



**Research Article / Araştırma Makalesi**

**ENTRANSY ANALYSIS OF AN IRREVERSIBLE BRAYTON CYCLE AND  
DEFINING ITS RELATIONS WITH OTHER THERMODYNAMICAL  
PARAMETRES**

**Emin AÇIKKALP\***

*Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, BİLECİK*

**Received/Geliş: 31.10.2013 Revised/Düzelme: 20.04.2014 Accepted/Kabul: 10.05.2014**

---

**ABSTRACT**

In this study, entransy, which is relatively new thermodynamic parameter, was investigated for irreversible Brayton cycle. Entransy dissipation is the destruction occurring heat transfer potential. Entransy analysis was conducted numerically and results were compared with the work output, exergy output, energy and exergy efficiencies, entropy generation and the internal irreversibility parameter. Even if optimum values for other parameters are determined, it is seen that entransy dissipation rate is very high. Work output decreases with irreversibilities and its value ranges from 339.41 (kW) to 222.36 (kW). Similarly, entransy dissipation decreases with irreversibilities and its value is reduced from 740795 (kW) to 606382 (kW).

**Keywords:** Entransy transfer, entransy dissipation, thermodynamic parameters, irreversibility, entropy generation, brayton cycle.

**TERSİNMEZ BİR BRAYTON ÇEVİRİMİ İÇİN ENTRANSİ ANALİZİ VE DİĞER  
TERMODİNAMİK PARAMETRELERLE İLİŞKİSİNİN BELİRLENMESİ**

**ÖZET**

Bu çalışmada nispeten yeni bir termodinamik parametre olan entransi, tersinmez bir Brayton çevrimi için incelenmiştir. Entransi yok oluşu, ısı geçişi potansiyelindeki yok oluştur. Çalışmada entransi analizi sayısal olarak yapılmış ve daha sonrasında sonuçlar iş çıktısı, ekserji çıktısı, enerji ve ekserji verimleri, entropi üretimi ve içten tersinmezlik parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, diğer termodinamik özelliklerin en uygun olduğu değerler elde edilebilse de entransi yok oluşunun çok yüksek olduğu görülmüştür. İş çıktısının tersinmezlikler sebebiyle 339.41 (kW) dan 222.36 (kW) değerine düşmüştür. Benzer olarak, entransi yok oluşu tersinmezlikle azalmaktadır ve değeri 740795 (kW) den 606382 (kW) e düşmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Entransi geçişi, entransi yok oluşu, termodinamik parametreler, tersinmezlik, entropi üretimi, brayton çevrimi.

---

**1. GİRİŞ**

Isı transferi özellikle enerji sistemlerinde en sık görülen ve sıcaklık farkından kaynaklanan enerji geçişidir. Tahminen dünyanın enerji sistemlerinin tahminen % 80'inden fazlası ısı transferi

---

\*e-mail/e-ileti: [emin.acikkalp@bilecik.edu.tr](mailto:emin.acikkalp@bilecik.edu.tr), tel: (228) 216 01 01

süreçlerini içermektedir. Geliştirilmiş ısı transferi süreçleri küresel ısınmanın en büyü nedeni olan CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmada büyük bir potansiyele sahiptir. [1-3]. Yukarıda sayılan nedenlerden dolayı ısı transferi süreçlerinin optimizasyonu büyük önem kazanarak entransi adı verilen bir kavram geliştirilmiştir. Entransi bir sistemin ısı transferi kabiliyeti olarak tarif edilebilir. Termodinamik olarak ısı transferi süreci tersinmez bir süreç olup ısı transferi sırasında her zaman bir miktar entransi yok oluşu olmaktadır. Bu olay, tersinmezliklerden dolayı iş potansiyelindeki kayıplara (ekserji yok oluşu) benzetilebilir. Entransi kavramı elektrik kapasitörlerine olan benzerliği kullanılarak geliştirilmiştir ve aşağıdaki biçimde tanımlanmıştır [4]:

$$G = \frac{1}{2}QT \quad (1)$$

Burada, G (kJK) entransi Q (kJ) nesnede depolanan ısı, T (K) ise nesnenin sıcaklığıdır. Enerji ve ekserji denge denklemlerine benzer olarak bir entransi denge denklemi türetilerek aşağıda gösterilmiştir [5]:

$$\dot{G}_H - \dot{G}_L - \dot{G}_d - \dot{G}_w = 0 \quad (2)$$

Burada, G<sub>H</sub> yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağından olan entransi geçişi, G<sub>L</sub> düşük sıcaklıktaki ısı kaynağından olan entransi geçişi, G<sub>d</sub> entransi yok oluşu ve iş ile olan entransi geçiştir.

