

EKSERJİ VE OPTİMİZASYON

Exergy and Optimization

Atilla BIYIKOĞLU

ÖZET

Bu çalışmada, ekserji kavramının tarihsel gelişimi, ekserji verim ve optimizasyon tanımlamaları sunulmuştur. Genel optimizasyon sınıflandırmasının yapılmasının ardından amaç fonksiyonun yapısına, sınırlayıcılara ve karar değişkenlerine bağlı olarak yapılan optimizasyon sınıflandırmaları hakkında bilgi verilmiştir. Bunun yanı sıra, mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan optimizasyon prosedürünün aşamaları sunulmuştur. Genel optimumun bulunmasının önemi ve karşılaşılan zorluklardan bahsedilmiştir. Ekserji tabanlı optimizasyonun önemini vurgulamak ve akış problemlerinin modellenmesinde ve optimizasyonunda kullanım avantajlarını göstermek amacıyla iki farklı vaka incelemesi tanıtılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ekserji, Tersinmezlik, Optimizasyon, ekserji verimi.

ABSTRACT

In this study, historical development of concept of exergy, definitions of exergetic efficiency and optimization are presented. After making the classification of general optimization, information was given about the optimization classifications made depending on the structure of the objective function, the limitations and the decision variables. In addition to that, it is introduced that the procedure of the optimization used in the solution of engineering problems. It is stated about the importance and difficulties associated with finding global optimum. Two different distinctive examples are introduced to show the advantages of usage of exergy based optimization in modelling and optimization of flow problems.

Key Words: Exergy, Irreversibility, Optimization, Exergy efficiency.

1. GİRİŞ

Bilim insanları, uzun süredir, enerji sistemlerinin analizinde kullanılacak daha iyi metotların geliştirilmesi üzerine çalışmaktadırlar. Enerji analizinin değerlendirilme indeksi olarak, enerji korunumu olarak bilinen termodinamiğin birinci kanununa dayanan “ısı verim” veya “Birinci Kanun Verimi” kullanılmaktadır. Birinci kanun verimi, enerji etkileşimlerini niceliksel olarak değerlendirmekte, bununla birlikte, enerji etkileşimleri süresince oluşan nitelik değişimleri hakkında bilgi vermemektedir. Bu yüzden, bir ekipmanın ısıl prosesinin değerlendirilmesi ve analizi için sadece birinci kanun veriminin kullanılması yeterli kalmamaktadır. Ekserji analizinin değerlendirme indeksi, hem termodinamiğin birinci hem de ikinci kanununu dikkate alan ikinci kanun verimi olarak bilinen ekserji verimidir. Ekserji verimi, sadece enerji niceliği hakkında bilgi vermekle kalmaz aynı zamanda enerjinin kullanım etkinliğini ve niteliğini gösterir. Ekserji verimi, proseslerin tersinmezlik derecesini ölçmek için de kullanılır.

2. TARİHSEL GELİŞİM

1953 yılında, bilimsel bir toplantıda, “teknik iş kapasitesi”ni ifade etmek amacıyla, Slovenyalı bir bilim insanı olan Rant [1] tarafından “Ekserji” kelimesinin kullanılması ilk kez önerilmiştir. Bununla birlikte, Gibbs ve Maxwell, bu olaydan önce, tersinir proseslerin yer aldığı keyfi bir başlangıç noktasından kararlı denge durumuna ilerlerken dış güç üretmek için gerekli olan sistem kapasitesini ifade eden ve “kullanılabilir enerji” olarak adlandırılan bir fonksiyon tanımlamışlardı. Bunun yanı sıra, “ekserji” ile “kullanılabilir enerji” arasındaki ilişkiyi açıklayan ayrıntılı bir çalışma 2002 yılında Gaggioli [2,3] tarafından yayınlanmıştır. Alman literatüründe, 1960’larda, tamamen “ekserji”ye denk olan “Arbeitsfaehigkeit” isimli bir fonksiyon, enerji dönüşüm proseslerinin değerlendirilmesinde kullanılmakta idi. Bunu takip eden yirmi yıl içerisinde, “kullanılabilir enerji”, “kullanılabilirlik”, “kullanılabilir iş”, “iş potansiyeli”, “faydalı enerji”, “potansiyel entropi”, ve “eserji” gibi terimler, çok sık olmamakla birlikte, literatürde yer almasına rağmen, “ekserji” adlandırması, yavaş yavaş genel kabul görmeye başlamıştır [4]. Ekserji analiz metodu, hem teori hem de uygulamalar açısından, 1070’li yıllardan bu yana, Gaggioli, Moran, Fratzscher, Beyer, Szargut, Brodyanski ve benzeri bir çok bilim adamı tarafından kullanılarak hem Avrupa’da hem de Amerika’da gelişme göstermeye devam etmektedir [5].

3. EKSERJİ VERİM TANIMLARI

Ekserji verimi ile ilgili tanımlamalar yapılmadan önce, “verim iyileştirmesi” ile “sürdürülebilirlik” kavramlarının eş anlamlı olmadığına dikkat edilmelidir. Isıl proseslerin verim iyileştirilmesinin yapılması, verimde sürekliliğin sağlandığı anlamına gelmemektedir. Gerçek sürekliliğe etki eden birçok faktör, verim iyileştirilmesi ile ilgili değildir.

