

Bartın Belediyesi Yayınları



Tuncer Özkan

Makina Y. Müh. · İTÜ 1970

# 2 × 660 MW Buharlı Güç Santrali Termodinamik Çözümleme

Amasra / Bartın, Mayıs 2025







Tuncer Özkan

2 x 660 MW Buharlı Güç Santrali  
**Termodinamik Çözümleme**

Tuncer Özkan

**2 x 660 MW Buharlı Güç Santrali · Termodinamik Çözümleme**

Sanat Ofset · Bartın

Amasra / Bartın, Mayıs 2025 · ISBN 978-605-69054-5-2





## *Sunuş*

*2 x 660 MW gücündeki Termik Santral'in karakteristik özelliklerini ortaya koyan, insan sağlığını ön planda tutarak çevre bilincini aşılarmayı amaçlayan bu çalışmanın toplumumuza fayda sağlamasını temenni eder, çalışmamıza verdiği değerli katkılarından dolayı, emeği geçen Makine Yüksek Mühendisi Sayın Tuncer Özkan'a en içten teşekkürlerimi sunarım.*

*M. Rıza Yalçınkaya  
Bartın Belediye Başkanı*



## MUHAMMET RIZA YALÇINKAYA

### Özgeçmiş

Muhammet Rıza Yalçinkaya 23 Kasım 1955'te doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bartın'da tamamlayan Yalçinkaya, Hacettepe Üniversitesi Zonguldak Mühendislik Fakültesi'nden Makina Mühendisi olarak mezun oldu. Amasra Taşkömürü Müessesesi Müdürlüğü'nde teknik uzman, makine mühendisi ve Baş Mühendis olarak görev aldı. 1995-1999 yılları arasında TMMOB Makine Mühendisleri Odası Bartın İl Başkanlığı görevinde bulundu. Bunun yanı sıra, 1998 Yılında TMMOB İl Koordinasyon Kurulu Başkanı olarak görev yaptı.

Yalçinkaya, 1999 yılında Bartın'ı daha yaşanabilir bir kent yapmak hedefiyle Demokratik Sol Parti'den Bartın Belediye Başkanlığı'na aday oldu ve seçimi % 34.1'lik oy oranıyla kazandı. 5 yılda adeta şehrin çehresini değiştiren Yalçinkaya, 2003 yılında Bartın'ın tarihi ve kültürel değerlerini öne çıkaran çalışmalarıyla "Tarihi Kentler Birliği Özendirme Ödülünü" aldı. Görev süresi boyunca Bartın'a sayısız eser kazandırdı.

DSP'den ikinci kez girdiği Belediye Başkanlığı seçimini bu kez oyların % 60.6'sını alarak kazandı. Rıza Yalçinkaya, 2002'de Şehir ve Başkan Dergisinin çevre düzenleme dalında "Kent Ödülü", 2005'te Ankara Yuva Konut Yap Kooperatifleri Birliği ile Anadolu Kamu-Sen'in "Yılın Belediye Başkanı Ödülünü", Gözcü Gazetesi'nin "Yılın Belediye Başkanı" ödülleri aldı. Türkiye Tarihi Kentler Birliği ve Türkiye Sağlıklı Kentler Birliği Encümen üyeliklerinde bulundu.

Cumhuriyet Halk Partisi'nden 2007 yılı Milletvekili Genel Seçiminde aday oldu. Yıllarca hizmet ettiği Bartınlıların desteğiyle seçimi kazandı ve 2018 yılına kadar milletvekili olarak görev yaptı. Parti Meclisi ve Merkez Yönetim Kurulu üyeliklerinde görev aldı. Ayrıca 4 yıl boyunca TBMM Başkanlık Divanı Kâtip Üyeliği görevinde bulundu.

Görev süresi boyunca emeklinin, madencinin, esnafın, işsiz, işçinin, çiftçinin, kadınların ve gençlerin sorunlarının takipçisi oldu. Sadece Bartın'da yaşayanların değil tüm Türkiye'de yaşayan Bartınlıların da sesi, nefesi oldu.

Yalçinkaya, 31 Mart 2024 Mahalli İdareler Seçiminde % 51.3 oy oranı ile Bartın Belediye Başkanı seçildi.

M. Rıza Yalçinkaya evli ve 2 çocuk babasıdır.

## TUNCER ÖZKAN

### Özgeçmiş

1944 yılında Erzincan'da doğdu. İTÜ. Makina Fakültesinden Makina Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu. Evli ve bir çocuk babasıdır.

01.04.1970 tarihinde, EKİ (Ereğli Kömürleri İşletmesi) Amasra Bölgesinde

- Yeraltı Makina Mühendisi,
- Bölge Makina Mühendisi,
- Elektromekanik Başmühendisi,
- Batı Karadeniz Kömür İşletmesi (BKİ.) Müessese Müdür Yardımcısı olarak çalıştı.

1981-1984 ve 1990-1997 yılları arasında

- Türkiye Taşkömürü Kurumu'na (TTK) bağlı Maden Makinaları Fabrika İşletme Müdürlüğünde, İşletme Müdürü,
- TTK Genel Müdürlük Müşaviri,
- Genel Müdürlük Enerji Tasarruf Komisyonu Başkanı ve
- APK Daire Başkanı olarak görev yaptı.
- Nisan 2009'da emekli oldu. Halen danışmanlık yapıyor.

Makina Mühendisleri Odası Zonguldak Şubesi'nin kurucu başkanlığını yaptı. Aynı zamanda Karaelmas Üniversitesi (ZKÜ) Makina Mühendisliği Bölümü'nde proje çalışmaları yaptırdı.

TTK Kurum içi eğitim amaçlı:

- Silindirik Sonsuz-Vida Çark Mekanizmaları,
- Helisel Alın Dişli Çark Mekanizmaları,
- Palloid Spiral Konik Dişli Çarklar,
- Bir Dalgıç Elektro-Pompanın Hesabı ve Projelendirilmesi,
- Molet Milinin Mukavemet Kontrolü,
- Hava Patlatmalı Kazı Sisteminin Mekaniği ve Termodinamik Çözümlemesi,
- Eksenel Kaymalı Yataklar,
- Karadon Müessesesi - 360 m Katı Su Haritası,
- Radyal Kaymalı Yataklar,
- CO<sub>2</sub> Gaz Patlatmalı Kazı Sistemi ile ilgili kitapları vardır.

## **TUNCER ÖZKAN**

### **Özgeçmiş (Devamı)**

Ayrıca Çeşitli Kongrelerde (Arkadaşları ile ortaklaşa) sunulan:

- ▶ Hava Patlatmalı Kazı Sisteminin Mekaniği,
- ▶ Yüksek Basıncılı Hava ile Kömür Kazısı,
- ▶ Sıvı CO<sub>2</sub> ile Kayaç Parçalamanın Mekanizması (Almanya Aachen ve Isparta),
- ▶ TTK'da Enerji Tasarrufu Çalışmaları,
- ▶ Ahşap Domuzdamlarının Çalışma Performasyonlarının İyileştirilmesi,
- ▶ Toz ve Gürültüye Karşı Alınması Gereken Önlemler Bağlamında İşçi Sağlığı,
- ▶ Kozlu Ana Kat Pompalarının Yüksek Verimli Pompalar İle Yenilenmesi Projesi,
- ▶ Termik Santral Külünün Ayak Arkası Yangınlarına Karşı Kullanılması, başlıklı bildirileri vardır.

Projeleri:

- ▶ TÜBİTAK 102M026-2007 no'lu proje tamamlandı (Sıvı CO<sub>2</sub> ile patlatma sisteminde gaz çıkış hızının deneysel olarak saptanması, Prof. Nuri Ali Akçın ve Doç. Dr. Mustafa Eğriboyun ile),
- ▶ TÜBİTAK 109G058 no'lu proje tamamlandı (Kaya ve kömür kırma amaçlı yüksek basınçlı gaz püskürtme sistemlerinin geliştirilmesi. TTK-MAM-MKE ile),
- ▶ TÜBİTAK 1120196 no'lu yeni projeye danışmanlık yaptı ve projenin kabul edilmesinden sonra da ayrıldı. (İnce boyutlu şlam kömür külünün uzaklaştırılması için yeni bir üç ünlü siklonik ayırıcı tasarımı ve geliştirilmesi)
- ▶ Mehmet Kemal Dedeman Araştırma ve Geliştirme Proje Yarışmasında: 2007 yılında 2. lik, 2008 yılında 3. lük ödülü aldı. (TTK önceki dönem Genel Müdürü Maden Yüksek Mühendisi Rifat Dağdelen ve Maden Mühendisi Haşim Demirler ile)

Patentleri (TTK adına, Rifat Dağdelen ile):

- ▶ Öngerilmeli Domuzdamı Sistemi 2008/07445,
- ▶ Ergonomik Madenci Kemer 2008/01161,
- ▶ Başyukarı Malzeme Çekme Mekanizması 2008/01162,
- ▶ Ocak Yangınlarına Karşı Önceden Önlem Mekanizması 2008/01163.





## Önsöz

Verilen / Seçilen büyüklükleri ile Amasra'da gerçek anlamda bir buharlı güç santrali kurulmasını öngören bir projenin irdelendiği, termodinamik ağırlıklı bu çalışma, yaklaşık 6 aylık bir zaman diliminde ortaya çıkmıştır.

Çalışmada üzerinde durulan ilkeler şunlardır:

- İşlenen konular oldukça sade bir anlatımla kaleme alınmıştır,
- Kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır,
- Santralin, topluma olası faydalı/zararlı yönlerine, ayrıca konu ile ilgili olarak akla gelebilecek sorulara ve cevaplara da çalışma içerisinde yer verilmiş; bunların değerlendirilmesi ise okuyucunun takdirine bırakılmıştır.

Okuyucunun zorlandığı konularda yazara (0542) 525 42 87 numaralı telefonundan her zaman ulaşılabilir.

Bu çalışmanın yayına hazırlanmasındaki katkıları için Mehmet Sabaz'a; ayrıca beni yetiştiren, genç yaşta aramızdan ayrılan termodinamik hocam Prof. Dr. Ahmet Rasim BÜYÜKTÜR'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca çalışmanın basımı konusunda desteklerini esirgemeyen Bartın Belediye Başkanı Mak. Y. Müh. Sayın M. Rıza Yalçınkaya'ya da şükranlarımı sunarım.

Tuncer Özkan



## Giriş / Özet

Termik Santral için gerekli:

Kimyasal analizi:

%78.54 C, %5.28 H<sub>2</sub>, %4.53 O<sub>2</sub>, %1.4 N<sub>2</sub>, %1.25 S, %9.05 Kül

Kalorifik değeri: 5 600 ( $\pm$  200) kcal/kg

Tüketim miktarı: 452 ton/saat olan zenginleştirilmiş taşkömürüne ihtiyaç var,

Sağlanabilir mi?

Üretim miktarı yeterli olmayıp yurtdışından katkı sağlanacaksa, liman problemi yok mudur?

Kimyasal analizi verilen ve saatte 452 ton kömürün (25.5 ton/saat; kalker hariç) kazanda tam yanmasından sonra oluşan baca gazlarının yaklaşık miktarları;

1 302 t/h CO<sub>2</sub>, 215 t/h H<sub>2</sub>O, 10,8 t/h SO<sub>2</sub>, 3 699 t/h N<sub>2</sub> olduğuna göre, bu değerler gerekli insan sağlığı sınırlarına nasıl çekilecektir; düzenekler nelerdir? (Örneğin, 'Filtre ile' cevabı yetersiz olup, filtrenin karakteristik özelliklerinin belirtilmesi gerekir). Kalkerin katkı maddesi olarak kullanılmasında baca gazları hangi değerlere indirgenecektir?

Deniz deşarj sisteminde kullanılan soğutma suyu miktarı 160 000 m<sup>3</sup>/saat olup kondense giriş/çıkış sıcaklık farkı 8 - 10 °C dir. Isınan suda kullanılan difüzör sistemi yeterli midir; sıcaklık kontrolü nasıl yapılacaktır?

Hava kirliliğini artıran SICAKLIK İNVERSİYONU, insan sağlığı ve çevre ortamı için en önemli faktördür. Etkilerinin giderilmesi için tatmin edici, yeterli bir çalışma yapılmış mıdır?

Ve, akla gelebilecek daha fazla sorular/cevaplar bu çalışma içerisinde.

Bu çalışmadaki AMACIMIZ, santral çıktı zararlı bileşenlerinin (örneğin, baca gazları, soğutma suyu v. b.) insan sağlığı ve çevre ortamı üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya çıkarmaktır.



## İçindekiler

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| I. 2019 yılı ÇED raporundan alınan proje özet bilgileri.....              | 7   |
| II. 2 x 660 MW Buhar Santrali Termodinamik Çözümleme .....                | 11  |
| III. Santral’de kullanılacak yıllık toplam kömür miktarı: .....           | 35  |
| IV. Yoğuşturucuda (Kondansör’de) kullanılacak soğutma suyu miktarı: ..... | 37  |
| V. 2 x 660 MWe gücünün eşdeğer güç değerleri .....                        | 51  |
| VI. Yakıtlar ve Yanma.....                                                | 53  |
| VII. ÇED raporuna göre yanma ürünleri ile ilgili alınan önlemler .....    | 77  |
| VIII. Kömür hakkında genel bilgi.....                                     | 79  |
| IX. Teorik hava ihtiyacı.....                                             | 93  |
| X. Akışkan yataklı kazanlar: .....                                        | 101 |
| XI. ÇED Raporu’na göre yanma ürünleri ile ilgili alınan önlemler: .....   | 103 |
| XII. Hava kirliliğini artıran sıcaklık inversiyonu .....                  | 105 |
| XIII. Sonuç: hava kirliliği ve sağlık etkileri irdeleme .....             | 129 |
| XIV. Soğutma suyu deniz deşarj sistemi (irdeleme): .....                  | 136 |
| LİTERATÜR.....                                                            | 146 |



## Şekiller Dizini

|                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 1. İdeal ara ısıtmalı Rankine çevrimi.....                                                                                                 | 9   |
| Şekil 2. Buharlı güç santralinin projemize esas çizimi (Rankine çevrimi).....                                                                    | 11  |
| Şekil 3. Buharlı Güç Santrali çevriminin T-S diagramı .....                                                                                      | 13  |
| Şekil 4. Giriş ve çıkış şartlarının Rankine çevriminin verim üzerindeki etkisi.....                                                              | 33  |
| Şekil 5. Buharlı güç santrali çevriminin T-S diagramı .....                                                                                      | 39  |
| Şekil 6. Tek geçişli açık soğutma sisteminin şematik gösterimi .....                                                                             | 44  |
| Şekil 7. Soğutma suyu denizde şarj sistemi için genel yerleşim planı.....                                                                        | 47  |
| Şekil 8. Difüzör kesiti .....                                                                                                                    | 48  |
| Şekil 9. Düşey kollu difüzör .....                                                                                                               | 48  |
| Şekil 10. Difüzör enine kesiti .....                                                                                                             | 49  |
| Şekil 11. Hava yakıt oranı (HY), bir yanma işleminde birim yakıt kütlesi için<br>kullanılan hava kütlesidir .....                                | 54  |
| Şekil 12. Yanma odasına giren bileşenler ve çıkan ürünler (Şematik olarak<br>gösterim).....                                                      | 62  |
| Şekil 13. Yanma odasına giren bileşenler ve çıkan ürünlerin kütle analizleri .....                                                               | 65  |
| Şekil 14. Yanma odasına giren çıkan bileşenler.....                                                                                              | 68  |
| Şekil 15. Bileşenlerin kütle analizi.....                                                                                                        | 70  |
| Şekil 16. Yanma odasına giren çıkan bileşenler.....                                                                                              | 73  |
| Şekil 17. Tipik elektrostatik filtre sistemi.....                                                                                                | 78  |
| Şekil 18. Yakacak analizi .....                                                                                                                  | 79  |
| Şekil 19. Kömürlerin yakma havası ihtiyacı .....                                                                                                 | 86  |
| Şekil 20. Kömürlerden oluşan özgül duman gazı miktarı.....                                                                                       | 87  |
| Şekil 21. 1 kg kömüre karşılık gelen bileşenlerin hacimsel analizi .....                                                                         | 90  |
| Şekil 22. Duman gazındaki CO <sub>2</sub> ve H <sub>2</sub> O (Su buharı) hacimsel oranları (Kömür ve<br>sıvı yakacaklar için).....              | 99  |
| Şekil 23. Kömür için duman gazının yoğunluğu.....                                                                                                | 100 |
| Şekil 24. Şehirlerde yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık değişimi.....                                                                              | 107 |
| Şekil 25. Radyasyon inversiyonu .....                                                                                                            | 108 |
| Şekil 26. Çökme inversiyonu .....                                                                                                                | 110 |
| Şekil 27. Çökme inversiyonu'nda sıcaklığın yükseklikle değişimi .....                                                                            | 110 |
| Şekil 28. Vadide gerçekleşen Çökme inversiyonu'nun etkileri.....                                                                                 | 111 |
| Şekil 29. Adveksiyon inversiyonu'nun oluşumu .....                                                                                               | 112 |
| Şekil 30. Türkiye'de taş kömürü ve linyit ile çalışan termik santrallerin kirlетici<br>salımları ile bağlantılı sağlık etkileri .....            | 115 |
| Şekil 31. Parçacıklı maddeye (PM <sub>2.5</sub> ) maruz kalmak çok sayıda sağlık sorununa yol<br>açar [Sağlık ve Çevre Birliği (2015), S. ]..... | 116 |
| Şekil 32. Kömür yakıtlı termik santrallerden çevreye yayılan zararlı maddeler...                                                                 | 118 |
| Şekil 33. Proje sahasının yerleşimlere olan mesafesini gösterir harita.....                                                                      | 125 |
| Şekil 34. Termik santralin planlanan bölge arazisi .....                                                                                         | 126 |
| Şekil 35. Termik santral iş akım şeması.....                                                                                                     | 131 |
| Şekil 36. Denizden su alma ve sıcak su dönüş sistemi şematik planı.....                                                                          | 137 |
| Şekil 37. Bir boruda kontrol hacmi için enerji etkileşimleri .....                                                                               | 142 |



## Tablo Dizini

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 1. Doymuş su basınç tablosu.....                                                              | 14  |
| Tablo 2. Tablo 1 devamı .....                                                                       | 15  |
| Tablo 3. Kızgın su buharı tablosu .....                                                             | 19  |
| Tablo 4. Tablo 3 devamı .....                                                                       | 21  |
| Tablo 5. SKKY'nin Tablo 23'ü.<br>Derin deniz deşarjları için uygulanacak kriterler .....            | 46  |
| Tablo 6. Seyrelme hesaplamaları sonucunda elde edilen<br>seyrelme ve sıcaklık farkı değerleri ..... | 50  |
| Tablo 7. Hava yakıt oranı hesaplanmasına ait bir örnek .....                                        | 56  |
| Tablo 8. mol kütlesi, gaz sabiti ve kritik nokta özellikleri.....                                   | 63  |
| Tablo 9. Amasra lavvarı taşkömürü özellikleri.....                                                  | 72  |
| Tablo 10. Taş kömürü analiz sonuçları ).....                                                        | 72  |
| Tablo 11. Türkiye'nin Taşkömürü üretim sahaları ve<br>üretilen kömür özellikleri .....              | 81  |
| Tablo 12. Yanma denklemleri .....                                                                   | 82  |
| Tablo 13. Yatağan ilçesinde 1990-93 yılları<br>ortalama aylık SO <sub>2</sub> konsantrasyonu.....   | 113 |
| Tablo 14. Muğla merkez ve Yatağan ilçesi 1999 yılı<br>ortalama yıllık ölçüm sonuçları .....         | 113 |
| Tablo 15. Hava kalitesi sınır değerleri.....                                                        | 117 |
| Tablo 16. Kömürlü Termik Santral salımlarından<br>kaynaklanan sağlık sorunları .....                | 120 |
| Tablo 17. Hava kirleticileri ve sağlık etkisi.....                                                  | 122 |
| Tablo 18. 2019 yılında hava kirliliğine bağlı ölüm sayısı en yüksek on il.....                      | 123 |
| Tablo 19. 2019 yılında hava kirliliğine bağlı ölüm yüzdesi en yüksek on il....                      | 124 |
| Tablo 20. Emisyonlar ve ilgili ulusal / uluslararası<br>sınır değerler / standartlar .....          | 133 |
| Tablo 21. HKDYY de belirtilen sınır değerler.....                                                   | 135 |
| Tablo 22. Doymuş suyun özellikleri .....                                                            | 140 |



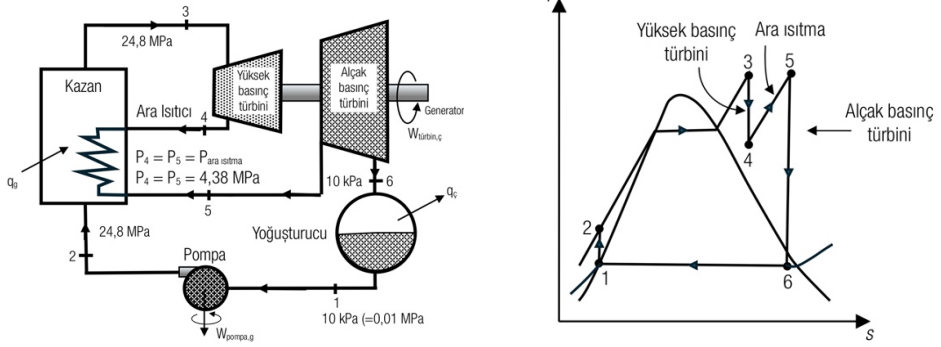
## I. 2019 yılı ÇED raporundan alınan proje özet bilgileri

- 1)  $2x (660 \text{ MW}_e - 669,4 \text{ MW}_m - 1,466 \text{ MW}_t)$  kurulu gücünde Termik Santral ve kül depolama sahası (**e**: Elektrik, **m**: Mekanik, **t**: Termik)
- 2) Dolgu alanı, dalgakıran ve rıhtım ile hizmet binaları,
- 3) 200 ton/saat kapasiteli bir adet ünite ve 500 ton/saat kapasiteli bir adet üniteden oluşan iki adet lavvar tesis.
- 4) Santral'de:  
Kullanılacak olan taş kömürünün kalorifik değeri  $5\,600 (\pm 200) \text{ kcal/kg}$  öngörülmektedir. Amasra-B sahasında üretilen kömürün termik santralde kullanılabilmesi için öncelikle yıkama ve zenginleştirme işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Bu nedenle proje alanına iki adet lavvar tesisi kurulacaktır.  
**• Her iki ünite toplam**
  - 458 ton/saat (3 389 200 ton/yıl) kömür
  - 25,5 ton/saat (188 700 ton/yıl) kalker,
  - $162\,900 \text{ m}^3/\text{saat}$  soğutma suyukullanılması öngörülmektedir.
- 5) Her biri  $660 \text{ MW}_e$  toplam  $2 \times 660 = 1\,320 \text{ MW}_e$  gücünde iki üniteli bir enerji santrali olarak planlanan santralin bütün çevrim verimi % 45 tir.
- 6) Santral'de kömür yakma teknolojisi olarak temiz kömür yapma teknolojileri olarak bilinen "Süper Kritik Pulverize Kömür Yakma Teknolojisi" kullanılacaktır.
- 7) Amasra-B sahasından çıkarılacak kömürün termik santralde kullanılmayacak olan bölümü, lavvar tesislerinde yıkandıktan sonra kapalı bantlı konveyörler vasıtasıyla Tarlaağzı balıkçı barınağının kuzeydoğusunda inşaa edilmesi planlanan dalgakıran korumalı rıhtımdan 30 000 DWT (Dead Weight Tonnage) dökme yük gemileri ile civardaki sanayi kuruluşlarına sevk edilecektir.
- 8) Termik santral ve kül depolama sahası inşaat aşaması dört yıl sürecek olup ekonomik ömrü 30 yıl olarak öngörülmektedir.
- 9) Santral işletmeye geçtiğinde, yılda 7 400 saat işletmede olacağı öngörülmektedir. Planlanan tesisin inşaat aşamasında yaklaşık 2 500 kişinin (inşaat faaliyetlerinin en yoğun olduğu dönemde), işletme aşamasında ise yaklaşık 500 kişinin çalıştırılması planlanmaktadır.
- 10) Hema dolgu alanı ve rıhtım projesinin etüt ve proje işleri dahil olmak üzere inşaat ve yapım süresi 24 ay, yatırım süresi 34 ay olup, proje işletme ömrü 49 yıl olacaktır. Projenin inşaatı sırasında yaklaşık 100 kişinin istihdam edileceği düşünülmekte, işletme aşamasında çalışacak personel sayısı ise 65 kişi olarak planlanmaktadır.

- 11) Lavvar tesislerinde inşaat aşamasında 20 kişi, işletme aşamasında ise 86 kişinin istihdam edilmesi planlanmaktadır.
- 12) Santral'de kullanılacak olan kömür, kömür kırıcılarına, oradan da kömür değirmenlerine alınarak öğütülecek ve kömür tozu haline getirilerek kazanın yanma odasına pulverize kömür tozu olarak püskürtülecektir.
- 13) Santral'de *Benson 23* tipinde kazan kullanılacaktır. Yakma sistemi, pulverize bitümlü kömürün yakılması şeklinde olacaktır. Kazan, yılda 8 000 saat süperkritik basınçlı buhar üretilcek şekilde dizayn edilecektir.
- 14) Kazan teknolojisinin seçimi:  
Büyük, pulverize kömür yakıtlı termik santrallerde kazan teknolojileri kritikaltı, süperkritik ve ultra süperkritik olarak üç farklı türde olabilir. Süperkritik santraller 221 bar'ın üzerinde buhar basıncıyla çalışırlar. 221 bar basınç ve 374,15 °C sıcaklıkta su kritik noktadadır. Kritik noktada, su ve buharın özkütlesi aynıdır. Kritikaltı santrallerde, buhar basıncı 190 bar'dan daha azdır. Süperkritik kazan teknolojisi, termik santrallerde kritikaltı kazan teknolojisinden daha verimli olduğundan gelişmiş ülkelerdeki elektrik endüstrisinde kullanımı standart hale gelmiştir.
- 15) Planlanan projede:  
Nominal ana buhar basıncı..... 254 bar  
Türbin girişi..... 248 bar,  
Nominal ana buhar sıcaklığı ..... 560 °C  
Nominal tekrar kızdırılmış buhar basıncı ..... 43,8 bar  
Nominal tekrar kızdırılmış buhar sıcaklığı..... 580 °C  
olmak üzere süperkritik kazan seçilecektir.

Ama önce planlanan projeye esas olmak üzere "buharlı güç çevrimleri için ideal ara ısıtmalı Rankine çevrimi" hakkında kısa bir bilgi verelim [ÇENGEL, 1996. S. ].

İdeal ara ısıtmalı Rankine çevriminin T-S diyagram'ı ve bu çevrime göre çalışan bir güç santralinin genel çizimi **Şekil 1**'de gösterilmiştir. Genişlemenin iki kademede olduğu bu çevrimde, buhar türbinde bir ara basınca kadar genişledikten sonra (yüksek basınç kademesi) yeniden kazana gönderilerek ısımaktadır.



**Şekil 1.** İdeal ara ısıtmalı Rankine çevrimi  
[ÇENGEL, 1996. S. ]

Buharın ikinci kademeye giriş sıcaklığı genellikle birinci kademeye giriş sıcaklığıyla aynıdır (bizim projede farklı). Buhar daha sonra türbinin ikinci kademesinde (alçak basınç kademesi) yoğuşturucu basıncına kadar genişlemektedir. Böylece ara ısıtmalı çevrimde, buhara verilen toplam ısı ve türbinde yapılan toplam iş aşağıda verildiği gibi gerçekleşmektedir.

$$\begin{aligned} q_g &= q_{\text{birincil}} + q_{\text{ara ısıtma}} \text{ (kJ/kg)} \\ q_g &= (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \text{ (kJ/kg)} \end{aligned} \quad (1)$$

ve

$$\begin{aligned} w_t &= w_{t,I} + w_{t,II} \text{ (kJ/kg)} \\ w_t &= (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \end{aligned} \quad (2)$$

dır. İki kademeli ara ısıtma genellikle kritik basıncın (22,09 MPa) üzerindeki basınçlarda çalışan güç santrallerinde söz konusudur.

Projemize dönecek olursak;

Güç santralinin genel çizimi **Şekil 2'**de, çevrimin T-S diyagramı **Şekil 3'**te gösterilmiştir.



## II. 2 x 660 MW Buhar Santrali Termodinamik Çözümleme

Şekil 2 ve Şekil 3'ü göz önüne alalım, burada;

Enerjinin korunumu ilkesi,

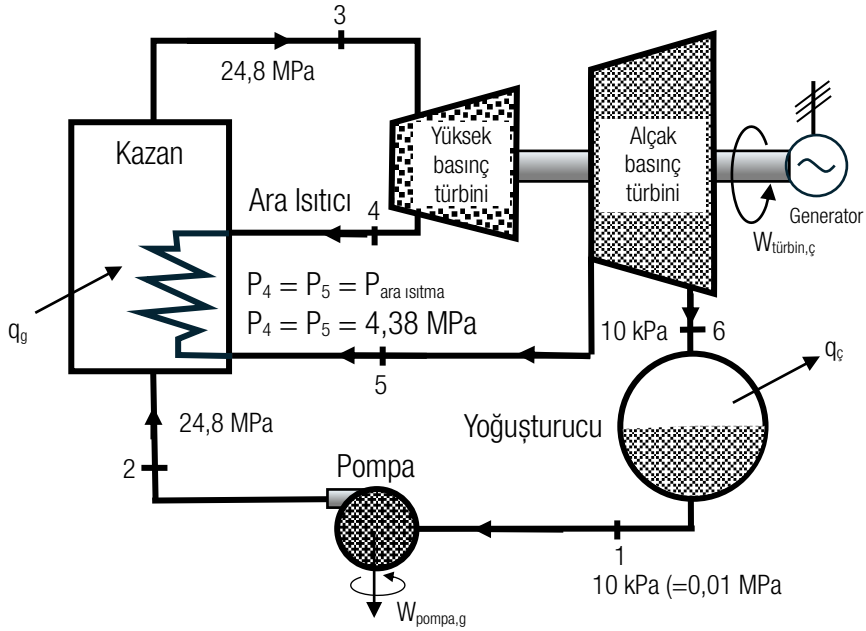
$$q - w = \Delta h + \Delta ke + \Delta pe \quad (3)$$

$$q = Q/\dot{m} \text{ birim kütle için ısı geçişi (kJ/kg)} \quad (4)$$

$$w = \dot{W}/\dot{m} \text{ birim kütle için iş (kJ/kg)} \quad (5)$$

olmaktadır. Akışkan kontrol hacminden geçerken kinetik ve potansiyel enerjilerinde çok az bir değişim olursa başka bir deyişle  $\Delta ke \cong 0$  ve  $\Delta pe \cong 0$  kabul edilirse (3) denklemi daha sade yazılabilir:

$$q - w = \Delta h \text{ (kJ/kg)} \quad (6)$$



Şekil 2. Buharlı güç santralinin projemize esas çizimi (Rankine çevrimi)

Kazan ve yoğuşturucuda iş etkileşimi yoktur. Ayrıca pompa ve türbindeki hal değişimleri izantropik (sabit entropi) kabul edilebilir. Bu durumda, ideal ara ısıtmalı Rankine çevrimindeki (Şekil 2) hal değişimleri aşağıdaki gibidir.

1-2 Pompada izantropik (sabit entropi) sıkıştırma ( $q = 0$ )

2-3 Kazan'da sabit basınçta (24,8 MPa) ısı geçişi ( $w = 0$ )

3-4 Yüksek basınç türbini izantropik genişleme ( $q = 0$ )

4-5 Sabit basınçta (4,38 MPa) ara ısıtma

5-6 Alçak basınç türbininde izantropik genişleme ( $q = 0$ )

6-1 Yoğuşturucuda, sistemden sabit basınçta (10 kPa) ısı atılması ( $w = 0$ )

Şimdi bu hal değişimlerine karşılık gelen değerleri hesaplayalım:

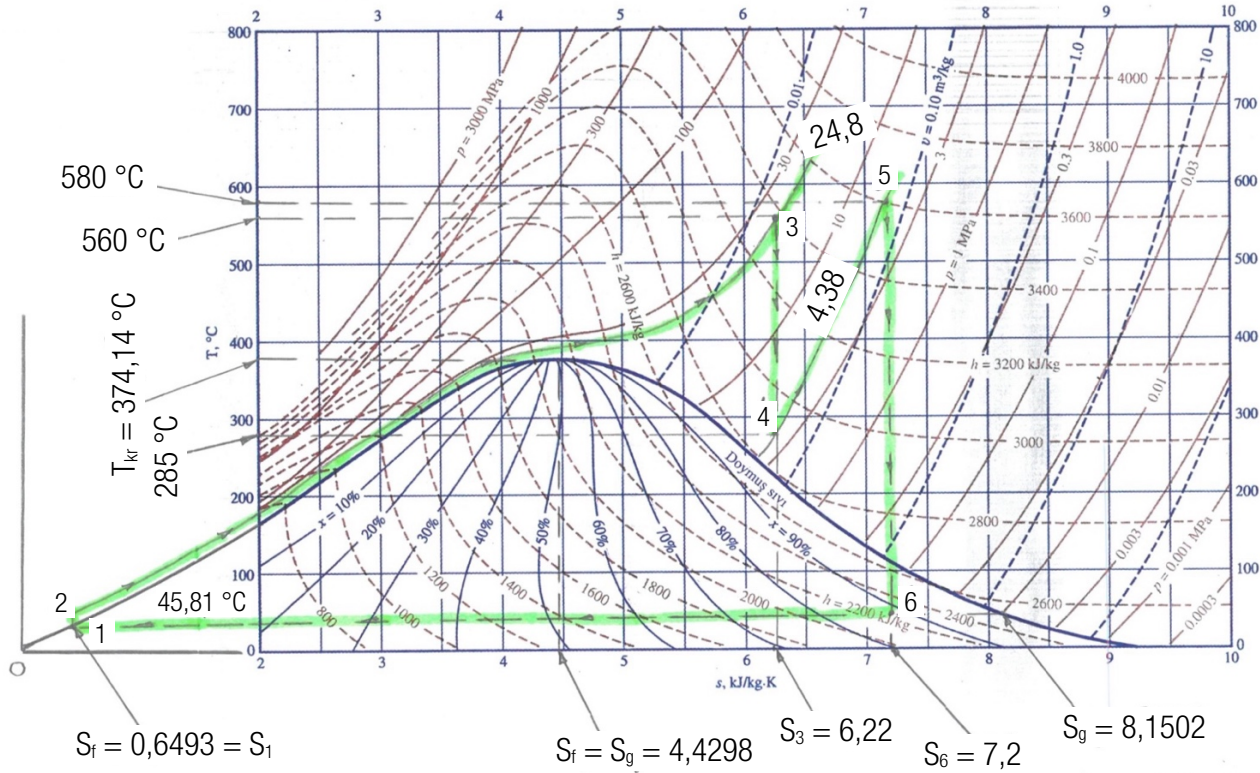
$P_6$  6 hali:

= 10 kPa

$X_6$  - Kuruluk derecesi

$X_6 = 0,873$  (**Şekil 3**)

$S_6$  - Doymuş sıvı-buhar karışımı bölgesinde entropi



**Şekil 3.** Buharlı Güç Santrali çevriminin T-S diagramı

(JONES & DUGAN, 2003, S )

$T_{kr} = 374,14^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{kr} = 22,09 \text{ MPa}$ ; Yoğuşturucu basıncı:  $10 \text{ kPa}$

| Basınç<br>kPa<br>$P$ | Doyma<br>sıcak<br>°C<br>$t$ | Özgül hacim<br>$m_3/kg$ |                 | İç enerji<br>$kJ/kg$ |          |                 | Entalpi<br>$kJ/kg$ |          |                 | Entropi<br>$kJ/(kg \text{ K})$ |          |        |
|----------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|----------|-----------------|--------------------|----------|-----------------|--------------------------------|----------|--------|
|                      |                             | Doymuş<br>sıvı          | Doymuş<br>buhar | Doymuş<br>sıvı       |          | Doymuş<br>buhar | Doymuş<br>sıvı     |          | Doymuş<br>buhar | Doymuş<br>sıvı                 |          | Doymuş |
|                      |                             | $v_f$                   | $v_g$           | $u_f$                | $u_{fg}$ | $u_g$           | $h_f$              | $h_{fg}$ | $h_g$           | $s_f$                          | $s_{fg}$ | $s_g$  |
| 0,6113               | 0,01                        | 0,001 000               | 206,14          | 0,00                 | 2375,3   | 2375,3          | 0,01               | 2501,3   | 2501,4          | 0,0000                         | 9,1562   | 9,1562 |
| 1,0                  | 6,98                        | 0,001 000               | 129,21          | 29,30                | 2355,7   | 2385,0          | 29,30              | 2484,9   | 2514,2          | 0,1059                         | 8,8697   | 8,9756 |
| 1,5                  | 13,03                       | 0,001 001               | 87,98           | 54,71                | 2338,6   | 2393,3          | 54,71              | 2470,6   | 2525,3          | 0,1957                         | 8,6322   | 8,8279 |
| 2,0                  | 17,50                       | 0,001 001               | 67,00           | 73,48                | 2326,0   | 2399,5          | 73,48              | 2460,0   | 2533,5          | 0,2607                         | 8,4629   | 8,7237 |
| 2,5                  | 21,08                       | 0,001 002               | 54,25           | 88,48                | 2315,9   | 2404,4          | 88,49              | 2451,6   | 2540,0          | 0,3120                         | 8,3311   | 8,6432 |
| 3,0                  | 24,08                       | 0,001 003               | 45,67           | 101,04               | 2307,5   | 2408,5          | 101,05             | 2444,5   | 2545,5          | 0,3545                         | 8,2231   | 8,5776 |
| 4,0                  | 28,96                       | 0,001 004               | 34,80           | 121,45               | 2293,7   | 2415,2          | 121,46             | 2432,9   | 2554,4          | 0,4226                         | 8,0520   | 8,4746 |
| 5,0                  | 32,88                       | 0,001 005               | 28,19           | 137,81               | 2282,7   | 2420,5          | 137,82             | 2423,7   | 2561,5          | 0,4764                         | 7,9187   | 8,3951 |
| 7,5                  | 40,29                       | 0,001 008               | 19,24           | 168,78               | 2261,7   | 2430,5          | 168,79             | 2406,0   | 2574,8          | 0,5764                         | 7,6750   | 8,2515 |
| 10                   | 45,81                       | 0,001 010               | 14,67           | 191,82               | 2246,1   | 2437,9          | 191,83             | 2392,8   | 2584,7          | 0,6493                         | 7,5009   | 8,1502 |
| 15                   | 53,97                       | 0,001 014               | 10,02           | 225,92               | 2222,8   | 2448,7          | 225,94             | 2373,1   | 2599,1          | 0,7549                         | 7,2536   | 8,0085 |
| 20                   | 60,06                       | 0,001 017               | 7,649           | 251,38               | 2205,4   | 2456,7          | 251,40             | 2358,3   | 2609,7          | 0,8320                         | 7,0766   | 7,9085 |
| 25                   | 64,97                       | 0,001 020               | 6,204           | 271,90               | 2191,2   | 2463,1          | 271,93             | 2346,3   | 2618,2          | 0,8931                         | 6,9383   | 7,8314 |
| 30                   | 69,10                       | 0,001 022               | 5,229           | 289,20               | 2179,2   | 2468,4          | 289,23             | 2336,1   | 2625,3          | 0,9439                         | 6,8247   | 7,7686 |
| 40                   | 75,87                       | 0,001 027               | 3,993           | 317,53               | 2159,5   | 2477,0          | 317,58             | 2319,2   | 2636,8          | 1,0259                         | 6,6441   | 7,6700 |
| 50                   | 81,33                       | 0,001 030               | 3,240           | 340,44               | 2143,4   | 2483,9          | 340,49             | 2305,4   | 2645,9          | 1,0910                         | 6,5029   | 7,5939 |
| 75                   | 91,78                       | 0,001 037               | 2,217           | 384,31               | 2112,4   | 2496,7          | 384,39             | 2278,6   | 2663,0          | 1,2130                         | 6,2434   | 7,4564 |
| Basınç<br>MPa        |                             |                         |                 |                      |          |                 |                    |          |                 |                                |          |        |
| 0,100                | 99,63                       | 0,001 043               | 1,6940          | 417,36               | 2088,7   | 2506,1          | 417,46             | 2258,0   | 2675,5          | 1,3026                         | 6,0568   | 7,3594 |
| 0,125                | 105,99                      | 0,001 048               | 1,3749          | 444,19               | 2069,3   | 2513,5          | 444,32             | 2241,0   | 2685,4          | 1,3740                         | 5,9104   | 7,2844 |
| 0,150                | 111,37                      | 0,001 053               | 1,1593          | 466,94               | 2052,7   | 2519,7          | 467,11             | 2226,5   | 2693,6          | 1,4336                         | 5,7897   | 7,2233 |
| 0,175                | 116,06                      | 0,001 057               | 1,0036          | 486,80               | 2038,1   | 2524,9          | 486,99             | 2213,6   | 2700,6          | 1,4849                         | 5,6868   | 7,1717 |
| 0,200                | 120,23                      | 0,001 061               | 0,8857          | 504,49               | 2025,0   | 2529,5          | 504,70             | 2201,9   | 2706,7          | 1,5301                         | 5,5970   | 7,1271 |
| 0,225                | 124,00                      | 0,001 064               | 0,7933          | 520,47               | 2013,1   | 2533,6          | 520,72             | 2191,3   | 2712,1          | 1,5706                         | 5,5173   | 7,0878 |
| 0,250                | 127,44                      | 0,001 067               | 0,7187          | 535,10               | 2002,1   | 2537,2          | 535,37             | 2181,5   | 2716,9          | 1,6072                         | 5,4455   | 7,0527 |
| 0,275                | 130,60                      | 0,001 070               | 0,6573          | 548,59               | 1991,9   | 2540,5          | 548,89             | 2172,4   | 2721,3          | 1,6408                         | 5,3801   | 7,0209 |
| 0,300                | 133,55                      | 0,001 073               | 0,6058          | 561,15               | 1982,4   | 2543,6          | 561,47             | 2163,8   | 2725,3          | 1,6718                         | 5,3201   | 6,9919 |
| 0,325                | 136,30                      | 0,001 076               | 0,5620          | 572,90               | 1973,5   | 2546,4          | 573,25             | 2155,8   | 2729,0          | 1,7006                         | 5,2646   | 6,9652 |
| 0,350                | 138,88                      | 0,001 079               | 0,5243          | 583,95               | 1965,0   | 2548,9          | 584,33             | 2148,1   | 2732,4          | 1,7275                         | 5,2130   | 6,9405 |
| 0,375                | 141,32                      | 0,001 081               | 0,4914          | 594,40               | 1956,9   | 2551,3          | 594,81             | 2140,8   | 2735,6          | 1,7528                         | 5,1647   | 6,9175 |
| 0,40                 | 143,63                      | 0,001 084               | 0,4625          | 604,31               | 1949,3   | 2553,6          | 604,74             | 2133,8   | 2738,6          | 1,7766                         | 5,1193   | 6,8959 |
| 0,45                 | 147,93                      | 0,001 088               | 0,4140          | 622,77               | 1934,9   | 2557,6          | 623,25             | 2120,7   | 2743,9          | 1,8207                         | 5,0359   | 6,8565 |
| 0,50                 | 151,86                      | 0,001 093               | 0,3749          | 639,68               | 1921,6   | 2561,2          | 640,23             | 2108,5   | 2748,7          | 1,8607                         | 4,9606   | 6,8213 |
| 0,55                 | 155,48                      | 0,001 097               | 0,3427          | 655,32               | 1909,2   | 2564,5          | 665,93             | 2097,0   | 2753,0          | 1,8973                         | 4,8920   | 6,7893 |
| 0,60                 | 158,85                      | 0,001 101               | 0,3157          | 669,90               | 1897,5   | 2567,4          | 670,56             | 2086,3   | 2756,8          | 1,9312                         | 4,8288   | 6,7600 |

**Tablo 1.** Doymuş su basınç tablosu  
(ÇENGEL, 1996, S. )

| Basınç<br>kPa<br>$P$ | Doyma<br>sıcak<br>°C<br>$t$ | Özgül hacim<br>$m_3/kg$ |                          | İç enerji<br>$kJ/kg$    |          |                          | Entalpi<br>$kJ/kg$      |          |                          | Entropi<br>$kJ/(kg \text{ K})$ |          |                 |
|----------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|----------|--------------------------|-------------------------|----------|--------------------------|--------------------------------|----------|-----------------|
|                      |                             | Doymuş<br>sıvı<br>$v_f$ | Doymuş<br>buhar<br>$v_g$ | Doymuş<br>sıvı<br>$u_f$ | $u_{fg}$ | Doymuş<br>buhar<br>$u_g$ | Doymuş<br>sıvı<br>$h_f$ | $h_{fg}$ | Doymuş<br>buhar<br>$h_g$ | Doymuş<br>sıvı<br>$s_f$        | $s_{fg}$ | Doymuş<br>$s_g$ |
|                      |                             |                         |                          |                         |          |                          |                         |          |                          |                                |          |                 |
| 0,65                 | 162,01                      | 0,001 104               | 0,2927                   | 683,56                  | 1886,5   | 2570,1                   | 684,28                  | 2076,0   | 2760,3                   | 1,9627                         | 4,7703   | 6,7331          |
| 0,70                 | 164,97                      | 0,001 108               | 0,2729                   | 696,44                  | 1876,1   | 2572,5                   | 697,22                  | 2066,3   | 2763,5                   | 1,9922                         | 4,7158   | 6,7080          |
| 0,75                 | 167,78                      | 0,001 112               | 0,2556                   | 708,64                  | 1866,1   | 2574,7                   | 709,47                  | 2057,0   | 2766,4                   | 2,0200                         | 4,6647   | 6,6847          |
| 0,80                 | 170,43                      | 0,001 115               | 0,2404                   | 720,22                  | 1856,6   | 2576,8                   | 721,11                  | 2048,0   | 2769,1                   | 2,0462                         | 4,6166   | 6,6628          |
| 0,85                 | 172,96                      | 0,001 118               | 0,2270                   | 731,27                  | 1847,4   | 2578,7                   | 732,22                  | 2039,0   | 2771,6                   | 2,0710                         | 4,5711   | 6,6421          |
| 0,90                 | 175,38                      | 0,001 121               | 0,2150                   | 741,83                  | 1838,6   | 2580,5                   | 742,83                  | 2031,1   | 2773,9                   | 2,0946                         | 4,5280   | 6,6226          |
| 0,95                 | 177,69                      | 0,001 124               | 0,2042                   | 751,95                  | 1830,2   | 2582,1                   | 753,02                  | 2023,1   | 2776,1                   | 2,1172                         | 4,4869   | 6,6041          |
| 1,00                 | 179,91                      | 0,001 127               | 0,19444                  | 761,68                  | 1822,0   | 2583,6                   | 762,81                  | 2015,3   | 2778,1                   | 2,1387                         | 4,4478   | 6,5865          |
| 1,10                 | 184,09                      | 0,001 133               | 0,17753                  | 780,09                  | 1806,3   | 2586,4                   | 781,34                  | 2000,4   | 2781,7                   | 2,1792                         | 4,3744   | 6,5536          |
| 1,20                 | 187,99                      | 0,001 139               | 0,16333                  | 797,29                  | 1791,5   | 2588,8                   | 798,65                  | 1986,2   | 2784,8                   | 2,2166                         | 4,3067   | 6,5233          |
| 1,30                 | 191,64                      | 0,001 144               | 0,15125                  | 813,44                  | 1777,5   | 2591,0                   | 814,93                  | 1972,7   | 2787,6                   | 2,2515                         | 4,2438   | 6,4953          |
| 1,40                 | 195,07                      | 0,001 149               | 0,140 84                 | 828,70                  | 1764,1   | 2592,8                   | 830,30                  | 1959,7   | 2790,0                   | 2,2842                         | 4,1850   | 6,4693          |
| 1,50                 | 198,32                      | 0,001 154               | 0,131 77                 | 843,16                  | 1751,3   | 2594,5                   | 844,89                  | 1947,3   | 2792,2                   | 2,3150                         | 4,1298   | 6,4448          |
| 1,75                 | 205,76                      | 0,001 166               | 0,113 49                 | 876,46                  | 1721,4   | 2597,8                   | 878,50                  | 1917,9   | 2796,4                   | 2,3851                         | 4,0044   | 6,3896          |
| 2,00                 | 212,42                      | 0,001 177               | 0,099 63                 | 906,44                  | 1693,8   | 2600,3                   | 908,79                  | 1890,7   | 2799,5                   | 2,4474                         | 3,8935   | 6,3409          |
| 2,25                 | 218,45                      | 0,001 187               | 0,088 75                 | 933,83                  | 1668,2   | 2602,0                   | 936,49                  | 1865,2   | 2801,7                   | 2,5035                         | 3,7937   | 6,2972          |
| 2,5                  | 223,99                      | 0,001 197               | 0,079 98                 | 959,11                  | 1644,0   | 2603,1                   | 962,11                  | 1841,0   | 2803,1                   | 2,5547                         | 3,7028   | 6,2575          |
| 3,0                  | 233,90                      | 0,001 217               | 0,066 68                 | 1004,78                 | 1599,3   | 2604,1                   | 1008,42                 | 1795,7   | 2804,2                   | 2,6457                         | 3,5412   | 6,1869          |
| 3,5                  | 242,60                      | 0,001 235               | 0,057 07                 | 1045,43                 | 1558,3   | 2603,7                   | 1049,75                 | 1753,7   | 2803,4                   | 2,7253                         | 3,4000   | 6,1253          |
| 4                    | 250,40                      | 0,001 252               | 0,049 78                 | 1082,31                 | 1520,0   | 2602,3                   | 1087,31                 | 1714,1   | 2801,4                   | 2,7964                         | 3,2737   | 6,0701          |
| 5                    | 263,99                      | 0,001 286               | 0,039 44                 | 1147,81                 | 1449,3   | 2597,1                   | 1154,23                 | 1640,1   | 2794,3                   | 2,9202                         | 3,0532   | 5,9734          |
| 6                    | 275,64                      | 0,001 319               | 0,032 44                 | 1205,44                 | 1384,3   | 2589,7                   | 1213,35                 | 1571,0   | 2784,3                   | 3,0267                         | 2,8625   | 5,8892          |
| 7                    | 285,88                      | 0,001 351               | 0,027 37                 | 1257,55                 | 1323,0   | 2580,5                   | 1267,00                 | 1505,1   | 2772,1                   | 3,1211                         | 2,6922   | 5,8133          |
| 8                    | 295,06                      | 0,001 384               | 0,023 52                 | 1305,57                 | 1264,2   | 2569,8                   | 1316,64                 | 1441,3   | 2758,0                   | 3,2068                         | 2,5364   | 5,7432          |
| 9                    | 303,40                      | 0,001 418               | 0,020 48                 | 1350,51                 | 1207,3   | 2557,8                   | 1363,26                 | 1378,9   | 2742,1                   | 3,2858                         | 2,3915   | 5,6722          |
| 10                   | 311,06                      | 0,001 452               | 0,018 026                | 1393,04                 | 1151,4   | 2544,4                   | 1407,56                 | 1317,1   | 2724,7                   | 3,3596                         | 2,2544   | 5,6141          |
| 11                   | 318,15                      | 0,001 489               | 0,015 987                | 1433,7                  | 1096,0   | 2529,8                   | 1450,1                  | 1255,5   | 2705,6                   | 3,4295                         | 2,1233   | 5,5527          |
| 12                   | 324,75                      | 0,001 527               | 0,014 263                | 1473,0                  | 1040,7   | 2513,7                   | 1491,3                  | 1193,6   | 2684,9                   | 3,4962                         | 1,9962   | 5,4924          |
| 13                   | 330,93                      | 0,001 567               | 0,012 780                | 1511,1                  | 985,0    | 2496,1                   | 1531,5                  | 1130,7   | 2662,2                   | 3,5606                         | 1,8718   | 5,4323          |
| 14                   | 336,75                      | 0,001 611               | 0,011 485                | 1548,6                  | 928,2    | 2476,8                   | 1571,1                  | 1066,5   | 2637,6                   | 3,6232                         | 1,7485   | 5,3717          |
| 15                   | 342,24                      | 0,001 658               | 0,010 337                | 1585,6                  | 869,8    | 2455,5                   | 1610,5                  | 1000,0   | 2610,5                   | 3,6848                         | 1,6249   | 5,3098          |
| 16                   | 347,44                      | 0,001 711               | 0,009 306                | 1622,7                  | 809,0    | 2431,7                   | 1650,1                  | 930,6    | 2580,6                   | 3,7461                         | 1,4994   | 5,2455          |
| 17                   | 352,37                      | 0,001 770               | 0,008 364                | 1660,2                  | 744,8    | 2405,0                   | 1690,3                  | 856,9    | 2547,2                   | 3,8079                         | 1,3698   | 5,1777          |
| 18                   | 357,06                      | 0,001 840               | 0,007 489                | 1698,9                  | 675,4    | 2374,3                   | 1732,0                  | 777,1    | 2509,1                   | 3,8715                         | 1,2329   | 5,1044          |
| 19                   | 361,54                      | 0,001 924               | 0,006 657                | 1739,9                  | 598,1    | 2338,1                   | 1776,5                  | 688,0    | 2464,5                   | 3,9388                         | 1,0839   | 5,0228          |
| 20                   | 365,81                      | 0,002 036               | 0,005 834                | 1785,6                  | 507,5    | 2293,0                   | 1826,3                  | 583,4    | 2409,7                   | 4,0139                         | 1,9130   | 4,9269          |
| 21                   | 369,89                      | 0,002 207               | 0,004 952                | 1842,1                  | 388,5    | 2230,6                   | 1888,4                  | 446,2    | 2334,6                   | 4,1075                         | 1,6938   | 4,8013          |
| 22                   | 373,80                      | 0,002 742               | 0,003 568                | 1961,9                  | 125,2    | 2087,1                   | 2022,2                  | 143,4    | 2165,6                   | 4,3110                         | 1,2216   | 4,5327          |
| 22,09                | 374,14                      | 0,003 155               | 0,003 155                | 2029,6                  | 0        | 2029,6                   | 2099,3                  | 0        | 2099,3                   | 4,4298                         | 0        | 4,4298          |