Literatürde entransi ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen [3-35], bunların sadece küçük bir bölümü termodinamik çevrimleri incelemiştir [4-8]. Bu çalışmada tersinmez bir Brayton çevriminin entransi analizi yapılmış ve sonuçlar diğer termodinamik parametrelerle kıyaslanmıştır.

## 2. TERMODİNAMİK ANALİZ

Çalışmada termodinamik analiz yapılırken aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

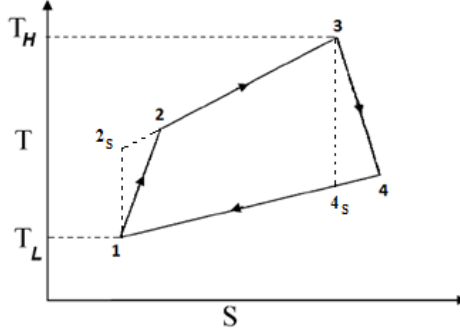
- Sistem sürekli rejimde çalışmaktadır
- Tüm süreçler tersinmezdir.
- Çevre koşulları T<sub>o</sub> 298.15 (K) ve P<sub>o</sub> 100 (kPa) dır.
- Özgül ısıların sıcaklıkla değişmediği kabul edilmiştir. Sabit basınçta özgül ısı, C<sub>p</sub> 1.005 (kJ/kg)ve izentropik katsayı, k 1.04 alınmıştır.
- Sistemde dolaşan akışkan havadır ve ideal gaz olarak kabul edilmiştir.

$$-\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \text{ kabul edilmiştir.}$$

Sistemden birim zamanda geçen ısı miktarı ( $\dot{Q}$ ):

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p dT \quad (3)$$

Sistem için sıcaklık entropi değişimi diyagramı şekil 1 de görülmektedir.



Şekil 1. Tersinmez Brayton çevriminin T-S diyagramı [36,37].

Buna göre, Brayton çevrimine giren ve çıkan toplam ısılar sırasıyla aşağıdaki denklemlerde ifade edilebilir:

$$\dot{Q}_H = \dot{m} c_p \int_2^3 dT = \dot{m} c_p (T_3 - T_2) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m} c_p \int_1^4 dT = \dot{m} c_p (T_4 - T_1) \quad (5)$$

Burada  $\dot{m}$  sistemde akan hava debisidir. Birim zamanda geçen entransi akışı ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{G} = \dot{m} \cdot c_p \cdot T \cdot dT \quad (6)$$

Burada sisteme ısı ile giren, çıkan ve iş ile aktarılan entransileri sırasıyla aşağıdaki denklemlerde gösterirsek:

$$\dot{G}_H = \dot{m} c_p \int_2^3 T dT = \frac{\dot{m} c_p (T_3^2 - T_2^2)}{2} \quad (7)$$

$$\dot{G}_L = \dot{m} c_p \int_1^4 T dT = \frac{\dot{m} c_p (T_4^2 - T_1^2)}{2} \quad (8)$$

$$\dot{G}_W = T_o \cdot \dot{W} \quad (9)$$

Tersinmez ve tersinir çevrimler arasındaki ilişki için genişleme ve sıkıştırma verimleri kullanılabilir [37-43]:

$$\eta_C = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}, \quad \eta_E = \frac{T_4 - T_3}{T_{4s} - T_3} \quad (10)$$

İş çıktısı, ekserji çıktısı, enerji verimi, ekserji verimi, entropi, içten tersinmezlik katsayısı ve entransi yok oluşu ve entropi üretimi aşağıdaki denklemlerdeki gibi sırasıyla ifade edilir:

$$\dot{W} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \tag{11}$$

$$Ex = \dot{Q}_H \left( 1 - \frac{T_o}{T_H} \right) \tag{12}$$

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} \tag{13}$$

$$\varphi = \frac{\dot{W}}{Ex} \tag{14}$$

$$S_{gen} = \left( \frac{\dot{Q}_L}{T_L} - \frac{\dot{Q}_H}{T_H} \right) \tag{15}$$

Termodinamiğin ikinci yasası matematiksel olarak aşağıdaki gibi (Clausius eşitsizliği) ifade edilebilir.

$$\frac{\dot{Q}_H}{T_H} - \frac{\dot{Q}_L}{T_L} \leq 0 \tag{16}$$

Bu eşitsizlik bir içten tersinmezlik katsayısı (I) tanımlayarak eşitlik haline dönüştürülebilir:

$$I \frac{\dot{Q}_H}{T_H} = \frac{\dot{Q}_L}{T_L} \tag{17}$$

Denklem (16) kullanılarak I aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$I = \frac{\dot{Q}_L T_H}{\dot{Q}_H T_L} \tag{18}$$