Termodinamik verim için, yazarlar arasında ihtilaflara sebep olan farklı formülasyonlar önerilmekle birlikte, mevcut durumda belli bir uyum sağlanmıştır [6]. Sciubba ve Wall [4]’un 1960’larda önermiş olduğu üç farklı verim tanımı aşağıda sunulmuştur,

Ekserji Verimi,

$$\varepsilon = \frac{\text{Faydalı ekserji çıktısı}}{\text{kullanılmış ekserji girdisi}}$$

Tersinirlik ölçüsü

$$\psi = \frac{\text{ürünlerin ekserjisi}}{\sum \text{kullanılmış ekserji girdisi}}$$

Ekserji yıkım katsayısı

$$\xi = \frac{\text{ekserji yıkımı}}{\text{toplam ekserji girdisi}}$$

4. OPTİMİZASYON METOTLARI

Bir fonksiyonun minimum veya maksimum değerini bulmak için sistematik olarak matematiksel tekniklerin kullanılması olarak tanımlanabilen optimizasyon genel olarak üç farklı kategoriye ayrılabilir;

- Hesaba dayalı metotlar (Gradyen tabanlı; Lagrange Çarpanları)
- Araştırma Metotları (kapsamlı, keyfi)
- Buluşsal (genetik algoritmalar)

Optimizasyon metodları, amaç fonksiyonunun yapısına bağlı olarak, (a) Tekli veya çoklu karar değişkenli, (b) sürekli-sürekli, (c) lineer-nonlineer olmak üzere üç farklı şekilde, sınırlayıcılara ve karar değişkenlerine bağlı olarak (a) sınırlayıcılar: i. Tek değişkenli {Ardışık (detaylı) Arama, Altın Kısım Arama, Polinom Yaklaşımlar}, ii. Çok değişkenli {Lattice Arama, Seri-Tek Değişkenli Arama, En dik Azalış (gradyen tabanlı), Newton Metodu (ikinci türev)}, (b) Sınırlayıcılar: i. Tek değişkenli {Bileşke fonksiyon (Takma-amaç fonksiyonu, engel fonksiyonu, ceza fonksiyonu, genelleştirilmiş ceza fonksiyonu)} ii. Çok Değişkenli { Lineer Programlama, Non-lineer Programlama} olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılabilir.

Optimizasyon metodları, uygulanan çözüm yöntemine bağlı olarak sayısal veya analitik olarak gerçekleştirilebilir ve (a) Grafik Metotlar, (b) Dolaylı Metotlar ve (c) Doğrudan Metotlar olmak üzere üç kategoride incelenebilirler. Amaç fonksiyon değerlerinin adedinin hesaplandığı ve çizildiği grafik metot, belki de, amaç fonksiyonunun ekstremumunu tespit etmeye yarayan en temel metottur. Amaç fonksiyonunun değerlerini ve türevlerini kullanarak ekstremumu belirleyen metotlar dolaylı metotlar olarak adlandırılır. Bu metotlara örnek olarak, Newton metodu, Newton metodunun sonlu fark yaklaşımı (veya sanki-Newton metodu) ve Sekant metodu verilebilir. Doğrudan metotlar, türevleri kullanmadan ardışık test noktalarındaki fonksiyon değerlerini doğrudan karşılaştırarak ekstremumu arayan metotlardır. Doğrudan sayısal metotlar, genellikle, sınır ve kıvrım noktalarında, sürekli amaç fonksiyonu içeren problemleri kolaylıkla çözebilirler. Bu metotlara örnek olarak, iki-noktalı eşit aralıklı arama, ikiye ayrılma (veya çatallanma araması), Fibonacci metodu, ve altın kesit metodu verilebilir.

4.1. Yerel - Genel Optimum

Optimizasyon problemi çözülürken elde edilen optimumun yerel veya genel olduğunun belirlenmesi tartışma konusudur. Yanıt yüzey metotları gibi genel yaklaşıma yönelik metotlar ve genetik algoritmalar gibi keşif teknikleri, yerel optimumun bulunmasında yerel yaklaşım tabanlı metotlardan daha az duyarlı olmalarına karşın gradyent tabanlı optimizasyonlar gibi yerel yaklaşıma yönelik metotlar, yerel optimumun bulunmasında daha duyarlıdır.

Diğer bir deyişle, bu teknikler, daha genel bir optimum bulma şansını artırır. Bununla birlikte, hiç bir algoritma, bulunan optimumun gerçek genel optimum olduğunu garanti edemez. Ancak optimizasyon problemi konveks yapıda ise, bulunan optimumun genel optimum olacağı garanti edilebilir.

Amaç fonksiyonu ve olası çözüm bölgesi konveks yapıda olan problemler “konveks optimizasyon problemi” olarak adlandırılır. Malesef, gerçekte karşılaşılan mühendislik problemlerinin çoğu konveks yapıya sahip değildir. Dolayısıyla, uygulamalı problemler için genel optimuma ulaşılması zordur. Farklı algoritma tipleri, garanti etmemekle birlikte, genel optimum bulma şansını artırabilir. Bu kapsamda, genel optimum bulma şansını artıran algoritmaların bir hesaplama maliyeti olduğunun akıldaki tutulması önemlidir.

4.2. Optimizasyon Prosedürü

Bir mühendislik probleminin tasarımında kullanılacak optimizasyon işlemi aşağıdaki basamaklardan oluşur;

- i. Problemin fiziksel tanımı
- ii. Problemin matematiksel modelinin oluşturulması
- iii. Tasarım değişkenlerinin belirlenmesi
- iv. Amaç fonksiyonunun oluşturulması
- v. Tüm sınırlayıcıların doğrudan tanımlanması
- vi. Bileşen karakteristiklerinin denklem şeklinde ifadesi
- vii. Yardımcı denge denklemlerinin yazılması
- viii. Analiz edilecek sistem için veri toplanması
- ix. Başlangıç tasarımının tahmini
- x. Sistemin Analizi

- xi. Uygun optimizasyon metodunun seçimi
- xii. Optimizasyon denklemler setinin çözümü
- xiii. Optimumun mevcut olup olmadığına yönelik olarak sonuçların test edilmesi
- xiv. Eğer optimum mevcut ise, ileri optimizasyon işlemlerinin uygulanması; hassasiyet analizi, Lagrange Çarpanları,
- xv. Optimumun yerel veya genel olduğunun kontrol edilmesi

