



**EĞİK ŞOK DALGALARINDA VE RAYLEIGH  
AKIŞLARINDA EKSERJİ ANALİZİ VE  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Bahar ÇAKMAK**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği  
Ana Bilim Dalı  
Doç. Dr. Rabi KARAALİ  
2023  
(Her Hakkı Saklıdır)**

T.C.  
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**EĞİK ŞOK DALGALARINDA VE RAYLEIGH AKIŞLARINDA EKSERJİ ANALİZİ  
VE İYİLEŞTİRİLMESİ**

(Exergy Analysis and Improvement in Inclined Shock Waves and Rayleigh Flows)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bahar ÇAKMAK

Doç. Dr. Rabi KARAALİ

Bayburt  
Ekim, 2023

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Doç. Dr. Rabi KARAALİ danışmanlığında, 202201011 Numaralı Bahar ÇAKMAK tarafından hazırlanan “EĞİK ŞOK DALGALARINDA VE RAYLEIGH AKIŞLARINDA EKSERJİ ANALİZİ VE İYİLEŞTİRİLMESİ” adlı bu çalışma .....tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Başkan** : .....

**İmza:** .....

**Jüri Üyesi** : .....

**İmza:** .....

**Jüri Üyesi** : .....

**İmza:** .....

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

...../...../.....

Doç. Dr. Murat KUL  
Enstitü Müdürü

## ETİK VE BİLDİRİMİ SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Eğik Şok Dalgalarında ve Rayleigh Akışlarında Ekserji Analizi ve İyileştirilmesi” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

..... / .... / 2023

(İmza)

Bahar ÇAKMAK

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda araştırmalarımnda her türlü desteği sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Rabi KARAALİ' ye ve Dr. Öğr. Gör. Arzu KEVEN'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamda benden desteklerini asla esirgemeyen sevgili anne-babama ve sevgili eşim Olgun ÇAPKUNOĞLU'na sonsuz teşekkürleri bir borç bilirim.



## ÖZ

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## EĞİK ŞOK DALGALARINDA VE RAYLEIGH AKIŞLARINDA EKSERJİ ANALİZİ VE İYİLEŞTİRİLMESİ

**Bahar ÇAKMAK**

**Ekim 2023, 64 sayfa**

Şok dalgası, fizikte bir akışkandaki yerel ses hızından çok daha hızlı hareketli bir dalga türü olarak tanımlanması mümkündür. Normal bir dalga gibi, şok dalgası da enerji taşır ve bir ortam aracılığıyla birlikte yayılabilir. Aynı zamanda, basıncın, sıcaklığın ve ortamın yoğunluğunda ani, neredeyse süreksiz bir değişim ile karakterize edilebilir. Eğik Şok Dalgasına bakıldığında zaman; eğik şoklar çoğunlukla süpersonik akımın kendi içine doğru döndüğü yerlerde meydana gelir. Normal şok eğik şokun bir özel hali olduğu söylenebilir. Eğik şok dalgasını geçerken Mach sayısı azalmakla birlikte akım ses altı rejime inmez. Basınç, sıcaklık ve yoğunluk ise bir artış gösterir. Ekserji, Termodinamik sistemin içerdiği enerji potansiyelinin, seçilmiş referans durumuna göre kullanılabilirliğinin göstergesi şeklinde tanımlanmaktadır. Tersinir süreç sonunda, ekserji eğer sistem çevre ile denge haline gelmişse, meydana gelen entropiden dolayı kullanılamaz olan enerji kısmı çıkarıldıktan sonra, kurumsal olarak elde edilebilecek en büyük faydalı iş miktarı olarak da tanımlanır. Yani sistem enerjisinin entropiden arındırılmış enerji olarak da tanımlanabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Eğik şok, ekserji analizi, rayleigh akışı.

**ABSTRACT**  
**MASTER'S THESIS**  
**EXERGY ANALYSIS AND IMPROVEMENT IN INCLINED SHOCK WAVES AND  
RAYLEIGH FLOWS**

**Bahar ÇAKMAK**

**October 2023, 64 pages**

It is possible to define a shock wave in physics as a type of wave traveling much faster than the local speed of sound in a fluid. Like a normal wave, a shock wave carries energy and can propagate together through a medium. It can also be characterized by a sudden, almost discontinuous change in pressure, temperature, and density of the medium. When looking at the Oblique Shock Wave; Oblique shocks mostly occur where the supersonic current turns inward. Normal shock can be said to be a special case of oblique shock. While the Mach number decreases while passing the oblique shock wave, the current does not go down to the subsonic regime. Pressure, temperature and density show an increase. Exergy is defined as an indicator of the availability of the potential energy contained in a thermodynamic system with respect to any reference state. Exergy is also expressed as the maximum amount of useful work that can be obtained theoretically, after deducting the energy that becomes unusable because of the entropy formed, if the system maintains equilibrium with the environment because of a reversible process. In system energy, exergy is defined as energy free from entropy.

**Keywords:** Oblique shock, exergy analysis, rayleigh flow.

## İÇİNDEKİLER

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| ETİK VE BİLDİRİMİ SAYFASI..... | I    |
| TEŞEKKÜR.....                  | II   |
| ÖZ.....                        | III  |
| ABSTRACT .....                 | IV   |
| İÇİNDEKİLER .....              | V    |
| TABLolar DİZİNİ .....          | VII  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....          | VIII |
| KISALTMALAR DİZİNİ.....        | XII  |

## BİRİNCİ BÖLÜM

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| Giriş .....                                 | 1  |
| Şok Dalgaları Hakkında Genel Bilgiler ..... | 3  |
| Normal şok dalgaları.....                   | 3  |
| Eğik şok dalgaları. ....                    | 4  |
| Yay şok dalgaları. ....                     | 5  |
| Süpersonik şok dalgaları. ....              | 5  |
| Hipersonik şok dalgaları.....               | 7  |
| Genişleme Dalgası .....                     | 7  |
| Şok ve genişleme dalgalarının oluşumu.....  | 8  |
| Mach Sayısı .....                           | 9  |
| Literatür.....                              | 10 |

## İKİNCİ BÖLÜM

|                        |    |
|------------------------|----|
| Materyal ve Metot..... | 13 |
| Ekserji .....          | 13 |
| Ölü Hal .....          | 13 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Enerjinin Korunumu Kanunu .....                                     | 13 |
| Ekserji Analizi .....                                               | 13 |
| Fiziksel ekserji. ....                                              | 15 |
| Kimyasal ekserji. ....                                              | 16 |
| Termal ekserji. ....                                                | 19 |
| Mekanik ekserji.....                                                | 19 |
| Şok Dalgalarında Ekserji Analizi .....                              | 20 |
| Normal şok dalgaları ekserji analizi.....                           | 20 |
| Eğik bir şok dalgası ekserji analizi. ....                          | 22 |
| Isı Geçişli ve Sürtünmenin İhmal Edildiği Rayleigh Kanal Akışı..... | 24 |
| Rayleigh akışında özellik denklemleri. ....                         | 27 |
| Boğulmuş rayleigh akışında durum .....                              | 28 |
| Gazlarda Patlama ve Parlama Arasındaki Niteliksel Farklılıklar..... | 29 |
| Detonasyon Oluşumu ve Özellikleri.....                              | 32 |
| Darbeli detonasyon motoru (DDM) çalışma prensibi. ....              | 34 |

### ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>Bulgular ve Tartışmalar .....</b> | <b>40</b> |
|--------------------------------------|-----------|

### DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>Sonuçlar.....</b>  | <b>58</b> |
| <b>Kaynakça.....</b>  | <b>60</b> |
| <b>Öz geçmiş.....</b> | <b>64</b> |

## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1. <i>Transonik, Süpersonik, Hipersonik ve Yüksek Hipersonik Dalgaların Uçuş Hızları ve Genel Uçak Karakteristiği (Yükselen, 2006)</i> .....                                                                   | 9  |
| Tablo 2. <i>Çeşitli Maddelerin Bazı Hallerdeki Standart Kimyasal Ekseriler (Çengel vd., 2014)</i> .....                                                                                                              | 18 |
| Tablo 3. <i>Isıtma ve Soğutmanın Rayleigh Akışının Özellikleri Üzerindeki Etkisi</i> .....                                                                                                                           | 27 |
| Tablo 4. <i>Gazlarda Patlama ve Parlama Arasındaki Niteliksel Farklılıklar (Friedman, 1953)</i> .....                                                                                                                | 29 |
| Tablo 5. <i>Detonasyonlu ve Deflagrasyon Şeklindeki Yanmaların Temel Parametrelerinin Karşılaştırılması</i> .....                                                                                                    | 30 |
| Tablo 6. <i>Temel Gaz Türbini Kojenerasyon Tesisi İçin Cihazların Enerji, Kütle, Entropi Denklemleri (Bejan vd., 1996, Ashrae, 2002; Lazzaretto vd., 2010; Karaali, 2016; Karaali, &amp; Öztürk, 2017c)</i> .....    | 39 |
| Tablo 7. <i>Temel Gaz Türbini Kojenerasyon Tesisi İçin Cihazların Ekserji, Ekserji Verimliliği, Değerlendirme Kriterleri Denklemleri (Bejan vd., 1996, Lazzaretto vd., 2010, Karaali, &amp; Öztürk, 2017c)</i> ..... | 39 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Şok dalgaları (Çengel vd., 2014).....                                                                                                                                                | 4  |
| Şekil 2. Bir ses üstü rüzgâr tüneline 3 Mach hızda denenen uzay mekiğinin bir modelinin Schlieren görüntüsü. Cismin etrafındaki havada eğik şoklar görülmektedir (Çengel vd., 2014).<br>..... | 4  |
| Şekil 3. Bulunduğu ortama göre şok dalgaları (URL-2). ....                                                                                                                                    | 5  |
| Şekil 4. Zamana bağlı genişleme dalgalarının oluşumu. ....                                                                                                                                    | 6  |
| Şekil 5. Hiperbol şeklindeki sarı renkli zeminin temas bölgesi ile konik şok dalgaları (URL-3).<br>.....                                                                                      | 6  |
| Şekil 6. Genişleme dalgası (URL-2). ....                                                                                                                                                      | 7  |
| Şekil 7. Mach dalgasının oluşumu (URL-2 ve 3). ....                                                                                                                                           | 8  |
| Şekil 8. Akışın Mach dalgasının $\mu$ açısı ile $\beta$ eğim açısı arasındaki ilişki (URL-2).....                                                                                             | 9  |
| Şekil 9. Verilen bir durum ile çevre arasındaki fiziksel ekserji (Çengel vd., 2014). ....                                                                                                     | 15 |
| Şekil 10. Fanno ve Rayleigh eğrisi (Çengel vd., 2014).....                                                                                                                                    | 21 |
| Şekil 11. $k = 1.4$ olan ideal gazda şok önü ile arkası akış özelliklerinin oranları ve normal şoktan geçişte akış özelliklerinin değişimi (Çengel vd., 2014). ....                           | 22 |
| Şekil 12. Normal şokun önü ve arkası için entropi eğrisi (Çengel vd., 2014). ....                                                                                                             | 22 |
| Şekil 13. Eğik şok dalgası simülasyonu (URL-2).....                                                                                                                                           | 23 |
| Şekil 14. Eğik şok diyagramı (URL-2).....                                                                                                                                                     | 24 |
| Şekil 15. Rayleigh akışı (Çengel vd., 2014). ....                                                                                                                                             | 25 |
| Şekil 16. Sabit en-kesitli bir kanal için sürtünmenin ihmal edildiği ancak ısı geçişinin olduğu bir akışa ait kontrol hacmi (Çengel vd., 2014). ....                                          | 25 |
| Şekil 17. T-s diyagramı (Çengel vd., 2014).....                                                                                                                                               | 26 |
| Şekil 18. Rayleigh akışlarda ses üstü ve ses altı durumlarındaki sıcaklık değişimi (Çengel vd., 2014). ....                                                                                   | 27 |
| Şekil 19. Boğulmuş akış gösterimi.....                                                                                                                                                        | 28 |

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 20. Patlama dalgası yayılımının şeması (Bello, & Lu, 2017).                                                                                                                                         | 31 |
| Şekil 21. P-V diyagramında Brayton ve Detonasyon dalgasının oluşum döngülerinin karşılaştırılması (Bello, & Lu, 2017).                                                                                    | 33 |
| Şekil 22. Detonasyon oluşumu şematik gösterimi (Shepherd, & Lee, 1992; Kumakura, 1996).                                                                                                                   | 34 |
| Şekil 23. İzo-oktan buharının parlamadan detonasyon dönüşüm dalgaları, geometrisi ve boyutları (Bello, & Lu, 2017).                                                                                       | 35 |
| Şekil 24. H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> karışımı, T <sub>1</sub> = 295 K, P <sub>1</sub> = 57.5 kPa, Resim = 5 x 5 mm (Bello, & Lu, 2017).                                                               | 36 |
| Şekil 25. Temel bir gaz türbini kojenerasyon tesisinin şeması.                                                                                                                                            | 36 |
| Şekil 26. Bir ZND detonasyon motoru kojenerasyon sisteminin şeması.                                                                                                                                       | 37 |
| Şekil 27. Buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motorlu kojenerasyon sisteminin şeması.                                                                                                           | 37 |
| Şekil 28. Kimyasal denge probleminin kodunun ve türünün seçildiği ekran alıntısı.                                                                                                                         | 40 |
| Şekil 29. Chapman-Jouguet detonasyon probleminde Sıcaklık ve basınç aralıklarının girilmiş olan ekranın görüntüsü.                                                                                        | 41 |
| Şekil 30. Chapman-Jouguet detonasyon probleminde hangi yakıt türünün kullanılacağına tercihinin yapıldığı ekran görüntüsü.                                                                                | 41 |
| Şekil 31. Chapman-Jouguet detonasyon probleminde oksitleyici/yakıt oranını hangi türden olacağına seçileceği programdaki ekran alıntısı.                                                                  | 42 |
| Şekil 32. Chapman-Jouguet detonasyon probleminde final bölümünün ekran alıntısı.                                                                                                                          | 42 |
| Şekil 33. Chapman-Jouguet detonasyon probleminde tüm sayısal sonuçların verildiği ekran alıntısı.                                                                                                         | 43 |
| Şekil 34. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için yanma odası çıkış sıcaklığının sıkıştırma oranı ile değişimi. | 44 |
| Şekil 35. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için yanma odası çıkış basıncının sıkıştırma oranı ile değişimi.   | 44 |

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 36. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için ekserji veriminin sıkıştırma oranı ile değişimi. ....                  | 45 |
| Şekil 37. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için sıkıştırma oranı ile özgül yakıt tüketiminin değişimi. ....            | 45 |
| Şekil 38. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için elektrik veriminin sıkıştırma oranı ile değişimi. ....                 | 46 |
| Şekil 39. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için ekserji için yakıt tüketiminin sıkıştırma oranı ile değişimi. ....     | 46 |
| Şekil 40. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için elektriksel ısı oranının sıkıştırma oranı ile değişimi. ....           | 47 |
| Şekil 41. ( $r=2$ , $r=3$ , $r=4$ , $r=5$ , $r=6$ , $r=7$ ve $r=8$ ), farklı sıkıştırma oranlarında ( $r$ ) detonasyonlu yanma odası çıkış basıncının hava fazlalık katsayısına ( $h_{fk}$ ) göre değişimi.....    | 48 |
| Şekil 42. ( $r=2$ , $r=3$ , $r=4$ , $r=5$ , $r=6$ , $r=7$ ve $r=8$ ), farklı sıkıştırma oranlarında ( $r$ ) detonasyonlu yanma odası çıkış sıcaklığı ile hava fazlalık katsayısına ( $h_{fk}$ ) göre değişimi..... | 48 |
| Şekil 43. Türbin gücünün (ZND-HRSGli) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.....                                                                                                                                 | 49 |
| Şekil 44. Ekserji veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi.....                                                                                                                                           | 49 |
| Şekil 45. Elektrik veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi.....                                                                                                                                          | 50 |
| Şekil 46. Spesifik yakıt tüketiminin (SFC(ZND-HRSGli)) hava fazlalık katsayısına göre değişimi .....                                                                                                               | 50 |
| Şekil 47. Ekserjiye harcanan yakıt(kW/kg) hava fazlalık katsayısına göre değişimi .....                                                                                                                            | 51 |
| Şekil 48. Özgün iş (kg/kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.....                                                                                                                                            | 51 |
| Şekil 49. Kompresör verimi (ZND-HRSGli) hava fazlalık katsayısında göre değişimi .....                                                                                                                             | 52 |
| Şekil 50. Yanma odası veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi .....                                                                                                                                      | 52 |
| Şekil 51. Türbin veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi.....                                                                                                                                            | 53 |
| Şekil 52. HRSG veriminin (ZND-HRSGli) hava fazlalık katsayısına göre değişimi .....                                                                                                                                | 53 |

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 53. Kompresör ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi .....        | 54 |
| Şekil 54. Yanma Odası ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.....       | 54 |
| Şekil 55. Türbin ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi .....           | 55 |
| Şekil 56. HRSG ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi .....             | 55 |
| Şekil 57. Toprak ekserji kaybının(kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi .....            | 56 |
| Şekil 58. Elektrik ısı oranının hava fazlalık katsayısına göre değişimi.....                   | 56 |
| Şekil 59. YEKO'nun hava fazlalık katsayısına göre değişimi.....                                | 57 |
| Şekil 60. Enerjiye harcanan yakıt miktarının (ZND-HRSGli) hava katsayısına göre değişimi ..... | 57 |



## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

|                         |                                                        |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>c</b>                | :Isı kapasitesi (kJ/kgK)                               |
| <b>c<sub>p</sub></b>    | :Sabit basınçta ısı kapasitesi (kJ/kgK)                |
| <b>c<sub>v</sub></b>    | :Sabit hacimde ısı kapasitesi (kJ/kgK)                 |
| <b>e</b>                | :Birim enerji(kJ/kg)                                   |
| <b>E</b>                | :Enerji (kJ)                                           |
| <b>E<sub>k</sub></b>    | :Kinetik Enerji                                        |
| <b>E<sub>p</sub></b>    | :Potansiyel Enerji                                     |
| <b>E<sub>x</sub></b>    | :Ekserji (kJ)                                          |
| <b>e<sub>x</sub></b>    | :Birim ekserji(kJ/kg)                                  |
| <b>h</b>                | :Entalpi(kj/kg)                                        |
| <b>I</b>                | :Tersinmezlik (kW)                                     |
| <b>K</b>                | :Kelvin                                                |
| <b>m</b>                | :Metre                                                 |
| <b>M(M<sub>a</sub>)</b> | :Mach sayısı                                           |
| <b>NASA</b>             | : Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi            |
| <b>NASP</b>             | :Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık Programı |
| <b>η</b>                | :Verim                                                 |
| <b>θ<sup>0</sup></b>    | :Derece                                                |
| <b>P</b>                | :Basınç (kPa)                                          |
| <b>s</b>                | :entropi                                               |
| <b>T</b>                | :Sıcaklık (Kelvin)                                     |
| <b>v</b>                | :Hız(m/s)                                              |
| <b>w</b>                | :İş (kW)                                               |
| <b>β</b>                | :Şok açısı                                             |

**k** :Özgöl ısı oranı  
**θ** :Sapma açısı



## BİRİNCİ BÖLÜM

### Giriş

Günümüz dünyasında verimlilik ve alternatif enerji kaynakları büyük ilgi ve önem kazanmış olup literatürde bu alanda çalışmalar artmaktadır. Verimi arttıran kojenerasyon, detonasyonlu yanma gibi verimi artıran yöntemler son zamanlarda ilgi çekmektedir (Karaali, & Keven, 2022). Alternatif yakıtlar, doğayı kirletmeyecek doğa dostu yağlayıcılar da önem kazanmaktadır (Keven, & Karaali, 2015; Keven, & Karaali, 2022; Keven, & Öner, 2023) Hareketli ses kaynağının hızı, sesin yayılma hızını geçtiğinde, ses, patlama sesi şeklinde duyulur. Bu durumda dalgalar ışın şeklinde konik bir alana yayılır ve bununla birlikte şok dalgaları olarak adlandırılır. Böyle durumlarda sesin yayılma hızının kaynağın yayılma hızına oranı Mach sayısı olarak isimlendirilir (URL-1).

Ses üstü akışta kimi karşı basınç durumlarında, yakınsak-ıraksak lülenin ince bir bölümünde ve akışın özelliklerinde şok dalgası meydana getiren ani değişimler olduğu görülmektedir (Çengel, Hill, & Cimbala, 2014). Bir akışkandaki yerel ses hızına kıyasla daha hızlı hareketli bir dalga olarak bilinir şok dalgası. Şok dalgası normal bir dalgada olduğu gibi belli bir miktar enerji taşımaktadır. Şok dalgası bir ortam v yayılabilme özelliğine sahiptir. Bir şok dalgasının hızı ve enerjisi uzaklık ile birlikte dağılır ve azalır. Şok dalgası maddeden geçerken entropi artar, fakat buna karşın toplam enerjisi korunur. Basıncın, ortamın yoğunluğunun ve sıcaklığın ani, süresiz bir değişimi ile karakterize edilir. Eğer dalga sıvıdaki yerel hızdan daha hızlı hareket ederse, bu şok dalgası olarak denilebilir. Maddenin özelliklerinde olan bu değişim, sahip olduğu iş kapasitesinde (ekserjisinde) bir azalma ve ses üstü cisimlerde bir sürüklenme kuvveti olarak kendini gösterir. Şok dalgaları şiddetle geri döndürülemez bir yapıdadır yani tersinmez süreçlerdir. Hızı az olan örneğin bir uçak hareket yönündeki hava kütlelerinin kaçabilecekleri zaman olduğundan bir sıkışma etkisi yapamaz. Uçağın hızı arttıkça başladığı zamankine göre durum değişir. Uçağın hareket yönünden kaçmaya zaman bulamayan hava taneciklerinin hızı ile ses hızında uçan uçağın hızı birbirine eşitlenir ve bu durumda uçağın önünde bulunan bu hava taneleri sıkışıp şok dalgalarını oluşturuyor. Bir nevi uçağın hareketine karşı direnç gösteren bir hava duvarına dönüşümü de denilebilir (Anderson, 1984).

Yanma Dünya üzerinde büyük bir kirlilik kaynağı olarak yer almakta ve bu kirlilikle alakalı çok fazla araştırmalar yapılmaktadır (Petela, 2000; Karaali, & Öztürk, 2016). Deflagrasyon olarak bilinen ses altı ve alevli yanma ile elektrik ve ısı enerji elde edilmektedir. Alevli yanma temelli gaz türbinleri, ekserji veriminin limitlerine ulaşabilmektedir. Buna bağlı olarak performans verimlerini artırmak çok zor bir hal almaktadır. Uçaklarda kullanılan motorlar, gaz türbinli ve detonasyon yanması olan motorlar, son zamanlarda araştırmacıların incelemelerinde ilgi odağı olmaktadır. Aynı zamanda elektrik ve ısı enerjisini üretmek, açıkçası kojenerasyon için detonasyonlu motorların kullanımı çok fazla araştırma konusu olmaktadır. Darbeli detonasyon motoru, oksitleyici ve yakıt karışımının kimyasal olarak daha iyi koşullarda yanmasını sağlayacak potansiyele sahip bir araçtır. Şu an kullanılmakta olan gaz türbin motorlarıyla karşılaştırıldığında daha fazla verimli yanma ve daha az entropide patlama oluşturmaktadır. Entropideki kayıp miktarı azaldığından oluşan kimyasal döngü daha verimli ve amacına uygun olarak oluşmaktadır (Bellini, 2010; Bellini, & Lu, 2010).

PCG (Basınç Kazançlı Yanma), gaz türbinli sistemlere kıyasla daha yüksek verimlere sahiptir. Detonasyonlu yanma PCG'yi elde etmek ve gerçekleştirmesini sağlamak için birincil yöntemlerin arasında yer almaktadır. Detonasyonlu yanmaya bakıldığında zaman, gaz türbinli yanmaya karşın %30 fazladan termal verim verir ve yapısal olarak daha yalındır. Detonasyonlu yanmanın hızı, alevli yanmanın hızından binlerce kat fazla olup süpersonik yanma moduna dayanmaktadır (Bellini, 2010; Bellini, & Lu, 2010).

PDE (darbeli detonasyon motoru) çevrimlerinde modelleme Fanno Akışı (sürtünme etkilerini de hesaba katar), ve Rayleigh Akışı (ısı verilmesi de hesaba katar) ile yapılabilmektedir. Bu ikisi de sabit alanlı akışlar olarak bilinir.

Detonasyonlu yanmada, sabit basınçlı yanmadan çok sabit hacimli yanmaya benzer. Burada basınç dengesi için gerekli olan yeterli zamanı yoktur. Bakıldığında zaman izobarik sürecin yanı sıra izokorik sürece yakın olduğu söylenmesi mümkündür. Sabit hacimli yakma da avantaj, iş akışkanında sabit basınçtaki yakmaya kıyasla düşük entropi artışı üretebilmesi olarak söylenir. Kontrol altında detonasyonlu yanma ile başlama ve devam ettirme zorluğu sebebiyle, detonasyonlu yanma elli yıl öncesine kadar bir tek tahrik uygulaması için incelenmiştir. Fakat PDE denilen (pulse detonation engine) ve RDE denilen (rotating detonation engine) kavramlarıyla güç üretiminin de sağlanabileceği, süreklilik içinde deneylerle ispatlanmıştır.

PDE çevrimleri hava ve yakıtın verilmesi, yanma, blöf ve tasfiye olmak üzere dört aşamalardan oluşmaktadır (Soni, Singh, Sandhu, Goel, & Sharma, 2013; Su, Wen, Wang, & Wang, 2022). Detonasyonda bir şok cephesi enerji salınımları tarafından yönlendirilir.

Detonasyon dalgası için Termodinamiğe en uygun modele en iyi model Chapman-Jouguet (CJ)'nin ortaya koyduğu modeldir. Detonasyon motorlar, ZND denilen Zeldovich-von Neumann-Döring açıklamaları ve anlatısı ile iyi anlaşılmaktadır. ZND çevrimlerinde oksidan ve yakıttan oluşan karışımı enjektörlerden yanma odası içine püskürtme şeklinde verilir. Hemen sonrasında, bir kıvılcım ateşleme ile yanma başlatılır. Alev, parlama yanması şeklinde ses altı hızda yayılır. Burada birçok gaz dinamiği işlemleriyle alev hızlandırılmakta ve türbülans seviyesi yanma odasına konmuş engellerle artırılır. Burada yanma detonasyona geçer ve DDT denilen detonasyonlu yanmaya sebep olmaktadır (Soni *vd.*, 2013; Su *vd.*, 2022). Yanma odası çıkışında detonasyon dalgaları elde edilmesi söz konusudur. Yanma odasındaki egzoz gazı inert bir gaz ile bertaraf edilir. Yanma odasında bir sonraki döngüsü başlar. Alevli yanmadan daha verimli detonasyonlu yanmada frekansın en az ya da ortalama 60-100Hz civarında olması gerekir. Chapman-Jouguet hız ile hareket için alevin hızı, yapılmış deneysel çalışmalar ile karşılaştırılırsa daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bir detonasyon dalgasına bakıldığında hızının süpersonik olduğu görülür. Yakıt ısı değeri ve verilen yakıt oksidan miktarlarına göre sıcaklıklar 2000 ile 3000 K civarındadır. Basınç kazandıran yanmalı termodinamik çevrimler, Humphrey ve ZND çevrimlerindendir. PDE denilen darbeli detonasyon motoru ile RDE denilen dönel detonasyon motoru, detonasyonlu yanmada en iyi ve en uygun motorlar arasında yer alır (Horlock, 1997; Soni *vd.*, 2013; Su *vd.*, 2022).