### 2.1.Tersinmez Brayton Çevrimi İçin Termodinamik Model

Bu çalışmada, termodinamik analiz için değişken olarak basınç oranı alınarak değişimler bu parametreler için incelenmiştir. Çünkü bu bileşen, doğrudan sıcaklıkları ve verimi etkilediğinden, çevrimdeki en önemli termodinamik parametredir. Çevrimin analizinin yapılması için önce çevrimdeki tüm sıcaklıkların tanımlanması gerektiği açıktır. Bunun için önce tersinir çevrimdeki sıcaklıklar belirlenir. T<sub>2s</sub> ve T<sub>4s</sub> değerleri sırasıyla aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibidir:

$$T_{2s} = x^{k-1} T_1 \tag{19}$$

$$T_{4s} = \frac{T_3}{x^{k-1}} \tag{20}$$

Burada x (  $\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$  ) basınç oranıdır. T<sub>2</sub> ve T<sub>4</sub> ise denklem (9) kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$T_2 = \frac{(T_{2S} - T_1)}{\eta_C} + T_1 \quad (21)$$

$$T_4 = T_4 + (T_{4S} - T_3)\eta_E \quad (22)$$

(2-20) denklemleri kullanılarak, iş çıktısı, ekserji çıktısı, enerji verimi, ekserji verimi, entropi, içten tersinmezlik katsayısı ve entransi yok oluşu üretimi aşağıdaki denklemlerdeki gibi sırasıyla ifade edilir:

$$\dot{W} = \frac{c_p \cdot \dot{m} \cdot x^{-1-k} \cdot (x - x^k)(T_1 \cdot x^k - \eta_C \cdot \eta_E \cdot T_3 \cdot x)}{\eta_C} \quad (23)$$

$$Ex = c_p \cdot \dot{m} \left( 1 - \frac{T_o}{T_3} \right) \left( T_3 + T_1 \left( \frac{1 - x^{-1+k}}{\eta_C} - 1 \right) \right) \quad (24)$$

$$\eta = \frac{x^{-k} \cdot (x^k - x)(T_1 \cdot x^k - \eta_E \cdot \eta_C \cdot T_3 \cdot x)}{T_1 \cdot ((\eta_C - 1) \cdot x + x^k) - \eta_C \cdot T_3 \cdot x} \quad (25)$$

$$\varphi = \frac{T_3 \cdot x^{-k} \cdot (x^k - x)(T_1 \cdot x^k - \eta_C \cdot \eta_E \cdot T_3 \cdot x)}{(T_1 - T_3)(T_1 \cdot ((\eta_C - 1) \cdot x + x^k) - \eta_C \cdot T_3 \cdot x)} \quad (26)$$

$$S_{gen} = c_p \cdot \dot{m} \cdot \left( \frac{T_1 \cdot ((\eta_C - 1) \cdot x + x^k)}{\eta_C \cdot T_3 \cdot x} + \frac{T_3 \cdot (1 + \eta_E \cdot (x^{1-k} - 1))}{T_1} - 2 \right) \quad (27)$$

$$I = \frac{T_3 \left( T_3 (1 + \eta_E (x^{1-k} - 1)) - T_1 \right)}{T_1 \left( T_3 + T_1 \left( \frac{1 - x^{1-k}}{\eta_C} - 1 \right) \right)} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \dot{G}_d = c_p \cdot \dot{m} \cdot & \left( \frac{((T_o \cdot x^{(-1-k)})(x^k - x)(T_1 \cdot x^k - \eta_C \cdot \eta_E \cdot T_3 \cdot x))}{\eta_C} - \frac{((T_3 - \eta_E T_3 + \eta_E T_3 x^{(1-k)})^2 - T_1^2)}{2} \right. \\ & \left. + \frac{(T_3^2 - (T_1 + (T_1 \cdot (x^{(-1+k)} - 1)))^2)}{2 \eta_C^2} \right) \quad (29) \end{aligned}$$

### 3. SAYISAL ÖRNEKLER VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, tersinmez Brayton çevriminin termodinamik analizi yapılmış ve sayısal yöntemler kullanılarak sonuçlar sunulmuştur. Hesaplamalarda daha önceden tanımlananlar dışında kullanılan sabit sayısal parametreler şöyledir:

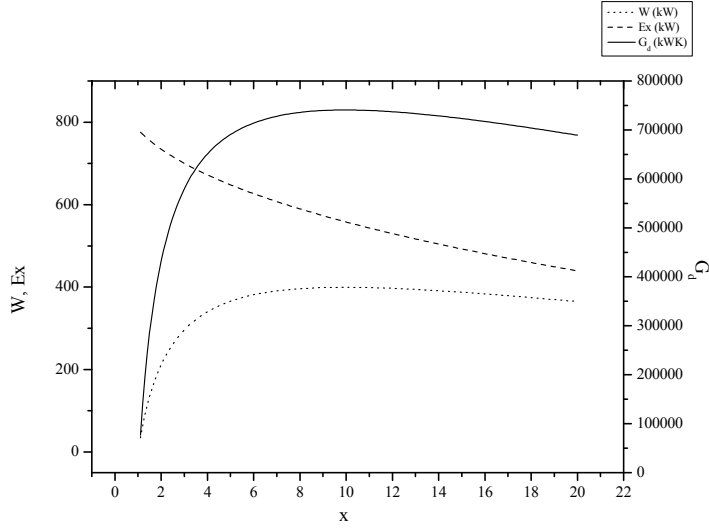
$$\dot{m} = 0.5 \text{ kg / s}, T_1 = 350K, T_3 = 2200K$$

Sıkıştırma ve genişleme verimleri bire eşit olduğu zaman ( $\eta_C = \eta_E = 1$ ) sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir ve incelenen değerlerin basınç oranı ile değişimi şekil 2 ile 4 arasında görülebilir:

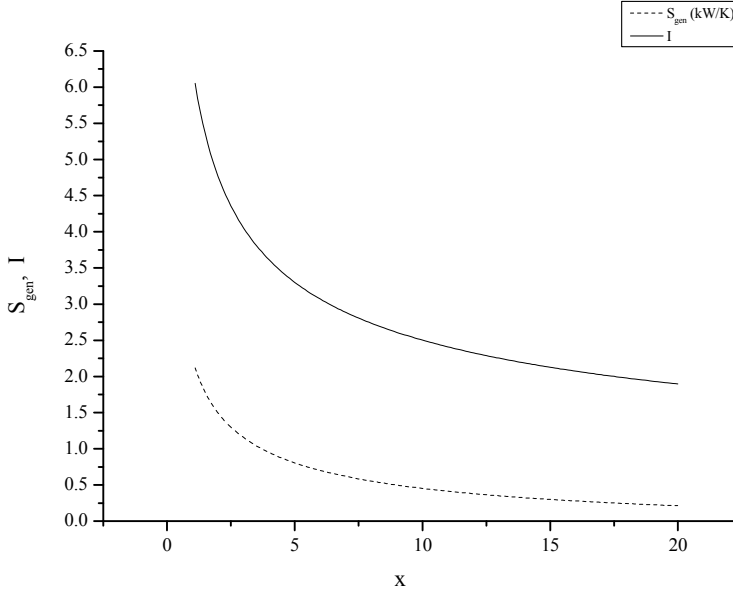
Maksimum iş çıktısı 399.491 (kW) basınç oranı 9.953 iken elde edilir. Benzer olarak entropi üretiminin ve içten tersinmezlik parametresinin maksimum olduğu basınç oranı değeri bire eşittir ve bu parametrelerin basınç oranı bir olduğu zamanki değerleri sırasıyla 2.233 (kW/K)

ve 6.286 dir. Entransi yok oluşu ise maksimum değerine basınç oranı 9.953 iken ulaşır ve değeri ise 740795 (kW/K) dir. Enerji ve ekserji verimlerinin çalışma aralığında herhangi bir maksimum noktası yoktur. Entropi üretimi ve içten tersinmezlik parametresinin ise bu değerler için çalışma aralığında minimum değerleri yoktur. Sıkıştırma ve genişleme verimleri 0.9'a eşit olduğu zaman ( $\eta_C = \eta_E = 0.9$ ) sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir ve bu değerler için şekil 5 ile 7 arasında gösterilmiştir:

Bu değerler için sistemin maksimum iş çıktısını basınç oranı 5.697 iken sağlanır ve değeri 308.483 (kW) dir. Bir önceki paragraftakine benzer olarak içten tersinmezlik parametresi ve entropi üretimi basınç oranı biriken sağlanır. Bu değerde, içten tersinmezlik parametresi 6.286 ve entropi üretimi 2.234 (kW/K) dir. İçten tersinmezlik parametresi minimum değerini  $x=18.586$  değerinde alır ve büyüklüğü 3.089 dur. Enerji ve ekserji verimleri maksimum değerlerine yine  $x=18.586$  noktasında alır ve enerji veriminin maksimum değeri (0.508), ekserji veriminin maksimum değeri ise 0.605 dir. Entropi üretimi minimum değerini  $x=76.119$ 'da alır ve büyüklüğü 0.307 dir. Son olarak, entransi yok oluşu değeri maksimumuna 680303 (kW/K)  $x=9.424$  noktasında ulaşır.