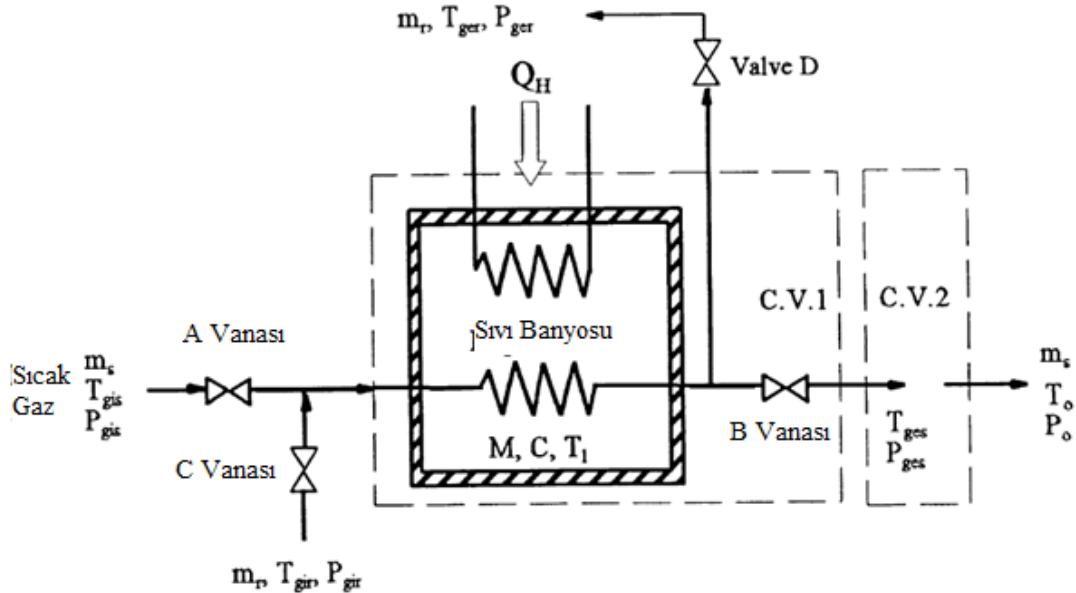
5. EKSERJİ TABANLI OPTİMİZASYON

Ekserji verimi veya tersinmezlik tanımı kullanılarak akış içeren optimizasyon problemlerinin çözümüne yönelik aşağıda sunulan çalışmalar tanıtılmıştır.

Vaka İncelemeleri:

A. “Yıgılı Model Kullanılarak Duyulur Isı Kaskat Enerji Depolama Sisteminin Optimizasyonu” [7]

Bu çalışmada, ekserji depolaması ve daha sonra verimli kullanımı için geliştirilen bir duyulur ısı kaskat ısı enerji depolama sistemini analiz ve optimize etmek için ekserji kavramı kullanılmıştır. Bu sistem sıvı-gaz ısı değiştirici, elektrik ısıtıcı ve yalıtılmış bir tank ve depolama sıvısı olarak büyük bir su banyosu ve sistem akışkanı olarak da hava kullanmaktadır. Isı değiştiricisindeki vizkoz kayıplar ve depolama sırasında oluşan ısı transferi, elektriksel ısıtma, deşarj prosesi ve depolama prosesi çıkışındaki sıcak gazların ortam havası ile karışımı sonucu oluşan tersinmezlikler değerlendirilerek geliştirilmesi gereken üniteler belirlenmiştir. Birinci ve İkinci Kanun verimleri ile sistem tersinmezlik kaynakları, tek enerji kaynağına sahip ısı enerji depolama sistemi ile karşılaştırılmıştır. Deşarj süresi, optimum depolama süresi ve ısı değiştiricisi transfer ünite sayısı, sistemdeki tersinmezlikler minimize edilerek farklı işletim şartları için belirlenmiştir.



Şekil 1. Kaskat Isıl Enerji Depolama Sisteminin Şematik Görünümü

Şekil 1’de şematik olarak görülen duyulur ısı kaskat ısı enerji depolama sistemini ele alalım. Sistem, çok iyi yalıtılmış bir tank içerisine yerleştirilen M kütleli ve C özgül ısıya sahip büyük bir ısı banyosundan ibarettir. Banyo içerisine daldırılan bir ısı değiştiricisi vasıtasıyla sistemden geçen sıcak hava ile banyo sıvısı arasında ısı transferine izin verilmektedir. Ayrıca, banyo içerisine daldırılan bir elektrikli ısıtıcı vasıtasıyla, yoğun olmayan zamanlardaki elektrik gücü kullanılarak banyo sıcaklığı artırılmaktadır. Gaz ve elektrik ısıtmanın dahil olduğu depolama prosesini takip eden deşarj prosesinin birleşiminden oluşan tek bir çevrim, termodinamik çevrim oluşturmaktadır. Depolama prosesinin başlangıcında, A ve B vanaları açılmakta, sıcak hava A vanası boyunca sisteme giren sıcak hava, banyo içerisine daldırılan ısı değiştiricisinden geçerken soğutulmakta ve daha sonra B vanasından geçerek atmosfere tahliye edilmektedir. Sıcak hava ısı değiştiricisinden geçerken banyo sıcaklığı, $T_1(t)$ ve depolama prosesinin gaz çıkış sıcaklığı, $T_{ges}(t)$ depolama prosesi gaz giriş sıcaklığına, T_{gis} yaklaşmaktadır. Depolama sistemini terk eden gaz atmosfere tahliye edilerek ortam havası ile karışmaktadır. Karışım prosesi, gaz çıkış sıcaklığını atmosfer sıcaklığına, T_o indirmektedir. Şekil 2’de görüldüğü üzere, gaz ısıtma prosesinin, istenen depolama sıvısı sıcaklığına, T_{is} ulaşılncaya kadar devam etmesine izin verilir. Bu sıcaklığa ulaşıncaya, A ve B vanaları kapatılır ve ikinci ısıtma devreye girer. T_H sıcaklığındaki elektrikli ısıtıcı, elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürür ve bu enerji sıvı banyosuna transfer edilir ve banyo sıcaklığı artar. Sıvı banyo sıcaklığı, banyo sıcaklığına, T'_{ls} ulaşılncaya kadar yükselir. Daha sonra, C ve D vanaları açılır ve deşarj prosesi başlar. C vanasından sabit kütleli debili soğuk hava geçer ve ısı değiştiricisine girer, sıvı banyosundan enerjiyi çekerek sistemi D vanasından tesk eder. Bu deşarj prosesi, banyo sıcaklığı, depolama prosesinin başlangıcındaki değerine, T_{ii} ulaşılncaya kadar devam eder. Böylece bir çevrim tamamlanmış olur.