Tablo 2. Tablo 1 devamı

$$S_6 = S_f + X_6 S_{fg} \quad | \quad (7)$$

dır. Burada,

$S_f$  - doymuş sıvı entropisi

$S_g$  - doymuş buhar entropisi

$S_{fg}$  - doymuş buhar ile doymuş sıvı entropisi arasındaki fark

$$S_{fg} = S_g - S_f \quad | \quad (8)$$

$P_6 = 10$  kPa için

$$S_f = 0,6493 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$S_g = 8,1502 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$S_{fg} = 7,5009 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$S_6 = 0,6493 + 0,873 \cdot 7,5009$$

$$S_6 = 7,2 \text{ kJ/(kg.K)}$$

(Tablo 2)

(Bu değer **Şekil 3**'ten de okunabilir)

$h_6$  - Doymuş sıvı buharı karışımı bölgesinde entalpi

$$h_6 = h_f + X_6 h_{fg} \quad | \quad (9)$$

dır. Burada

$h_f$  - doymuş sıvı entalpisi

$h_g$  - doymuş buhar entalpisi

$h_{fg}$  - Doymuş buhar ile doymuş sıvı entalpisi arasındaki fark

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

$$h_f = 191,83 \text{ kJ/kg}$$

$$h_g = 2584,7 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fg} = 2392,8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = 191,83 + 0,873 \cdot 2392,8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = 2280,7 \text{ kJ/kg}$$

(Bu değer **Şekil 3**'ten de okunabilir)

5 Hali:

$$T_5 = 580 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$S_5 = S_6 = 7,2 \text{ kJ/(kg.K)}$$

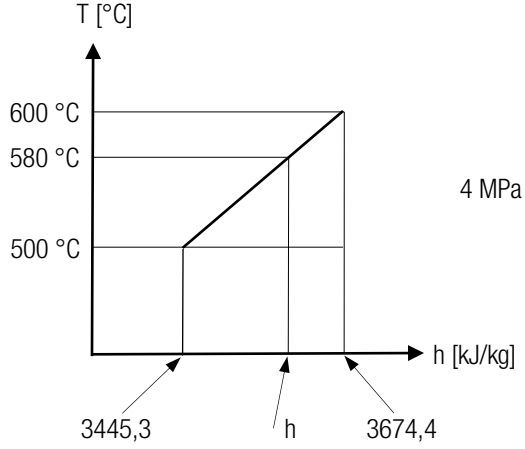
$$P_5 = 4,38 \text{ MPa}$$

4 MPa için,

$$500\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{500\text{ }^{\circ}\text{C}} = 3\,445,3\text{ kJ/kg}$$

$$600\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{600\text{ }^{\circ}\text{C}} = 3\,674,4\text{ kJ/kg}$$

(Tablo 3)



$$\frac{h - 3\,445,3}{3\,674,4 - 3\,445,3} = \frac{580 - 500}{600 - 500}$$

$$h_{580\text{ }^{\circ}\text{C}, 4\text{ MPa}} = 3\,628,58\text{ kJ/kg}$$

4,5 MPa için

$$500\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{500\text{ }^{\circ}\text{C}} = 3\,439,6\text{ kJ/kg}$$

$$600\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{600\text{ }^{\circ}\text{C}} = 3\,670,5\text{ kJ/kg}$$

(Tablo 3)

| $r$<br>°C                         | $v$<br>m³/kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) | $v$<br>m³/kg                       | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) | $v$<br>m³/kg                       | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|------------------------------------|--------------|--------------|------------------|------------------------------------|--------------|--------------|------------------|
| $P = 4,0 \text{ MPa (250,40 °C)}$ |              |              |              |                  | $P = 4,5 \text{ MPa (257,49 °C)}$  |              |              |                  | $P = 5,0 \text{ MPa (263,99 °C)}$  |              |              |                  |
| Doymuş                            | 0,049 78     | 2602,3       | 2801,4       | 6,0701           | 0,044 06                           | 2600,1       | 2798,3       | 6,0198           | 0,039 44                           | 2597,1       | 2794,3       | 5,9734           |
| 275                               | 0,054 57     | 2667,9       | 2886,2       | 6,2285           | 0,047 30                           | 2650,3       | 2863,2       | 6,1401           | 0,041 41                           | 2631,3       | 2838,3       | 6,0544           |
| 300                               | 0,058 84     | 2725,3       | 2960,7       | 6,3615           | 0,051 35                           | 2712,0       | 2943,1       | 6,2828           | 0,045 32                           | 2698,0       | 2924,5       | 6,2084           |
| 350                               | 0,066 45     | 2826,7       | 3092,5       | 6,5821           | 0,058 40                           | 2817,8       | 3080,6       | 6,5131           | 0,051 94                           | 2808,7       | 3068,4       | 6,4493           |
| 400                               | 0,073 41     | 2919,9       | 3213,6       | 6,7690           | 0,064 75                           | 2913,3       | 3204,7       | 6,7047           | 0,057 81                           | 2906,6       | 3195,7       | 6,6459           |
| 450                               | 0,080 02     | 3010,2       | 3330,3       | 6,9363           | 0,070 74                           | 3005,0       | 3323,3       | 6,8746           | 0,063 30                           | 2999,7       | 3316,2       | 6,8186           |
| 500                               | 0,086 43     | 3099,5       | 3445,3       | 7,0901           | 0,076 51                           | 3095,3       | 3439,6       | 7,0301           | 0,068 57                           | 3091,0       | 3433,8       | 6,9759           |
| 600                               | 0,098 85     | 3279,1       | 3674,4       | 7,3688           | 0,087 65                           | 3276,0       | 3670,5       | 7,3110           | 0,078 69                           | 3273,0       | 3666,5       | 7,2589           |
| 700                               | 0,110 95     | 3462,1       | 3905,9       | 7,6198           | 0,098 47                           | 3459,9       | 3903,0       | 7,5631           | 0,088 49                           | 3457,6       | 3900,1       | 7,5122           |
| 800                               | 0,122 87     | 3650,0       | 4141,5       | 7,8502           | 0,109 11                           | 3648,3       | 4139,3       | 7,7942           | 0,098 11                           | 3646,6       | 4137,1       | 7,7440           |
| 900                               | 0,134 69     | 3843,6       | 4382,3       | 8,0647           | 0,119 65                           | 3842,2       | 4380,6       | 8,0091           | 0,107 62                           | 3840,7       | 4378,8       | 7,9593           |
| 1000                              | 0,146 45     | 4042,9       | 4628,7       | 8,2662           | 0,130 13                           | 4041,6       | 4627,2       | 8,2108           | 0,117 07                           | 4040,4       | 4625,7       | 8,1612           |
| 1100                              | 0,158 17     | 4248,0       | 4880,6       | 8,4567           | 0,140 56                           | 4246,8       | 4879,3       | 8,4015           | 0,126 48                           | 4245,6       | 4878,0       | 8,3520           |
| 1200                              | 0,169 87     | 4458,6       | 5138,1       | 8,6376           | 0,150 98                           | 4457,5       | 5136,9       | 8,5825           | 0,135 87                           | 4456,3       | 5135,7       | 8,5331           |
| 1300                              | 0,181 56     | 4674,3       | 5400,5       | 8,8100           | 0,161 39                           | 4673,1       | 5399,4       | 8,7549           | 0,145 26                           | 4672,0       | 5398,2       | 8,7055           |
| $P = 6,0 \text{ MPa (275,64 °C)}$ |              |              |              |                  | $P = 7,0 \text{ MPa (285,88 °C)}$  |              |              |                  | $P = 8,0 \text{ MPa (295,06 °C)}$  |              |              |                  |
| Doymuş                            | 0,032 44     | 2589,7       | 2784,3       | 5,8892           | 0,027 37                           | 2580,5       | 2772,1       | 5,8133           | 0,023 52                           | 2569,8       | 2758,0       | 5,7432           |
| 300                               | 0,036 16     | 2667,2       | 2884,2       | 6,0674           | 0,029 47                           | 2632,2       | 2838,4       | 5,9305           | 0,024 26                           | 2590,9       | 2785,0       | 5,7906           |
| 350                               | 0,042 23     | 2789,6       | 3043,0       | 6,3335           | 0,035 24                           | 2769,4       | 3016,0       | 6,2283           | 0,029 95                           | 2747,7       | 2987,3       | 6,1301           |
| 400                               | 0,047 39     | 2892,9       | 3177,2       | 6,5408           | 0,039 93                           | 2878,6       | 3158,1       | 6,4478           | 0,034 32                           | 2863,8       | 3138,3       | 6,3634           |
| 450                               | 0,052 14     | 2988,9       | 3301,8       | 6,7193           | 0,044 16                           | 2978,0       | 3287,1       | 6,6327           | 0,038 17                           | 2966,7       | 3272,0       | 6,5551           |
| 500                               | 0,056 65     | 3082,2       | 3422,2       | 6,8803           | 0,048 14                           | 3073,4       | 3410,3       | 7,7975           | 0,041 75                           | 3064,3       | 3398,3       | 6,7240           |
| 550                               | 0,061 01     | 3174,6       | 3540,6       | 7,0288           | 0,051 95                           | 3167,2       | 3530,9       | 6,9486           | 0,045 16                           | 3159,8       | 3521,0       | 6,8778           |
| 600                               | 0,065 25     | 3266,9       | 3658,4       | 7,1677           | 0,055 65                           | 3260,7       | 3650,3       | 7,0894           | 0,048 45                           | 3254,4       | 3642,0       | 7,0206           |
| 700                               | 0,073 52     | 3453,1       | 3894,2       | 7,4234           | 0,062 83                           | 3448,5       | 3888,3       | 7,3476           | 0,054 81                           | 3443,9       | 3882,4       | 7,2812           |
| 800                               | 0,081 60     | 3643,1       | 4132,7       | 7,6566           | 0,069 81                           | 3639,5       | 4128,2       | 7,5822           | 0,060 97                           | 3636,0       | 4123,8       | 7,5173           |
| 900                               | 0,089 58     | 3837,8       | 4375,3       | 7,8727           | 0,076 69                           | 3835,0       | 4371,8       | 7,7991           | 0,067 02                           | 3832,1       | 4368,3       | 7,7351           |
| 1000                              | 0,097 49     | 4037,8       | 4622,7       | 8,0751           | 0,083 50                           | 4035,3       | 4619,8       | 8,0020           | 0,073 01                           | 4032,8       | 4616,9       | 7,9384           |
| 1100                              | 0,105 36     | 4243,3       | 4875,4       | 8,2661           | 0,090 27                           | 4240,9       | 4872,8       | 8,1933           | 0,078 96                           | 4238,6       | 4870,3       | 8,1300           |
| 1200                              | 0,113 21     | 4454,0       | 5133,3       | 8,4474           | 0,097 03                           | 4451,7       | 5130,9       | 8,3747           | 0,084 89                           | 4449,5       | 5128,5       | 8,3115           |
| 1300                              | 0,121 06     | 4669,6       | 5396,0       | 8,6199           | 0,103 77                           | 4667,3       | 5393,7       | 8,5475           | 0,090 80                           | 4665,0       | 5391,5       | 8,4842           |
| $P = 9,0 \text{ MPa (303,40 °C)}$ |              |              |              |                  | $P = 10,0 \text{ MPa (311,06 °C)}$ |              |              |                  | $P = 12,5 \text{ MPa (327,89 °C)}$ |              |              |                  |
| Doymuş                            | 0,020 48     | 2557,8       | 2742,1       | 5,6772           | 0,018 026                          | 2544,4       | 2724,7       | 5,6141           | 0,013 495                          | 2505,1       | 2673,8       | 5,4624           |
| 325                               | 0,023 27     | 2646,6       | 2856,0       | 5,8712           | 0,019 861                          | 2610,4       | 2809,1       | 5,7568           |                                    |              |              |                  |
| 350                               | 0,025 80     | 2724,4       | 2956,6       | 6,0361           | 0,022 42                           | 2699,2       | 2923,4       | 5,9443           | 0,016 126                          | 2624,6       | 2826,2       | 5,7118           |
| 400                               | 0,029 93     | 2848,4       | 3117,8       | 6,2854           | 0,026 41                           | 2832,4       | 3096,5       | 6,2120           | 0,020 00                           | 2789,3       | 3039,3       | 6,0417           |
| 450                               | 0,033 50     | 2955,2       | 3256,6       | 6,4844           | 0,029 75                           | 2943,4       | 3240,9       | 6,4190           | 0,022 99                           | 2912,5       | 3199,8       | 6,2719           |
| 500                               | 0,036 77     | 3055,2       | 3386,1       | 6,6576           | 0,032 79                           | 3045,8       | 3373,7       | 6,5966           | 0,025 60                           | 3021,7       | 3341,8       | 6,4618           |

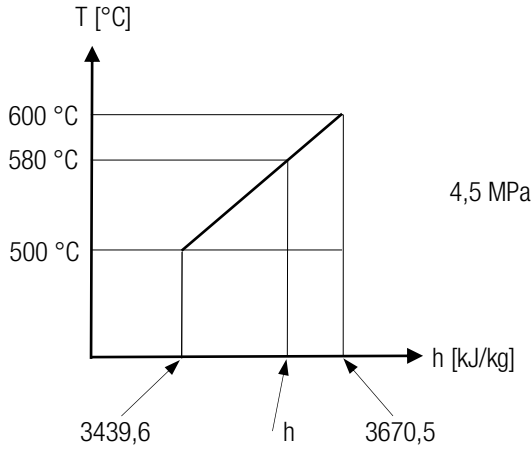
| $r$<br>°C | $v$<br>m³/kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) | $v$<br>m³/kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) | $v$<br>m³/kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| 550       | 0,039 87     | 3152,2       | 3511,0       | 6,8142           | 0,035 64     | 3144,6       | 3500,9       | 6,7561           | 0,028 01     | 3125,0       | 3475,2       | 6,6290           |
| 600       | 0,042 85     | 3248,1       | 3633,7       | 6,9589           | 0,038 37     | 3241,7       | 3625,3       | 6,9029           | 0,030 29     | 3225,4       | 3604,0       | 6,7810           |
| 650       | 0,045 74     | 3343,6       | 3755,3       | 7,0943           | 0,041 01     | 3338,2       | 3748,2       | 7,0398           | 0,032 48     | 3324,4       | 3730,4       | 6,9218           |
| 700       | 0,048 57     | 3439,3       | 3876,5       | 7,2221           | 0,043 58     | 3434,7       | 3870,5       | 7,1687           | 0,034 60     | 34229        | 3855,3       | 7,0536           |
| 800       | 0,054 09     | 3632,5       | 4119,3       | 7,4596           | 0,048 59     | 3628,9       | 4114,8       | 7,4077           | 0,038 69     | 3620,0       | 4103,6       | 7,2965           |
| 900       | 0,059 50     | 3829,2       | 4364,8       | 7,6783           | 0,053 49     | 3826,3       | 4361,2       | 7,6272           | 0,042 67     | 3819,1       | 4352,5       | 7,5182           |
| 1000      | 0,064 85     | 4030,3       | 4614,0       | 7,8821           | 0,058 32     | 4027,8       | 4611,0       | 7,8315           | 0,046 58     | 4021,6       | 4603,8       | 7,7237           |
| 1100      | 0,070 16     | 4236,3       | 4867,7       | 8,0740           | 0,063 12     | 4234,0       | 4865,1       | 8,0237           | 0,050 45     | 4228,2       | 4858,8       | 7,9165           |
| 1200      | 0,075 44     | 4447,2       | 5126,2       | 8,2556           | 0,067 89     | 4444,9       | 5123,8       | 8,2055           | 0,054 30     | 4439,3       | 5118,0       | 8,0937           |
| 1300      | 0,080 72     | 4662,7       | 5389,2       | 8,4284           | 0,072 65     | 4460,5       | 5387,0       | 8,3783           | 0,058 13     | 4654,8       | 5381,4       | 8,2717           |

Tablo 3. Kızgın su buharı tablosu  
[ÇENGEL (1996) S. ].

| $r$<br>°C                          | $v$<br>m³/kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) | $v$<br>m³/kg                       | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) | $v$<br>m³/kg                       | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|------------------------------------|--------------|--------------|------------------|------------------------------------|--------------|--------------|------------------|
| $P = 15,0 \text{ MPa (342,24 °C)}$ |              |              |              |                  | $P = 17,5 \text{ MPa (354,75 °C)}$ |              |              |                  | $P = 20,0 \text{ MPa (365,81 °C)}$ |              |              |                  |
| Doymuş                             | 0,010 337    | 2455,5       | 2610,5       | 5,3098           | 0,007 920                          | 2390,2       | 2528,8       | 5,1419           | 0,005 834                          | 2293,0       | 2409,7       | 4,9269           |
| 350                                | 0,011 470    | 2520,4       | 2692,4       | 5,4421           |                                    |              |              |                  |                                    |              |              |                  |
| 400                                | 0,015 649    | 2740,7       | 2975,5       | 5,8811           | 0,012 447                          | 2685,0       | 2902,9       | 5,7213           | 0,009 942                          | 2619,3       | 2818,1       | 5,5540           |
| 450                                | 0,018 445    | 2879,5       | 3156,2       | 6,1404           | 0,015 174                          | 2844,2       | 3109,7       | 6,0184           | 0,012 695                          | 2806,2       | 3060,1       | 5,9017           |
| 500                                | 0,020 80     | 2996,6       | 3308,6       | 6,3443           | 0,017 358                          | 2970,3       | 3274,1       | 6,2383           | 0,014 768                          | 2942,9       | 3238,2       | 6,1401           |
| 550                                | 0,022 93     | 3104,7       | 3448,6       | 6,5199           | 0,019 288                          | 3083,9       | 3421,4       | 6,4230           | 0,016 555                          | 3062,4       | 3393,5       | 6,3348           |
| 600                                | 0,024 91     | 3208,6       | 3582,3       | 6,6776           | 0,021 06                           | 3191,5       | 3560,1       | 6,5866           | 0,018 178                          | 3174,0       | 3537,6       | 6,5048           |
| 650                                | 0,026 80     | 3310,5       | 3712,3       | 6,8224           | 0,022 74                           | 3296,0       | 3693,9       | 6,7357           | 0,019 693                          | 3281,4       | 3675,3       | 6,6582           |
| 700                                | 0,028 61     | 3410,9       | 3840,1       | 6,9572           | 0,024 34                           | 3398,7       | 3824,6       | 6,8736           | 0,021 13                           | 3386,4       | 3809,0       | 6,7993           |
| 800                                | 0,032 10     | 3610,9       | 4092,4       | 7,2040           | 0,027 38                           | 3601,8       | 4081,1       | 7,1244           | 0,023 85                           | 3592,7       | 4069,7       | 7,0544           |
| 900                                | 0,035 46     | 3811,9       | 4343,8       | 7,4279           | 0,030 31                           | 3804,7       | 4335,1       | 7,3507           | 0,026 45                           | 3797,5       | 4326,4       | 7,2830           |
| 1000                               | 0,038 75     | 4015,4       | 4596,6       | 7,6348           | 0,033 16                           | 4009,3       | 4589,5       | 7,5589           | 0,028 97                           | 4003,1       | 4582,5       | 7,4925           |
| 1100                               | 0,042 00     | 4222,6       | 4852,6       | 7,8283           | 0,035 97                           | 4216,9       | 4846,4       | 7,7531           | 0,031 45                           | 4211,3       | 4840,2       | 7,6874           |
| 1200                               | 0,045 23     | 4433,8       | 5112,3       | 8,0108           | 0,038 76                           | 4428,3       | 5106,6       | 7,9360           | 0,033 91                           | 4422,8       | 5101,0       | 7,8707           |
| 1300                               | 0,048 45     | 4649,1       | 5376,0       | 8,1840           | 0,041 54                           | 4643,5       | 5370,5       | 8,1093           | 0,036 36                           | 4638,0       | 5365,1       | 8,0442           |
| $P = 25,0 \text{ MPa}$             |              |              |              |                  | $P = 30,0 \text{ MPa}$             |              |              |                  | $P = 35,0 \text{ MPa}$             |              |              |                  |
| 375                                | 0,001 9731   | 1798,7       | 1848,0       | 4,0320           | 0,001 7892                         | 1737,8       | 1791,5       | 3,9305           | 0,001 700 3                        | 1702,9       | 1762,4       | 3,8722           |
| 400                                | 0,006 004    | 2430,1       | 2580,2       | 5,1418           | 0,002 790                          | 2067,4       | 2151,1       | 4,4728           | 0,002 100                          | 1914,1       | 1987,6       | 4,2126           |
| 425                                | 0,007 881    | 2609,2       | 2806,3       | 5,4723           | 0,005 303                          | 2455,1       | 2614,2       | 5,1504           | 0,003 428                          | 2253,4       | 2373,4       | 4,7747           |
| 450                                | 0,009 162    | 2720,7       | 2949,7       | 5,6744           | 0,006 735                          | 2619,3       | 2821,4       | 5,4424           | 0,004 961                          | 2498,7       | 2672,4       | 5,1962           |
| 500                                | 0,011 123    | 2884,3       | 3162,4       | 5,9592           | 0,008 678                          | 2820,7       | 3081,1       | 5,7905           | 0,006 927                          | 2751,9       | 2994,4       | 5,6282           |
| 550                                | 0,012 724    | 3017,5       | 3335,6       | 6,1765           | 0,010 168                          | 2970,3       | 3275,4       | 6,0342           | 0,008 345                          | 2921,0       | 3213,0       | 5,9026           |
| 600                                | 0,014 137    | 3137,9       | 3491,4       | 6,3602           | 0,011 446                          | 3100,5       | 3443,9       | 6,2331           | 0,009 527                          | 3062,0       | 3395,5       | 6,1179           |
| 650                                | 0,015 433    | 3251,6       | 3637,4       | 6,5229           | 0,012 596                          | 3221,0       | 3598,9       | 6,4058           | 0,010 575                          | 3189,8       | 3559,9       | 6,3010           |
| 700                                | 0,016 646    | 3361,3       | 3777,5       | 6,6707           | 0,013 661                          | 3335,8       | 3745,6       | 6,5606           | 0,011 533                          | 33098        | 3713,5       | 6,4631           |
| 800                                | 0,018 912    | 3574,3       | 4047,1       | 6,9345           | 0,015 623                          | 3555,5       | 4024,2       | 6,8332           | 0,013 278                          | 3536,7       | 4001,5       | 6,7450           |
| 900                                | 0,021 045    | 3783,0       | 4309,1       | 7,1680           | 0,017 448                          | 3768,5       | 4291,9       | 7,0718           | 0,014 883                          | 3754,0       | 4274,9       | 6,9386           |
| 1000                               | 0,023 10     | 3990,9       | 4568,5       | 7,3802           | 0,019 196                          | 3978,8       | 4554,7       | 7,2867           | 0,016 410                          | 3966,7       | 4541,1       | 7,2064           |
| 1100                               | 0,025 12     | 4200,2       | 4828,2       | 7,5765           | 0,020 903                          | 4189,2       | 4816,3       | 7,4845           | 0,017 895                          | 4178,3       | 4804,6       | 7,4037           |
| 1200                               | 0,027 11     | 4412,0       | 5089,9       | 7,7605           | 0,022 589                          | 4401,3       | 5079,0       | 7,6692           | 0,019 360                          | 4390,7       | 5068,3       | 7,5910           |
| 1300                               | 0,029 10     | 4626,9       | 5354,4       | 7,9342           | 0,024 266                          | 4616,0       | 5344,0       | 7,8432           | 0,020 815                          | 4605,1       | 5333,6       | 7,7653           |
| $P = 40,0 \text{ MPa}$             |              |              |              |                  | $P = 50,0 \text{ MPa}$             |              |              |                  | $P = 60,0 \text{ MPa}$             |              |              |                  |
| 375                                | 0,001 6407   | 1677,1       | 1742,8       | 3,8290           | 0,001 559 4                        | 1638,6       | 1716,6       | 3,7639           | 0,001 502 8                        | 1609,4       | 1699,5       | 3,7141           |
| 400                                | 0,01 9077    | 1854,6       | 1930,9       | 4,1135           | 0,001 730 9                        | 1788,1       | 1874,6       | 4,0031           | 0,001 633 5                        | 1745,4       | 1843,4       | 3,9318           |
| 425                                | 0,002 532    | 2096,9       | 2198,1       | 4,5029           | 0,002 007                          | 1959,7       | 2060,0       | 4,2734           | 0,001 8165                         | 1892,7       | 2001,7       | 4,1626           |

| $r$<br>°C | $v$<br>m³/kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) | $v$<br>m³/kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) | $v$<br>m³/kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/(kg·K) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| 450       | 0,003 693    | 2365,1       | 2512,8       | 4,9459           | 0,002 486    | 2159,6       | 2284,0       | 4,5884           | 0,002 085    | 2053,9       | 2179,0       | 4,4121           |
| 500       | 0,005 622    | 2678,4       | 2903,3       | 5,4700           | 0,003 892    | 2525,5       | 2720,1       | 5,1726           | 0,002 956    | 2390,6       | 2567,9       | 4,9321           |
| 550       | 0,006 984    | 2869,7       | 3149,1       | 5,7785           | 0,005 118    | 2763,6       | 3019,5       | 5,5485           | 0,003 956    | 2658,8       | 2896,2       | 5,3441           |
| 600       | 0,008 094    | 3022,6       | 3346,4       | 6,0144           | 0,006 112    | 2942,0       | 3247,6       | 5,8178           | 0,004 834    | 2861,1       | 3151,2       | 5,6452           |
| 650       | 0,009 063    | 3158,0       | 3520,6       | 6,2054           | 0,006 966    | 3093,5       | 3441,8       | 6,0342           | 0,005 595    | 3028,8       | 3364,5       | 5,8829           |
| 700       | 0,009 941    | 3283,6       | 3681,2       | 6,3750           | 0,007 727    | 3230,5       | 3616,8       | 6,2189           | 0,006 272    | 3177,2       | 3553,5       | 6,0824           |
| 800       | 0,011 523    | 3517,8       | 3978,7       | 6,6662           | 0,009 076    | 3479,8       | 3933,6       | 6,5290           | 0,007 459    | 3441,5       | 3889,1       | 6,4109           |
| 900       | 0,012 962    | 3739,4       | 4257,9       | 6,9150           | 0,010 283    | 3710,3       | 4224,4       | 6,7882           | 0,008 508    | 3681,0       | 4191,5       | 6,6805           |
| 1000      | 0,014 324    | 3954,6       | 4527,9       | 7,1356           | 0,011 411    | 3930,5       | 4501,1       | 7,0146           | 0,009 480    | 3906,4       | 4475,2       | 6,9127           |
| 1100      | 0,015 642    | 4167,4       | 4793,1       | 7,3364           | 0,012 496    | 4145,7       | 4770,5       | 7,2184           | 0,010 409    | 4124,1       | 4748,6       | 7,1195           |
| 1200      | 0,016 940    | 4380,1       | 5057,7       | 7,5224           | 0,013 561    | 4359,1       | 5037,2       | 7,4058           | 0,011 317    | 4338,2       | 5017,2       | 7,3083           |
| 1300      | 0,018 229    | 4594,3       | 5323,5       | 7,6969           | 0,014 616    | 4572,8       | 5303,6       | 7,5808           | 0,012 215    | 4551,4       | 5284,3       | 7,4837           |

Tablo 4. Tablo 3 devamı  
[ÇENGEL, 1996. S. ]



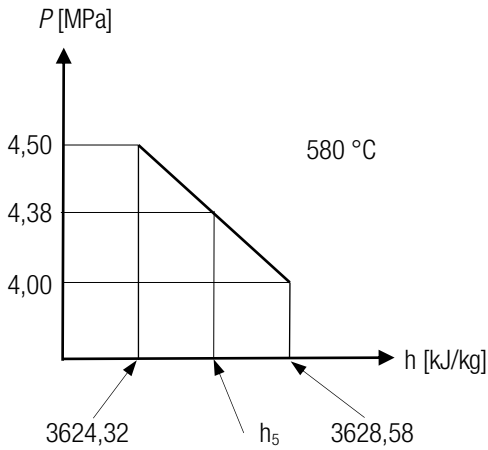
$$\frac{h - 3\,439,6}{3\,670,5 - 3\,439,6} = \frac{580 - 500}{600 - 500}$$

$$h_{580\text{ }^{\circ}\text{C}, 4,5\text{ MPa}} = 3\,624,32\text{ kJ/kg}$$

$$h_{580\text{ }^{\circ}\text{C}, 4\text{ MPa}} = 3\,628,5\text{ kJ/kg}$$

$$h_{580\text{ }^{\circ}\text{C}, 4,5\text{ MPa}} = 3\,624,32\text{ kJ/kg} \quad \left. \vphantom{\begin{matrix} h_{580\text{ }^{\circ}\text{C}, 4,5\text{ MPa}} \\ h_{580\text{ }^{\circ}\text{C}, 4\text{ MPa}} \end{matrix}} \right\}$$

değerleri ile



$$\frac{3\,628,58 - h_5}{3\,628,58 - 3\,624,32} = \frac{4,38 - 4}{4,5 - 4}$$

$$h_5 = h_{580\text{ }^{\circ}\text{C}, 4,38\text{ MPa}} = 3\,625,3424\text{ kJ/kg}$$

(bu değer **Şekil 3**'ten de okunabilir)

### 1 Hali:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 10 \text{ kPa} \\ \text{Doymuş sıvı} \end{array} \right\} T_{\text{doyma}} = 45,81 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Tablo 2})$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = h_{f, 10 \text{ kPa}} = 191,83 \text{ kJ/kg} \\ v_1 = v_{f, 10 \text{ kPa}} = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg} \\ s_1 = s_{f, 10 \text{ kPa}} = 0,6493 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \end{array} \right\} \quad (\text{Tablo 2})$$

### 2 Hali:

$$\begin{array}{l} p_2 = 24,8 \text{ mPa} \\ s_2 = s_1 = s_{f, 10 \text{ kPa}} = 0,6493 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \end{array} \quad | \quad (\text{Tablo 2})$$

Pompa işi:

$$w_{\text{pompa,g}} = v_1(p_2 - p_1) \quad | \quad (11)$$

Burada adyabatik verim göz önüne alınmamıştır (Gerçek pompa ve türbinlerin izantropik pompa ve türbinlerden farklılığı adyabatik verim  $\eta_p$  tanımıyla göz önüne alınabilir).

$$w_{\text{pompa,g}} = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg} (24\ 800 - 10) \text{ kPa}$$

$$1 \text{ kJ} = 1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3$$

olduğuna göre

$$w_{\text{pompa,g}} \cong 25,04 \text{ kJ/kg}$$

Diğer taraftan,

$$w_{\text{pompa,g}} = h_2 - h_1 \quad (q = 0) \quad | \quad (12)$$

$$h_2 = 25,04 + 191,803$$

$$h_2 = 216,87 \text{ kJ/kg}$$

### 3. Hali:

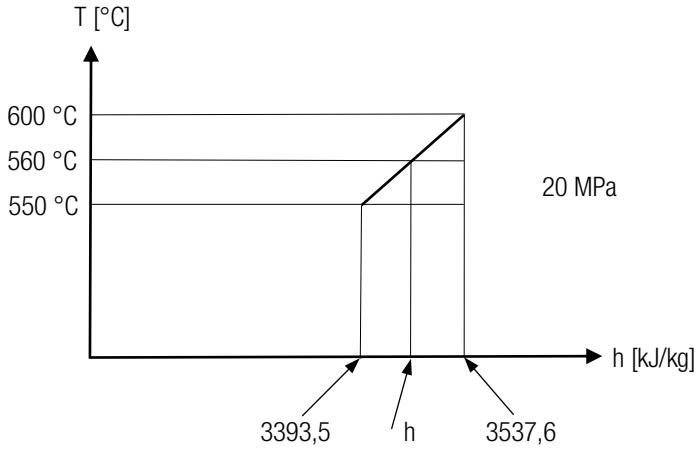
$$P_3 = 24,8 \text{ MPa}$$

$$T_3 = 560 \text{ } ^\circ\text{C derece}$$

$p = 20 \text{ MPa}$  için, **Tablo 4**'ten

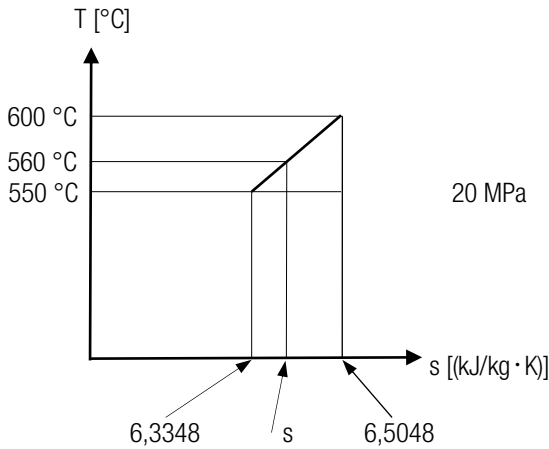
$$\begin{array}{l} T = 550 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow h_{550 \text{ } ^\circ\text{C}, 20 \text{ MPa}} = 3\ 393,5 \text{ kJ/kg} \\ s_{550 \text{ } ^\circ\text{C}, 20 \text{ MPa}} = 6,3348 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} T = 600 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow h_{600 \text{ } ^\circ\text{C}, 20 \text{ MPa}} = 3\ 537,6 \text{ kJ/kg} \\ s_{600 \text{ } ^\circ\text{C}, 20 \text{ MPa}} = 6,5048 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \end{array}$$



$$\frac{h - 3\,393,5}{3\,537,6 - 3\,393,5} = \frac{560 - 550}{600 - 550}$$

$$h_{560\text{ }^{\circ}\text{C}, 20\text{ MPa}} = 3\,422,32\text{ kJ/kg}$$



$$\frac{S - 6,3348}{6,5048 - 6,3348} = \frac{560 - 550}{600 - 550}$$

$$S_{560\text{ }^{\circ}\text{C}, 20\text{ MPa}} = 6,3688\text{ kJ/(kg.K)}$$

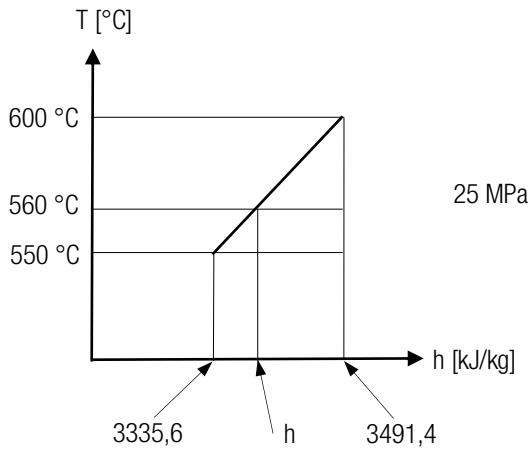
$p = 25\text{ MPa}$  için **Tablo 4**'ten

$$T = 550\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{550\text{ }^{\circ}\text{C}, 25\text{ MPa}} = 3\,335,6\text{ kJ/kg}$$

$$S_{550\text{ }^{\circ}\text{C}, 25\text{ MPa}} = 6,1765\text{ kJ/(kg.K)}$$

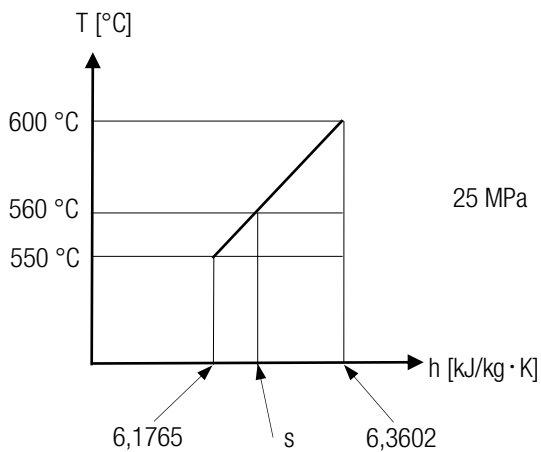
$$T = 600\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{600\text{ }^{\circ}\text{C}, 25\text{ MPa}} = 3\,491,4\text{ kJ/kg}$$

$$S_{600\text{ }^{\circ}\text{C}, 25\text{ MPa}} = 6,3602\text{ kJ/(kg.K)}$$



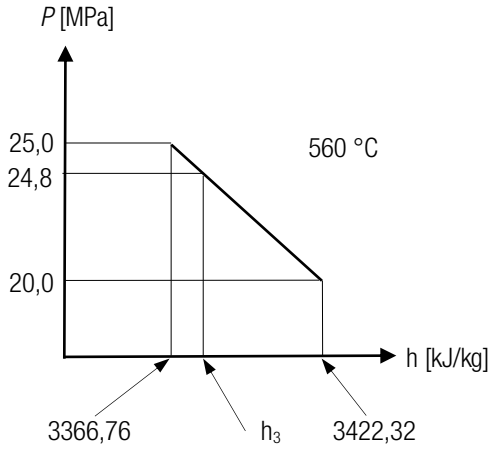
$$\frac{h - 3\,335,6}{3\,491,4 - 3\,335,6} = \frac{560 - 550}{600 - 550}$$

$$h_{560\text{ °C}, 25\text{ MPa}} = 3\,366,76\text{ kJ/kg}$$



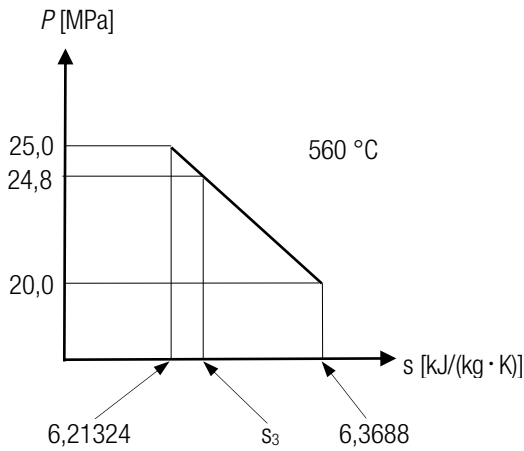
$$\frac{s - 6,1765}{6,3602 - 6,1765} = \frac{560 - 550}{600 - 550}$$

$$s_{560\text{ °C}, 25\text{ MPa}} = 6,21324\text{ kJ/(kg.K)}$$



$$\frac{3422,32 - h_3}{3422,32 - 3366,76} = \frac{24,8 - 20}{25 - 20}$$

$$h_3 = h_{560\text{ }^{\circ}\text{C}, 24,8\text{ MPa}} = 3368,98\text{ kJ/kg}$$



$$\frac{6,3688 - s_3}{6,3688 - 6,21324} = \frac{24,8 - 20}{25 - 20}$$

$$s_3 = s_{560\text{ }^{\circ}\text{C}, 24,8\text{ MPa}} \cong 6,22\text{ kJ/(kg.K)}$$

4 Hali:

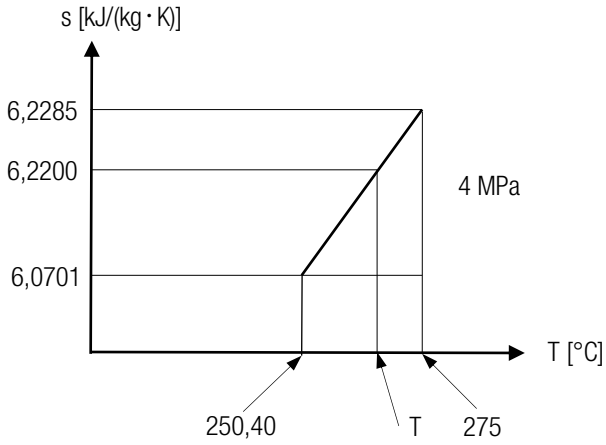
$$p_4 = 4,38\text{ MPa}$$

$$s_4 = s_3 = s_{560\text{ }^{\circ}\text{C}, 24,8\text{ MPa}} = 6,22\text{ kJ/(kg.K)}$$

$p = 4\text{ MPa}$  için, **Tablo 3**'ten

$$T_{\text{doyma}} = 250,40\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow s_{250,40\text{ }^{\circ}\text{C}, 4\text{ MPa}} = 6,0701\text{ kJ/(kg.K)}$$

$$T = 275 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow S_{275 \text{ }^{\circ}\text{C}, 4 \text{ MPa}} = 6,2285 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$



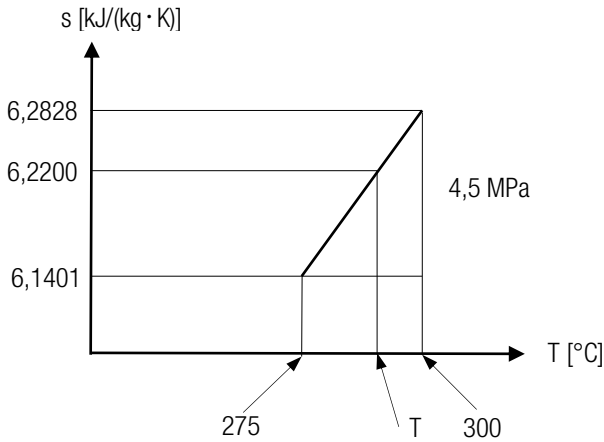
$$\frac{T - 250,40}{275 - 250,40} = \frac{6,22 - 6,0701}{6,2285 - 6,0701}$$

$$T_{4 \text{ MPa}, 6,22 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})} = 273,68 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$p = 4,5 \text{ MPa}$  için, **Tablo 3**'ten

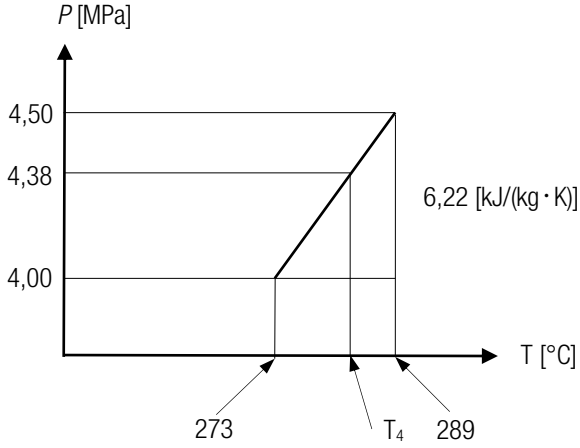
$$T = 275 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow S_{275 \text{ }^{\circ}\text{C}, 4,5 \text{ MPa}} = 6,1401 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow S_{300 \text{ }^{\circ}\text{C}, 4,5 \text{ MPa}} = 6,2828 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$



$$\frac{T - 275}{300 - 275} = \frac{6,22 - 6,1401}{6,2828 - 6,1401}$$

$$T_{4,5 \text{ MPa}, 6,22 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})} \cong 289 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



$$\frac{T_4 - 273}{289 - 273} = \frac{4,38 - 4}{4,5 - 4}$$

$$T_4 = T_{4,38 \text{ MPa}, 6,22 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})} \cong 285 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

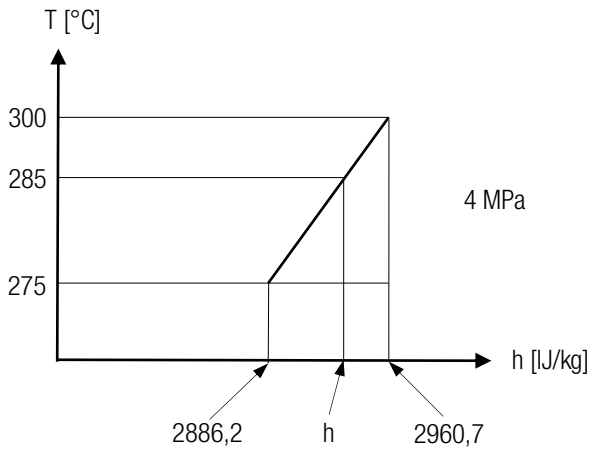
$$P_4 = 4,38 \text{ MPa}$$

$$T_4 = 285 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$p = 4 \text{ MPa}$  için, **Tablo 3**'ten

$$T = 275 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{275 \text{ }^{\circ}\text{C}, 4 \text{ MPa}} = 2\,886,2 \text{ kJ/kg}$$

$$T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{300 \text{ }^{\circ}\text{C}, 4 \text{ MPa}} = 2\,960,7 \text{ kJ/kg}$$



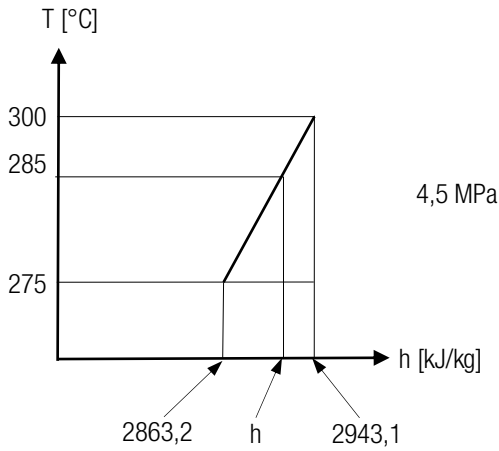
$$\frac{h - 2\,886,2}{2\,960,7 - 2\,886,2} = \frac{285 - 275}{300 - 275}$$

$$h_{4\text{MPa}, 285\text{ }^{\circ}\text{C}} = 2\,916\text{ kJ/kg}$$

$p = 4,5\text{ MPa}$  için **Tablo 3**'ten

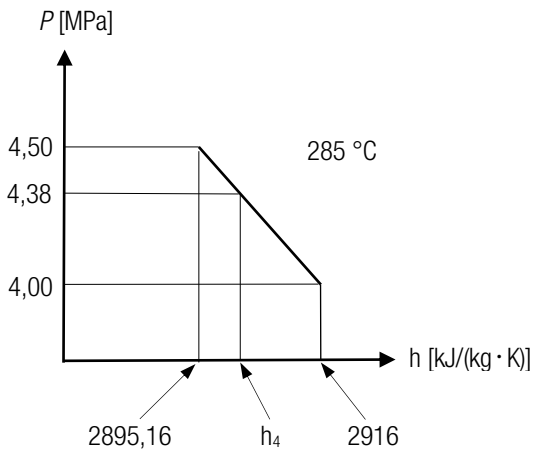
$$T_{275\text{ }^{\circ}\text{C}} \rightarrow h_{275\text{ }^{\circ}\text{C}, 4,5\text{ MPa}} = 2\,863,2\text{ kJ/kg}$$

$$T_{300\text{ }^{\circ}\text{C}} \rightarrow h_{300\text{ }^{\circ}\text{C}, 4,5\text{ MPa}} = 2\,943,1\text{ kJ/kg}$$



$$\frac{h - 2\,863,2}{2\,943,1 - 2\,863,2} = \frac{285 - 275}{300 - 275}$$

$$h_{4,5\text{ MPa}, 285\text{ }^{\circ}\text{C}} = 2\,895,16\text{ kJ/kg}$$



$$\frac{2\,916 - h_4}{2\,916 - 2\,895,16} = \frac{4,38 - 4}{4,5 - 4}$$

$$h_4 = h_{4,38 \text{ MPa}, 285 \text{ }^{\circ}\text{C}} \cong 2\,900,17 \text{ kJ/kg}$$

Sonuçları bir tabloda gösterelim:

|   | p [MPa] | T [°C] | h [kJ/kg] | s [kJ/(kg · K)] |
|---|---------|--------|-----------|-----------------|
| 1 | 0,01    | 45,81  | 191,83    | 0,6493          |
| 2 | 24,8    | ~45,81 | 216,87    | 0,6493          |
| 3 | 24,8    | 560    | 3368,98   | 6,22            |
| 4 | 4,38    | 285    | 2900,17   | 6,22            |
| 5 | 4,38    | 580    | 3625,3424 | 7,2             |
| 6 | 0,01    | 45,81  | 2280,7    | 7,2             |

Not:

$$T_{\text{doyma}} = 45,81 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Sayfa 23})$$

$$T_1 = T_6 = T_{\text{doyma}} = 45,81 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 - \text{Pompa çıkışı su sıcaklığı}$$

$$T_2 \cong T_1 = 45,81 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

alınabilir.