### **Şok Dalgaları Hakkında Genel Bilgiler**

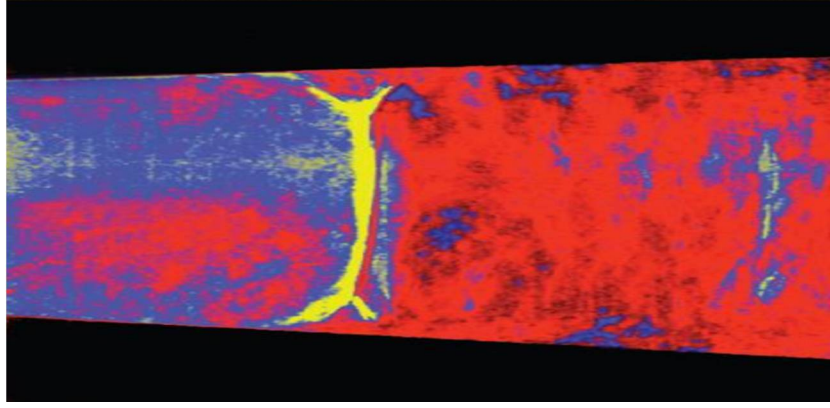
Şok dalgaları çeşitleri;

- Normal şok dalgaları
- Eğik şok dalgaları
- Yay şok dalgaları
- Süpersonik şok dalgaları
- Hipersonik şok dalgaları

Şeklinde sıralanabilirler.

#### **Normal şok dalgaları.**

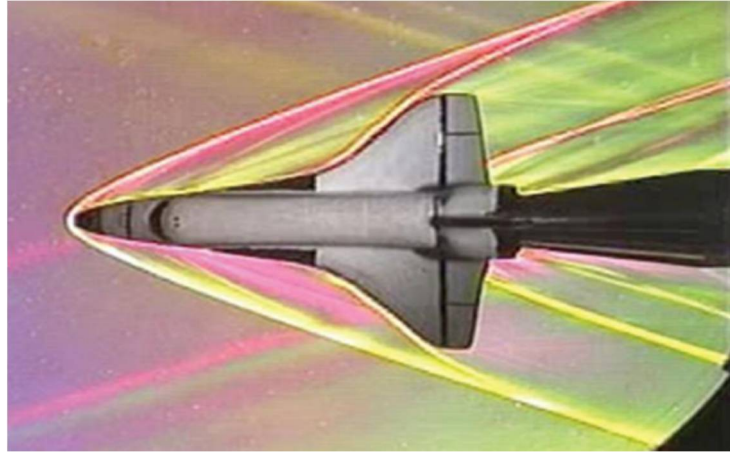
Akış yönüne dik olan bir düzlemde oluşan şok dalgaları normal şok dalgalarıdır. Şok dalgalarında akış tersinmezdir.



Şekil 1. Şok dalgaları (Çengel vd., 2014).

Bir şok dalgası, akışkanlar mekaniğinde entropinin sonsuz küçük bir bölgede artan bir süreksizlik olarak ele alınır. Akışkan akışı sürekli olduğundan, kontrol yüzeyleri ile şok dalgasının etrafında bir kontrol hacmi oluşur. Şok bu iki yüzey, arasında kalacak şekilde küçük bir derinlikle ayrılır. Bu yüzeylerde, enerji, kütle akışı ve momentum sabittir. Yanmada patlamalar şok dalgası içine ısı girişi gibi modellenenir. Sistem adyabatik ve bir iş yapmadığı farz edilir. Şok ortamının akış yönüne  $90^0$ (dik) dir (Yıldırım, 2006; Çengel vd., 2014).

#### Eğik şok dalgaları.

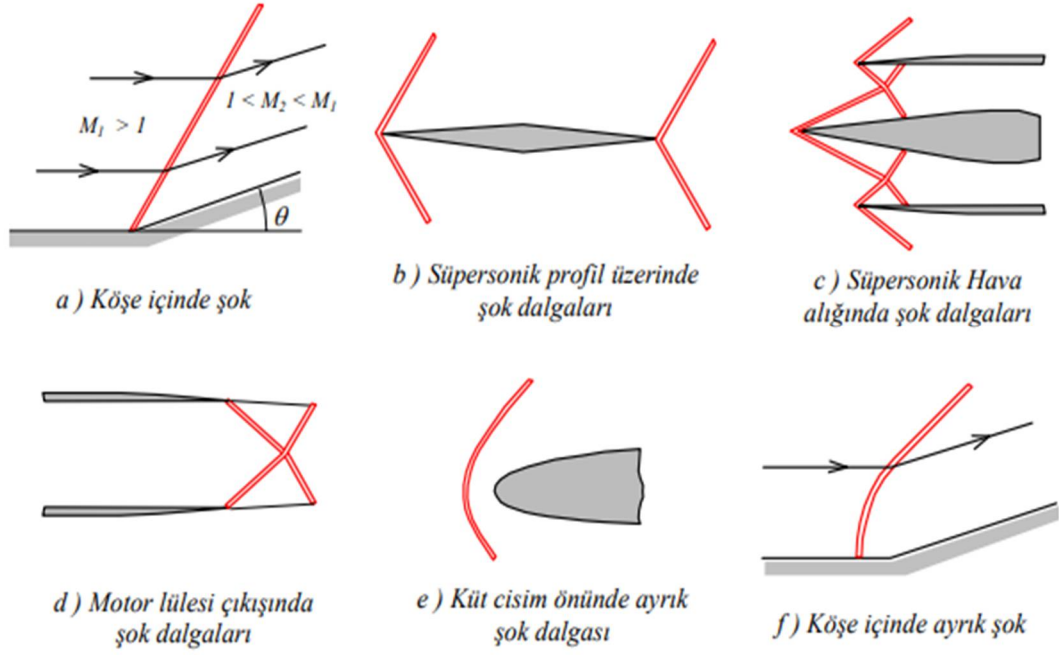


Şekil 2. Bir ses üstü rüzgâr tüneline 3 Mach hızda denenen uzay mekiğinin bir modelinin Schlieren görüntüsü. Cismin etrafındaki havada eğik şoklar görülmektedir (Çengel vd., 2014).

Şok dalgası, eğer akış yönünden rastgele bir açıyla sapan bir şok dalgası ise buna eğik şok denir. Bunlar akışın vektör analizini gerektirir. Bunun için, akışın eğik şoka dik bir yönde normal bir şok olarak aktığı farz edilir (Markell, 2005).

Eğik şoklar çoğu zaman ses üstü akışın kendi içine doğru döndüğü ortaya çıkar. Eğik şokun özel hallerinden biri de normal şok halidir. Mach sayısı eğik şok dalgasını geçerken

azalır ancak akış ses altına inmez. Sıcaklık, basınç, yoğunluk ve bazı özellikler ise bir artış gösterir (Moorhouse, Charles, & Prendergast, 2002).



Şekil 3. Bulunduğu ortama göre şok dalgaları (URL-2).

#### Yay şok dalgaları.

Akışın yukarı akış hızı  $Mach=1$ 'i aştığında kör bir nesnenin pruvasının (önünün) akış üst tarafında ortaya çıkar. Burada yüzeyde olmayacak şekilde eğik bir şok oluşması olası olduğundan, şok dalgası cisim etrafında sürekli bir model oluşturacağı bir olgu ortaya çıkar. Bu tip şoklara yay şoku denir. Burada, yüzeye gelen basıncı bulmak için daha fazla analize ihtiyaç vardır, yani burada 1d akış modeli geçerli değildir (Markell, 2005).

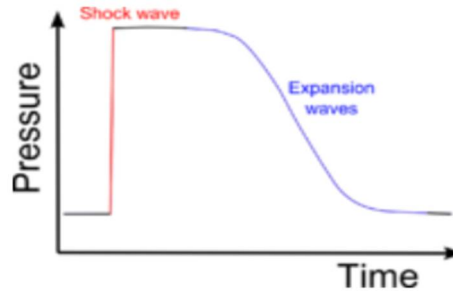
#### Süpersonik şok dalgaları.

İngilizce olan “Süpersonik” Türkçe’de “sesten hızlı uçak, süpersonik uçak, ses üstü şey” ve sıfat olarak kullanıldığında; “Ses üstü, sestten hızlı”, anlamına gelmektedir. Süpersonik, ses hızının  $Mach=1$ 'in üzerinde olan hızları tanımlamak için kullandığımız terimdir. Bazılarına göre de 1.2 veya 1.3 Mach sayısının üzeridir. Deniz seviyesinde, havadaki sesin hızı 340 m/s, veya 1,225 km/h olarak kabul edilir. Uzun süre sestten hızlı uçuşa dayanabilecek ve motor ve gövdesi buna uygun olan uçaklara süpersonik ya da ses üstü uçaklar denir. Savaş uçaklarının günümüzdeki büyük bir kısmı süpersonik uçaklardan oluşmaktadır. Bloodhound SSC veya F-16 bunlara örnek verilebilir (Moorhouse vd., 2002).

Şok dalgalarını karakterize eden ortamın özelliklerindeki değişimin aniliği bir faz geçişi olarak isimlendirilmesi mümkündür. Yayılan süpersonik nesnenin basınç-zaman

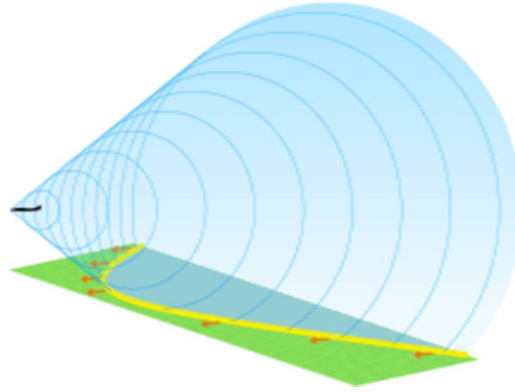
diyagramı, şok dalgasının sebep olduğu geçişin dinamik bir faz geçişine benzerliği söz konusudur.

Bir nesne etrafındaki sıvıya kıyasla daha hızlı hareket ettiğinde, bozulmanın temasındaki sıvı, etki gelmeden önce tepki vermiş olamaz. Bir şok dalgasında akışkanın özellikleri sıcaklık, basınç, yoğunluk, akış hızı, Mach sayısı hemen anında değişir. Havada olan şok dalgasının kalınlığı hesaplanıp ölçüldüğünde, 200 nm civarında görülmüştür. Süreklilik akış alanında iki veya üç boyutluysa şok dalgasının bir çizgi ya da düzlem olarak ele alınabilir.



Şekil 4. Zamana bağlı genişleme dalgalarının oluşumu.

Gözlemciyi geçerek yayılan ses üstü bir nesnenin durumunda dışardan bir gözlem için noktasındaki basınç-zaman diyagramı. Cismin ön kenarı şoka (sol, kırmızı) ve arka kenarı genişlemeye (sağ, mavi) sebep olur.



Şekil 5. Hiperbol şeklindeki sarı renkli zeminin temas bölgesi ile konik şok dalgaları (URL-3).

Bir basınç cephesi süpersonik hızlarda çevredeki havayı iteceğinden şok dalgaları meydana gelir. Bu olduğu bölgede, akışa karşı hareketi olan ses dalgaları, akıntıya karşı fazla ilerleyemeyecekleri bir yere ulaşır. O bölgede basınç artar, yüksek basınçlı şok dalgası hızla meydana gelir.

Şok dalgaları standart ses dalgası değildir. Şok dalgası, gaz özelliklerinde ise çok keskin bir değişiklik halini alır. Hava olan şok dalgaları, yüksek bir "çatlak" ya da "çırpma" sesi gibi ses verir. Daha uzun mesafelerde şok dalgası doğrusal olmayan halden doğrusal bir

dalgaya dönüşebilir. Enerji kaybettikçe geleneksel bir ses dalgasına dönüşebilir. Ses dalgası, çoğu zaman ses üstü uçak uçuşları tarafından oluşturulan bir sonik patlamanın "güm" sesi gibi ses verir.

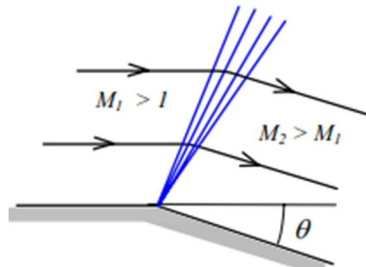
Şok dalgası, ses üstü akımdaki gazın sıkıştırılabileceği birçok değişik yollardan biridir. Diğer yöntemler, Prandtl–Meyer sıkıştırmaları dâhil izentropik sıkıştırmalardır. Şok dalgasının sıkıştırması, basıncın toplamında kayba sebep olur. Ses üstü uçaklarda basınç sürüklemesinin şekli, çoğu zaman akış üzerindeki şok sıkıştırmasının etkisinden dolayı ortaya çıkar.

### Hipersonik şok dalgaları.

Hipersonik, 5 Mach veya daha yüksek hızları tanımlamakta kullanılır. 1 Mach 15 °C yere yakın yerde yaklaşık 1225 km/h' tir. 5 Mach ve üzerindeki hızlarda uçan uçaklara hipersonik uçaklar denmektedir. Hipersonik akış Mach sayısı yükseldikçe belirli fiziksel akış olgularının en iyi değerlere yükseltildiği ve giderek daha önemli hale geldiği rejim olarak tanımlanır. Hipersonik akışın öne çıkan bir diğer özelliği, eğik şok teorisinin öngördüğü gibi bir cisim üzerinde ince şok katmanlarının oluşturmalarıdır. İnce şok katmanları, şok dalgasının kendisinin sınır katmanıyla birleşmesi gibi bazı fiziksel karmaşa ve karışıklıklar yaratabilir ve bu da sınır katmanının ayrılmasına yol açabilir. Üçüncü bir özellik, gerekli kütle akışını sınır tabakasından azaltılmış yoğunlukta geçirmek için gereken büyük sınır tabakası kalınlıklarından kaynaklanan viskoz etkileşimi yenebilir.

### Genişleme Dalgası

Ses üstü akış eğer dışa doğru dönüyorsa genişleme dalgaları oluşur. Duvardan ya da cidardan uzaklaştıkça genişleme dalgaları da genişleyen bir yelpaze gibi genişler. Akış çizgileri bunun içinden geçerken sürekli ve düzgün olarak yön değiştirir. Dalga bölgesinden sonra tekrar cidara ya da duvara paralel hale gelir (URL-2).

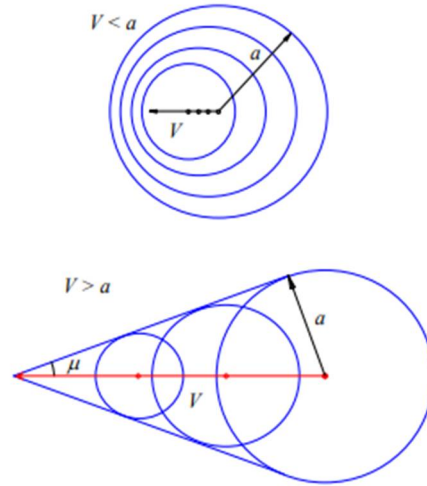


Şekil 6. Genişleme dalgası (URL-2).

Mach sayısı genişleme dalgalarını geçerken artar. Yoğunluk, basınç, sıcaklık ve diğer bazı özellikler ise azalır (URL-2).

### Şok ve genişleme dalgalarının oluşumu.

Süpersonik akım içerisinde bozuntuların nasıl hareket ettiği incelenirse şok ve Mach dalgalarının oluşumu daha iyi anlaşılır. Akışkan içinde hareket eden bir cisim küçük şiddetli basınç dalgaları üretir. Akışkan ortamı içinde basınç dalgaları molekülden moleküle iletilir ve ses hızına eşit hızda küresel dalgalar şeklinde yayılır. Cisim ses hızından büyük bir hızla hareket ediyorsa, kendi yaydığı bozuntulardan hızlı olduğu için onlardan daima ileride olacaktır. Cismin tarafından oluşturulan tüm basınç dalgaları,  $2\mu$  tepe açılı olan bir koninin içinde kalacaktır. Cismin varlığı konik bölge dışındaki ortaya çıkmayacaktır. Akım özellikleri koninin yüzeyi boyunca aynıdır. Bu konik yüzeye Mach dalgası denir. Burada akış özelliklerinde süreksizlik yoktur. Mach dalgası bir içbükey köşe etrafında üst üste binmesi halinde daha kuvvetli dalgalar ortaya çıkar. Bu türlere de eğik şok dalgası denir. Eğik şokun  $\beta$  eğim açısı gelen akışın Mach dalgası  $\mu$  açısından büyüktür (URL-2).



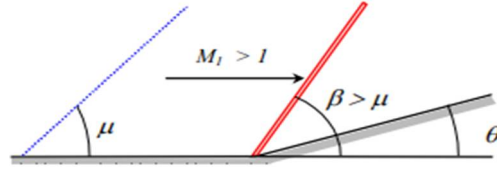
Şekil 7. Mach dalgasının oluşumu (URL-2 ve 3).

Koni kesiti geometrisinden

$$\mu = \sin^{-1} \frac{1}{M} \quad (1.1)$$

Olur.

Mach dalgaları küçük şiddette dalgalardır. Bunların akış özelliklerinde süreksizlik olmayıp sonsuz küçük değişimler görülür. Mach dalgaları iç bükey köşe etrafında olduğu gibi üst üste binerlerse daha kuvvetli dalgalar meydana getirir. Bunlara eğik şok dalgası denir. Akışın Mach dalgasının  $\mu$  açısı oluşan eğik şokun  $\beta$  eğim açısından daha küçüktür (URL-2).



Şekil 8. Akışın Mach dalgasının  $\mu$  açısı ile  $\beta$  eğim açısı arasındaki ilişki (URL-2).

Mach dalgaları aynı zamanda eğik şokların zayıf şiddette bir özel hali olarak tanımlanabilir (Yıldırım, 2006).

## Mach Sayısı

Akışkanlar mekaniğinde Mach Sayısı, “bir akışkanın hızının o akışkandaki ses hızına oranına” denir. M veya Ma olarak kısaltılabilir. Avusturyalı filozof ve fizikçi Ernst Mach tarafından geliştirilmiş ve tanımlanmıştır (Yıldırım, 2006).

Tablo 1. *Transonik, Süpersonik, Hipersonik ve Yüksek Hipersonik Dalgaların Uçuş Hızları ve Genel Uçak Karakteristiği (Yükselen, 2006)*

| Adlandırma           | Uçuş Hızı |              |              |               |             | Genel Uçak Karakteristiği                                                                                                                                                                                                |
|----------------------|-----------|--------------|--------------|---------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                      | (Mach)    | (knots)      | (mhp)        | (km/h)        | (m/s)       |                                                                                                                                                                                                                          |
| Ses altı             | <0.8      | <530         | <609         | <980          | <273        | Çoğu zaman, yüksek en boy oranlı (ince) kanatlara ve burun ve ön kenarlar gibi yuvarlak özelliklere sahip pervaneli ve ticari turbo fan uçaklar                                                                          |
| Transonik            | 0.8-1.2   | 530-794      | 609-914      | 980-1,470     | 273-409     | Transonik uçaklar neredeyse her zaman süpürme kanatlarına sahiptir, bu da sürüklenme sapmasının gecikmesine neden olur ve genellikle WHITCOMB Alan kuralının ilkelerine bağlı bir tasarıma sahiptir.                     |
| Süpersonik           | 1.2-5.0   | 794-3,308    | 915-3,806    | 1,470-6,126   | 410-1,702   | Modern savaş uçağı, düşük hızda kullanım sağlamak için taviz verilmelidir. “Gerçek “süpersonik tasarımlar arasında F=104 Starfihter, Kuzey Amerika XB=70 Valkyrie, SR-71 Blackbird ve BAc/Aerospatiale Concorde bulunur. |
| Hipersonik           | 5.0-10.0  | 3,308-6,615  | 3,806-6,615  | 6,126-12,251  | 1,702-3,403 | Mach 6,72’deki X-15, en hızlı uçaklardan biridir.                                                                                                                                                                        |
| Yüksek hipersonik    | 10.0-25.0 | 6,615-16,537 | 6,615-16,537 | 12,251-30,626 | 3,403-8,508 | Mach 9.6’ da ki NASA X=4, en hızlı uçaklardan biridir.                                                                                                                                                                   |
| Atmosfere giriş hızı | >25.0     | >16,537      | >16,537      | >30,626       | >8,508      | Ablatif ısı kalkanı; küçük veya kanatsız; küt şekil                                                                                                                                                                      |

Burada M Mach sayısını, V gerçek hava hızını, a yerel ses hızını ifade eder. Ses hızı yükseklikle değişen bir özelliktir ve yerden yükseldikçe hava sıcaklığı ve ses hızı azalır. Ses hızının karesi de hava sıcaklığı ile arttığından dolayı Mach sayısı daha yükseklerde deniz seviyesine göre daha düşük olur. Bir akışın gaz veya sıvı ortamdaki sıkıştırılmaz bir akış olarak ele alınacağı yaklaşımını belirlemek için Mach sayısı kavramı kullanılır. Mach sayısı iki hızın oranıdır ve boyutsuz bir sayıdır. Mach sayısı 0,2-0,3 değerinden küçük ise ve akış

izotermal ve yarı sabitse, sıkıştırılabilirliği küçüktür. Burada basit sıkıştırılmaz akışlar için denklemler kullanmak mümkündür (Yıldırım, 2006).

## Literatür

Levy, Ben-Dor, Skews ve Sorek (1993), yaptığı bu çalışmada 75 mm x 75 mm şok tüpünde düzlemsel şok dalgasını gözenekli yapıdaki katı bir nesneyle çarpışmasını ele almıştır. Ele alınan bu çalışmada esnek gözenekli yapıya sahip olan poliüretan köpük gibi malzemelerde şok dalgalarının malzeme boyunca yayılmadığını fakat alümina gibi sert yapıdaki bir şok dalgalarının malzeme boyunca dağıldığı sonucuna varılmıştır. Yapılan deneyler doğrultusunda hem esnek yapıdaki malzemeye hem de sert yapıdaki malzemeye gönderilen dalga hızının sabit olduğunu boşlukları dolduran havanın ise ortalama %4 daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Igra, Falcovitz, Houas ve Jourdan (2013), birlikte yaptığı çalışmada olumsuz etkisi fazla olan şok patlamalarının sonucunda oluşabilecek zararı minimize etmek veya tam olarak yok etmek için birçok yöntemler denemiştir. Bunlara öneri olarak yaptıkları deneylerin arasında şok dalgalarının geçtiği yollarda birden geometrik değişikliğe uğraması, yüzeylerin pürüzlülük oranlarının artırılması, şok dalgalarının geçtiği o mekanizmaya rijit yapıda bariyerler konularak etkisinin azaltılması denemiştir. Fakat yapılan tüm çalışmalar sonucunda şok patlamalarındaki olumsuz etkiyi azaltmanın en doğru yöntemi dalga cephesi doğrultusunda dalga hızının genliği ve basınç artma oranının azaltmanın daha uygun olacağı tespit edilmiştir. Diğer öneriler teoride uygun olsa da uygulamada olumlu sonuçlanmamıştır.

Britan, Ben-Dor, Elperin, Igra ve Jiang (2013), yaptığı çalışmada gaz filtrasyonu sırasında zayıf şok dalgalarının granüller katmanlar üzerindeki sonuçlarını tespit etmeyi amaçlamıştır. Bunu da tespit etmek için granüller tabakada oluşan gaz basıncının incelenmesiyle sağlamıştır. 5 farklı tip granüller katmandan gaz filtrasyonu yapıp deneysel ve sayısal olarak inceleme yapılmıştır.

Ram, Ben-Dor ve Sadot'un (2018) yaptığı çalışmada delikli bir plakaya şok dalgasının çarpmasıyla plakanın arkasında meydana gelen basınç birikimi deneysel olarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan bu deneyler sırasında plakalarının delik sayısı ve plakaların gözenekliliği durumuna göre sınıflandırılıp araştırmalara ayrıntılı yer verilmiştir. Plakalarda var olan gözeneklerin şok etkileşiminin daha etkili olduğu sonucuna deney sonucunda varılmıştır.

Ghezali, Haoui ve Chpoun (2020), yaptığı çalışmada rotasyonel düzensizliğin oksijen ve azot gazı akışındaki normal bir şok dalgasının arkasındaki akışın makroskobik

parametreleri üzerinde oluşturduğu etkileri incelemiştir. Oluşan kimyasal dengesizlikler tanımlanmak için 3 kinetik model kullanıldı. Kullanılan yöntemler arasında en çok PARK 89 kullanılmıştır.

Shoostari ve Shahsavand (2017), süpersonik ayırıcının yoğunlaşma ve normal şok dalgası varlığında içindeki enerji geri kazanımının maksimizasyonu incelemiştir. Daha önceden yapılan diğer çalışmalara bakıldığında farklı olarak, normal şok konumunun potansiyel enerji geri kazanımındaki değişikliklerle değiştiği çok net bir şekilde ispatlanmıştır.

Sod (1991), yaptığı çalışmada sıkıştırılabilir bir akış alanında, yüksek Reynolds sayısı durumunda çözebilen sayısal bir yöntem kullanılarak eğik bir şok dalgasının sınır tabakası ile etkileşimi incelenmiştir. Elde ettikleri sonuçların yapılan deneylerle mükemmel uyum içinde olduğunu göstermişlerdir.

Qin ve Zhang (2018), yaptıkları çalışmada eğik şok dalgalarının uçak motorları üzerine etkisi gözlemlemiş ve motor küçültebilmek için modellemeler yapılmıştır. Geliştirilen kama ile sıkıştırma işlemi ile eğik şok dalgasının tetik konumunu kontrol etme olasılığına sahip olduğu görülmüştür. Tetik konumu kontrolü, adım konumu ve arka kama açısının varyasyonları aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Tetik konumu, adım kama yüzeyi boyunca hareket ederken her zaman adımdan sabit bir mesafe ile adımı takip edebileceğini gösterir. Yaptıkları başka çalışmada sınırlı konik bir yanma odasındaki eğik şok dalgasının başlamasını dinamik olarak kontrol etmek için yeni bir yapı denemesi yapmışlardır. Yeni yapının patlama başlangıcındaki performansını test etmek için reaktif Euler denklemlerine dayalı bir parametrik çalışmadan yararlanılmıştır. Yeni yapıya dayalı olası bir dinamik kontrol yöntemi denenmiştir.

Teng, Bian, Zhou ve Zhang (2021), yaptıkları bu çalışmada, düşük uçuş Mach sayılarına ve farklı uçuş irtifalarına sahip hidrojen-hava karışımındaki eğik şok dalgalarını simüle etmek için kimyasal reaksiyon modelleri ile birleştirilmiş Euler denklemleri kullanılmıştır. Eğik şok dalgalarının kararlılığına ve hızlı başlatmaya dayalı olarak eğik şok dalgalarını uygulanması için bir akış-yanma kriteri önermişlerdir.

Liu, Wang, Xiao, Yan ve Wang (2018), yaptıkları çalışmada eğik şok dalgasının histerezis fenomeni sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada iki boyutlu kararsız reaktif Euler denklemleri, iki adımlı indirgenmiş reaksiyon mekanizması ile temel sayısal denklemler olarak çözülür. Kama açısı değişimi, içeri akış yönü değiştirilerek gerçekleştirilir. Kama açısı belirli bir değerden küçük olduğunda histerezisin ortadan kalkacağını göstermiştir.

Lee ve Glass (1984), yaptıkları çalışma ile durağan akışkan havadaki eğik şok dalgalarının yansıması analitik ve sayısal olarak incelenmiştir. Böylece üretilen akışların anlaşılmasına yardımcı olacak, gaz dinamitçileri tarafından bilinen bazı özellikleri ortaya çıkarmak için mükemmel gazlarla bazı karşılaştırmalar da yapmışlardır. Yapılan deneylerden, şok dalgalarının arkasındaki gevşeme uzunluklarından gösterildi ki, şok cephelerinin arkasındaki akış durumları, şok dalgası yansıması için dalga sistemleri, titreşimsel uyarma ve ayırma ile ilgili olarak donmuş veya neredeyse donmuş olarak gözlemlenmiştir.

Mochalova, Utkin, Savinykh ve Garkushin'in (2021) yaptığı çalışmada bir VISAR lazer interferometre kullanılarak, fiberlerin iki yönü için bir Kevlar/epoksi kompozitinin şok sıkıştırılabilirliği ve parçalanma mukavemetinin deneysel olarak çalışmışlardır. Deneylerde tek kademeli gaz tabancası (düşük basınç testleri) ve patlayıcı sürücü sistemi (30 GPa'ya kadar yüksek basınçlar) kullanıldı. Kevlar/epoksi kompozitinin Hugoniot parametreleri, bir faz geçişi ile ilişkilendirilebilen 17 GPa civarında bir bükülme ile elde edildi. Kompozitin şok sıkıştırılabilirliği ve parçalanma mukavemetinin neredeyse fiber oryantasyonundan bağımsız olduğu gösterilmiştir. İncelenen malzemenin anizotropisinin etkisi, lifler boyunca şok dalgası yayılımında iki dalga konfigürasyonunun oluşumunda kendini gösterir.