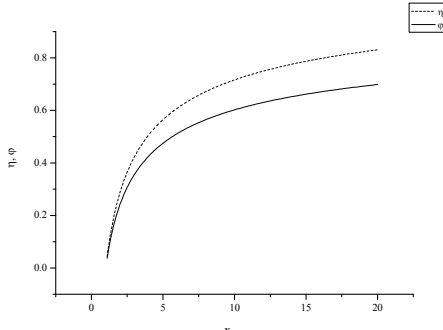
Şekil 2. İş çıktısı, ekserji çıktısı ve entransi yok oluşunun basınç oranı ile değişimi ( $\eta_C = \eta_E = 1$ )



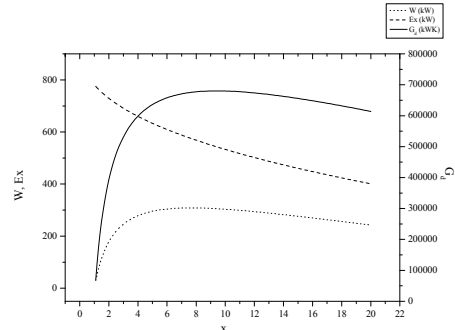
**Şekil 3.** Entropi üretimi ve içten tersinirlik parametresinin basınç oranı ile değişimi ( $\eta_C = \eta_E = 1$ )

Sıkıştırma ve genişleme verimleri 0.8 iken ( $\eta_C = \eta_E = 0.8$ ) sonuçlar şekil 8-10'da gösterilerek sonuçlar aşağıda tartışılmıştır:

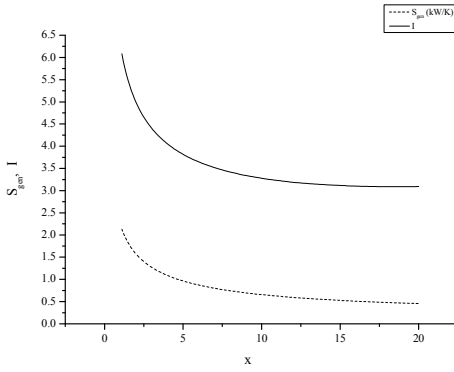
Maksimum iş çıktısı  $x=5.697$  değerinde 222.36 (kW) dır. Maksimum içten tersinmezlik parametresi ve entropi üretiminin değerleri önceki iki sonuçla aynıdır. Maksimum entransi yok oluşu  $x=8.513$ 'de 606382 (kW/K) dir. Enerji ve ekserji verimleri maksimum değerlerine  $x=9.488$  değerinde ulaşır ve büyüklükleri sırasıyla 0.335 ve 0388 dir. İçten tersinmezlik parametresi de minimum değerine  $x=9.488$  noktasında ulaşır ve büyüklüğü 4.180 dir. Entropi üretimi minimum değerini 0.612 (kW/K)  $x=56.704$  noktasında alır. Şekil 2, 5 ve 8 incelendiğinde iş çıktısı ve entransi yok oluşunun basınç oranı ile logaritmik olarak maksimum değere kadar arttığı daha sonra azaldığı görülmektedir. Ekserji çıktısının ise logaritmik olarak azaldığı görülmektedir. Şekil 3, 6 ve 9 da çalışma aralığında entropi üretiminin ve içten tersinmezlik parametresinin logaritmik olarak azaldığı görülür. Basınç oranı büyüdükçe ise bu değerlerin minimum değerlerine ulaştıkları görülmektedir. Fakat bu değerler çevrim için çok büyük olduğundan uygulamada kullanılamazlar. Şekil 4 de enerji ve ekserji verimlerinin basınç oranıyla sürekli olarak logaritmik olarak arttığı görülür. Şekil 7 ve 10 da çalışma aralığında enerji ve ekserji verimlerinin maksimum bir noktaya ulaşana kadar logaritmik olarak arttığı bu değerden sonra ise aynı şekilde logaritmik olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca bu şekillerde görüldüğü gibi sıkıştırma ve genişleme verimlerinin azalmasıyla grafiklerin eğimleri artmaktadır.