Yukarıdaki tablo değerleri **Şekil 3** (Sayfa 13) üzerine de işlenmiştir.

• Buhara verilen toplam ısı (çevrime verilen ısı)

$$\left. \begin{aligned} q_g &= q_{\text{birincil}} + q_{\text{ara ısıtma}} \\ q_g &= (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \end{aligned} \right\} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

$$q_g = (3\,368,98 - 216,87) + (3\,625,3424 - 2\,900,17)$$

$$q_g \cong 3\,877,3 \text{ kJ/kg}$$

• Çevrimden alınan ısı (yoğuşturucuda iş etkileşimi yok,  $w = 0$ )

$$\left. \begin{aligned} q_c &= h_6 - h_1 \\ q_c &= 2\,280,7 - 191,83 \\ q_c &= 2\,088,87 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \right| \quad (13)$$

• Türbinde yapılan toplam iş (pompa hariç)

$$\left. \begin{aligned} w_t &= (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \\ w_t &= (3\,368,98 - 2\,900,17) + (3\,625,3424 - 2\,280,7) \\ w_t &= 1\,813,4524 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \right| \quad (\text{Eşitlik 2})$$

• Elde edilen net iş

$$\left. \begin{aligned} w_{\text{net}} &= w_{\text{türbin, ç}} - w_{\text{pompa, g}} \\ w_{\text{pompa, g}} &= 25,04 \text{ kJ/kg} \\ w_{\text{net}} &= 1\,813,4524 - 25,04 \\ w_{\text{net}} &= 1\,788,4 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \right| \quad (\text{Sayfa 23})$$

bulunur.

• Rankine çevriminin ısı verimi

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_f} = 1 - \frac{Q_c}{Q_f}$$

$$\eta_{th} = \frac{1\,788,4}{3\,877,3}$$

$$\eta_{th} = \% 46$$

veya

$$\eta_{th} = 1 - \frac{2\,088,87}{3\,877,3}$$

$$\eta_{th} = \% 46 \text{ (aynı sonuç bulunur)}$$

Projede bu değer % 45 olarak verilmiştir (DOKAY MÜHENDİSLİK, 2019, ÇSED Raporu, S. 5)

Not.

► Hesaplarımızda adyabatik verimi gözönüne almadık (bkz. Sayfa 23).

**Adyabatik verim:** Gerçek hal değişiminin izantropik hal değişiminden sapmasını gösterir. Yunus Çengel hocamızın (ÇENGEL, 1996) örnek problemlerinde bu değer, pompa için  $\eta_p = 0,85$ , türbin için  $\eta_t = 0,87$  alınmıştır. Adyabatik verimi göz önüne alsaydık, pompa daha çok iş gerektirir, türbin ise daha az iş yapar olacaktı.

► Ayrıca yoğuşturucu basıncını ÇED raporunda bulamadık; ancak literatür taraması ile  $p_{yoğuşturucu} = 0,01 \text{ MPa} = 10 \text{ kPa}$  olarak seçtik.

►  $\eta_{th} = \% 46$  dır, yani, güç santrali kazanda aldığı ısıнын % 46 sını net işe dönüştürebilmektedir. Aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan gerçek bir güç santralinin ısı verimi sürtünme ve tersinmezliklerden dolayı daha az olacaktır. Bu nedenlerden dolayı hesapladığımız  $\eta_{th} = \% 46$  değeri yerine ÇED raporundaki

$$\eta_{th} = \% 45$$

değerini kabul edebiliriz.

• Yoğuşturucu (kondansör) basıncının seçimi:

ÇENGEL (1996)'ya göre:

Yoğuşturucudaki su buharı, yoğuşturucu çalışma basıncına karşı gelen doyma sıcaklığında, doymuş sıvı buhar karışımıdır. Düşük basınçlarda artan ısı veriminden yararlanabilmek için buharlı güç santrallerinin yoğuşturucuları

genellikle atmosfer basıncının çok daha altında çalışırlar. Fakat yoğuşturucu basıncının düşürülebileceği bir alt sınır vardır. Bu sınır, çevrimin ısı verdiği ortamın sıcaklığına karşılık gelen doyma basıncıdır. Su sıcaklığı 15 °C olan bir ırmak örnek olarak alınsın. Etkin bir ısı geçişinin olması için 10 °C kadar bir sıcaklık farkı gerektiği düşünülürse, yoğuşturucudaki su buharının sıcaklığı 25 °C olacaktır. Bu sıcaklığa karşı gelen doyma basıncı 3,2 kPa dır (**Şekil 3**). Bu nedenle basıncı 3,2 kPa'nın altında olamaz.

BÜYÜKTÜR (1985)'e göre Yoğuşturucu basıncını

$$0,01 \text{ MPa} = 10 \text{ kPa} = 0,1 \text{ bar}$$

olarak seçmiştik. Seçtiğimiz bu basıncın mertebesi hakkında bilgi sahibi olabilmemiz için A. Rasim Büyüktür hocamdan [BÜYÜKTÜR (1985), S. ] aşağıda verilen nattan faydalanabiliriz.

Kondansör basıncı, kondansörün yapısı, büyüklüğü ve işletilmesi ile ilgili diğer faktörlerin yayında her şeyden önce kullanılan soğutma suyunun sıcaklığı ve miktarına bağlıdır. Soğutma suyunun sıcaklığı verildiği zaman iyi bir kondansörde ekonomik olarak gerçekleştirilebilecek basıncın değeri de yaklaşık olarak belirlenebilir. Konu ile ilgili **Şekil 4**'ü inceleyelim:

Verim: % 45

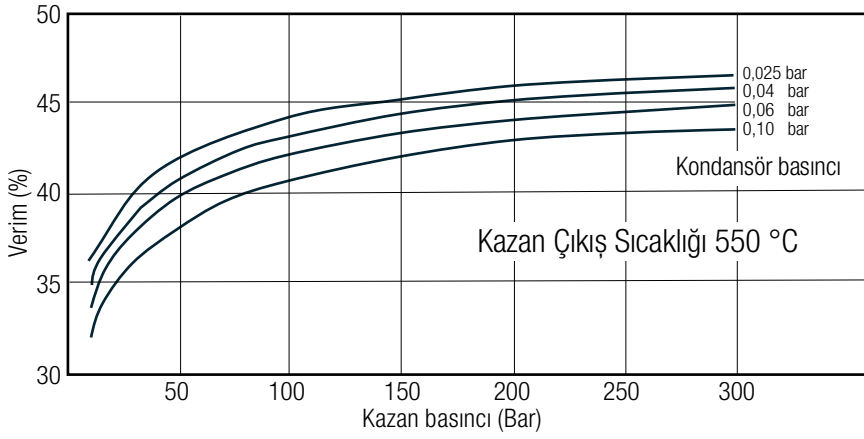
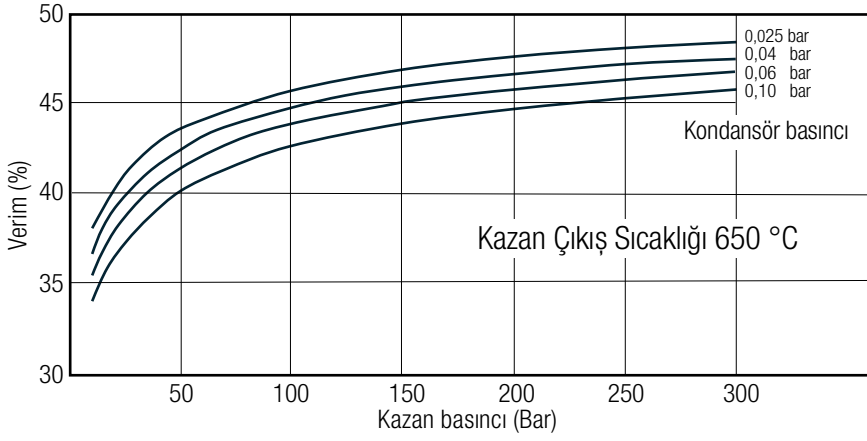
Kazan basıncı: 24,8 MPa = 248 bar

Kazan çıkış sıcaklığı,

650 °C için kondansör basıncı: 0,10 bar

550 °C için kondansör basıncı: 0,06 bar

değerleri okunabilir.



**Şekil 4.** Giriş ve çıkış şartlarının Rankine çevriminin verim üzerindeki etkisi  
[BÜYÜKTÜR (1985), S. ]



### III. Santral’de kullanılacak yıllık toplam kömür miktarı:

Amasra-B bölgesinden üretilen kömürün Termik Santral’de kullanılabilmesi için, önce lavvar tesislerinde yıkama + zenginleştirme işlemi ile kalorifik değerinin 5 600 (±200) kcal/kg değerine çıkarılması gerekmektedir (Projede öngörülen). Santralin yıllık çalışma süresi 7 400 saat olarak projelendirilmiştir.

Buna göre,

$$\text{Kurulu güç} = 2 \cdot 660 \text{ MW} = 1\,320 \text{ MW} = 1\,320 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kwh} = 3\,600 \text{ kJ}$$

$$1\,320 \cdot 10^3 \text{ kW} = 3\,600 \cdot 1\,320 \cdot 10^3 \text{ kJ/h}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,18 \text{ kJ}$$

$$3\,600 \cdot 1\,320 \cdot 10^3 \text{ kJ/h} = 3\,600 \cdot 1\,320 \cdot 10^3 / 4,18 \text{ kcal/h}$$

$$\cong 1,137 \cdot 10^9 \text{ kcal/h}$$

$$\frac{1,137 \cdot 10^9 \text{ kcal/h}}{5\,600 \text{ kcal/kg}} \cong 203\,035,7 \text{ kg/h}$$

Çevrimin ısı verimi

$$\eta_{th} = \% 45$$

olduğuna göre, kalorifik değeri 5 600 kcal/kg olan kömürden

$$\frac{203\,035,7 \text{ kg/h}}{0,45} = 451\,190,5 \text{ kg/h}$$

$$\sim 452 \text{ ton / saat}$$

kullanılmalıdır (ÇED raporunda, 458 ton/h değeri verilmiştir, DOKAY MÜHENDİSLİK, 2019, ÇSED Raporu, S. 1).

Santral yılda 7 400 saat çalışacağına göre yıllık kömür,

$$452 \text{ ton/saat} \cdot 7\,400 \text{ saat/yıl}$$

$$= 3\,344\,800 \text{ ton/yıl}$$

$$\cong 3,35 \cdot 10^6 \text{ ton/yıl (Hesap)}$$

$$458 \text{ ton/saat} \cdot 7\,400 \text{ saat/yıl}$$

$$= 3\,389\,200 \text{ ton/yıl}$$

$$\cong 3,39 \cdot 10^6 \text{ ton/yıl (ÇED raporu)}$$

Hesap ve ÇED raporu değerleri birbirine çok yakın, dolayısıyla

$$458 \text{ ton/saat} (= 3\,389\,200 \text{ ton/yıl}) \text{ (Kabul)}$$



#### IV. Yoğuşturucuda (Kondansör'de) kullanılacak soğutma suyu miktarı:

##### • Buharın kütle debisi

Santralde üretilecek güç, akışkanın (buharın) kütledebisi ile çevrimin net işinin çarpımıdır.

$$\dot{W}_{net} = \dot{m} \cdot w_{net}$$

| $\dot{W}_{net}$ | $\dot{m}$ | $w_{net}$ |
|-----------------|-----------|-----------|
| kJ/s            | kg/s      | kJ/kg     |

$\dot{W}_{net}$  - Buharlı santralin net gücü

$$\dot{W}_{net} = 2 \cdot 660 \text{ MW} = 1\,320 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 3\,600 \text{ kJ/h} = 1 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{W}_{net} = 1\,320 \cdot 10^3 \text{ kJ/s}$$

$\dot{W}_{net}$ : Elde edilen net iş

$$\dot{W}_{net} = 1\,788,4 \text{ kJ/kg (Sayfa 23)}$$

$$1\,320 \cdot 10^3 = \dot{m} \cdot 1\,788,4$$

Çevrimde dolaşan buharın kütle debisi

$$\dot{m} = 738 \text{ kg/s}$$

bulunur.

##### • Çevrimden alınan ısı (yoğuşturucuda) debisi

$$Q_{\dot{c}} = \dot{m} \cdot q_{\dot{c}} \quad (17)$$

| $Q_{\dot{c}}$ | $\dot{m}$ | $q_{\dot{c}}$ |
|---------------|-----------|---------------|
| kJ/s          | kg/s      | kJ/kg         |

$$q_{\dot{c}} = 2\,088,87 \text{ kJ/kg (Sayfa 30)}$$

$$Q_{\dot{c}} = 738 \cdot 2\,088,87$$

$$Q_{\dot{c}} \cong 1\,541\,586 \text{ kJ / s}$$

##### • Çevrimde (yoğuşturucuda) dolaşan suyun debisi

Yoğuşturucuda, soğutma suyu olarak deniz suyu kullanılacak olursa gerekli olan en az soğutma suyu,

$$\dot{m}_{\text{soğutma suyu}} = \frac{Q_{\dot{c}}}{C_{su} \cdot \Delta T} \quad (18)$$

$C_{su}$  – Suyun özgül ısısı

$$C_{su} = 4,184 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}$$

$\Delta T$  - Soğutma suyunun sıcaklık farkı

$\Delta T$  değerini irdeleyelim:

Seçilen yoğuşturucu basıncına (doyma basıncı = 0,01 MPa= 10 kPa) karşılık gelen doyma sıcaklığı 45,81 °C olarak **Şekil 3**'teki diyagramda gösterilmiştir.

Deniz suyu sıcaklığı ortalama 15 °C kabul edilirse

$$\Delta T = 45,81 - 15 = 30,81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T \cong 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Fark çok büyük ne yapılabilir?

Seçtiğimiz yoğuşturucu basıncını değiştirelim:

$$p_{\text{yoğuşturucu}} = 0,004 \text{ MPa} = 4 \text{ kPa}$$

ile hesaba girelim (daha önce de belirttim, ÇED raporunda bu değer yok veya bulamadık)

$$p = 4 \text{ kPa için}$$

$$T_{\text{doyma}} = 28,96 \text{ } ^\circ\text{C derece}$$

(Tablo 2)

uygun değer.

Devam edelim:

1. Hali:

$$p_1 = 4 \text{ kPa}$$

$$T_1 = T_{\text{doyma}} = 28,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_1 = h_{f, 4 \text{ kPa}} = 121,46 \text{ kJ/kg}$$

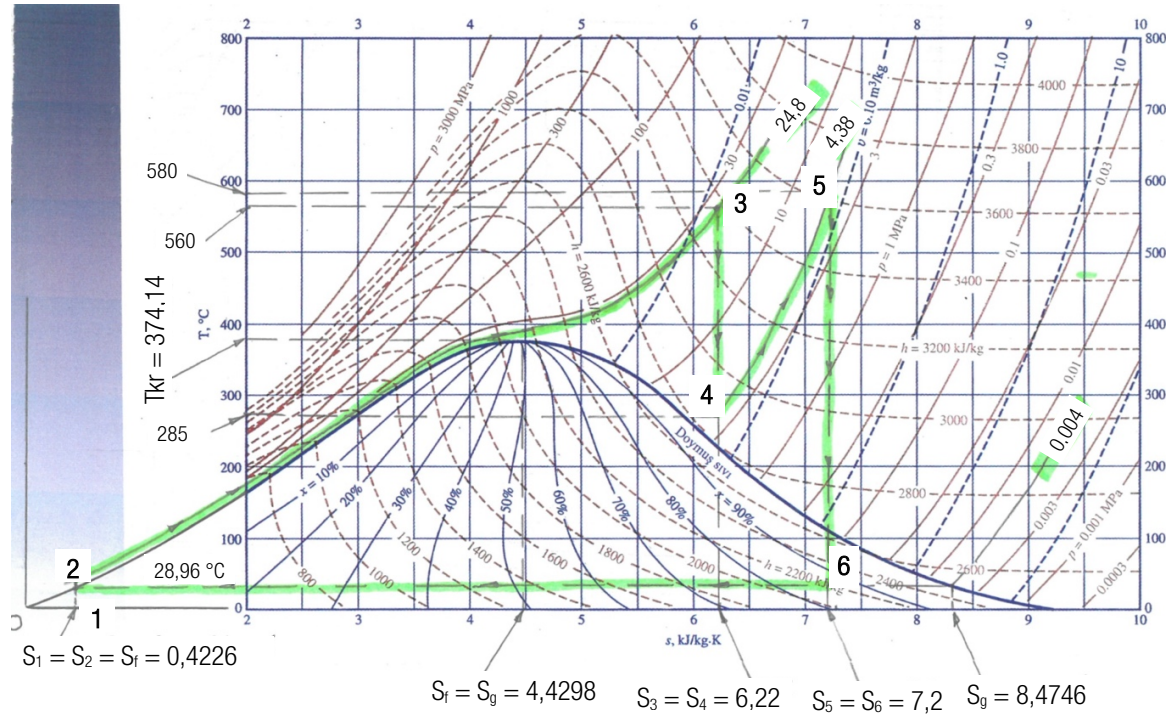
$$V_1 = V_{1, 4 \text{ kPa}} = 0,001004 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$S_1 = S_{f, 4 \text{ kPa}} = 0,4226 \text{ kJ/(kg.K)}$$

(Tablo 2)

2 Hali:

$$P_2 = 24,8 \text{ MPa}$$



**Şekil 5.** Buharlı güç santrali çevriminin T-S diagramı  
 [JONES & DUGAN (2003)];  $T_{kr} = 374,14^\circ\text{C}$ ,  $p_{kr} = 22,09\text{ MPa}$ , Yoğuşturucu basıncı:  $4\text{ kPa}$

$$S_2 = S_1 = S_{f, 4 \text{ kPa}} = 0,4226 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

Pompa işi,

$$W_{\text{pompa,g}} = v_1 (P_2 - P_1) \quad | \quad (\text{Eşitlik 11})$$

$$W_{\text{pompa,g}} = 0,001004 (24\,800 - 4)$$

$$W_{\text{pompa,g}} = 24,9 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{pompa,g}} = h_2 - h_1 \quad | \quad (\text{Eşitlik 12})$$

$$h_2 = 24,9 + 121,46$$

$$h_2 = 146,36 \text{ kJ/kg}$$

3 Hali:

$$h_3 = h_{560 \text{ }^\circ\text{C}, 24,8 \text{ MPa}} = 3\,368,98 \text{ kJ/kg} \quad | \quad (\text{Sayfa 26})$$

$$S_3 = S_{560 \text{ }^\circ\text{C}, 24,8 \text{ MPa}} = 6,22 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

4 Hali:

$$T_4 = T_{4,38 \text{ MPa}, 6,22 \text{ kJ}/(\text{kg.K})} = 285 \text{ }^\circ\text{C} \quad | \quad (\text{Sayfa 28})$$

$$S_4 = S_3 = S_{560 \text{ }^\circ\text{C}, 24,8 \text{ MPa}} = 6,22 \text{ kJ}/(\text{kg.K}) \quad | \quad (\text{Sayfa 26})$$

$$h_4 = h_{4,38 \text{ MPa}, 285 \text{ }^\circ\text{C}} = 2\,900,17 \text{ kJ/kg} \quad | \quad (\text{Sayfa 30})$$

5 Hali:

$$T_5 = T_{580 \text{ }^\circ\text{C}, 4,38 \text{ MPa}} = 580 \text{ }^\circ\text{C için}$$

$$h_5 = h_{580 \text{ }^\circ\text{C}, 4,38 \text{ MPa}} = 3\,625,3424 \text{ kJ/kg} \quad | \quad (\text{Sayfa 22})$$

$$S_5 = S_{580 \text{ }^\circ\text{C}, 4,38 \text{ MPa}} = 7,2 \text{ kJ}/(\text{kg.K}) \quad | \quad (\text{Şekil 5})$$

6 Hali:

$$S_5 = S_6 = s_{580 \text{ }^\circ\text{C}, 4,38 \text{ MPa}} = 7,2 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$p_6 = 4 \text{ kPa}$$

$$T_{\text{doyma}} = 28,96 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_6 = h_{28,96 \text{ }^\circ\text{C}, 4 \text{ kPa}} = 2\,200 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Şekil 5})$$

için

|   | p [MPa] | T [°C] | h [kJ/kg] | s [kJ/(kg.K)] |
|---|---------|--------|-----------|---------------|
| 1 | 0,004   | 28,96  | 121,46    | 0,4226        |
| 2 | 24,8    | ~28,96 | 146,36    | 0,4226        |
| 3 | 24,8    | 560    | 3368,98   | 6,22          |
| 4 | 4,38    | 285    | 2900,17   | 6,22          |
| 5 | 4,38    | 580    | 3625,3424 | 7,2           |
| 6 | 0,004   | 28,96  | 2200      | 7,2           |

Yoğuşturucu basıncı olarak

$$p_{\text{yoğuşturucu}} = 4 \text{ MPa} = 0,004 \text{ kPa}$$

ile elde edilen tablodaki değerler kullanılarak

$$\begin{aligned} q_g &= (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) & | & \text{(Eşitlik 1)} \\ q_g &= (3\,368,98 - 146,36) + (3\,625,3424 - 2\,900,17) \\ q_g &= 3\,947,8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{\zeta} &= h_6 - h_1 & | & \text{(Eşitlik 13)} \\ q_{\zeta} &= 2\,200 - 121,46 \\ q_{\zeta} &= 2\,078,54 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_t &= (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) & | & \text{(Eşitlik 2)} \\ w_t &= (3\,368,98 - 2\,900,17) + 3\,625,3424 - 2\,200 \\ w_t &= 1\,894,15 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{net} &= w_{t\text{ürbin},\zeta} - w_{p\text{ompa},g} & | & \text{(Eşitlik 14)} \\ w_{net} &= 1\,894,15 - 24,9 \text{ kJ/kg} \\ w_{net} &= 1\,869,25 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{w_{net}}{q_g} = 1 - \frac{q_{\zeta}}{q_g} & \text{(Eşitlik 15)} \\ \eta_{th} &= \frac{1\,869,25}{3\,947,8} \\ \eta_{th} &= \% 47 \end{aligned}$$

Görüldüğü gibi, yoğunlaştırıcı basıncını 10 kPa'dan 4 kPa'a düşürdüğümüzde çevrimin ısı verimi % 46'dan % 47'ye yükselmiştir (bkz. Sayfa 31).

Hesaplarımızda yine türbin ve pompadaki adyabatik verimleri, ayrıca sürtünme kayıplarını göz önüne almadık, dolayısıyla ÇED raporundaki  $\eta_{th} = \% 45$  değerini kabul edebiliriz.

Devam edelim;

$$\begin{aligned} \dot{W}_{net} &= \dot{m} \cdot w_{net} & | & \text{(Eşitlik 16)} \\ \dot{W}_{net} &= 1\,320 \cdot 10^3 \text{ kJ/s} & | & \text{(Sayfa 37)} \\ \dot{W}_{net} &= 1\,869,25 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Çevrimde dolaşan buharın kütle debisi

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{1\,320 \cdot 10^3}{1\,869,25} \\ \dot{m} &= 706,16 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Çevrimden alınan ısı

$$Q_{\zeta} = \dot{m} \cdot q_{\zeta} \quad | \quad \text{(Eşitlik 17)}$$

$$q_{\dot{c}} = 2\,078,54 \text{ kJ/kg} \quad | \quad (\text{Sayfa 41})$$

$$Q_{\dot{c}} = 706,16 \cdot 2\,078,54 \text{ kJ/s}$$

$$Q_{\dot{c}} = 1\,467\,782 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{m}_{\text{soğutma suyu}} = \frac{Q_{\dot{c}}}{C_{\text{su}} \cdot \Delta T} \quad (\text{Eşitlik 18})$$

Deniz suyu sıcaklığı ortalama 15 °C kabul edilirse

$$\Delta T = T_{\text{doyma}} - T_{\text{deniz}} = 28,96 - 15 = 13,96 \text{ °C}$$

$Q_{\dot{c}} = 1\,467\,782 \text{ kg/s}$  değeri % 47 ısı verimine karşılık gelmektedir.

Halbuki biz  $\eta_{\text{th}} = \% 45$  ile hesaba devam etmek istiyoruz.

$$Q_{\dot{c}} = \dot{m} \cdot q_{\dot{c}} \quad (\text{Eşitlik 17})$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{W_{\text{net}}} \quad (\text{Eşitlik 16})$$

$$Q_{\dot{c}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{W_{\text{net}}} \cdot q_{\dot{c}} \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$Q_{\dot{c}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{q_g - q_{\dot{c}}} \cdot q_{\dot{c}} = \dot{W}_{\text{net}} \frac{q_{\dot{c}}}{q_g - q_{\dot{c}}}$$

$$Q_{\dot{c}} = \frac{1}{\frac{q_g}{q_{\dot{c}}} - 1}$$

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{q_{\dot{c}}}{q_g} \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$\frac{q_g}{q_{\dot{c}}} = \frac{1}{1 - \eta_{\text{th}}}$$

$$Q_{\dot{c}} = \dot{W}_{\text{net}} \left( \frac{\frac{\dot{W}_{\text{net}}}{1 - \eta_{\text{th}}} - 1}{\frac{1}{1 - \eta_{\text{th}}} - 1} \right) = \dot{W}_{\text{net}} \left( \frac{1 - \eta_{\text{th}}}{\eta_{\text{th}}} \right)$$

$$Q_{\dot{c}} = \dot{W}_{\text{net}} \left( \frac{1}{\frac{1}{1 - \eta_{\text{th}}} - 1} \right) = \dot{W}_{\text{net}} \left( \frac{1 - \eta_{\text{th}}}{\eta_{\text{th}}} \right)$$

$$Q_{\dot{c}} = \dot{W}_{\text{net}} \left( \frac{1}{\eta_{\text{th}}} - 1 \right) \quad (19)$$

Artık bu formülü  $\eta_{\text{th}} = \% 45$  için rahatlıkla kullanabiliriz.

$$Q_{\dot{c}} = 1\,320 \cdot 10^3 \text{ kJ/s} \left( \frac{1}{0,45} - 1 \right)$$

$$Q_{\dot{c}} = 1\,613\,333,4 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{m}_{\text{soğutma suyu, 15 °C, 4 kPa}} = \frac{1\,613\,333,4}{4,184 \cdot 13,96}$$

$$\dot{m}_{\text{soğutma suyu, 15 °C, 4 kPa}} = 27\,621,5 \text{ kg/s}$$

$$\cong 100\,000 \text{ t/h}$$

Deniz suyu ortalama 20 °C ise

$$\dot{m}_{\text{soğutma suyu, 20 °C, 4 kPa}} = \frac{1\,613\,333,4}{4,184 (28,96 - 20)}$$

$$\dot{m}_{\text{soğutma suyu, 20 °C, 4 kPa}} = 43\,035,26 \text{ kg/s}$$

$$\cong 155\,000 \text{ t/h}$$

Bu değer ÇED raporunda [DOKAY MÜHENDİSLİK (2019), ÇSED Raporu, S. 1)]

$$\text{Soğutma suyu} = 162\,900 \text{ m}^3/\text{h}$$

olarak verilmiştir.

Bazı bilgiler verelim;

► ÇED raporu [DOKAY MÜHENDİSLİK (2019), ÇSED Raporu] Sayfa 13'ten:

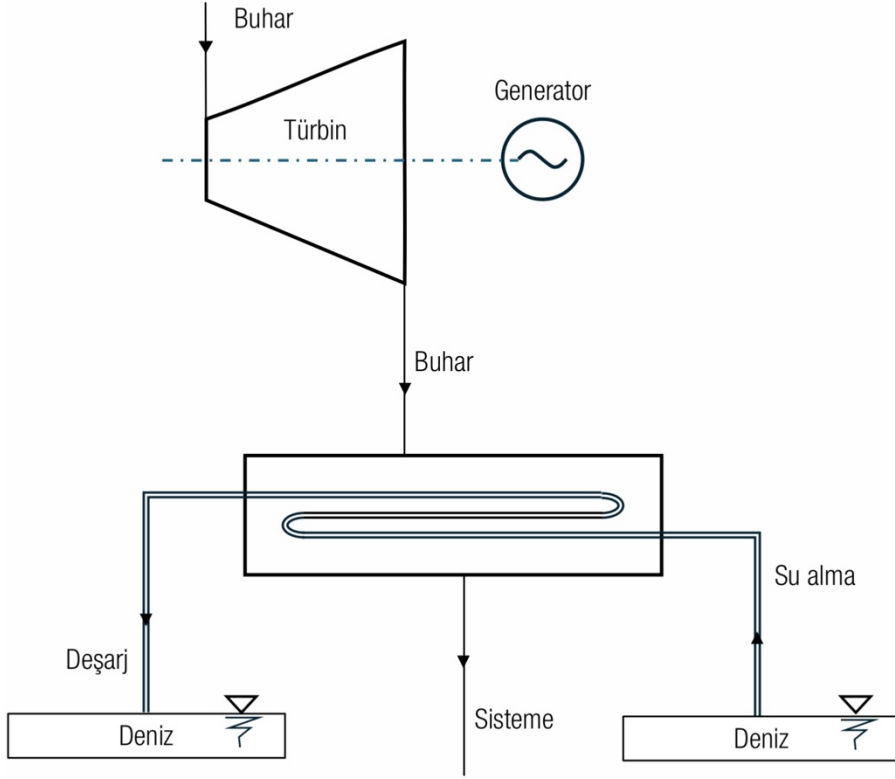
Proje kapsamında ünite başına iki adet su soğutmalı kondansör (yoğuşturucu) tasarlanmıştır. Dizayn sıcaklığında sıcaklık yükselişi, soğutma suyu girişindeki miktardan 8 °C - 10 °C artar.

► ÇED raporu Sayfa 16'dan: [DOKAY MÜHENDİSLİK, 2019, ÇSED Raporu, S. 16)]

Kondansör basıncı milibar seviyesindedir ve buhar çevrimini etkiler. Ne kadar düşük kondansör basıncı elde edilebilirse tesis verimi o kadar artmaktadır (bkz. Sayfa 41).

► ÇED raporu Sayfa 19'dan [DOKAY MÜHENDİSLİK, 2019, ÇSED Raporu, S. 19)]

Santral için gerekli proses suyunun tamamı Karadeniz'den temin edilecektir. Santralde ihtiyaç duyulacak kondansör ve yardımcı soğutma suyu miktarı 162 900 m<sup>3</sup>/saat olup denizden alınan su klorlama ünitesinden geçirilerek doğrudan soğutmada kullanılacaktır (**Şekil 6**).



**Şekil 6.** Tek geçişli açık soğutma sisteminin şematik gösterimi  
[DOKAY MÜHENDİSLİK, 2019, ÇSED Raporu, S. 13]

Yaklaşık 18 metre su derinliği bulunan bir noktaya yerleştirilecek su alma ağzından deniz suyu alınması, alınan bu suyun filtrasyon ünitelerini takiben pompalar ile kondansörlere basılması planlanmaktadır. Pompa binasından sonra kondansörlere su taşıyan iki adet hat 3 400 mm çaplı borudan oluşacaktır. Kondansör çıkışında ısınmış olan suyun deniz deşarjına taşınması için, yükleme odasına kadar iki adet 3 400 mm çaplı boru olacaktır. Yükleme odası sonrasında ise dört adet 2 500 mm dış çaplı borular ile deniz deşarjının yapılması planlanmaktadır.

SKKY (Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği) sıcaklık kriterine göre:

Tasarlanan sistemin Haziran ile Eylül ayları arasındaki yaz döneminde, deşarj edildikten sonra uğrayacağı ilk seyrelme sonucunda (Yakın alan karışımı) ortam sıcaklığını 1 °C'den daha fazla değiştirmemesi gerekmektedir. Diğer aylarda ise bu değerin 2 °C olmasına müsaade edilmektedir. Özel bir durum olarak, soğutma amacıyla kullanılan deniz suyunun doğal sıcaklığının 28 °C'den daha

sıcak olduğu durumlarda deşarj edilen sularda 35 °C maksimum sıcaklık limiti aranmamakta ve deşarj sonrasında ortam sıcaklığının 3 °C'ye kadar değişimlere yol açmasına müsaade edilmektedir.

ÇED raporu Sayfa 7/44'ten [VAROL & KABDAŞLI (2019)].

**Su alma ve deşarj sisteminin genel özellikleri:**

Denizden uygun bir derinlikten alınacak olan deniz suyu, pompalar ile yoğuşturuculara basılacak ve sıcaklığı artmış olan deniz suyu deşarj boruları ve difüzörler vasıtasıyla uygun bir şekilde denize deşarj edilecektir. Planlanan soğutma suyu sisteminde kullanılacak olan max. debi 162 900 m<sup>3</sup>/h (= 45,25 m<sup>3</sup>/s) olup, denizden alınan su, sıcaklığı en fazla 8,5 °C artmış olarak difüzörler vasıtasıyla denize deşarj edilecektir.

Hesaplarımızda,

$$\dot{m}_{\text{soğutma suyu, 20 °C, 4 kPa}} = 155\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$$

$$\Delta T = T_{\text{doyma, 4 kPa}} - T_{\text{deniz}} = 28,96 - 20 = 8,96\ ^\circ\text{C}$$

olarak bulunmuştur (bkz. Sayfa 43).

Yaklaşık 18 m su derinliği bulunan bir noktaya yerleştirilecek su alma ağzından deniz suyu alınması; alınan suyun filtrasyon ünitelerini takiben pompalar ile kondansörlere basılması öngörülmektedir. Deniz deşarjı kot farkından dolayı doğal olarak yapılacak olup herhangi bir pompalama gerekmeyecektir.

Deşarj sisteminin kavramsal tasarımı Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde (SKKY) sunulmuş olan sıcaklık kriteri baz alınarak yapılmıştır. SKKY'nin Tablo 23'ü **Tablo 5**'te verilmiştir.

| PARAMETRE                                                 | LİMİT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sıcaklık                                                  | Deniz ortamının seyreltme kapasitesi ne olursa olsun, denize deşarj edilecek suların sıcaklığı 35 °C yi aşamaz. Sıcak su deşarjları difüzörün fiziksel olarak sağladığı birinci seyrelme (S <sub>1</sub> ) sonucunda karıştığı deniz suyunun sıcaklığını Haziran-Eylül aylarını kapsayan yaz döneminde 1 °C'den, diğer aylarda ise 2 °C den fazla arttırmaz. Ancak, deniz suyu sıcaklığının 28 °C'nin üzerinde olduğu durumlarda, soğutma amaçlı olarak kullanılan deniz suyunun, deşarj sıcaklığına herhangi bir sınırlama getirilmeksizin alıcı ortam sıcaklığını 3 °C 'den fazla artırmayacak şekilde deşarjına izin verilebilir |
| En muhtemel sayı (EMS) olarak toplam ve fekal koliformlar | Derin deniz deşarjıyla sağlanacak olan toplam seyrelme sonucunda insan teması olan koruma bölgesinde, zamanın % 90'ında, EMS (En Muhtemel Sayı) olarak toplam koliform (TC) seviyesi 1 000 TC/100 ml ve fekal koliform (FC) seviyesi 200 FC/100 ml'den az olmalıdır                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Katı ve yüzen maddeler                                    | Difüzör çıkışı üzerinde, toplam genişliği o noktadaki deniz suyu derinliğine eşit olan bir şerit dışında gözle izlenebilecek katı ve yüzer maddeler bulunmayacaktır.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

**Tablo 5.** SKKY'nin Tablo 23'ü. Derin deniz deşarjları için uygulanacak kriterler [VAROL & KABDAŞLI (2019)].  
(Koliform: bakteri, Fekal koliform: Dışkısal bakteri)

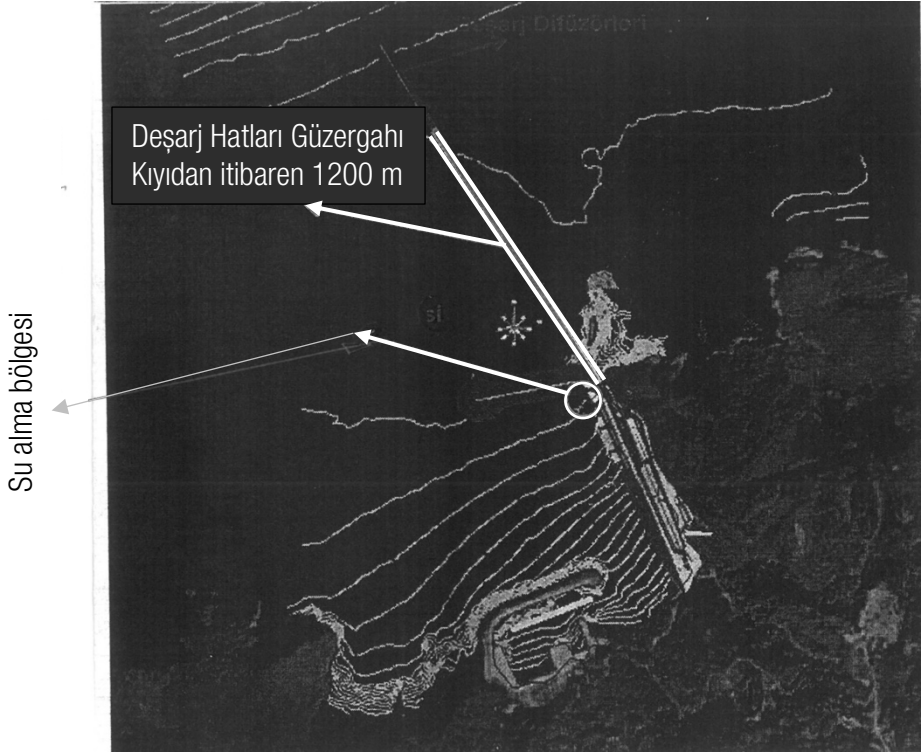
Su alma ağzının yerleştirileceği liman aynı zamanda bir koy içerisinde yer aldığından, bölgedeki akıntıların bu tür koylarda izlediği hareketler nedeniyle deşarj edilen sıcak su bulutunun su alma bölgesine doğru taşınması ve koy içerisinde birikim yaparak sisteme alınan suyun sıcaklığının artması riski bulunmaktadır. Bu nedenle deşarj edilen sıcak su bulutu, akıntılarla koy içine ve su alma bölgesine ulaşmamasını sağlayacak bir mesafede olacak şekilde tasarlanmıştır. Deşarj bölgesi için,

- Kıyıdan yaklaşık 1 200 m uzaklığa kadar deşarj hattı,
- Deşarj hattına bağlı, 21 m su derinliğinden başlayarak 23 m su derinliğine kadar toplamda yaklaşık 500 m uzunluğunda difüzör belirlenmiştir (**Şekil 7**). Difüzör tasarımı [VAROL & KABDAŞLI (2019)],

Özetle,

- ▶ Deşarj edilecek soğutma suyu 4 ayrı boru ile taşınacak,
- ▶ Her bir boru hattı ucunda birer difüzör bulunacak (yani toplam 4 difüzör),
- ▶ Her bir difüzörün uzunluğu 125 m olacak,
- ▶ Difüzörler 21 m ile 23 m su derinlikleri arasına yerleştirilecektir.
- ▶ Difüzör delik çapı 60 cm seçilmiştir.

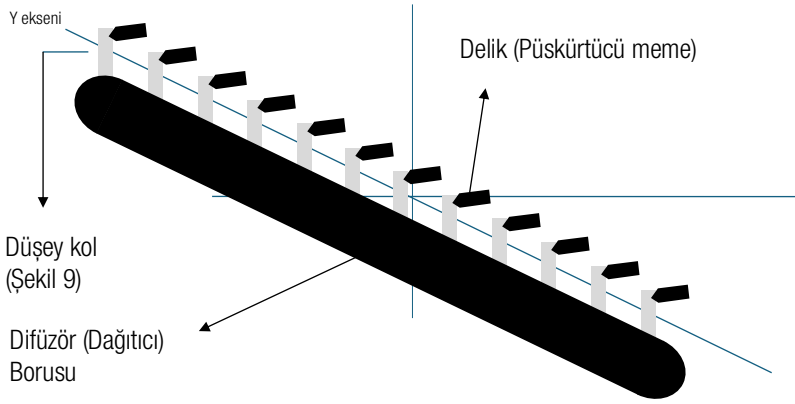
- Difüzör delik sayısı 12, delikler arası mesafe 10,4 m olarak alınmıştır (Şekil 8).



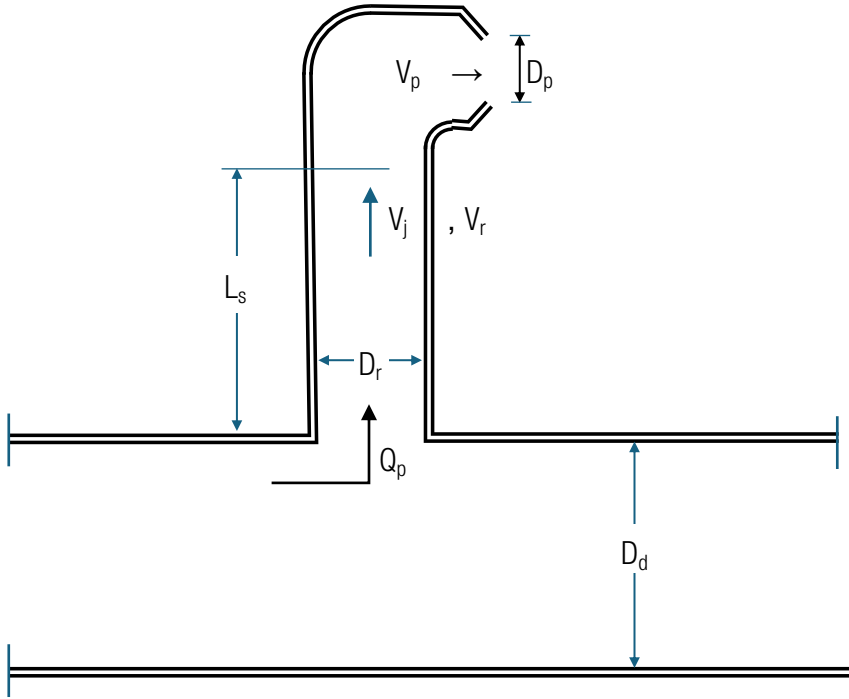
**Şekil 7.** Soğutma suyu denizde şarj sistemi için genel yerleşim planı  
[VAROL & KABDAŞLI (2019), S. ]

Ayrıca, difüzörün enine kesiti **Şekil 10**'da gösterilmiştir.

Denize deşarj edilecek suların sıcaklığı, **Tablo 5**'te gösterilen sınır değerleri aşmayacak şekilde deniz deşarj sistemleri ile uygulamaya konulacağı için difüzör konusu üzerinde fazlaca durulmuştur.



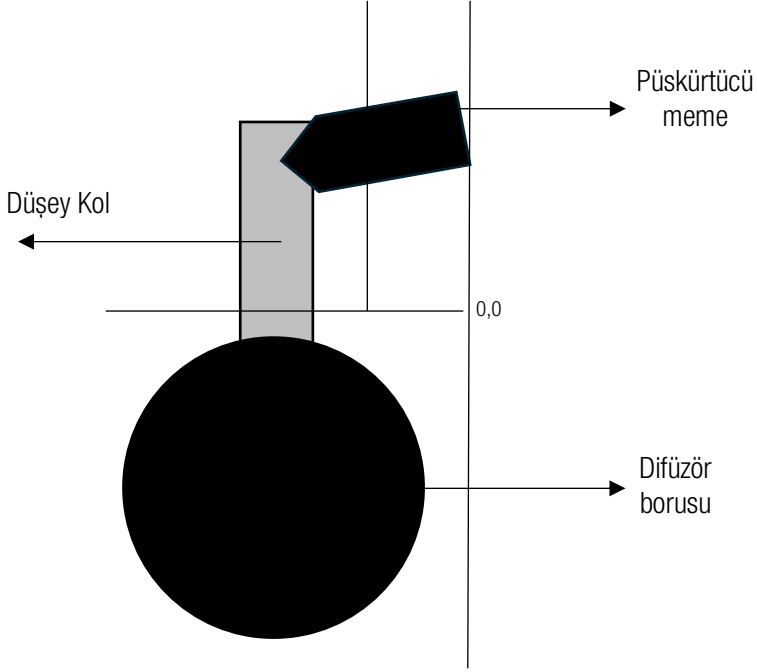
**Şekil 8.** Difüzör kesiti  
[ÖZTÜRK (2011), S. ]



**Şekil 9.** Düsey kollu difüzör  
[ÖZTÜRK (2011), S. ]

$L_s$  - Düsey kol uzunluğu  
 $D_r$  - Düsey kol çapı

$D_p$  - Delik çapı  
 $V_p$  - Delikten çıkış hızı  
 $V_j$  - Düşey koldaki su hızı



**Şekil 10.** Difüzör enine kesiti  
[VAROL & KABDAŞLI (2019), S. ]

Not:

Tasarlanan difüzörlerin hidrolik özellikleri ve seyrelme hesaplarına temel oluşturması amacıyla her bir difüzör deliğinden çıkan atıksu debileri ve hızları belirlenmesinde ÖZTÜRK (2011)'den faydalanılabilir.

ÇED raporundaki [VAROL & KABDAŞLI (2019)] sonuç bilgisini de verelim (**Tablo 6**). Tabloda görüldüğü gibi 'Difüzörlerin sağlayacağı seyrelmeler SKKY **Tablo 5**'te verilmiş olan sıcaklık kriterini sağlamaktadır' iddiası vardır.

| Difüzör No. | Delik No. | İlk seyrelme sonrası<br>oluşan sıcaklık artışı (°C) |
|-------------|-----------|-----------------------------------------------------|
| 1           | 1         | 0,28                                                |
| 1           | 12        | 0,27                                                |
| 2           | 1         | 0,28                                                |
| 2           | 12        | 0,26                                                |
| 3           | 1         | 0,26                                                |
| 3           | 12        | 0,26                                                |
| 4           | 1         | 0,25                                                |
| 4           | 12        | 0,24                                                |

**Tablo 6.** Seyrelme hesaplamaları sonucunda elde edilen seyrelme ve sıcaklık farkı değerleri  
[VAROL & KABDAŞLI (2019), S. ]

## V. 2 x 660 MWe gücünün eşdeğer güç değerleri

Yıllık çalışma süresi 7 400 saat olan buharlı güç santralinde, 5 600 kcal/kg kalorifik değerinde 458 ton/h kömür kullanılmaktadır (Sayfa 35).