Tersinmezlik Sayısı

1. İkinci kanun veriminin veya minimum tersinmezliğin hangi işletim şartlarında elde edildiği bilgisi, güç üretimi için kullanılan farklı türlerdeki ısı enerji depolama sistemlerinin optimizasyonu için temel teşkil etmektedir.
2. Bir ısı enerji depolama sistemindeki ikinci kanun veriminin maksimize edilmesi veya tersinmezliklerin minimize edilmesi, kaskat sistemin tersinmezlik sayısının minimizasyonu ile mümkündür. Tersinmezlik sayısı, Tersinmezliğin sisteme sağlanan toplam ekserjiye oranıdır ve N' ile gösterilmiştir. $N' = I / (E_{gis} + E_{gir} + E_{QH})$

Optimum Depolama Süresi

Sistemin tersinmezlik sayısının 5 farklı bileşeni mevcuttur;

- (a) depolama prosesi tersinmezliği, $N'_{s,\Delta T}$
- (b) Deşarj gazı ile atmosfer havasının arasındaki ısı transferi sonucu oluşan tersinmezlik, N'_Q
- (c) Elektriksel direnç ile depolama sıvısı arasındaki ısı transferi sonucu oluşan tersinmezlik, N'_{QH}
- (d) Deşarj prosesi tersinmezliği, $N'_{r,\Delta T}$
- (e) Basınç farkı sebebiyle oluşan tersinmezlik, $N'_{\Delta P}$

Bizi ilgilendiren termodinamik optimum, verilen ısı enerji depolama sisteminin minimum tersinmezlikle işletimini sağlayan işletim parametresi, optimum depolama süresidir. Kaskat sistemin optimum depolama süresi, $\theta'_{s,opt}$ aşağıdaki türev sonucu elde edilir;

$$\left(\frac{\partial N'}{\partial \theta'_s} \right)_{\tau_s, \tau_H, \bar{G}, NTU, NTU_H, \dot{m}_t, \dot{m}_s} = 0$$

Isıl enerji depolama sisteminin optimum depolama süresi, $\theta_{s,opt}$ aşağıdaki türev sonucu elde edilir,

$$\left(\frac{\partial N}{\partial \theta_s} \right)_{\tau_s, \bar{G}, NTU, \dot{m}_r / \dot{m}_s} = 0$$

Minimum Tersinmezlik Sayısı için Optimizasyon Sonuçları Tablo-1'de sunulmuştur.

Tablo 1

1-9 Sistemleri için Optimizasyon Sonuçları

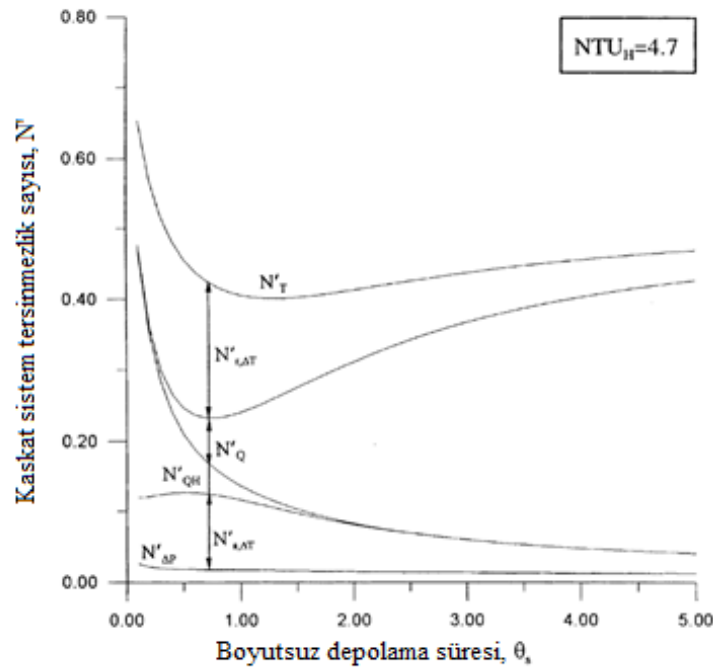
($\tau_s = 1.0$, $\tau_r = 0.0$, $\tau_H = 1.0$)