Gvozdeva, Faresov, Brossard ve Charpentier (1986), yaptığı çalışmada, havadaki düzlem şok dalgaları ile düz genleşmiş polimer tabakalarıyla kaplanmış sert bir duvarın etkileşiminin mevcut deneysel araştırması, standart bir şok tüpünde ve 100.000 Pa'lık bir ilk test bölümü basıncına sahip bir diyaframda gerçekleştirildi. Olayın Mach sayısı şok dalgası 1,1 ile 2,7 arasında değişmiştir; çeşitli gelen dalga Mach sayılarında poliüretanın arkasındaki duvarda ölçülen tepe basınçları, hesaplanan değerlerle, ideal yayılma modeliyle ve homojen karışım olarak anlaşılan gözenekli bir malzemede şok dalgalarının yansımasıyla karşılaştırılır. Gözenekli malzeme yapısının elastikiyet ve geçirgenliğinin rijit duvarın basınç darbe parametreleri üzerindeki etkisi niteliksel olarak incelenmiştir.

Bachman ve Goodwin (2021), yaptıkları bu çalışmada Kama üzerinde bir reaksiyona simülasyonu ile kama yüzeyinde tutuşma ve eğik şok dalgalarının kararlılığındaki etkisini incelemiştir. İncelemede biri tek açılı bir kama diğeri ise çift açılı bir kama geometrisi olmak üzere İki hesaplama alanı kullanılmıştır. Bu hesaplamalarla birlikte viskoz ve viskoz olmayan kama yüzeyleri sırasıyla kaymalı ve kaymaz adyabatik sınır koşulları kullanılarak modellenmiştir. Birkaç farklı eğik şok dalgası yapısını özetleyen önceki çalışmalarla karşılaştırma yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir.

## İKİNCİ BÖLÜM

### Materyal ve Metot

#### Ekserji

Belirli bir çevredeki bir hal içindeki sistemde ya da kütleden faydalanılabilecek maksimum yararlı işe ekserji denmektedir. Yani, bir düzenden ya da cisimden alınabilecek işin maksimum sınırıdır. Termodinamikte ekserji, enerji ya da maddeyi belirli çevre ile (ölü hal) denge haline ulaştırdığında, bu enerji ya da maddelerden elde edilebilecek maksimum yararlı teorik iştir. Ekserji, enerji kalitesinin bir ölçüsüdür (Bellini, & Lu, 2010).

#### Ölü Hal

Bir sistem eğer ölü halde ise, çevresi ile termodinamik denge halinde demektir. Sistemin ölü haldeyken çevreyle ısı ve mekanik dengededir. Çevre ile karşılaştırıldığında kinetik ve potansiyel enerji sıfırdır. Bu durumda sistem ile çevre arasında kimyasal reaksiyon olmaz. Enerjinin yararlı parçası ekserji, yararsız parçası da anerji ile tanımlanmaktadır (Bellini, & Lu, 2010).

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji}$$

#### Enerjinin Korunumu Kanunu

Enerji korunumu Termodinamiğin birinci kanunu olarak da bilinmektedir. Bu yasaya göre: Enerji kesinlikle kaybolmaz sadece form değiştirmektedir. Enerji korunumu yöntemine göre hal değişimi esnasında kapalı bir sistemde bulunan toplam enerjideki net değişim sisteme giren ile sistemden çıkan enerjinin arasındaki farka eşittir (Bello, & Lu, 2017).

Sisteme giren toplam enerji ( $E_g$ ) – Sistemden çıkan toplam enerji ( $E_ç$ ) = Sistemin toplam enerjisindeki değişim ( $\Delta E_{\text{sistem}}$ )

$$E_g - E_ç = \Delta E_{\text{sistem}} \quad (2.1)$$

#### Ekserji Analizi

Termodinamiğin 1. yasası, enerjinin niceliği ile alakalıdır. Burada enerjinin yoktan var edilemeyeceği vardan da yok edilemeyeceği söylenmiştir. 2. Kanun ise enerjinin niteliği ile alakalıdır. Yani, bir hal değişimi esnasında enerjinin niteliğindeki azalma, entropi üretimi ve

iş yapma yeteneğinin değerlendirilememesi ile alakalıdır ve sistemleri geliştirmek için çeşitli imkânlar sunmaktadır (Bello, & Lu, 2017).

Bir sistemde, hal değişiminden sonra çevre üzerinde hiçbir etki bırakmaksızın ilk haline dönüyorsa sistemdeki hal değişimine tersinir hal değişimi denmektedir. Tersinir hal değişimi sonsuz küçük hız ile meydana gelir. Termodinamik dengeden sapma sonsuz küçük denebilecek derecededir. Ancak gerçek işlemler için hal değişimi belli hızdadır ve hal değişimleri tersinmezdir. Burada dengede hal durumundan olan sapma büyürse halde değişimde hızlı artmakta ayrıca tersinmezlik de büyümektedir. Bir sistem sınırında sıcaklık,  $dQ$  sonsuz küçük hal değişimi için sistem ile çevre arasında ısı alışverişi de olacak şekilde tersinir hal değişim için entropi değişimi aşağıdaki gibidir (Bello, & Lu, 2017).

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \left( \frac{\partial Q}{T} \right) t_r \quad (2.2)$$

Burada tersinir adyabatik hal değişimi için ısı geçişi olmadığından entropi değişimleri de sıfır olmakta ve entropi değişimi de sıfır olmaktadır.

$$s_2 - s_1 = 0 \quad (2.3)$$

İdeal gazlarda molar cinsinden entropi değişimi;

$$d\bar{s} = \frac{\bar{c}_{v0}(T)}{T} dT + \bar{R} \frac{dv}{v} \quad (2.4)$$

$$d\bar{s} = \frac{\bar{c}_{v0}(T)}{T} dT + \bar{R} \frac{dp}{p} \quad (2.5)$$

Bunların integre edilmesiyle iki durum arasında olan molar cinsinden entropide değişim hesaplanabilir.

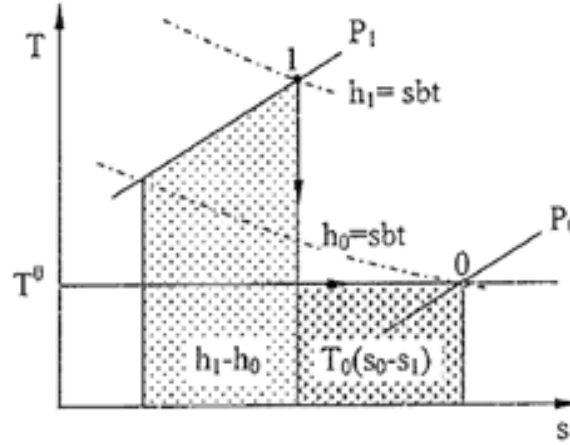
Bir sistemin ölü halde olması, çevresi ile termodinamik dengede olduğunu gösterir. Ölü haldeki bir sistem, çevre sıcaklığı ve basıncı ile aynıdır, çevresine göre Kinetik ve potansiyel enerjiye sahip değildir ve çevresi ile tepkimeye girmez. Böylece bir sistem, belirli bir başlangıç halinden, çevresinin haline, yani ölü hale geçtiği bir tersinir hal değişimi geçirdiğinde, o sistemden en çok iş elde edileceği neticesine varılır. Bu, belirli bir haldeki sistemin faydalı iş potansiyelini temsil eder ve buna da ekserji denir. Ekserji, bir iş üreten sistemin, asıl olarak tesise verdiği iş miktarı değildir. Herhangi bir termodinamik kanununa karşı gelmeden, bir sistemin verebileceği işin ölçüsündeki üst sınırı temsil eder. Belirli bir haldeki sistemin ekserjisinde, sistemin özelliklerine bağlı olduğu gibi çevrenin (ölü hal) şartlarına da bağlıdır. Bundan dolayı, ekserji yalnızca sistemin değil sistem-çevre birleşiminin

bir özeliğidir. Çevreyi değiştirmek ekserji arttırmanın bir başka yoludur fakat asla kolay bir yol değildir (Bello, & Lu, 2017).

### Fiziksel ekserji.

Düzenli olmayan enerji biçimlerinden ekserjinin harcanmasında birinci öge fiziksel ekserji olarak söylenebilir. Madde akışı, çevre ile yalnızca ısıl etkileşimde olan fiziksel işlemler ile başlangıç hallerinden  $P_0$  ve  $T_0$  diye belirlenen çevre haline getirildiğinde elde edilebilen en yüksek iş oranı fiziksel ekserji olarak adlandırılmaktadır (Bello, & Lu, 2017).

İç tersinmezlikleri dışlayabilmek gibi, madde akışının tersinir muamelede maruz kaldığı bir kontrol hacminde giriş halinin  $P_1$  basıncı ve  $T_1$  sıcaklığı; çıkış halinin ise çevre haline denk gelen  $P_0$  basıncı ve  $T_0$  sıcaklığı olması halinde, birim kütle başına geçen ısı miktarı:



Şekil 9. Verilen bir durum ile çevre arasındaki fiziksel ekserji (Çengel vd. 2014).

$$(q_o)_{ter} = T_0(s_0 - s_1) \quad (2.6)$$

Eşitliği ile hesaplanmaktadır. Kontrol bölgesinde kararlı akış için enerji denklemi de:

$$(q_o)_{ter} = - (W)_{ter} = T_0(h_e - h_1) \quad (2.7)$$

Eşitliği ile bulunur.

Fiziksel işlemlerin çözümlemelerinde çoğu kez olayın iki farklı hali için fiziksel ekserji farkı hesaplanır.

$$\varepsilon_{Fiz1} - \varepsilon_{Fiz2} = (h_1 - h_2) - T_0(s_2 - s_1) \quad (2.8)$$

$$\bar{S}(T_2, P_2) - \bar{S}(T_1, P_1) = \int_1^2 \frac{\bar{c}_{P0}(T)}{T} dT - \bar{R} \ln p_2/p_1 \quad (2.9)$$

$$\bar{S}(T_2, v_2) - \bar{S}(T_1, v_1) = \int_1^2 \frac{\bar{c}_{v0}(T)}{T} dT - \bar{R} \ln v_2/v_1 \quad (2.10)$$

Özgöl ısılar sabit kabul edilirse gazlarda tersinir adyabatik hal değışimi;

$$k = c_{p0}/c_{v0} \quad (2.11)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} \quad (2.12)$$

$$P \cdot v^k = T \cdot v^{k-1} = T \cdot P^{\frac{(k-1)}{k}} \quad (2.13)$$

Kimyasal reaksiyonlu işlemlerde, entropi değışimleri hesabında tüm maddeler için ortak bir referans hali seçilir ve mutlak entropi tanımlanır (Bello, & Lu 2017).

Tersinir bir sürecin sonu eğer çevre ile denge sağlanarak bitiyorsa teorik yönden elde edilebilecek maksimum faydalı iş miktarı kullanılabilirlik miktarı veya ekserji miktarıdır. Fiziksel ve kimyasal olarak adlandırılır. İdeal gaz karışımlarında fiziksel ekserji molar cinsten saf ve karışım halinde maddeler için aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$e_{Fiz} = (\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0.(s - s_0) = \int_{T_0}^T \bar{C}_{p0}(T)dT - T_0.\left(\int_{T_0}^T \frac{c_{p0}(T)}{T} dT - \bar{R} \ln p_i/p_0\right) \quad (2.14)$$

$$e_{Fiz} = (\bar{h} - \bar{h}_0)_{kar} - T_0.(s - s_0)_{kar} = \sum_i X_i \left(\int_{T_0}^T \bar{C}_{poi}(T)dT - \left(\int_{T_0}^T \frac{c_{poi}(T)}{T} dT - \bar{R} \ln p_i/p_0\right)\right) \quad (2.15)$$

Kimyasal ekserji referans halde (T<sub>0</sub>, P<sub>0</sub>) olan maddenin çevresiyle kimyasal bileşim yönünden termodinamik açıdan dengeli hale gelme sürecinde elde edilebilecek en fazla yararlı iştir (Bello, & Lu 2017).

### **Kimyasal ekserji.**

Fiziksel ekserji belirlenirken kinetik ve potansiyel ekseriler sıfır olarak tanımlanmıştı. Fiziksel ekserji de görülen son hal akış halinde olan maddenin kimyasal ekserjisini belirleyecek olan tersinir proses için ise başlangıç durumudur. Son durum ise tanımda da belirtildiği üzere çevre ile sınırlandırılmamış olan ölü hal durumuna indirgenen haldir. Kimyasal ekserjiye; ele alınmış olan maddenin yalnızca civarıyla madde alışverişi ve ısı geçişi ihtiva eden süreçlerle çevre durumundan ölü hale getirildiği vakit elde edilebilecek en yüksek iş değerine denir (Bello, & Lu, 2017).

Termodinamik çevre, termodinamik işlem esnasında çevre ve sistem arasında madde ve ısı alış-verişi gerçekleştiği zaman çevre içerisindeki kaynak maddelerinin veya çevre de sıfırdan farklı kimyasal bileşenler kararlı olmayan halinin (T<sub>0</sub>, P<sub>0</sub>) değışmediği büyük bir denge sistemi olarak kabul edilir. Referans maddeler arasında kimyasal reaksiyonlar

gerçekleşmediğinden dolayı sadece tam bir termodinamik denge mevcudiyetinden bahsedilir ve çevrenin toplam ekserji sıfırdır. Civarın verilen sıcaklık ile basıncı ve civar içinde bulunan kimyasal maddelerin verili ölçüleri için, civarı meydana getiren kimyasalların dengesi de hesaplanabilmektedir.

Ekserji kuramsal yönden, doğal civarın göz önüne alınmakta olan şartları için sistemden çıkan iş potansiyellerini göstermektedir (Bello, & Lu, 2017). Kimyasal ekserji referans haldeki ( $T_0$ ,  $H_0$ ) maddenin kimyasal bileşimi yönünden termodinamik dengeye gelmesi esnasında elde edilebilecek en fazla yararlı iştir. Maddelerin her birinin kimyasal yapısı değişik olduğu için kimyasal ekserjisi de değişiktir. Gaz karışımlarının kimyasal ekserjisi;

$$\bar{e}_{kim, kar} = \sum_i x_i \cdot \bar{e}_{kim, i} + \bar{R} \cdot T_0 \sum_i x_i \cdot \ln x_i \quad (2.16)$$

Burada akışın ya da kontrol kütleinde toplam ekserji şu şekilde yazılabilmektedir.

$$\bar{E} = \bar{E}_{Fiz} + \bar{E}_{kim} \quad (2.17)$$

Zamandan bağımsız olan giren-çıkan kütle değerleri eşit olan açık sistemlerde ekserjinin denklemi de;

$$\sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_i \dot{T}_0 S_i - \sum_j \dot{m}_j h_j + \sum_j \dot{T}_0 h_j + \sum_i \dot{Q}_k - \sum_i \dot{Q}_k \frac{T_0}{T_k} - \dot{W} = \dot{E}_{KAYIP} \quad (2.18)$$

Birinci toplam terime giren ekserji ve ikinci toplam terim ile  $\dot{W}$  toplamı çıkan ekserji, üçüncü toplam terimde sistem içinde üretilen ekserji ve  $E_{kayıp}$  yok olan ekserjidir. Sistemin 2. yasa verimi de elde edilmiş ekserjinin verilmiş ekserjiye olan oranıdır.

$$\dot{E}_{KAYIP} = T_0 \left[ \sum_j \dot{S}_j - \sum_i \dot{S}_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \right] \quad (2.19)$$

$$\eta_{ekver} = \frac{\text{Elde edilen ekserji}}{\text{Beslenen ekserji}} \quad (2.20)$$

Tablo 2. *Çeşitli Maddelerin Bazı Hallerdeki Standart Kimyasal Ekserjiler (Çengel vd., 2014)*

| Madde                          | Faz  | Mol ağırlığı (kg/kmol) | Standart kimyasal ekserji (kJ/kmol) |
|--------------------------------|------|------------------------|-------------------------------------|
| Ag                             | Katı | 107,8                  | 73730                               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Katı | 101,9                  | 204270                              |
| CO <sub>2</sub>                | Gaz  | 44                     | 20140                               |
| H <sub>2</sub> O               | Gaz  | 18                     | 11710                               |
| H <sub>2</sub> O               | Sıvı | 18                     | 3120                                |
| CH <sub>4</sub>                | Gaz  | 16                     | 836510                              |
| C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> | Sıvı | 114                    | 5440030                             |

Bir maddenin kimyasal ekserjisi, yerel çevresel durumundan ölü duruma getirilerek maddeden elde edilebilecek maksimum kullanılabilir iş miktarıdır; standart ortamın ortam koşullarında maddenin denge sıcaklığı, basıncı ve kimyasal bileşimidir. Bu çalışmada ilgilenilen maddelerin kimyasal ekserjisi, yakıtların ve ortaya çıkan yanma ürünlerinininkidir. Bu nedenle, ürünler ve reaktanlar standart çevre ile kimyasal dengeye getirilirse, yakıt molü başına çıkarılabilecek maksimum işin belirlenmesi ilgi çekicidir. Bir Mol hidrokarbon  $C_\alpha H_\beta$ 'nin diatomik oksijen O<sub>2</sub> ile tam yanması için:



Tam kimyasal yanma için mevcut maksimum iş, reaktanların kimyasal potansiyellerinin toplamının, ölü haldeki ürünlerin kimyasal potansiyellerinin toplamından farkıdır. Bu ilişki aşağıda sunulmuştur (Bello, & Lu, 2017).

$$W_{rev} = \xi_{ch} = \mu_{C_\alpha H_\beta} + \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right) \mu_{CO_2} - \alpha \mu_{H_2O} - \frac{\beta}{2} \mu_{H_2O} \quad (2.22)$$

Burada  $W_{rev}$  yakıtın molü başına maksimum tersinir iş,  $\xi_{ch}$  yakıtın molü başına kimyasal ekserji ve  $\mu$  kimyasal potansiyellerdir. Bu ilişki, yakıtın kimyasal potansiyeli Gibbs serbest enerjisiyle aynı olduğundan ve kimyasal ekserji değerini yakıt alt ısı değeri (LHV) ile normalleştirerek daha da basitleştirilebilir. Bu, Moran (1989) tarafından türetilen gaz halindeki hidrokarbonlar için kimyasal ekserji  $\xi_{ch}$  ve LHV arasında yaklaşık bir ilişki ile sonuçlanır.

$$\frac{\xi_{ch}}{LHV} \cong 1.033 + 0.0169 \frac{\beta}{\alpha} - \frac{0.0698}{\alpha} \quad (2.22)$$

Yakıtın düşük ısı değeri, yanmadan kaynaklanan H<sub>2</sub>O ürünlerinin son halinin gaz halinde olduğunu varsayarken, yakıtın daha yüksek ısı değeri (HHV), yanmadan kaynaklanan

H<sub>2</sub>O ürünlerinin son halinin sıvı olduğunu varsayar.  $\alpha = 0$  ve  $\beta = 2$ 'ye karşılık gelen hidrojen için de geçerlidir. Hidrojene uygulanan bu çalışmada tüm deneyler için kullanılan stokiyometrik yanmaya karşılık gelir. Genel PDE-LPG sistemi enerji ve ekserji analizi için, LHV varsayımıyla bağlantılı olarak çeşitli doldurma fraksiyonları için kütle akış hızı kullanıldı.

### Termal ekserji.

PDE-LPG tesisinin termal ekserjisi  $\xi_t$  veya entalpisinin ekserjisi, iç ekserji  $\xi_U$  ve akış işi  $\xi_{Flow}$  toplamından oluşur (Moorhouse, & Camberos, (Eds.). 2011). Termal ekserji, çevresel ölü hal ile termal, mekanik ve kimyasal dengeye ulaştığında PDE'nin yanmış yanma ürünlerinin egzoz akışından çıkarılabilen maksimum kullanılabilir enerjidir.

$$\xi_t = \xi_{Flow} + \xi_u \quad (2.23)$$

$$\xi_t = [pv - p_0v]_{Flow} + [(e - e_0) - p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)]u \quad (2.24)$$

Burada  $e_0$  ölü durum iç enerjisidir,  $p_0$  ölü durum basıncıdır,  $v_0$  ölü duruma özgü hacimdir,  $T_0$  ölü durum sıcaklığıdır,  $s_0$  ölü duruma özgü entalpidir.

Deneysel verilerin ekserji analizinde, ölü hal sıcaklığına göre entropiyi hesaplamak için gereken toplam sıcaklık ölçümünün olmaması nedeniyle iç enerjinin ekserjisi hesaba katılmamıştır. Bununla birlikte, akış ekserjisi, 1 atm'lik ölü durum basıncına göre durgunluk basıncı ölçümleriyle hesaplanmıştır. Keyfi bir iş veya ısı aygıtı boyunca genelleştirilmiş bir ekserji dengesidir (Bello, & Lu, 2017).

### Mekanik ekserji.

PDE-LPG tesisinin mekanik ekserjisi  $\xi_{ME}$ , bağlı sıkıştırma yaylarını sıkıştıran ve uzatan pistonun hareketinden kaynaklanan yay enerjisinden oluşur. Bu yay enerjisi tamamen işe dönüştürülebilir. Başka bir deyişle, sistemin yay enerjisinden gelen mekanik ekserji, kinetik enerjinin kendisine eşittir. Mekanik ekserji, yer değiştirmeye tekabül eden ve dolayısıyla sıfır olan ölü hal ile dengeye ulaştığında yaydan elde edilebilecek maksimum kullanılabilir iştir (Bello, & Lu, 2017). Mekanik ekserji ile verilir.

$$\xi_{ME} = \frac{1}{2} \omega_n^2 x^2 \quad (2.25)$$

Burada  $\omega_n$  piston yay sisteminin doğal frekansıdır ve  $x$  yer değiştirmedir. PDE-LPG tesisinin deneysel verilerden mekanik ekserji analizi için yayın yer değiştirmesi doğrudan ölçüldü. Etkili yay sabiti, sistemin doğal frekansının belirlenmesine izin veren ayrı deneyler yoluyla ölçülmüştür (Bello, & Lu, 2017).

PDE'den piston-yay sistemi üzerindeki kuvvet girişi, kısa süreli bir darbe olarak tanımlanabilir. Piston-yay sisteminin darbeli yüklemeye normalize tepkisi, az sönümlü ve aşırı sönümlü bir durum için modellenmiştir. Piston üzerine, piston kütesine  $m$  başlangıç hızı  $\dot{x} = l/m$  vermeye benzer şekilde hareket eder, ancak onu  $x = 0$  başlangıç yer değiştirmesi ile bırakır. Az sönümlü piston-yay sistemi için darbe tepki fonksiyonu

Aşırı sönümlü durum için,

$$x(t) = \frac{l}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t), \quad \zeta < 1 \quad (2.26)$$

$$x(t) = \frac{l}{m\omega^*} e^{-\zeta\omega_n t} \sinh(\omega^* t), \quad \zeta > 1 \quad (2.27)$$

burada  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$  ve  $\omega^* = \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$ ,  $\omega_d$  sönümlü doğal frekans ve  $\zeta$  sönüm oranıdır (Horlock, 1997).

$$\omega^* = \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.28)$$

PDE-LPG tesisinin piston-yay sistemi, piston bilyeli yataklarla tabanda basitçe desteklendiğinde ve PDE meme flaşını örtmediğinde, titreşimi düşük sönümlü bir modda çalışır. Bu yetersiz sönümlü işlem, mekanik olarak lineer güç üreticine aktarılan salınım hareketi üretir. Bu düşük sönümlü çalışma aynı zamanda PDE-LPG'nin darbe-darbe etkileşimi yoluyla Rezonansta potansiyel çalışmasına izin verir, bu da piston-yay sisteminin tepkisini bir büyüklük sırasına göre büyük ölçüde artırabilir (Bello, & Lu, 2017).

Piston yayı sistemi ayrıca, piston PDE meme flaşını kapladığında ve PDE meme flaşında bulunan oluklar içinde yuvarlanan ayar vidalı bilyeli rulmanlarla desteklendiğinde aşırı sönümlü modda da çalıştırılabilir. Az sönümlü çalışma, pistonun meme çıkışından daha uzağa yerleştirilmesini ve dolayısıyla daha büyük tepe yer değiştirmeleri üreten, ancak yay pistonu nominal konumuna geri döndürdükten sonra salınım hareketi sağlamayan aşırı sönümlü mod aksine daha küçük yer değiştirmeler üretmesini gerektirir veya ölü hali (Bello, & Lu, 2017).

## Şok Dalgalarında Ekserji Analizi

### Normal şok dalgaları ekserji analizi.

Süpersonik akışlarda ve karşı basınç noktalarında, yakınsak ıraksak lülelerin ince olan bölümünde akışkanda şok dalgası oluşturan ani değişiklikler olur. Şok dalgasında akış yüksek oranda tersinmezdir. Şimdi şok dalgasındaki denklemleri inceleyelim,

Normal şok dalgasından geçen akım için;

Kütlenin korunumu;

$$\rho_1 AV_1 = \rho_2 AV_2 \quad (2.29)$$

Enerjinin korunumu için denklem (2.29) kullanıldığında;

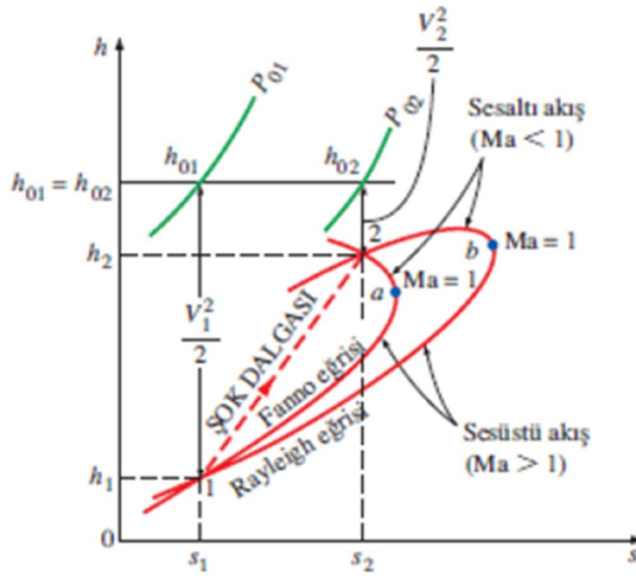
$$h_{01} = h_{02} \quad (2.30)$$

Momentumun korunumu;

$$A(P_1 - P_2) = \dot{m}(V_2 - V_1) \quad (2.31)$$

Entropi artışı;

$$s_2 - s_1 \geq 0 \quad (2.32)$$



Şekil 10. Fanno ve Rayleigh eğrisi (Çengel vd., 2014).

Fanno eğrisi, enerji ve kütlenin korunumu denklemleri tek denklem haline getirildiğinde ve h-s diyagramı üzerinde özellik bağıntıları kullanılarak çizildiğinde meydana gelen eğridir. Fanno eğrisi aynı kütle akışına ve durma entalpisinin sahip hallerin geometrik yeridir.

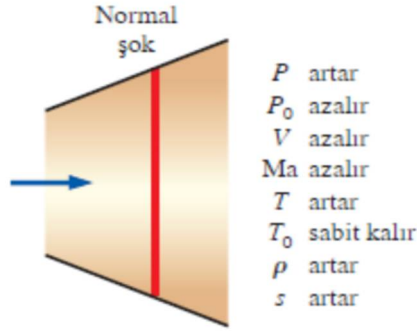
Rayleigh eğrisi, momentumun ve kütlenin korunumu denklemleri tek denklem haline getirildiğinde ve h-s diyagramı üzerinde çizildiğinde meydana gelen eğridir.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \frac{P_2 M_{a2} c_2}{P_1 M_{a1} c_1} = \frac{P_2 M_{a2} \sqrt{T_2}}{P_1 M_{a1} \sqrt{T_1}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2 \left(\frac{M_{a2}}{M_{a1}}\right)^2 \quad (2.33)$$

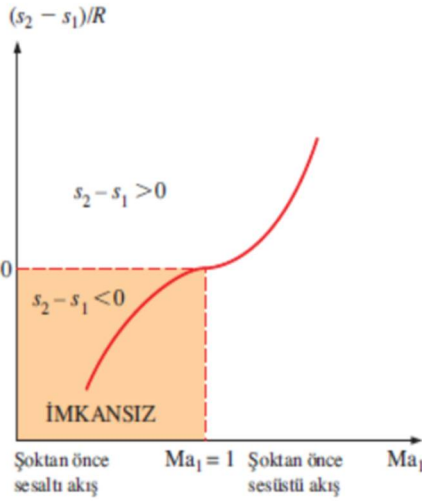
$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{M_{a1} \sqrt{1 + M_{a1}^2 (k-1)/2}}{M_{a2} \sqrt{1 + M_{a2}^2 (k-1)/2}} \quad (2.34)$$

$$M_{a_2}^2 = \frac{M_{a_1}^{2+2/(k-1)}}{(2M_{a_1}^{2k/(k-1)})-1} \quad (2.35)$$

Bu denklemler Rayleigh ve Fanno eğrilerinin kesişmesini gösterir.