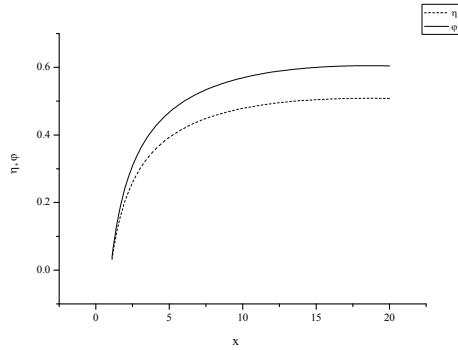
Şekil 4. Enerji ve ekserji verimlerinin basınç oranı ile değişimi ( $\eta_C = \eta_E = 1$ )



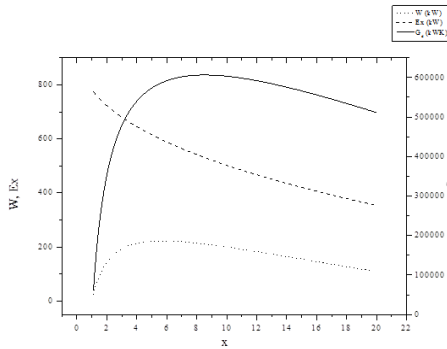
Şekil 5. İş çıkışı, ekserji çıkışı ve entransi yok oluşunun basınç oranı ile değişimi ( $\eta_C = \eta_E = 0.9$ )



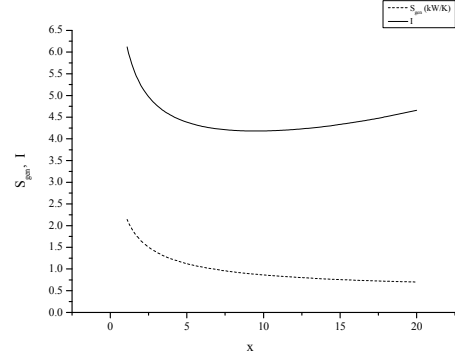
Şekil 6. Entropi üretimi ve içten tersinirlik parametresinin basınç oranı ile değişimi ( $\eta_C = \eta_E = 0.9$ )



Şekil 7. Enerji ve ekserji verimlerinin basınç oranı ile değişimi ( $\eta_C = \eta_E = 0.9$ )

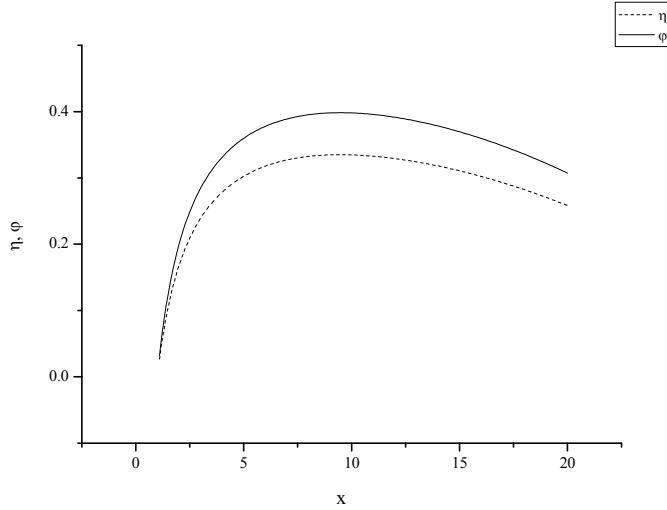


Şekil 8. İş çıkışı, ekserji çıkışı ve entransi yok oluşunun basınç oranı ile değişimi ( $\eta_C = \eta_E = 0.8$ )



Şekil 9. Entropi üretimi ve içten tersinirlik parametresinin basınç oranı ile değişimi ( $\eta_C = \eta_E = 0.8$ )





Şekil 10. Enerji ve ekserji verimlerinin basınç oranı ile değişimi ( $\eta_C = \eta_E = 0.8$ )

#### 4. SONUÇLAR

Sayısal örnekler incelendiğinde entropi üretiminin, ekserji çıktısının ve içten tersinmezlik parametresinin basınç oranıyla azaldığı görülmektedir. Sıkıştırma ve genişleme verimleri bire eşit olmadığı sürece bir değerde maksimuma eriştiği ve daha sonra azaldığı görülmektedir. Benzer olarak, iş çıktısı ve entransi yok oluşu da bir değerde maksimum değere ulaşmakta ve bu değerden sonra azaldığı görülmektedir. Buna göre entropi üretimi ve içten tersinmezlik parametresinin düşük olduğu değerlerde, verimlerin maksimum değerlerine yakın olduğu, iş çıktısının da bu değerlerde yaklaşık olarak maksimum olduğu görülmektedir. Yani, basınç çıktısını bu değerlere yakın seçmek mantıklı görünmektedir. Fakat, bu değerlerde entransi yok oluşunun yaklaşık olarak maksimum olduğu görülmektedir.