Variable	System								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
\dot{m}_r / \dot{m}_s	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
\bar{G}	0.005	0.005	0.005	0.05	0.05	0.05	0.5	0.5	0.5
ε	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1
$\theta_{s,opt}$	1.050	0.9522	0.8313	1.069	0.966	0.8432	1.449	1.260	1.089
$\theta'_{s,opt}$	2.090	1.8568	1.5795	2.1273	1.8837	1.6021	2.8835	2.457	2.0691
θ_r	9.410	6.0304	4.4415	9.4585	6.0637	4.4701	10.4926	6.7862	5.0639
θ'_r	10.460	6.9454	5.1993	10.5277	6.9918	5.2386	11.9374	7.9934	6.0536
NTU_{opt}	10.09	10.80	10.00	5.555	5.687	5.744	2.6550	2.796	2.8660
NTU_H	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
P_{gis}/P_0	1.0004	1.0004	1.0004	1.0216	1.0221	1.0224	1.6430	1.6673	1.6792
P_{gir}/P_0	1.0001	1.0001	1.0001	1.0032	1.0032	1.0033	1.1338	1.1401	1.1432
N_T	0.7399	0.7309	0.7208	0.7490	0.7394	0.7292	0.8800	0.8615	0.8503
$N_{\Delta P}$	5.869-	5.528-	4.855-	0.0305	0.0276	0.0264	0.4576	0.4265	0.4135
	E-4	E-4	E-4						
$N_{s,\Delta T}$	0.3072	0.2955	0.2815	0.2946	0.2851	0.2720	0.1357	0.1420	0.1402
$N_{r,\Delta T}$	0.207	0.2150	0.2237	0.2001	0.2086	0.2173	0.1055	0.1165	0.1243
N_Q	0.2252	0.2199	0.2152	0.2238	0.2182	0.2135	0.1812	0.1766	0.1723
N'_T	0.3723	0.3754	0.3799	0.3789	0.3811	0.3855	0.4911	0.4777	0.4778
$N'_{\Delta P}$	2.943-	2.828-	2.549-	0.0154	0.0142	0.0139	0.2551	0.2362	0.2321
	E-4	E-4	E-4						
$N'_{s,\Delta T}$	0.1539	0.1511	0.1477	0.1485	0.1463	0.1432	0.0756	0.0786	0.0786
$N'_{r,\Delta T}$	0.1047	0.1109	0.1183	0.1017	0.1080	0.1153	0.0593	0.0650	0.0703
N'_Q	0.1129	0.1124	0.1129	0.1128	0.1120	0.1124	0.1009	0.0977	0.0966
N'_{QH}	5.798-	6.444-	7.287-	5.472-	6.1478-	6.973-	1.841-	2.403-	2.945-
	E-4	E-4	E-4	E-4	E-4	E-4	E-4	E-4	E-4

Tablo 1'de 9 farklı işletim durumu için gerçekleştirilen ekserji analizi sonucunda elde edilen toplam tersinmezlik sayısı ve tersinmezliğe etki eden bileşenlerin değerleri sunulmuştur. Toplam tersinmezlik sayısının 5 farklı ($N'_{s,\Delta T}$, N'_Q , N'_{QH} , $N'_{r,\Delta T}$, $N'_{\Delta P}$) bileşen değerleri de bu tabloda listelenmiştir. Optimizasyon sonucunda, sadece sıcak havanın enerjisi kullanılarak elde edilen optimum depolama süresi, $\theta_{s,opt}$ ile hem sıcak hava enerjisinin hem de elektrik enerjisinin kullanıldığı kaskat sistemin optimum depolama süresi, $\theta'_{s,opt}$ ve ısı değiştiricisinin boyutunu temsil eden optimum transfer ünite sayısı, NTU_{opt} farklı işletim şartları için elde edilmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1'de elde edilen değerler kullanılarak elde edilen kaskat sistemin tersinmezlik sayısı ile boyutsuz depolama süresinin değişimi Şekil 2'de sunulmuştur. Minimum Tersinmezlik sayısı için optimum işletim noktası Şekil-2 üzerinde görülmektedir.

Tablo 2'de ise 9 farklı işletim durumu için optimum depolama süreleri ve bu sürelerle karşılık gelen depolama ve kaskat depolama sistemi için depolama, deşarj ve genel birinci ($\eta_{IS}, \eta'_{IS}, \eta_{IR}, \eta'_{IR}, \eta_I, \eta'_I$) ve ikinci kanun verimleri ($\eta_{II}, \eta'_{II}, \eta_{IIR}, \eta'_{IIR}, \eta_{II}, \eta'_{II}$) hesaplanmış ve listelenmiştir.