Şekil 11.  $k=1.4$  olan ideal gazda şok önü ile arkası akış özelliklerinin oranları ve normal şoktan geçişte akış özelliklerinin değişimi (Çengel vd., 2014).



Şekil 12. Normal şokun önü ve arkası için entropi eğrisi (Çengel vd., 2014).

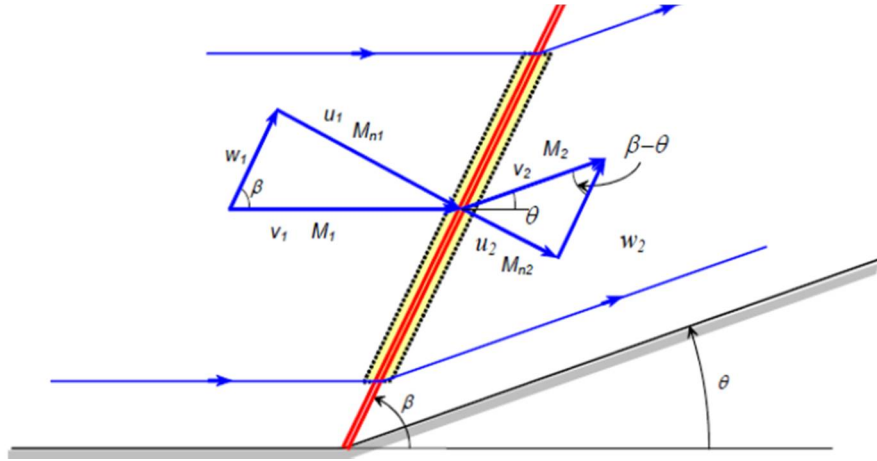
$$S_2 - S_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (2.36)$$

Şoktan geçen akım tersinmez ve adyabatik olduğundan, 2. kanuna göre şok dalgası eni boyunca entropi artar. Bu yüzden  $Ma_1 < 1$ 'den küçük hızlarında şok dalgası meydana gelmez. Yoksa Entropideki değişim negatif olur ki bu da imkânsızdır. Adyabatik akışta şok dalgaları sadece ses üstü akışlarda oluşabilir (Levy vd., 1993).

### Eğik bir şok dalgası ekserji analizi.

Normal bir şoktan farklı olarak, olay yukarı akış yönüne göre eğimli bir şok dalgasıdır. Süpersonik bir akış, akışı etkin bir şekilde kendine çeviren ve sıkıştıran bir köşeyle karşılaştığında ortaya çıkar. Akış yukarı akım çizgileri, şok dalgasından sonra düzgün bir şekilde sapar. Eğik bir şok dalgası üretmenin en yaygın yolu, süpersonik, sıkıştırılabilir akışa bir kama yerleştirmektir. Normal bir şok dalgasına benzer şekilde, eğik şok dalgası, bir gazın

termodinamik özelliklerinde neredeyse süreksiz değişikliklerin meydana geldiği çok ince bir bölgeden oluşur (URL-2).



Şekil 13. Eğik şok dalgası simülasyonu (URL-2).

Süreklilik denklemleri:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (2.37)$$

Kontrol hacminden geçen bütün akım çizgileri üzerinde akım özelliklerinin aynı olduğu kabul edilir. Şoka paralel doğrultuda momentum denklemi:

$$w_1 = w_2 \quad (2.38)$$

Şoka dik doğrultuda momentum denklemi:

$$p_1 - p_2 = (\rho_2 v_2) v_2 - (\rho_1 v_1) v_1$$

$$p_1 + (\rho_1 v_1) v_1 = p_2 + (\rho_2 v_2) v_2 \quad (2.39)$$

Şok ince olduğu için şoku geçmekte olan akış etrafı ile ısı alışverişinde bulunmaz. Dolayısıyla olayın adyabatik bir gelişme farz edilir.

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.40)$$

Hız vektörleri için;

$$V_1^2 = v_1^2 + w_1^2 \quad (2.41)$$

$$V_2^2 = v_2^2 + w_2^2 \quad (2.42)$$

Yazılan denklemlerden yararlanarak yazarsak;

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.43)$$

$M_1$  in farklı değerlerinde farklı  $\theta$  sapma açıları için yapılan sayısal çözümler tablo şeklinde ya da eğik şok diyagramı gibi grafiksel olarak düzenlenir (URL-2). Bir  $M_1$  Mach sayısında  $\theta$  sapma açısının rastgele değerine karşılık  $\beta$  için iki değişik çözüm vardır. Akımda sapma olmaması ( $\theta = 0$ ) halinde bu çözümler:

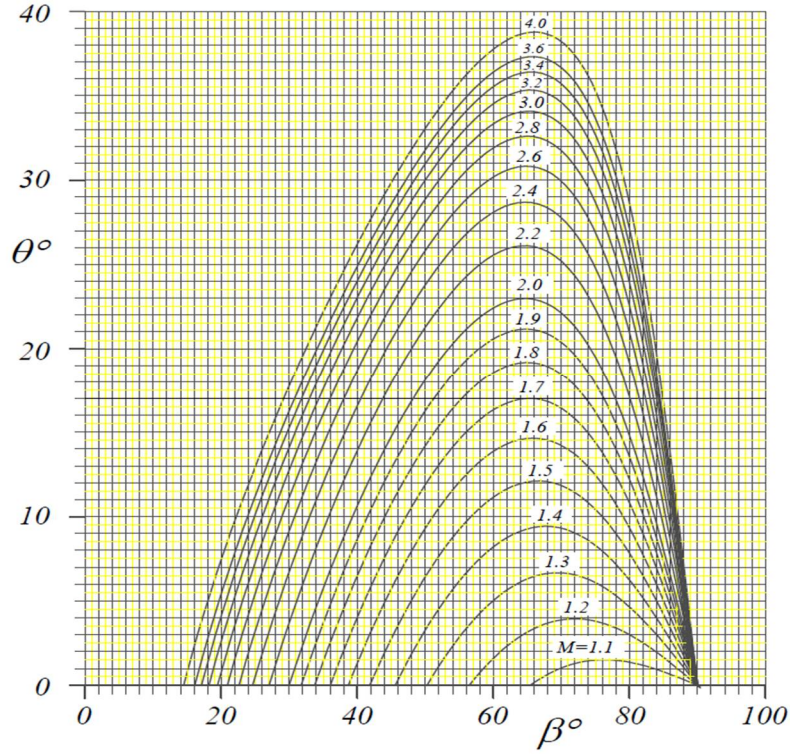
Normal şok

$$\cotan\beta = 0 \rightarrow \beta = \pi/2 \quad (2.44)$$

Sonsuz akım (Mach dalgası)

$$M_1^2 \sin\beta - 1 = 0 \rightarrow \beta = \sin^{-1}(1/M_1) \quad (2.45)$$

Denklemler eğik şok için çıkarılmış ancak normal şok denklemlerinden farklıdır. yani eğik şoka dik olan akım bileşenleri için olan dik-şok denklemleridir. Tezde normal şok bağıntıları bu şekilde işlenerek eğik şok dalgaları için önemli denklemler bulunacaktır.



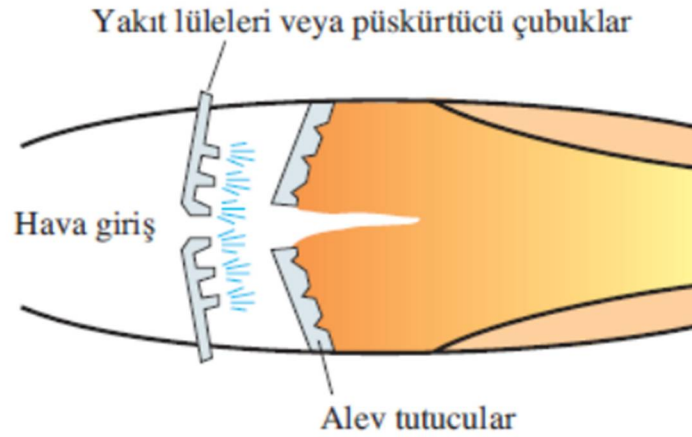
Şekil 14. Eğik şok diyagramı (URL-2).

### Isı Geçişli ve Sürtünmenin İhmal Edildiği Rayleigh Kanal Akışı

İzentropik akışlarda ısı geçişi ve sürtünme gibi tersinmezlikleri yoktur. Uygulamada da çoğu sıkıştırılabilir akış problemlerinde ise, buharlaşma, nükleer tepkime, yoğunlaşma ve yanma gibi kimyasal tepkimelerin yanında ayrıca kanal çeperinden ısı kazancı ya da kaybı vardır. Akış sırasında kimyasal bileşimde değişiklikler ve kimyasal, gizli ya da nükleer

enerjilerin ısıl enerjiye dönüşümü oluşabilir. Bu problemleri analiz etmek zor ancak basitleştirilmiş bir model olan Rayleigh Akışı ile mümkündür (Çengel vd., 2014).

Rayleigh akışlarında sabit özgül ısı ideal gazın ısı geçişli bir boyutlu daimi akışında kanalın en kesit alanı sabittir. Sürtünme de vardır.



Şekil 15. Rayleigh akışı (Çengel vd., 2014).

Uygulamadaki birçok sıkıştırılabilir akış problemi, kanal cidarından ısı kazancı şeklinde modellenen yanma olayını içerir.

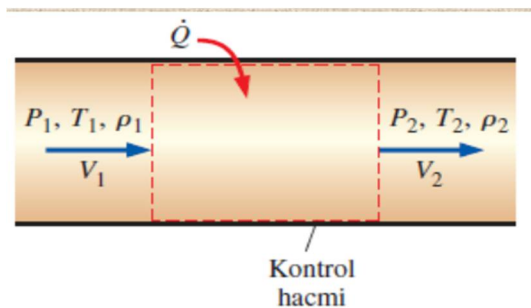
$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \quad \text{Süreklilik denklemi} \quad (2.46)$$

$$P_1 + \rho_1 V_1^2 = P_2 + \rho_2 V_2^2 \quad \text{X-Momentum denklemi} \quad (2.47)$$

$$q = c_p(T_2 - T_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \quad \text{Enerji denklemi} \quad (2.48)$$

$$q = h_{02} - h_{01} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Entropi değişimi} \quad (2.49)$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2} \quad \text{Hal denklemi} \quad (2.50)$$



Şekil 16. Sabit en-kesitli bir kanal için sürtünmenin ihmal edildiği ancak ısı geçişinin olduğu bir akışa ait kontrol hacmi (Çengel vd., 2014).

$R$ ,  $k$  ve  $c_p$  özellikleri bilinen bir gazı ele alalım. Verilen bir giriş hali 1 için giriş özellikleri olan  $P_1$ ,  $T_1$ ,  $V_1$  ve  $s_1$  bilinmektedir. Verilen bir  $q$ . Isı geçişi değeri için, 5 çıkış özelliği  $P_2$ ,  $T_2$ ,  $V_2$ , ve  $s_2$  5 denklemden belirlenebilir.

Rayleigh eğrisi ve denklemlerinden

Özellik bağıntılarını, enerjinin, kütle ve momentumun korunumu denklemlerini sağlayan tüm haller Rayleigh eğrisi üzerindedir (Çengel vd., 2014).

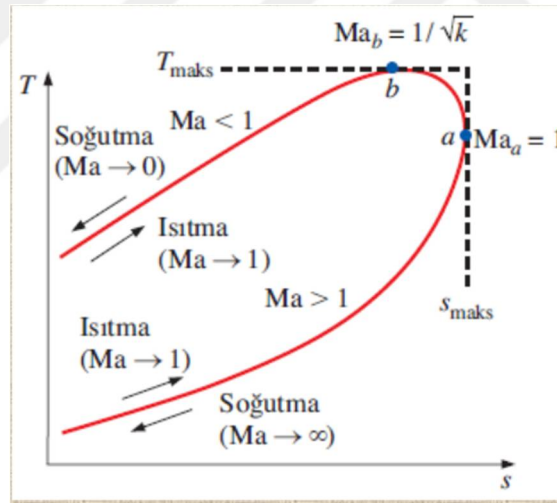
Isı kazancıyla entropi artar, bu yüzden akışkana ısı geçtikçe Rayleigh eğrisi üzerinde sağa doğru ilerleme olur.

Hız ve basınç ters eğilimlere sahiptir.

Ses altı ve ses üstü akışlarda enerji dengesine göre, ısıtmanın  $T_0$  durma sıcaklığını arttıracak, soğumanın ise azaltacak ortadadır.

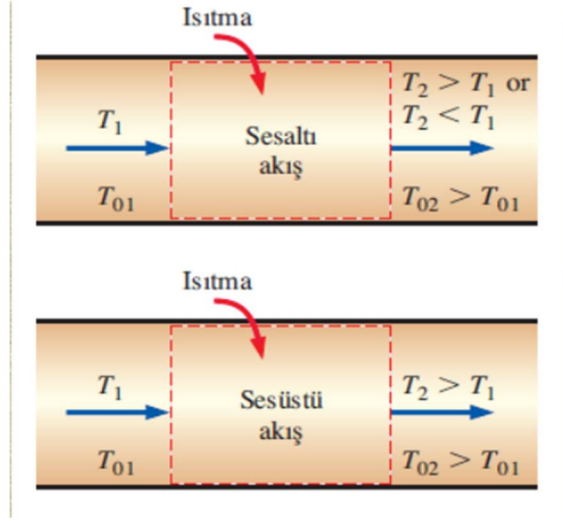
Isıtma işlemi ses altı akışta Mach sayısını artırırken, ses üstü akışta azaltır.

Yoğunluk ve hız ters orantılıdır (Çengel vd., 2014).



Şekil 17. T-s diyagramı (Çengel vd., 2014).

Isı geçişinin olduğu, sürtünmenin ihmal edildiği sabit en-kesit alanlı bir kanaldaki T-s diyagramı (Rayleigh akışı).



Şekil 18. Rayleigh akışlarda ses üstü ve ses altı durumlarındaki sıcaklık değişimi (Çengel vd., 2014).

Rayleigh akışı ses üstü ise, ısıtma işlemiyle akışkan sıcaklığı daima yükselir, ancak akış ses altı ise sıcaklık düşebilir. Çoğu özelliklerde ısıtma ve soğutmanın etkileri terstir. Bunun yanında akış ister ses altı ister ses üstü olsun durma basıncı soğutma ile artar, ısıtma ile azalır.

Tablo 3. Isıtma ve Soğutmanın Rayleigh Akışının Özellikleri Üzerindeki Etkisi

| Özellik             | Isıtma                                          |         | Soğutma                                         |         |
|---------------------|-------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------|---------|
|                     | Sesaltı                                         | Sesüstü | Sesaltı                                         | Sesüstü |
| Hız, V              | Artar                                           | Azalır  | Azalır                                          | Artar   |
| Msch Sayısı, Ma     | Artar                                           | Azalır  | Azalır                                          | Artar   |
| Durma sıcaklığı, To | Artar                                           | Artar   | Azalır                                          | Azalır  |
| Sıcaklık, T         | Artar $Ma < 1/k_2^1$ ,<br>Azalır $Ma > 1/k_2^1$ | Artar   | Azalır $Ma < 1/k_2^1$ ,<br>Artar $Ma > 1/k_2^1$ | Azalır  |
| Yoğunluk, $\rho$    | Azalır                                          | Artar   | Artar                                           | Azalır  |
| Durma basıncı, Po   | Azalır                                          | Azalır  | Artar                                           | Azalır  |
| Basınç, P           | Azalır                                          | Artar   | Artar                                           | Azalır  |
| Entropi, s          | Artar                                           | Artar   | Azalır                                          | Azalır  |

### Rayleigh akışında özellik denklemleri.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1+k.Ma_1^2}{1+k.Ma_2^2} \quad (2.51)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left[ \frac{Ma_2(1+k.Ma_1^2)}{Ma_1(1+k.Ma_2^2)} \right]^2 \quad (2.52)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{Ma_1^2 (1+kMa_2^2)}{Ma_2^2 (1+kMa_1^2)} \quad (2.53)$$

$$\frac{P}{P^*} = \frac{1+k}{1+kMa^2} \quad (2.54)$$

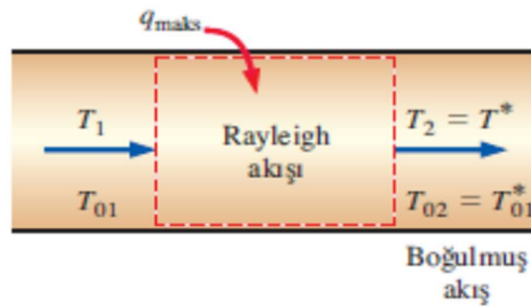
$$\frac{T}{T^*} = \left[ \frac{Ma(1+k)}{1+kMa^2} \right]^2 \quad ve \quad \frac{V}{V^*} = \frac{\rho^*}{\rho} = \frac{(1+k)Ma^2}{1+kMa^2} \quad (2.55)$$

$$\frac{T_0}{T_0^*} = \frac{(k+1)Ma^2[2+(k-1)Ma^2]}{(1+kMa^2)^2} \quad (2.56)$$

$$\frac{P_0}{P_0^*} = \frac{k+1}{1+kMa^2} \left[ \frac{2+(k-1)Ma^2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.57)$$

### Boğulmuş rayleigh akışında durum.

Mach sayısının 1 olduğu kritik haldeki akışkan ısıtma ile ses üstü hızlara çıkarılamaz. Yani akış boğulmuştur (Çengel vd., 2014).



Şekil 19. Boğulmuş akış gösterimi.

$$q_{max} = h_0 - h_{01} = c_p(T_0 - T_{01}) \quad (2.58)$$

Verilen giriş hali için maksimum ısı geçişi çıkış halinde sonik şartlara ulaşıldığında oluşur.

$$\frac{T_0}{T_0^*} = \frac{(k+1)Ma^2[2+(k-1)Ma^2]}{(1+kMa^2)^2} \quad (2.59)$$

$$\frac{P_0}{P_0^*} = \frac{k+1}{1+kMa^2} \left( \frac{2+(k-1)Ma^2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.60)$$

$$\frac{T}{T^*} = \left( \frac{Ma(1+k)}{1+kMa^2} \right)^2 \quad (2.61)$$

$$\frac{P}{P^*} = \frac{1+k}{1+kMa^2} \quad (2.62)$$

$$\frac{V}{V^*} = \frac{\rho^*}{\rho} = \frac{(1+k)Ma^2}{1+kMa^2} \quad (2.63)$$

### Gazlarda Patlama ve Parlama Arasındaki Niteliksel Farklılıklar

Patlama motorları, parlama muadillerine kıyaslandığında daha yüksek çevrim performansları sebebiyle incelenmiştir. Parlamalı yanmanın aksine, patlamalı yanmanın doğasındaki birinci ayırım, bir şok dalgasının varlığının oluşudur. Bu şok dalgası, yakıt-oksitleyici karışımını çok hızlı bir şekilde sıkıştırarak bir patlamanın, bir parlamaya benzer, ancak daha yüksek bir basınç ve sıcaklıkta aynı miktarda iç enerjiyi serbest bırakmasına müsaade etmektedir (Friedman, 1953).

Bunlara ek olarak, daha yüksek teorik termodinamik çevrim verimlilikleri sebebiyle havacılık ve uzay havası soluma ve roket uygulamaları için patlama motorları tavsiye edilmiştir. Bu daha yüksek termodinamik verimlilik, güç üretimi için de yararlıdır. Bununla birlikte, bu daha yüksek termodinamik çevrim verimlerinin deneysel olarak gerçekleştirilmesinin zor olduğu ispatlanmıştır. Güç üretimi için bir patlama motorunun geliştirilmesinde birkaç büyük zorluk yaşandı (Friedman, 1953). Bunlara bakıldığı zaman;

- Yakıt-hava operasyonları için güvenilir patlamalar elde etmek ve yanmış gazların iç enerjisini mekanik işe dönüştürmek için termomekanik sistemin tasarımı.
- Çeşitli yakıt oksitleyici kombinasyonları için patlama hücresi boyutu bilgisi ve DDT geçiş cihazlarının kullanımı,
- Oksitleyici olarak hava ile bir dizi hidrokarbon yakıt için güvenilir patlamalar elde etmeyi mümkün kılmıştır

Tablo 4. *Gazlarda Patlama ve Parlama Arasındaki Niteliksel Farklılıklar (Friedman, 1953)*

| Parameter       | Detonation(patlama) | Deflagration(parlama) |
|-----------------|---------------------|-----------------------|
| $u_1/\alpha_1$  | 5-10                | 0.0001-0.03           |
| $u_2/u_1$       | 0.4-0,7             | 4-16                  |
| $p_2/p_1$       | 13-55               | 0.98-0.976            |
| $T_2/T_1$       | 8-21                | 4-16                  |
| $\rho_2/\rho_1$ | 1.4-2,6             | 0.06-0.25             |

Tablo 5. *Detonasyonlu ve Deflagrasyon Şeklindeki Yanmaların Temel Parametrelerinin*

| Temel Parametreler                      | Detonasyon durumu | Deflagrasyon durumu |
|-----------------------------------------|-------------------|---------------------|
| Yoğunlukların Oranı ( $\rho_1/\rho_0$ ) | 1.5-2,7           | 0.6 – 1,3           |
| Sıcaklıkların Oranı ( $T_1/T_0$ )       | 8-20              | 5-16                |
| Basınçların Oranı ( $p_1/p_0$ )         | 12-65             | 0.98-0.97           |
| Dalganın Mach sayısı (Ma)               | 1.1-5             | 0.0001-1.04         |

Bir patlama dalgasının Mach sayısı  $M1 = u1/a1$  yanma dalgasının, bir parlama dalgasınınkinden en az iki büyüklük mertebesinde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yanmış gazların yanmamış gaza göre hızı, bir patlama dalgasının aksine bir parlama için daha yüksektir. Bununla birlikte, bir patlama dalgasının yanma ürünlerinin basınç ve yoğunluk artışı, şok sıkıştırması nedeniyle bir parlama dalgasından en azından bir büyüklük sırası daha yüksektir (Bello, & Lu, 2017).

Alevlenmenin basınç ve yoğunluk oranlarının alt birim değerleri, patlama ve alevlenme arasındaki önemli bir farkı vurgular. Patlama reaksiyonları için ürünlerin basıncı ve yoğunluğu, reaktanların ortam koşullarının üzerine çıkarken, parlama reaksiyonları için ürünlerin basıncı ve yoğunluğu, reaktanların ortam koşullarının altına düşer. Bu temel fark aynı zamanda patlamanın eşanlı olarak “basınç kazançlı yanma” olarak adlandırılmasının nedenidir. Hem parlama hem de patlama dalgaları, yanma nedeniyle enerjiyi serbest bırakır ve beklendiği gibi, her iki reaksiyonun sıcaklık oranları, büyüklük olarak aynı aralıktadır. Bununla birlikte, bir patlama reaksiyonunun sıcaklık oranının, parlama yanmasına maruz kalan eşdeğer reaktan kimyası için tipik olarak %20 daha yüksek veya daha fazla olduğuna dikkat etmek önemlidir, bu nedenle patlama reaksiyonlarının entropisi daha düşüktür (Bello, & Lu, 2017).

Şekil bir tüp içindeki patlama dalgası yayılımının tek boyutlu bir şemasını göstermektedir. 1 ve 2 alt simgelerinin sırasıyla reaktan ve ürün gazlarının durum özelliklerine karşılık geldiği Tablo 'dekiyle aynı kural kullanılır. Bu şekil, sabit bir şok dalgası çerçevesinde gaz ürünlerinin ve reaktanların hızlarını ve laboratuvar alanındaki sabit tüp çerçevesindeki hızları gösterir. Bu sorunu çözmek için, Hugoniot denklemini türetmek için ürünlerin ve reaktanların durum denklemleri ile birlikte entegre korunum denklemleri uygulanabilir. Yayılan bir patlama dalgası boyunca gaz durumlarını tanımlayan Hugoniot denkleminin ayrıntılı bir türevidir. Hugoniot denklemi şunu belirtir:

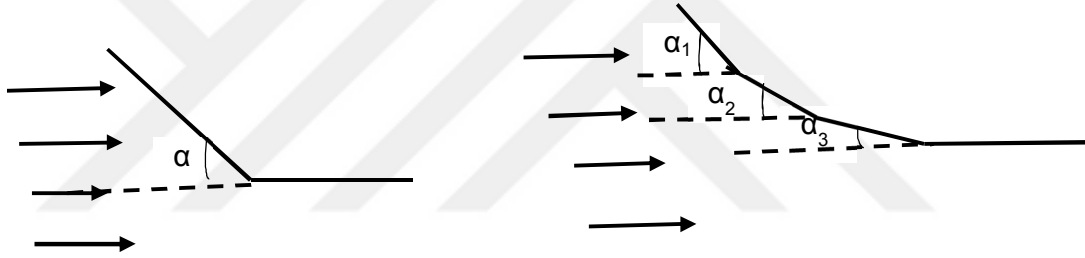
$$e_2 - e_1 = \frac{1}{2}(p_2 + p_1)(v_2 + v_1) \quad (2.64)$$

Burada  $e$  iç enerji,  $p$  basınçlar ve  $v$  özgül hacimlerdir.

| Velocities with wave fixed in lab space              |               |                     |                 |        |          |
|------------------------------------------------------|---------------|---------------------|-----------------|--------|----------|
|                                                      | $-u_2$        | 0                   |                 | $-u_1$ |          |
| $P_2$                                                | Burned<br>gas | Wave direction<br>→ | Unburned<br>gas |        | $P_1$    |
| $\rho_2$                                             |               |                     |                 |        | $\rho_1$ |
| $T_2$                                                |               |                     |                 |        | $T_1$    |
|                                                      | $u_1 - u_2$   | $u_1$               |                 | 0      |          |
| Velocities with respect to a fixed tube in lab space |               |                     |                 |        |          |

Şekil 20. Patlama dalgası yayılımının şeması (Bello, & Lu, 2017).

Yapılan araştırmalar ve elde edilen bulgular ışığında ilerletilen çalışmalar sonucu aşağıdaki tablolarda ve grafiklerde verilmiştir.



$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{V}{\sqrt{kRT}} \quad (2.65)$$

$$Ma_{1n} = Ma_1 \cdot \sin\beta \quad (2.66)$$

$$Ma_{1t} = Ma_1 \cdot \cos\beta \quad (2.67)$$

$$Ma_{2n} = Ma_2 \cdot \sin(\beta - \alpha) \quad (2.68)$$

$$Ma_{2t} = Ma_2 \cdot \cos(\beta - \alpha) \quad (2.69)$$

$$\tan\alpha = 2\cot\beta \cdot \frac{Ma_1^2 \cdot \sin^2\beta - 1}{Ma_1^2 \cdot (k + \cos^2 2\beta) + 2} \quad (2.70)$$

Burada  $\alpha$  açısı ve  $Ma_1$  bilindiğinden iterasyonla  $\beta$  zayıf şok açısı ve  $\beta$  güçlü şok açıları hesaplanır. Daha sonra diğer bilinmeyenler bulunur. Burada  $k$  özgül ısılar oranı olup  $k=1.4$  alınmıştır.

$$Ma_{2n} = \frac{Ma_{1n}^2 + 2/(k-1)}{Ma_{1n}^2 \cdot \frac{2k}{k-1} - 1} \quad (2.71)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{k.Ma_{1n}^2 + 1}{k.Ma_{2n}^2 + 1} \quad (2.72)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\left(\frac{k-1}{2}\right)Ma_{1n}^2 + 1}{\left(\frac{k-1}{2}\right)Ma_{2n}^2 + 1} \quad (2.73)$$

$$s_{irr} = s_2 - s_1 = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (2.74)$$

## Detonasyon Oluşumu ve Özellikleri

Detonasyon oluşumu fiziksel bölge olarak 4'e ayrılmaktadır. Bunlara bakıldığında zaman ses altı hızda oluşan parlamaya, parlamanın hızlanması, farklı patlama merkezlerinin oluşumu ve detonasyon dalgasının evrimi olarak söylemek mümkündür (Shepherd, & Lee, 1992). Başlaması basit bir kıvılcımla gerçekleşmektedir. Klasik patlama diyebileceğimiz süreç ses altı hızda ve düşük enerjide olmaktadır. Ama çevresindeki yakıt ve oksitleyici daha büyük bir parlamaya için başlangıçtaki parlamanın hemen çevresinde birikmiş şekilde yer alır. Ardında çevresi de parlamaya başlayan ve aldığı enerji ve ısı ile basınçlanıp hızlanan karışım, birbiriyle kesişmeye başlayacak birden fazla patlama alanlarını oluşturmuştur. Bu farklı patlama alanları ve kılavuz etrafında yönlendirilerek yeni patlama alanları oluşturması ile ani dalga pikleri ve basınç artışları oluşturur. Tam bu anda Detonasyon oluşmaması için hiçbir sebep yoktur. Ve böylelikle detonasyon gerçekleşmiş olur. Yüksek hızlarda olan parlamaya artık Detonasyon haline dönüşmüş ve hemen sonrasında donuk patlama haline gelmiş olmaktadır. Donuk patlama özetlenirse yakıt ve oksitleyici o kadar hızlı dalgayla karşılaşmış olur ki adeta patlama esnasında yerinden kaçamadan gelen dalgaya maruz kalır ve hareket bile edemez konumda olur (Wood, & Kirkwood, 1958).