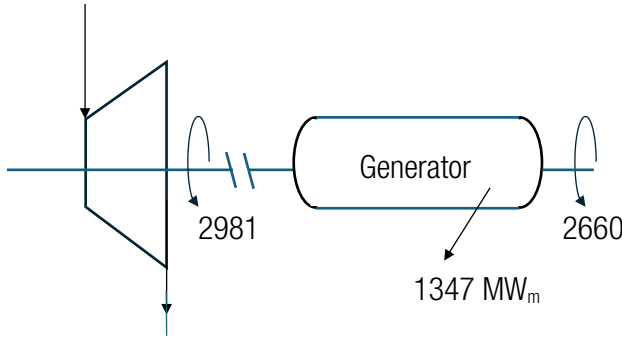
Termik güç (MW<sub>t</sub>)

$$\begin{aligned} & 458 \text{ ton/h} \cdot 7\,400 \text{ h/yıl} = 3\,389\,200 \text{ ton/yıl} \\ & = 3,3892 \cdot 10^9 \text{ kg/yıl} \\ & 3,3892 \cdot 10^9 \text{ kg/yıl} \cdot 5\,600 \text{ kcal/kg} = 1,897952 \cdot 10^{13} \text{ kcal/yıl} \\ & 1,897952 \cdot 10^{13} \text{ kcal/yıl} \cdot 4,184 \text{ kJ/kcal} \\ & = 7,941031168 \cdot 10^{13} \text{ kJ/yıl} \\ & = \frac{7,941031168 \cdot 10^{13}}{7400 \cdot 3600 \text{ kJ/saniye}} \\ & = 7,941031168 \cdot 10^{13} / 7\,400 \cdot 3600 \text{ kJ/saniye} \\ & = 2\,980\,867,6 \text{ kWt} \\ & \cong 2\,981 \text{ MWt} \end{aligned}$$

Termik güç  $\cong 2\,981 \text{ MWt}$

bulunur (Proje değeri:  $2 \cdot 1\,466 \text{ MWt} = 2\,932 \text{ MWt}$ ).

• Mekanik güç (MW<sub>m</sub>)



Türbin çıkışı: 2 981 MW<sub>t</sub>

Generator çıkışı: 1 320 (MW<sub>e</sub>)<sub>net</sub>

Generator mekanik verimi: 0,98 (Yataklardaki sürtünme gibi)

$$\eta_G = 0,98 = \frac{\text{Elektrik gücü}}{\text{Mekanik güç}}$$

$$MW_m = \frac{MW_e}{0,98} = \frac{1\,320}{0,98}$$

$$\text{Mekanik güç} = 1\,347\, MW_m$$

bulunur (Proje değeri:  $2 \cdot MW_m = 1\,338,8\, MW_m$ )

• **Elektrik güç ( $MW_e$ )**

$$\text{Elektrik gücü} = 2 \cdot 660\, MW_e = 1\,320\, MW_e$$

Proje değeridir.

## VI. Yakıtlar ve Yanma

ÇENGEL (1996)'ya göre yakıldığı zaman enerji veren herhangi bir maddeye 'yakıt' adı verilir. En çok kullanılan yakıtlar temelde hidrojen ve karbondan oluşur. Bu yakıtlara 'hidrokarbon yakıtlar' denir. Örnek olarak kömür, benzin ve doğal gaz verilebilir.

Kömürün ana bileşeni karbondur. Kömürde ayrıca oksijen azot kükürt, nem ve kül bulunur. Kömürün kütle analizini tam olarak belirlemek olanaksızdır, çünkü kömürün bileşeni belirli bir bölgede bile bir yöreden diğerine değişir.

Yanma, yakıtın oksijenle birleştiği ve büyük miktarda enerjinin açığa çıktığı bir kimyasal reaksiyondur. Saf oksijen O<sub>2</sub>, sadece kaynak ve kesme gibi havanın kullanılmayacağı bazı özel uygulamalarda kullanılır. Bu nedenle havanın bileşiminin incelenmesinde yarar vardır.

Mol oranı veya hacimsel oran olarak kuru hava % 20,9 oksijen, % 78,1 azot, % 0,9 argon ve az miktarda karbondioksit, helyum, neon ve hidrojenlerden oluşur. Yanma işlemini çözümlerken, az miktarda bulunan gazlar ihmal edilir ve kuru havayı oluşturan karışımların mol oranları yaklaşık % 21 oksijen ve % 78 azot olarak kabul edilir. Böylece, yanma işlemine giren her mol oksijenin yanında  $0,79 / 0,21 = 3,76$  mol azot bulunur başka bir anlatımla,



olur. Bu arada, bir yakıtın oksijenle yakın temasa getirilmesinin yanmanın başlaması için yeterli olmadığı vurgulanmalıdır. Yanmanın başlayabilmesi için yakıtın tutuşma sıcaklığına getirilmesi gerekir. Bazı yakıtların atmosferik havada tutuşma sıcaklıkları şöyledir:

|                 |        |
|-----------------|--------|
| Benzin:         | 260 °C |
| Karbon:         | 400 °C |
| Hidrojen:       | 580 °C |
| Karbonmonoksit: | 610 °C |
| Metan:          | 630 °C |

Yanmanın başlayabilmesi için ayrıca yakıt ve havanın uygun oranlarda bir arada bulunması gerekir. Örneğin doğal gazın hava içindeki konsantrasyonu % 5'ten az, % 15'ten çok olduğu zaman yanma olmaz.

Kütlenin korunumu ilkesine göre, bir kimyasal reaksiyon sırasında her elementin kütlesi sabit kalır.



Başka bir deyişle, reaksiyon denkleminin sağ tarafındaki (çıkanlar) her elementin toplam kütlesi, o elementin denklemin sol tarafındaki (girenler) toplam kütlesine eşit olmak zorundadır.

Başka bir örnek,



denklemini ele alalım.

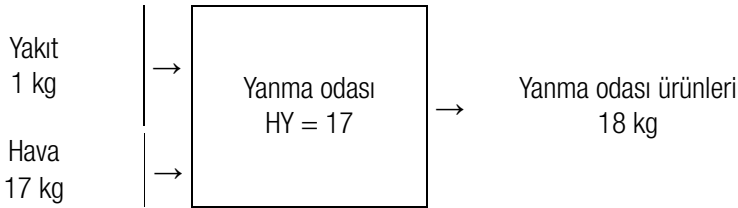
Yanma işlemine girenlerin toplam mol miktarı (2 kmol), yanma sonu ürünlerin toplam mol miktarından (1 kmol) farklıdır. Başka bir deyişle kimyasal reaksiyon sırasında mol miktarının korunumu söz konusu değildir.

Hava ve yakıtın miktarlarını belirlemek için yanma işlemlerinde sıkça kullanılan bir büyüklük hava/yakıt oranıdır (HY). Bir yanma işleminde hava kütlesinin yakıt kütlesine oranı diye tanımlanır (**Şekil 11**).

Başka bir anlatımla

$$\text{HY} = \frac{m_{\text{hava}}}{m_{\text{yakıt}}} \quad (23)$$

şeklinde yazılabilir.



**Şekil 11.** Hava yakıt oranı (HY), bir yanma işleminde birim yakıt kütlesi için kullanılan hava kütlesidir  
[ÇENGEL, 1996. S. ]

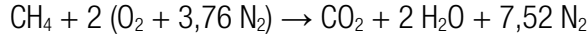
Bir maddenin kütlesi  $m$  ile, mol miktarı  $n$  arasındaki ilişki,

$$m = n \cdot M$$

bağıntısıyla verilir. Burada  $M$ , mol kütlesidir.

Yanma işlemi sırasında, eğer yakıt içindeki karbonun tümü  $\text{CO}_2$  ye, hidrojenin tümü  $\text{H}_2\text{O}$  ya ve varsa kükürtün tümü  $\text{SO}_2$  ye dönüşüyorsa, yanma tamdır. Bir

yakıtın tam olarak yanması için gerekli en az hava miktarını “Stokiometrik” veya “Teorik hava” adı verilir. Örneğin metan’ın teorik yanması aşağıda gösterildiği gibidir:



Dikkat edilirse yanma sonu ürünleri arasında yanmamış metan ve C, H<sub>2</sub>, CO, OH veya serbest O<sub>2</sub> yoktur.

Gerçek yanma işlemlerinde yanmanın tama yakın olmasını sağlamak veya çıkış sıcaklığını belirli bir düzeyde tutabilmek için, genellikle stokiometrik miktardan daha fazla hava kullanılır. Stokiometrik miktarın üzerinde olan hava miktarına “Fazla hava” adı verilir.

Bu bağlamda, Yunus Çengel hocamdan [ÇENGEL, 1996. S. ] hava/yakıt oranı (HY) hesaplanması ile ilgili alınan bir örnek **Tablo 7**’de verilmiştir.

14-30 The composition of the coal is given on a mass basis, but we need to know the composition on a mole basis to balance the combustion equation. Considering 1 kg of coal, the numbers of mole of the each component are determined to be

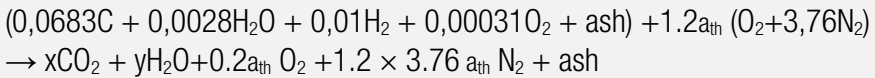
$$N_c \text{ (m/M)}_c = 0,82/12 = 0,0683 \text{ kmol}$$

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = (\text{m/M})_{\text{H}_2\text{O}} = 0,05/18 = 0,0028 \text{ kmol}$$

$$N_{\text{H}_2} = (\text{m/M})_{\text{H}_2} = 0,02/2 = 0,01 \text{ kmol}$$

$$N_{\text{O}_2} = (\text{m/M})_{\text{O}_2} = 0,01/32 = 0,00031 \text{ kmol}$$

The coal is burned completely with excess air, and thus the products with contain H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, some free O<sub>2</sub>, and ash only. Considering 1 kg of coal the combustion equation can be written as



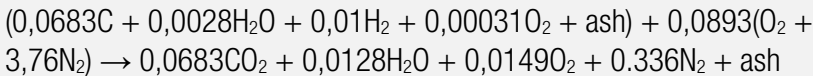
The unknown coefficients in the above equation are determined from mass balances,

$$\text{C: } 0,0683 = x$$

$$\text{H: } 0,0028 \times 2 + 0,01 \times 2 = 2y \rightarrow y = 0,0128$$

$$\text{O}_2: 0,00031 + 1,3 a_{\text{th}} = x + y/2 + 0,3 a_{\text{th}} \rightarrow a_{\text{th}} = 0.0744$$

Thus,



The air-fuel ratio for the this reaction is determined by taking the ratio of the mass of the air to the mass of the coal, which is taken to be 1 kg

$$m_{\text{air}} = (0,0893 \times 4,76 \text{ kmol}) (29 \text{ kg/kmol}) = 12,3 \text{ kg}$$

$$m_{\text{fuel}} = 1 \text{ kg}$$

and

$$AF_{\text{th}} = \frac{m_{\text{air, th}}}{m_{\text{fuel}}} = \frac{12.3 \text{ kg}}{1 \text{ kg}} = 12.3 \text{ kg air/kg coal}$$

14-30: Bir kömürün kütleli analizi şöyledir:

- % 82 C
- % 5 H<sub>2</sub>O
- % 2 H<sub>2</sub>
- % 1 O<sub>2</sub>
- % 10 kül

Kömür % 20 fazla havayla yanmaktadır. Hava yakıt oranını hesaplayın.

**Tablo 7.** Hava yakıt oranı hesaplanmasına ait bir örnek  
[ÇENGEL, 1996. S. ]

Şimdi, **Tablo 7**'deki örnekten faydalanarak yıkama ve zenginleştirme işleminden sonra 5 600 kcal/kg kalorifik değerinde santrale gelen taş kömürünün kütleli analizi aşağıdaki gibi verilmiş olsun (daha farklı değerler de olabilir). Hava/yakıt oranının hesaplanması istenmektedir

Taş kömürünün kütleli analizi:

- % 70 C
- % 13 H<sub>2</sub>O
- % 4 H<sub>2</sub>
- % 1 O<sub>2</sub>
- % 12 kül

ve kömür % 20 fazla havayla yanmaktadır. Ayrıca

- Karbonun mol kütlesi  $M_C = 12 \text{ kg/kmol}$
- Hidrojenin mol kütlesi  $M_{H_2} = 2 \text{ kg/kmol}$
- Oksijenin mol kütlesi  $M_{O_2} = 32 \text{ kg/kmol}$

verileri ile

Karbonun mol miktarı,

$$n_C = \left( \frac{m}{M} \right)_C \quad (\text{Eşitlik 24})$$

$$n_C = 0,70 / 12$$

$$n_C = 0,0584 \text{ kmol}$$

Suyun (rutubet) mol miktarı,

$$n_{H_2O} = \left( \frac{m}{M} \right)_{H_2O} = 0,13 / 18$$

$$n_{H_2O} = 0,0072 \text{ kmol}$$

Hidrojenin mol miktarı,

$$n_{H_2} = \left( \frac{m}{M} \right)_{H_2} = 0,04 / 2$$

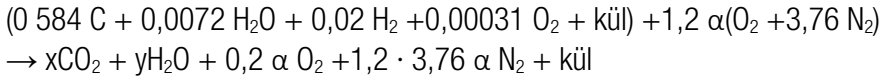
$$n_{H_2} = 0,02 \text{ kmol}$$

Oksijenin mol miktarı,

$$n_{O_2} = \left( \frac{m}{M} \right)_{O_2} = 0,01 / 32$$

$$n_{O_2} = 0,00031 \text{ kmol}$$

Kömürün tam olarak yandığı verilmektedir. Bu nedenle yanma sonu ürünleri arasında sadece  $CO_2$ ,  $N_2$  ve kullanılmamış  $O_2$  bulunacaktır. Buna göre yanma denklemi aşağıda gösterildiği gibi yazılır.



$\alpha$ , hava için stokiometrik katsayıdır. % 20 fazla hava, denklemde  $\alpha$  yerine  $1,2\alpha$  yazarak kendiliğinden hesaba katılmıştır. Oksijenin stokiometrik miktarı ( $\alpha \text{ O}_2$ ) yanma sonu ürünleri arasında kullanılmamış  $O_2$  olarak görünecektir.  $N_2$  nin katsayılarının denklemin her iki tarafında aynı değere sahip oldukları not edilmelidir.

Yukarıdaki denklemlerdeki bilinmeyen katsayılar, elementlerin kütle dengelemesi ile hesaplanır:

$$\text{C: } 0,0584 = x$$

$$\text{H: } 0,072 \cdot 2 + 0,02 \cdot 2 = 2 y$$

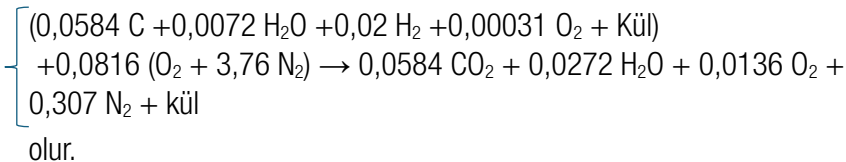
$$y = 0,0272$$

$$\text{O}_2: 0,072/2 + 0,00031 + 1,2 \alpha = x + y / 2 + 0,2 \alpha$$

$$0,00391 + 1,2 \alpha = 0,0584 + 0,0272/2 + 0,2 \alpha$$

$$\alpha = 0,068$$

Dolayısıyla yanma denklemi,



Hava / yakıt oranı HY,

Kömür % 20 fazla hava ile yanmakta

$$m_{\text{hava}} = 1,2 \cdot \alpha \cdot 4,76 \text{ kmol hava} \cdot (29 \text{ kg/kmol})_{\text{hava}}$$

Hava'nın mol kütlesi

$$m_{\text{hava}} = 1,2 \cdot \alpha \cdot 0,068 \cdot 4,76 \cdot 29$$

$$m_{\text{hava}} = 11,26 \text{ kg}$$

$$m_{\text{yakıt}} = 1 \text{ kg}$$

$$HY = \frac{m_{\text{hava}}}{m_{\text{yakıt}}} \quad (\text{Eşitlik 23})$$

$$HY = \frac{11,26}{1}$$

$$HY = 11,26 \text{ kg hava / kg kömür}$$

Bir örnek daha verelim:

• Örnek (JONES & DUGAN, 2003, S )

Kömür 100 kPa basınçta %20 fazla hava ile yakılmaktadır. Yanma tam olduğuna göre,

a) 1 kg yakıtın yakılması için gerekli hava kütlesini bulunuz

b) (mol / kilogram yakıt) değerlerini hesaplayınız.

Kömürün kütle analizi aşağıda verilmiştir:

| Yakıt analizi |       |
|---------------|-------|
| Element       | Yüzde |
| C             | 70    |
| H             | 5     |
| S             | 1     |
| O             | 12    |
| N             | 2     |
| Kül           | 10    |
| Toplam        | 100   |

Önce Hamra hocam'dan (JONES & DUGAN, 2003, S. ) kısa bir bilgi verelim:

**Kuru havanın bileşimi:**

Kuru havanın mol oranları cinsinden bileşimi 0,7809 N<sub>2</sub>, 0,2095 O<sub>2</sub>, 0,0093 Ar ve 0,0003 CO<sub>2</sub> dir. Bu karışımın mol kütlesi 28,967 kg/kmol dur. Yanma hesaplarında argon ve karbondioksit reaksiyona girmedikleri ve miktarları az olduğu için azot olarak kabul edilebilir. Böylece bir mol havanın 0,79 mol N<sub>2</sub> ve 0,21 mol O<sub>2</sub> den oluştuğu varsayılır. Şu halde kuru havanın bileşimi,

• Mol bazında,

$$0,21 \text{ mol O}_2 + 0,79 \text{ mol N}_2 = 1 \text{ mol hava} \quad | \quad (25)$$

veya

$$1 \text{ mol O}_2 + 3,76 \text{ mol N}_2 = 4,76 \text{ mol hava} \quad | \quad (\text{Eşitlik 20})$$

• Kütle bazında,

$$\text{Oksijenin mol kütlesi } M_{\text{O}_2} = 32 \text{ kg/kmol}$$

$$\text{Azotun mol kütlesi } M_{\text{N}_2} = 28 \text{ kg/kmol}$$

Havanın mol kütlesi

$$0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28 = M_{\text{hava}} = 28,84 \text{ kg/kmol}$$

Bu değeri, A. Rasim Büyüktür hocam [BÜYÜKTÜR (1985), S. ]

$$M_{\text{hava}} = 28,851 \text{ kg/kmol}$$

olarak vermiştir.

1 kg hava

$$0,21 \cdot \frac{32}{28,851} = 0,232 \text{ kg}$$

oksijen ve geri kalan  $(1 - 0,232) = 0,768 \text{ kg}$  azot içerdiğinden, kuru havanın bileşimi

$$0,232 \text{ kg O}_2 + 0,768 \text{ kg N}_2 = 1 \text{ kg hava} \quad | \quad (26)$$

veya

$$1 \text{ kg O}_2 + 3,31 \text{ kg N}_2 = 4,31 \text{ kg hava} \quad | \quad (27)$$

şeklinde ifade edilir

Probleme geri dönelim ve önce 1 kg yakıt için yanma denklemini yazalım

$$\begin{array}{l} 0,70 \text{ C} \\ 0,05 \text{ H} \\ 0,01 \text{ S} \\ 0,12 \text{ O} \\ 0,02 \text{ N} \\ 0,10 \text{ kül} \\ 1 \text{ kg yakıt} \end{array} \quad \begin{array}{l} + 1,2 \cdot x \underbrace{[0,232 \text{ O}_2 + 0,768 \text{ N}_2]}_{\%20 \text{ fazla hava}} = \underbrace{\alpha \cdot \text{H}_2\text{O}}_{\text{su buharı}} + \\ b \cdot \text{CO}_2 + c \cdot \text{O}_2 + d \cdot \text{N}_2 + e \cdot \text{SO}_2 + \underbrace{0,10 \text{ kül}}_{\text{kırı atık}} \end{array}$$

kuru gaz

$\alpha$ ) H, C ve S için kütle dengesi yazılırsa,

H dengesi:

$$0,05 \text{ kg} = \alpha \left( \frac{2 \text{ kg H}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \right)$$

Suyun mol kütlesi

$$\alpha = 0,45 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$M_{H_2} = 2 \text{ kg/kmol}$$

$$M_{O_2} = 32 \text{ kg/kmol} \quad M_{H_2O} = 18 \text{ kg /kmol}$$

C dengesi:

$$0,70 \text{ kg} = b \left( \frac{12 \text{ kg C}}{44 \text{ kg CO}_2} \right)$$

$$b = 2,57 \text{ kg CO}_2$$

$$M_C = 12 \text{ kg/kmol}$$

$$M_{CO_2} = M_C + M_{O_2} = 12 + 32 = 44 \text{ kg /kmol}$$

S dengesi

$$0,01 \text{ kg} = e \left( \frac{32 \text{ kg O}_2}{64 \text{ kg SO}_2} \right)$$

$$e = 0,02 \text{ kg SO}_2$$

$$M_S = 32 \text{ kg/kmol}$$

$$M_{SO_2} = M_S + M_{O_2} = 32 + 32 = 64 \text{ kg/kmol}$$

a, b ve e bulunduktan sonra yanma için gerekli stokiometrik oksijen hesaplanır. Bunun için  $c \cdot O_2$  terimini hesaba katmaya gerek yoktur (yani  $c = 0$  dır). Bu terim kullanılan fazla hava nedeniyle yanma ürünlerinde görülen oksijen miktarıdır. O halde stokiometrik oksijen dengesinde  $x$  hesaplanır (Stokiometrik havada fazla hava bulunmadığından stokiometrik oksijen denge denkleminde 1,2 fazla hava katsayısı yerine 1 alınır).

O dengesi:

$$0,12 \text{ kg O} + x \left( \frac{0,232 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kg hava}} \right) = 0,45 \left( \frac{16 \text{ kg O}}{18 \text{ kg H}_2O} \right)$$

$$+ 2,57 \left( \frac{32 \text{ kg O}}{44 \text{ kg CO}_2} \right)$$

$$+ 0,02 \left( \frac{32 \text{ kg O}}{64 \text{ kg SO}_2} \right)$$

$$x = (0,40 + 1,87 + 0,01 - 0,12) \left( \frac{1 \text{ kg hava}}{0,232 \text{ kg O}_2} \right)$$

$$x = 9,30 \text{ kg hava/kg yakıt}$$

1 kg yakıt için kullanılan hava kütlesi

$$1,2 \cdot x = 1,2 \cdot 9,30 = 11,16 \text{ kg dır.}$$

Yanma ürünlerindeki serbest oksijen kütlesi

$$c = 0,2 \cdot 9,30 \cdot 0,232 = 0,43 \text{ kg dır.}$$

N dengesi:

$$0,02 + 1,2 \cdot 9,30 \cdot 0,768 = d$$

$$d = 8,59 \text{ kg N}_2$$

b) Su buharı dışındaki yanma ürünleri kuru yanma ürünleridir. mol/kg yakıt değerleri aşağıdaki gibidir.

| Madde           | Kütle / kg yakıt | Mol kütlesi | mol/kg yakıt       |
|-----------------|------------------|-------------|--------------------|
| CO <sub>2</sub> | 2,57             | 44          | 2,57 / 44 = 0,0584 |
| SO <sub>2</sub> | 0,02             | 64          | 0,02 / 64 = 0,0003 |
| O <sub>2</sub>  | 0,43             | 32          | 0,43 / 32 = 0,0134 |
| N <sub>2</sub>  | 8,59             | 28          | 8,59 / 28 = 0,3068 |
| Toplam          | 11,61            |             | 0,379              |

Bir örnek te, Yunus Çengel Hocamın 7. Baskısı yapılan 'Termodinamik' kitabından verelim:

Örnek [ÇENGEL & BOLES (2013), S. ]

Kütlece,

% 84,36 C

% 1,89 H<sub>2</sub>

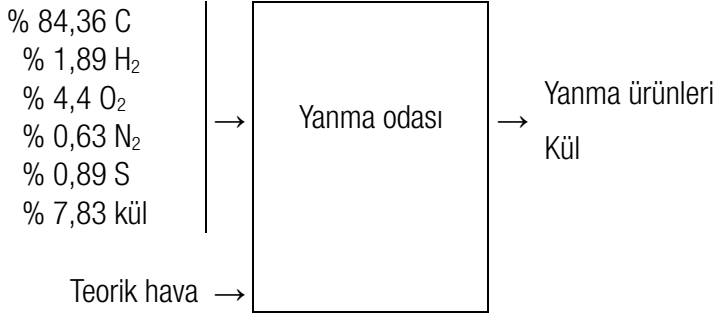
% 4,4 O<sub>2</sub>

% 0,63 N<sub>2</sub>

% 0,89 S

% 7,83 kül

içeren Zonguldak kömürü teorik hava ile yakılmaktadır (**Şekil 12**). Kül içeriğini göz ardı ederek, gaz ürünlerin görünür mol kütlelerini ve mol miktarlarını belirleyiniz, ayrıca bu yanma işlemi için gereken yakıt / hava oranını da hesaplayınız.



**Şekil 12.** Yanma odasına giren bileşenler ve çıkan ürünler  
(Şematik olarak gösterim)  
[ÇENGEL & BOLES (2013), S. ]

Çözüm:

Kütlesel analizi bilinen kömür teorik hava ile yanmaktadır. Gaz ürünlerin mol miktarları, görünür mol kütleleri ve yakıt/hava oranı belirlenecektir.

Kabuller:

1. Yanma stokiometrik ve tamdır
2. Yanma ürünleri sadece,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  ve  $\text{N}_2$  dir (Kül göz ardı edilmiştir).
3. Yanma gazları mükemmel gazlardır.

Analiz:

Mol kütleleri (Tablo 8);

|               |                                        |
|---------------|----------------------------------------|
| Karbon için   | $M_C = 12 \text{ kg/kmol}$             |
| Hidrojen için | $M_{H_2} = 2 \text{ kg/kmol}$          |
| Oksijen için  | $M_{O_2} = 32 \text{ kg/kmol}$         |
| Azot için     | $M_{N_2} = 28 \text{ kg/kmol}$         |
| Kükürt için   | $M_S = 32 \text{ kg/kmol}$             |
| Hava için     | $M_{\text{hava}} = 29 \text{ kg/kmol}$ |

dır.

Kömür bileşenlerinin mol miktarları,

$$N_{\text{bileşen}} = \left( \frac{m}{M} \right)_{\text{bileşen}} \quad (\text{Eşitlik 24})$$

$$N_C = \frac{m_C}{M_C} = \frac{84,36 \text{ kg}}{12 \text{ kg/kmol}} = 7,030 \text{ kmol}$$

$$N_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}} = \frac{1,89 \text{ kg}}{2 \text{ kg/kmol}} = 0,9450 \text{ kmol}$$

| Madde                          | Kimyasal formül                   | Mol kütlesi <i>M</i> kg/kmol | Gaz sabiti, <i>R</i> kJ/kg.K*) | Kritik nokta özellikleri |            |               |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------|---------------|
|                                |                                   |                              |                                | Sıcaklık K               | Basınç MPa | Hacim m³/kmol |
| Hava                           | -                                 | 28,97                        | 0,2870                         | 132,5                    | 3,77       | 0,0883        |
| Amonyak                        | NH <sub>3</sub>                   | 17,03                        | 0,4882                         | 405,5                    | 11,28      | 0,0724        |
| Argon                          | Ar                                | 39,948                       | 0,2081                         | 151                      | 4,86       | 0,0749        |
| Benzen                         | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>     | 78,115                       | 0,1064                         | 562                      | 4,92       | 0,2603        |
| Bromin                         | Br <sub>2</sub>                   | 159,808                      | 0,0520                         | 584                      | 10,34      | 0,1355        |
| <i>n</i> -Büten                | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>    | 58,124                       | 0,1430                         | 425,2                    | 3,80       | 0,2547        |
| Karbon dioksit                 | CO <sub>2</sub>                   | 44,01                        | 0,1889                         | 304,2                    | 7,39       | 0,0943        |
| Karbon monoksit                | CO                                | 28,011                       | 0,2968                         | 133                      | 3,50       | 0,0930        |
| Karbon tetraklorür             | CCl <sub>4</sub>                  | 153,82                       | 0,05405                        | 556,4                    | 4,56       | 0,2759        |
| Klorin                         | Cl <sub>2</sub>                   | 70,906                       | 0,1173                         | 417                      | 7,71       | 0,1242        |
| Kloroform                      | CHCl <sub>3</sub>                 | 119,38                       | 0,06964                        | 536,6                    | 5,47       | 0,2403        |
| Dichlorodifluoromethane (R-12) | CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>   | 120,91                       | 0,06876                        | 384,7                    | 4,01       | 0,2179        |
| Dichlorofluoromethane (R-21)   | CHCl <sub>2</sub> F               | 102,92                       | 0,08078                        | 451,7                    | 5,17       | 0,1973        |
| Ethan                          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>     | 30,070                       | 0,2765                         | 305,5                    | 4,48       | 0,1480        |
| Etil alkol                     | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH  | 46,07                        | 0,1805                         | 516                      | 6,38       | 0,1673        |
| Etilen                         | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>     | 28,054                       | 0,2964                         | 282,4                    | 5,12       | 0,1242        |
| Helyum                         | He                                | 4,003                        | 2,0769                         | 5,3                      | 0,23       | 0,0578        |
| <i>n</i> -Heksan               | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>    | 86,179                       | 0,09647                        | 507,9                    | 3,03       | 0,3677        |
| Hidrojen (normal)              | H <sub>2</sub>                    | 2,016                        | 4,1240                         | 33,3                     | 1,30       | 0,0649        |
| Kripton                        | Kr                                | 83,80                        | 0,09921                        | 209,4                    | 5,50       | 0,0924        |
| Metan                          | CH <sub>4</sub>                   | 16,043                       | 0,5182                         | 191,1                    | 4,64       | 0,0993        |
| Metil alkol                    | CH <sub>3</sub> OH                | 32,042                       | 0,2595                         | 513,2                    | 7,95       | 0,1180        |
| Metil klor                     | CH <sub>3</sub> Cl                | 50,488                       | 0,1647                         | 416,3                    | 6,68       | 0,1430        |
| Neon                           | Ne                                | 20,183                       | 0,4119                         | 44,5                     | 2,73       | 0,0417        |
| Nitrojen                       | N <sub>2</sub>                    | 28,013                       | 0,2968                         | 126,2                    | 3,39       | 0,0899        |
| Azot oksit                     | N <sub>2</sub> O                  | 44,013                       | 0,1889                         | 309,7                    | 7,27       | 0,0961        |
| Oksijen                        | O <sub>2</sub>                    | 31,999                       | 0,2598                         | 154,8                    | 5,08       | 0,0780        |
| Propan                         | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>     | 44,097                       | 0,1885                         | 370                      | 4,26       | 0,1998        |
| Propilan                       | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>     | 42,081                       | 0,1976                         | 365                      | 4,62       | 0,1810        |
| Kükürt dioksit                 | SO <sub>2</sub>                   | 64,063                       | 0,1298                         | 430,7                    | 7,88       | 0,1217        |
| Tetrafluoroethan (R-134a)      | CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F | 102,03                       | 0,08149                        | 374,2                    | 4,059      | 0,1993        |
| Trichlorofluoromethan (R-11)   | CCl <sub>3</sub> F                | 137,37                       | 0,06052                        | 471,2                    | 4,38       | 0,2478        |
| Su                             | H <sub>2</sub> O                  | 18,015                       | 0,4615                         | 647,1                    | 22,06      | 0,0560        |
| Xenon                          | Xe                                | 131,30                       | 0,06332                        | 289,8                    | 5,88       | 0,1186        |

\*) kJ/(kg.K) birimi kPa-m³/kg.K birimiyle eşdeğerdir. Gaz sabiti  $R = R/M$  bağıntısından hesaplanmıştır.  $R_1 = 8.31447$  kJ/kmol-K,  $M$ : mol kütlesi.

Kaynak: K. A. Kobe and R. E. Lynn, Jr., Chemical Review 52 (1953), pp. 117-236; ve ASHARE, Handbook of Fundamentals (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), pp. 16.4 and 36.1.

**Tablo 8.** mol kütlesi, gaz sabiti ve kritik nokta özellikleri  
[ÇENGEL & BOLES (2013), S. ]

$$NO_2 = \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} = \frac{4,40 \text{ kg}}{32 \text{ kg/kmol}} = 0,1375 \text{ kmol}$$

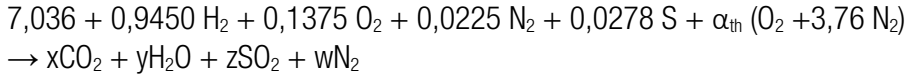
$$NN_2 = \frac{m_{N_2}}{M_{N_2}} = \frac{0,63 \text{ kg}}{28 \text{ kg/kmol}} = 0,0225 \text{ kmol}$$

$$NS = \frac{m_S}{M_S} = \frac{0,89 \text{ kg}}{32 \text{ kg/kmol}} = 0,0278 \text{ kmol}$$

(100 kg kömür esas alınmıştır).

Kül, yanmayan madde olduğundan yanma denkleminde göz önüne alınmamıştır. Ayrıca yanma, teorik hava (stokiyometrik hava) ile yapılmaktadır. Bilindiği gibi, bu yakıtın tam olarak yanması için gerekli en az hava miktarına, 'stokiyometrik' veya 'teorik hava' denilmektedir. Fazla hava kullanılmamaktadır.  $\alpha_{th}$  nın havanın stokiyometrik katsayısı olduğunu da tekrar hatırlatalım.

Yanma denklemi



Bileşenlerin mol dengelemesi (denklikleri) yazılırsa

$$\text{C: } 7,03 = x$$

$$\text{H}_2: 0,945 = y$$

$$\text{S: } 0,0278 = z$$

$$\text{O}_2: 0,1375 + \alpha_{th} = x + y / 2 + z$$

$$0,1375 + \alpha_{th} = 7,03 + 0,945 / 2 + 0,0278$$

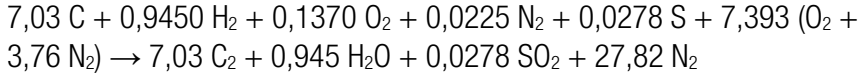
$$\alpha_{th} = 7,393$$

$$\text{N}_2: 0,0225 + \alpha_{th} \cdot 3,76 = w$$

$$0,0225 + 7,393 \cdot 3,76 = w$$

$$w = 27,82$$

Dolayısıyla yanma denklemi,



Kül göz önüne alınmamıştır

Hava yakıt oranı,

Yanmada fazla hava kullanılmamaktadır.

$$m_{hava} = \alpha_{th} \cdot 4,76 \text{ kmol hava} \cdot \frac{29 \text{ kg /kmol hava}}{\text{Hava'nın mol kütlesi}}$$

$$m_{hava} = 7,393 \cdot 4,76 \cdot 29$$

$$m_{hava} \cong 1020 \text{ kg}$$

$$\text{HY} = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}}$$

(Eşitlik 23)

$$\text{HY} = \frac{1020}{100}$$

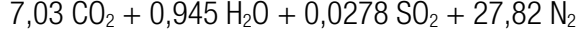
$$\text{HY} = 10,2 \text{ kg hava/kg yakıt}$$

Yani, kömürün her kilogramı için kazana 10,2 kg hava verilmelidir.

### İrdeleme:

Yanma odasından çıkan ürünlerin kütle analizi:

Yanma ürünleri kmol olarak (Sayfa 64)



olduğuna göre, mol kütleleri (**Tablo 8**) göz önüne alınarak

$$m\text{CO}_2 = 7,03 \text{ kmol} = 7,03 \text{ kmol} \cdot 44 \text{ kg/kmol}$$

$$m\text{CO}_2 = 309,32 \text{ kg}$$

$$m\text{H}_2\text{O} = 0,945 \text{ kmol} = 0,945 \text{ kmol} \cdot 18 \text{ kg/kmol}$$

$$m\text{H}_2\text{O} = 17,01 \text{ kg}$$

$$m\text{SO}_2 = 0,0278 \text{ kmol} = 0,0278 \text{ kmol} \cdot 64 \text{ kg/kmol}$$

$$m\text{SO}_2 = 1,78 \text{ kg}$$

$$m\text{N}_2 = 27,82 \text{ kmol} = 27,82 \text{ kmol} \cdot 28 \text{ kg/kmol}$$

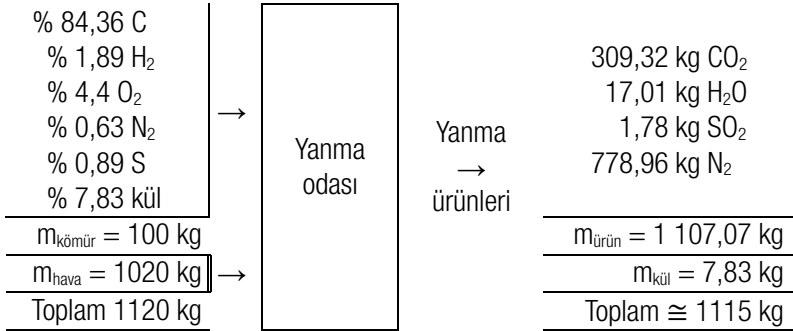
$$m\text{N}_2 = 778,96 \text{ kg}$$

$$m_{\text{ürün}} = (309,32 + 17,01 + 1,78 + 778,96) \text{ kg}$$

$$m_{\text{ürün}} = 1107,07 \text{ kg}$$

bulunur.

Şematik olarak gösterelim (**Şekil 13**):



**Şekil 13.** Yanma odasına giren bileşenler ve çıkan ürünlerin kütle analizleri  
(5 kg fark kg/kmol değerlerinden gelmektedir).

(Çevre ortama atılacak olan yanma ürünlerine karşı alınacak önlemlerde, bu konuya tekrar geri dönülecek).

Sayfa 64'deki yanma denklemi göz önüne alınırsa,

$$N_{\text{ürün}} = (7,03 + 0,945 + 0,0278 + 27,82) \text{ kmol}$$

$$N_{\text{ürün}} = 35,82 \text{ kmol}$$

$$m_{\text{ürün}} = 1107,07 \text{ kg}$$

Ürün mol kitlesi

$$M_{\text{ürün}} = \frac{m_{\text{ürün}}}{N_{\text{ürün}}} \quad (\text{Eşitlik 24})$$

$$M_{\text{ürün}} = 1\,107,07 \text{ kg} / 35,82 \text{ kmol}$$

$$M_{\text{ürün}} = 30,9 \text{ kg} / \text{kmol}$$

Ürünlerin mol oranlarını da yazabiliriz:

$$Y_{\text{CO}_2} = \frac{N_{\text{CO}_2}}{N_{\text{ürün}}} = \frac{7,03 \text{ kmol}}{35,82 \text{ kmol}}$$

$$Y_{\text{CO}_2} = 0,1963$$

$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{N_{\text{H}_2\text{O}}}{N_{\text{ürün}}} = \frac{0,945 \text{ kmol}}{35,82 \text{ kmol}}$$

$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = 0,02638$$

$$Y_{\text{SO}_2} = \frac{N_{\text{SO}_2}}{N_{\text{ürün}}} = \frac{0,0278 \text{ kmol}}{35,82 \text{ kmol}}$$

$$Y_{\text{SO}_2} = 0,000776$$

$$Y_{\text{N}_2} = \frac{N_{\text{N}_2}}{N_{\text{ürün}}} = \frac{27,82 \text{ kmol}}{35,82 \text{ kmol}}$$

$$Y_{\text{N}_2} = 0,7767$$

bulunur.

Not: Santralde toplam olarak

458 ton/h kömür

25,5 ton/h kalker

kullanılması öngörüldüğüne göre (Sayfa 7) yanma ürünlerinin büyüklüğünü görmek için sadece kömürü yakalım.

$$\begin{array}{l|l} m_{\text{kömür}} = 100 \text{ kg} \\ m_{\text{hava}} = 1\,120 \text{ kg} \end{array} \quad \text{Yanma odası girdileri}$$

$$\begin{array}{l|l} 309,32 \text{ kg CO}_2 \\ 17,01 \text{ kg H}_2\text{O} \\ 1,78 \text{ kg SO}_2 \\ 778,96 \text{ kg N}_2 \\ 7,83 \text{ kg Kül} \end{array} \quad \text{Yanma ürünleri}$$

Yanacak olan kömür,

$$(m_{\text{kömür}})_{\text{santral}} = 458 \text{ ton/h} = 458\,000 \text{ kg/h}$$

$$HY = 10,2 \text{ kg hava / kg kömür (Sayfa 64)}$$

olduğuna göre, yanma için gerekli olan hava miktarı

$$(m_{\text{hava}})_{\text{santral}} = 10,2 \text{ kg hava/kg kömür} \cdot 458 \cdot 10^3 \text{ kg kömür/h}$$

$$(m_{\text{hava}})_{\text{santral}} = 4\,671,6 \text{ ton hava/h}$$

dır.

Yanma ürünleri:

$$(m_{\text{CO}_2})_{\text{santral}} = \frac{309,32 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 458 \text{ ton/h}$$

$$(m_{\text{CO}_2})_{\text{santral}} \cong 1416,7 \text{ ton/h}$$

$$(m_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{santral}} = \frac{17,01 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 458 \text{ ton/h}$$

$$(m_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{santral}} \cong 78 \text{ ton/h}$$

$$(m_{\text{SO}_2})_{\text{santral}} = \frac{1,78 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 458 \text{ ton/h}$$

$$(m_{\text{SO}_2})_{\text{santral}} = 8,15 \text{ ton/h}$$

$$(m_{\text{N}_2})_{\text{santral}} = \frac{778,96 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 458 \text{ ton/h}$$

$$(m_{\text{N}_2})_{\text{santral}} = 3\,567,6 \text{ ton/h}$$

$$(m_{\text{kül}})_{\text{santral}} = \frac{7,83 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 458 \text{ ton/h}$$

$$(m_{\text{kül}})_{\text{santral}} = 35,86 \text{ ton/h}$$

Planlanan projede, 13,74 ton/h kazanaltı külü, 77,86 ton/h uçucu kül olmak üzere toplam 91,6 ton/h kül oluşması beklenmektedir [DOKAY MÜHENDİSLİK, (2019), ÇSED Raporu, S. 19]. Yani santralde kullanılan kömürün kütlege kül oranı,

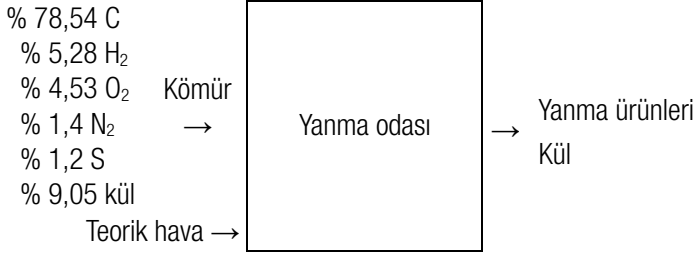
$$91,6 \text{ ton/h} = \frac{x \text{ kg kül}}{100 \text{ kg}} \cdot 458 \text{ ton/h}$$

% 20 kül olarak bulunur (100 kg kömürde 20 kg kül).

Projeyi esas kömürün kütleli analiz değerleri elimizde mevcut olmadığı için birebir uygulamaya dönük hesap yapma olanağımız yoktur. Yapılan hesaplar bir ön bilgi için olup yol göstericidir.

Bir örnek daha yapalım:

**Örnek [Tuncer Özkan]:**



**Şekil 14.** Yanma odasına giren çıkan bileşenler

Bir buharlı güç santrali (termik santral) düşünelim. Yakıt olarak saatte 452 ton kütleye: % 78,54 C, % 5,28 H<sub>2</sub>, % 4,53 O<sub>2</sub>, % 1,4 N<sub>2</sub>, % 1,2 S ve % 9,05 kül içeren taşkömürü kullanılacak ve teorik hava ile (**Şekil 14**) yakılacaktır (yani, fazla hava kullanılmaksızın). Bu durumda yanma ürünlerinin sadece CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> (Kül göz ardı edilmiştir) olduğu kabulü ile, çevre ortama atılacak olan önlemsiz zehirli gazların kütesel değerlerini hesaplamaya çalışalım. C, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, S ve hava'nın mol kütleleri sırasıyla: 12, 2, 32, 28, 32 ve 29 kg/kmol dır. Kömür bileşenlerinin mol miktarları:

$$N_{\text{bileşen}} = \left( \frac{m}{M} \right)_{\text{bileşen}} \quad (\text{Eşitlik 24})$$

$$N = \frac{m_C}{M_C} = \frac{78,54 \text{ kg}}{12 \text{ kg/kmol}} = 6,545 \text{ kmol}$$

$$N_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}} = \frac{5,28 \text{ kg}}{2 \text{ kg/kmol}} = 2,64 \text{ kmol}$$

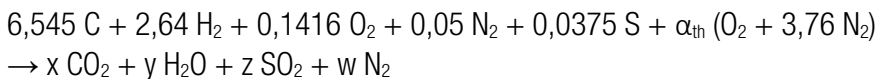
$$N_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} = \frac{4,53 \text{ kg}}{32 \text{ kg/kmol}} = 0,1416 \text{ kmol}$$

$$N_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{M_{N_2}} = \frac{1,4 \text{ kg}}{28 \text{ kg/kmol}} = 0,05 \text{ kmol}$$

$$N_S = \frac{m_S}{M_S} = \frac{1,2 \text{ kg}}{32 \text{ kg/kmol}} = 0,0375 \text{ kmol}$$

Kül yanmayan madde olduğundan yanma denkleminde gözönüne alınmamıştır.

$\alpha_{th}$ , havanın stokiometrik katsayısı olmak üzere yanma denklemi,



Bileşenlerin mol dengesi yazılırsa

$$\text{C dengesi: } 6,545 = x$$

$$\text{H}_2 \text{ dengesi: } 2,64 = y$$

$$\text{S dengesi: } 0,0375 = z$$

$$\text{O}_2 \text{ dengesi: } 0,1416 + \alpha_{\text{th}} = x + y/2 + z$$

$$\alpha_{\text{th}} = 6,545 + 2,64/2 + 0,0375 - 0,1416$$

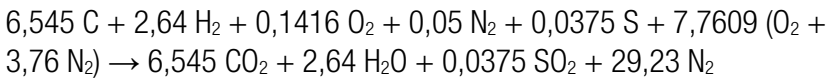
$$\alpha_{\text{th}} = 7,7609$$

$$\text{N}_2 \text{ dengesi: } 0,05 + \alpha_{\text{th}} \cdot 3,76 = w$$

$$w = 0,05 + 7,7609 \cdot 3,76$$

$$w = 29,23$$

Dolayısıyla yanma denklemi,



Kül göz önüne alınmamıştır.

Hava-yakıt oranı:

Yanmada fazla hava kullanılmadığına göre

$$m_{\text{hava}} = \alpha_{\text{th}} \cdot 4,76 \text{ kmol hava} \cdot 29 \text{ kg/kmol hava}$$

$$m_{\text{hava}} = 7,7609 \cdot 4,76 \cdot 29$$

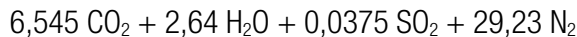
$$m_{\text{hava}} \cong 1071 \text{ kg}$$

$$\text{HY} = \frac{m_{\text{hava}}}{m_{\text{yakıt}}} = \frac{1071 \text{ kg hava}}{100 \text{ kg yakıt}}$$

$$\text{HY} = 10,71 \text{ kg hava/kg yakıt}$$

olarak bulunur. Yani kömürün her kg için buhar kazanına 10,71 kg hava verilmelidir.

Yanma odasından çıkan ürünlerin kütle analizi:



olduğuna göre, mol kütleleri,

$$m_{\text{CO}_2} = 6,545 \text{ kmol} \cdot 44 \text{ kg/kmol} = 287,98 \text{ kg}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 2,64 \text{ kmol} \cdot 18 \text{ kg/kmol} = 47,52 \text{ kg}$$

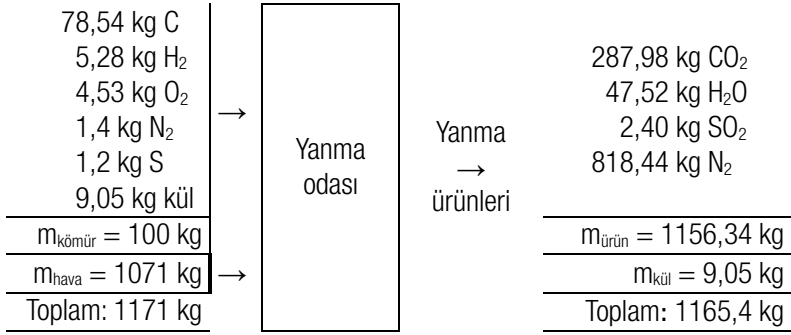
$$m_{\text{SO}_2} = 0,0375 \text{ kmol} \cdot 64 \text{ kg/kmol} = 2,40 \text{ kg}$$

$$m_{\text{N}_2} = 29,23 \text{ kmol} \cdot 28 \text{ kg/kmol} = 818,44 \text{ kg}$$

$$m_{\text{ürün}} = (287,98 + 47,52 + 2,4 + 818,44) \text{ kg}$$

$$m_{\text{ürün}} = 1156,34 \text{ kg}$$

bulunur. Şematik olarak gösterelim (Şekil 15)



**Şekil 15.** Bileşenlerin kütle analizi  
 (Toplamdaki 5,6 kg fark ihmal edilebilir;  
 sayıların yuvarlatılmasından ileri gelebilir)

Santralde, saatte 452 ton zenginleştirilmiş (lavvardan çıkmış) taşkömürü kullanıldığına göre çevre ortama atılacak olan gazlar:

$$m_{\text{hava}} = 10,71 \text{ kg hava/kg kömür} \cdot 452 \cdot 10^3 \text{ kg kömür/h}$$

$$m_{\text{hava}} = 4\,841 \text{ ton hava/saat}$$

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{287,98 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 452 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 1\,302 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{47,52 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 452 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 215 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{2,4 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 452 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{SO}_2} = 10,8 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{N}_2} = \frac{818,44 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 452 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{N}_2} = 3\,699 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{kül}} = \frac{9,05 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \cdot 452 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{kül}} = 41 \text{ t/h}$$

Not 1: Taşkömürü özellikleri ile ilgili bilgiler, **Tablo 9** ve **Tablo 10**'da verilmiştir.  
Not 2: Aynı örnek, "ZEHİR YAĞACAK" altında özet olarak Sayfa 73-75'dir.