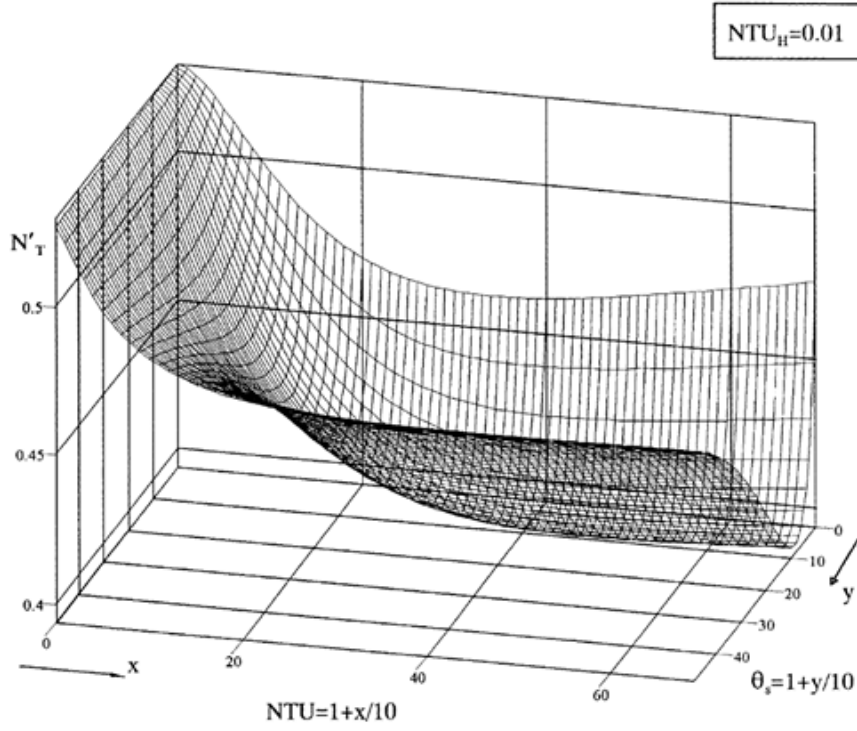


Şekil 2. Kaskat sistemin tersinmezlik sayının boyutsuz depolama süresi değişimi

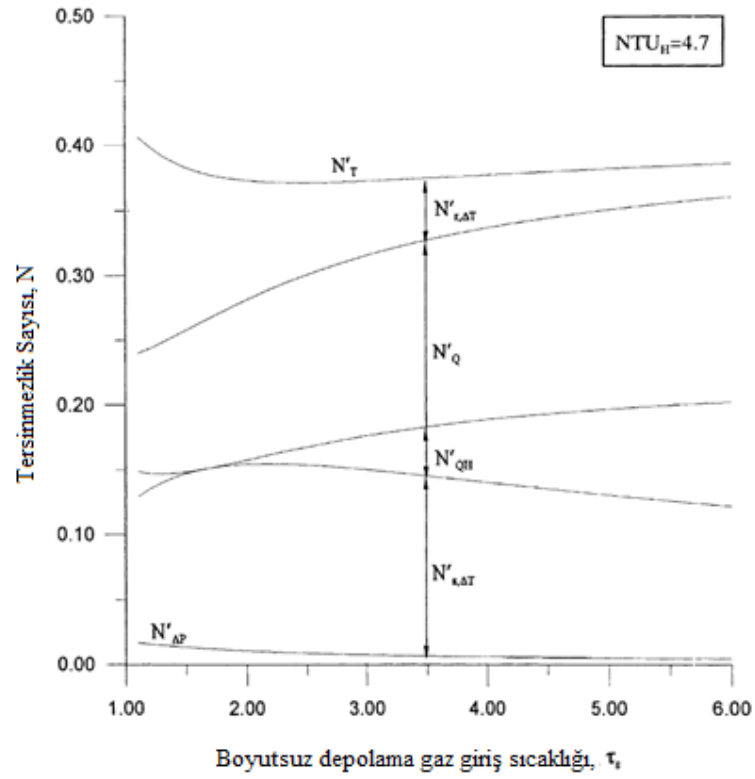
Maksimum birinci ve ikinci Kanun Verimi için Optimizasyon Sonuçları Tablo-2’de sunulmuştur

Tablo 2
1-9 Sistemleri için Optimizasyon Sonuçları ($\tau_s = 1.0$, $\tau_r = 0.0$, $\tau_H = 1.0$)

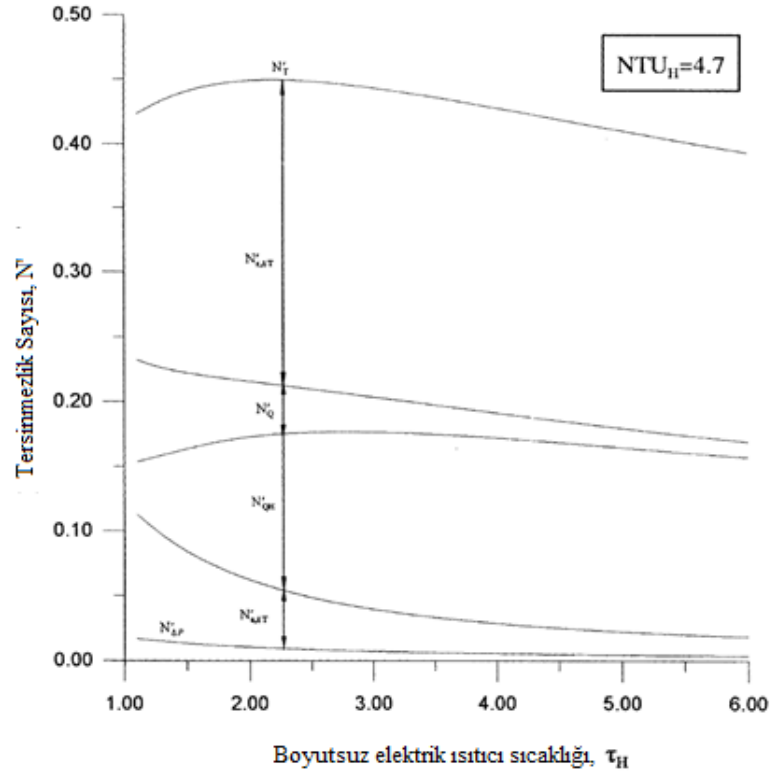
Variable	System								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
\dot{m}_r/\dot{m}_s	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
G	0.005	0.005	0.005	0.05	0.05	0.05	0.5	0.5	0.5
ε	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1
$\theta_{s,opt}$	1.050	0.9522	0.8313	1.069	0.966	0.8432	1.449	1.260	1.089
$\theta'_{s,opt}$	2.090	1.8568	1.5795	2.1273	1.8837	1.6021	2.8835	2.457	2.0691
θ_r	9.410	6.0304	4.4415	9.4585	6.0637	4.4701	10.4926	6.7862	5.0639
θ'_r	10.460	6.9454	5.1993	10.5277	6.9918	5.2386	11.9374	7.9934	6.0536
NTU_{opt}	10.09	10.80	10.00	5.555	5.687	5.744	2.6550	2.796	2.8660
NTU_H	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
P_{gis}/P_0	1.0004	1.0004	1.0004	1.0216	1.0221	1.0224	1.6430	1.6673	1.6792
P_{gir}/P_0	1.0001	1.0001	1.0001	1.0032	1.0032	1.0033	1.1338	1.1401	1.1432
$\eta_{1,s}$	0.65	0.6141	0.5645	0.6552	0.6181	0.5685	0.7400	0.6937	0.6419
$\eta_{1,r}$	0.0649	0.2176	0.3553	0.0646	0.2167	0.3539	0.0588	0.2012	0.3312
η_1	0.0422	0.1336	0.2006	0.0423	0.1340	0.2012	0.0435	0.1396	0.2126
$\eta'_{1,s}$	0.6537	0.6176	0.5677	0.6589	0.6216	0.5718	0.7437	0.6973	0.6454
$\eta'_{1,r}$	0.0647	0.2168	0.3542	0.0643	0.2159	0.3529	0.0586	0.2005	0.3302
η'_1	0.0423	0.1339	0.2011	0.0424	0.1342	0.2018	0.0436	0.1398	0.2131
$\eta_{11,s}$	0.4673	0.4843	0.5030	0.4622	0.4769	0.4944	0.4301	0.4085	0.4053
$\eta_{11,r}$	0.7928	0.7848	0.7762	0.7887	0.7837	0.7764	0.6899	0.7300	0.7443
η_{11}	0.2601	0.2691	0.2792	0.2510	0.2606	0.2708	0.1200	0.1385	0.1497
$\eta'_{11,s}$	0.7324	0.7356	0.7385	0.7284	0.7309	0.7332	0.6823	0.6724	0.6662
$\eta'_{11,r}$	0.8952	0.8890	0.8816	0.8926	0.8880	0.8813	0.8266	0.8499	0.8559
η'_{11}	0.6277	0.6246	0.6201	0.6211	0.6189	0.6145	0.5089	0.5223	0.5222