Detonasyon şok dalgası patlamadan sonra aniden yakıt ve gaz karışımını sıkıştırması meydana gelir. Yüksek basınçlara ve sıcaklıklara gelen gaz karışımı lokal ve açık alanda hızlıca biriktirdiği enerjiyi serbest bırakma durumuna geçecektir. Bu ısı ve enerji salınımı şok dalgasının hemen ardında gerçekleşecektir. Isı salınımıyla geri kazanılan basınç, detonasyon dalgasının ileri formda hareket etmesine sebep olacaktır. Bu durum yanmamış gazların önünde olacağı için yanmamış gazların tetiklenmesi ve özellikle sürekli detonasyon motoru için sürdürülebilirlik sağlamış olacaktır. Detonasyon ardında oluşan düzenli basınç alanı, ardından oluşan enerji ve basınç çöküşü patlama bölgesindeki geometrik sınırlara ve dalga boyuna bağlıdır (Matsutomi, 2010).

Burada Detonasyon dalgasının hızlanmasıyla ilgili 3 pozitif patlama davranışı incelenmesi gerekmektedir (Shepherd, & Lee, 1992).

- Şok dalgası altındaki reaktif aktif maddelerle parlamanın etkileşimi

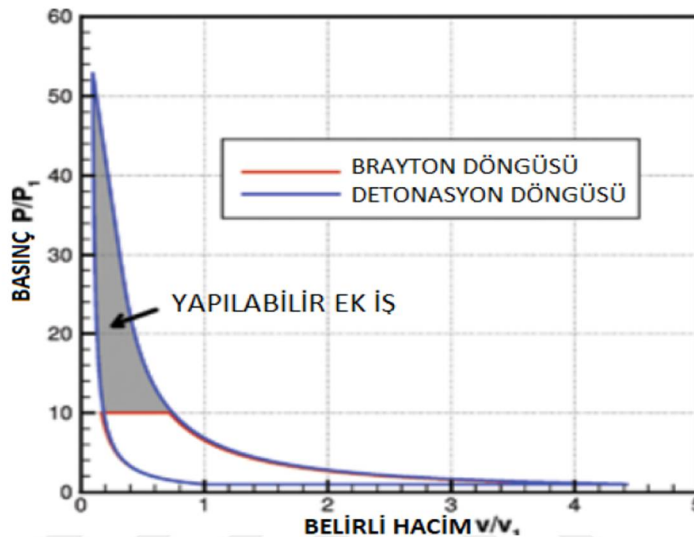
Şok sıkıştırma tarafından indüklenen parçacık hızı, alevin yayıldığı reaksiyona girmemiş akışın Reynolds sayısını da yükseltmiş olur. Yeterince yüksek Reynolds sayısında akış, aşağıda tartışıldığı gibi türbülanslı yapılardan dolayı yanma hızında ve enerji salınım oranındaki artışlarla birlikte laminierden türbülansa geçecektir (Shepherd, & Lee, 1992).

- Yansıyan şok dalgası ile parlamanın etkileşimi

Yansıyan şoklar, alevin gerilmesine ve bozulmasına neden olan Rayleigh-Taylor ara yüzü kararsızlığına sebep olan alevle etkileşime girer. Şok-alev etkileşimi tipik olarak sınırlı durumlarda bulunur, çünkü alev tarafından üretilen sıkıştırma dalgaları katı sınırlardan yansır. Alevin yüzey alanı arttıkça enerji açığa çıkma hızı artar ve böylelikle alev hızlanmış olur. Artan Reynolds sayısı ile birleşen çarpık akış alanı, aşağıda tartışıldığı gibi alevi daha da hızlandıran türbülansa yol açar.

- Engeller ve gaz jetleri ile parlamanın etkileşimi

Engeller, akışın kinetik enerjisinin bir kısmını büyük ölçekli türbülansa dönüştürür ve bu türbülansa sonradan kademeli olarak daha ince ölçeklere dönüştür. Büyük ölçekli türbülanslı yapılar alev yüzey alanında daha da büyük artışlara neden olur. Daha küçük ölçekli yapılar ise moleküler seviyede türbülanslı karıştırma yoluyla türleri ve termal taşıma işlemlerini iyileştirir ve böylelikle yine enerji salınım hızında ve etkin alev yayılma hızında bir artmasına sebep olur. Detonasyon oluşumlu kimyasal tepkime ve klasik Brayton çevrimi arasında oluşan enerji kıyaslanmıştır.



Şekil 21. P-V diyagramında Brayton ve Detonasyon dalgasının oluşum döngülerinin karşılaştırılması (Bello, & Lu, 2017).

Darbeleri detonasyon motoru, temeline bakıldığında ses altı hızlarda meydana gelen dalganın ses üstü hızlara çıkartılma enerjisini kontrollü sağlayan bir araç olarak

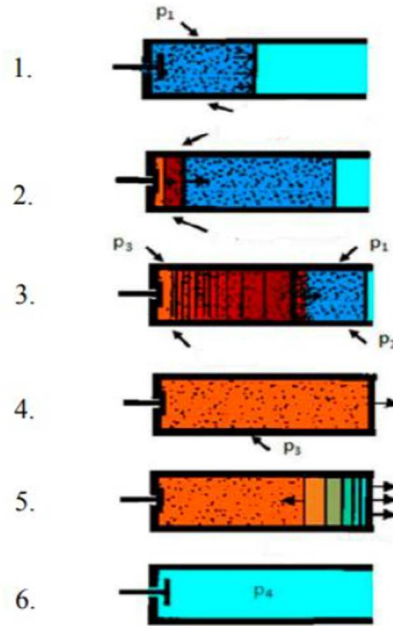
düşünülebilmektedir. Çünkü direk detonasyon dalgası oluşturulması için çok yüksek başlangıç enerjilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma prensibi olarak ses altı hızda başlatılan bir patlama, yüzey çeperi ve geometrik yönlendirmeler ve şartlandırmalarla ses üstü hızlara çıkabilir. Buradaki ana prensip, gazın dinamik olarak yönlendirilmesiyle birlikte hızlandırılması ile kimyasal reaksiyonun işleyişinde dönüşüm sağlanmasıdır.

### **Darbeli detonasyon motoru (DDM) çalışma prensibi.**

Detonasyon oluşumuna bakıldığında 5 aşamada gerçekleştiği görülür. Bunlar;

1. Yavaş ses altı aşaması,
2. Hızlı ses altı aşaması,
3. Detonasyon öncesi aşama,
4. Aşırı hızlanmış detonasyon aşaması,
5. Kararlı detonasyon

Aşamalarıdır.



Şekil 22. Detonasyon oluşumu şematik gösterimi (Shepherd, & Lee, 1992; Kumakura, 1996).

1. Aşamaya bakıldığında yakıt ve oksitleyici Şekil 'de gösterildiği gibi hacme püskürtülür. Mikro tanelerde meydana gelen karışımın yanmaya elverişli olması, oksijen ve yakıtın doğru kimyasal oranlarda hacme doldurulmasıyla (stokiyometrik denge) mümkün kılınmaktadır (Shepherd, & Lee, 1992).

2. Aşama olarak yakıt ve oksitleyici ile dolu alan ateşleyici(buji) yardımı ile ateşlenmesi sağlanır. Ateşleme anında yanmaya başlayan karışım ısı ve basınçla beraber karışımın yanmamış kısmına doğru ilerlemeye başlar.

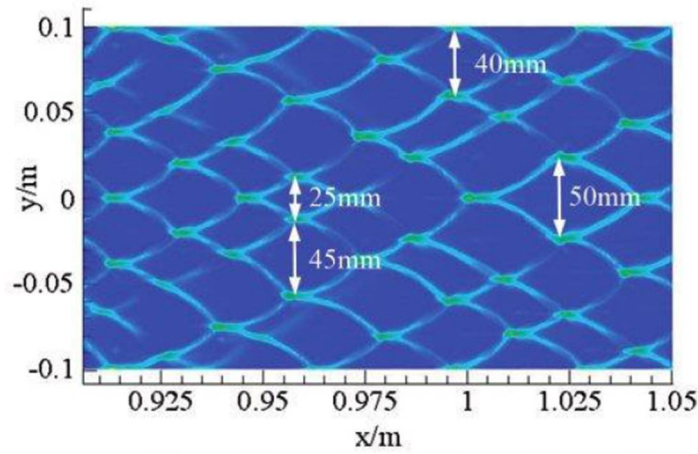
3. Aşama olarak karışımın tüm parçaları yanana kadar devam eden yanma reaksiyonu, bölge içinde, ısı, basınç ve düzensizliğin olduğu bir patlama bölgesine geçmiş olur. Bu patlama bölgesinde düzensizlik ve koşullar el verirse patlama aniden ses altı hızdan ses üstü hıza geçer ve detonasyon dalgası oluşmuş olur. Detonasyon dalgasının sönmeden devam etmesi için geometrik ve kimyasal parametrelerin süreci ilerletmek adına uygun aralıkta olması gerekmektedir.

4. Aşamada bu süreç ortak bir basınç ve sıcaklık değerinde dengelenir. İçerisi yanmamış yakıt, yakamamış oksitleyici ve son ürün karışımıyla dolu, belli sıcaklık ve basınç değerinde partiküllerle dolu konumdadır.

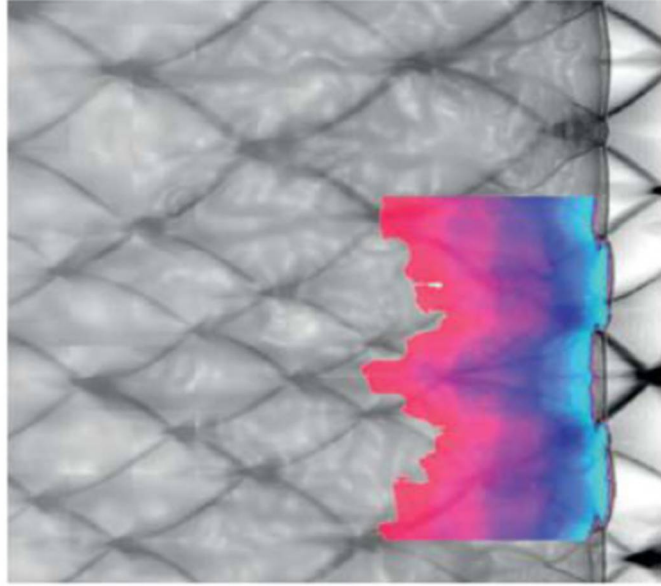
5. Aşamada bu dolan ve basınçlanan bölge kendini daha az basıncın olduğu bölgeye doğru yönlendirmesini sağlar. Partiküllerin büyük çoğunluğu süreci dengelemek adına Basıncın düşük olduğu bölgeye geçişi gerçekleştirir.

6. Aşamada yeni yakıt ve oksitleyici karışımı hacmi doldurmaya başlar böylelikle yeni döngü oluşumu için ortam hazırlanır.

Bu evrelerde kullanılan yakıt, başlatma enerjisi, detonasyon oluşma enerjisi DDM'nin tasarımını da etkisi vardır. Detonasyon hücre kalınlığı ve bu detonasyon dalgasının sürdürülebilirliği için belli çap ve uzunluk, oluşumu için engeller ve şartlandırıcılar kullanılır.

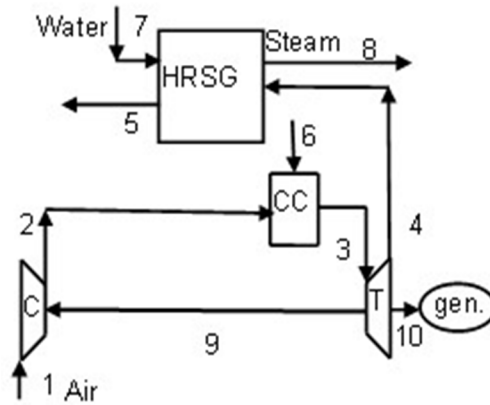


Şekil 23. İzo-oktan buharının parlamadan detonasyon dönüşüm dalgaları, geometrisi ve boyutları (Bello, & Lu, 2017).



Şekil 24. H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> karışımı, T<sub>1</sub>= 295 K, P<sub>1</sub>= 57.5 kPa, Resim = 5 x 5 mm (Bello, & Lu, 2017).

Kojenerasyon da ana bileşen türbin olup başka bileşenlerde vardır. Bunlar da basınçlar, sıcaklıklar ile kimyasal bileşimler değişmektedir. Buradaki hesaplamalarda yapılan kabuller ve ayrıntılar literatürde vardır (Bejan, Tsatsaronis, & Moran, 1996; Karaali, & Öztürk, 2015a; Karaali, & Öztürk, 2017a; Karaali, & Öztürk, 2017b; Stathopoulos, 2018).



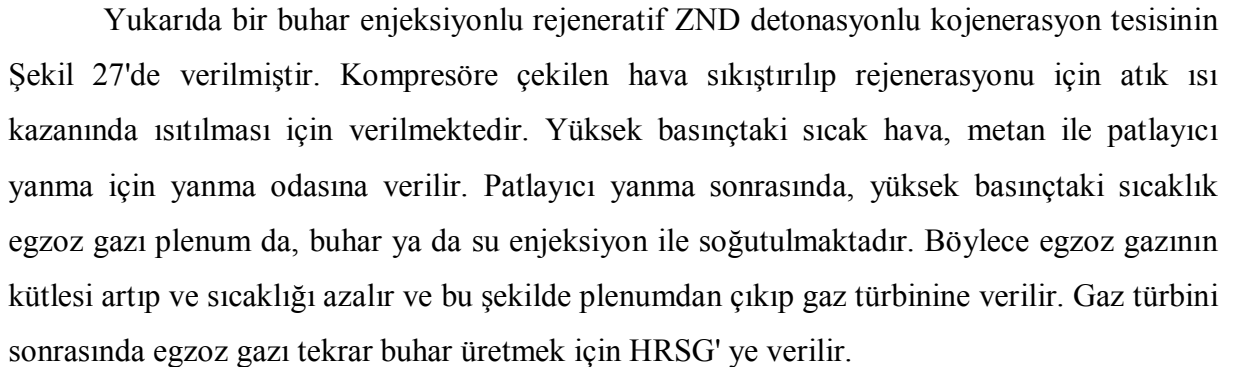
Şekil 25. Temel bir gaz türbini kojenerasyon tesisinin şeması.

Temel bir gaz türbini kojenerasyon santralinin şeması Şekil 25'de verilmiştir. Gaz türbini kojenerasyon santralinde görülmektedir, hava kompresöre çekilip sıkıştırılır ve metanla yanması için yanma odasına verilir. Gaz türbininde yanma odasından gelen egzoz gazları enerjisinden mekanik enerji elde edilerek, bu mekanik enerji elektrik üretimi için jeneratöre verilir. Egzoz gazının kalan enerjisi, sıcak su ya da buhar üretimi için bir HRSG'de yani atık ısı geri kazanım cihazında kullanılır.

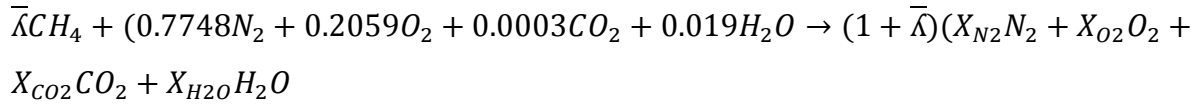
ZND detonasyonlu motor kojenerasyon sisteminin şeması Şekil 26' da verilmiştir. Hava kompresöre çekilip sıkıştırılır ve metanla yanması içinde darbeli detonasyonlu yanma

Fig. 26. Bir ZND detonasyon motoru kojenerasyon sisteminin şeması

**Şekil 27.** Buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motorlu kojenerasyon sisteminin şeması.



Yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjisini ancak reaksiyonu ile ısı enerjisiye dönüştürebiliriz. Hesaplarda yanma, ideal-tam yanma şeklinde alınmıştır. Yanmada kimyasal reaksiyon işlemi;



Hava için stokiyometrik değeri, kurumsal olarak yanmanın tamamlaması için gereken en az hava değeridir. Fakat Brayton çevrimlerinde yanmanın tamamlaması için kurumsal değerden fazla hava verilir. Fazla hava oranı ya da hava fazlalık katsayısı, verilen havanın gerçek miktarının kurumsal havaya olan oranıdır (Bejan *vd.*, 1996; Ashrae, 2002, Karaali, & Öztürk, 2015b). Kullanılabilirlik, kurumsal faydalı işin en büyük değeridir. Çevre ile denge haline ulaşması, tersinir süreç sonunda olabilir. Ekserji de çift bileşen fiziksel ve kimyasal ekserjilerdir (Moran, & Tsatsaronis, 2000; Karaali, 2016). Karışık maddelerde ve ideal gaz karışımlarının fiziksel ekserjisi;

$$e_{phys} = (\bar{h} - \bar{h}_0)_{mixt} - T_0 \cdot (s - s_0)_{mixt} = \sum_j x_j \left[ \int_{T_0}^T \bar{c}_{poj}(T) dT - T_0 \cdot \left( \int_{T_0}^T \frac{\bar{c}_{poj}(T)}{T} dT - \bar{R} \ln \frac{p_j}{p_0} \right) \right] \quad (2.75)$$

Gaz karışımları için kimyasal ekserji şu şekildedir (Lazzaretto, Toffolo, Morandin, & Von Spakovsky, 2010; Karaali, & Öztürk, 2017c);

$$\bar{e}_{chem,mix} = \sum_i x_i \bar{e}_{chem,i} + \bar{R}T_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (2.76)$$

Bir akış veya kontrol kütlesi için toplam ekserji şu şekildedir;

$$\bar{E} = \bar{E}_{phy} + \bar{E}_{chem} \quad (2.77)$$

Açık sistemler için ekserji denklemi;

$$\sum \dot{m}_i \cdot h_i - \sum_i T_0 \cdot S_i - \sum_j \dot{m}_j \cdot h_j + \sum_j T_0 \cdot S_j + \sum \dot{Q}_c - \sum \dot{Q}_c \cdot \frac{T_0}{T_c} - \dot{W} = \dot{E}_{loss} \quad (2.78)$$

Tablo 6. Temel Gaz Türbini Kojenerasyon Tesisi İçin Cihazların Enerji, Kütle, Entropi Denklemleri (Bejan vd., 1996, Ashrae, 2002; Lazzaretto vd., 2010; Karaali, 2016; Karaali, & Öztürk, 2017c)

| Cihazlar    | Kütle Denklemleri                                  | Enerji Denklemleri                                                                                                                                                                                                                                                                            | Entropi Denklemleri                                                                      |
|-------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kompresör   | $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$                            | $\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_C = \dot{m}_2 h_2$                                                                                                                                                                                                                                                   | $\dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_1 s_2 + \dot{S}_{gen,C} = 0$                                    |
| Türbin      | $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$                            | $\dot{m}_3 h_3 = \dot{W}_T + \dot{W}_C + \dot{m}_4 h_4$                                                                                                                                                                                                                                       | $\dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_4 s_4 + \dot{S}_{gen,T} = 0$                                    |
| HRSG        | $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$<br>$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ | $\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_8 h_8$                                                                                                                                                                                                                               | $\dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_7 s_7 - \dot{m}_5 s_5 - \dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{gen,HRSG} = 0$ |
| Yanma Odası | $\dot{m}_2 + \dot{m}_6 = \dot{m}_3$                | $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_3 h_3 + 0.02 \dot{m}_7 LHV$                                                                                                                                                                                                                          | $\dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_6 s_6 - \dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{gen,CC} = 0$                   |
| Genel Döngü |                                                    | $\bar{h}_i = f(T_i)$<br>$\dot{m}_{hava} h_{hava} + \dot{m}_{yakıt} LHV_{CH4} - \dot{Q}_{kayıp,CC} - \dot{m}_{eg,çıkan} h_{eg,çıkan} - \dot{W}_T - \dot{m}_{buhar} (h_{su,giriş} - h_{buhar,çıkan}) = 0$<br>$\dot{Q}_{kayıp,CC} = 0.02 \dot{m}_{yakıt} LHV_{CH4}$<br>$\bar{s}_i = f(T_i, P_i)$ |                                                                                          |

Tablo 7. Temel Gaz Türbini Kojenerasyon Tesisi İçin Cihazların Ekserji, Ekserji Verimliliği, Değerlendirme Kriterleri Denklemleri (Bejan vd., 1996, Lazzaretto vd., 2010, Karaali, & Öztürk, 2017c)

| Cihazlar    | Ekserji Denklemleri                                                | Enerji Verimlilikleri                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kompresör   | $\dot{E}_{D,C} = \dot{E}_1 + \dot{W}_C - \dot{E}_2$                | $\eta_{ex,C} = \frac{\dot{E}_{çıkan,C} - \dot{E}_{giren,C}}{\dot{W}_C}$                                                                                                                                                                                                                                         |
| Türbin      | $\dot{E}_{D,T} = \dot{E}_3 - \dot{E}_4 - \dot{W}_C - \dot{W}_T$    | $\eta_{ex,T} = \frac{\dot{W}_{net,T} + \dot{W}_C}{\dot{E}_{giren,T} - \dot{E}_{çıkan,T}}$                                                                                                                                                                                                                       |
| HRSG        | $\dot{E}_{D,HRSG} = \dot{E}_4 - \dot{E}_5 + \dot{E}_7 - \dot{E}_8$ | $\eta_{ex,HRSG} = \frac{\dot{E}_{buhar,HRSG} - \dot{E}_{su,HRSG}}{\dot{E}_{giren,egzoz,HRSG} - \dot{E}_{çıkan,egzoz,HRSG}}$                                                                                                                                                                                     |
| Yanma Odası | $\dot{E}_{D,CC} = \dot{E}_2 + \dot{E}_6 - \dot{E}_3$               | $\eta_{ex,CC} = \frac{\dot{E}_{çıkan,CC}}{\dot{E}_{giren,CC} + \dot{E}_{yakıt}}$                                                                                                                                                                                                                                |
|             | Elektriksel ısı oranı                                              | $EHR = \frac{W_{net}}{Q_{net}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|             | SFC-Özel yakıt tüketimi                                            | $SFC = 3600 \cdot \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{W}_{net}}$                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Genel Döngü |                                                                    | $\dot{E} = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch}$<br>$\dot{E}_{ph} = \dot{m}(h - h_0 - T_0(s - s_0))$<br>$\dot{E}_{ch} = \frac{\dot{m}}{M} \left\{ \sum x_k \bar{e}_k^{ch} + \bar{R} T_0 \sum x_k \ln x_k \right\}$<br>$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net,T} + (\dot{E}_{buhar,HRSG} - \dot{E}_{su,HRSG})}{\dot{E}_{yakıt}}$ |

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### Bulgular ve Tartışmalar

Bu çalışmada, normal şartlar  $P_0=101.3$  kPa ve  $T_0=25$  °C olarak alınmıştır. Brayton çevrimi için kompresör giriş havası  $m_{air}=91.3$  kg/s, yakıt kütleli debisi  $m_{fuel}=1.64$  kg/s, izentropik verimler türbin ve kompresörler için  $\eta_{izC}=\eta_{izT}=0.86$ , rekuperative çevrimin rekuperator sıcaklığı  $T_{recout}=850$  K, üretilen buhar sıcaklığı  $T_{steam}=485.57$  K, HRSG çıkış sıcaklığı  $T_{exhaust}=426$  K (Bejan *vd.*, 1996; Lazzaretto *vd.*, 2010; Karaali, & Öztürk, 2017a). Detonasyonlu yanma odası hesapları, basınçları, sıcaklık ve diğer yanma özellikleri NASA'nın <https://cearun.grc.nasa.gov/> adlı program ile yapıp alınmıştır. Diğer hesaplar ise faydalanarak yazılıp çalıştırılan FORTRAN bilgisayar programı (tez için yapılan FORTRAN programının bir kısmı (Karaali, R. (2010). Kojenerasyon tesislerinin termoeconomik optimizasyonu (Doktora tezi, Kocaeli Univ. FBE Makine Müh. ABD)) adlı kaynaktan alınmıştır.

← → ↻ cearun.grc.nasa.gov

**Disclaimer:**

The data is provided *as is* without any warranty of any kind, either express, implied, or statutory, including but not limited to, any warranty that the data will conform to specifications, any implied warranties of merchantability, fitness for a particular purpose, freedom from infringement, or any warranty that the data will be error free or any warranty that related documentation/release notes will conform to the data provided. NASA has neither verified nor validated any third party data. In no event shall the U.S. Government be liable for any damages, including but not limited to, direct, indirect, special or consequential damages, arising out of or resulting from or in any way connected with this data. You are put on notice that export of any goods or technical data from the United States may require some form of export license from the U.S. Government before they are either sent outside of the United States or made available to nationals of a foreign country either within the United States or abroad. Failure to obtain necessary export licenses may result in criminal liability under U.S. laws. NASA neither represents that a license shall not be required nor that, if required, it shall be issued. The data, and/or any modified or enhanced version thereof, shall not be offered for sale to the U.S. Government or any other entity. NASA shall be neither liable nor responsible for any maintenance or updating of the data, nor for correction of any errors in the data.

Select problem and code and click on the 'Submit' button:

**Chemical Equilibrium Problem Types**

| Type Code                            | Description                     |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| <input type="radio"/> rocket         | Rocket                          |
| <input type="radio"/> hp             | Assigned Enthalpy & Pressure    |
| <input type="radio"/> tp             | Assigned Temperature & Pressure |
| <input checked="" type="radio"/> det | Chapman-Jouguet Detonation      |
| <input type="radio"/> shock          | Shock Tube                      |
| <input type="radio"/> tv             | Assigned Temperature & Density  |
| <input type="radio"/> uv             | Combustion at Assigned Density  |
| <input type="radio"/> sp             | Assigned Entropy & Pressure     |
| <input type="radio"/> sv             | Assigned Entropy & Density      |

Enter an alphanumeric code:

The code is optional and is used to identify your data. Use no more than 15 characters. Blank spaces, hyphens and underscores are allowed, but no special characters (\$, #, etc).

Şekil 28. Kimyasal denge probleminin kodunun ve türünün seçildiği ekran alıntısı.

Şekil 28'de kimyasal denge probleminin kodunun ve türünün seçildiği ekran alıntısında görüldüğü gibi NASA'nın <https://cearun.grc.nasa.gov/> adlı programın ilk sayfasında kimyasal denge problem tipi seçilerek problem tanımlanır.

Şekil 29’da Chapman-Jouguet detonasyon probleminde sıcaklık ve basınç aralıklarının girilmiş olan ekranın görüntüsünde görüldüğü gibi NASA’nın <https://cearun.grc.nasa.gov/> adlı programın ikinci sayfasında sıcaklık ve basınç aralıkları girilir.

Şekil 29. Chaplan-Jouguet detonasyon probleminde Sıcaklık ve basınç aralıklarının girilmiş olan ekranın görüntüsü.

Şekil 30. Chapman-Jouguet detonasyon probleminde hangi yakıt türünün kullanılacağını tercihinin yapıldığı ekran görüntüsü.