Lavvar Şube Müdürlüğü

| TTK Üretimi Taşkömürlerin Karakteristik Özellikleri ve Sınıflandırılmaları<br>(Milimetrik Ebat Ayrımlı Kömür Cinsleri) |                 |           |           |           |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| AMASRA LAVUARI (Amasra Müessesesi)                                                                                     |                 |           |           |           |           |
| Nitelikler                                                                                                             |                 | +50       | 18 - 50   | 10 - 18   | 0 - 10    |
| Rutubet                                                                                                                | (ar) %          | 3 ± 1     | 4 ± 1     | 6 ± 1     | 14 ± 2    |
| Kül                                                                                                                    | (ar) %          | 15 ± 2    | 14 ± 2    | 14 ± 2    | 12 ± 2    |
| Uçucu madde                                                                                                            | (ar) %          | 35 ± 2    |           |           |           |
| Sabit Karbon                                                                                                           | (ar) %          | 47 ± 2    |           |           |           |
| Üst Isı değeri                                                                                                         | (ar) % kcal/kg  | 6250      | 6200      | 6050      | 5650      |
| Üst Isı değeri                                                                                                         | (ar) % btu/lb   | 11250     | 11160     | 10890     | 10170     |
| Alt Isı değeri                                                                                                         | (ar) % kcal/kg  | 6050      | 6000      | 5850      | 5450      |
| Alt Isı değeri                                                                                                         | (ar) % btu/lb   | 10890     | 10800     | 10530     | 9810      |
|                                                                                                                        |                 |           |           |           |           |
| Kül                                                                                                                    | (d) %           | 15 ± 2    | 15 ± 2    | 15 ± 2    | 14 ± 2    |
| Uçucu madde                                                                                                            | (d) %           | 36 ± 2    | 36 ± 2    | 36 ± 2    | 37 ± 2    |
| Sabit Karbon                                                                                                           | (d) %           | 48 ± 2    | 48 ± 2    | 48 ± 2    | 48 ± 2    |
| Üst Isı değeri                                                                                                         | (d) % kcal/kg   | 6450      | 6450      | 6450      | 6550      |
| Üst Isı değeri                                                                                                         | (d) % btu/lb    | 11610     | 11610     | 11610     | 11700     |
| Alt Isı değeri                                                                                                         | (d) % kcal/kg   | 6250      | 6250      | 6250      | 6350      |
| Alt Isı değeri                                                                                                         | (d) % btu/lb    | 11250     | 11250     | 11250     | 11410     |
|                                                                                                                        |                 |           |           |           |           |
| Uçucu madde                                                                                                            | (daf) %         | 43 ± 2    | 43 ± 2    | 43 ± 2    | 43 ± 2    |
| Sabit Karbon                                                                                                           | (daf) %         | 56 ± 2    | 56 ± 2    | 56 ± 2    | 56 ± 2    |
| Üst Isı değeri                                                                                                         | (daf) % kcal/kg | 7500      | 7500      | 7500      | 7500      |
| Üst Isı değeri                                                                                                         | (daf) % btu/lb  | 13680     | 13680     | 13680     | 13680     |
|                                                                                                                        |                 |           |           |           |           |
| Uçucu madde                                                                                                            | (dmmf) %        | 42 ± 1    | 42 ± 1    | 42 ± 1    | 42 ± 1    |
| Sabit Karbon                                                                                                           | (dmmf) %        | 58 ± 1    | 58 ± 1    | 58 ± 1    | 58 ± 1    |
| Üst Isı değeri                                                                                                         | (mmf) % btu/lb  | 13900     | 13900     | 13900     | 13900     |
|                                                                                                                        |                 |           |           |           |           |
| Karbon C                                                                                                               | (ad) %          | 70 ± 3    | 70 ± 3    | 70 ± 3    | 70 ± 3    |
| Hidrojen H                                                                                                             | (ad) %          | 4 ± 1     | 4 ± 1     | 4 ± 1     | 4 ± 1     |
| Kükürt S                                                                                                               | (ad) %          | max 1,5   | max 1,5   | max 1,5   | max 1,5   |
| Azot N                                                                                                                 | (ad) %          | 1,2 ± 0,4 | 1,2 ± 0,4 | 1,2 ± 0,4 | 1,2 ± 0,4 |
|                                                                                                                        |                 |           |           |           |           |
| Kül Ergime Noktası en az C                                                                                             |                 |           | 1270      |           |           |
|                                                                                                                        |                 |           |           |           |           |
| ISO Uluslararası Sınıflandırma                                                                                         |                 |           |           |           |           |
| ISO Kod. No.                                                                                                           |                 |           | 711       |           |           |
| ISO Sınıf                                                                                                              |                 |           | VII       |           |           |
| Koklaşma durumu                                                                                                        |                 |           | Pek zayıf |           |           |
|                                                                                                                        |                 |           |           |           |           |
| ASTM Rank Sınıflandırması                                                                                              |                 |           |           |           |           |
| ASTM Rank Skalası                                                                                                      |                 |           | 58-139    |           |           |

|                                                                                                                       |                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| ASTM Rank Sınıf                                                                                                       | II Bitümlü                                          |
| ASTM Rank Grup                                                                                                        | hvbB                                                |
| GB National Coal Board Sınıflandırma                                                                                  |                                                     |
| GB - NCB Grup                                                                                                         | 900                                                 |
| GB - NCB Sınıf                                                                                                        | 902                                                 |
| GB - NCB Tanımlama                                                                                                    | Yüksek Uçuculu, Kokuşmaz                            |
| Kısaltmalar                                                                                                           |                                                     |
| ar: Teslim alındığı gibi                                                                                              | hvaB : Yüksek Uçuculu A Bitümlü                     |
| ad: Havada kurutulmuş                                                                                                 | hvbB : Yüksek Uçuculu B Bitümlü                     |
| d: Kuru                                                                                                               | ISO: International Organization for Standardization |
| daf: Kuru, külsüz                                                                                                     | ASTM: American Society for Testing and Materials    |
| dmmf: Kuru, mineral maddesiz                                                                                          | GB NCB: İngiltere National Coal Board               |
| hvb : Orta Uçuculu A Bitümlü                                                                                          |                                                     |
| NOT                                                                                                                   |                                                     |
| 1) Teslim alındığı gibi ve kuru kömür ısı değerlerinde +150 kcal/kg veya 270 btu/lb tolerans vardır                   |                                                     |
| 2) Kükürt değerlerinde rastlanan en yüksek değerler tabloya konulmuştur. Bu rakamların yarıları ortalama değerlerdir. |                                                     |

**Tablo 9.** Amasra lavvarı taşkömürü özellikleri

| Kömür Kimyasal Analiz | Birim | Analiz Metodu | WA 100   | WA300 veya WA400 |
|-----------------------|-------|---------------|----------|------------------|
|                       |       |               | 16110018 | 17020025         |
|                       |       |               | Sonuç    | Sonuç            |
| Toplam Rutubet        | %     | ASTM D3302    | 6,54     | 2,75             |
| Kül                   | %     | ASTM D3174    | 9,05     | 5,59             |
| Uçucu Madde           | %     | ASTM D3175    | 32,32    | 36,65            |
| Sabit Karbon          | %     | ASTM D3172    | 58,63    | 57,76            |
| S                     | %     | ASTM D4239    | 0,96     | 1,192            |
| C (Karbon)            | %     | ASTM D5373    | 76,49    | 78,54            |
| H (Hidrojen)          | %     | ASTM D5373    | 4,9      | 5,28             |
| N (Azot)              | %     | ASTM D5373    | 1,33     | 1,4              |
| FSI                   | -     | ASTM D720     | 4        | 6,5              |
| Oksidasyon            | % T17 | ASTM D5263    | 94,1     | 96,3             |
| Üst Isıl Kalori       | cal/g | ASTM D5865    | 7475     | 7542             |
| Alt ısı kalori        | cal/g | ASTM D5865    | 7223     | 7319             |
| Kül Ergime Sıcaklığı  | °C    | ASTM D1857    | >=1500   | 1405             |
| Roga                  | -     | ISO 335       | 57       | 65,8             |
| Hard Grove            | -     | ASTM D409     | 63,97    | 58,94            |

**Tablo 10.** Taş kömürü analiz sonuçları <sup>1)</sup>

<sup>1</sup> [L 9] YURDAŞEN, Atilla (20..). Kişisel görüşme. Emekli Lavvar Şube Md. ATİ Amasra.

## “ZEHİR YAĞACAK”

Bir buharlı güç santrali (Termik santral) düşünelim. Yakıt olarak saatte 450 ton kütlece % 78,54 C, % 5,28 H<sub>2</sub>, % 4,53 O<sub>2</sub>, % 1,4 N<sub>2</sub>, % 1,2 S ve % 9,05 kül içeren taş kömürü kullanılacak ve teorik hava ile (**Şekil 16**) yakılacaktır. Bu durumda yanma (Tam yanma) ürünlerinin sadece, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> (Kül gözardı edilmiştir) olduğu kabulü ile yanma işlemi için gereken yakıt-hava oranını ve çevre-ortama atılacak olan ÖNLEMSİZ zehirli gazlar kütleli değerlerini hesaplamaya çalışalım. C, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, S ve havanın mol kütleleri sırasıyla 12, 2, 32, 28, 32 ve 29 kg/kmol dır.



**Şekil 16.** Yanma odasına giren çıkan bileşenler

Kömür bileşenlerinin mol miktarları  
(100 kg kömür esas alınmıştır):

$$N_C = \frac{m_C}{M_C} = \frac{78,54 \text{ kg}}{12 \text{ kg/mol}} = 6,545 \text{ kmol}$$

$$N_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}} = \frac{5,28 \text{ kg}}{2 \text{ kg/kmol}} = 2,64 \text{ kmol}$$

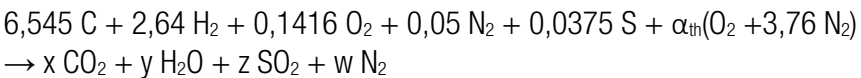
$$N_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} = \frac{4,53 \text{ kg}}{32 \text{ kg/kmol}} = 0,1416 \text{ kmol}$$

$$N_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{M_{N_2}} = \frac{1,4 \text{ kg}}{28 \text{ kg/kmol}} = 0,05 \text{ kmol}$$

$$N_S = \frac{m_S}{M_S} = \frac{1,2 \text{ kg}}{32 \text{ kg/mol}} = 0,375 \text{ kmol}$$

Kül, yanmayan madde olduğundan yanma denkleminde gözönüne alınmamıştır.

$\alpha_{th}$ , teorik hava katsayısı olmak üzere yanma denklemi,



Bileşenlerin mol dengesi yazılırsa,

C dengesi:  $6,545 = x$

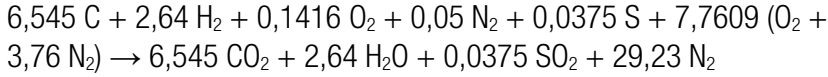
H<sub>2</sub> dengesi:  $2,64 = y$

S dengesi:  $0,0375 = z$

O<sub>2</sub> dengesi:  $0,1416 + \alpha_{th} = x + y/2 + z$   
 $\alpha_{th} = 7,7609$

N<sub>2</sub> dengesi:  $0,05 + \alpha_{th} \cdot 3,76 = w$   
 $w = 29,23$

Dolayısıyla yanma denklemi



olur. Yanmada fazla hava kullanılmadığına göre

$$m_{hava} = \alpha_{th} \cdot 4,76 \text{ kmol hava} \cdot 29 \text{ kg/kmol hava}$$

$$m_{hava} = 7,7609 \cdot 4,76 \cdot 29 \text{ kg}$$

$$m_{hava} = 1\,071 \text{ kg}$$

$$m_{yakıt} = 100 \text{ kg için hava-yakıt oranı}$$

$$HY = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} = \frac{1\,071 \text{ kg hava}}{100 \text{ kg yakıt}}$$

$$HY = 10,71 \text{ kg hava/kg yakıt}$$

olarak bulunur. Yani kömürün her kilogram için buhar kazanına 10,71 kg hava verilmelidir.

Yanma ürünlerinin kütle değerini bulalım:

$$m_{ürün} = 6,545 \cdot 44 + 2,64 \cdot 18 + 0,0375 \cdot 64 + 29,23 \cdot 28$$

$$m_{ürün} = 1156,34 \text{ kg (CO}_2, H_2O, SO_2, N_2 \text{ dahil, kül hariç)}$$

Bu değerler 100 kg kömür içindir. Santralde saatte 452 ton zenginleştirilmiş kömür kullanıldığına göre (Tam yanma) çevre ortama atılacak olan zehirli gazlar (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> gibi) saatte tonlarca miktardadır. Hangi önlemlerle bu değerler HANGİ ORANDA en aza indirilecek? Cevapsız soru buradadır.

Bu gazların özellikleri:

CO<sub>2</sub>: En yaygın boğucu / boğulmaya yol açan gaz

SO<sub>2</sub>: Atmosferde nem ile reaksiyona girerek asit yağmuru oluşturur (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Bitki örtüsü ve toprak bozulması gibi olaylara neden olurlar.

İnsan üzerindeki etkileri: Kornea bulanıklığı, nefes alma zorluğu, hava yolları (solunum yolları) iltihabı, göz tahrişi, akciğer ödemi, kalp yetmezliği, dolaşım çöküşü, yaşlılarda ve bebeklerde astım, kronik bronşit.

N<sub>2</sub>: Bu gazın O<sub>2</sub> ile yer değiştirmesi halinde ani ölümlerin meydana gelmesi de kaçınılmazdır.

## ÖZET

100 kg kömürü yakmak için (Tam yanma) 1 071 kg havaya ihtiyaç vardır. Yanma ürünleri ise 1 156,34 kg dır.

100 kg yakıt + 1 071 kg hava

$$m_{CO_2} = 6,545 \text{ kmol} \cdot 44 \text{ kg/kmol} = 287,98 \text{ kg}$$

$$m_{H_2O} = 2,64 \cdot 18 = 47,52 \text{ kg}$$

$$m_{SO_2} = 0,0375 \cdot 64 = 2,40 \text{ kg}$$

$$m_{N_2} = 29,23 \cdot 28 = 818,44 \text{ kg}$$

452 t/h yakıt için

$$m_{CO_2} = 1302 \text{ t/h}$$

$$m_{H_2O} = 215 \text{ t/h}$$

$$m_{SO_2} = 10,8 \text{ t/h}$$

$$m_{N_2} = 3499 \text{ t/h}$$



## VII. ÇED raporuna göre yanma ürünleri ile ilgili alınan önlemler

[DOKAY MÜHENDİSLİK (2019), ÇSED Raporu, S. )]

### Baca gazı arıtma üniteleri

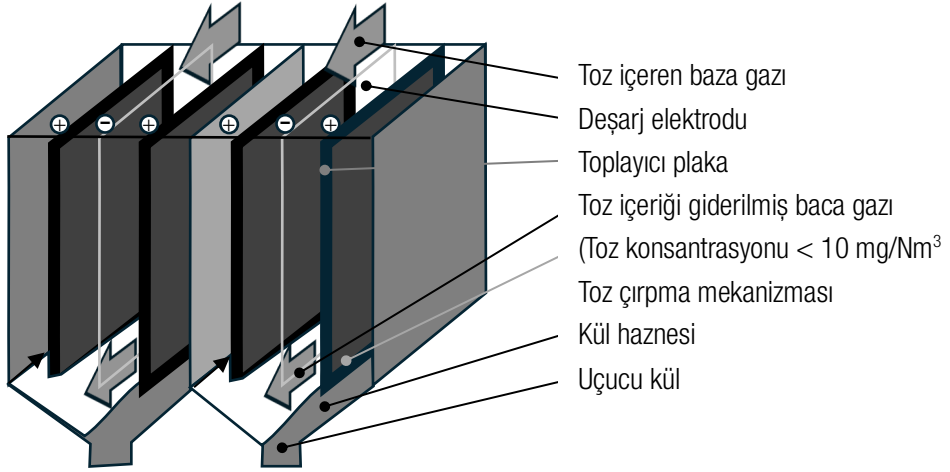
- ▶ Santralde kömürün yakılması sonucunda başlıca şu emisyonlar oluşacaktır:
  - Karbon oksitler
  - Azot oksitler
  - Kükürt oksitler
  - Toz
- ▶ Yanma sonucu oluşan gazların içerdiği uçucu küllerin, atmosfere atılarak çevre kirliliğine neden olmasını önlemek için yüksek verimli "Elektrostatik Filtreler (EF)" kullanılacaktır.
- ▶ Tesisin devreye alınması esnasında (start-up) yardımcı yakıt olarak doğalgaz ve LNG kullanılacaktır. Kazanda kömür yakılmaya başladığı andan itibaren toz tutma sistemi devreye girecektir.
- ▶ Santralde, kömür yakıldığında oluşacak SO<sub>2</sub> konsantrasyonunu "Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği"inde belirlenen sınır değerlerin altına çekebilmek için iki adet BGD (Baca Gazı Desülfürizasyon) tesisi kurulacaktır.
- ▶ Ayrıca baca gazındaki NO<sub>x</sub> (Azot oksitler) emisyonlarının da yönetmelik sınır değerlerinin altında kalması için düşük-NO<sub>x</sub> brülörler kullanılacak; kazan ön hava ısıtıcısı ve ekonomizer arasına Baca Gazı Azot Oksitleri Giderme sistemi-DeNO<sub>x</sub> (SCR - Selective Catalytic Reactor / Seçici Katalitik İndirgeme) yerleştirilecektir.
- ▶ Elektrostatik Filtreler (EF)

Elektrostatik filtre (EF), en basit tanımı ile kömür yakan endüstri kazanlarında yanma sonrası oluşan sıcak gaz içerisindeki tozun tutulmasını sağlayan ekipmandır (**Şekil 17**).

EF ile kül tutma işlemi baca gazı akışında herhangi bir kesintiye yol açmaz. Yapılması planlanan santralde her üniteye ikişer adet elektrostatik filtre kurulacaktır. Planlanan EF üniteleri ihtiyacı karşılayacak şekilde dizayn edilecektir. Projede kömürün yakılması durumunda EF sistemi için baca gazındaki toz içeriğinin 10 mg/Nm<sup>3</sup> ü aşmaması garanti edilmektedir.

Yapılması planlanan santralde kömürün yakılmasından kaynaklı SO<sub>2</sub> emisyonu meydana gelecektir. Tesiste düşük kükürt içeren yakıt kaynağı kullanılması ile beraber baca gazındaki SO<sub>2</sub>'yi uzaklaştırmak için desülfürizasyon (BGD) tekniği

uygulanacaktır. Desülfürizasyon işleminin temeli baca gazında bulunan  $\text{SO}_2$ 'nin baca gazı üzerine püskürtülen bir absorban maddeye bağlanarak katı halde ortamdan uzaklaştırılmasıdır.

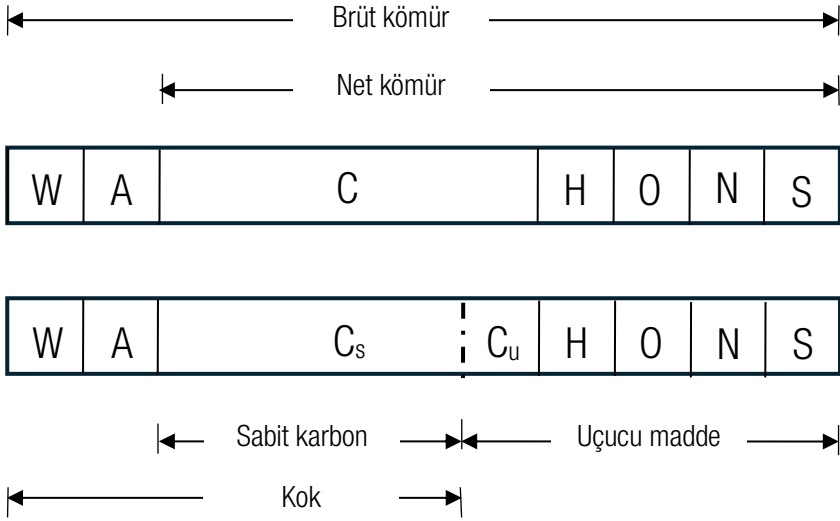


**Şekil 17.** Tipik elektrostatik filtre sistemi  
[DOKAY MÜHENDİSLİK (2019), ÇSED Raporu, S. )]

## VIII. Kömür hakkında genel bilgi

[ONAT v. d. (2007), S ]

Buhar üretiminde kullanılan fosil yakacaklar içinde en önemlisi kömürdür. Kömürün elemansel analizinde, kömür içindeki nem, karbon, hidrojen, kükürt, azot, oksijen ve kül miktarlarının tespiti yapılır. Nem ve kül dahil toplam yakacağa 'Brüt yakacak' adı verilir. Nem ve kül dışındaki yakacağın yanabilen kısımlarına ise 'Net yakacak' adı verilir (**Şekil 18**).



**Şekil 18.** Yakacak analizi

[ONAT v. d. (2007), S. ]

Bu şekildeki W, A, C, C<sub>s</sub>, C<sub>u</sub>, H, O, N ve S sırası ile yakacağın, nem, kül, karbon, sabit karbon, uçucu karbon, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt bileşenlerini gösterir. Doğal olarak  $C = C_s + C_u$  olacaktır.

Bileşenleri görelim:

### Nem

Kömür içindeki nem oranı devamlı olarak değişir. Bu nem serbest nem ve bağlı nem olarak ikiye ayrılabilir. Serbest nem kömürün açık havada bırakılması ile yağmur gibi bünyeye girmiş nemdir. Bağlı nem ise kömür yapısındaki tuzlar ve benzeri tarafından içerilen, bünyeye kimyasal olarak bağlanmış gizli nemdir. Kömür bir kazanın ocağına gönderildiğinde önce yapısındaki nem buharlaşır. Bu

olay ısı yuttuğunda yüksek nem içeren kömür özel bir önlem alınmazsa ocağı soğutur ve yanmayı kötüleştirir. Ayrıca toz kömür ocaklarında kömürün öğütülmesi ve hava ile taşınması için mutlaka kuru olması gerekir. Bunun için hava ısıtıcıları kullanılır ve yakma havası ocağa sıcak olarak gönderilir.

#### **Uçucu maddeler:**

Uçucu maddeler kömürün damıtılması ve ayrışması ile ortaya çıkan hidrokarbonlardan meydana gelir. Ana bileşenleri, oksijen, karbonmonoksit, metan ve diğer karbonlu hidrojenler ile bünyeye kimyasal şekilde bağlı su olarak sayılabilir. Uçucu maddeler kömürün çabuk tutuşması ve hızlı yanması açısından çok önemlidir.

#### **Sabit karbon:**

Sabit karbon, uçucu maddelerin ayrılmasından sonra geriye kalan ve yanabilen kısımdır. Genel anlamda sabit karbon kömürün katı halde yanması gereken kısmını temsil eder.

#### **Kül:**

Kül, kömürün tamamen yanmasından sonra arta kalan, yanıcı olmayan maddelerin toplamıdır.

#### **Kükürt:**

Kükürt kömür yapısındaki en önemli bileşenlerden biridir. Kükürt yanması kükürt oksitleri oluşturur. Bunlar da yanma gazları çığ noktası altına soğutulduklarında yoğunlaşarak su ile yüzeyler arasında asit tabakası meydana getirirler (çığ noktası sıcaklığı: yoğunlaşmanın başladığı sıcaklık). Ayrıca bacadan atılan gaz içerisindeki kükürt oksitler asit yağmuru şeklinde çevre bitki örtüsüne ve solunmaları halinde insan sağlığına son derece zararlıdır. Kükürtçe zengin kömürlerin ancak bazı fiziksel yıkama yöntemleri ile içlerindeki kükürt oranı düşürülerek yakılmasına izin verilmelidir. Kükürdü yüksek kömürlerin yakılmasında bir başka imkan ise akışkanlaştırılmış yataklarda (akışkan yataklı) olduğu gibi, kömürü kalker (kalsiyum oksit) ile birlikte karıştırarak yapmaktır. Bu durumda bir kısım kükürt oksitler kalker tarafından kimyasal yolla yatakta tutulabilmektedir.

Faydalı olur düşüncesiyle, Türkiye’de üretilen taş kömürü üretim alanları ve işletmeleri **Tablo 11**’de verilmiştir.

| BÖLGELER                                   | Armutçuk              | Kozlu   | Özülmaz | Karadon       | Amasra | Azdavay<br>Kurucaşile<br>(ayıklanmış) | Pamucak<br>Antalya<br>(Tuvenam) | GENEL<br>TOPLAM |
|--------------------------------------------|-----------------------|---------|---------|---------------|--------|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Görünür                                    | 32,4                  | 9,1     | 71,3    | 51,6          | 20,3   | 1,9                                   | -                               | 186,6           |
| Rezerv                                     | Muhtemel              | 61,3    | 15,8    | 101,7         | 84,2   | 195,6                                 | 11,9                            | 470,5           |
| milyon ton                                 | Mümkün                | -       | 260     | 79,3          | 344,6  | 60,7                                  | 1,3                             | 746             |
| TOPLAM                                     |                       | 93,7    | 234,9   | 252,3         | 480,4  | 276,6                                 | 15,1                            | 1404,0          |
| Su (%)                                     | 8,0                   | 9,0     | 9,0     |               | 10     | 5,0                                   | 1,3                             |                 |
| Kül (%)                                    | 11,0                  | 13,0    | 13,0    | 13,0          | 14,0   | 42                                    | 31,9                            |                 |
| Yıkanmış<br>Kömür Analizi<br>ve Isı Değeri | Toplam Kükürt (%)     | 1,2     | 1,0     | 1,0           | 1,5    | 1,0                                   | 2,4                             |                 |
| Uçucu madde (%)                            | 33                    | 25      | 25      | 24            | 33     | 18                                    |                                 |                 |
| Alt ısı değeri (kJ/kg)                     | 6400                  | 6500    | 6500    | 6500          | 5700   | 3600                                  | 4800                            |                 |
| (kJ/kg)                                    | 26750                 | 27170   | 27170   | 27170         | 23830  | 15050                                 | 20060                           |                 |
| Üretim                                     | Yıkanmış fiili (1981) | 0,385   | 1,016   | 1,023         | 1,32   | 0,151                                 | 0,043                           | 3,970           |
| m. ton/yl                                  | Yıkanmış optimum      | 0,5     | 1,2     |               | 2,3    | 0,4                                   | 0,3                             | 6               |
| Tesisler                                   | Lavuar t/h            | 250     | 1000    | 750           | 220    | -                                     | -                               | 2220            |
|                                            | Eleme t/h             |         |         |               |        | 250                                   | -                               |                 |
|                                            | Şişme FSI             | 1,5     |         | 7,5 ila 8,5   |        |                                       | 4                               | 9               |
|                                            | Dilatasyon            | - 31    |         | - 8 ila 169   |        |                                       | - 64                            | - 229           |
| Koklaşma<br>Özellikleri                    | Pişme                 | - 10,5  |         | -12 ila - 25  |        |                                       |                                 |                 |
|                                            | Zayıf                 |         |         |               | Zayıf  |                                       |                                 | Zayıf           |
|                                            | Koklaşma              | (10-90) |         | İyi - Çok iyi | - 95 % | Orta                                  | Çok iyi                         |                 |

**Tablo 11.** Türkiye'nin Taşkömürü üretim sahaları ve üretilen kömür özellikleri  
[ONAT v. d. (2007), S ] \*) 1 kcal = 4,18 kJ

#### Alt ve üst ısı değerleri:

Buhar kazanlarında olduğu gibi bütün yanma ürünleri gaz bazında ise alt ısı değeri söz konusudur ve bu değer, üst ısı değerinden mevcut su buharının gizli buharlaşma ısıya kadar düşük olacaktır. Yanma ürünlerinin tamamının gaz fazında olması halinde tarif edilen bu ısı değeri ile üst ısı değeri arasında

$$H_u = H_o - 2440 W_t \quad (28)$$

şeklinde bir bağıntı vardır. Burada

$H_u$  - Alt ısı değeri (kJ/kg)

$H_o$  - Üst ısı değeri (kJ/kg)

$W_t$  - 1 kg yakıttan oluşan toplam su buharı miktarı (kg/kg)

2 440 değeri ise suyun 25 °C sıcaklıktaki gizli buharlaşma ısıdır. Yakıtın elemansel analizi biliniyorsa ısı değeri kolaylıkla hesaplanabilir. Katı veya sıvı yakıt analizi,

$$C + H + O + S + N + W + A = 1 \text{ kg} \quad (29)$$

verildiğine göre,

C - karbon oranı

H - hidrojen oranı

O - oksijen oranı

S - kükürt oranı

N - azot oranı  
W - nem oranı  
A - kül oranı.

**Tablo 12'**deki yanma denklemlerinden yanabilen elemanlar olarak karbon, hidrojen ve kükürt gözönüne alınırsa

| Yakıt          | Mol. Küt. | Reaksiyon                                         | REAKSİYON ISISI |                    |
|----------------|-----------|---------------------------------------------------|-----------------|--------------------|
|                |           |                                                   | kJ/kg           | kJ/Nm <sup>3</sup> |
| Karbon         | 12        | $C + O_2 \rightarrow CO_2$                        | 32 796          | -                  |
| Hidrojen       | 2         | $H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$                  | 141 886         | 12 109             |
| Kükürt         | 32        | $S + O_2 \rightarrow SO_2$                        | 9 300           | -                  |
| Metan          | 16        | $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$          | 55 590          | 37 743             |
| Etan           | 30        | $C_2H_6 + 3,5 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 3 H_2O$    | 51 870          | 66 768             |
| Propan         | 44        | $C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O$      | 50 000          | 96 500             |
| Bütan          | 58        | $C_4H_{10} + 6,5 O_2 \rightarrow 4 CO_2 + 5 H_2O$ | 49 540          | 125 562            |
| Karbonmonoksit | 28        | $CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$                   | 10 108          | 11 990             |

**Tablo 12.** Yanma denklemleri  
[ONAT v. d. (2007), S ]

$$H_o = 32\,796\,C + 141\,886\,(H - O/8) + 9\,300\,S \text{ kJ/kg} \quad (30)$$

yazılabilir. Bu ifadedeki O/8 terimi, yakıt içerisindeki oksijenin hidrojenle daha önce H<sub>2</sub>O olarak birleşik halde bulunduğu kabulünden gelmektedir.

Alt ısı değeri ise

$$H_u = H_o - 2440\,(w + 9H) \text{ kJ/kg} \quad (31)$$

şeklinde hesaplanır.

Örnek [ONAT v. d. (2007), S ]:

Elemansel analizi aşağıda verilen taş kömürünün üst ve ısı alt değerlerinin hesaplanması istensin:

C: 0,6610

H: 0,0386

O: 0,0414

S: 0,0249

w: 0,0628

A: 0,1713

1,0000 kg

Buna göre üst ısı değeri,

$$H_o = 32\,796\,C + 141\,886(H - O/8) + 9\,300\,D \quad (\text{Eşitlik 30})$$

$$H_o = 32\,796 \cdot 0,6610 + 141\,886 (0,0386 - 0,0414/8) + 9\,300 \cdot 0,0249$$

$$H_o = 26\,652 \text{ kJ / kg}$$

Alt ısı değeri,

$$H_u = H_o - 2\,440 (W + 9 \cdot H) \quad (\text{Eşitlik 31})$$

$$H_u = 26\,652 - 2\,440 (0,0628 + 9 \cdot 0,0386)$$

$$H_u = 25\,651 \text{ kJ/kg}$$

#### • Yakma havası miktarının bulunması

Buhar kazanlarında kullanılan katı ve sıvı yakıtlarda yanabilen elemanlar sadece karbon, hidrojen ve kükürt olduğundan, bu yakıtların yakılabilmeleri için gerekli oksijen ve hava miktarları **Tablo 12**'de verilen yanma denklemleri yardımı ile bulunabilir. Burada yanma reaksiyonuna giren bütün gaz ürünlerin ideal gaz olduğu, 1 kmol gazın 22,4 Nm<sup>3</sup> hacim işgal ettiği ve havanın hacimsel olarak % 79 Azot ve % 21 Oksijenden oluştuğudur. Buna göre elemansel analizi bilinen 1 kg yakacağın yanabilmesi için gerekli teorik hava miktarı, ki buna 'Teorik Özgül Hava Miktarı' adı verilir, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$v_{h_0} = \frac{100}{21} \left[ \frac{22,4}{12} C + \frac{11,2}{2} \left( H - \frac{O}{8} \right) + \frac{22,4}{32} S \right]$$

veya

$$v_{h_0} = 8,89\,C + 26,7 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 3,34 \cdot S \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Yukarıda hesaplanan  $v_{h_0}$  hava miktarı, yakacak ile havanın her noktada ideal bir şekilde karıştığına göredir ve teorik bir değerdir. Pratikteki ocaklarda yakacağın ve ocağın cinsine göre bir miktar hava yakacakla temas etmez ve yanma olayına katılmadan bacaya gider. İşte bu nedenle pratikteki yanmaya karşı gelen gerçek bir yanma için havayı, yukarıda bulunan teorik miktardan daha fazla göndermek gerekir (Fazla hava bkz. Sayfa 55).

#### Not

Nm<sup>3</sup> biriminde kullandığımız

N - normal şartlar (270 °K sıcaklık ve 1 atm = 760 mm Hg basınç altında) halini tanımlar.

### • Yanma ürünleri miktarlarının bulunması

Yanma ürünleri de **Tablo 12**'de verilen yanma denklemleri ve yakacağın elemansel analizi ile bulunabilir. Katı ve sıvı yakacaklar için teorik tam yanma halinde yanma ürünler içindeki gaz bileşenleri CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ve N<sub>2</sub> olacaktır. Yakacağın elemansel analizi bilindiğine göre yanma ürünleri hacimleri (1 kmol gazın 22,4 Nm<sup>3</sup> hacim kapladığı bilindiğine göre):

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} C \quad (33)$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} S \quad (34)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} H + \frac{22,4}{18} W \quad (35)$$

$$V_{N_2} = 0,79 v_{h_0} + \frac{22,4}{28} C \quad (36)$$

Yukarıdaki bağıntılarda V değerleri 1 kg yakacağın yakılması sonucunda ortaya çıkan gaz hacimlerini Nm<sup>3</sup> cinsinden ifade eden özgül gaz miktarlarıdır. Toplam teorik özgül duman miktarı  $V_{go} = (Nm^3/kg)$  ile gösterilirse

$$V_{go} = 8,89 C + 21,1(H - O/8) + 3,34 S + 0,8 N + 1,244 (W + 9H) \quad (37)$$

şeklinde bileşenlerin toplamı olarak bulunur. Çoğu zaman yakıt içindeki azottan gelen 0,8 N terimi ihmal edilir. Pratikte tam yanma belirli bir n hava fazlalık katsayısı ile gerçekleştirilebildiğinden, hava fazlalığı ile tam yanma halinde  $(n - 1) V_{h_0}$  kadar fazla hava hiç reaksiyona girmeden doğrudan yanma ürünlerine geçer. Bu durumda gerçek özgül duman miktarı için

$$V_g = V_{go} + (n-1) V_{h_0} \quad (38)$$

bağıntısının yazılabileceği açıktır.

Yukarıda verilen bağılantılarda yanma ürünleri su buharı da içerdiğinden  $V_g$  'Özgül yaş duman miktarı' adını alır. Soğukta yapılan gaz analizi gibi bazı hallerde yanma gazlarındaki su buharı yoğunlaşmıştır. Su buharı içermeyen bu gazlara 'Kuru duman' denir.  $V_{gkr}$  ile gösterilecek olan özgül kuru duman miktarı

$$V_{gkr} = V_g - V_{H_2O} = V_g - 1,244 (W + 9H) \quad (39)$$

bağıntısı ile belirlenir.

Yukarıda yanma ürünleri miktarlarının bulunmasında havanın getirdiği nem ihmal edilmiştir. Daha kesin bir hesap yapılmak istendiğinde çevre havasının nemi de göz önünde tutulmalıdır.

• **Yakma havası ve yanma ürünleri miktarları için deneysel bağıntılar**

Buraya kadar verilen bağıntılar yardımı ile yanma ürünleri ve yakma havasının hesaplanabilmesi için yakacağın elemansel analizinin bilinmesine gerek vardır. Yakacağın ısı değeri bilinir ise yaklaşık bir hesap yapabilmek için deneylerden elde edilmiş aşağıdaki ifadeler kullanılabilir

Katı yakacakları için

$$V_{ho} = 0,241 \frac{H_u}{1\ 000} + 0,5 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (40)$$

$$V_{go} = 0,227 \frac{H_u}{1\ 000} + 1,375 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (41)$$

$H_u$  - Yakacağın alt ısı değeri (kJ /kg) (Tablo 11, Eşitlik 31)

Ayrıca **Şekil 19**'da kömürlerin yakılması için gerekli hava miktarı, **Şekil 20**'de kömürlerin yanması sonucu ortaya çıkan gerçek özgül duman miktarı diyagramları verilmiştir.

Şimdi, Sayfa 68'teki örneği (Tuncer Özkan) tekrar ele alalım:

Taşkömürünün kütlesele (elemansel) analizi:

C: 0,7854

H: 0,0528

O: 0,0453

N: 0,014

S: 0,012

W: - (Nem)

A: 0,0905 (Kül )

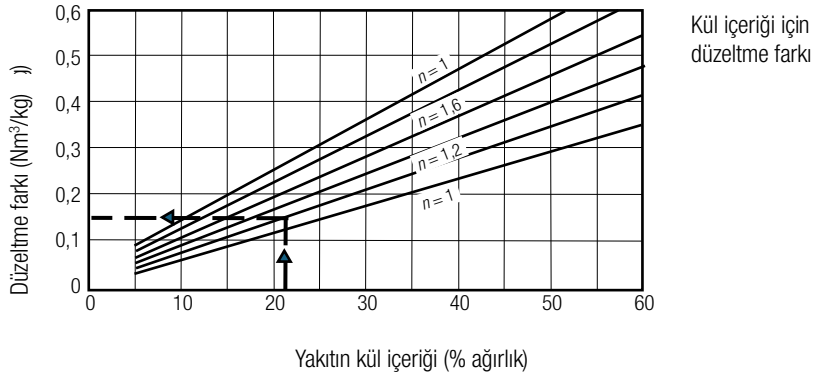
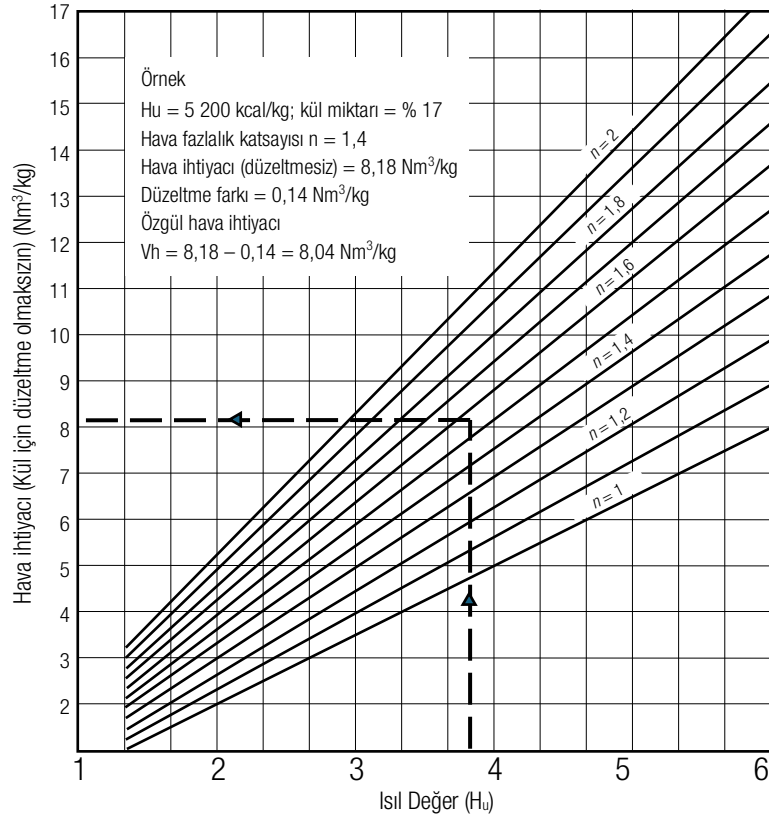
olduğuna göre:

Üst ısı değeri,

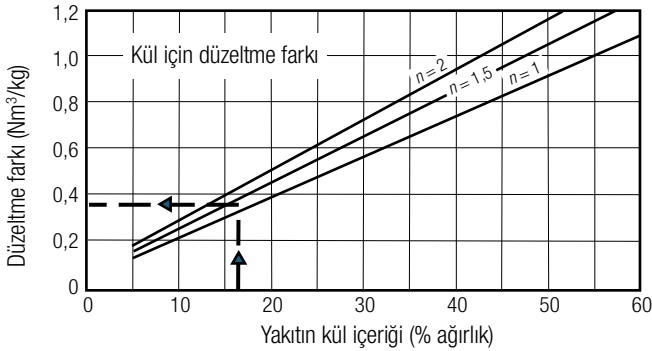
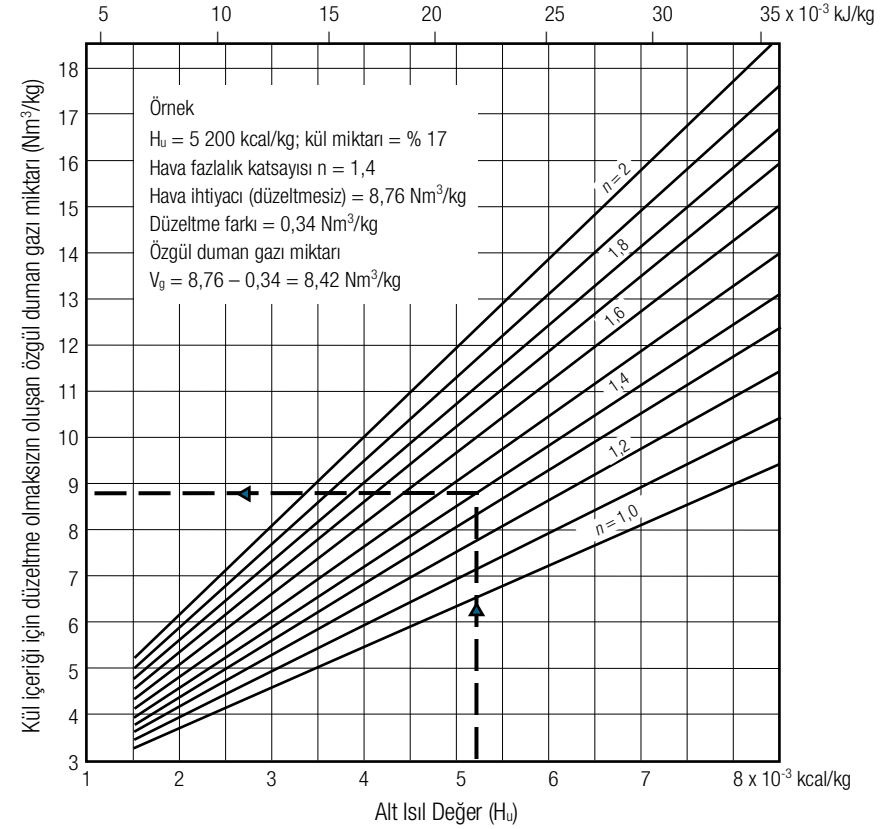
$$H_o = 32\ 796 \cdot C + 141\ 886 (H - O/8) + 9\ 300 \cdot S \quad (\text{Eşitlik 30})$$

$$H_o = 32\ 796 \cdot 0,7854 + 141\ 886 (0,0528 - 0,0453/8) + 9\ 300 \cdot 0,012$$

$$H_o = 32\ 558 \text{ kJ/kg}$$



**Şekil 19.** Kömürlerin yakma havası ihtiyacı  
[ONAT v. d. (2007), S. ] (1 kcal = 4,18 kJ)



**Şekil 20.** Kömürlerden oluşan özgül duman gazı miktarı  
[ONAT v.d. (2007), S. ] (1 kcal = 4,18 kJ)

Alt ısııl değer,

$$H_u = H_o - 2440 (W + 9 H)$$

(Eşitlik 31)

$$H_u = 32558 - 2440 (9 \cdot 0,0528)$$

$$H_u = 31398 \text{ kJ/kg}$$

Teorik özgül hava miktarı,

$$V_{ho} = 8,89 C + 26,7 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 3,34 \cdot S \quad (\text{Eşitlik 32})$$

$$V_{ho} = 8,89 \cdot 0,7854 + 26,7 (0,0528 - 0,0453/8) + 3,34 \cdot 0,012$$

$$V_{ho} = 8,28 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

veya yaklaşık olarak

$$V_{ho} = 0,241 \left( \frac{H_u}{1\,000} \right) + 0,5 \quad (\text{Eşitlik 40})$$

$$V_{ho} = 0,241 \left( \frac{31\,398}{1\,000} \right) + 0,5$$

$$V_{ho} = 8,1 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

elde edilir.

Sayfa 69'de, hava/yakıt oranını

$$HY = 10,71 \text{ kg hava/kg yakıt}$$

bulmuştuk. Normal şartlarda havanın yoğunluğunu

$$\rho \cong 1,3 \text{ kg hava/Nm}^3$$

olarak kabul edersek,

$$HY = \frac{10,71 \text{ kg hava/kg yakıt}}{1,3 \text{ kg hava/Nm}^3}$$

$$HY = 8,23 \text{ Nm}^3/\text{kg kömür}$$

Görüldüğü gibi aynı değerler elde edilir.

Toplam teorik özgül duman miktarı

$$V_{go} = 8,89 C + 21,1(H - O/8) + 3,34 S + 0,8N + 1,244 (W + 9H) \quad (\text{Eşitlik 37})$$

$$V_{go} = 8,89 \cdot 0,7854 + 21,1 (0,0528 - 0,0453/8) + 3,34 \cdot 0,012 + 0,8 \cdot 0,014 + 1,244 (9 \cdot 0,0528)$$

$$V_{go} \cong 8,62 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

veya yaklaşık olarak

$$V_{go} = 0,227 \frac{H_u}{1\,000} + 1,375 \quad (\text{Eşitlik 41})$$

$$V_{go} = 0,227 \frac{31\,398}{1\,000} + 1,375$$

$$V_{go} = 8,5 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

elde edilir.

Hesaplanan bu değerler,

$$H_u = 31\,398 \text{ kJ/kg} = \frac{31\,398}{4,18} \text{ kcal/kg}$$

$$H_u = 7\,511 \text{ kcal/kg}$$

$$n = 1$$

ile **Şekil 19** ve **Şekil 20**'deki diyagramlardan da okunabilir.

Sayfa 68'teki örnek probleme devam edelim:

100 kg kömürü ( $m_{\text{kömür}}$ ) yakmak (tam yanma) için 1 071 kg havaya ( $m_{\text{hava}}$ ) ihtiyaç olduğunu hesapladık (Sayfa 69). Ayrıca 100 kg kömüre karşılık gelen yanma ürünlerinin kütsel değerlerini de elde ettik. Şimdiyse yanma sonucu oluşan bu gaz ürünlerinin hacimsel değerlerini bulmaya çalışalım.