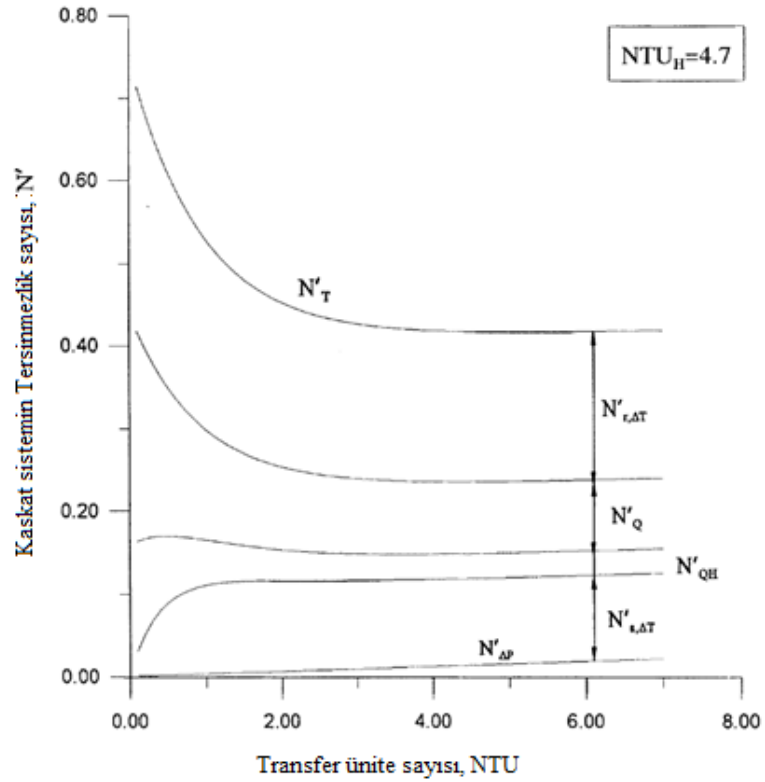
Şekil 3. Tersinmezlik sayısının, boyutsuz depolama süresi, N'_T ve transfer ünite sayısı, NTU ile değişimi



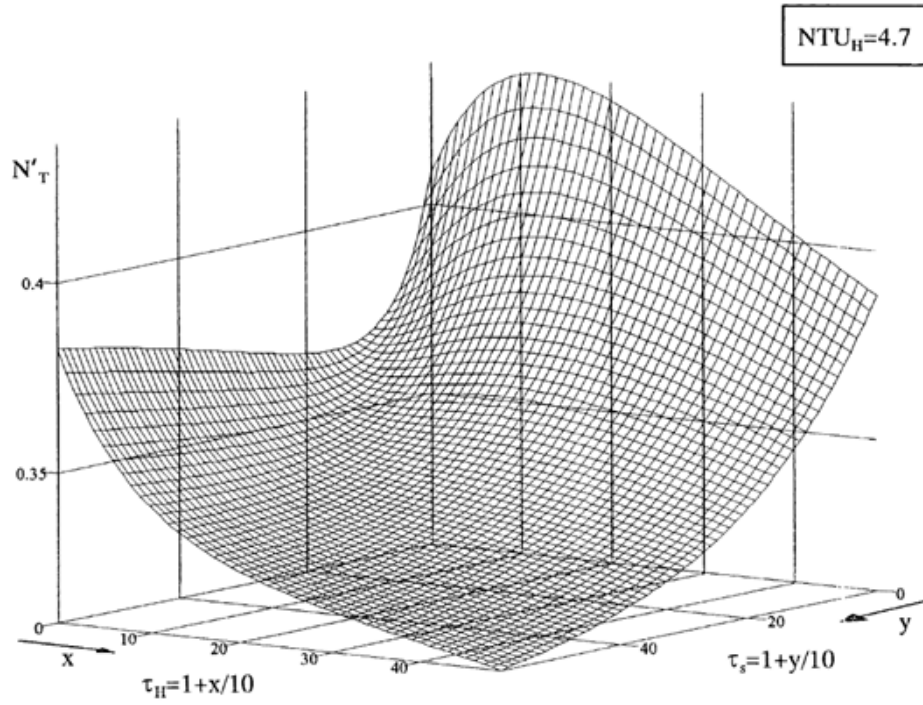
Şekil 4. Tersinmezlik Sayısının boyutsuz depolama gaz giriş sıcaklığı ile değişimi



Şekil 5. Tersinmezlik sayısının, boyutsuz elektrik ısıtıcı ile değişimi



Şekil 6. Kaskat sistemin tersinmezlik sayısı ile transfer ünite sayısının değişimi



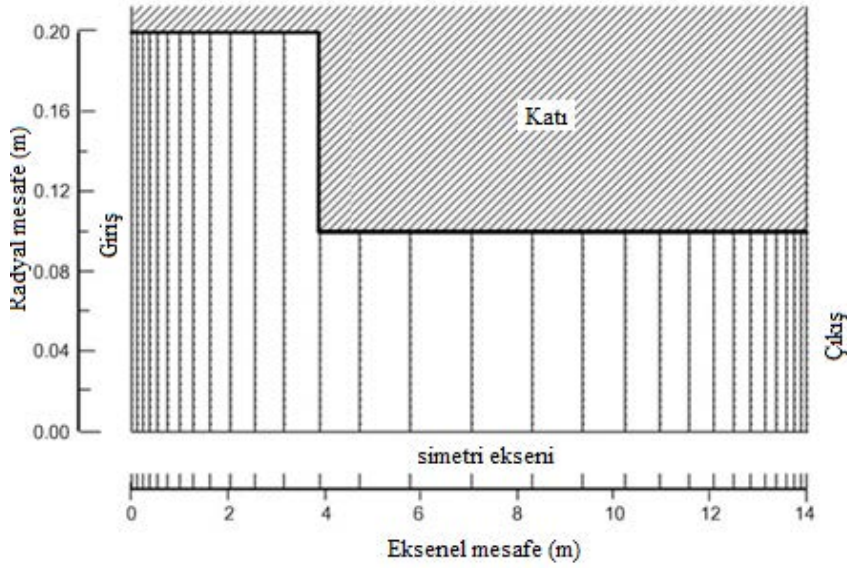
Şekil 7. Tersinmezlik sayısı ile boyutsuz gaz depolama giriş sıcaklığı ve boyutsuz elektrik sıcaklığının değişimi

