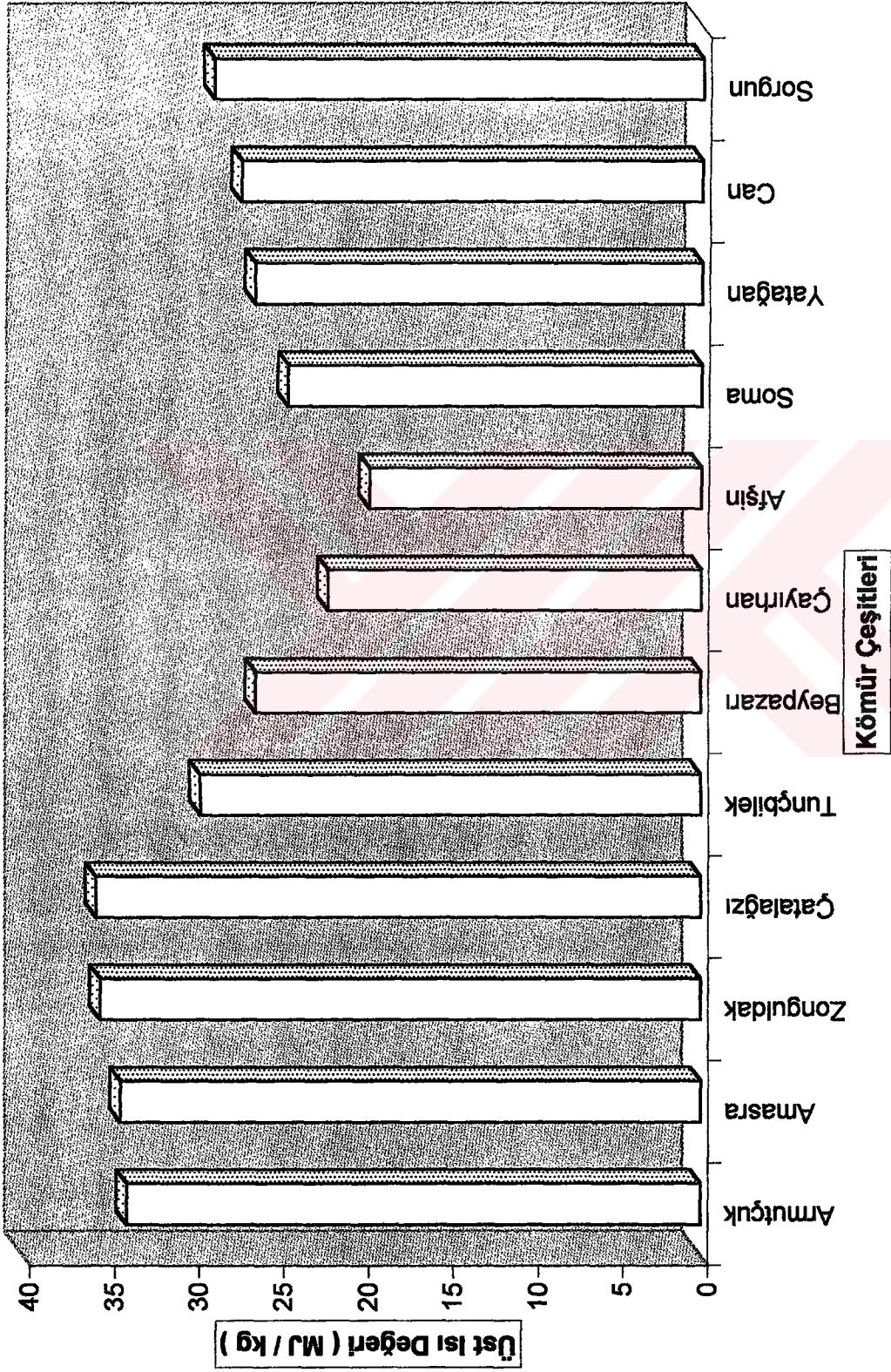


Şekil 6. Bazı kömürlerin kımyasal eksjerji değerleri



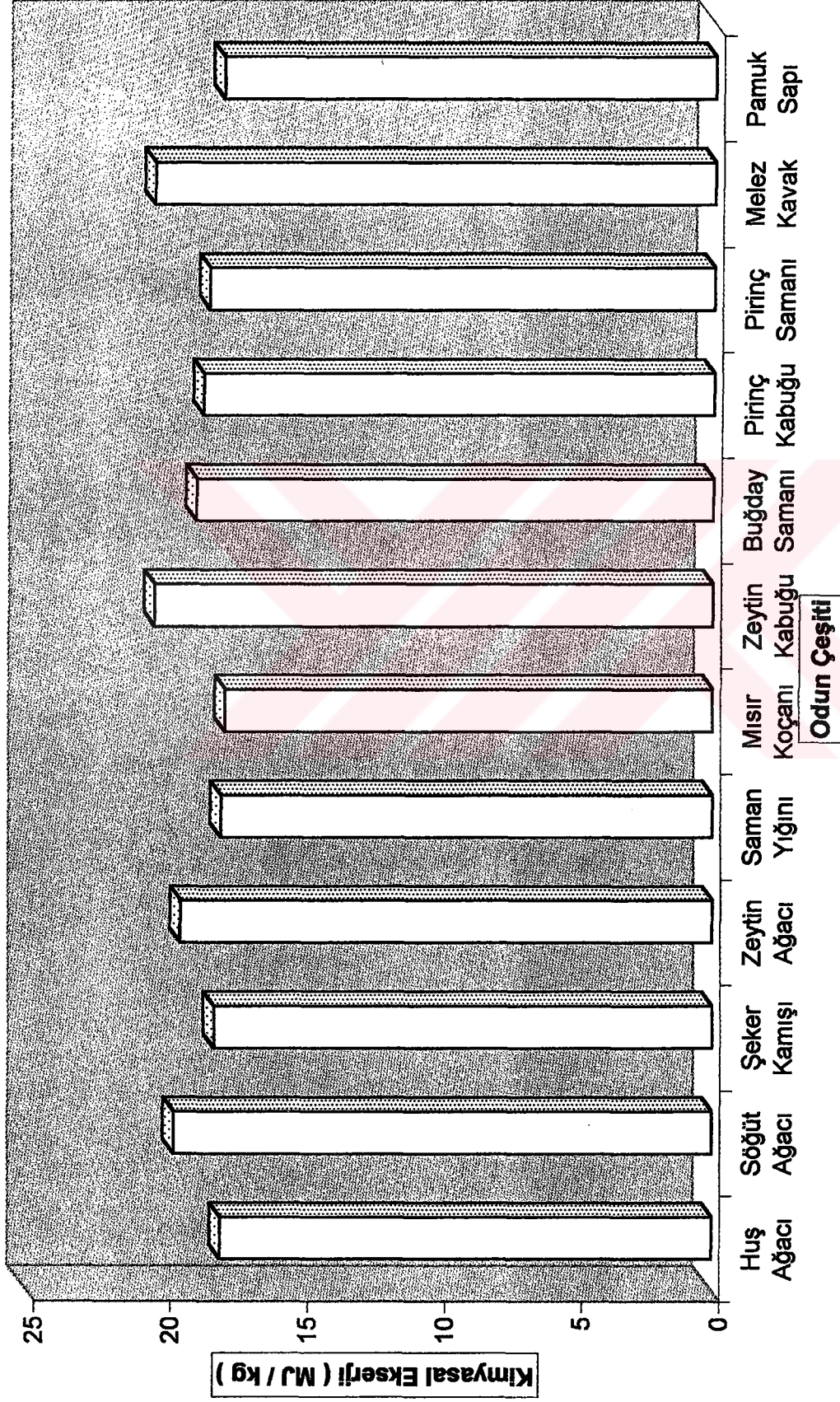


Şekil 7. Bazı kömürlerin spesifik kimyasal ekserji değerleri

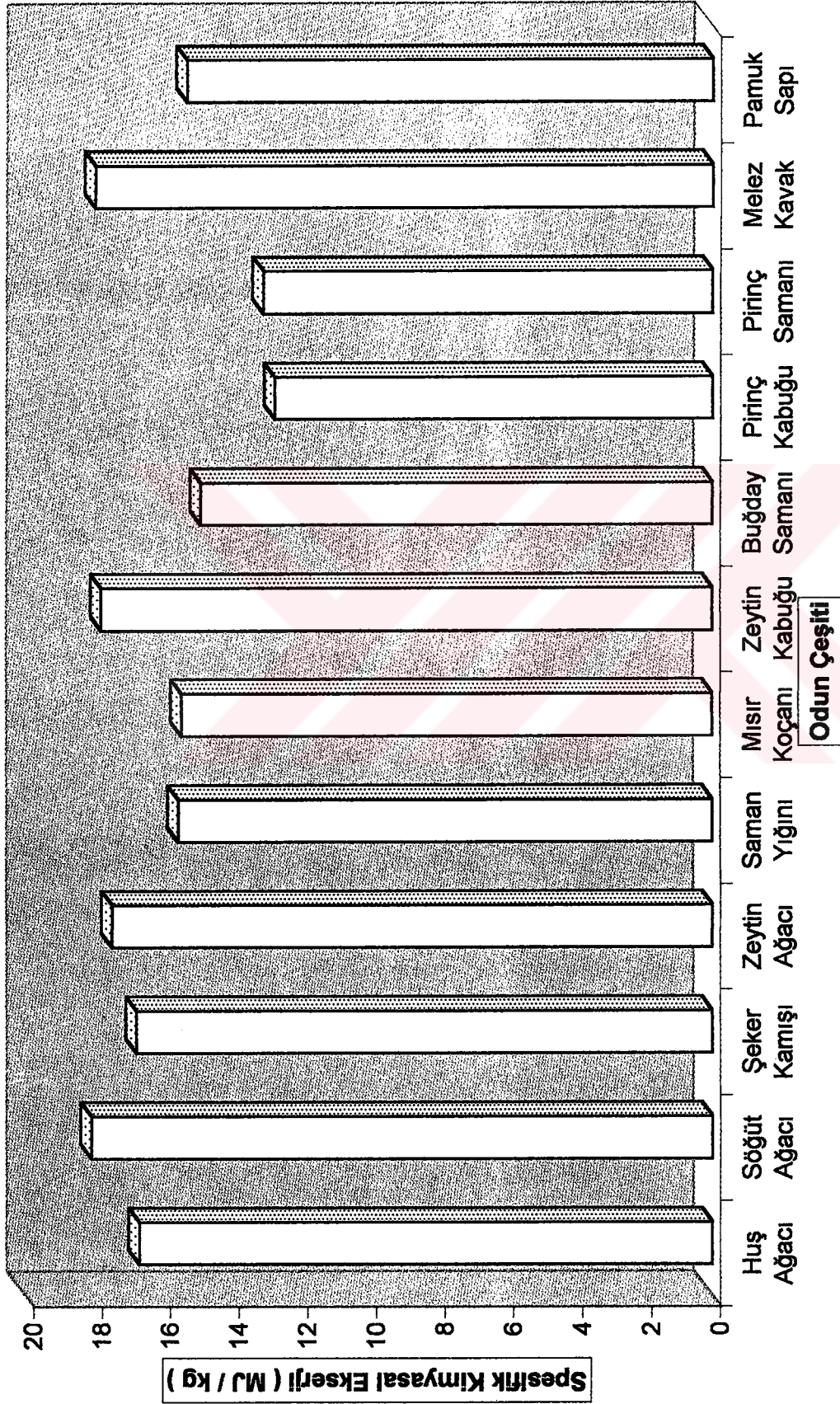


Şekil 8. Bazı kömürlerin üst ısı değerleri



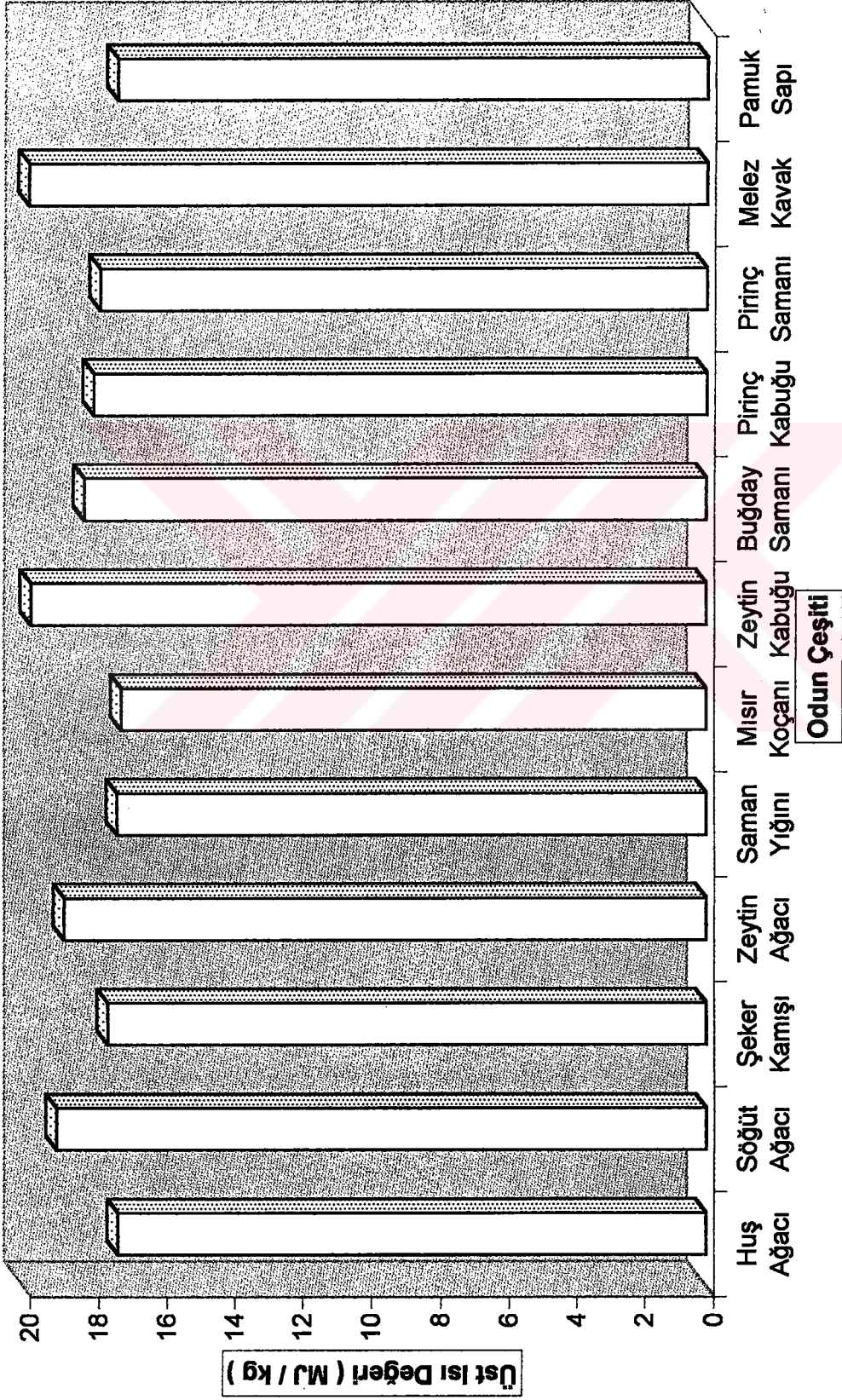


Şekil 9. Bazı odunların kımyasal ekserji değerleri

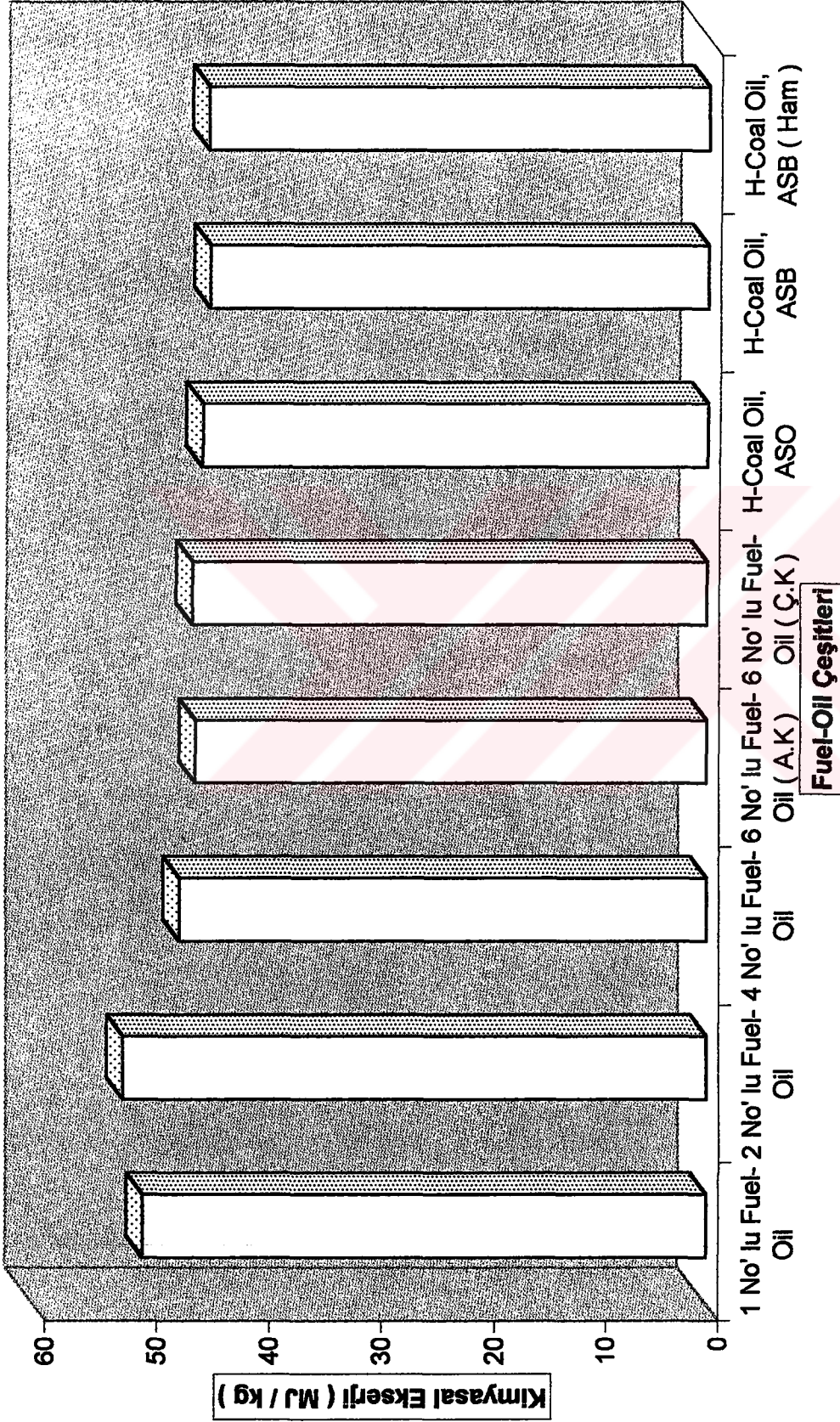


Şekil 10. Bazı odunların spesifik kimyasal ekserji değerleri



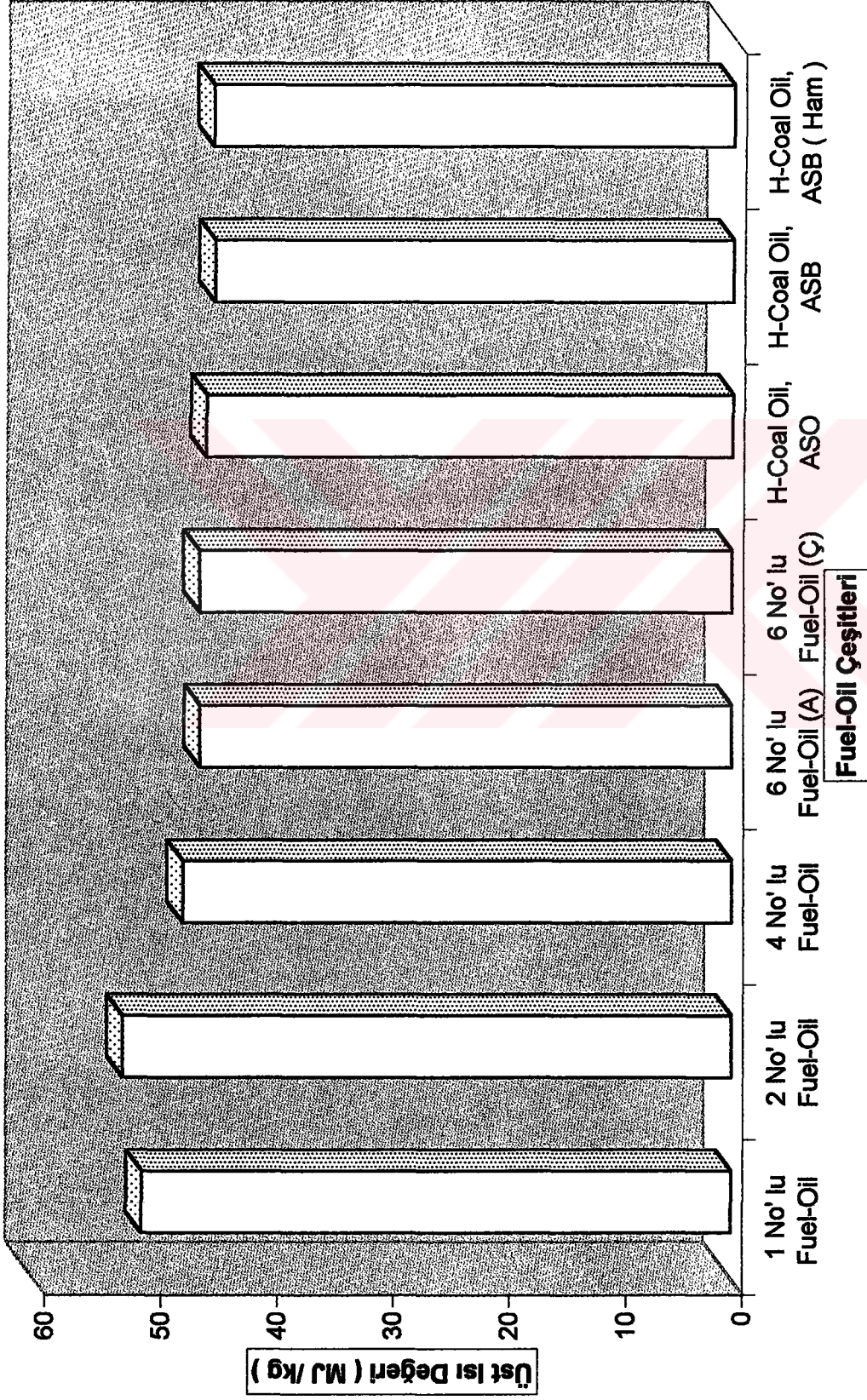


Şekil 11. Bazı odunların üst ısı değerleri



Şekil 12. Bazı fuel-oil yakıtların kimyasal ekserji değerleri





Şekil 13. Bazı fuel-oil yakıtların üst ısı değerleri