Standart sıcaklık ve basınçta (0 °C sıcaklık, 1 atm basınç) bazı gazların yoğunlukları [AR-GE VE TASARIM, Teknoloji, İnovasyon, Mühendislik]

$$\text{Hava } 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ } 1,977 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{H}_2 \text{ } 0,0899 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ } 1,2506 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ } 1,4290 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{SO}_2 \text{ } 2,926 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O } 0,804 \text{ (Su buharı)}$$

$$(V_{\text{CO}_2})_{\text{hesap}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}} = \frac{2,8798 \text{ kg/1 kg kömür}}{1,977 \text{ kg/Nm}^3}$$

$$(V_{\text{CO}_2})_{\text{hesap}} = 1,45 \text{ Nm}^3/\text{1 kg kömür}$$

veya

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,4}{12} \text{ C} \quad (\text{Eşitlik 33})$$

$$V_{\text{CO}_2} = 22,4/12 \cdot 0,7854$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1,46 \text{ Nm}^3/\text{1 kg kömür}$$

aynı değer çıkar.

$$(V_{\text{SO}_2})_{\text{hesap}} = \frac{m_{\text{SO}_2}}{\rho_{\text{SO}_2}} = \frac{0,024 \text{ kg/1 kg kömür}}{2,926 \text{ kg Nm}^3}$$

$$(V_{\text{SO}_2})_{\text{hesap}} = 0,082 \text{ Nm}^3/\text{1 kg kömür}$$

veya

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} \text{ S} \quad (\text{Eşitlik 34})$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} 0,012$$

$V_{SO_2} = 0,084 \text{ Nm}^3/\text{1 kg kömür}$   
aynı değer bulunur.

$$(V_{H_2O})_{\text{hesap}} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \frac{0,4752 \text{ kg/1 kg kömür}}{0,804 \text{ kg/Nm}^3}$$

$$(V_{H_2O})_{\text{hesap}} = 0,59 \text{ Nm}^3/\text{1 kg kömür}$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} H + \frac{22,4}{18} W \quad (\text{Eşitlik 35})$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,0528$$

$$V_{H_2O} = 0,59 \text{ Nm}^3/\text{1 kg kömür}$$

aynı değer.

$$(V_{N_2})_{\text{hesap}} = \frac{m_{N_2}}{\rho_{N_2}} = \frac{8,1844 \text{ kg/1 kg kömür}}{1,2506 \text{ kg/Nm}^3}$$

$$(V_{N_2})_{\text{hesap}} = 6,544 \text{ Nm}^3/\text{1 kg kömür}$$

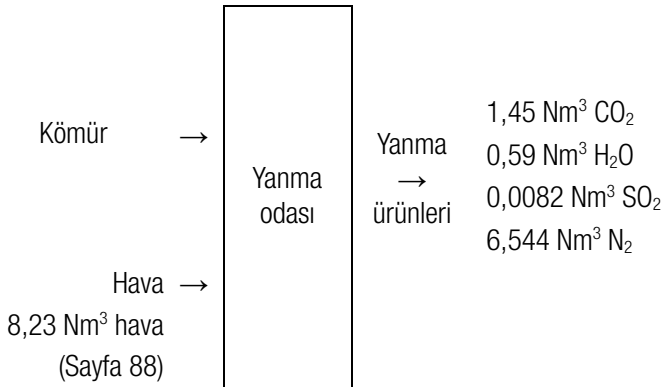
$$V_{N_2} = 0,79 V_{\text{h}_0} + \frac{22,4}{28} N \quad (\text{Eşitlik 36})$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot 8,28 + \frac{22,4}{28} 0,014$$

$$V_{N_2} = 6,55 \text{ Nm}^3/\text{1 kg kömür}$$

aynı sonuç elde edilir.

Şimdi, yanma sonucu oluşan gaz ürünlerinin 1 kg kömüre karşılık gelen hesapladığımız hacimsel değerlerini toplu olarak **Şekil 21**'de verelim.



**Şekil 21.** 1 kg kömüre karşılık gelen bileşenlerin hacimsel analizi

Santralde saatte 452 ton Taşkömürü kullanıldığına göre

$$1,45 \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2/\text{kg kömür} \cdot 452\,000 \text{ kg kömür/h} \\ 655\,400 \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2/\text{h}$$

$$0,59 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{kg kömür} \cdot 452\,000 \text{ kg kömür/h} \\ 266\,680 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{h}$$

$$0,0082 \text{ Nm}^3 \text{ SO}_2/\text{kg kömür} \cdot 452\,000 \text{ kg kömür/h} \\ 3\,706 \text{ Nm}^3 \text{ SO}_2/\text{h}$$

$$6,544 \text{ Nm}^3 \text{ N}_2 / \text{kg kömür} \cdot 452\,000 \text{ kg kömür/h} \\ 2\,957\,888 \text{ Nm}^3 \text{ N}_2/\text{h}$$

Yanma odasına girecek olan hava miktarı ise

$$8,23 \text{ Nm}^3 \text{ hava}/\text{kg kömür} \cdot 452.000 \text{ kg kömür/h} \\ 3\,719\,960 \text{ Nm}^3 \text{ hava/h}$$

bulunur.



## IX. Teorik hava ihtiyacı

[HEPER (2001), S. ]

Eldeki karbonun tümünün CO<sub>2</sub> haline geçebilmesi için yeterli miktarda hava sağlanmalıdır. Yakıtın elemanter analizi, yakıt bünyesindeki karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen (azot), kükürt, nem (su) ve kül miktarlarını ortaya koyar. Bu miktarların aralarında ağırlık yüzdesi cinsinden aşağıdaki bağıntı vardır:

$$c + h + o + n + s + w + a = 1 \text{ (Eşitlik 29 ile aynı)}$$

c: Karbon yüzdesi

h: Hidrojen yüzdesi

o: Oksijen yüzdesi

n: Nitrojen (azot) yüzdesi

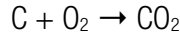
s: Kükürt yüzdesi

w: Nem (su) yüzdesi

a: Kül yüzdesi

Bunlardan karbon, hidrojen ve kükürt yanıcı elementlerdir. Şimdi bu yanıcı elementler için gerekli olan oksijen miktarını hesap edelim. Ancak bu arada 1 kmol gazın hacminin 22,4 Nm<sup>3</sup> olduğunu hatırlatmakta yarar vardır (bkz. Sayfa 84).

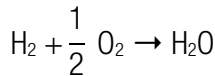
Karbon:



$$12 \text{ kg C} + 32 \text{ kg O}_2 = 44 \text{ kg CO}_2 = 22,4 \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2 \quad (42)$$

$$\text{Oksijen ihtiyacı: } \frac{32}{12} \text{ kg O}_2 / \text{kg C}$$

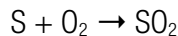
Hidrojen:



$$2 \text{ kg H}_2 + 16 \text{ kg O}_2 = 18 \text{ kg H}_2O = 22,4 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2O \quad (43)$$

$$\text{Oksijen ihtiyacı: } \frac{16}{2} \text{ kg O}_2 / \text{kg C}$$

Kükürt:



$$32 \text{ kg S} + 32 \text{ kg O}_2 = 64 \text{ kg SO}_2 = 22,4 \text{ Nm}^3 \text{ SO}_2 \quad (44)$$

$$\text{Oksijen ihtiyacı: } \frac{32}{32} \text{ kg O}_2 / \text{kg C}$$

Yakıtın tümüyle yanabilmesi için gerekli olan minimum oksijen miktarı  $O_{\min}$ , bu üç yanıcı element için gerekli oksijen miktarlarının toplamına eşittir. Ancak, yakıtın kendi bünyesindeki oksijen miktarını bu toplamdan çıkarmak gerekir. Çünkü yakıtın bünyesindeki oksijen de yanma sırasında kullanılmaktadır.

$$O_{\min} = \frac{32}{12} \text{ kg } O_2 / \text{ kg C} \cdot c \text{ kg C/kg yakıt} + \frac{16}{2} \text{ kg } O_2 / \text{ kg H}_2 \cdot h \text{ kg H}_2 / \text{ kg yakıt} + \frac{32}{32} \text{ kg } O_2 / \text{ kg S} \cdot s \text{ kg S / kg yakıt} - o \text{ kg } O_2 / \text{ kg yakıt} \quad (45)$$

$O_{\min}$ , daha basit olarak basit bir şekilde şöyle yazılabilir:

$$O_{\min} = \frac{32}{12} \cdot c \cdot \sigma \text{ kg } O_2 / \text{ kg yakıt} \quad (46)$$

$\sigma$ : Mollier sayısı

Denklemler 45 ve 46 karşılaştırılırsa  $\sigma$ ,

$$\sigma = \frac{\frac{32}{12} c + \frac{16}{2} h + \frac{32}{32} s - o}{\frac{32}{12} c} = \left( 1 + 3 \frac{h}{c} + \frac{3}{8} \frac{s}{c} - \frac{3o}{8c} \right) \quad (47)$$

şeklinde yazılabilir.

$\sigma$ 'nın değerleri,

Karbon için  $\sigma = 1$

Katı yakıtlar için  $\sigma = 1,1 - 1,2$

Sıvı yakıtlar ve gazlar için  $\sigma = 1,2 - 1,5$

1 kmol  $O_2 = 32 \text{ kg } O_2 = 22,4 \text{ Nm}^3 O_2$  olduğunu hatırlayarak  $O_{\min}$

$$O_{\min} = \frac{32}{12} c \sigma \text{ kg } O_2 / \text{ kg yakıt} \cdot \frac{22,4 \text{ Nm}^3 O_2}{32 \text{ kg } O_2}$$

$$O_{\min} = \frac{22,4}{12} c \sigma \text{ Nm}^3 O_2 / \text{ kg yakıt} \quad (48)$$

şeklinde yazılabilir.

Hava hacminin ancak % 21'i oksijendir. Dolayısıyla tam bir yanma için gerekli olan teorik hava ihtiyacı

$$H_{\min} = O_{\min} \frac{1 \text{ Nm}^3 \text{ hava}}{0,21 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2} = \frac{22,4}{12} c \sigma \frac{\text{Nm}^3 \text{ O}_2}{\text{kg yakıt}} \cdot \frac{1 \text{ Nm}^3 \text{ hava}}{0,21 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2}$$

$$H_{\min} = 8,89 \cdot c \cdot \sigma \text{ Nm}^3 \text{ hava/kg yakıt} \quad (49)$$

Katı yakıtlar için bu formül şöyle ifade edilebilir:

$$H_{\min} \cong 10 \cdot c \cdot \sigma \text{ Nm}^3 \text{ hava/kg yakıt} \quad (50)$$

Sayfa 68'teki örnekte karbon yüzdesi

$$c = 0,7854$$

alınırsa, tam bir yanma için gerekli olan teorik hava ihtiyacı,

$$H_{\min} = 10 \cdot c \text{ Nm}^3 \text{ hava / kg yakıt} \quad (\text{Eşitlik 50})$$

$$H_{\min} = 10 \cdot 0,7854$$

$$H_{\min} \cong 7,9 \text{ Nm}^3 \text{ hava / kg yakıt}$$

bulunur.

Daha önce yaptığımız hesaplarda, teorik özgül hava miktarı

$$V_{ho} = 8,3 \text{ Nm}^3 \text{ hava / kg yakıt (Sayfa 88)}$$

Hava yakıt oranı,

$$HY = 8,23 \text{ Nm}^3 \text{ hava / kg yakıt (Sayfa 88)}$$

Görüldüğü gibi teorik hava ihtiyacı değerleri birbirine çok yakındır.

• **Baca gazı miktarı** [HEPER (2001), S. ]

Kazanların ocaklarında ya da yanma odalarında yanma sonucu meydana gelen gazlara 'baca gazları' deniyordu. Yanma sırasında C, H<sub>2</sub> ve S oksitlenerek CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ve SO<sub>2</sub>'ye dönüşür. Yakıt bünyesindeki nem ise gaz halinde H<sub>2</sub>O olur, yani buharlaşır. (42), (43) ve (44) nolu yanma denklemlerinden her bir element için baca gazı miktarını bulalım:

$$c \text{ kg C/kg yakıt} \cdot 22,4 \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2/12 \text{ kg C}$$

$$= 22,4/12 \cdot c \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2/\text{kg yakıt} \quad (51)$$

$$h \text{ kg H}_2/\text{kg yakıt} \cdot 22,4 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O}/2 \text{ kg H}_2$$

$$= 22,4/2 \cdot h \cdot \text{Nm}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{kg yakıt} \quad (52)$$

$$s \text{ kg S/ kg yakıt} \cdot 22,4 \text{ Nm}^3 \text{ SO}_2/32 \text{ kg S}$$

$$= 22,4/32 s \text{ Nm}^3 \text{ SO}_2/\text{kg yakıt} \quad (53)$$

$$w \cdot \text{kg H}_2\text{O / kg yakıt} \cdot 22,4 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O}/18 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$= 22,4/18 \cdot w \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{kg yakıt} \quad (54)$$

elde edilir.

Yakıttaki kül miktarı  $\alpha$ , katı atık madde olarak kalır. Oksijen miktarı  $o$ , minimum oksijen miktarı  $O_{\min}$ 'un elde edilmesi sırasında zaten hesaba katılmıştı. Yakıttaki

nitrojen miktarı da yok sayılırsa, yukarıdaki denklemlerden baca gazı miktarı kolayca bulunabilir:

$$V_b = \left( \frac{22,4}{12} \cdot c + \frac{22,4}{2} \cdot h + \frac{22,4}{32} \cdot s + \frac{22,4}{18} \cdot w \right) \text{Nm}^3/\text{kg yakıt} + (H - O_{\min})$$

$O_{\min}$  (Eşitlik 45) yerine konursa

$$\begin{aligned} O_{\min} = & \frac{32}{12} \text{ kg } O_2/\text{kg yakıt} \cdot c + \\ & \frac{16}{2} \text{ kg } O_2/\text{kg yakıt} \cdot h + \\ & \frac{32}{32} \text{ kg } O_2/\text{kg yakıt} \cdot s - \\ & 0 \text{ kg } O_2/\text{kg yakıt} \end{aligned}$$

1 kmol  $O_2 = 32 \text{ kg } O_2 = 22,4 \text{ Nm}^3$  olduğuna göre,

$$\begin{aligned} O_{\min} = & \frac{22,4}{12} \text{ Nm}^3 O_2/\text{kg yakıt} \cdot c + \\ & \frac{22,4}{4} \text{ Nm}^3 O_2/\text{kg yakıt} \cdot h + \\ & \frac{22,4}{32} \text{ Nm}^3 O_2/\text{kg yakıt} \cdot s - \\ & \frac{22,4}{32} \text{ Nm}^3 O_2/\text{kg yakıt} \cdot o \end{aligned}$$

şeklinde yazılırsa,

$$\begin{aligned} V_b = & H + \frac{22,4}{12} \left[ \left( c + 6 \cdot h + \frac{12}{32} \cdot s + \frac{12}{32} \cdot w \right) - \right. \\ & \left. \frac{22,4}{12} \left( c + 3h + \frac{3}{8} \cdot s - \frac{3}{8} \cdot o \right) \right] \text{Nm}^3/\text{kg yakıt} \\ V_b = & H + \frac{22,4}{12} \left[ 3h + \left( \frac{12}{32} - \frac{3}{8} \right) s + \frac{12}{18} w \right. \\ & \left. + \frac{3}{8} \cdot o \right] \text{Nm}^3/\text{kg yakıt} \\ V_b = & H + 1,867 \left( 3h + \frac{2}{3} \cdot w + \frac{3}{8} \cdot o \right) \text{Nm}^3/\text{kg yakıt} \end{aligned}$$

Görüldüğü gibi bu denklemde, gerekli hava miktarı da dahil edilmiştir.

Yanma sırasında artan hacim miktarı

$$\Delta V = 1,867 \left( 3h + \frac{2}{3} \cdot w + \frac{2}{3} \cdot o \right) \text{Nm}^3/\text{kg yakıt} \quad (55)$$

dolayısıyla

$$V_b = H + \Delta \quad (56)$$

yazılabilir.

Katı yakıtlar için baca gazı miktarı hava oranına bağlı olarak

$$V_b = (13... 20) \cdot c \text{ Nm}^3/\text{kg yakıt} \quad (57)$$

değerleri dolaylarındadır.

Şimdi Sayfa 68'teki örneği yeniden ele alalım. Kullanılan taşkömürünün kütlesele analizi

% 78,54 C, % 5,28 H<sub>2</sub>, % 4,53 O<sub>2</sub>, % 1,4 N<sub>2</sub>, % 1,2 S ve % 9,05 kül olup nem yüzdesi yoktur (w = 0).

Yapılan hesapların özeti:

Hava yakıt oranı, yanma ürünleri

|            |                                |            |
|------------|--------------------------------|------------|
| HY = 10,71 | kg hava / kg yakıt             |            |
| 2,8798     | kg CO <sub>2</sub> / kg yakıt  |            |
| 0,4752     | kg H <sub>2</sub> O / kg yakıt | (Sayfa 69) |
| 0,024      | kg SO <sub>2</sub> / kg yakıt  |            |
| 8,1844     | kg N <sub>2</sub> / kg yakıt   |            |

veya

|           |                                             |            |
|-----------|---------------------------------------------|------------|
| HY = 8,23 | Nm <sup>3</sup> hava/ kg yakıt              | (Sayfa 88) |
| 1,45      | Nm <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> / kg yakıt  | (Sayfa 89) |
| 0,0082    | Nm <sup>3</sup> SO <sub>2</sub> / kg yakıt  |            |
| 0,59      | Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O / kg yakıt | (Sayfa 90) |
| 6,544     | Nm <sup>3</sup> N <sub>2</sub> / kg yakıt   |            |

veya

$$HY = (H_{\min}) = 7,9 \text{ Nm}^3 \text{ hava/kg yakıt}$$

$$- \frac{22,4}{12} \cdot c \cdot \text{Nm}^3 \text{ CO}_2/\text{kg yakıt} \quad (\text{Eşitlik 51})$$

$$\frac{22,4}{12} \cdot 0,7854 = 1,46 \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2/\text{kg yakıt}$$

$$- \frac{22,4}{2} \cdot h \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O/kg yakıt} \quad (\text{Eşitlik 52})$$

$$\frac{22,4}{12} \cdot 0,0528 = 0,59 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O/kg yakıt}$$

$$- \frac{22,4}{2} \cdot s \text{ Nm}^3 \text{ SO}_2/\text{kg yakıt} \quad (\text{Eşitlik 53})$$

$$\frac{22,4}{32} \cdot 0,012 = 0,0084 \text{ Nm}^3 \text{ SO}_2/\text{kg yakıt}$$

$$- 6,544 \text{ Nm}^3 \text{ N}_2/\text{kg yakıt} \quad (\text{Sayfa 90})$$

ile baca gazı miktarı

$$V_b = 1,46 + 0,59 + 0,0084 + 6,544 \text{ Nm}^3/\text{kg yakıt}$$

$$V_b = 8,6 \text{ Nm}^3/\text{kg yakıt}$$

veya,

Yanma sırasında artan hacim miktarı,

$$\Delta V = 1,867 \left( 3 \cdot h + \frac{2}{3} w + \frac{3}{8} o \right) \text{ Nm}^3/\text{kg yakıt} \quad (\text{Eşitlik 55})$$

$$\Delta V = 1,867 \left( 3 \cdot 0,0528 + \frac{3}{8} 0,0453 \right) \text{ Nm}^3/\text{kg yakıt}$$

$$\Delta V = 0,327 \text{ Nm}^3/\text{kg yakıt}$$

Baca gazı miktarı

$$V_b = H + \Delta V \quad (\text{Eşitlik 56})$$

$$H_{\min} = 7,9 \text{ Nm}^3 \text{ hava/kg yakıt} \quad (\text{Sayfa 95})$$

$$V_b = 7,9 + 0,327 \text{ Nm}^3/\text{kg yakıt}$$

$$V_b = 8,23 \text{ Nm}^3/\text{kg yakıt}$$

bulunur.

#### • Duman gazındaki CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O (Su buharı) hacimsel oranları:

Kemal Onat hocam'dan [ONAT v.d. (2007), S. ] alınan, duman gazındaki CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O (su buharı) hacimsel oranlarını veren diagram **Şekil 22**'de gösterilmiştir.

Bir örnek verelim:

$$H_u = 7\,511 \text{ kcal/kg} \quad (\text{Sayfa 89})$$

$$n = 1$$

ile hesaplanan değerler:

$$1,45 \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2/\text{kg kömür} \quad (\text{Sayfa 98})$$

$$0,59 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{kg kömür}$$

$$8,62 \text{ Nm}^3 \text{ duman gazı/kg kömür} \quad (\text{Sayfa 88})$$

Buna göre duman gazındaki

$$\text{CO}_2 \text{ yüzdesi} \rightarrow 1,45 / 8,62 \cong \% 17$$

$$\text{H}_2\text{O yüzdesi} \rightarrow 0,59 / 8,62 \cong \% 6,84$$

dır.

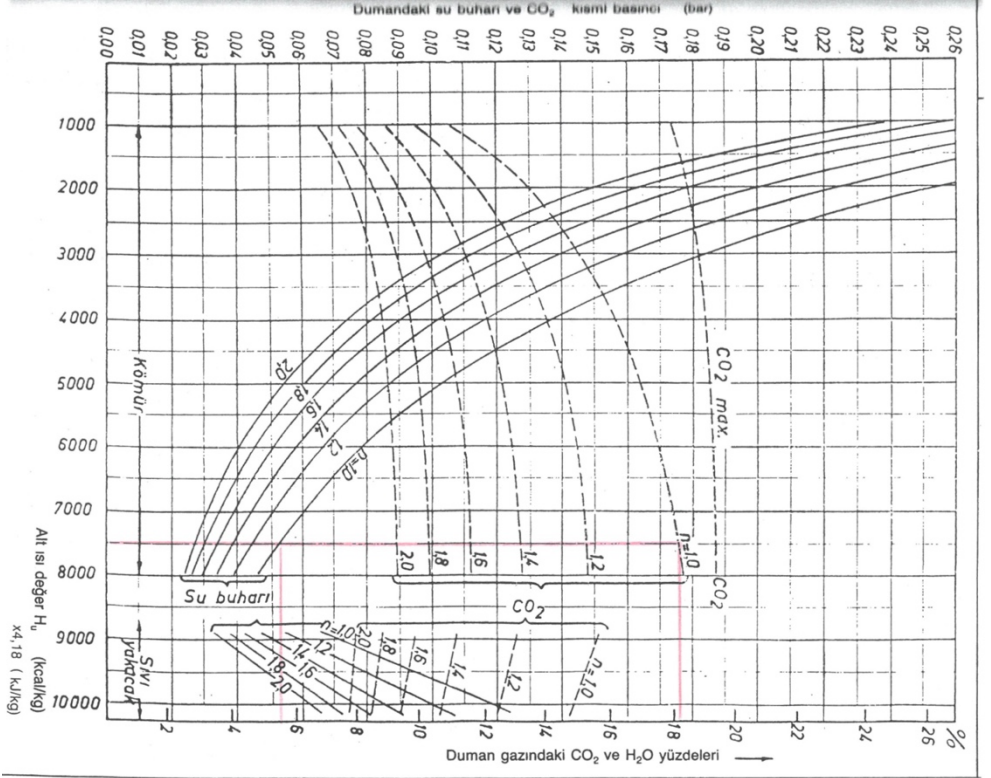
**Şekil 22**'deki diyagram'dan da

CO<sub>2</sub> yüzdesi → % 18'e yakın

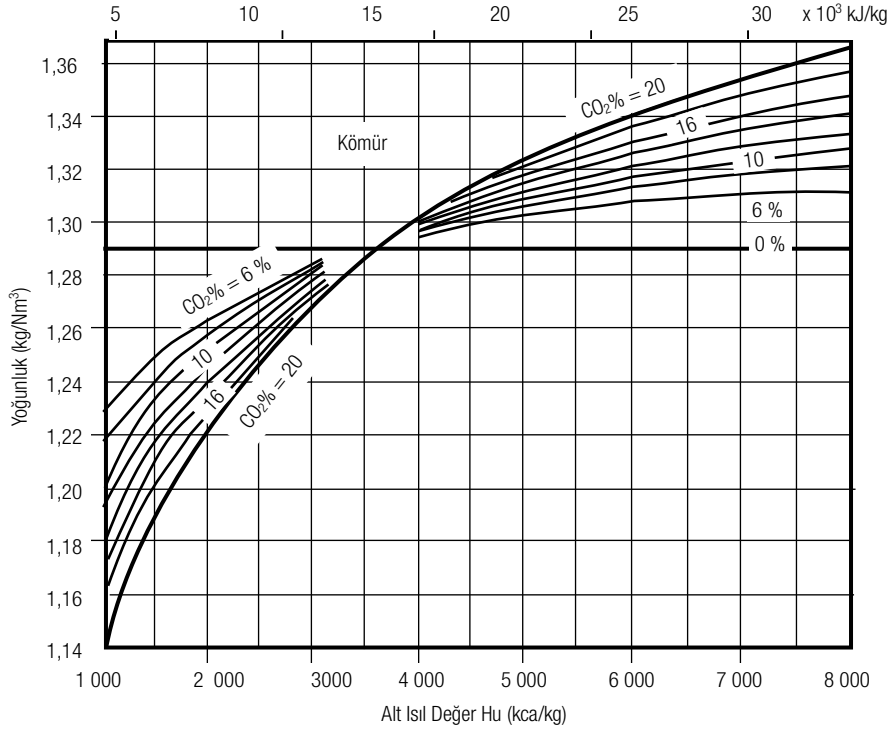
H<sub>2</sub>O yüzdesi → % 6'ya yakın

okunabilir.

Yine Kemal Onat Hocam'dan [ONAT v.d. (2007), S. ] alınan duman gazı yoğunluğu da **Şekil 23**'teki diyagram'dan okunabilir.



**Şekil 22.** Duman gazındaki CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O (Su buharı) hacimsel oranları (Kömür ve sıvı yakacaklar için  
[ONAT v. d. (2007), S. ]



**Şekil 23.** Kömür için duman gazının yoğunluğu  
[ONAT v.d. (2007), S. ]

Bir örnek verelim,

$$H_u = 7\,511 \text{ kcal/kg}$$

(Sayfa 89)

$$\text{CO}_2 \text{ yüzdesi: } \% 17$$

(Sayfa 98)

Bu iki değer ile duman gazının yoğunluğu

$$\rho \cong 1,35 \text{ kg/Nm}^3 \text{ duman gazı}$$

(Şekil 23)

Buna göre yanma ürünü

$$m_{\text{ürün}} = 1156,34 \text{ kg yanma ürünü/kg kömür}$$

(Sayfa 69)

olduğuna göre, hacimsel olarak duman gazı

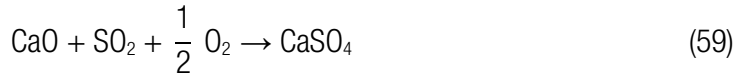
$$\begin{aligned} & \frac{1156,34 \text{ kg yanma ürünü}}{1,35 \text{ kg duman gazı/Nm}^3 \text{ duman gazı}} \\ &= 8,56 \text{ Nm}^3 \text{ duman gazı/ kg kömür} \end{aligned}$$

olarak bulunur ki bu değer Sayfa 88'te  $8,62 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  olarak hesaplanmıştı (çok yakın).

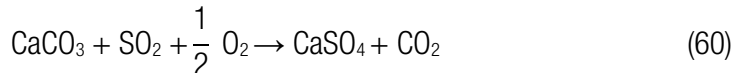
## X. Akışkan yataklı kazanlar:

Sayfa 79-80'de belirtildiği gibi, bacadan atılan gaz içerisindeki kükürt oksitler, asit yağmuru şeklinde çevre bitki örtüsüne ve sulanmaları halinde insan sağlığına son derece zararlıdır. Onun için kükürdü yüksek kömürlerin, akışkanlaştırılmış yataklarda kalker (kalsiyum oksit) ile birlikte karıştırılarak yakılması halinde bir kısım kükürt oksitler, kalker tarafından kimyasal yolla yatakta tutulabilmektedir (ÇED raporuna göre 25,5 ton/saat kalker kullanılması öngörülmektedir, bkz. Sayfa 7).

O halde akışkan yataklı kazanlar için kısa bir bilgi verelim [HEPER (2001), S. ]: Bu tür kazanlarda yakma havası, kazanın alt tarafındaki nozullardan geçerek ocak bölümüne girer ve kömür ile kireç taşından oluşan yatak malzemesini havalandırır. Kömür ve kireç taşı genelde kazana girmeden önce karıştırılır, öğütülür ve pnömatis olarak yatak beslenir. Gerekli olan hava debisi ile öyle bir noktaya ulaşılır ki hava'nın yatak malzemesine uyguladığı kuvvetler ile yatak malzemesi üzerindeki yerçekimi kuvveti birbirlerini dengeler ve yatak malzemesi yukarı doğru akmakta olan havanın içinde asılı kalır. Bu, yatak malzemesinin artık bir akışkan gibi davranmaya başladığı noktadır. 'Akışkanlığın başlama noktası' diye adlandırılır. Ocakta, yani akışkan yatakta kömürün içindeki elementlerden karbon, yakma havası ile reaksiyona girerek; yanarken kükürt de oksijenle reaksiyona girerek SO<sub>2</sub> meydana getirir. Yatağa beslenen kireçtaşı (CaCO<sub>3</sub>) ise SO<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfat (CaSO<sub>4</sub>) oluşturur. Oluşturulan CaSO<sub>4</sub> katı halde kazandan alınarak atılır. Böylece baca gazları da kükürttten büyük çapta arındırılmış olur. Bu arındırma işlemi ile ilgili kimyasal reaksiyonlar şöyledir:



Eşitlik 59'a 'Desülfürizasyon denklemi' denir. Bu iki denklem yerine, olay tek bir denklemle de şöyle ifade edilebilir:



Akışkan yataklı kazanlara devam edelim:

Yanma havası (aynı zamanda akışkanlığı sağlayan hava) daha önce de açıklandığı gibi kazanın alt tarafındaki dağıtım plakasının nozullarından geçerek hem yakıt, kireç taşı ve külden oluşan yatak malzemesini havalandırır; hem de yakıtla reaksiyona girerek yanma olayını gerçekleştirir. Yanma sonucu oluşan

küller baca gazları ile birlikte sürüklenir. Bu uçucu küllerin bir kısmı siklon'da, diğer kısma ise filtrede tutulur. Akışkan yataklı kazanların teknolojisi gereği, yakıt bünyesindeki kükürdün çok büyük bir bölümü kireç taşı ile reaksiyona girerek tutulmuş olduğundan baca gazları içerisinde pek fazla kükürt bulunmaz.

## **XI. ÇED Raporu'na göre yanma ürünleri ile ilgili alınan önlemler:**

[ÇINAR MÜHENDİSLİK (2009), S. ]

### **Baca gazı desülfürizasyon (BGD) sistemi**

Kazana beslenen kömürün içindeki kükürtten kaynaklanan SO<sub>2</sub> yi gidermek üzere, yüksek giderme verimliliği sağlayan Islak Kireç Taşı/Alçı Taşı prosesi kurulacaktır. Kazanda kömürün yanması sırasında oluşan SO<sub>2</sub> gazı, diğer baca gazları ile birlikte kazanı ve elektrostatik filtreleri terk ettikten sonra BGD tesisine girecektir.

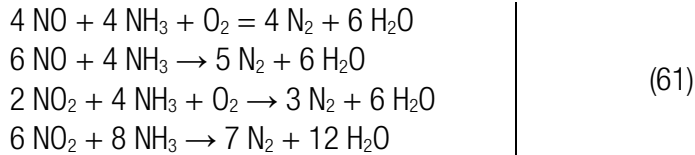
BGD sistemi baca gazı içindeki SO<sub>2</sub> gazını en az % 93 verimli tutarak SO<sub>2</sub> emisyonunun 200 mg/Nm<sup>3</sup> (kuru, % 6 O<sub>2</sub>) değerinin altında olmasını sağlayacak şekilde tasarlanacaktır.

### **• Baca gazı azot oksit giderme (DeNO<sub>x</sub>) sistemi;**

Kazana beslenen kömürün içindeki azot ve yanma havasındaki azot gazının yüksek kazan sıcaklığı nedeniyle oluşturduğu NO<sub>x</sub> bileşiklerinin baca gazından temizlenmesi için DeNO<sub>x</sub> ünitesi kurulacaktır.

DeNO<sub>x</sub> sistemi için selective (seçici) katalitik reaksiyon (SCR) yöntemi uygulanacaktır. DeNO<sub>x</sub> sistemi için kazan çıkışına amonyak enjeksiyonlu selective katalitik reaksiyon (Selektif Katalitik Reaktör Sistemi) monte edilerek baca gazı içindeki NO<sub>x</sub> emisyonunun 200 mg/Nm<sup>3</sup> (kuru, % 6 O<sub>2</sub>) değerinin altında olması sağlanacaktır.

SCR sisteminde NO gazı aşağıdaki reaksiyon zinciri sonucunda azot gazı ve suya dönüşecektir:



Sistemin uygulamadaki verimliliği % 80 civarında gerçekleşmektedir.

[MGS PROJE MÜŞAVİRLİK MÜHENDİSLİK (2014), S. ], nitrojen oksitin (NO<sub>x</sub>) emisyonu limit 150 mg/Nm<sup>3</sup> olarak öngörmüştür.



## **XII. Hava kirliliğini artıran sıcaklık inversiyonu**

[ÖZTÜRK (2017), S. ]

### **• Giriş**

Yeryüzünü kuşatan atmosfer, troposfer diye adlandırılan alt tabakadan ibarettir. Deniz seviyesinden itibaren yüksekliği yaklaşık 10 km dir. Bacadan ve egzozdan atılan kirleticilerin atmosferde dağılmasını etkileyen parametreler, meteorolojik şartlar ile bölgenin topografik özellikleridir.

Günlük yaşamımızı etkileyen tüm meteorolojik olaylar troposferde meydana gelmektedir. Troposferde düşük basınç şartlarında sıcaklık, yükseklikle azalır. Böyle durumlarda yer seviyesindeki hava kütlesi ve bacalardan atılan sıcak gazlar yükselir ve dağılır. Sıcaklık genelde yerden yükseklikle 0,65 °C/100 m oranında azalır. Hava yerden yukarı doğru yükselirken genişler ve soğur. Hava içindeki nem, bulut oluşturmak üzere yoğunlaşır. Bu şartlar altında troposferde hava kirliliği ile ilgili sorun olmaz ve gazlarda çökme meydana gelmez.

Kararsız ve nötr şartlarda, yere yakın hava, üstteki havadan daha hızlı ısınır. Isınan hava soğuk tabakaya doğru yükselir. Sıcaklığın yerden yükseklikle azalması, havayı karıştırarak bacalardan ve egzozlardan atılan kirleticilerin dağılmasına ve seyrelmesine yardımcı olur. Bir parsel hava, çevre havasından daha sıcaksa bu hava atmosferde kendi sıcaklığına, yoğunluğuna ve basıncına ulaşınca kadar yükselir. Böylece kararsız ve nötr şartlarda bacadan ve egzozdan atılan gazların atmosferde yükselmesi ve dağılması hızlı bir şekilde gerçekleşir.

Bu çalışmada, şehirlerde hava kirliliğinin artmasına neden olan inversiyon türleri, oluşumları ve etkileri detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca inversiyon olayının yaşandığı bazı şehirlerde hava kirliliğinden dolayı ölüm olayı üzerinde durulmuştur.

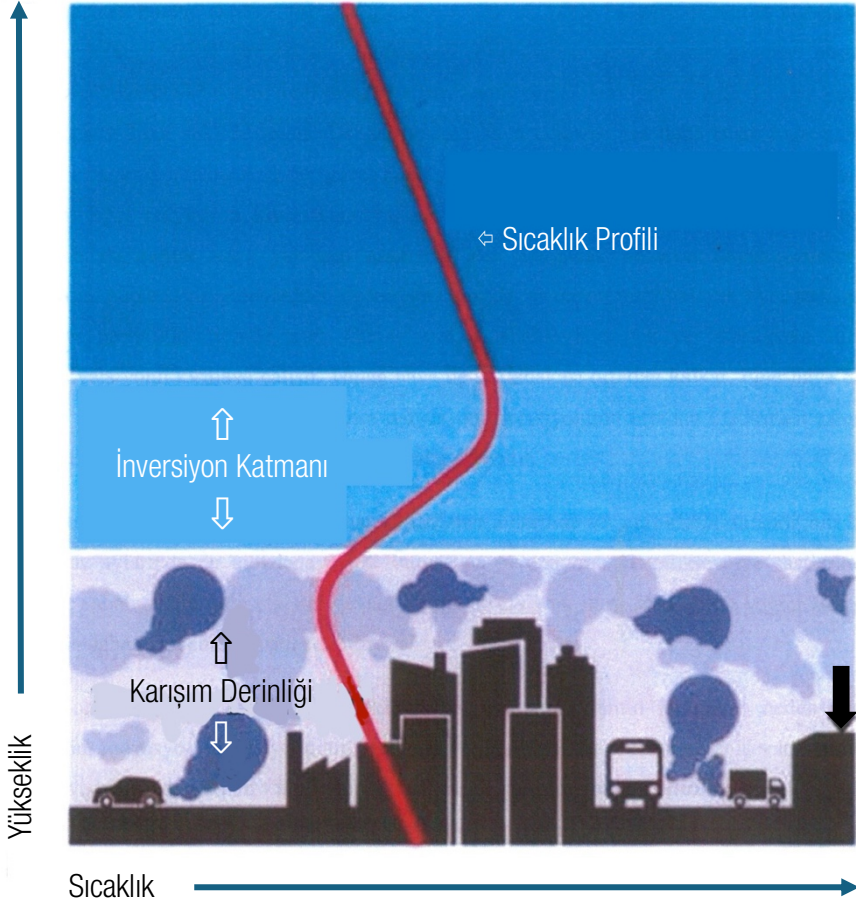
### **• Sıcaklık inversiyonu**

Sıcaklık inversiyonu, yüksek basınç şartlarının hakim olduğu günlerde, açık hava ve sakın rüzgar şartlarında, meydana gelir. Özellikle açık hava (bulutsuz) ve sakın rüzgârlı (hızı düşük) gecelerde yer, infra-kızıl radyasyonu yayarak hızlı şekilde soğur. Böylece yer ve yere yakın yüzey (kuru yer), yukarıdaki yüzeyden daha soğuk olur. Ayrıca kar örtüsü, havayı zeminin yakınında soğuk yapar, açık gökyüzü ve sakın rüzgar şartlarında güneş ışınları, üst atmosferi daha hızlı ısıtır. Bu duruma 'Sıcaklık inversiyonu' denir. Böyle zamanlarda hava kütlesi yukarı doğru değil, daha soğuk ortam olan aşağı doğru hareket etme meylindedir.

İnversiyon, atmosferik şartların en muhtemel sonucunda meydana gelir. Sıcaklık inversiyonu, bacadan veya egzozdan atılan kirleticiler olmasa, genel olarak zararlı sonuçlar oluşturmeyen normal bir meteorolojik olaydır. Sanayi bölgeleri ile şehir içi bölgelerde inversiyon olayı hava kalitesi üzerinde olumsuz etki oluşturabilir. Bacadan ve egzozdan atılan sıcak ve hafif gazlar yükselir, genişler ve sonra soğur. İnversiyonlu günlerde bacadan ve egzozdan atılan sıcak kirleticiler yer seviyesinde tutulur ve birikir. Bu durumda bacalardan ve egzozlardan atılan kirleticiler inversiyon tabakası içinde veya altında tutulur ve birikmeye başlar. Bacadan atılan kirletici miktarı azaltılamıyorsa ve inversiyon süresi de uzuyorsa o bölgede ciddi hava kirliliği problemi yaşanabilir. Çünkü inversiyonlu şartlarda gazların dikey değil düşey hareketi ve birikmesi söz konusudur. Ayrıca soğuk hava, sıcak havadan daha yoğundur. Bu durum yer seviyesindeki havanın ve kirleticilerin yükselmesini ve dağılmasını (seyrelmesini) önler.

İnversiyon tabakasının üzerinde ise sıcaklık, yükseklikle azalmaya devam eder. (Şekil 24). Bulutlarla örtülü havalar termal radyasyonu absorbe eder ve radyasyonun yeryüzüne dönmesine neden olur.

Üç temel inversiyon vardır. Bunlar; Radyasyon inversiyonu, Çökme inversiyonu ve Adveksiyon inversiyonudur.



**Şekil 24.** Şehirlerde yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık değişimi  
[ÖZTÜRK (2017), S. ]

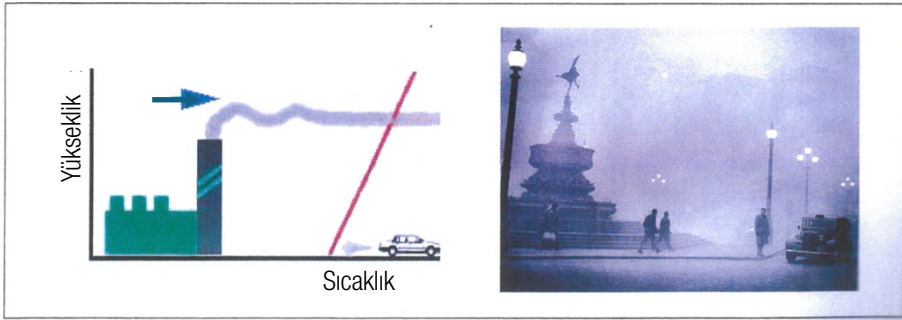
• **Radyasyon inversiyonu.**

Yüksek basınç şartları altında bulutsuz, soğuk ve sakin rüzgârlı günlerde radyasyon inversiyonu yere yakın gerçekleşir. Radyasyon inversiyonu genel olarak geceleri başlar. Bulutsuz gecelerde yer ısısını hızlı şekilde yayar. Sonuç olarak hem yer ve hem de yere yakın hava tabakası hızlı şekilde soğur. Üst tabakadaki hava tabakası ise daha sıcak hale geçer. Böylece sabahın erken saatlerinde (gece) radyasyon inversiyonu oluşur. Bu durumda yer, daha soğuktur. Eğer radyasyon inversiyonu bir vadide veya havzada meydana gelirse, vadinin kenarlarındaki soğuk hava yamacın aşağısına akar ve sıcak havanın altına yerleşerek inversiyonu güçlendirir. Radyasyon inversiyonu havada sis oluşumunu başlatır, aynı zamanda gazları ve partikülleri içinde tutar. Güneş ışınları

sabahleyin soğuk yer tabakasına nüfuz ederek inversiyonu kırmaya çalışır. Isınan hava ile sis tabakası ortadan kalkar. Eğer hava çok sakın ve aşırı nemli ise güneş ışınlarının radyasyon inversiyonunu ortadan kaldırması zaman alabilir. Bu süre birkaç saatten birkaç güne kadar sürebilir.

Radyasyon inversiyonu sonbahar ve ilkbahar aylarında sık aralıklarla olmakla birlikte kış ve yaz aylarında da meydana gelir. Radyasyon inversiyonu genellikle gece saatlerinde başlar ve sabah saatlerinde etkisini devam ettirir. İnversiyon, hava kirliliğinin yoğun olduğu şehirlerde daha uzun süre devam edebilir.

Londra'da 1952 yılında gerçekleşen ve binlerce kişinin ölümüne neden olan inversiyon, radyasyon inversiyonudur. Yer seviyesinde ciddi sis oluşmuştu. Yüksek basınçlı, sakın havada bacadan atılan kirleticiler sis tabakası içinde tutulmuş ve birikmişti. Radyasyon inversiyonu 5 Aralık'ta başlamış, 10 Aralık'a kadar devam etmişti. Güneş ışınları sis tabakasını ısıtıp ortadan kaldıramamıştı. İngiltere'de yaşanan radyasyon inversiyonu görüntüleri **Şekil 25**'de verilmiştir.



**Şekil 25.** Radyasyon inversiyonu  
[ÖZTÜRK (2017), S. ]

#### • Çökme inversiyonu

Dağ eteği bölgeleri ile vadilerde çökme inversiyonu sık aralıklarla meydana gelmektedir. Yüksek basınç şartları altında açık havalar (bulutsuz havalarda) ile sakın rüzgarlı hallerde, bir tepe, dağ bölgesi, engel gibi yüksek bölge üzerinden dağ eteği veya vadi üzerine gelen soğuk hava tabakası yüksek bölgeden aşağı doğru inerken sıkışır. Sıkışan hava kütlesi ısınır. Böylece yerden belli bir yükseklikte sıcak hava tabakası oluşur. Yer seviyesindeki hava kütlesi inversiyon tabakasına kadar yükselir. İnversiyon tabakası bir kapak gibi hareket ederek hava kütesinin ve kirleticilerin daha fazla yükselmesine ve dağılmasına engel olur.

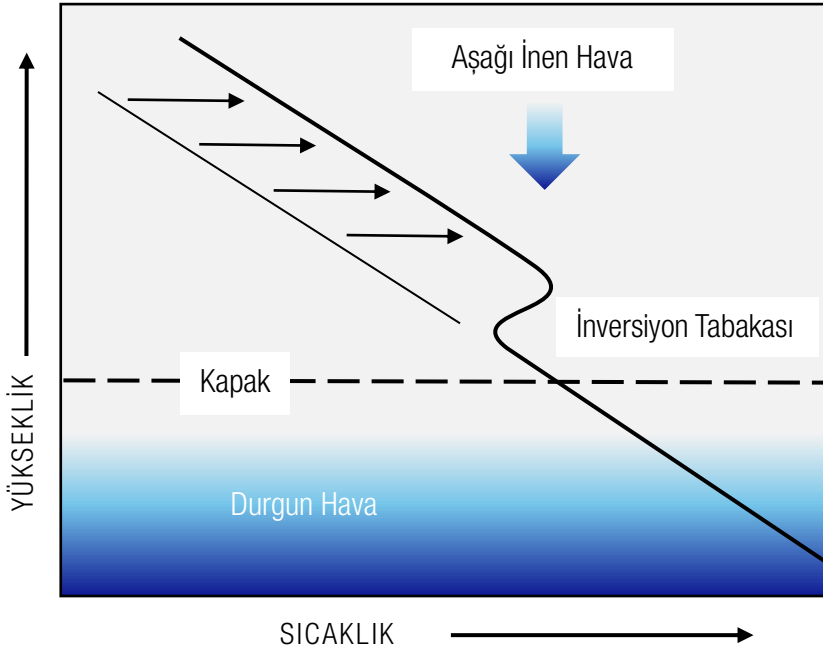
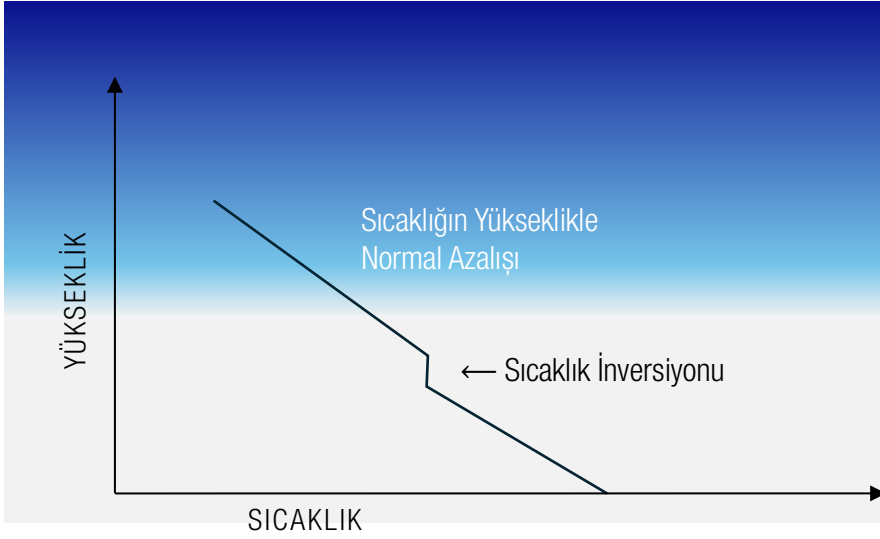
Los Angeles'de bu tür inversiyon sık aralıklarla meydana gelir. Doğudan gelen sıcak çöl havası dağ üzerinden şehir üzerine eser. Pasifikten (denizden) gelen soğuk hava ise yere yakın yere yerleşir. Böylece yüksekte gelen sıcak hava tabakası denizden gelen soğuk hava tabakası üzerine yerleşerek bir tabakalaşma oluşturur

Çökme inversiyonu, radyasyon inversiyonuna göre daha etkilidir. Etkisi ve kalma süresi daha uzundur. Bu tür inversiyonlar genel olarak ilkbahar ve sonbahar aylarında daha sık aralıklarla meydana gelir.

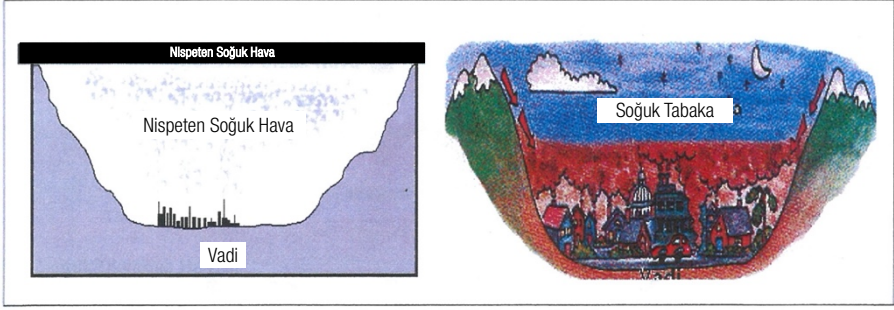
Atmosferde yerden bir kaç km yükseklik içinde çökme inversiyonu meydana gelir. İnversiyon tabakasının yerden yüksekliği oldukça önemlidir. İnversiyon tabakası yerden ne kadar yüksekte oluşmuşsa bacadan ve egzozdan atılan kirleticilerin atmosferde seyrelmesi de o kadar yüksek; kirleticinin konsantrasyonu da o kadar düşük olur. İnversiyon tabakası yere kadar yakın ve ortamdan kalkma süresi uzun ise kirleticinin konsantrasyonu kadar yüksek ve hava kirliliği bakımından etkisi o kadar şiddetlidir.

Özellikle doğu yönünde dağlarla, yüksek tepelerle ve gökdelenlerle çevrili şehirlerde yüksek basınç şartlarının hakim olduğu açık hava ve sakin kış aylarında bu tür inversiyonlar sık aralıklarla meydana gelebilir. Ayrıca dağların ve tepelerin üzerine yapılan yüksek binalar veya gökdelenler, çökme inversiyonunu tetikler. Eğer bu tür bölgelerde kış aylarında kalitesiz yakıtlar (kükürdÜ, külÜ ve nemi yüksek, kalorisi düşük) ısınma amaçlı, aşırı fosil yakıt tüketen yaşlı araçlar, servis ve toplu taşıma aracı olarak kullanılıyorsa ve sanayi tesislerinin bacaları kontrol edilmiyorsa, bacadan atılan kirleticilerin çevre üzerinde etkisi inversiyonlu günlerde fevkalade ölümcül olabilir.