CHAPMAN-JOUQUET DETONATION PROBLEM (DET)

Fuel(s): Pure CH<sub>4</sub>  
 Oxid(s): Pure Air

### Enter Proportions of Oxidizer/Fuel (Optional)

How do you want to specify the Oxidizer/Fuel Ratio?

☐ %fuel: %Fuel by Weight  
☒ o/f: Oxidizer/Fuel Wt. ratio  
☐ phi: Equivalence based on Fuel/Oxid. wt ratio (Eq 9.19\*)  
☐ r,eq.ratio: Equivalence based on Valence (Eq 9.18\*)

If these values are not filled, CEA will assume 1:1 Oxidizer/Fuel ratio by weight.  
 \*Reference: [NASA RP1311 Part II \(Users Manual\)](#), p. 13, Sect. 2.4.3

#### Enter Low-Value, High-Value and Interval

Low Value:

High Value:

Interval:

The Low-High-Interval values must result in an array of no more than 30 datapoints.

#### Or, Fill in these numbered fields. Do not use both sides.

|     |                      |     |                      |     |                      |
|-----|----------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|
| 1.  | <input type="text"/> | 11. | <input type="text"/> | 21. | <input type="text"/> |
| 2.  | <input type="text"/> | 12. | <input type="text"/> | 22. | <input type="text"/> |
| 3.  | <input type="text"/> | 13. | <input type="text"/> | 23. | <input type="text"/> |
| 4.  | <input type="text"/> | 14. | <input type="text"/> | 24. | <input type="text"/> |
| 5.  | <input type="text"/> | 15. | <input type="text"/> | 25. | <input type="text"/> |
| 6.  | <input type="text"/> | 16. | <input type="text"/> | 26. | <input type="text"/> |
| 7.  | <input type="text"/> | 17. | <input type="text"/> | 27. | <input type="text"/> |
| 8.  | <input type="text"/> | 18. | <input type="text"/> | 28. | <input type="text"/> |
| 9.  | <input type="text"/> | 19. | <input type="text"/> | 29. | <input type="text"/> |
| 10. | <input type="text"/> | 20. | <input type="text"/> | 30. | <input type="text"/> |

Şekil 31. Chapman-Jouguet detonasyon probleminde oksitleyici/yakıt oranını hangi türden olacağının seçileceği programdaki ekran alıntısı.

CHAPMAN-JOUQUET DETONATION PROBLEM (DET)

Fuel(s): Pure CH<sub>4</sub>  
 Oxid(s): Pure Air

### Enter Your Final Choices Before Running CEA.

Select Your Output File Length:

☒ Short: Prints only error messages and final tables, excluding atom ratios and species being considered during calculation.  
☐ Long: Prints all output tables.

#### CEA Options

Express **Products** as: ☒ Mass-Fractions ☐ Mole-Fractions

Express heat as: ☒ SI units ☐ Calories

☐ Include Transport Properties?  
 Ref: [NASA RP1311 Part I \(Analysis\), Ch. 5](#)

☐ Consider Ionized Species as possible products?

☐ Set Trace Value:  x 10<sup>-</sup>

The Trace Option prints species compositions having mole or mass fractions exceeding the Trace Value. The criteria for equilibrium composition convergence will be tighter to ensure accuracy. Mass- and mole-fractions will be expressed in E-format (eg. '2.0089-4' = '0.0002').

#### Other Parameters

| Name | Definition      | Qty. | Value(s)                                                               |
|------|-----------------|------|------------------------------------------------------------------------|
| P    | Pressure (atm)  | 16   | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16                  |
| T    | Temperature (K) | 9    | 298.15, 308.15, 318.15, 328.15, 338.15, 348.15, 358.15, 368.15, 378.15 |
| O/F  | o/f             | 9    | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9                                              |

What do you want to do upon clicking 'Submit'?

☒ Perform CEA Analysis.  
☐ Change Problem Type  
☐ Tabulate results for insertion into a spreadsheet.  
☐ Select species for 'Omit/Only/Insert' options.

Şekil 32. Chapman-Jouguet detonasyon probleminde final bölümünün ekran alıntısı.

Şekil 30'da Chapman-Jouguet detonasyon probleminde hangi yakıt türünün kullanılacağını tercihinin yapıldığı ekran görüntüsünde görüldüğü gibi NASA'nın <https://cearun.grc.nasa.gov/> adlı programın üçüncü sayfasında yakıt türü girilir.

Şekil 31'de Chapman-Jouguet detonasyon probleminde oksitleyici/yakıt oranını hangi türden olacağını seçileceği programdaki ekran alıntısında görüldüğü gibi NASA'nın <https://cearun.grc.nasa.gov/> adlı programın dördüncü sayfasında oksitleyici/yakıt oranı girilir.

Şekil 32'de Chapman-Jouguet detonasyon probleminde final bölümünün ekran alıntısında görüldüğü gibi NASA'nın <https://cearun.grc.nasa.gov/> adlı programın son sayfasında sonuç tipleri seçilir.

CHAPMAN-JOUGUET DETONATION PROBLEM (DET)

Problem Type | Temperatures&Pressures | Fuel(s) | Oxidizer(s) | Oxid/Fuel | Final

Fuel(s): Pure CH4  
Oxid(s): Pure Air

**CEA is finished.**

To repeat your analysis with any changes, click on one of the menu links above, change your parameters, click on 'Submit', and then click on 'Final' from the menu above.

Your input and output files are here:

- [Input](#)
- [Output](#)

**Scroll up & down to see your Results.**

```
*****
NASA-GLENN CHEMICAL EQUILIBRIUM PROGRAM CEA2, FEBRUARY 5, 2004
BY BONNIE MCBRIDE AND SANFORD GORDON
REFS: NASA RP-1311, PART I, 1994 AND NASA RP-1311, PART II, 1996
*****

### CEA analysis performed on Tue 15-Aug-2023 06:03:14

# Problem Type: "Chapman-Jouguet Detonation"

prob case=_____6431 det

# Pressure (16 values):
p,atm= 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
# Temperature (9 values):
t,k= 298.15, 308.15, 318.15, 328.15, 338.15, 348.15, 358.15, 368.15, 378.15

# Oxidizer/Fuel Wt. ratio (9 values):
o/f= 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

# You selected the following fuels and oxidizers:
reac
fuel CH4
oxid Air
```

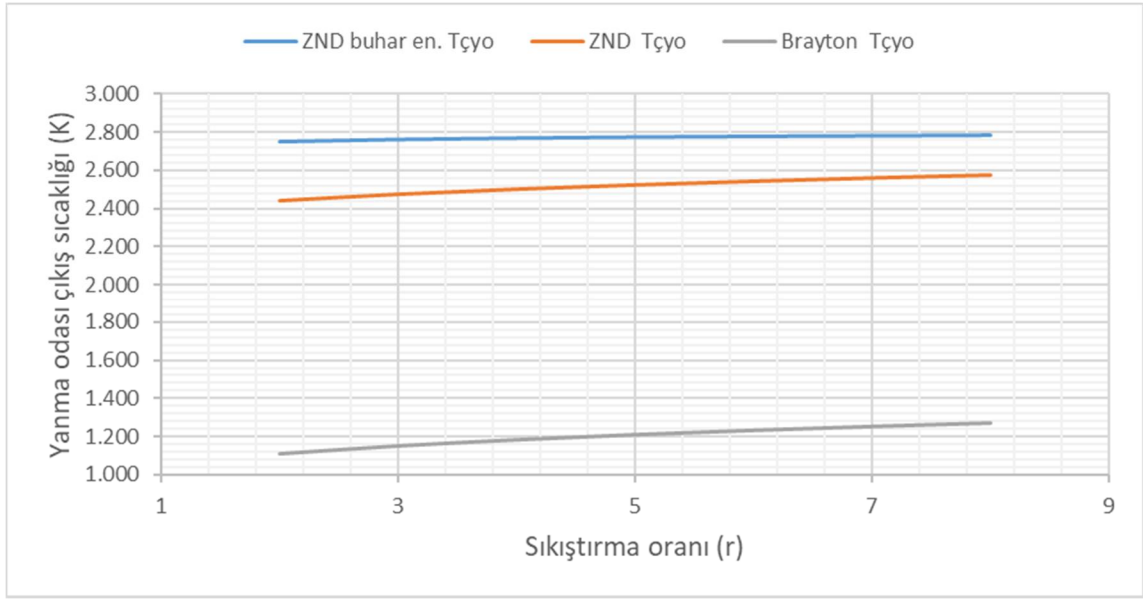
Şekil 33. Chapman-Jouguet detonasyon probleminde tüm sayısal sonuçların verildiği ekran alıntısı.

Şekil 33'te Chapman-Jouguet detonasyon probleminde tüm sayısal sonuçların verildiği ekran alıntısında görüldüğü gibi NASA'nın <https://cearun.grc.nasa.gov/> adlı programın son sayfasında sonuçlar alınır.

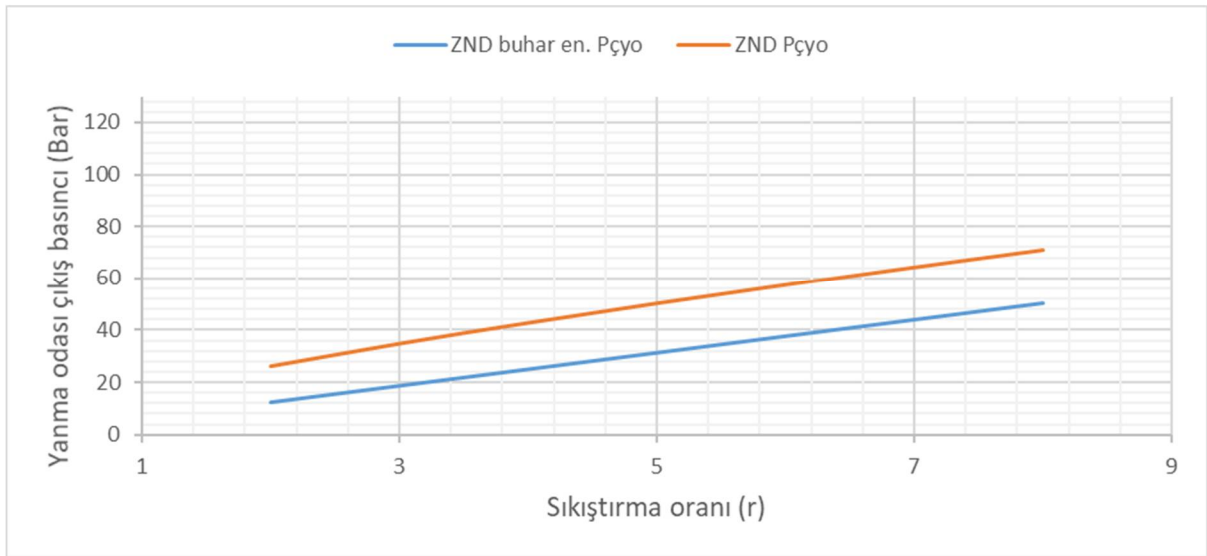
Şekil 34'te gaz türbinli, ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonu olan rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru olan kojenerasyon tesisi için yanma odası çıkış sıcaklığının sıkıştırma değeri ile olan değişim verilmiştir. Burada sıkıştırma değerlerinin yükselmesi üç çevrimin yanma odası çıkış sıcaklıklarını da artırmaktadır. Bu artış Brayton çevrimi için %27,3, ZND çevrimi için %11,3, ZND buhar enjeksiyonlu çevrim için %1,8'dir.

ZND çevrimleri yanma odası çıkış sıcaklıkları 2350-2850 K civarındadır bu sebepten sıkıştırma değerleri etkin olmamaktadır.

Şekil 35'te ZND detonasyonlu motoru ve buhar enjeksiyonu rejeneratifli ZND detonasyonlu motor kojenerasyon tesisi sıkıştırma değeri ile yanma odası çıkış basıncının değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi artırılan sıkıştırma değeri ile yanma odası çıkış basıncı ZND çevriminde %380, ZND buhar enjeksiyonlu çevrim için %733 arttırırken, Brayton çevriminde aynı kalmaktadır.

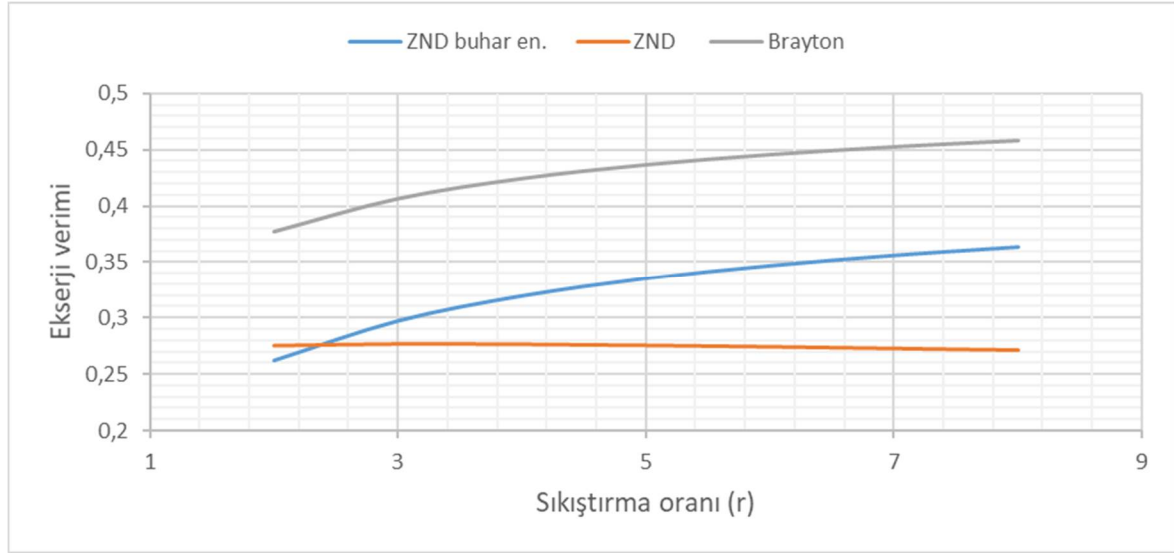


Şekil 34. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için yanma odası çıkış sıcaklığının sıkıştırma oranı ile değişimi.

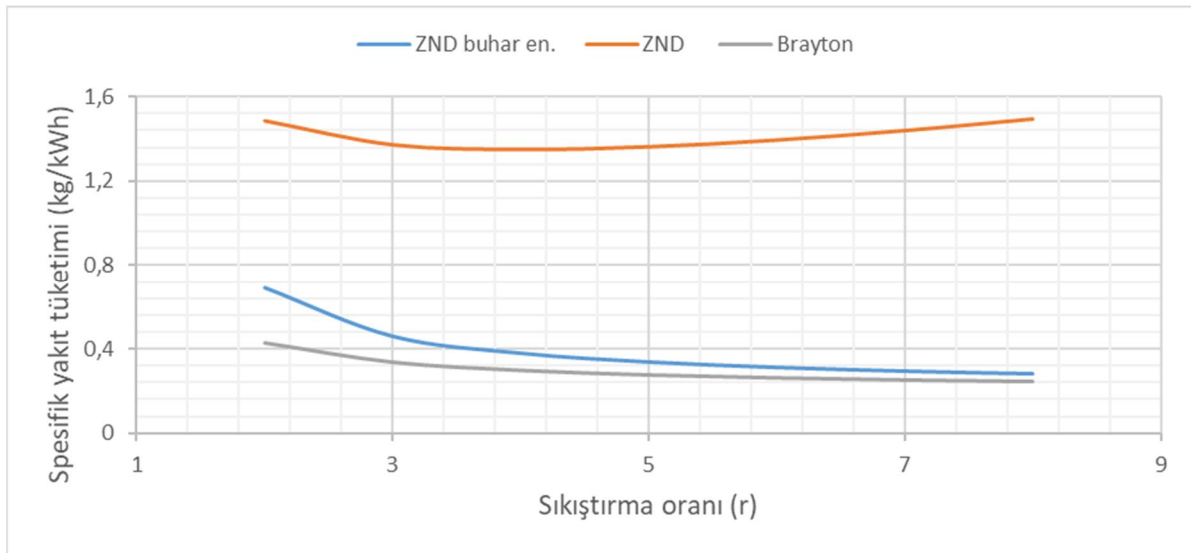


Şekil 35. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için yanma odası çıkış basıncının sıkıştırma oranı ile değişimi.

Şekil 36'de gaz türbinli, ZND detonasyonlu motor ile buhar püskürtmeli rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesisleri için ekserji veriminin sıkıştırma oranıyla değişimi verilmektedir. Burada sıkıştırma oranının artırılması gaz türbinli ve buhar enjeksiyonlu rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesislerinin ekserji verimini sırasıyla yaklaşık %26 ve %50 oranında artırmaktadır. ZND çevrimi için, literatürde bulunanla aynı olan yaklaşık 5-7 sıkıştırma oranında bir maksimum ekserjetik verim noktası vardır.



Şekil 36. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için ekserji veriminin sıkıştırma oranı ile değişimi.

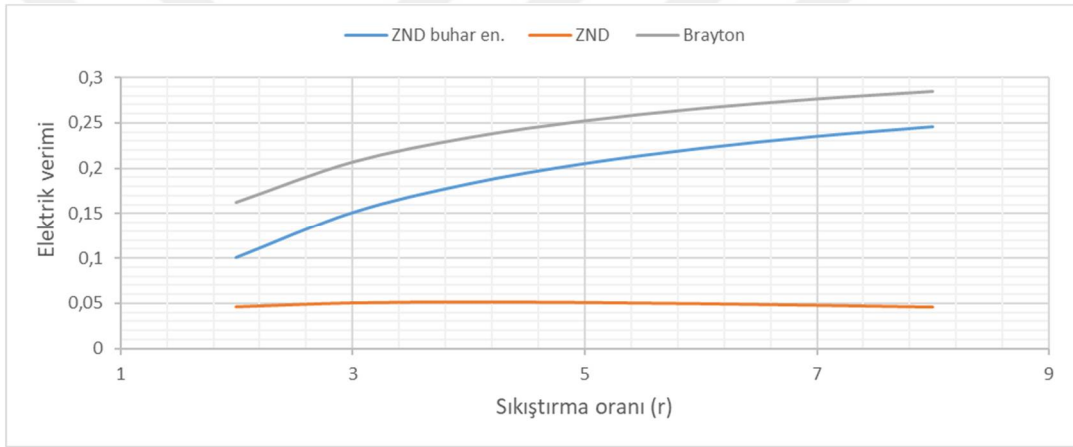


Şekil 37. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için sıkıştırma oranı ile özgül yakıt tüketiminin değişimi.

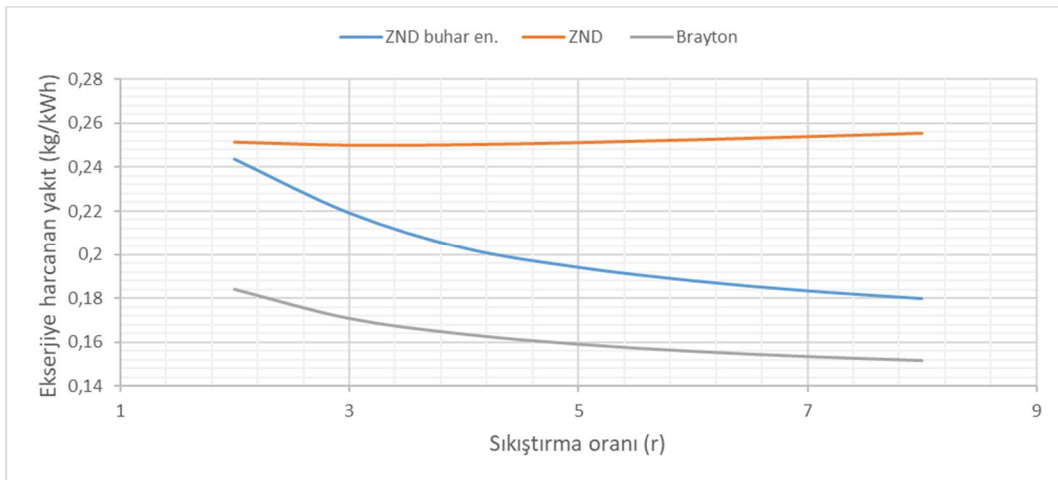
Şekil 37'de gaz türbinli, ZND detonasyonlu motor ile buhar enjeksiyonu olan rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesisleri için sıkıştırma oranı ile özgül

yakıt tüketiminin değişimi verilmiştir. Bu da ZND çevrimi için yaklaşık 4-6 sıkıştırma oranında özgül yakıt tüketiminin minimum noktası olduğu şeklinde görülebilir. 6 sıkıştırma oranının üzerinde özgül yakıt tüketimi hızla artar. Gaz türbini (Brayton) ve buhar püskürtmeli rejeneratif ZND için özgül yakıt tüketimi, ZND çevriminden daha iyidir. Gaz türbini ile buhar enjeksiyonu olan rejeneratifli ZND çevrimler her biri rekabet edebilmektedir.

Şekil 38'de, gaz türbinli, ZND detonasyonlu motoru ve buhar enjeksiyonu olan rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesisleri için elektrik veriminin sıkıştırma değeri ile değişim durumu gösterilmiştir. Burada, sıkıştırma değerlerinin artırılması gaz türbinli ve buhar enjeksiyonlu rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesislerinin elektrik verimini sırasıyla yaklaşık %106 ve %190 artırmaktadır. ZND çevrimi için, literatürde bulunanla aynı yaklaşık 5-7 sıkıştırma oranında bir maksimum elektriksel verim noktası vardır.



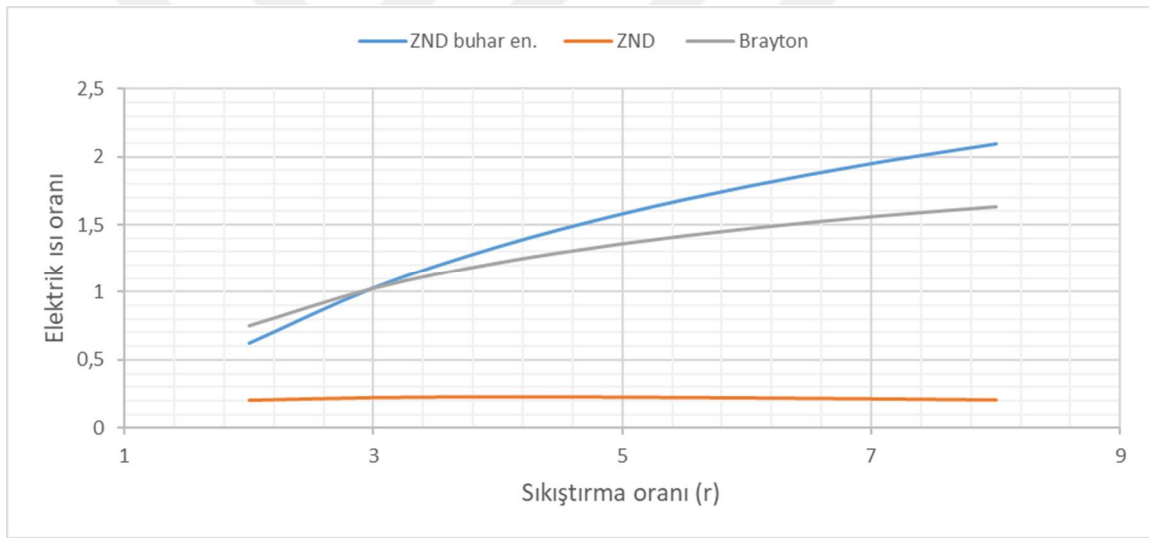
Şekil 38. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için elektrik veriminin sıkıştırma oranı ile değişimi.



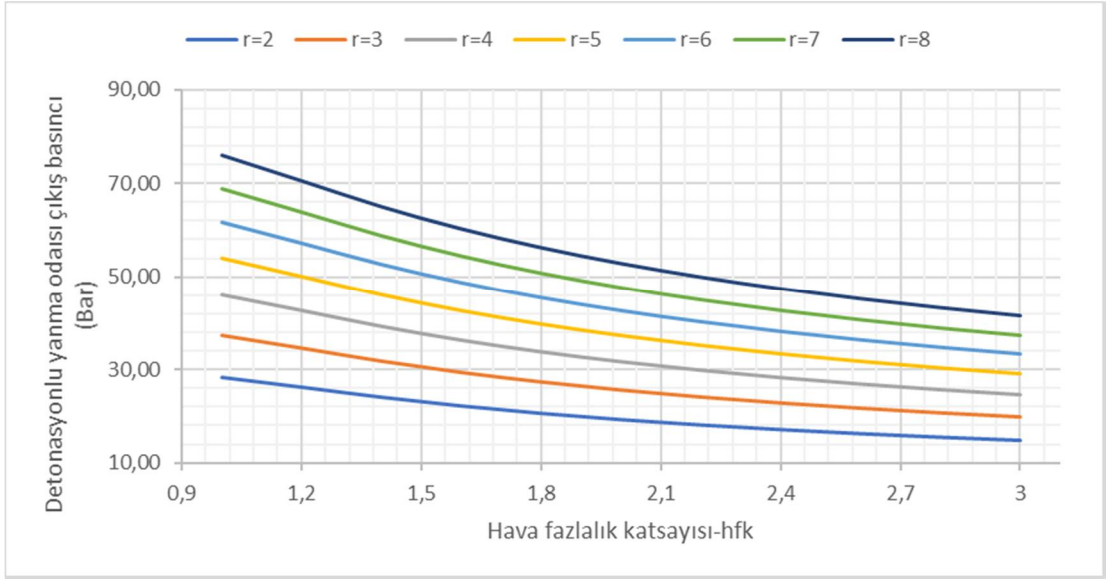
Şekil 39. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için ekserji için yakıt tüketiminin sıkıştırma oranı ile değişimi.

Şekil 39'da gaz türbini, ZND detonasyonlu motoru ile buhar enjeksiyonu olan rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesisleri için sıkıştırma oranlı ekserji için yakıt tüketiminin değişimi verilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi, artan sıkıştırma oranı, gaz türbini ile buhar enjeksiyonu rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesislerinin ekserjisi için yakıt tüketimini sırasıyla yaklaşık %21 ve %32 oranında azaltmaktadır. ZND çevrimi için, literatürde bulunanla aynı yaklaşık 5-7 sıkıştırma oranında bir maksimum elektriksel verim noktası vardır.

Şekil 40'de gaz türbinli, ZND detonasyonlu motoru ile buhar püskürtmeli rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesislerinde elektriksel ısı oranının sıkıştırma oranıyla değişimi gösterilmiştir. Burada, sıkıştırma oranlarındaki bir artış gaz türbininin ile buhar enjeksiyonu rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesislerinin elektriksel ısı oranını sırasıyla yaklaşık %143 ve %367 oranında artırmaktadır. ZND döngüsü için, yaklaşık 5-7 sıkıştırma oranında bir maksimum elektriksel ısı oranı noktası vardır.

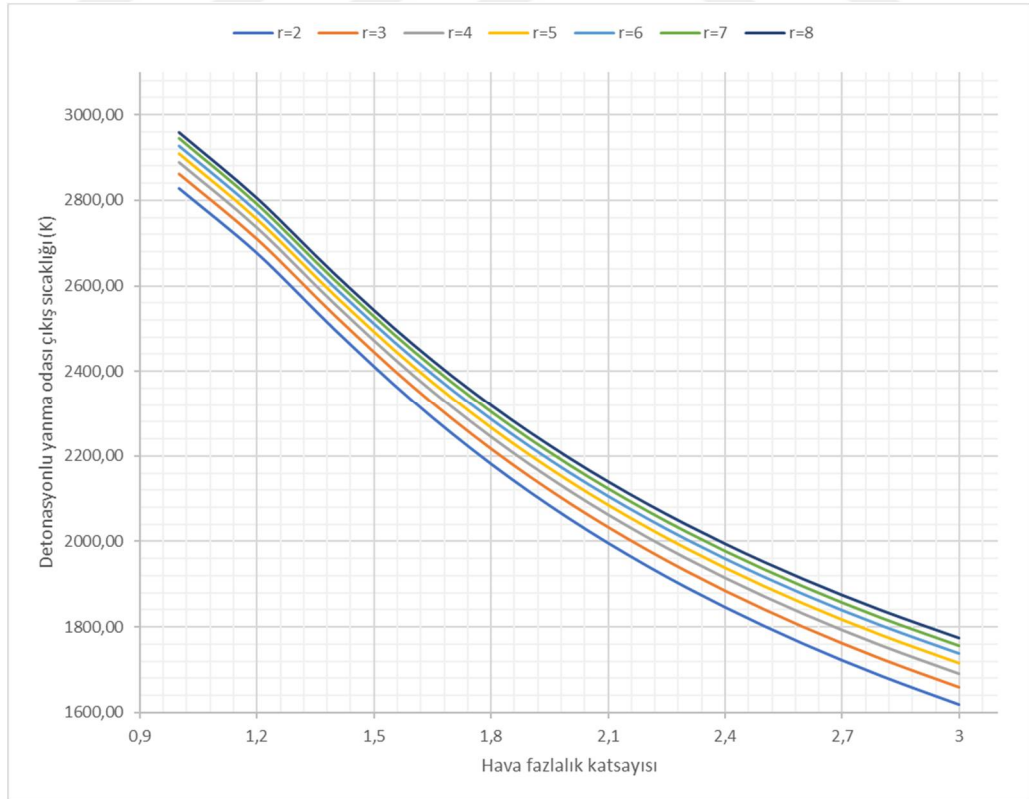


Şekil 40. Gaz türbini (Brayton), ZND detonasyon motoru ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri için elektriksel ısı oranının sıkıştırma oranı ile değişimi.