## 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

### 4.1. Taşkömürü ve Linyitler İçin Hesaplanan Değerler

Bu çalışmada Armutçuk, Amasra, Zonguldak ve Çatalağzı bölgesinden çıkarılan taşkömürleri ile Tunçbilek, Beypazarı, Çayırhan, Afşin, Soma, Yatağan, Çan ve Sorgun yöresinden çıkarılan linyit kömürlerinin kuru ve külsüz bazdaki üst ısı değerleri, kimyasal ekserji ve spesifik ekserji değerleri hesaplanarak Tablo 8' de verilmiştir. Ekserji değerlerinin hesaplanmasında kullanılan % C, H, O, N ve S değerleri literatürden ve bunlara bağlı c, h, o, n ve s değerleri ise hesaplanarak Tablo 2' de verilmiştir. Tablo 8' de verilen kuru ve külsüz (DAF) taşkömürü ve linyitlerin hesaplanan üst ısı değerlerine bakıldığında en yüksek değerleri taşkömürleri, düşük değerleri ise linyit kömürleri göstermektedir. Örneğin; Çatalağzı taşkömürünün üst ısı değeri 8545.81 cal / g olarak hesaplanmış iken Armutçuk bölgesi taşkömürünün üst ısı değeri 8100.21 cal / g olarak hesaplanmıştır. Taş kömürlerin kimyasal yapılarının farklı olması doğal olarak üst ısı değerlerinin de farklı olmasına sebep olmaktadır. Yine bu kömürlerin hesaplanan kimyasal ve spesifik ekserji değerleri Çatalağzı taşkömürü için sırasıyla 8668.75 ve 7351.11 cal / g iken, Armutçuk taşkömürü için bu değerler sırasıyla 8234.14 ve 7287.23 cal / g olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında; en yüksek kimyasal ve spesifik ekserji değerleri en yüksek üst ısı değerlerine sahip kömürlerde görülmektedir. Taş kömürlerinin kuru bazda kimyasal yapılarına bakıldığında, Çatalağzı kömürünün