Yüksek tepe veya dağlarla çevrili bölgelerde oluşan çökme inversiyonuna ait detaylar **Şekil 26** ve **Şekil 27**'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi belli yüksekliğe kadar sıcaklık yerden yükseklikle azalmaktadır. Belli bir yükseklikte ise sıcaklık yükseklikle artmaktadır. Bu tabakanın üzerinde de sıcaklık yine yükseklikle azalmaktadır. İnversiyon tabakası bir kapak gibi hareket ederek yer seviyesindeki gazların daha fazla yükselmesini ve dağılmasını engellemektedir. Çökme inversiyonu kalitesiz yakıt ve yakma sistemlerinin kullanıldığı yerlerde daha etkili olmaktadır.



Benzer bir durum, sıcak havanın vadilerde biriken daha soğuk havanın üzerine çıktığı dağ vadisi'nde ortaya çıkar (**Şekil 28**).

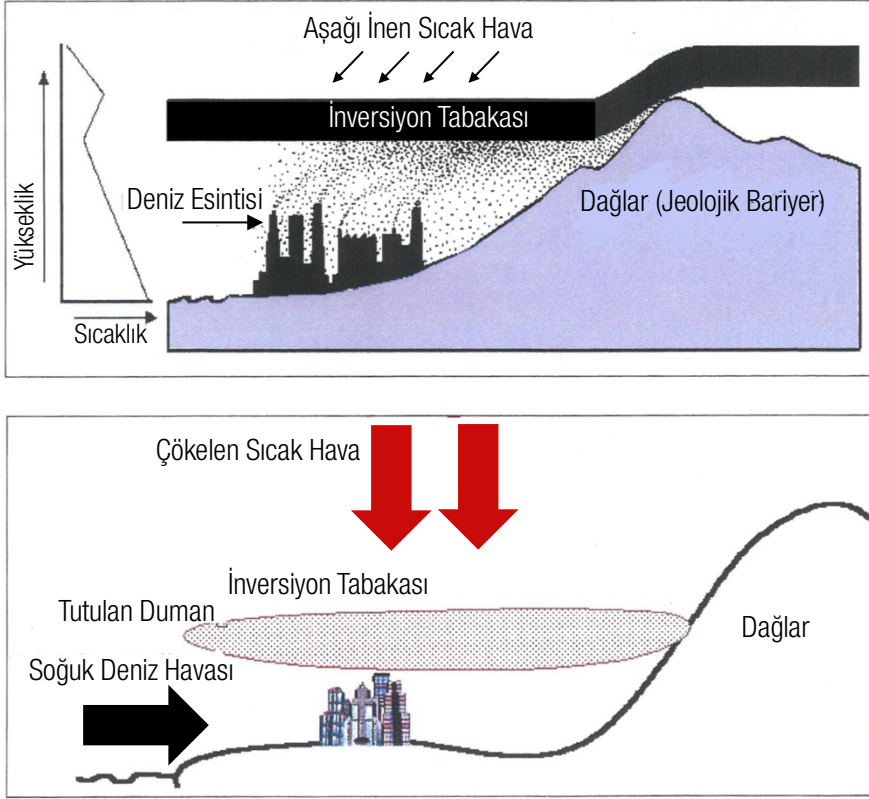


**Şekil 28.** Vadide gerçekleşen Çökme inversiyonu'nun etkileri  
[ÖZTÜRK (2017), S. ]

• **Adveksiyon inversiyonu:**

Yüksek basınçlı günlerde, sakin ve açık atmosferik şartlarda, sıcak deniz, göl veya deniz esintileri, karaya ulaşmadan önce soğuk hava akımları üzerinden geçtiği sahillerde (şehirlerde) adveksiyon inversiyonu gerçekleşir. Bu durumda yer seviyesindeki soğuk hava tabakası üzerine sıcak hava tabakası yerleşir. Kararlı (stabil) tabaka olarak adlandırılan inversiyon tabakası bir kapak gibi hareket ederek tabaka altında bacadan veya egzozdan atılan kirleticilerin tutulmasına ve birikmesine neden olur. Bu tür inversiyon oluşumu ile ilgili örnekler **Şekil 29** da verilmiştir.

Adveksiyon inversiyonu, genel olarak arkasında yüksek tepe veya dağ olan sahil bölgelerinde kurulu şehirlerde meydana gelmektedir.



**Şekil 29.** Adveksiyon inversiyonu'nun oluşumu  
[ÖZTÜRK (2017), S. ]

Şimdi çevre ortama atılan yanma ürünlerinden dolayı oluşan hava kirliliği ile ilgili çeşitli kaynaklardan alınan bilgi verilecek ve daha sonra tekrar Adveksiyon inversiyonu konusuna geri döneceğiz.

• Hava kirliliği [TTB - TÜRK TABİPLER BİRLİĞİ (2020), S. ]:  
İnsan sağlığını etkileyen, havadaki kirletici maddeler içinde yer alan ve hava kirliliği ölçümlerinde değerlendirilen

• **Sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>)**

Çalışmaların sonuçlarına göre önerilen SO<sub>2</sub> düzeyi,

24 saat ortalaması 125 mg/m<sup>3</sup>

Yıllık ortalaması 50 mg/m<sup>3</sup>

olarak belirlenmiştir.

Asılı partiküler madde [PM]:

Sağlık üzerine etkisi, partikül büyüklüğüne ve konsantrasyonuna bağlıdır.

PM<sub>10</sub>: 10 µm çapından küçük partiküller

PM<sub>2,5</sub>: 2,5 µm çapından küçük partiküller

PM, düşük değerlerde (100 mg/m<sup>3</sup> ten az) solunum sistemi hastalıkları ve solunum fonksiyonlarında azalma gibi kronik etkilere yol açmaktadır.

SO<sub>2</sub> ve PM, diğer atıklara göre iki yönde farklılık göstermektedir. Birincisi ülkemizde sadece bu iki maddenin ölçülüyor / izleniyor olması, diğeri ise termik santral için geliştirilmiş filtrasyon yöntemlerinin yine sadece bu iki maddeye özgü olmasıdır. Diğer bir deyişle, bu iki madde dışındaki kirleticiler ne izlenmekte ne de filtre edilmektedir.

#### **Yatağan'da hava kirliliği ve sağlık etkileri:**

Devlet İstatistik Enstitüsü istatistiklerinde belirtilen, Yatağan'ın 1990-93 yılları (Tarihler eski, ancak bize bir fikir verebilir, TÖ). SO<sub>2</sub> ve PM Konsantrasyonları aşağıda görülmektedir:

| Yıl  | SO <sub>2</sub> | PM |
|------|-----------------|----|
| 1990 | 69              | 31 |
| 1991 | 154             | 38 |
| 1992 | -               | -  |
| 1993 | 320             | 43 |

**Tablo 13.** Yatağan ilçesinde 1990-93 yılları ortalama aylık SO<sub>2</sub> konsantrasyonu (mg/m<sup>3</sup>) [TTB - TÜRK TABİPLER BİRLİĞİ (2020),S. ]

1999 yılı DiE istatistiklerine göre Yatağan ve Muğla merkezdeki hava kirliliği ölçüm sonuçları **Tablo 14**'te görülmektedir.

|         | SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) |     | PM <sub>10</sub> |     |
|---------|--------------------------------------|-----|------------------|-----|
|         | Yıllık ortalama                      | Max | Yıllık ortalama  | Max |
| Muğla   | 83                                   | 347 | 40               | 105 |
| Yatağan | 193                                  | 567 | 39               | 78  |

**Tablo 14.** Muğla merkez ve Yatağan ilçesi 1999 yılı ortalama yıllık ölçüm sonuçları  
[TTB - TÜRK TABİPLER BİRLİĞİ (2020), S. ]

PM her iki merkezde de benzer düzeyde iken SO<sub>2</sub> nin Yatağan'da daha yüksek düzeyde olduğu gözlenmektedir. Bir bilgi daha verelim: 1990-93,1999 yılları kirlilik düzeyleri karşılaştırıldığında, Yatağan'da hastaneye yatış nedenleri arasında solunum sistemi hastalıklarının oranı % 28,2 iken Muğla'da % 13,8 ile daha düşüktür.

## Hava kirliliğinin insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkisi

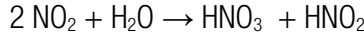
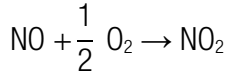
[İLKILIÇ & BEHÇET (2006)]

Kükürt oksitler (SO<sub>2</sub>)

Yeryüzünde en kirletici ve en çok bulunan kükürt bileşikleri SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub> olup termik santrallerin emisyonlarından meydana gelmektedir. SO<sub>2</sub> gazı, insan ve diğer canlılara zararlı olması bakımından ilk sırada yer almaktadır.

Azot oksitler (NO<sub>x</sub>)

Genellikle azot oksitler NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> şeklinde olup bunlardan NO<sub>2</sub> ve NO en önemli kirletici gazlardır. NO hava ile temas ederken kısa zamanda NO<sub>2</sub>'ye dönüşür ve NO<sub>2</sub> de suda kolayca çözünerek asit çözeltisi oluşturabilir.



Buna göre atmosferdeki HNO<sub>3</sub> ise asit yağmurlarının oluşmasına yardımcı olmaktadır.

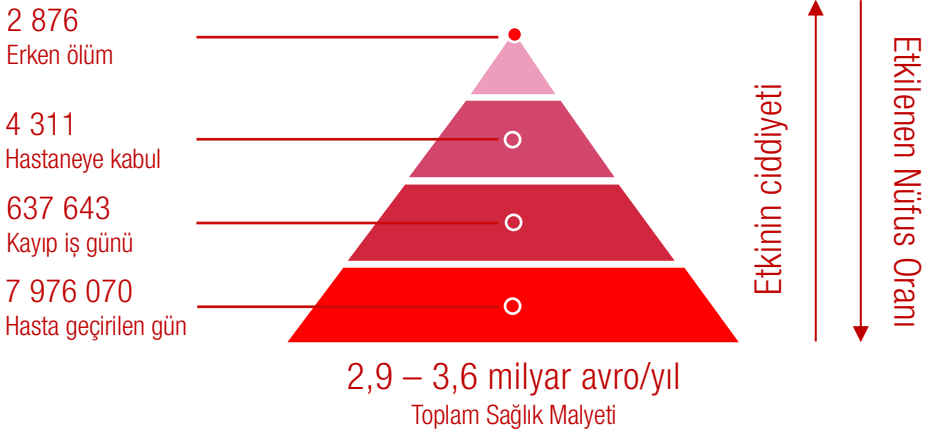
## Ödenmeyen sağlık faturası (Türkiye’de Kömürlü termik santraller bizi nasıl hasta ediyor?) [SAĞLIK VE ÇEVRE BİRLİĞİ (2015), S. ]

Yatağan termik santralının sağlık etkilerini araştırmak amacıyla Türk Tabipler Birliği’nin yaptığı bir çalışmaya göre, solunum sistemi hastalıkları nedeniyle Yatağan Devlet Hastanesi’nde yatarak tedavi gören hasta oranı, aynı hastalık grubu nedeniyle Muğla şehir merkezindeki hastanelerde yatan hastalara oranla iki kat daha fazladır.

## Kömür bizi nasıl hastalandırıyor?

Kömürlü termik santraller, Avrupa’da olduğu gibi Türkiye’de de ciddi düzeyde hava kirliliğine yol açmaktadır. Avrupalı solunum hastalıkları uzmanları kömürü “Görünmez katil” olarak adlandırmakta ve günümüzde toplum sağlığını tehdit eden en önemli sorunlardan biri olarak tanımlamaktadır.

Türk Tabipler Birliği’nin yaptığı çalışma çalışmada yayınlanan güncel veriler gösteriyor ki (Şekil 30):



**Şekil 30.** Türkiye’de taş kömürü ve linyit ile çalışan termik santrallerin kirlетici salımları ile bağlantılı sağlık etkileri  
[SAĞLIK VE ÇEVRE BİRLİĞİ (2015), S. ]

Elektrik üretimi için kömür kullanımının Türkiye’ye sağlık maliyeti, her yıl en az 2 876 erken ölüm, yetişkinlerde 3 820 civarında yeni kronik bronşit vakası, 4 311 hastaneye kabul ve 637 643 kayıp iş günü olmaktadır. Kömürün sağlık üzerindeki etkilerinin ekonomik maliyetinin ise yıllık 2,9 ila 3,6 milyar € arasında olduğu tatmin edilmektedir. Bu çalışmada “Türkiye’de sadece kömürlü termik santrallerden kaynaklanan CO<sub>2</sub> salımlarına dair açıklanan resmi veri yoktur” ifadesi yer almaktadır. Ayrıca, kömürlü termik santrallerinin yakınlarında yaşayan topluluklar diğerlerinden farklı sağlık riskleri ile de karşı karşıya kalabilirler (Şekil 31).

### 1inci Ulusal Hava Kalitesi Yönetimi Çalıştayı

[ÇED İZİN VE DENETİM GENEL MÜDÜRLÜĞÜ (2017)]:

Hava kirliliğine neden olan gazlardan bazıları için sınır değerler **Tablo 15**’de verilmiştir.

### Hava kirliliğinin insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkisi:

[İLKILIÇ & BEHÇET (2006)]

Yeryüzünde en kirlетici ve en çok bulunan kükürt bileşikler SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub> olup bu emisyonların büyük bir kısmı termik santrallerin faaliyetlerinden meydana gelmektedir.

## Kömürlü Termik Santral Salımlarından Kaynaklanan Sağlık Sorunları

### Akciğerler

- İnflamasyon
- Oksidatif stres
- KOAH'da hızlı ilerleme ve alevlenme
- Solunum semptomlarında artış
- Pulmoner reflekslerin etkilenmesi
- Akciğer fonksiyonlarında azalma

### Beyin

- Serebrovasküler iskemide artış
- Dikkat eksikliği
- Hiperaktivite bozukluğu

### Kalp

- Kalbin otonomik fonksiyonunda bozulma
- Oksidatif stres
- Disritmik duyarlılık artışı
- Kardiyak repolarizasyon bozukluğu
- Miyokardiyal iskemide artış

### Kan

- Akış değişimi
- Koagülabilitede artış
- Parçacıklarda yer değişimi
- Periferik tromboz
- Oksijen doygunluğunda azalma

### Damarlar

- Damar tıkanıklığı, plaklarda hızlı ilerleme ve destabilizasyon
- Endotel disfonksiyonu
- Vazokonstriksiyon ve hipertansiyon

### Diğer etkiler

- Düşük doğum ağırlığı
- Erken doğum
- Deri, mesane kanseri
- Diyabet

Özellikle çocuklar, doğum öncesinde bile hava kirliliğine duyarlıdır. Sayıları giderek artan kanıtlar, yaşamın erken dönemlerinde hava kirliliğine maruz kalmanın, ileri yıllarda aralarında obezite, diyabet, göğüs ve prostat kanseri gibi hormonlarla ilintili kanserlerin de bulunduğu kronik hastalıklar geliştirme riskini artırdığını göstermektedir. Ayrıca son araştırmalar, hamilelik döneminde dış ortam hava kirliliğine maruz kalmak ile düşük doğum ağırlığı, erken doğum ve preeklampsi oranlarında artış arasında bağlantılar tespit etmiştir

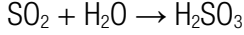
**Şekil 31.** Parçacıklı maddeye (PM<sub>2.5</sub>) maruz kalmak çok sayıda sağlık sorununa yol açar [SAĞLIK VE ÇEVRE BİRLİĞİ (2015), S. ]

| İNSAN SAĞLIĞI VE EKOSİSTEMİN KORUNMASI İÇİN HAVA KALİTESİ SINIR DEĞERLERİ |                              |                                 |                               |              |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------|
| Kirlenici Parametreler                                                    | Ölçüm Periyodu               | Sınır Değerler                  |                               | Uyum Takvimi |
|                                                                           |                              | Ülkemizde Uygulanan (2017 Yılı) | AB'ne Üye Ülkelerde Uygulanan |              |
| Kükürtdioksit SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )                        | Saatlik                      | 410                             | 350                           | 1.01.2019    |
|                                                                           | Günlük                       | 175                             | 125                           |              |
|                                                                           | Uyarı Eşiği (3 ardışık saat) | 500                             | 500                           |              |
|                                                                           | Saatlik Aşım Sayısı          | -                               | 24/Yıl                        |              |
|                                                                           | Günlük Aşım Sayısı           | -                               | 3/Yıl                         |              |
| Partikül Madde PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )                      | Yıllık (Ekosistem)           | 20                              | 20                            | 1.01.2014    |
|                                                                           | Günlük                       | 70                              | 50                            | 1.01.2019    |
|                                                                           | Yıllık                       | 48                              | 40                            |              |
|                                                                           | Günlük Aşım Sayısı           | -                               | 35/Yıl                        |              |
| Azotdioksit NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )                          | Saatlik                      | 270                             | 200                           | 1.01.2024    |
|                                                                           | Yıllık                       | 48                              | 40                            |              |
|                                                                           | Uyarı Eşiği (3 ardışık saat) | 400                             | 400                           |              |
|                                                                           | Saatlik Aşım Sayısı          | -                               | 18/Yıl                        |              |
| Azotoksitler NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> )                         | Yıllık (Ekosistem)           | 30                              | 30                            | 1.01.2014    |
| Karbonmonoksit CO (mg/m <sup>3</sup> )                                    | 8 saatlik Ortalama           | 10                              | 10                            | 1.01.2017    |
| Ozon O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )                                  | 8 saatlik Ortalama           | 120                             | 120                           | 1.01.2022    |
|                                                                           | Bilgi Eşiği (saatlik)        | -                               | 180                           |              |
|                                                                           | Uyarı Eşiği (saatlik)        | -                               | 240                           |              |
| Benzen C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (µg/m <sup>3</sup> )                 | Yıllık                       | 9                               | 5                             | 1,1,2021     |
| Kurşun Pb (µg/m <sup>3</sup> )                                            | Yıllık                       | 0.7                             | 0.5                           | 1.01.2019    |
| Arsenik As (nh/m <sup>3</sup> )                                           | Yıllık                       | -                               | 6                             | 1.01.2020    |
| Kadmiyum Cd (ng/m <sup>3</sup> )                                          | Yıllık                       | -                               | 5                             | 2.01.2020    |
| Nikel Ni (ng/m <sup>3</sup> )                                             | Yıllık                       | -                               | 20                            | 3.01.2020    |
| Benzoapiren B(a)p (ng/m <sup>3</sup> )                                    | Yıllık                       | -                               | 1                             | 4.01.2020    |

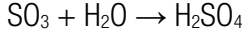
**Tablo 15.** Hava kalitesi sınır değerleri  
[ÇED İZİN VE DENETİM GENEL MÜDÜRLÜĞÜ (2017)]

Atmofere karışan SO<sub>2</sub> ile onun atmoferdeki dönüşüm ürünleri olan sülfıt (SO<sub>3</sub>) ve sülfatlar (SO<sub>4</sub>) yayılma yoluyla toz taneciklerine dönüşerek kendi aralarında veya başka taneciklerle birleşmek suretiyle büyür ve çökelirler. Bazen havadaki SO<sub>2</sub> atmoferin çok yüksek tabakalarına kadar çıkarak hava akımları ile uzaklara

taşıyabilir. Bu hareket esnasında SO<sub>2</sub> havadaki su damlacıkları veya nem ile kimyasal reaksiyona girerek asit oluşturmaktadır. SO<sub>2</sub> önce



sülfüroz aside, daha sonra da etkili bir asit olan



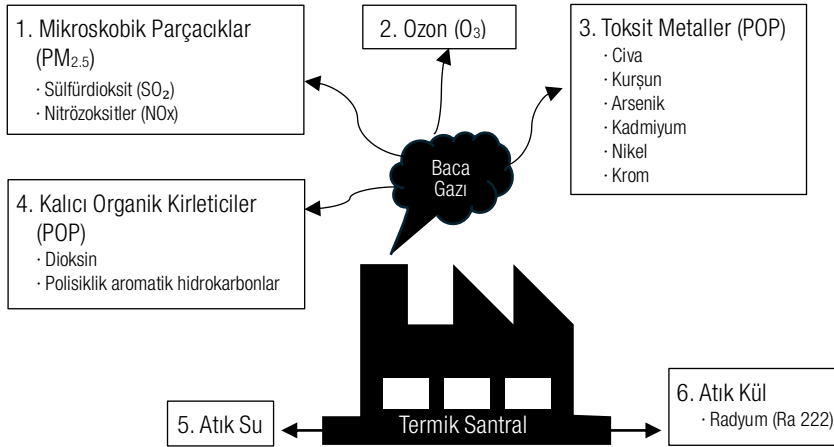
Sülfürik aside dönüşmektedir. Bu dönüşümler sonucu oluşan asitler, asit yağmurlarının meydana gelmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Hava kirliliğini oluşturan gazlar içinde, insan ve diğer canlılara zararı olması bakımından SO<sub>2</sub> gazı ilk sırada yer almaktadır.

Azot oksitler ise, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> şeklinde olup bunlardan NO<sub>2</sub> ve NO, en önemli kirlenici gazlardır. NO<sub>2</sub>, havanın içinde bulunan nem ile birleşerek nitrat asidine dönüşür ve bu asidin de canlıların sağlığı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır.

### Eskişehir Alpu Kömürlü termik santrali sağlık etki değerlendirmesi raporu [ETİLER v. d. (2020), S. ]:

Kömürlü Termik Santraller (KTS), yaşadığımız çevreyi en çok kirlüten endüstriyel tesisler arasında yer almaktadır. Diğer taraftan KTS'lerin yaydığı önemli miktardaki CO<sub>2</sub>'nin iklim üzerindeki etkileri de sağlık açısından ciddi sorunlar ortaya çıkarmaktadır.

Termik santrallerin çevre kirliliğine katkısı ise Şekil 32'de özetlenmiştir.



**Şekil 32.** Kömür yakıtlı termik santrallerden çevreye yayılan zararlı maddeler [ETİLER v. d. (2020), S. ]

Şekilden anlaşılacağı üzere termik santrallerin başta baca gazı yanında, atık suları ve atık küllerinden çevreye zararlı maddeler yayılmaktadır. Canlıların

sağlığı üzerine doğrudan etkilerinin yanı sıra bu kirleticiler, bitkisel ve hayvansal ürünleri ve su kaynaklarını da kirleterek dolaylı yoldan da doğal kaynaklara zarar vermektedirler. Bu santral salımlarından kaynaklanan sağlık sorunları **Tablo 16**'da özetlenmiştir.

KTS'lerin baca gazından yayılan gazlar ve duman, önemli bir hava kirliliği kaynağıdır.

• **Kömürün yanması sırasında ortaya çıkan kritik kirleticiler**

[ETILER v. d. (2020), S. ]:

**Partiküler madde (PM):**

Kömür yakılması sonucu oluşan tozların içerisinde yer alan partiküler madde (PM), insan sağlığı açısından çok tehlikelidir. Hava kalitesi izlemlerinde bu mikroskobik parçacıklar  $PM_{10}$  ve  $PM_{2,5}$  olarak ölçülmektedir. Bu parçacıklardan çapı 10 mikrometreden küçük olanlar,  $PM_{10}$ ; 2,5 mikrometreden küçük olanları ise  $PM_{2,5}$  olarak adlandırılmaktadır. Bir saç telinin çapının 70 mikrometre, bir kum tanesinin çapının ise 50 mikrometre olduğu göz önüne alınırsa bu parçacıkların ne kadar küçük olduğu anlaşılabilir.

Türkiye'de  $PM_{2,5}$  maruziyetine atfedilen sağlık sorunlarının % 20'si termik santrallerden kaynaklanmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Çevre Koruma Ajansı (EPA), 2009 yılında  $PM_{2,5}$  maruziyetinin sağlık açısından etkileri ile ilgili yayımladığı geniş çaplı bir raporda,  $PM_{2,5}$ 'a maruz kalan çocuklarda solunum bozukluğu semptomları, astım gelişimi ve akciğer fonksiyonlarında azalma meydana geldiğini bildirmiştir. Raporda ayrıca astımlı çocuklarda havadaki  $PM_{2,5}$  parçacık yoğunluğundaki her  $10 \mu g/m^3$  lük artış ile solunum fonksiyonlarının bir ölçütü olan FEV1 'de % 1-3,4 kadar bir düşüşe neden olduğu bildirilmektedir.  $PM_{2,5}$  maruziyetinin enfeksiyonlar ve Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı (KOAH) gibi solunum sistemi ile ilişkili hastalıklar nedeniyle acil servis ve hastane başvurularını artırdığı da raporda vurgulanan bulgulardan biri olmuştur. Raporda  $PM_{2,5}$  maruziyeti ile akciğer kanseri arasında belirtilen ilişki de dikkat çeken başlıklardandır. Bunun dışında çeşitli çalışmalar  $PM_{2,5}$ 'a kısa süreli maruziyetin bile kalp krizi, inme ve kalp aritmilerini tetikleyerek ölüme neden olduğunu göstermiştir. PM'ye uzun süreli maruziyet ise hipertansiyon ve ateroskleroz gibi birçok kalp-damar hastalığının gelişim riskini artırmaktadır.

Türkiye'deki Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği'nde  $PM_{2,5}$  konusunda bir düzenleme yer almamaktadır. Kanser ile güçlü nedenselliği artık tartışmasız bir biçimde kabul edilen  $PM_{2,5}$  pek çok istasyonda ölçülmemekte; ölçümü yapılsa bile sınır değerleri belirlenmediğinden önlem alınması olanaksız kılınmaktadır.

| Etkilenen organ ve sistemler | Etki                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Akciğerler                   | İnflamasyon<br>Oksidatif stres<br>KOAH'da hızlı ilerleme ve alevlenme<br>Solunum semptomlarında artış<br>Pulmoner reflekslerin etkilenmesi<br>Akciğer fonksiyonlarında azalma<br>Akciğer kanseri riskinde artış |
| Kalp                         | Kalbin otonom fonksiyonunda bozulma<br>Oksidatif stres<br>Disritmik duyarlılık artışı<br>Kardiyak repolarizasyon bozukluğu<br>Miyokardiyal iskemide artış                                                       |
| Kan                          | Akış değişimi<br>Koagülabilitede artış<br>Parçacıklarda yer değişimi<br>Periferik tromboz<br>Oksijen doygunluğunda azalma                                                                                       |
| Damarlar                     | Damar tıkanıklığı, plaklarda hızlı ilerleme ve destabilizasyon<br>Endotel disfonksiyonu<br>Vazokonstriksiyon ve hipertansiyon                                                                                   |
| Beyin                        | Serebrovasküler sistemde artış<br>Dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu                                                                                                                                   |
| Diğer                        | Düşük doğum ağırlığı<br>Erken doğum<br>Deri, mesane kanseri<br>Diyabet                                                                                                                                          |

**Tablo 16.** Kömürlü Termik Santral salımlarından kaynaklanan sağlık sorunları  
[ETİLER v. d. (2020), S. ]

### **Kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>):**

SO<sub>2</sub>, maruziyeti termik santral çevresinde yaşayan insanların, özellikle de astım hastası çocukların solunum semptomlarının insidansını ve şiddetini artırmaktadır. Hassas kişilerin SO<sub>2</sub> solunması, inflamasyon ve hava yollarının aşırı duyarlılığına neden olmakta, bronşiti tetiklemekte ve akciğer fonksiyonlarını azaltmaktadır. Epidemiyolojik çalışmalar havadaki SO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile astım ve diğer solunum sistemi semptomları nedeniyle hastane başvuruları arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur.

Termik santrallerden çevreye SO<sub>2</sub> yayılımını önlemek için yapılan desülfürizasyon üniteleri (Flue Gas Desulfurization - FGD), son birkaç on yılda birçok ülkede havadaki SO<sub>2</sub> konsantrasyonunun azalmasını sağlamıştır. FGD üniteleri, kömür yakılması sonucu açığa çıkan kükürdün % 95'ini tutabilmektedir.

Desülfürizasyon üniteleri sadece kükürdü tutmaktadır, çevreye zarar veren diğer etkenler ise bu sistemden etkilenmezler. Bu ünite, baca gazındaki SO<sub>2</sub>'yi bazik karakterli maddeler çözeltisi içinden geçirerek katı maddelere dönüştürür.

Oluşan bu kükürtlü bileşiklerin bir kısmı kimya ya da gübre sanayisinde kullanılabilir de yine de ortaya önemli bir katı atık sorunu çıkmaktadır.

### **- Azot oksitler (NO<sub>x</sub>)**

Termik santrallerde kömür yakılması sonucu çevreye yayılan istenmeyen ürünlerden biri de azot oksitlerdir (NO<sub>x</sub>). NO<sub>x</sub>'ler, atmosferde kimyasallarla tepkimeye girerek ozon, azot oksit (N<sub>2</sub>O) ve azot dioksit (NO<sub>2</sub>) üretimine neden olur. Ozon ve NO<sub>2</sub> önemli kirleticilerdir. NO<sub>2</sub> maruziyeti, astımlı çocuklarda hırıltı (wheezing) ve öksürük gelişimini artırmaktadır. Ayrıca viral ve bakteriyel enfeksiyonlara yatkınlığı artırmakta ve yüksek konsantrasyonlarda (1-2 ppm) hava yolu inflamasyonuna neden olmaktadır. Düşük konsantrasyonlarda (3-50 ppm) ise astımlı kişilerde akciğer fonksiyonlarını azaltmaktadır (ppm: Milyonda bir birim - parts per million)

### **Kara rapor 2020. Hava kirliliği ve sağlık etkileri**

[TEMİZ HAVA HAKKI PLATFORMU (2020)]

Hava kirliliği çevre kaynaklı en büyük sağlık tehdidi olarak kabul edilmektedir. Dünyada ölüm nedenleri sıralamasında dış ortam kirliliği 6., iç ortam kirliliği ise 8. sırada yer almaktadır. Hava kirleticileri ve sağlık etkisi **Tablo 17**'de gösterilmiştir.

| Kirletici                        | Ana Kaynağı                                                                                                 | Sağlık Etkisi                                                                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kükürtdioksit (SO <sub>2</sub> ) | Fosil Yakıt Yanması,<br>Taşıt Emisyonları                                                                   | Solunum Yolu<br>Hastalıkları, Asit<br>Yağmurları                                                  |
| Azot oksitler (NO <sub>x</sub> ) | Taşıt Emisyonları,<br>Yüksek Sıcaklıkta<br>Yakma Prosesleri                                                 | Göz ve Solunum Yolu<br>Hastalıkları, Asit<br>Yağmurları                                           |
| Partikül Madde (PM)              | Sanayi, Taşıt<br>Emisyonları, Fosil Yakıt<br>Yanması, Tanım ve<br>İkincil Kimyasal<br>Reaksiyonlar          | Kanser, Kalp<br>Problemleri, Solunum<br>Yolu Hastalıkları,<br>Bebek Ölüm<br>Oranlarında Artış     |
| Ozon (O <sub>3</sub> )           | Trafikten Kaynaklanan<br>Azot Oksitler ve Uçucu<br>Organik Bileşiklerin<br>(VOC) Güneş Işığıyla<br>Değişimi | Solunum Sistemi<br>Problemleri, Göz ve<br>Burunda İritasyon,<br>Astım, Vücut<br>Direncinde Azalma |
| Karbonmonoksit (CO)              | Eksik Yanma Ürünü,<br>Taşıt Emisyonları                                                                     | Kandaki Hemeogloblin<br>ile Birleşerek Oksijen<br>Taşınma<br>Kapasitesinde Azalma,<br>Ölüm        |

**Tablo 17.** Hava kirleticileri ve sağlık etkisi  
[TEMİZ HAVA HAKKI PLATFORMU (2020), S. ]

Ayrıca, kirli havanın bebek ve çocukların kalbi, beyni, hormon sistemleri ve bağışıklığı üzerindeki etkileri kanıtlanmıştır ve büyüme, zeka, beyin gelişimi ve koordinasyon üzerindeki etkilerine yönelik kanıtlar çoğalmaktadır. Hava kirliliğinin çocuklarda görülme riskini artırdığı sağlık sorunlarından bazıları:

- Düşük doğum ağırlığı (Erken doğum)
- Otizm
- Diyabet
- Ani bebek ölümü sendromu
- Astım, KOAH, bronşit ve bronşit gibi solunum hastalıkları
- Zatürree
- Bebek ölümü

· Zekâ geriliği

Hava kirliliği ve COVID-19 virüsü ilişkisi ile de kısa bir bilgi verelim.

Milyonlarca insan, geçmişte hava kirliliğine maruz kalmaları nedeniyle kronik hastalıklar ve sakatlıklar yaşamakta ya da kemoterapi gibi tedaviler görmektedir.

Bu durum onları COVID-19 karşı daha savunmasız hale getirmektedir.

Enfeksiyon riski hava kirliliğinin bağışıklık sistemi üzerindeki etkisi ile artabilir.

Yüksek seviyedeki hava kirliliği vücudun hava yoluyla taşınan virüslere karşı doğal savunmasını etkilemekte ve insanların viral hastalıklara yakalanma olasılığını artırmaktadır (COVID-19 virüsü nedeniyle).

Hava kirliliği seviyelerinin COVID-19 kaynaklı vakaların ve ölümlerin sayısını artırdığına işaret etmektedir.

Küresel ölçekte hava kirliliği, diyabet kaynaklı hasta yükünün yaklaşık % 18 inden, akciğer kanserinin % 14'ünden, kronik obstrüktif akciğer hastalıklarının % 34'ünden, iskemik kalp hastalıklarının % 11 inden ve inmelerin % 7 sinden sorumludur. Bilgi olarak 2019 yılında hava kirliliğine bağlı bazı illerdeki ölüm sayısı ve hızı **Tablo 18** ve **Tablo 19**'da verilmiştir.

| İller    | Hava kirliliğine atfedilen ölüm sayısı |      |       | Hava kirliliğine atfedilen ölüm yüzdesi |       |       | Hava kirliliğine atfedilen ölüm hızı (100 binde) |        |        |
|----------|----------------------------------------|------|-------|-----------------------------------------|-------|-------|--------------------------------------------------|--------|--------|
|          | Ort.                                   | Min. | Maks. | Ort.                                    | Min.  | Maks. | Ort.                                             | Min.   | Maks.  |
| İstanbul | 3761                                   | 2480 | 4932  | 6,4                                     | 4,22  | 8,4   | 38,92                                            | 25,66  | 51,04  |
| İzmir    | 2075                                   | 1373 | 2714  | 8,08                                    | 5,34  | 10,56 | 70,82                                            | 46,85  | 92,62  |
| Manisa   | 1680                                   | 1134 | 2156  | 18,5                                    | 12,48 | 23,75 | 177,68                                           | 119,92 | 228,1  |
| Bursa    | 1584                                   | 1052 | 2064  | 10,26                                   | 6,82  | 13,37 | 80,36                                            | 53,38  | 104,7  |
| Ankara   | 1552                                   | 1024 | 2036  | 6,4                                     | 4,22  | 8,4   | 43,38                                            | 28,61  | 56,89  |
| Konya    | 1271                                   | 847  | 1652  | 11,87                                   | 7,91  | 15,42 | 94,62                                            | 63,04  | 122,92 |
| Kayseri  | 1004                                   | 674  | 1295  | 16,01                                   | 10,75 | 20,64 | 116,63                                           | 78,33  | 150,42 |
| Antalya  | 932                                    | 618  | 1216  | 9,18                                    | 6,08  | 11,98 | 57,42                                            | 38,06  | 74,95  |
| Çorum    | 881                                    | 599  | 1122  | 22,33                                   | 15,19 | 28,46 | 247,75                                           | 168,54 | 315,8  |
| Erzurum  | 867                                    | 591  | 1104  | 23,25                                   | 15,85 | 29,59 | 204,87                                           | 139,64 | 260,69 |

**Tablo 18.** 2019 yılında hava kirliliğine bağlı ölüm sayısı en yüksek on il  
[TEMİZ HAVA HAKKI PLATFORMU (2020), S. ]

| İller    | PM <sub>2,5</sub> | Hava Kirliliğine Atfedilen Ölüm Sayısı |      |      | Hava Kirliliğine Atfedilen Ölüm Yüzdesi |       |       | Hava Kirliliğine Atfedilen Ölüm hızı (Yüz binde) |        |        |
|----------|-------------------|----------------------------------------|------|------|-----------------------------------------|-------|-------|--------------------------------------------------|--------|--------|
|          |                   | Ort.                                   | Min. | Max. | Ort.                                    | Min.  | Max.  | Ort.                                             | Min.   | Max.   |
| İğdır    | 78                | 226                                    | 158  | 282  | 33,57                                   | 23,41 | 41,85 | 214,29                                           | 149,42 | 267,15 |
| Erzurum  | 54                | 867                                    | 591  | 1104 | 23,25                                   | 15,85 | 29,59 | 204,87                                           | 139,64 | 260,69 |
| Çorum    | 52                | 881                                    | 599  | 1122 | 22,33                                   | 15,19 | 28,46 | 247,75                                           | 168,54 | 315,8  |
| Düzce    | 45                | 418                                    | 283  | 536  | 18,9                                    | 12,83 | 24,35 | 170,51                                           | 115,2  | 218,7  |
| Manisa   | 44                | 1680                                   | 1134 | 2156 | 18,5                                    | 12,48 | 23,75 | 177,68                                           | 119,92 | 228,1  |
| K. Maraş | 42                | 791                                    | 533  | 1017 | 17,51                                   | 11,79 | 22,52 | 118,24                                           | 79,65  | 152,08 |
| Sinop    | 41                | 331                                    | 223  | 426  | 17,01                                   | 11,45 | 21,9  | 218,69                                           | 147,17 | 281,52 |
| Elazığ   | 39                | 477                                    | 320  | 615  | 16,01                                   | 10,75 | 20,64 | 131,97                                           | 88,63  | 170,19 |
| Kayseri  | 39                | 1004                                   | 674  | 1295 | 16,01                                   | 10,75 | 20,64 | 116,63                                           | 78,33  | 150,42 |
| Osmaniye | 39                | 357                                    | 240  | 460  | 16,01                                   | 10,75 | 20,64 | 110,17                                           | 73,99  | 142,07 |

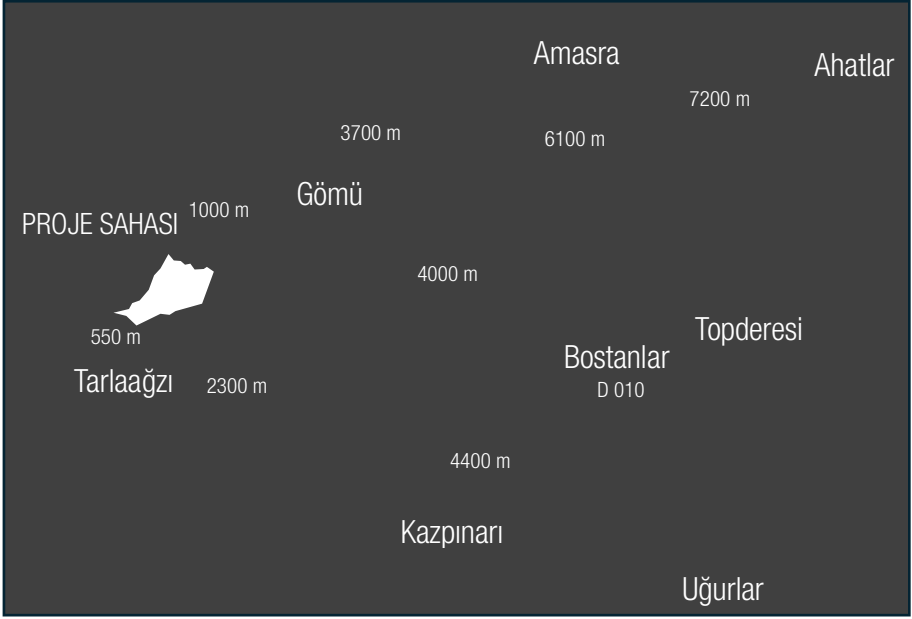
**Tablo 19.** 2019 yılında hava kirliliğine bağlı ölüm yüzdesi en yüksek on il  
[TEMİZ HAVA HAKKI PLATFORMU (2020), S. ]

Hava kirliliği ile ilgili bu bilgilerden sonra Adveksiyon inversiyonu konusuna tekrar geri dönelim.

#### **Adveksiyon inversiyonu:**

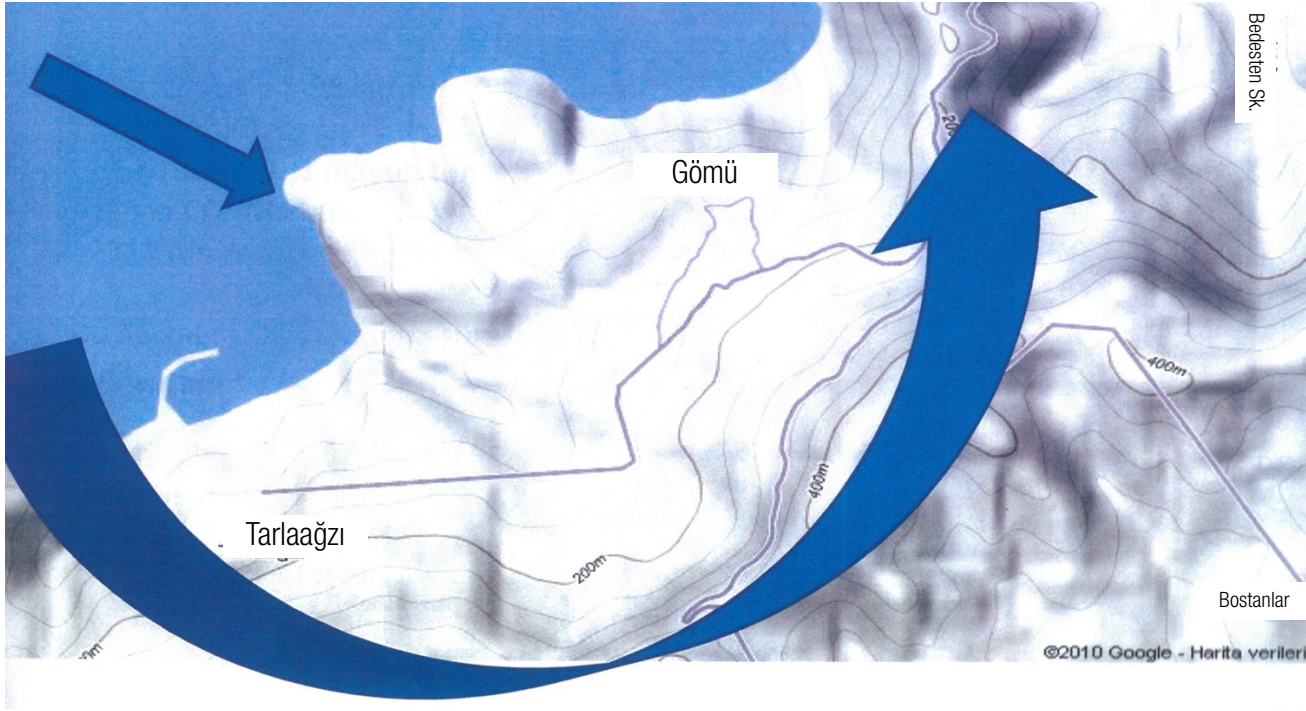
Önce proje sahasının yerini tarif edelim:

Proje sahası Amasra ilçe merkezinin 3,7 km güneybatısında (kuş bakışı), Gömü köyünün merkezden itibaren 1 km güneybatısında (kuş bakışı), Tarlaağzı köyünün 550 metre kuzeydoğusunda (kuş bakışı) yer almaktadır (**Şekil 33**).



**Şekil 33.** Proje sahasının yerleşimlere olan mesafesini gösterir harita  
[MGS PROJE MÜŞAVİRLİK MÜHENDİSLİK (2014), S. ]

Termik santral planlanan bölgedeki arazinin arkasında yer alan dağların deniz seviyesinden olan yüksekliği 400 metre (**Şekil 34**) olup denizden gelen sıcak hava akımları acaba bu yüksekliği aşabilmekte zorluk çekebilir mi?



**Şekil 34.** Termik santralin planlanan bölge arazisi <sup>2</sup>

<sup>2</sup> SEVİNÇ, C. (2021). Kişisel görüşme. Y. Müh. Ekonomist.

Adveksiyon inversiyonu genel olarak arkasında yüksek tepe veya dağ olan sahillerde de kurulan yerleşim yerlerinde meydana gelmektedir ve en basit anlatımıyla 'Yatay olarak ısının bir bölgeden bir bölgeye taşınmasıdır' şeklinde tanımlanabilir.

Santral bacasından çevre ortama atılan hava kirleticileri havadan daha ağır olduklarından yere doğru deniz seviyesinden esen soğuk hava tabakası üzerine sıcak hava tabakası olarak yerleşir.

Kararlı (stabil) tabaka olarak adlandırılan inversiyon tabakası bir kapak gibi hareket ederek tabaka altındaki hava kirleticilerin tutulmasına ve birikmesine neden olur (**Şekil 29**). Bu olay sonucu ise, ciddi hava kirlenmesi dolayısıyla ölümcül atmosferik şartlar meydana gelir.



### XIII. Sonuç: hava kirliliği ve sağlık etkileri irdeleme

Kütlesel analizi verilen zenginleştirilmiş taşkömürü (bkz. Sayfa 67) buharlı güç santralinde (Termik santral  $2 \times 660$  MW) saatte 452 ton kullanıldığına göre tam yanma kabulü ile çevre ortama atılacak olan ve hava kirliliğine neden olacak zehirli gazlar veya yanma ürünleri bizim hesaplarımıza göre

Kütlesel olarak (Sayfa 70-70):

$$m_{\text{hava}} = 4\,841 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 1\,302 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 215 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{SO}_2} = 10,8 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{N}_2} = 3\,699 \text{ t/h}$$

$$m_{\text{Kül}} = 41 \text{ t/h}$$

veya,

Hacimsal olarak (bkz. Sayfa 91-91)

$$V_{\text{hava}} = 3\,719\,960 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 655\,400 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 266\,680 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{SO}_2} = 3\,706 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{N}_2} = 2\,957\,888 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

olup Hava-Yakıt oranı,

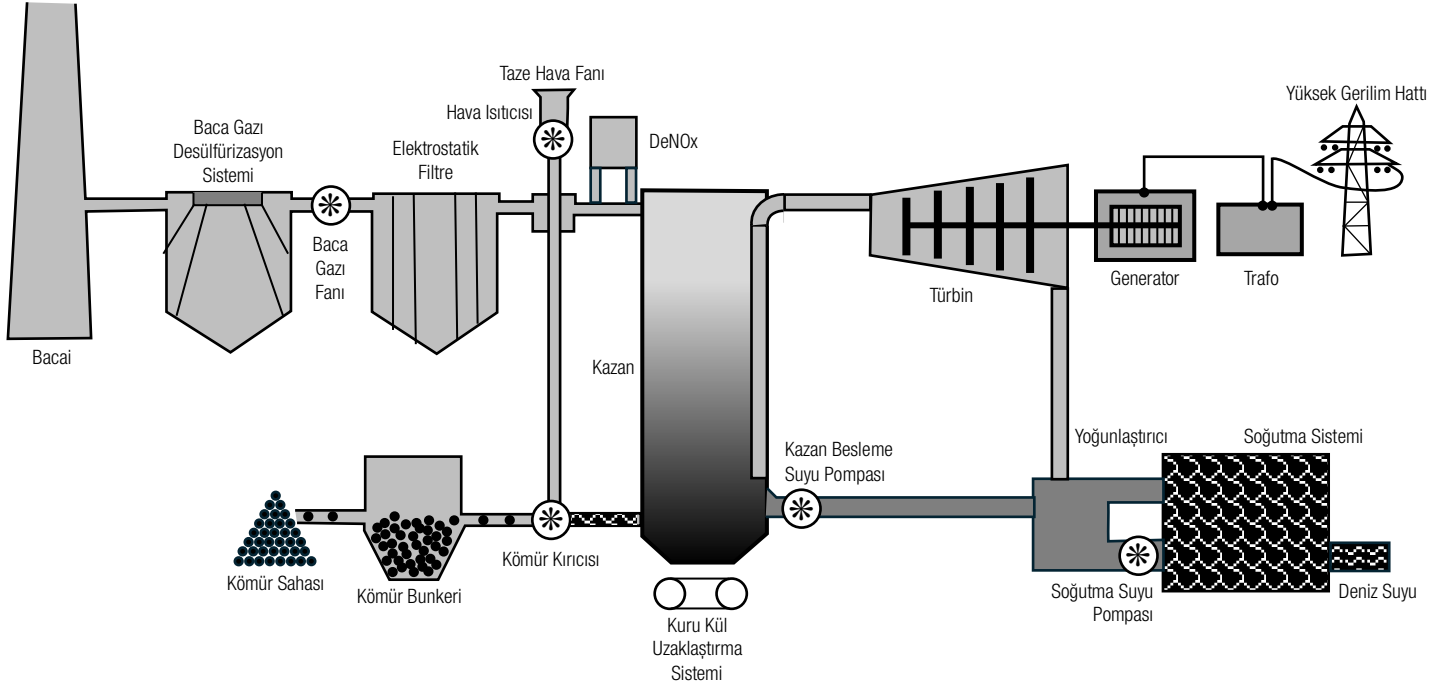
$$\text{HY} = 10,71 \text{ kg hava/kg yakıt (bkz. Sayfa 69) dır.}$$

Yanma ürünlerinin (Baca gazı emisyonlarının) bu kadar büyük (tonlarca) değerlerine karşı ÇED raporlarında belirtilen önlemlerin yeterli olup olmadığı gibi konularda aşağıdaki soruları akla gelmektedir:

- Santral bacasından çıkan gazların emisyon değerleri nedir; sınır değerler aşıyor mu?
- Çevre mevzuatına uyulması için hangi yatırımlar yapılmıştır?  
Yapılan yatırımlar Çevre mevzuatındaki toz, azot oksit, kükürt oksit sınır değerlerini ve kül depolamak gerekliliklerinin karşılanması için uygun teknolojiler midir?