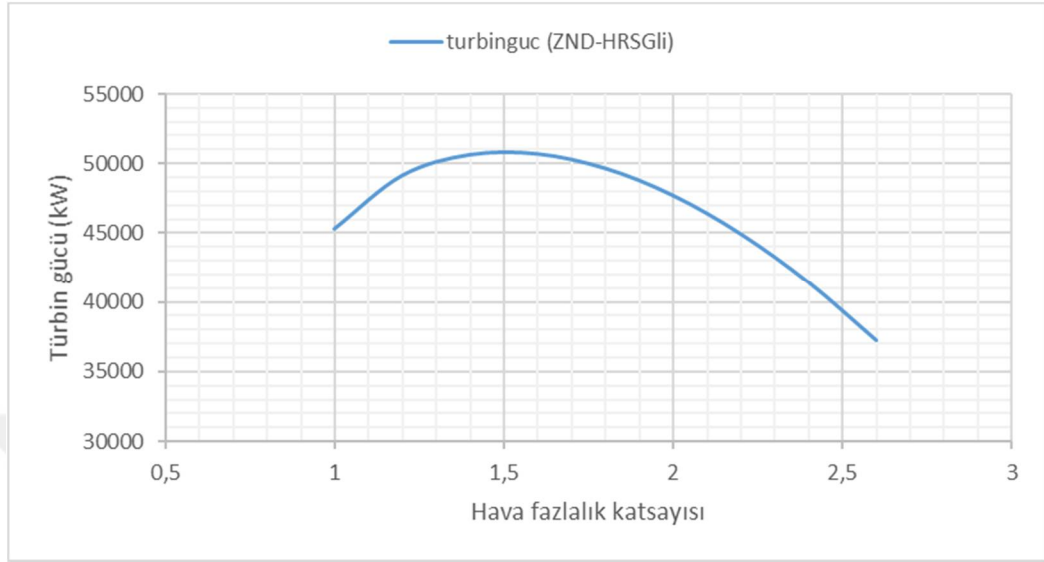
Şekil 41. ( $r=2$ ,  $r=3$ ,  $r=4$ ,  $r=5$ ,  $r=6$ ,  $r=7$  ve  $r=8$ ), farklı sıkıştırma oranlarında ( $r$ ) detonasyonlu yanma odası çıkış basıncının hava fazlalık katsayısına ( $hfk$ ) göre değişimi.

Şekil 41’de farklı sıkıştırma oranlarında ( $r$ ) detonasyonlu yanma odasındaki çıkış basıncının hava fazlalık katsayısına göre değişiminin farklı olduğu gösterilmiştir. Hava fazlalık katsayısı arttıkça detonasyonlu yanma odasının basıncı düşmektedir.  $r=2$  iken yaklaşık 28 Bar yanma odası basıncı 1.2 hava fazlalık katsayısını gösterirken,  $r=3$ ’te 37 Bar detonasyonlu yanma odası çıkış basıncında hava fazlalık katsayısı 1.2’de 34 Bar olmuştur.



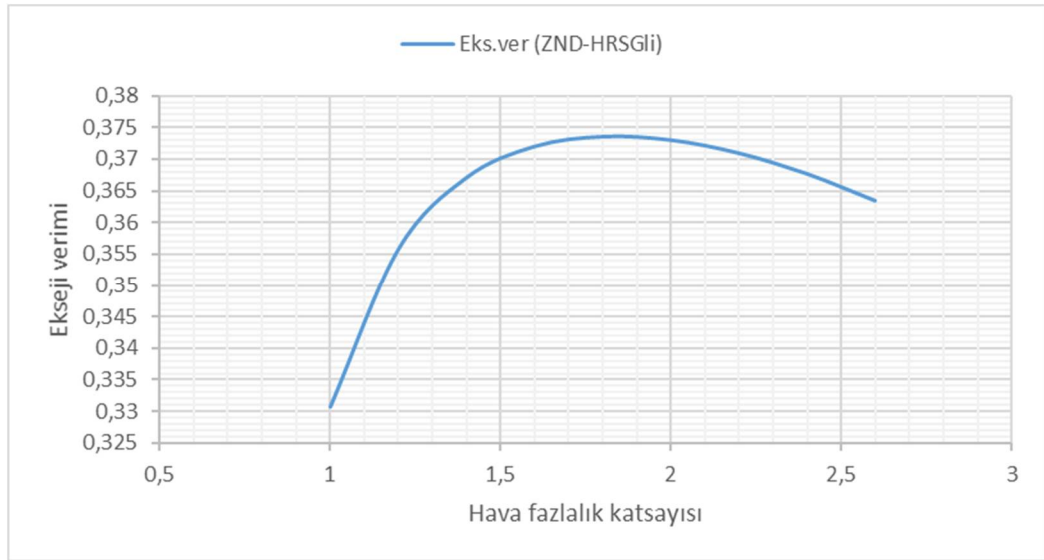
Şekil 42. ( $r=2$ ,  $r=3$ ,  $r=4$ ,  $r=5$ ,  $r=6$ ,  $r=7$  ve  $r=8$ ), farklı sıkıştırma oranlarında ( $r$ ) detonasyonlu yanma odası çıkış sıcaklığı ile hava fazlalık katsayısına ( $hfk$ ) göre değişimi.

Şekil 42’de farklı sıkıştırma oranlarından detanasyonlu yanma odası çıkış sıcaklığının(K) hava fazlalık sayısı artııkça azalma eğiliminde olduğunu görölmektedir.  $r=2$  sıkıştırma oranında hava fazlalık katsayısı 1,2 iken detonasyon yanma odası sıcaklığı 2680,00 K larda olduğu görölmektedir.



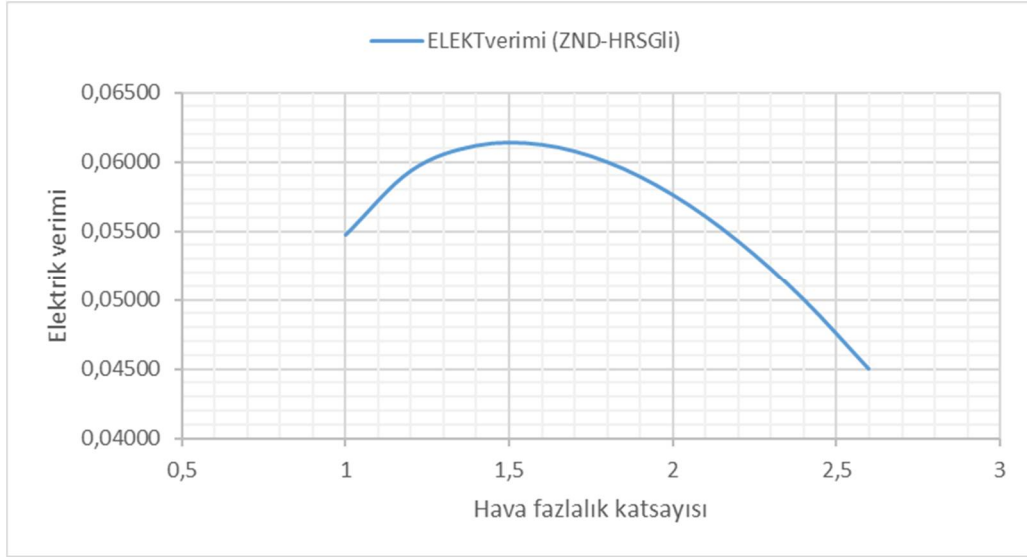
Şekil 43. Türbin gücünün (ZND-HRSGLi) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 43’te türbin gücünün (kW) hava fazlalık katsayısı 1,5 olduğunda maksimum türbin gücüne ulaştığı daha sonrasında da hava fazlalık katsayısı artııkça türbin gücünde azalma meydana geldiği görölmektedir.



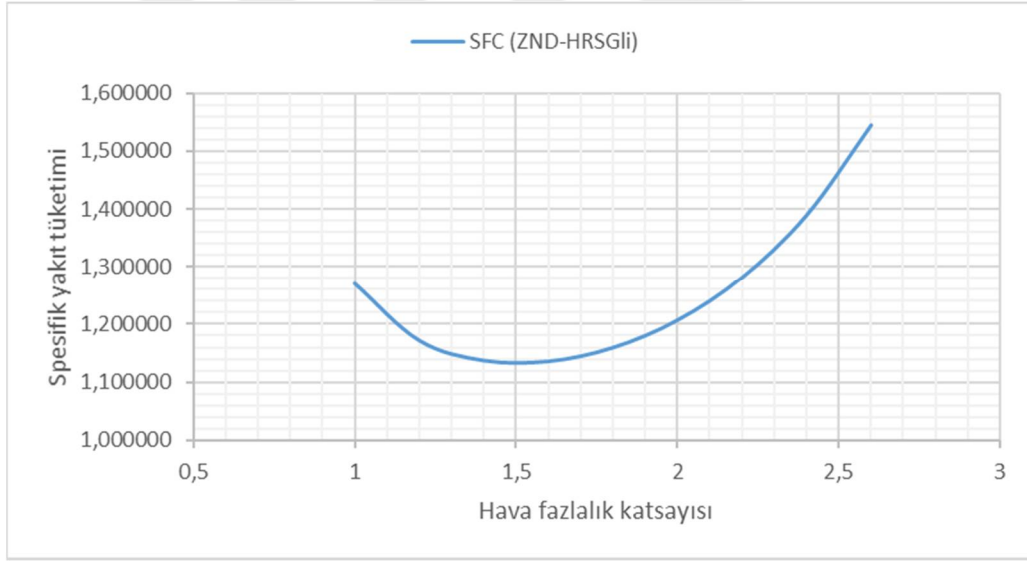
Şekil 44. Ekserji veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 44’te göröldüğü gibi hava fazlalık katsayısı artııkça ZND-HRSGLi detonasyonlu motorlarda verim belli bir değere kadar artmaktadır. Hava fazlalık katsayısı ortalama 1,75 olduğunda maksimum verime ulaşmıştır. Bu değerlerden sonra hava fazlalık katsayısı artııkça ekserji verimi azalma eğilimi göstermektedir.



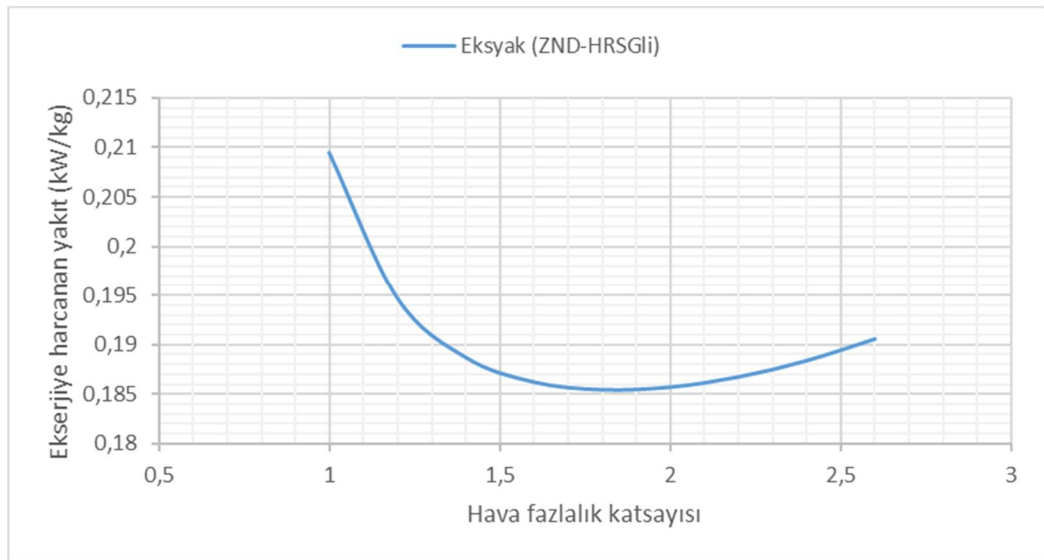
Şekil 45. Elektrik veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 45'te gözüktüğü gibi ZND-HRSGli detonasyonlu motorlarda hava fazlalık katsayısı 1,5 olduğunda elektrik verimi maksimum değere ulaşmaktadır. Bu değerden sonra hava fazlalık katsayısı arttıkça elektrik verimi azalmaya başlamıştır.



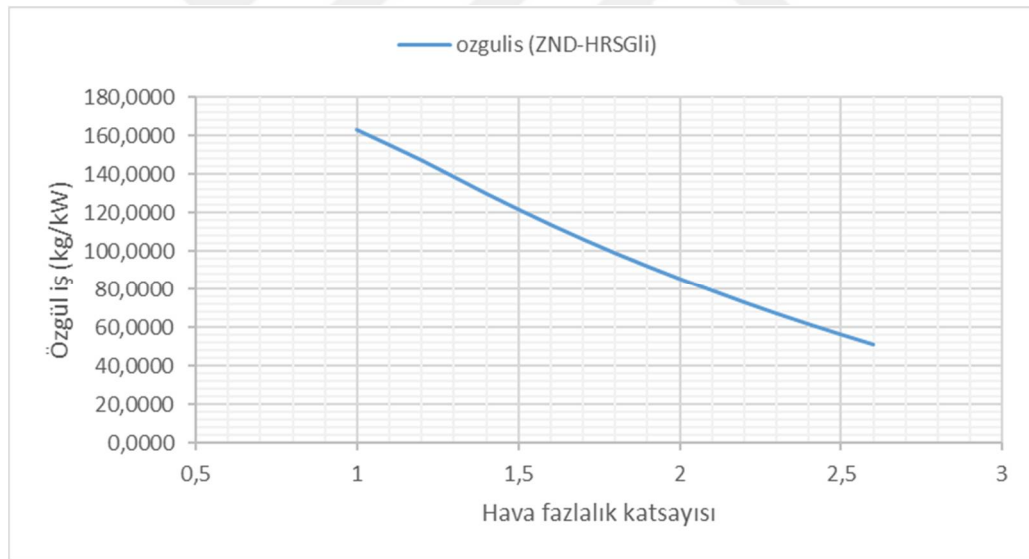
Şekil 46. Spesifik yakıt tüketiminin (SFC(ZND-HRSGli)) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 46'da hava fazlalık katsayısı arttıkça spesifik yakıt tüketimi önce azalma sonra artma eğilimi göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısı 1,5 olduğunda minimum spesifik yakıt tüketimi gerçekleşmiş olur.



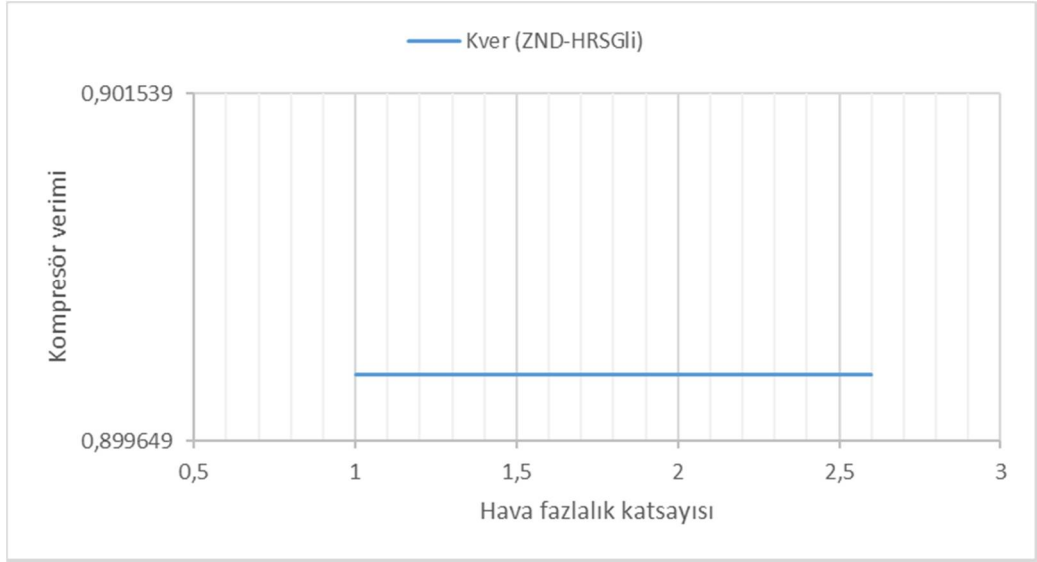
Şekil 47. Ekserjiye harcanan yakıt(kW/kg) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 47’de hava fazlalık katsayısı yaklaşık olarak 1,75 değerine ulaştığında 0,185 kW/kg ekserji verimi ile minimum ekserjiye harcanan yakıt değerine düştüğü görülmektedir. Daha sonrasında hava fazlalık katsayısı artıkça harcanan yakıt tüketimi tekrardan artma eğilimi göstermektedir.



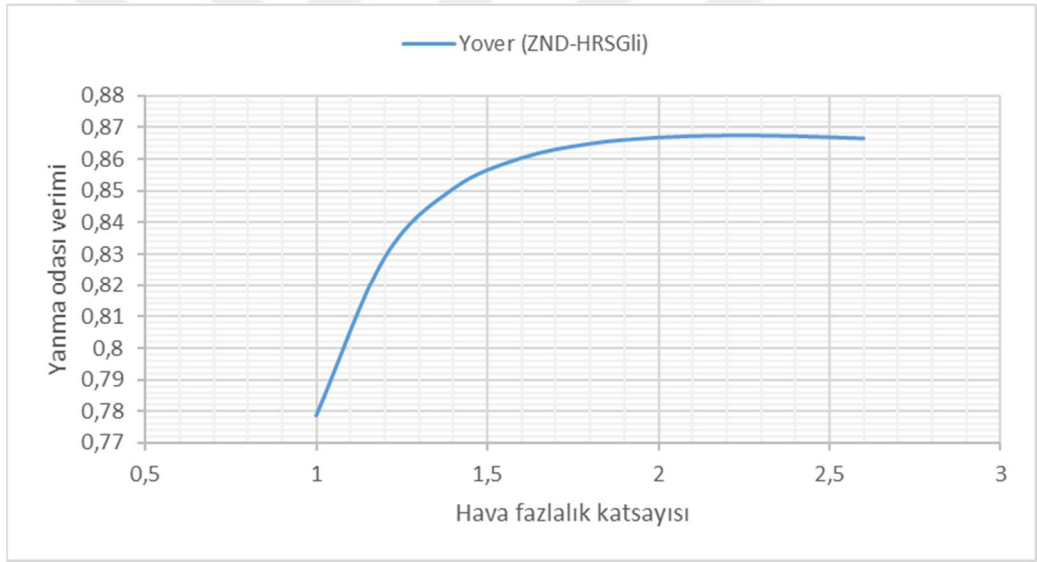
Şekil 48. Özgün iş (kg/kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 48’de görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısı 1 olduğunda maksimum 162,000 (kg/kW) özgün iş değerine ulaşmaktadır. Daha sonrasında hava fazlalık katsayısı artıkça özgün iş azalmaya devam etmektedir.



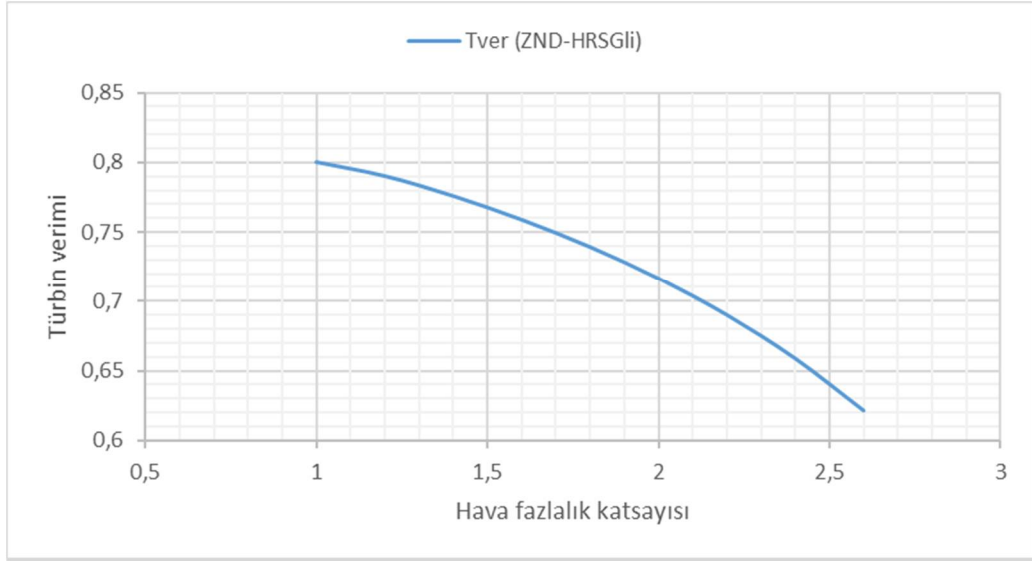
Şekil 49. Kompresör verimi (ZND-HRSGli) hava fazlalık katsayısında göre değişimi.

Şekil 49’da ZND-HRSGli kompresör için 0,899649 ile 0,901539 değerleri arasında hava fazlalık katsayısı artıkça kompresör veriminin sabit kaldığı görülmektedir.



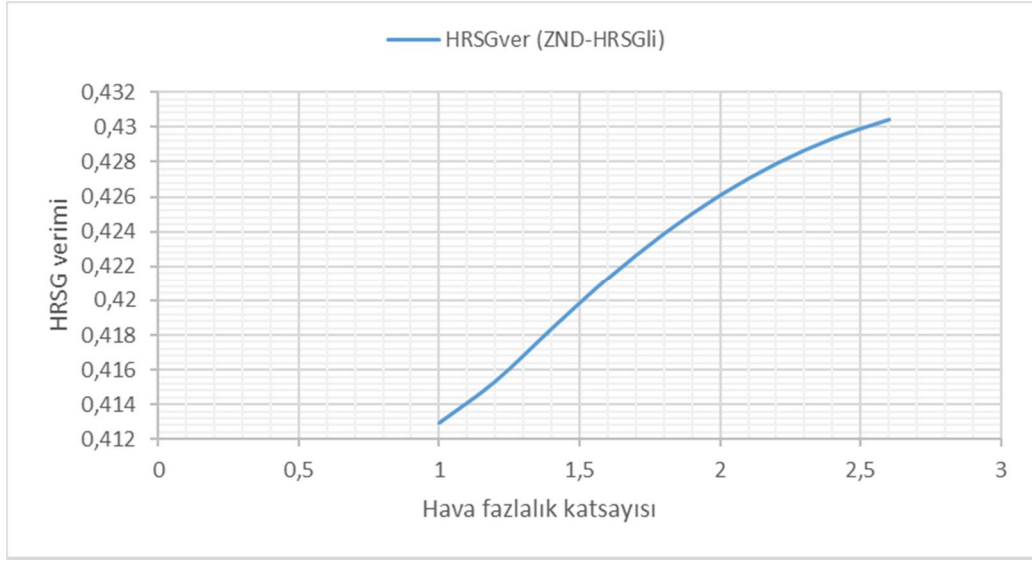
Şekil 50. Yanma odası veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 50’de yanma odasının veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi gösterilmektedir. Yanma odası verimini maksimum değerlere ulaştığı hava fazlalık katsayısı aralığı 2 ile 2,5 değerleri olarak gösterilmiştir.



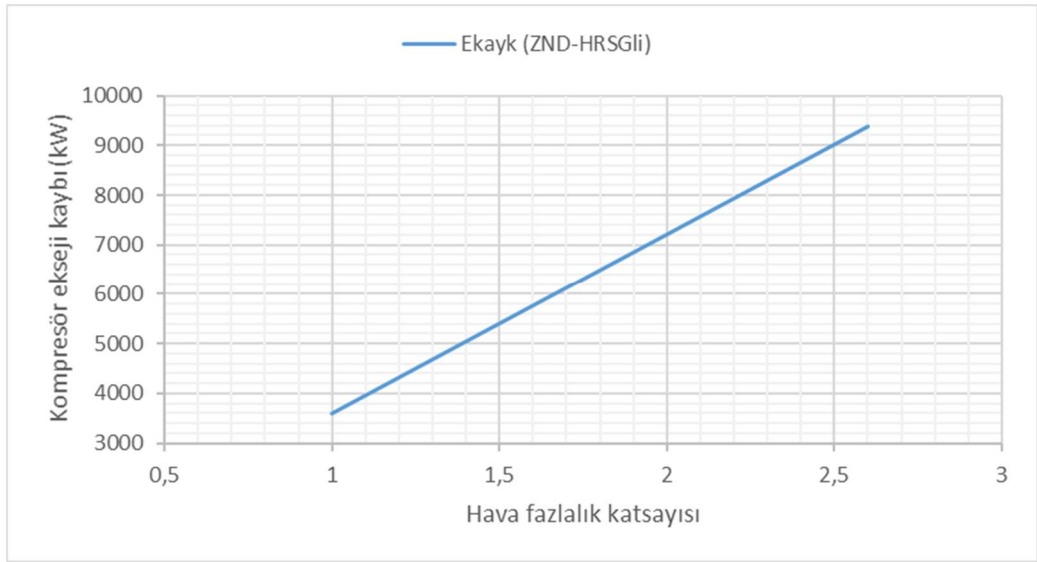
Şekil 51. Türbin veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 51’de türbin veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi gösterilmektedir. Türbin veriminin maksimum olduğu hava fazlalık katsayısı değeri 1 olarak görülmektedir. Hava fazlalık katsayısı artıkça türbinden alınan verim azalmaktadır.



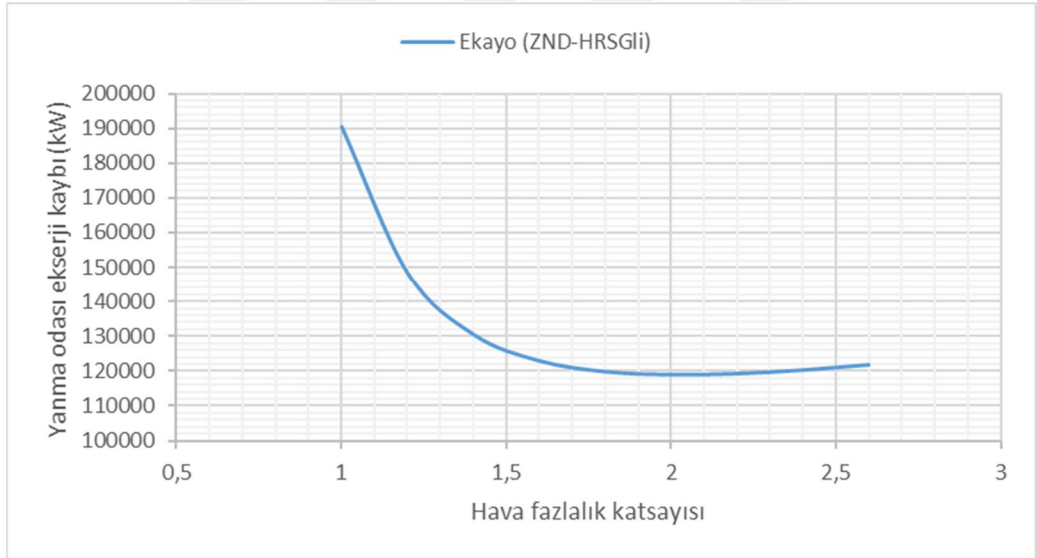
Şekil 52. HRSG veriminin (ZND-HRSGli) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 52’de HRSG veriminin hava fazlalık katsayısına göre değişimi gösterilmektedir. Hava fazlalık katsayısı 1 iken HRSG verimi 0,4132 olarak görülmektedir. Buna bağlı olarak hava fazlalık katsayısı artıkça HRSG veriminin de arttığı görülmektedir.