oksijen yüzdesinin diğer taş kömürlerine göre en düşük değerde olması ekserji değerlerinin yüksek çıkmasını sağlamıştır. Bu durum bize Çatalağzı taş kömürünün ekserji analizi açısından en iyi sonucu verdiğini göstermektedir.

Linyit kömürlere baktığımızda da benzer yaklaşımların sağlandığı görülmektedir. Örneğin; Sorgun linyitinin üst ısı değeri 7090.42 cal / gr olarak hesaplanmış iken Afşin linyitinin üst ısı değeri 4689.14 cal / gr olarak hesaplanmıştır. Yine bu linyitlerin hesaplanan kimyasal ve spesifik kimyasal ekserji değerleri Sorgun linyiti için sırasıyla 7265.10 ve 5754.00 cal / gr iken, Afşin linyiti için bu değerler sırasıyla 4921.91 ve 1811.54 cal / gr olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında; en yüksek kimyasal ve spesifik kimyasal ekserji değerlerinin en yüksek üst ısı değerlerine ait linyitlerde olduğu görülmektedir. Linyitlerin kuru ve külsüz bazda yapılarına bakıldığında, oksijen



yüzdesinin düşük ve karbon yüzdesininise daha yüksek olduğu yakıtların daha yüksek üst ısı, kimyasal ekserji ve spesifik kimyasal ekserji değerlerine sahip oldukları görülmektedir.

#### 4.2. Odun ve Biyokütle (Biomass) Örnekleri İçin Bulunan Değerler

Bu çalışmada odun ve biyokütle örnekleri olarak Huş ağacı, Söğüt ağacı, Şeker kamışı, Zeytin atığı (çekirdeği) ve kabuğu, Saman yığını, Mısır koçanı, Buğday samanı, Pirinç kabuğu ve samanı, Melez kavak ve Pamuk sapı hesaplamalar için kullanılmıştır. Bu örneklerin kabul edilen kütle fraksiyonları literatürden alınmış, kuru ve külsüz bazdaki kütle fraksiyonları ile c, h, o ve n değerleri hesaplanarak Tablo 6' da verilmiştir. Ayrıca bu örneklerin hesaplanan üst ısı değerleri, kimyasal ve spesifik ekserji değerleri Tablo 9' da verilmiştir. Tablo 9 'a bakıldığında en yüksek üst ısı ve kimyasal ekserji değerleri Melez kavak için sırasıyla 4747.01 ve 4885.91 cal / gr bulunurken, en düşük değerler Mısır koçanı için elde edilmiştir. Bu yakıtın üst ısı değeri 4095.71 cal / gr ve kimyasal ekserji değeri de 4246.53 cal / gr olarak hesaplandı. Diğer taraftan Tablo 6' ya baktığımızda Mısır koçanının % C değeri en düşük, Melez kavak için % C değeri ise yüksek olarak verilmektedir. Yapılan değerlendirme sonucunda Melez kavak odununun iyi bir yakıt özelliği gösterdiği anlaşılmaktadır.