Şimdi ÇED raporlarındaki hava kirliliğini önleyici önlemleri özetleyerek sıralayalım [MGS PROJE MÜŞAVİRLİK MÜHENDİSLİK (2014), S. ]:

- Yanma sonucu oluşan gazların içerdği uçucu küllerin, atmosfere atılarak çevre kirliliğine neden olmasını önlemek için yüksek verimli 'Elektrostatik Filtreler (EF)' kullanılacaktır.
- Santralde kömür yakıldığında oluşacak SO<sub>2</sub> konsantrasyonu 'Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği (BYTY)'nde belirtilen sınır değerlerin altına çekebilmek için iki adet 'Baca Gazı Desülfürizasyon (BGD)' tesisinin kurulması planlanmıştır.
- Proje kapsamında baca gazı desülfürizasyonunda (baca gazındaki kükürdü gidermede) kireçtaşı kullanılacaktır (yılda 7 400 saat çalışma esasına göre yılda 187 700 ton) kullanılacağı öngörülmektedir.
- Santralde baca gazındaki NO<sub>x</sub> emisyonlarının da yönetmelik sınır değerlerinin altında kalması için düşük NO<sub>x</sub> brülörler kullanılacak; kazan ön hava ısıtıcısı ve ekonomizer arasına baca gazı azot oksitleri giderme sistemi DeNO<sub>x</sub> (Selective Catalytic Reactor SCR: Seçici Katalitik İndirgeme) yerleştirilecektir (**Şekil 35**).



**Şekil 35.** Termik santral iş akım şeması  
[MGS PROJE MÜŞAVİRLİK MÜHENDİSLİK (2014), S. ]

- Santral bölgesinde inversiyon özelliklerine bakıldığında yaz aylarında tehlike arz edecek atmosferik şartlar görülmemektedir. Kış aylarında (Ekim, Kasım, Aralık) inversiyon şiddetlerinde artış olmakta, ilkbahar aylarında atmosferin daha kararlı olduğu görülmektedir (Prof. Dr. Orhan Şen, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü) [MGS PROJE MÜŞAVİRLİK MÜHENDİSLİK (2014), S. ].
- Projede kömürün yakılması durumunda EF sistemi, baca gazındaki toz içeriğinin  $10 \text{ mg/Nm}^3$ 'ü aşmaması garanti edilmektedir. Elektrostatik filtrelerde tutulabilen kül oranı baca gazı oranı ile orantılıdır. Bu hız 1-3 m/s dolaylarında olmalıdır. EF sisteminde çekiş kayıpları yalnızca 2-4 mmSS dir. ayrıca bu metodla tutulabilen kül oranı %99'un üzerine çıkabilmektedir.
- Islak kireçtaşı prosesine dayalı sistemde kükürt tutma verimi % 80 - % 95 tir.
- $\text{NO}_x$  emisyonu limit  $150 \text{ mg/Nm}^3$  değeri, alınan önlemler ile sağlanabilir.
- Planlanan projede 13,74 t/h kazanaltı külü, 77,86 t/h uçucu kül olmak üzere toplam 91,6 t/h kül oluşması beklenmektedir (677 840 t/yıl). Kömürün kül oranı maksimum % 20 kabul edilmiştir.
- Planlanan projede, baca gazı miktarları, özellikleri ve ilgili sınır değerleri **Tablo 20'**de gösterilmiştir.

| Parametre                 | Tasanm Değerleri*                                                                        | BYTY<br>(mg/Nm <sup>3</sup> ) | IPPC BREF<br>(2006<br>versiyonu)<br>Kılavuz<br>Değerleri<br>(mg/Nm <sup>3</sup> ) | IPPC Taslak<br>BREF<br>(2013<br>versiyonu)<br>kılavuz<br>Değerleri<br>(mg/Nm <sup>3</sup> ) | SKHKKY<br>(kg/saat) |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| SO <sub>2</sub>           | 110 mg/ Nm <sup>3</sup> (kuru, % 6 O <sub>2</sub> )<br>206,14 kg/saat                    | 200                           | 20 - 150                                                                          | 25 - 110                                                                                    | 60                  |
| NO <sub>x</sub>           | 100 mg/ Nm <sup>3</sup> (kuru, % 6 O <sub>2</sub> )<br>187,40 kg/saat                    | 200                           | 90 - 150                                                                          | 80 - 125                                                                                    | 40                  |
| CO                        | 200 mg/ Nm <sup>3</sup> (kuru, % 6 O <sub>2</sub> )<br>374,80 kg/saat                    | 200                           | < 50                                                                              | 1 - 55                                                                                      | 500                 |
| Toz                       | 10 mg/ Nm <sup>3</sup> (kuru, %6 O <sub>2</sub> )<br>18,74 kg/saat                       | 30                            | 5 - 10                                                                            | 5                                                                                           | 10                  |
| HCl                       | 20 mg/ Nm <sup>3</sup> (kuru, %6 O <sub>2</sub> )<br>37,48 kg/saat                       | 100                           | -                                                                                 | < 1 - 5                                                                                     | 20                  |
| HF                        | 2,5 mg/ Nm <sup>3</sup> (kuru, %6 O <sub>2</sub> )<br>4,69 kg/saat                       | 15                            | -                                                                                 | < 0,1 - 2                                                                                   | 2                   |
| Baca gaz debisi           | 1 874 000 Nm <sup>3</sup> /saat (kuru)<br>2 363 560 m <sup>3</sup> /saat (baca şartları) | -                             | -                                                                                 | -                                                                                           | -                   |
| Baca gazı çıkış sıcaklığı | 50 °C                                                                                    | -                             | -                                                                                 | -                                                                                           | -                   |
| Baca gaz çıkış hızı       | 23,22 m/s                                                                                | -                             | -                                                                                 | -                                                                                           | -                   |
| Baca çıkışı iç çapı       | 6 m                                                                                      | -                             | -                                                                                 | -                                                                                           | -                   |
| Baca yüksekliği           | 220 m                                                                                    | -                             | -                                                                                 | -                                                                                           | -                   |

**Tablo 20.** Emisyonlar ve ilgili ulusal / uluslararası sınır değerler / standartlar  
[MGS PROJE MÜŞAVİRLİK MÜHENDİSLİK (2014), S. ]

\*) Değerler, bir ünite içindir.

BYTY: Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği

IPPC: AB Entegre kirlilik önleme ve kontrolü direktifi (*Integrated Pollution Prevention and Control*)

BREF: Mevcut en iyi teknolojiler en iyi teknikler referans dokümanı  
(*Best Available Techniques Reference Documents*)

SKHKKY: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği

HF: Hidroflorik asit

- Kurulması planlanan santral SKHKKY’de belirtilen hüküm ve sınır değerlere de uygun olarak işletilecektir. Aynı zamanda **Tablo 20**’de görüldüğü gibi, santralden atmosfere salınacak kirlletici konsantrasyonları BYTY’de belirtilen sınır değerleri de sağlamaktadır.
- BYTY uyarınca, santralde bulunacak bacalara sürekli emisyon ölçüm sistemi (SEÖS) kurularak baca gazı emisyonları sürekli olarak ölçülecek ve kayıt altına

alınacaktır. Bu sistemde SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO ve toz emisyonları ile basınç, sıcaklık, gaz debisi ve nem ölçmek için ayrı çalışabilen elektronik cihazlar yer alacaktır. Emisyon ölçüm sonuçları online bağlantı ile Valilik ve/veya ÇŞB'na iletilecektir.

- Santralin işletme döneminde, tesis etki alanında belirlenecek ve yetkili makamların onayı alınacak bir noktaya hava kalitesi sürekli ölçüm istasyonu kurularak SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, toz ve CO parametrelerine ait yer seviyesi konsantrasyonları ile rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü gibi meteorolojik parametreler sürekli ölçülecektir. Böylelikle santralden kaynaklanacak baca gazı emisyonlarının yer seviyesindeki konsantrasyon (YSK) değerleri üzerinde herhangi bir etki yapıp yapmadığı belirlenebilecektir.
- HKDYY (Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği), ortam hava kalitesinin kademeli olarak iyileştirilmesi ve hedeflenen bir tarihte belirlenen limit değerlerin (**Tablo 21**) sağlanmasını amaçlamaktadır. Limit değerleri [HKDYY (2008), S. ]'te kapsamlı olarak görmek mümkündür.

| Kirletici       | Ortalama Süre                                     | Limit Değer (µg/m <sup>3</sup> )                | Tolerans Payı                                                                                                                                                                        | Limit Değere Ulaşılabilecek Tarih |
|-----------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| SO <sub>2</sub> | Saatlik (insan sağlığının korunması için)         | 350<br>(bir yılda 24 defadan fazla aşılamaz) 1) | 1.1.2014 tarihinde 150 µg/m <sup>3</sup> (limit değerin % 43'ü) ve 1.1.2019 tarihine kadar tolerans payı sıfırlanacak şekilde her 12 ayda bir eşit miktarda yıllık olarak azaltılır. | 1.1.2019                          |
|                 | 24 saatlik (insan sağlığının korunması için)      | 125<br>(bir yılda 3 defadan fazla aşılamaz) 2)  | 1.1.2014 tarihinde 125 µg/m <sup>3</sup> (limit değerin %100'ü) ve 1.1.2019 tarihine kadar tolerans payı sıfırlanacak şekilde her 12 ayda bir eşit miktarda yıllık olarak azaltılır. | 1.1.2019                          |
|                 | Yıllık ve kış dönemi (ekosistemin korunması için) | 20                                              |                                                                                                                                                                                      | 1.1.2014                          |
| NO <sub>2</sub> | Saatlik (insan sağlığının korunması için)         | 200<br>(bir yılda 18 defadan fazla aşılamaz) 3) | 1.1.2014 tarihinde 100 µg/m <sup>3</sup> (limit değerin %50'si) ve 1.1.2024 tarihine kadar tolerans payı sıfırlanacak şekilde her 12 ayda bir eşit miktarda yıllık olarak azaltılır. | 1.1.2024                          |
|                 | Yıllık (insan sağlığının korunması için)          | 40                                              | 1.1.2014 tarihinde 20 µg/m <sup>3</sup> (limit değerin %50'si) ve 1.1.2024 tarihine kadar tolerans payı sıfırlanacak şekilde her 12 ayda bir eşit miktarda yıllık olarak azaltılır   | 1.1.2024                          |
| NO              | Yıllık (vejetasyonun korunması için)              | 30                                              |                                                                                                                                                                                      | 1.1.2014                          |

|                  |                                                                      |                                                |                                                                                                                                                                                         |          |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| PM <sub>10</sub> | 24 saatlik (insan sağlığının korunması için)                         | 50<br>(bir yılda 35 defadan fazla aşılamaz) 4) | 1.1.2014 tarihinde 50 µg/m <sup>3</sup> (limit değerin %100'u) ve 1.1.2019 tarihine kadar tolerans payı sıfırlanacak şekilde her 12 ayda bir eşıit miktarda yıllık olarak azaltılır.    | 1.1.2019 |
|                  | Yıllık (insan sağlığının korunması için)                             | 40                                             | 1.1.2014 tarihinde 20 µg/m <sup>3</sup> (limit değerin %50'si) ve ve 1.1.2019 tarihine kadar tolerans payı sıfırlanacak şekilde her 12 ayda bir eşıit miktarda yıllık olarak azaltılır. | 1.1.2019 |
| CO               | Maksimum günlük 8 saatlik ortalama (insan sağlığının korunması için) | 10 000                                         | 1.1.2014 tarihinde 6,000 µg/m <sup>3</sup> (limit değerin %60'ı) ve 1.1.2017 tarihine kadar tolerans payı sıfırlanacak şekilde her 12 ayda bir eşıit miktarda yıllık olarak azaltılır   | 1.1.2017 |

**Tablo 21 . HKDYY de belirtilen sınır değerler**  
[MGS PROJE M   AVIRLIK M  HENDİSLİK (2014), S. ]

- 1) Herhangi bir noktadaki saatlik ölçüm sonuçları büyükten k  ğ e doğru sıralandığında sonuçların %99,73'ünün aşılamaması gereken değerdir
- 2) Herhangi bir noktadaki günlük ölçüm sonuçları büyükten k  ğ e doğru sıralandığında sonuçların %99,18'inin aşılamaması gereken değerdir.
- 3) Herhangi bir noktadaki saatlik ölçüm sonuçları büyükten k  ğ e doğru sıralandığında sonuçların %99,79'unun aşılamaması gereken değerdir.
- 4) Herhangi bir noktadaki günlük ölçüm sonuçları büyükten k  ğ e doğru sıralandığında sonuçların %90,41'inin aşılamaması gereken değerdir.

Hava kirliliği ve sağlık etkileri ile ilgili verebildiğimiz bilgilere karşı, Sayfa 129'da sorduğumuz sorulara genel değerlendirme yapmamız bağlamında acaba uygun bir cevap verebilir miyiz?

#### XIV. Soğutma suyu deniz deşarj sistemi (irdeleme):

Özetleyelim:

- Santral için gerekli soğutma suyunun tamamı Karadeniz'den karşılanacaktır.
- Kondansör ve yardımcı soğutma suyu miktarı 162 900 m<sup>3</sup>/saat tir (Sayfa 43).  
Deniz suyu sıcaklığı ortalama 20°C alınır,

$$(\dot{m}_{\text{soğutmasuyu, 20°C, 4 kPa}})_{\text{hesap}} \cong 155\,000 \text{ t/h} \quad (\text{Sayfa 43})$$

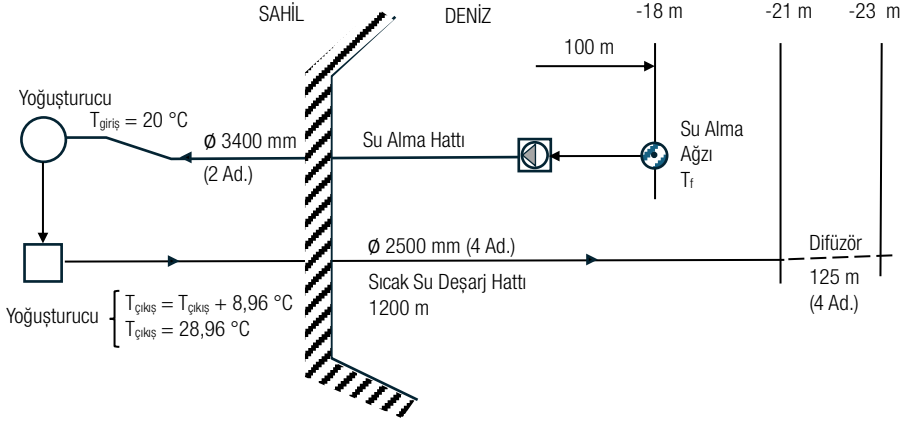
ve kondansörden çıkan, yani denize deşarj olacak (**Şekil 6**) suyun sıcaklığı

$$p = 4 \text{ kPa için } T_{\text{doyma}} = 28,96 \text{ °C} \quad (\text{Sayfa 38})$$

dir.

- Kıydan 100 m mesafede ve 18 m su derinliğinde bulunan bir yere 'Su alma ünitesi' kurulacak; su filtrasyondan geçtikten sonra pompalarla kondansörlere basılacaktır.
- Pompa binasından kondansörlere su taşıyan iki adet hat 3 400 mm çaplı borulardan oluşacaktır.
- Kondansörde (yoğuşturucu) ısınan deniz suyu (28,96°C) yaklaşık 1 200 metre uzaklıkta 4 adet ø 2 500 mm çapındaki borularla deşarj hattını meydana getirecektir (**Şekil 7**).
- Deşarj hattına bağlı, 21 metre su derinliğinden başlayarak 23 metre su derinliğine kadar her biri 125 metre ve toplamda 500 metre uzunluğunda difüzör sistemi yerleştirilecektir (**Şekil 8**).

Bu bilgiler, ÇED raporlarından alınmıştır, hatalar olabilir; ancak genel bir değerlendirme yapılacağından (irdeleme) bazı sonuçlar elde edebiliriz. Önce, şematik olarak pompalama sistemini ÖZTÜRK (2011)'den de faydalanarak çizelim (**Şekil 36**) [ÖZTÜRK (2011), S. ].



**Şekil 36.** Denizden su alma ve sıcak su dönüş sistemi şematik planı

Şimdi sıcak su deşarj hattında bulunan boruların dış yüzeyine ait sıcaklık dağılımını inceleyelim:

Proje debisi:  $Q_{top} = 160\,000\text{ m}^3/\text{h}$  (Kabul)

Yoğuşturucudan çıkan

suyun sıcaklığı:  $T_1 = 28,96^\circ\text{C}$

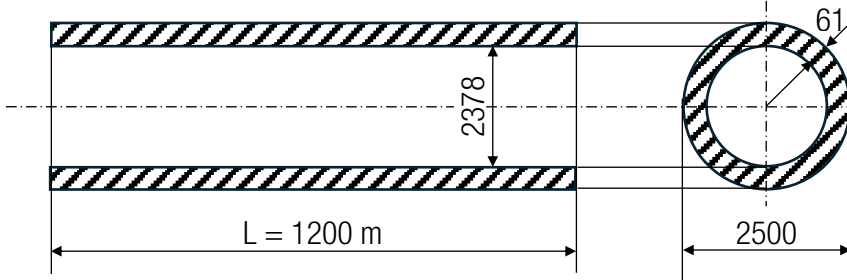
Boru çapı:  $d = 2\,500\text{ mm}$  (Dış)

Boru adedi:  $n = 4$

Boru boyu:  $L = 1\,200\text{ m}$  (Difüzör kadar)

Boru özelliği: HDPE (High Density Polyethylene - yüksek yoğunluklu Polietilen hammadde ile üretilmiş)

Sıcak su deşarj borusu:



Şekildeki boyutlarda (yaklaşık) HDPE malzemeden yapılmış olup (cidar pürüzlükleri az, dolayısıyla sürtünme kayıpları düşüktür. ÖZTÜRK (2011)'e göre Darcy pürüzlülük katsayısı  $f = 0,02 \dots 0,03$  alınmıştır. 4 adettir.

2 378 mm çaplı sıcak su deşarj hattı borusundaki ortalama akışkan hızını hesaplayalım:

$$Q_{\text{top}} = 160\,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\text{boru}} = \frac{Q_{\text{top}}}{4} = \frac{160\,000}{4}$$

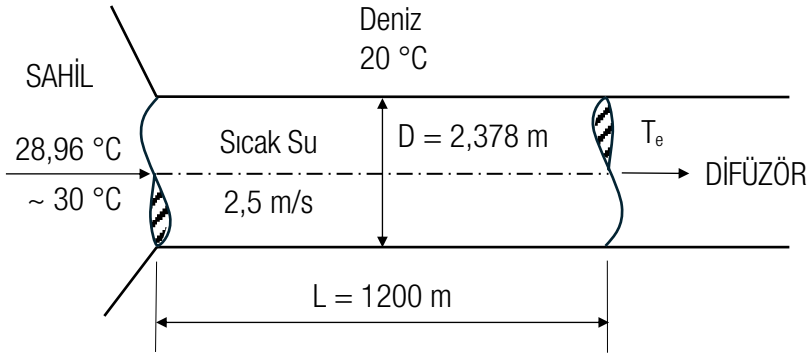
$$Q_{\text{boru}} = 40\,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\text{boru}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot V_{\text{ort}}$$

$$\frac{40\,000}{3\,600} \text{ m}^3/\text{s} = \frac{\pi (2,378)^2}{4} \cdot V_{\text{ort}}$$

$$V_{\text{ort}} = 2,5 \text{ m/s}$$

Şöyle bir problem olsa



2,378 m çaplı bir boru hattından  $28,96 \text{ °C}$ 'de ve  $2,5 \text{ m/s}$  hızla akan sıcak su akışını göz önüne alalım. Boru hattı 1 200 metre olup tamamen deniz altındadır. Borunun yüzey sıcaklığı hemen hemen  $20 \text{ °C}$  alınabilir.

Boru malzemesinin ısıl direncini ihmal ederek borunun  $L = 1\,200 \text{ m}$  sinde, yani difüzöre geçiş yerindeki akışkan sıcaklığını bulunuz:

Kabuller:

- ▶ Sürekli işlem söz konusudur (İşletme süresi yılda 7 400 saat);
- ▶ Borunun yüzey sıcaklığı  $20 \text{ °C}$ 'ye çok çok yakındır;
- ▶ Borunun ısıl direnci ihmal edilebilmektedir;
- ▶ Boru hattının iç yüzeyleri pürüzsüzdür.

Özellikler:

Sıcak suyun difüzöre geçiş yerindeki ( $L = 1\,200 \text{ m}$ ) sıcaklığı bilinmemekte ve dolayısıyla sıcak suyun özelliklerinin belirleneceği sıcaklık olan ortalama sıcaklık bulunamamaktadır. Girişte sıcak suyun sıcaklığı  $28,96 \text{ °C}$  dir ve denizin soğuk suyuna olan ısı kaybının bir sonucu olarak bu sıcaklığın bir miktar düşmesi

beklenir. Sıcak suyun özellikleri giriş sıcaklığında hesaplanır, fakat gerekirse hesaplamalar, ortalama sıcaklıkta alınan özellikler kullanılarak tekrarlanacaktır. Kolaylık olması açısından ve birbirine çok yakın değerler olması nedeniyle 28,96 °C yerine giriş sıcaklığını 30 °C olarak alalım. 30 °C için **Tablo 22**'den

| Sıcaklık<br>T °C | Doyma Basıncı<br>P <sub>doym</sub> , kPa | Özgül Kütle<br>ρ, kg/m <sup>3</sup> |        | Buharlaşma<br>Entalpisi<br>h <sub>fg</sub> , kJ/kg | Özgül Isı<br>c <sub>p</sub> , J/kg · K |       | Isıl İletkenlik<br>k, W/m · K |        | Dinamik Viskozite<br>μ, kg/m · s |                          | Prandtl<br>Sayısı Pr |       | Hacimsel<br>Genleşme<br>Katsayısı<br>β, 1/K |
|------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|--------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|-------|-------------------------------|--------|----------------------------------|--------------------------|----------------------|-------|---------------------------------------------|
|                  |                                          | Sıvı                                | Buhar  |                                                    | Sıvı                                   | Buhar | Sıvı                          | Buhar  | Sıvı                             | Buhar                    | Sıvı                 | Buhar |                                             |
| 0,01             | 0,6113                                   | 999,8                               | 0,0048 | 2501                                               | 4217                                   | 1854  | 0,561                         | 0,0171 | 1,792 · 10 <sup>-3</sup>         | 0,922 · 10 <sup>-5</sup> | 13,5                 | 1,00  | - 0,068 · 10 <sup>-3</sup>                  |
| 5                | 0,8721                                   | 999,9                               | 0,0068 | 2490                                               | 4205                                   | 1857  | 0,571                         | 0,0173 | 1,519 · 10 <sup>-3</sup>         | 0,934 · 10 <sup>-5</sup> | 11,2                 | 1,00  | 0,015 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 10               | 1,2276                                   | 999,7                               | 0,0094 | 2478                                               | 4194                                   | 1862  | 0,580                         | 0,0176 | 1,307 · 10 <sup>-3</sup>         | 0,946 · 10 <sup>-5</sup> | 9,45                 | 1,00  | 0,733 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 15               | 1,7051                                   | 999,1                               | 0,0128 | 2466                                               | 4185                                   | 1863  | 0,589                         | 0,0179 | 1,138 · 10 <sup>-3</sup>         | 0,959 · 10 <sup>-5</sup> | 8,09                 | 1,00  | 0,138 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 20               | 2,339                                    | 998,0                               | 0,0173 | 2454                                               | 4182                                   | 1867  | 0,598                         | 0,0182 | 1,002 · 10 <sup>-3</sup>         | 0,973 · 10 <sup>-5</sup> | 7,01                 | 1,00  | 0,195 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 25               | 3,169                                    | 997,0                               | 0,0231 | 2442                                               | 4180                                   | 1870  | 0,607                         | 0,0186 | 0,891 · 10 <sup>-3</sup>         | 0,987 · 10 <sup>-5</sup> | 6,14                 | 1,00  | 0,247 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 30               | 4,246                                    | 996,0                               | 0,0304 | 2431                                               | 4178                                   | 1875  | 0,615                         | 0,0189 | 0,798 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,001 · 10 <sup>-5</sup> | 5,42                 | 1,00  | 0,294 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 35               | 5,628                                    | 994,0                               | 0,0397 | 2419                                               | 4178                                   | 1880  | 0,623                         | 0,0192 | 0,720 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,016 · 10 <sup>-5</sup> | 4,83                 | 1,00  | 0,337 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 40               | 7,384                                    | 992,1                               | 0,0512 | 2407                                               | 4179                                   | 1885  | 0,631                         | 0,0196 | 0,653 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,031 · 10 <sup>-5</sup> | 4,32                 | 1,00  | 0,377 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 45               | 9,593                                    | 990,1                               | 0,0655 | 2395                                               | 4180                                   | 1892  | 0,637                         | 0,0200 | 0,596 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,046 · 10 <sup>-5</sup> | 3,91                 | 1,00  | 0,415 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 50               | 12,35                                    | 988,1                               | 0,0831 | 2383                                               | 4181                                   | 1900  | 0,644                         | 0,0204 | 0,547 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,062 · 10 <sup>-5</sup> | 3,55                 | 1,00  | 0,451 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 55               | 15,76                                    | 985,2                               | 0,1045 | 2371                                               | 4183                                   | 1908  | 0,649                         | 0,0208 | 0,504 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,077 · 10 <sup>-5</sup> | 3,25                 | 1,00  | 0,484 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 60               | 19,94                                    | 983,3                               | 0,1304 | 2359                                               | 4185                                   | 1916  | 0,654                         | 0,0212 | 0,467 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,093 · 10 <sup>-5</sup> | 2,99                 | 1,00  | 0,517 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 65               | 25,03                                    | 980,4                               | 0,1614 | 2346                                               | 4187                                   | 1926  | 0,659                         | 0,0216 | 0,433 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,110 · 10 <sup>-5</sup> | 2,75                 | 1,00  | 0,548 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 70               | 31,19                                    | 977,5                               | 0,1983 | 2334                                               | 4190                                   | 1936  | 0,663                         | 0,0221 | 0,404 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,126 · 10 <sup>-5</sup> | 2,55                 | 1,00  | 0,578 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 75               | 38,58                                    | 974,7                               | 0,2421 | 2321                                               | 4193                                   | 1948  | 0,667                         | 0,0225 | 0,378 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,142 · 10 <sup>-5</sup> | 2,38                 | 1,00  | 0,607 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 80               | 47,39                                    | 971,8                               | 0,2935 | 2309                                               | 4197                                   | 1962  | 0,670                         | 0,0230 | 0,355 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,159 · 10 <sup>-5</sup> | 2,22                 | 1,00  | 0,653 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 85               | 57,83                                    | 968,1                               | 0,3536 | 2296                                               | 4201                                   | 1977  | 0,673                         | 0,0235 | 0,333 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,176 · 10 <sup>-5</sup> | 2,08                 | 1,00  | 0,670 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 90               | 70,14                                    | 965,3                               | 0,4235 | 2283                                               | 4206                                   | 1993  | 0,675                         | 0,0240 | 0,315 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,193 · 10 <sup>-5</sup> | 1,96                 | 1,00  | 0,702 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 95               | 84,55                                    | 961,5                               | 0,5045 | 2270                                               | 4212                                   | 2010  | 0,677                         | 0,0246 | 0,297 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,210 · 10 <sup>-5</sup> | 1,85                 | 1,00  | 0,716 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 100              | 101,33                                   | 957,9                               | 0,5978 | 2257                                               | 4217                                   | 2029  | 0,679                         | 0,0251 | 0,282 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,227 · 10 <sup>-5</sup> | 1,75                 | 1,00  | 0,750 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 110              | 143,27                                   | 950,6                               | 0,8263 | 2230                                               | 4229                                   | 2071  | 0,682                         | 0,0262 | 0,255 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,261 · 10 <sup>-5</sup> | 1,58                 | 1,00  | 0,798 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 120              | 198,53                                   | 943,4                               | 1,121  | 2203                                               | 4244                                   | 2120  | 0,683                         | 0,0275 | 0,232 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,296 · 10 <sup>-5</sup> | 1,44                 | 1,00  | 0,858 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 130              | 270,1                                    | 934,6                               | 1,496  | 2174                                               | 4263                                   | 2177  | 0,684                         | 0,0288 | 0,213 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,330 · 10 <sup>-5</sup> | 1,33                 | 1,01  | 0,913 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 140              | 361,3                                    | 921,7                               | 1,965  | 2145                                               | 4286                                   | 2244  | 0,683                         | 0,0301 | 0,197 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,365 · 10 <sup>-5</sup> | 1,24                 | 1,02  | 0,970 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 150              | 475,8                                    | 916,6                               | 2,546  | 2114                                               | 4311                                   | 2314  | 0,682                         | 0,0316 | 0,183 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,399 · 10 <sup>-5</sup> | 1,16                 | 1,02  | 1,025 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 160              | 617,8                                    | 907,4                               | 3,256  | 2083                                               | 4340                                   | 2420  | 0,680                         | 0,0331 | 0,170 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,434 · 10 <sup>-5</sup> | 1,09                 | 1,05  | 1,145 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 170              | 791,7                                    | 897,7                               | 4,119  | 2050                                               | 4370                                   | 2490  | 0,677                         | 0,0347 | 0,160 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,468 · 10 <sup>-5</sup> | 1,03                 | 1,05  | 1,178 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 180              | 1002,1                                   | 887,3                               | 5,153  | 2015                                               | 4410                                   | 2590  | 0,673                         | 0,0364 | 0,150 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,502 · 10 <sup>-5</sup> | 0,983                | 1,07  | 1,210 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 190              | 1254,4                                   | 876,4                               | 6,388  | 1979                                               | 4460                                   | 2710  | 0,669                         | 0,0382 | 0,142 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,537 · 10 <sup>-5</sup> | 0,947                | 1,09  | 1,280 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 200              | 1553,8                                   | 864,3                               | 7,852  | 1941                                               | 4500                                   | 2840  | 0,663                         | 0,0401 | 0,134 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,571 · 10 <sup>-5</sup> | 0,910                | 1,11  | 1,350 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 220              | 2318                                     | 840,3                               | 11,60  | 1859                                               | 4610                                   | 3110  | 0,650                         | 0,0442 | 0,122 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,641 · 10 <sup>-5</sup> | 0,865                | 1,15  | 1,520 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 240              | 3344                                     | 813,7                               | 16,73  | 1767                                               | 4760                                   | 3520  | 0,632                         | 0,0487 | 0,111 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,712 · 10 <sup>-5</sup> | 0,836                | 1,24  | 1,720 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 260              | 4688                                     | 783,7                               | 23,69  | 1663                                               | 4970                                   | 4070  | 0,609                         | 0,0540 | 0,102 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,788 · 10 <sup>-5</sup> | 0,832                | 1,35  | 2,000 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 280              | 6412                                     | 750,8                               | 33,15  | 1544                                               | 5280                                   | 4835  | 0,581                         | 0,0605 | 0,094 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,870 · 10 <sup>-5</sup> | 0,854                | 1,49  | 2,380 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 300              | 8581                                     | 713,8                               | 46,15  | 1405                                               | 5750                                   | 5980  | 0,548                         | 0,0695 | 0,086 · 10 <sup>-3</sup>         | 1,965 · 10 <sup>-5</sup> | 0,902                | 1,69  | 2,950 · 10 <sup>-3</sup>                    |
| 320              | 11274                                    | 667,1                               | 64,57  | 1239                                               | 6540                                   | 7900  | 0,509                         | 0,0836 | 0,078 · 10 <sup>-3</sup>         | 2,084 · 10 <sup>-5</sup> | 1,00                 | 1,97  |                                             |
| 340              | 14586                                    | 610,5                               | 92,62  | 1028                                               | 8240                                   | 11870 | 0,469                         | 0,1100 | 0,070 · 10 <sup>-3</sup>         | 2,255 · 10 <sup>-5</sup> | 1,23                 | 2,43  |                                             |
| 360              | 18651                                    | 528,3                               | 144,0  | 720                                                | 14690                                  | 25800 | 0,427                         | 0,1780 | 0,060 · 10 <sup>-3</sup>         | 2,571 · 10 <sup>-5</sup> | 2,06                 | 3,73  |                                             |
| 374,14           | 22090                                    | 317,0                               | 317,0  | 0                                                  | -                                      | -     | -                             | -      | 0,043 · 10 <sup>-3</sup>         | 4,313 · 10 <sup>-5</sup> |                      |       |                                             |

**Not 1:** Kinematik viskozite  $\nu$  ve ısıl yayılım katsayısı  $\alpha$  tanımları olan  $\nu = \mu/\rho$  ve  $\alpha = k/\rho c_p = \nu/\text{Pr}$  'dan bulunabilir. 0.01 °C, 100 °C ve 374,14 °C sıcaklıklarda, suyun sırasıyla üçlü, kaynama ve kritik nokta sıcaklıklardır. Yukarıda - buhar yoğunluğu dışındaki - listelenen özellikler, -kritik nokta değerine yakın sıcaklıklarda dışında bütün basınçlarda - ihmal edilebilir hatayla - kullanılabilir.

**Not 2:** Özgül ısı için kJ/kg °C birimi, kJ/kg · K 'ye ve ısıl iletkenlik için W/m °C birimi W/m · K'e eşdeğerdir.

Kaynak: Viskozite ve ısıl iletkenlik verileri, J. V. SENGERS ve J. T. R. WATSON, Journal of Physical and Chemical Reference Data 15 (1986), pp. 1291-1322 'den alınmıştır. Diğer veriler ise çeşitli kaynaklardan derlenmiş veya hesaplanmıştır.

**Tablo 22.** Doymuş suyun özellikleri  
[ÇENGEL (2011), S. ]

$\rho$ : yoğunluk

$\rho = 996,0 \text{ kg/m}^3$

$c_p$  = Sabit basınçta özgül ısı

$c_p = 4178 \text{ J/(kg.k)}$

$k$  = Isı iletim katsayısı

$$k = 0,615 \text{ w/(m.K)}$$

$\mu$  = Dinamik Viskozite

$$\mu = 0,798 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}$$

Pr = Prandtl sayısı

$$Pr = 5,42$$

Reynolds sayısı

$$Re = \frac{\rho \cdot V_{ort} \cdot D}{\mu} = \frac{V_{ort} \cdot D}{\nu} \quad (62)$$

$$Re = \frac{996 \cdot 2,5 \cdot 2,378}{0,798 \cdot 10^{-3}}$$

$$Re = 7\,420\,075$$

[ÇENGEL (2011), S. ]'den faydalananak bir borudaki akışta akış

$$\begin{array}{l} Re < 2\,300 \text{ için laminar} \\ Re > 10\,000 \text{ için türbülanslı} \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \text{dır.} \end{array} \right.$$

Boru şebekeleri tasarlandığında ve pompa gücünün belirlenmesi gerektiğinde ölçülü bir yaklaşımla  $Re > 4\,000$  için akışlar türbülanslı olarak kabul edilir.

$$Re = 7\,420\,075 > 10\,000$$

dolayısıyla akış türbülanslıdır.

Bazı bilgiler verelim:

Pürüzsüz borular için türbülanslı akışta sürtünme faktörü

$$\begin{array}{l} 3\,000 < Re < 5 \cdot 10^6 \text{ için} \\ f = (0,790 \ln Re - 1,64)^{-2} \end{array} \quad (63)$$

Petukhov (1970) denklemi ile verilmiştir. Türbülanslı akışta Nusselt sayısı sürtünme faktörü ile Chilton-Colburn tarafından

$$Nu = 0,125 f \cdot Re \cdot Pr^{1/3} \quad (64)$$

şeklinde verilmiştir. Sürtünme faktörü için basit

$$f = 0,184 \cdot Re^{-0,2} \quad (65)$$

eşitliği göz önüne alınırsa

$$\begin{array}{l} Nu = 0,125 \cdot (0,184 \cdot Re^{-0,2}) \cdot Re \cdot Pr^{1/3} \\ Nu = 0,0023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \left( \begin{array}{l} 0,7 \leq Pr \leq 160 \\ Re > 10\,000 \end{array} \right) \end{array} \quad (66)$$

ifadesi 'Colburn eşitliği' olarak bilinir. Bu denklem

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (67)$$

$n = 0,4$  Borudan akan akışkanın ısıtılması

$n = 0,3$  Borudan akan akışkanın soğutulması

hali için yazılabilir ('Dittus-Boelter denklemi')

Borudan akan akışkan soğuyacağına göre,

$$N_u = 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \quad (\text{Eşitlik 67})$$

$$N_u = 0,023 \cdot (7\,420.075)^{0,8} \cdot (5,42)^{0,3}$$

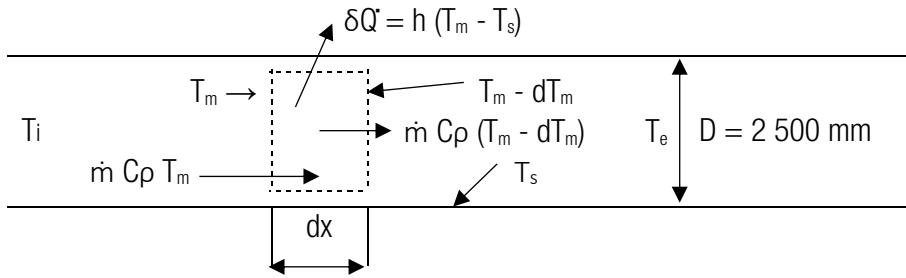
$$N_u = 11\,974,4$$

Boru içindeki türbülanslı akışı incelemeye devam edelim.

Boru yüzey sıcaklığı sabit  $T_s = 20\,^{\circ}\text{C}$  ile işleme girelim. Boruda kontrol hacmi seçerek enerji etkileşimlerini gösterelim (**Şekil 37**).

Bir boruda akan akışkandan olan ısı geçişi,

$$Q = h \cdot A_s \cdot \Delta T_{\text{ort}} = h A_s (T_m - T_s)_{\text{ort}} \quad (68)$$



**Şekil 37.** Bir boruda kontrol hacmi için enerji etkileşimleri  
[ÇENGEL (2011), S. ]

Burada

$A_s$  - Isı geçiş yüzeyi,

$h$  - Taşınım ısı geçiş katsayısı (ısı taşıma katsayısı)

$T_s$  - sabit yüzey sıcaklığı ( $T_s = 20\,^{\circ}\text{C}$  = deniz suyu sıcaklığı)

$\Delta T_{\text{ort}}$  - Akışkan ile yüzey arasındaki ortalama sıcaklık farkı

$$\Delta T_{\text{ort}} = \frac{\Delta T_i + \Delta T_e}{2} = \frac{(T_i - T_s) + (T_e - T_s)}{2}$$

$$\Delta T_{\text{ort}} = \frac{T_i + T_e}{2} - T_s$$

$T_b$  - Aritmetik ortalama sıcaklık

$$\Delta T_{\text{ort}} = T_b - T_s \quad (69)$$

Kontrol hacmi üzerinde enerji dengesini yazalım:

$$\dot{m} C_p T_m = - h (T_m - T_s) dA_s$$

Yani akışkan enerjisindeki azalma (akışkanın ortalama sıcaklığında  $dT_m$  kadar azalma ile gösterilir) taşınım yoluyla boru yüzeyinden dış ortama (denize) aktarılan ısıya eşittir.  $T_s$  sabit olduğunda

$$dT_m = d(T_m - T_s)$$

$$dA_s = p \cdot dx \text{ (p boru çevresidir)}$$

olduğu dikkate alınarak yukarıdaki ifade

$$\dot{m} C_p d(T_m - T_s) = -h(T_m - T_s) p \cdot dx$$

$$\frac{d(T_m - T_s)}{2a} = -\frac{h \cdot p}{\dot{m} C_p} dx$$

şeklinde düzenlenebilir.

$$x = 0 \text{ için } T_m = T_i$$

$$x = L \text{ için } T_m = T_e$$

sınırlarında denklem entegre edilirse,

$$\begin{aligned} \ln \frac{T_m - T_s}{T_m - T_s} \bigg|_{x=0 \rightarrow T_m=T_i}^{x=L \rightarrow T_m=T_e} &= -\frac{h \cdot p}{\dot{m} C_p} x \bigg|_0^L \\ \ln \frac{T_e - T_s}{T_i - T_s} &= -\frac{h p L}{\dot{m} C_p} \end{aligned}$$

$p = \pi \cdot D$  (dış çap alınmıştır; ısı geçişi boru dış yüzeyinden ortama olmaktadır)

$$\ln \frac{T_e - T_s}{T_i - T_s} = -\frac{h \cdot A_s}{\dot{m} C_p}$$

$$\frac{T_e - T_s}{T_i - T_s} = e^{-\frac{h \cdot A_s}{\dot{m} C_p}}$$

$$T_e = T_s + (T_i - T_s) \cdot e^{-\frac{h \cdot A_s}{\dot{m} C_p}} \quad (70)$$

sıcaklık denklemi elde edilir.

Isı taşınım katsayısı  $h$ ,

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (71)$$

$$11.974,4 = \frac{h \cdot 2,5}{0,615}$$

$$h = 2945,7 \text{ w/(m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

Isı geçiş yüzeyi  $A_s$ ,

$$A_s = \pi D L \rightarrow A_s = \pi \cdot 2,5 \cdot 1\,200$$

$$A_s = 9\,424,8 \text{ m}^2$$

Kütle debisi  $\dot{m}$

$$\dot{m} = Q \cdot \rho = 40\,000 / 3\,600 \cdot 996$$

$$\dot{m} = 11\,066,7 \text{ kg/s}$$

$$T_e = 20 \text{ }^\circ\text{C} + (30 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) e^{-\frac{2\,945,7 \cdot 9\,424,8}{11\,066,7 \cdot 4\,178}}$$

$$T_e = 20 \text{ }^\circ\text{C} + 10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot e^{-0,6}$$

$$T_e = 20 \text{ }^\circ\text{C} + 10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 0,55$$

$$T_e = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

olarak difüzöre giriş sıcaklığı bulunur. Yani 1 200 metre boru sonunda sıcaklık  $30^\circ - 25,5 \text{ }^\circ\text{C} = 4,5 \text{ }^\circ\text{C}$  düşmüştür. Bu sıcaklık difüzörde seyrelme işlemlerinden sonra daha da düşecektir ve sınır değerlerine ulaşacaktır diye düşünüyorum.

21 Haziran 2021, saat 11:45



## LİTERATÜR

AR-GE VE TASARIM (web sitesi). Teknoloji, İnovasyon, Mühendislik. Erişim tarihi. / / 2??? URL : ???

BÜYÜKTÜR, Ahmet Rasim (1985). Termodinamik 2. Cilt (Bursa: Uludağ Üniversitesi).

ÇED İZİN VE DENETİM GENEL MÜDÜRLÜĞÜ (2017). 1. Ulusal Hava Kalitesi Yönetimi Çalıştayı (Afyonkarahisar: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı). URL: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/haberler/haberler158701.pdf> Erişim tarihi: 24.7.2024.

ÇENGEL, Yunus A, Taner DERBENTLİ (1996). Termodinamik (İstanbul: Literatür Yayıncılık)

ÇENGEL, Yunus A. (2011). Isı ve Kütle Transferi - Pratik Bir Yaklaşım. Çeviri: Vedat TANYILDIZI, 3. Baskı (İzmir: Güven Kitabevi).

ÇENGEL, Yunus A., Michael A. BOLES (2013). Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla, Çeviri: Ali PINARBAŞI, 7. Baskı (Ankara: Palme Kitabevi).

ÇINAR MÜHENDİSLİK (2009). ÇED Raporu, Ankara.

DOKAY MÜHENDİSLİK (2019). Amasra Kömür Madeni Projesi Uluslararası Kredi Kuruluşlarına Yönelik Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirme (ÇSED) Raporu), (Ankara: Dokay Mühendislik Ltd.), Cilt 1.

ETİLER, Nilay, Ayşe YIKICI, Onur AKGÜL (2020). Eskişehir Alpu Kömürlü Termik Santrali Sağlık Etki Değerlendirmesi Raporu. Erişim: 24.7.2024. URL: <https://komuretme.org/wp-content/uploads/2022/09/eskisehir-alpu.pdf>

GÜNAY, Aysen (2015). Entegre kirlilik önleme ve kontrolü. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Bitirme Tezi.

HALK SAĞLIĞI GENEL MÜDÜRLÜĞÜ. Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri. Erişim: 24.7.2024. URL: <https://hsgm.saglik.gov.tr/tr/ced/hava-kirliligi.html>

HEPER, Yaver (2001). Buhar Santralleri Teorisi ve Uygulaması (Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı).

HKDYY - Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. Resmi Gazete 6 Haziran 2008, sayı 26898. URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/06/20080606-6.htm>

INCROPERA, Frank P., David P. DEWITT (2001). Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri. Çeviri: Taner DERBENTLİ, Osman GENCELİ (İstanbul: Literatür Yayınları).

- İLKILIÇ, Cumali, Rasim BEHÇET (2006). Hava kirliliğinin İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerindeki Etkisi. Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 5 (1), 66-72. URL <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/762464> Erişim tarihi: 24.7.2024,
- JONES J. B., R. E. DUGAN (2003). Mühendislik Termodinamiği (İstanbul: Beta Basım Yayın) Çeviri: Hamra ATILGAN, 1. Baskı.
- MGS PROJE MÜŞAVİRLİK MÜHENDİSLİK (2014). ÇED Raporu. Ankara.
- ONAT, Kemal, Osman F. GENÇELİ, Ahmet ARISOY (2007). Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları (İstanbul: Birsan Yayınevi).
- ÖZTÜRK, İzzet (2011). Deniz Deşarjı Tesisleri Tasarımı (İstanbul: Su Vakfı Yayınları)
- ÖZTÜRK, Mustafa (2017). Hava Kirliliğini Artıran Sıcaklık İnversiyonu (Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı).
- SAĞLIK VE ÇEVRE BİRLİĞİ (2015). Ödenmeyen Sağlık Faturası: Türkiye’de Kömürlü Termik Santraller Bizi Nasıl Hasta Ediyor? HEAL Health and Environment Alliance (Ankara: İris İletişim). Erişim: 24.7.2024. URL: [https://env-health.org/IMG/pdf/03072015\\_heal\\_odenmeyensaglikfaturasi\\_tr\\_2015\\_final.pdf](https://env-health.org/IMG/pdf/03072015_heal_odenmeyensaglikfaturasi_tr_2015_final.pdf)
- SEVİNÇ, Canip (2021). Kişisel görüşme. Y. Müh. Ekonomist.
- TEMİZ HAVA HAKKI PLATFORMU (2020). Kara Rapor 2020: Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri’. Erişim: 24.7.2024. URL: <https://www.temizhavahakki.org/kararapor2020/>
- TMMOB ÇEVRE MÜHENDİSLERİ ODASI BURSA ŞUBESİ (2021). Bursa Hava Kalitesi Değerlendirmesi Raporu. Erişim 24.7.2024. URL: [https://icerik.cmo.org.tr/uploads/portal/resimler/ekler/af90c37c19e9c5a\\_ek.pdf](https://icerik.cmo.org.tr/uploads/portal/resimler/ekler/af90c37c19e9c5a_ek.pdf)
- TTB - TÜRK TABİPLER BİRLİĞİ (2020). Yatağan’da Hava Kirliliğinin Değerlendirilmesi Raporu: 3. Hava Kirliliği. Ankara. Erişim: 24.7.2024. URL: <https://www.ttb.org.tr/eweb/yatagan/3.html>
- VAROL, Ö. Evren, Sedat KABDAŞLI (2019). Soğutma Suyu Deniz Deşarj Sistemi Seyrelme Hesapları. Amasra Kömür Madeni Projesi Uluslararası Kredi Kuruluşlarına Yönelik Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirme (ÇSED) Raporu, (Ankara: Dokay Mühendislik Ltd.), Cilt 6.
- YURDAŞEN, Atilla (2???). Kişisel görüşme. Emekli Lavvar Şube Md. ATİ Amasra.



## **Tuncer Özkan**

1944 yılında Erzincan'da doğdu. İTÜ Makina Fakültesi'nden Makina Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu. Evli ve bir çocuk babasıdır.

01.04.1970 tarihinde,  
EKİ (Ereğli Kömürleri İşletmesi) Amasra Bölgesinde

- ▶ Yeraltı Makina Mühendisi,
- ▶ Bölge Makina Mühendisi,
- ▶ Elektromekanik Başmühendisi,
- ▶ Batı Karadeniz Kömür İşletmesi (BKİ.) Müessese Müdür Yardımcısı olarak çalıştı.

1981-1984 ve 1990-1997 yılları arasında

- ▶ Türkiye Taşkömürü Kurumuna (TTK) bağlı Maden Makinaları Fabrika İşletme Müdürlüğünde, İşletme Müdürü,
- ▶ TTK Genel Müdürlük Müşaviri,
- ▶ Genel Müdürlük Enerji Tasarruf Komisyonu Başkanı ve
- ▶ APK Daire Başkanı olarak görev yaptı.

Makina Mühendisleri Odası Zonguldak Şubesinin kurucu başkanlığını yaptı. Aynı zamanda Karaelmas Üniversitesi (ZKÜ) Makina Mühendisliği Bölümünde proje çalışmaları yaptırdı.

- ▶ Nisan 2009'da emekli oldu. Halen danışmanlık yapıyor ve Bartın/Amasra'da uzmanlık alanındaki çalışmalarına devam ediyor.