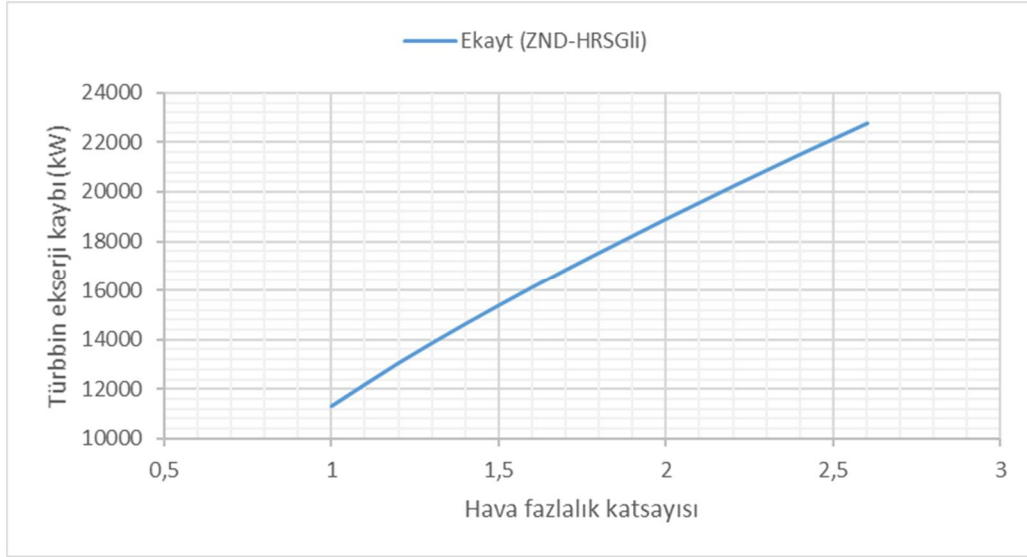
Şekil 53. Kompresör ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 53'te kompresör ekserji kaybının hava fazlalık katsayısına göre değişimi gösterilmektedir. Şekil incelendiği zaman hava fazlalık katsayısı 1 değerinde iken 3600 kW kompresör ekserji kaybı olmaktadır. Hava fazlalık katsayısı arttıkça kompresördeki ekserji kaybı artmaktadır.



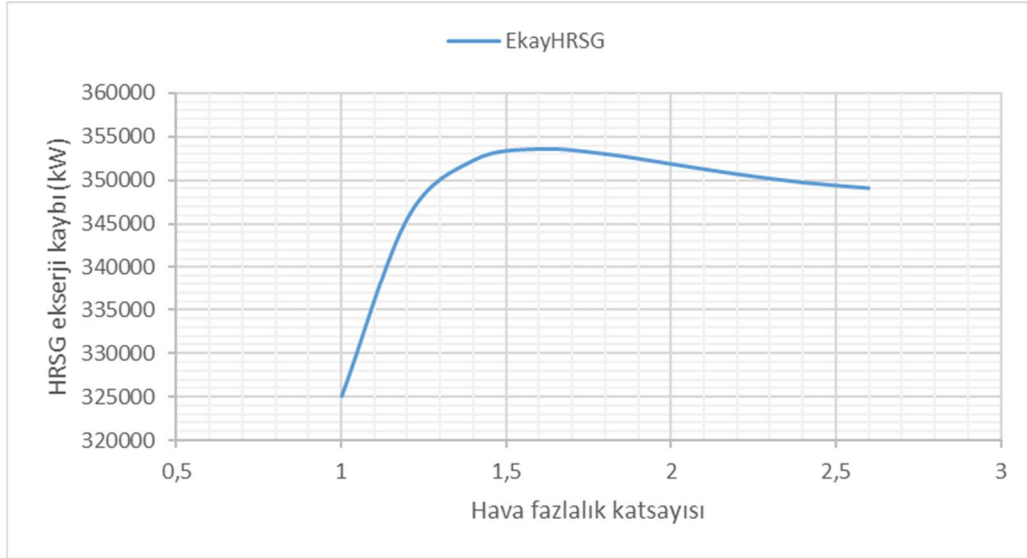
Şekil 54. Yanma Odası ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 54'te hava fazlalık katsayısının arttıkça belli bir değere kadar yanma odası ekserji kaybının azaldığını görülmektedir. 1,8 ile 2,4 aralığında 120000 kW yanma odası ekserji kaybı meydana gelmektedir. Bu aralık minimum ekserji kaybının olduğu aralıktır.



Şekil 55. Türbin ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 55'te Türbin ekserji kaybının hava fazlalık katsayısına göre değişimi görülmektedir. Şekil incelendiği zaman hava fazlalık katsayısı arttıkça türbin ekserji kaybının da arttığı sonucuna varılabilir. Hava fazlalık katsayısı 1 iken 11200 kW Türbin ekserji kaybı meydana gelmiştir.



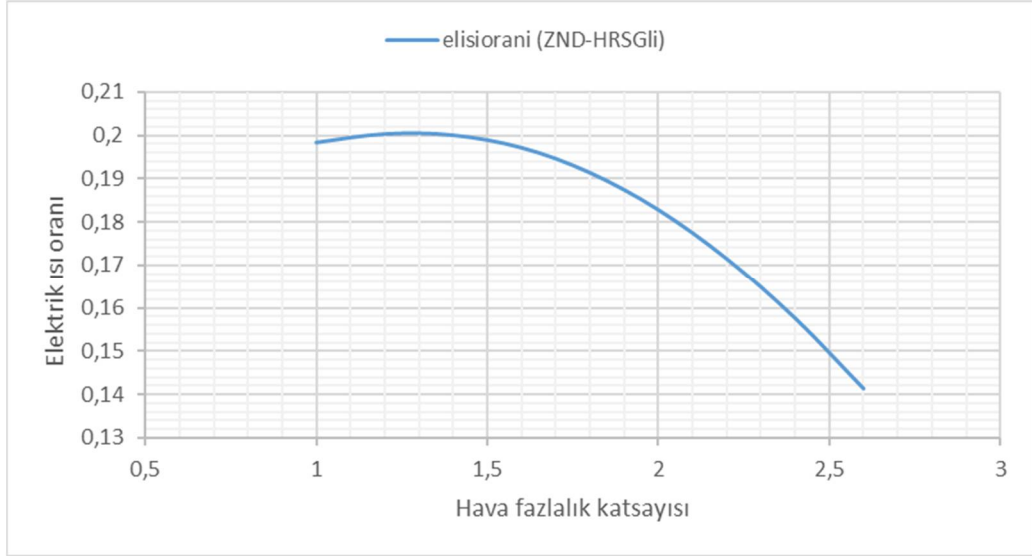
Şekil 56. HRSG ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 56'da görüldüğü gibi HRSG ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısının artışına göre değişimi şekillendirilmiştir. Hava fazlalık katsayısı 1 iken 325000 kW değerini göstermektedir. Hava fazlalık katsayısı 1,6 ile 1,7 aralığında iken maksimum HRSG ekserji kaybı meydana gelmektedir.



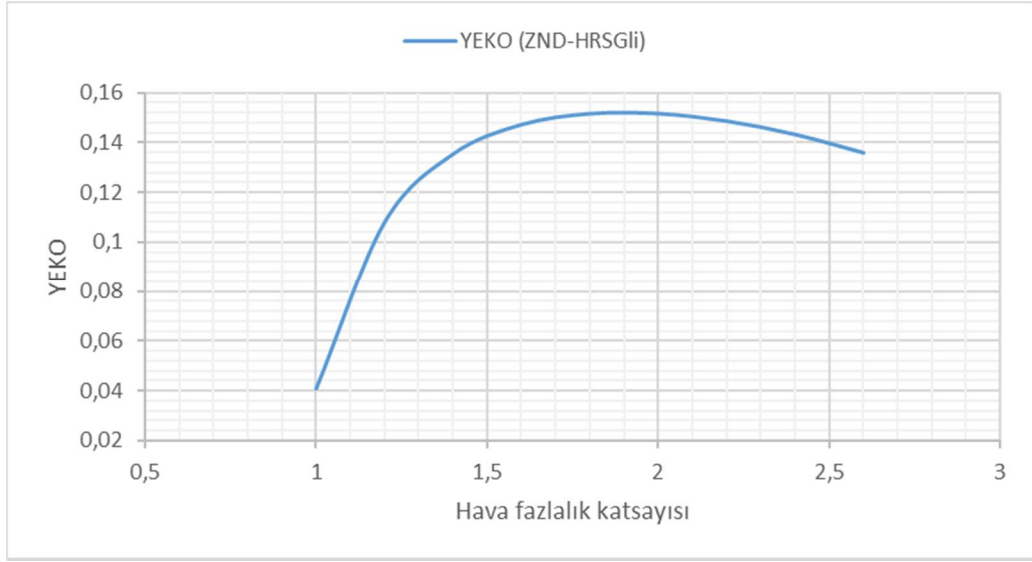
Şekil 57. Toprak ekserji kaybının(kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 57’de toprak ekserji kaybının (kW) hava fazlalık katsayısına göre değişimi verilmiştir. Hava fazlalık katsayısı artıkça belli bir değere kadar azalma görüldükten sonra ekserji kaybında bir artma gözükmemektedir. Toplam ekserji kaybının en düşük olduğu hava fazlalık katsayısı değeri 1,8 ile 1,9 aralığına karşılık gelmektedir.



Şekil 58. Elektrik ısı oranının hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 58’de hava fazlalık katsayısı artıkça belli bir miktar elektrik ısı oranı artmakta daha sonrasında ısı azalma meydana gelmektedir. Maksimum değer gösterdiği aralığa bakıldığında 1,3 fazlalık katsayısında 0,2 oranında elektrik ısı meydana gelmektedir.



Şekil 59. YEKO'nun hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Şekil 59'da görüldüğü gibi YEKO'nun hava fazlalık katsayısı 1,8 değerine ulaştığında maksimum 0,152 YEKO değerine karşılık gelmektedir. Daha sonrasında hava fazlalık katsayısı arttıkça YEKO değeri azalma göstermektedir.



Şekil 60. Enerjiye harcanan yakıt miktarının (ZND-HRSGli) hava katsayısına göre değişimi.

Şekil 60'da görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısı 1,5 iken 0,0716 ekserjiye harcanan yakıt miktarına ulaşmıştır. Hava fazlalık katsayısı 2 ilen minimum değere ulaşmıştır. Bu değer 0,0704 olarak görülmektedir.

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, ZND detonasyon, değişik sıkıştırma değerlerinde ( $r$ ) gaz türbinli ve buhar enjeksiyonu rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesisleri araştırılıp analiz edilmiştir. Sıkıştırma değerlerinin arttırılması, üç çevrimin de yanma odasındaki çıkış sıcaklıklarını artmasına sebep olur. ZND çevrimlilerde yanma odasında olan çıkış sıcaklıkları 2350-2850 K'dir. Bundan dolayı sıkıştırma değerlerinin etkili olmadığı görülmüş olup sıcaklıkları yükseltmek için lazım olmamaktadır. Sıkıştırma değerleri artığında, yanma odasında çıkış basıncı ZND çevriminde %380, ZND buhar enjeksiyonlu çevrim için %733 artmakta, Brayton çevriminde ise aynı olmaktadır. Sıkıştırma değerlerinin arttırılması, gaz türbininin ve buhar enjeksiyonu rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesislerinin ekserji verimini sırasıyla yaklaşık %26 ve %50 artırmaktadır. Literatürde ZND çevrimi için, bulunanla aynı olan yaklaşık 5-7 sıkıştırma oranında bir maksimum ekserjetik verim noktası bulunur. ZND çevrimi için özgül yakıt tüketiminin minimum noktasının yaklaşık 4-6 sıkıştırma oranında olduğu tespit edilmiştir. 6 sıkıştırma oranının üzerinde özgül yakıt tüketimi hızla artmaktadır. Gaz türbini (Brayton) ve buhar püskürtmeli rejeneratif ZND için özgül yakıt tüketimi, ZND çevrimine kıyasla daha iyi olduğu söylenebilir. Sıkıştırma değerlerinin arttırılmasıyla, gaz türbininin ve buhar enjeksiyonlu rejeneratifli ZND detonasyonlu motoru kojenerasyon tesislerinin elektrik verimliliğini sırasıyla yaklaşık %106 ve %190 oranında artırır. ZND çevrimi için, literatürde bulunanla aynı yaklaşık 5-7 sıkıştırma oranında bir maksimum elektriksel verim noktası vardır. Artan sıkıştırma oranları, gaz türbini (Brayton) ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemlerinin ekserjisi için yakıt tüketimini yaklaşık %21 ve %32 azaltır. Gaz türbininin (Brayton) elektriksel ısı oranını ve buhar enjeksiyonlu rejeneratif ZND detonasyon motoru kojenerasyon sistemleri sırasıyla yaklaşık %143 ve %367. ZND çevrimi için, elektrik verimliliği ve elektriksel ısı oranı noktası için yaklaşık 5-7 sıkıştırma oranlarında bir maksimum değer vardır.

ZND-HRSGli detonasyonlu motorlarda hava fazlalık katsayısı artıkça detanasyonlu yanma odasının basıncı ve çıkış sıcaklığı düşmektedir. Hava fazlalık katsayısının 1,5 olduğu değerlerde maksimum türbin gücüne ve elektrik verimine ulaşılmakta, ortalama 1,75 olduğunda da maksimum ekserji verimine ulaşmıştır. Bu değerlerden sonra hava fazlalık

katsayısı artıkça türbin gücü, elektrik verimi ve ekserji verimi azalma eğilimi göstermektedir. Hava fazlalık katsayısının 1,5 olduğu değerlerde minimum spesifik yakıt tüketimine ulaşılmakta, ortalama 1,75 olduğunda da minimum ekserjiye harcanan yakıt değerine ulaşmıştır. Bu değerlerden sonra hava fazlalık katsayısı artıkça spesifik yakıt tüketimi ve ekserjiye harcanan yakıt değeri artma eğilimi göstermektedir. Hava fazlalık katsayısı 1 olduğunda maksimum 162,0000 (kg/kW) özgül iş değerine ulaşmaktadır. Daha sonrasında hava fazlalık katsayısı artıkça özgül iş azalmaya devam etmektedir. Hava fazlalık katsayısı artıkça türbinden alınan verim azalmakta, yanma odası verimi 2 ile 2,5 değerlerinde maksimum değerlere ulaşmakta, kompresör verimi sabit kalmakta ve HRSG verimi artmaktadır. Toplam ekserji kaybının en düşük olduğu hava fazlalık katsayısı değeri 1,8 ile 1,9 aralığına karşılık gelmektedir. Hava fazlalık katsayısı 1,3 civarında maksimum değer göstermektedir. Hava fazlalık katsayısı 1,8 değerine ulaştığında maksimum 0,152 YEKO değerine karşılık gelmektedir. Daha sonrasında hava fazlalık katsayısı artıkça YEKO değeri azalma göstermektedir. Hava fazlalık katsayısı 2 iken ekserjiye harcanan yakıt miktarı minimum değere ulaşmıştır.

Araştırma konusu olan bu çalışma, ZND çevrimleri için ekserji ve elektriksel verimler, alevli yanmaya dayalı bir Brayton çevrimiyle kıyaslanmıştır. Kompresörün sıkıştırma değeri 1' de gaz türbinli çevrimin verimi sıfır verirken, iki ZND' li çevrimde termal verimin %20-35'den itibaren başladığı söylenebilir. Elde edilen bu sonuçlar, PDE'lerin Brayton döngülerine kıyasla teorik avantajını destekleyen sonuçlar vermektedir. Yalnızca fan veya az sayıda kompresör aşaması gerektirmesi açısından PDE' ler için bir avantajdır. Diğer motorlara kıyasla detonasyon motorları daha az karmaşık ve uygun maliyete sahiptir.

Sonuçlara bakıldığında, gaz türbinli çevrimi ile buhar veya su enjeksiyonu rejeneratifli ZND çevrimleri birbirleri ile yarışabilir konumdadırlar. ZND çevrimleri de buharlı ya da su enjeksiyonu ile rejenerasyonlu, PDE motorlu çevrimlerde daha uygun tasarımlı gaz türbini ile Basınç Kazandıran Yanmayla performanslarının artırılması, ZND çevrimlerini gaz türbinli çevrimlerden daha avantajlı duruma getirecektir.

## KAYNAKÇA

- Anderson, J., D., J. (1984). Fundamentals of Aerodynamics (3rd ed.), McGraw-Hill Science/Engineering/Math, ISBN 978-0-07-237335-6, 465-511, adresinden edinilmiştir.
- Ashrae (2002). Cogeneration Systems and Engine and Turbine Drives. Ashrae Systems and Equipment Handbook (SI). Chapter 7. New York.
- Bachman, C., L. & Goodwin, G., B. (2021). Ignition criteria and the effect of boundary layers on wedge-stabilized oblique detonation waves. *Combustion and Flame*, 223, 271-283.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M., J. (1996). *Thermal design and optimization*. Danvers, Massachusetts: Wiley Pub.
- Bellini, R. (2010). *Ideal cycle analysis of a regenerative pulse detonation engine for power production* (Doctoral dissertation). The University of Texas at Arlington USA. (4. Kaynak)
- Bellini, R., & Lu, F., K. (2010). Exergy analysis of a pulse detonation power device. *Journal of Propulsion and Power*, 26, 4, <https://doi.org/10.2514/1.44141>
- Bello, R., T., & Lu, F., K. (2017). *Exergy analysis of a pulse detonation engine linear power generator* (Doctoral dissertation). The University of Texas at Arlington.
- Britan, A., Ben-Dor, G., Elperin, T., Igra, O., & Jiang, J. P. (2013). In Numerical Methods for Wave Propagation: Selected Contributions from the Workshop held in Manchester, UK, Containing the Harten Memorial Lecture (Vol. 47, p. 55). Springer Science & Business Media.
- Çengel, Y., A., Hill, M., & Cimbala J., M. (2014). *Akışkanlar mekaniği; Temelleri ve Uygulamaları*, 3.bs. Bölüm 12.
- Friedman, R. (1953). Kinetics of the combustion wave. *Journal of the American Rocket Society*, 23(6), 349-54.
- Ghezali, Y., Haoui, R., & Chpoun, A. (2020). Effect of rotational nonequilibrium behind a normal shock wave in oxygen and nitrogen flow. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100601.
- Gvozdeva, L., G., Faresov, I., M., Brossard, J., & Charpentier, N. (1986). Normal shock wave reflection on porous compressible material. In *IN: Dynamics of explosions; International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, 155-165.
- Horlock, J., H. (1997). Cogeneration-Combined. Power (CHP): Thermodynamics and Economics. Malabar, Florida: Krieger Pub.
- Igra, O., Falcovitz, J., Houas, L., & Jourdan, G. (2013). Review of methods to attenuate shock/blast waves. *Progress in Aerospace Sciences*, 58, 1-35.
- Karaali, R. (2016). Exergy analysis of a combined power and cooling cycle. *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 209-213.
- Karaali, R. (2010). Kojenerasyon tesislerinin termoeconomik optimizasyonu (Doktora tezi), Kocaeli Univ. FBE Makine Müh. ABD
- Karaali, R., Keven, A. (2022). Performance Analysis of Air Fuel Heating Effects on Cogeneration cycles. *European Journal of Science and Technology*, 43;91 – 96. DOI: 10.31590/ejosat.1199414

- Karaali, R., Keven, A. (2022). Exergy Analysis of Inlet Air Absorption Cooling Effects on Basic Cogeneration Systems. *European Journal of Science and Technology*, 43;97 – 103. DOI: 10.31590/ejosat.1199382
- Karaali, R., Keven, A. (2022). Evaluation of four different cogeneration cycles by using some criteria. *Applied Rheology*, 32;122 – 137. DOI: 10.1515/arh-2022-0128
- Karaali, R., & Öztürk, İ. T. (2017c). Performance analyses of gas turbine cogeneration plants. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 37(1), 25-33.
- Karaali, R., & Öztürk, İ., T. (2015a). Thermoeconomic optimization of gas turbine cogeneration plants. *Energy*, 80, 474-485.
- Karaali, R., & Öztürk, İ., T. (2015b). Thermoeconomic analyses of steam injected gas turbine cogeneration cycles. *Acta Physica Polonica A*, 128(2B B-279), 279–81.
- Karaali, R., & Öztürk, İ., T. (2016). Thermodynamic optimization of a zero CO<sub>2</sub> emission cogeneration cycle. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25,12, 5729-5738.
- Karaali, R., & Öztürk, İ., T. (2017a), Efficiency improvement of gas turbine cogeneration systems, *Tehnicki vjesnik-Technical Gazette*, 24, 1, 21-27. DOI:10.17559/TV20140509154652
- Karaali, R., & Öztürk, İ., T. (2017b). Effects of ambient conditions on performance of gas turbine cogeneration cycles. *Isı Bilimi Ve Teknigi Dergisi/Journal of Thermal Science & Technology*, 37(1), 93-102.
- Keven, A. (2023). Performance analyses of detonation engine cogeneration cycles. *Open Chemistry*, 21;1 – 9. DOI: 10.1515/chem-2022-0313
- Keven, A. (2023). Exergetic performance analyses of three different cogeneration plants. *Open Chemistry*, 21;1 – 13. DOI: 10.1515/chem-2022-0295
- Keven, A., Karaali, R. (2015). Investigation of an Alternative Fuel for Diesel Engines. *Acta Physica Polonica A*, 128(2B);282 – 286. DOI: 10.12693/APhysPolA.128.B-282
- Keven, A., Karaali, R. (2022). Analysis of Some Tribological Properties of Hazelnut Oil in Gasoline engines. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 15;75 – 83. DOI: 10.18185/erzifbed.1199745
- Keven, A., Öner, C. (2023.) Emission and Lubrication Performance of Hazelnut Oil as A Lubricant. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 9;219 – 224. DOI: 10.22399/ijcesen.1321604
- Kumakura, T. (1996). Characteristics of stoichiometric H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> combustion in water with premixing and diffusion burners. *International Journal of Hydrogen Energy*, 21(8), 685–693. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(95\)00133-6](https://doi.org/10.1016/0360-3199(95)00133-6)
- Lazzaretto, A., Toffolo, A., Morandin, M., & Von Spakovsky, M. R. (2010). Criteria for the decomposition of energy systems in local/global optimizations. *Energy*, 35(2), 1157-1163.
- Lee, J., H., & Glass, I., I. (1984). Pseudo-stationary oblique-shock-wave reflections in frozen and equilibrium air. *Progress in Aerospace Sciences*, 21, 33-80.
- Levy, A., Ben-Dor, G., Skews, B. W., & Sorek, S. (1993). Head-on collision of normal shock waves with rigid porous materials. *Experiments in Fluids*, 15, 183-190.
- Liu, Y., Wang, L., Xiao, B., Yan, Z., & Wang, C. (2018). Hysteresis phenomenon of the oblique detonation wave. *Combustion and Flame*, 192, 170-179.

- Markell, K., C. (2005). *Exergy Methods for the Generic Analysis and Optimization of Hypersonic Vehicle Concepts*.  
[https://www.researchgate.net/publication/36190015\\_Exergy\\_Methods\\_for\\_the\\_Generi\\_c\\_Analysis\\_and\\_Optimization\\_of\\_Hypersonic\\_Vehicle\\_Concepts](https://www.researchgate.net/publication/36190015_Exergy_Methods_for_the_Generi_c_Analysis_and_Optimization_of_Hypersonic_Vehicle_Concepts) adresinden edinilmiştir.
- Matsutomi, Y. (2010). *Studies on pressure-gain combustion engines* (Doctoral dissertation). Purdue University.
- Mochalova, V., Utkin, A., Savinykh, A., & Garkushin, G. (2021). Pulse compression and tension of Kevlar/epoxy composite under shock wave action. *Composite Structures*, 273, 114309.
- Moorhouse, D., Charles, H., O., K., E., & Prendergast, J. (2002). Thermal analysis of hypersonic inlet flow with exergy-based design methods, *International Journal of Thermodynamics*, 5(4), 161-168.
- Moorhouse, D., J., & Camberos, J., A. (Eds.). (2011). *Exergy analysis and design optimization for aerospace vehicles and systems*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 77-140.
- Moran, J., M., & Tsatsaronis, G. (2000). *The CRC handbook of thermal engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 15–109.
- Moran, M., J. (1989). *Availability analysis: a guide to efficient energy use*. New York: ASME.
- Petela, R. (2000). Application of exergy analysis to the hydrodynamic theory of detonation in gases. *Fuel Processing Technology*, 67, 131-145.
- Qin, Q., & Zhang, X. (2018). A novel method for trigger location control of the oblique detonation wave by a modified wedge. *Combustion and Flame*, 197, 65-77.
- Ram, O., Ben-Dor, G., & Sadot, O. (2018). On the pressure buildup behind an array of perforated plates impinged by a normal shock wave. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 92, 211-221.
- Shepherd, J., & Lee J. (1992). On the transition from deflagration to detonation. *Major Research Topics In Combustion*, 439-487.
- Shooshtari, S., R., & Shahsavand, A. (2017). Maximization of energy recovery inside supersonic separator in the presence of condensation and normal shock wave. *Energy*, 120, 153-163.
- Sod, G., A. (1991). A compressible vortex method with application to the interaction of an oblique shock wave with a boundary layer. *Applied Numerical Mathematics*, 8(3), 257-273.
- Soni, S., K., Singh, A., Sandhu, M., Goel, A., & Sharma, R., K. (2013). Numerical simulation to investigate the effect of obstacle on detonation wave propagation in a pulse detonation engine combustor. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3), 458-464.
- Stathopoulos, P. (2018). Comprehensive thermodynamic analysis of the Humphrey cycle for gas turbines with pressure gain combustion. *Energies*, 11(12), 3521. doi:10.3390/en1123521
- Su, L., Wen, F., Wang, S., & Wang, Z. (2022). Analysis of Energy Saving and Thrust Characteristics of Rotating Detonation Turbine Engine. *Aerospace Science and Technology*, 124, 107555. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107555>

- Teng, H., Bian, J., Zhou, L., & Zhang, Y. (2021). A numerical investigation of oblique detonation waves in hydrogen-air mixtures at low mach numbers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(18), 10984-10994.
- URL-1: <https://ckk.com.tr/bilimsel/ses.pdf> 17 Haziran 2023.
- URL-2: <https://web.itu.edu.tr/yukselen/UZB362/04%20E%F0ik%20%DEoklar%20ve%20Genisleme%20Dalgalar%FD.pdf> 17 Haziran 2023.
- URL-3: <https://prezi.com/gyhnky056gjw/supersonik-sok-dalgasi-ve-sonik-patlama/> 16 Haziran 2023.
- Wood, W., W., & Kirkwood, J., G. (1958). Present status of detonation theory. *The Journal of Chemical Physics*, 29(4), 957-958. <https://doi.org/10.1063/1.1744626>
- Yıldırım, M. (2006), *Süpersonik, Sübsonik, Transonik, Hipersonik Nedir?* Bilgiustam, <https://www.bilgiustam.com/supersonik-subsonik-transonik-hipersonik-nedir-sok-dalgali-ve-sonik-patlama-nasil-gerceklestir/> adresinden edinilmiştir.
- Yükselen, M., A. (2006). *Sıkıştırılabilir Aerodinamik (2006-2007) (Ders notları)* [https://web.itu.edu.tr/yukselen/UZB362/UZB362\\_Index.htm](https://web.itu.edu.tr/yukselen/UZB362/UZB362_Index.htm) adresinden edinilmiştir.

## ÖZ GEÇMİŞ

.... yılında ..... doğdu. Lise Eğitimini Ahmet Can Bali Anadolu Lisesinde tamamladı. Lisans Eğitimini 2009-2013 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümünde tamamladı. Hemen ardından Rize (Recep Tayyip Erdoğan) Üniversitesinde formasyon eğitimi aldı. 2015 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde eğitimine devam edip,2018 yılında mühendislik eğitimimi tamamladı. Lisansüstü Eğitimini Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim dalında tamamladı.