Buradan çıkarılacak, sonuç ise tersinmez Brayton çevrimi için entransi yok oluşundan (ısı transferi kabiliyeti) fedakarlık yapmadan çevrimin optimum değerlerde çalışması sağlanamaz. Bu sonuçlara göre, diğer termodinamik sistemler için de benzer çalışmalar yapılması tavsiye edilebilir.

#### REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Wang W., Cheng X.T., Liang X.G., “Entransy theory for the optimization of heat transfer – A review and update”, Int J Heat Mass Transfer, 63, 65-81, 2013.
- [2] Bergles A.E., “Heat transfer enhancement – the maturing of second-generation heat transfer technology”, Heat Transfer Eng., 18, 47-55, 1997.
- [3] Webb R.L., “Principles of Enhanced Heat Transfer”, John Wiley & Sons, NewYork, 1994.
- [4] Guo ZY, Zhu HY, Liang XG., “Entransy—a physical quantity describing heat transfer ability”, Int J Heat Mass Transfer ,50, 2545-56, 2007.
- [5] Cheng XT, Liang XG., “Entransy loss in thermodynamic processes and its application”, Energy, 44,964-72, 2012.
- [6] Xu MT., “The thermodynamic basis of entransy and entransy dissipation”, Energy, 36, 4272-7, 2011.

- [7] Cheng XT, Wang WH, Liang XG., “Entransy analysis of open thermodynamic systems”, *Chin Sci Bull.* , 57, 2934–40, 2012.
- [8] Wang W, Cheng XT, Liang XG., “Entropy and entransy analyses and optimizations of the Rankine cycle”, *Energ Convers Manage*, 68, 82-88, 2013.
- [9] Liu W, Liu ZC, Jia H, et al., “Entransy expression of the second law of thermodynamics and its application to optimization in heat transfer process” *Int J Heat Mass Transfer*, 54, 3049–59, 2011.
- [10] Chen LG, Wei SH, Sun FR., “Constructal entransy dissipation minimization for ‘volume-point’”, heat conduction, *J Phys D, Appl Phys*, 41, 195506, 2008.
- [11] Xie ZH, Chen LG, Sun FR., “Constructal optimization for geometry of cavity by taking entransy dissipation minimization as objective” *Sci China Ser E, Tech Sci*, 52, 3413–504, 2009.
- [12] Chen Q, Ren JX., “Generalized thermal resistance for convective heat transfer and its relation to entransy dissipation”, *Chin Sci Bull*, 53, 3753–61, 2008.
- [13] Cheng XT, Liang XG., “Entransy flux of thermal radiation and its application to enclosures with opaque surfaces”, *Int J Heat Mass Transfer*, 54, 269–78, 2011.
- [14] Cheng XT, Xu XH, Liang XG., “Radiative entransy flux in enclosures with nonisothermal or non-grey, opaque, diffuse surfaces and its application”, *Sci China, Tech Sci*, 54, 2446–56, 2011.
- [15] Cheng XT, Liang XG., “Computation of effectiveness of two-stream heat exchanger networks based on concepts of entropy generation, entransy dissipation and entransy-dissipation-based thermal resistance”, *Energ Convers Manage*, 58, 163–70, 2012.
- [16] Cheng XT, Xu XH, Liang XG., “Application of entransy to optimization design for parallel thermal network of thermal control system in spacecraft” *Sci China, Tech Sci*, 54, 964–71, 2011.
- [17] Qian XD, Li Z, Li ZX., “Entransy-dissipation-based thermal resistance analysis of heat exchanger networks”, *Chin Sci Bull.*, 56, 3289–95, 2011.
- [18] Cheng XT, Liang XG, Guo ZY.. “Entransy decrease principle of heat transfer in an isolated system”, *Chin Sci Bull*, 56, 847e54, 2011.
- [19] Cheng XT, Liang XG, Xu XH., “Microscopic expression of entransy”, *Acta Phys Sin*, 60, 060512, 2011.
- [20] Xie ZH, Chen LG, Sun FR., “Constructal optimization on T-shaped cavity based on entransy dissipation minimization” *Chin Sci Bull*, 54, 4418-27, 2009.
- [21] Xiao QH, Chen LG, Sun FR., “Constructal entransy dissipation rate minimization for “disc-to-point” heat conduction” *Chin Sci Bull*, 56, 102-12, 2011.
- [22] Wu J, Liang XG. “Application of entransy dissipation extreme principle in radiative heat transfer optimization” *Sci China Ser E-Tech Sci*, 51, 1306-14, 2008.
- [23] Xia SJ, Chen LG, Sun FR., “Optimization for entransy dissipation minimization in heat exchanger” *Chin Sci Bull* ,54,3572-8, 2009.
- [24] Li XF, Guo JF, Xu MT, “Cheng L. Entransy dissipation minimization for optimization of heat exchanger design”, *Chin Sci Bull* ,56,2174-8, 2011.
- [25] Qian XD, Li ZX. “Analysis of entransy dissipation in heat exchangers”. *Int J Thermal Sci*, 50, 608-14, 2011.
- [26] Chen L, Wei S and Sun F., “Constructal entransy dissipation rate minimization of a disc”, *Int. J. Heat Mass Transfer* , 54, 210-216, 2011.
- [27] Chen L, Wei S and Sun F. “Constructal entransy dissipation rate minimization of round tube heat exchanger cross-section”, *Int. J. Them. Sci.*, 50, 1285- 1292, 2011.
- [28] Wei SH, Chen LG, Sun FR. “Constructal optimization of discrete and continuous-variable cross-section conducting path based on entransy dissipation rate minimization.”, *Sci. China – Technol. Sci.*, 53, 1666–1677, 2010.