#### 4.3. Fuel-Oil İçin Bulunan Değerler

Bu çalışmada petrol kökenli ve kömür kökenli olmak üzere iki farklı fuel-oil türünün üst ısı değerleri ve kimyasal ekserji değerleri incelenmiştir. Bu türlerde kendi aralarında sınıflandırılmış olup kabul edilen kütle fraksiyonları literatürden ve c, h, o, n ve s değerleri de hesaplanarak Tablo 7' de verilmiştir. Fuel-oil yakıtların hesaplanan üst ısı ve kimyasal ekserji değerleri Tablo 10' da verilmektedir. Tablo 10 'a baktığımızda en yüksek üst ısı değerine sahip fuel-oil' in aynı zamanda en yüksek kimyasal ekserji değerine de sahip olan 2-Nolu fuel-oil olduğunu görürüz. Bu fuel-oil için hesaplanan üst ısı değeri ve kimyasal ekserji değeri sırasıyla 12523 cal / gr ve 12444.69 cal / gr' dır. En düşük üst ısı ve kimyasal ekserji değeri ise kömür kökenli H-coal oil, ABS' de elde edilmiş olup, hesaplanan değerler sırasıyla 10658.69 cal / gr ve 10636 cal / gr' dır.

## 5. ÖNERİLER

Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi tarafından açıklanan istatistiklere göre, Türkiye enerji ihtiyacının yarısından fazlasını, kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtları ithal ederek ve geri kalanını da hidroelektrik ve biyokütle (odun ve hayvan/bitki artıkları) gibi yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılamaktadır. Fakat bu kaynakların büyük bir kısmı, evsel uygulamalar için sıcak su ve endüstriyel uygulamalar için de proses buharı gibi düşük kaliteye sahip enerjiye çevrilmektedir. Eğer bu çevrimler sonucunda düşük kaliteli enerji dışında bir ürün üretilmiyorsa, bu çok büyük bir kaybı işaret eder. Termodinamiğin birinci kanununa göre enerji korunur, fakat bu esnada yüksek kaliteli bir enerjinin düşük kaliteli bir enerjiye çevrilmesi sonucunda önemli ölçüde bir enerji kaybı meydana gelir ki, birinci kanun bu kaybı açıklayamamaktadır. Bu önemli kayıp, termodinamiğin ikinci kanunu ve ekserji kavramıyla açıklanabilmektedir. Bundan dolayı, ekserji analizi, termodinamik yönden enerji üretim tesislerinin ve yakıtların iyileştirilmesi imkanlarını belirleyip değerlendirmek için kullanılır, fakat bu iyileştirmeler ancak ekonomik olarak uygulanabilir olursa gerçekleştirilebilirler. Enerji verimi ve çevre açısından aşağıdaki öneriler ifade edilebilir:

1. Türkiye'deki linyitlerin ısı değerlerinin ve buna bağlı olarak da kimyasal ekserji değerlerinin düşük olması, ayrıca kül ve uçucu maddelerin fazla olması, enerji ve çevre açısından önemli sorunlara yol açtığından, kullanımdan önce kalite iyileştirme çalışmalarının mutlaka yapılması gerekir.

2. Ülkemizin enerji kaynaklarının sınırlı olması ve ithal kaynaklar içinde ödenen döviz miktarının gittikçe artmasından dolayı enerji ve ekserji değeri yüksek olan kavak ağacının ve diğer biyokütle kaynaklarının üretiminin devlet tarafından teşvik edilmesi gerekmektedir.

3. Yakıtların kalite değerlerini ölçmek için kimyasal ekserji değerleri yanında fiziksel ekserji değerlerinin de hesaplanması gerekir. Ayrıca yakıtın yakıldığı yakma sisteminin de enerji verimine ilaveten ekserji veriminin de detaylı bir şekilde belirlenmesi gerekir.

4. Özellikle döviz harcanarak ithalat edilen fosil yakıtların yüksek verimlerle elektrik yada ısı enerjiye dönüştüğü enerji santrallerinin süratle tesis edilerek enerji verimliliği açısından ülke ekonomisine pozitif katkı sağlanmalıdır.

5. Isı yada elektrik enerjisi üreten tüm tesislerin ekserji analizi yanında, ayrıca termoekonomik optimizasyonunu da yapılarak ekonomik açıdan en uygun yakma sistemlerinin tasarımı sağlanmalıdır.

6. Bu çalışmada tezin kapsam ve amacına uygun olarak sadece literatürde verilen ekserji analiz metodu kullanılarak ülkemizde kullanılan bazı yakıtların kimyasal ekserji değerleri hesaplanmıştır. İleride gerçekleştirmeyi düşündüğümüz çalışmalarda ise çok daha detaylı enerji, ekserji ve termoekonomik optimizasyon analiz metotları kullanılarak enerji tüketen tüm sistemler incelenecektir.



## 6. KAYNAKLAR

1. Alpar, S.R., Hakdiyen, M.İ., Bigat, T., Sınai Kimya Analiz Metodları, Altıncı Baskı, Birsen Kitabevi Yayını, İstanbul, 1982.
2. Telli, Z., Yakıtlar ve Yanma, Akdeniz Üniversitesi, Isparta Mühendislik Fakültesi Yayını, Isparta, 1984.
3. Güllü, E., Bazı Sıvı Yakıtların Isı Değerlerinin Yoğunluk ve Viskozite Ölçüm Sonuçlarından Yararlanarak Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1999.
4. Beker, Ü.G., Kömürün Kullanım Alanları, Kömür: Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri, Kural, O. (ed.), Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş., İstanbul, 1988.
5. El-Wakil, M.M., Powerplant Technology, McGraw-Hill Book Co, New York, 1974.
6. Sorensen, H.A., Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons, New York, 1983.
7. Wereko-Brobby, C.Y., Biomass Conversion and Technology, John Wiley & Sons, New York, 1996.
8. Sarıkaya, Y., Fizikokimya, Birinci Baskı, Gazi Büro Kitabevi, Ankara, 1993.
9. Yıldız, S., Fizikokimya, Cilt 2, İkinci Baskı, Bizim Büro Basımevi, Ankara, 1998.
10. Moran, M.J., Shapiro, H.N., Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Third Edition, John Wiley & Sons, New York, 1996.
11. Büyüktür, A.R., Termodinamik, Cilt 1, Uludağ Üniversitesi Yayını, Bursa, 1982.
12. Çengel, Y.A., Boles, M.A., Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Derbentli, T. (Çeviren), Literatür Yayıncılık, İstanbul, 1996.
13. Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., Thermal Design & Optimization, John Wiley & Sons, New York, 1996.
14. Moran, M.J., Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use, ASME Press, New York, 1989.

15. Sarı, A., Enerji Depolama Sisteminin Performansının İçin Enerji ve Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996.
16. Kotas, T.J., The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Krieger, Melbourne, Fl, 1995.
17. Ahrendts, J., Reference States, Energy-Int.J., Vol.5, 1980, pp.667-677.
18. Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R., Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes, Hemisphere, New York, 1988.
19. Gaggioli, R.A., Petit, P.J., Use The Second Law, First, Chemtech, Vol.7, 1977, pp.496-506.
20. Tsatsaronis, G., Thermo-economic Analysis and Optimization of Energy Systems, Prog. Energy Combustion Sci., Vol.19, 1993, pp.227-257.
21. Minkova, V., Marinov, S.P., Zanzi, R., Björnborn, E., Budinova, T., Stefanova, M., Lakov, L., Thermochemical Treatment of Biomass in a Flow of Steam or in a Mixture of Steam and Carbon Dioxide, Fuel Processing Technology, 62 (2000) 45-52.
22. Demirbaş, A., Güllü, D., Çağlar, A., Akdeniz, F., Estimation of Calorific Values of Fuels from Lignocellulosics, Energy Sources, 19 (1997) 765-770.
23. Jenkins, B.M., Baxter, L.L, Miles Jr., T.R., Miles, T.R., Combustion Properties of Biomass, Fuel Processing Technology, 54 (1998) 17-46.
24. Demirbaş, A., Calculation of Higher Heating Values of Biomass Fuels, Fuel, 76, 5 (1997) 431-434.
25. Food and Agriculture Organization of the United Nations ( FAO ), Improved Solid Biomass Burning Cookstoves: A Development Manual, Bangkok, 1993.
26. Bolat, E., Sağlam, S., Pişkin, S., The Effect of Oxidation on The Flotation Properties of a Turkish Bituminous Coal, Fuel Processing Technology, 55 (1998) 101-105.
27. Vural, H., Türk linyitlerinin ortalama özellikleri, Mühendis ve Makine, 32, 373 (1991) 24-32.
28. Söğüt, F., Olcay, A., Dissolution of Lignites in Tetralin at Ambient Temperature : Effect of Ultraviolet Irradiation, Fuel Processing Technology, 55 (1998) 107-115.

29. Grbz-Beker, ., Kkbayrak, S., zer, A., Briquetting of Afin – Elbistan Lignite, Fuel Processing Technology, 55 (1998) 117-127.
30. nder, F., Ekinci, E., Tırıs, M., Türkiye’ de Elektrik retimi ve Hava Kirlilięi, UKMK-2, Eylül 1996, İstanbul, Bildiri Kitabı, 1210-1216.
31. Ediz, İ.G., Korkmaz, M., Bentli, İ., Hava Kirlilięi Nedenleri-Kömür Kullanımının Hava Kirlilięine Etkisi, Kütahya’ da Hava Kirlilięi ve zm Yolları Konferansı, Şubat 1998, Kütahya, 9-21.
32. D.P.T., Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı zel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara, 1996.
32. Jain, S.R., Sundararajan, R., New Method of Calculating Calorific Values from Elemental Compositios of Fossil Fuels, Fuel, 60 (1981) 1079-1082.

## ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Trabzon' un Çaykara ilçesine bağlı Kabataş Köyü' nde doğdu. Lise tahsilini Trabzon Lise' sinde tamamlayıp 1992 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen – Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü' ne girdi. 1996 yılında bu bölümden mezun oldu. 1997 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. 1998 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Trabzon Fen - Edebiyat Fakültesi Kimya Anabilim Dalı' nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı görevine devam etmektedir. Yabancı dili İngilizce' dir