- [29] Wei SH, Chen LG, Sun FR., “Constructal entransy dissipation minimization for ‘volume-point’ heat conduction without the premise of optimized last order construct”, *Int. J. Exergy*, 7, 627–639, 2010.
- [30] Xia SJ, Chen LG, Sun FR., “Optimal paths for minimizing entransy dissipation during heat transfer processes with generalized radiative heat transfer law”, *Appl. Math. Model.*, 34, 2242–2255, 2010.
- [31] Xiao QH, Chen LG, Sun FR., “Constructal entransy dissipation rate minimization for a heat generating volume cooled by forced convection”, *Chin. Sci. Bull.*, 56, 2966–2973, 2011.
- [32] Xiao QH, Chen LG, Sun FR., “Constructal entransy dissipation rate minimization for heat conduction based on a tapered element”, *Chin. Sci. Bull.*, 56, 2400–2410, 2011.
- [33] Xiao QH, Chen LG, Sun FR., “Constructal entransy dissipation rate minimization for umbrella-shaped assembly of cylindrical fins”, *Sci. China – Technol. Sci.*, 54, 211–219, 2011.
- [34] Xie ZH, Chen LG, Sun FR., “Constructal optimization for geometry of cavity by taking entransy dissipation minimization as objective”, *Sci. China Ser. E – Technol. Sci.*, 52, 3504–3513, 2009.
- [35] Xie ZH, Chen LG, Sun FR., “Comparative study on constructal optimizations of T-shaped fin based on entransy dissipation rate minimization and maximum thermal resistance minimization”, *Sci. China – Technol. Sci.*, 54, 1249–1258, 2011.
- [36] Baierlein R., *Thermal Physics* (Cambridge, Cambridge University Press), 1999.
- [37] Ge Y., Chen L., Sun F., Wu C., “Thermodynamic simulation of performance of an Otto cycle with heat transfer and variable specific heats for the working fluid”, *Int. J. Therm. Sci.*, 44, 506–511, 2005.
- [38] Ge Y., Chen L., Sun F., Wu C., “The effects of variable specific-heats of the working fluid on the performance of an irreversible Otto cycle”, *Int. J. Exergy*, 2, 274 – 283, 2005.
- [39] Chen L., Ge Y., Sun F., Wu C., “Effects of heat transfer, friction and variable specific-heats of a working fluid on performance of an irreversible Dual cycle”, *Energy Convers. Manage.*, 47, 3224–3234, 2006.
- [40] Al-Sarkhi A., Jaber J.O., Abu-Qudais M., Probert S.D., “Effects of friction and temperature-dependent specific-heat of the working fluid on the performance of a Diesel-engine”, *Appl Energy*, 83, 153 – 165, 2006.
- [41] Y.Ge, L.Chen, Sun F., “Finite- time thermodynamic modeling and analysis for an irreversible dual cycle”, *Math Comput Model*, 50, 101-108, 2009.
- [42] Y.Ge, L.Chen, Sun F., “Finite- time thermodynamic modeling and analysis for of an irreversible Diesel cycle”, *P I Mech Eng D-J Aut*, 222, 887-894, 2008.
- [43] Y.Ge, L.Chen, Sun F., “Finite- time thermodynamic modeling and analysis for of an irreversible Otto- cycle”, *Appl Energy*, 85, 618-624, 2008.