VAKA (A) SONUÇLAR

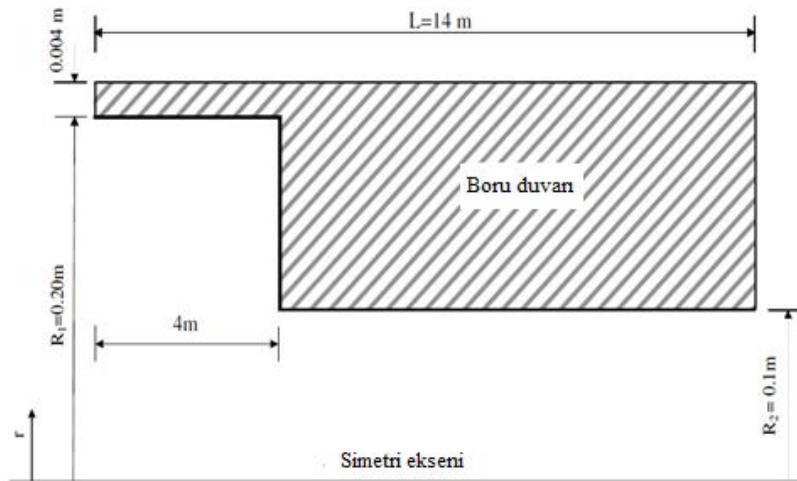
- Bu çalışma sonucunda, sadece depolama prosesi modifiye edilerek ısı enerji depolama sisteminin ikinci kanun verimini artırmanın mümkün olduğu anlaşılmıştır.
- Sistemin modifikasyonu için yapılan küçük bir yatırım, bir tek enerji kaynağına sahip ısı enerji depolama sistemi ile karşılaştırıldığında, 2.3 kat daha fazla ikinci kanun verimi ile sonuçlanmıştır.
- En önemli tersinmezlik kaynaklarının, deşarj gazı ile atmosfer arasındaki ısı transferi ve sıvı banyosu ile gaz arasındaki sıcaklık farkı ile ilgili olduğu anlaşılmıştır.
- Atmosfere olan gaz deşarjı ile ilgili tersinmezliği azaltmak veya üstesinden gelmek için ısı enerji depolama sistemleri seri olarak birbirine bağlanmalıdır.
- Diğer bir önemli tersinmezlik kaynağı, elektrikli ısıtıcının sıcaklığını depolama prosesinin başlangıcındaki gaz sıcaklığından daha fazla artırarak giderilebilir.
- Bununla birlikte, elektrikli ısıtıcının sıcaklığındaki artış, kaskat sistemin birinci kanun veriminde bir düşüşe sebep olacaktır.
- Elektrikli ısıtıcı devreye alınarak, yatırım maliyetinde, depolama gaz miktarında ve sistem boyutunda makul tasarruf elde edilir.
- En verimli işletim şartlarında, optimum depolama süresinde, Enerji depolama ünitesi, yüksek sıcaklıklı kaynaklar tarafından sağlanan ekserjinin %36'sını yok eder.
- Depolama ve deşarj proseslerindeki ekserji yıkımı, sırasıyla %24 ve %10'dur. Sonuç olarak ekserjinin banyodan deşarjı depolanmasından daha verimli olarak gerçekleştirilir.

B. “Boru bağlantılarının ani daralması süresince akışın sebep olduğu entropi üretimi” [8]

Bu çalışmada, farklı akış yukarı Reynolds sayıları için, vizkoz yutum sonucu oluşan entropi üretimi hesaplanmış ve akış alanının simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Isı transferinin entropi üretimine etkisini engellemek amacıyla akış izotermal olarak ele alınmıştır. Akış yönetici denklemlerinin ayrıklaştırılmasında “kontrol hacim” yaklaşımı kullanılmıştır. Ağdan bağımsız çözüm elde etmek için, ağdan bağımsızlık testleri gerçekleştirilmiştir. Daralma düzlemi boyunca, simetri eksenini üzerinde, aksel hızın beklenenden fazla olduğu tespit edilmiştir. Entropi üretim hızının, Reynolds sayısının artmasıyla arttığı belirlenmiştir. Maksimum entropi üretim hızının konumu, bu çalışmada ele alınan tüm Reynolds sayıları için hemen hemen aynı yerde çıkmıştır.



Şekil 8. Çözüm bölgesindeki ve sınırlardaki düğümlerin dağılımı



Şekil 9. Boru daralmasının taslak geometri ve ölçüler

Akış ve enerji denklemleri

Sabit dönmenin olduğu kararlı akış alanını yöneten kısmi diferansiyel denklemler seti, 2 boyutlu (r,z) silindirik koordinatlarda aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\rho W \phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho r V \phi - \Gamma_{\phi} r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_{\phi} \quad (1)$$

Tablo 3. Değişkenler ve korunum denklemleri

Korunumu	ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
Kütle	1	0	0
Eksenel momentum	W	μ	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_e \frac{\partial V}{\partial z})$
Radyal momentum	V	μ	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} (\mu \frac{\partial W}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu \frac{\partial V}{\partial r}) - 2\mu \frac{V}{r^2}$

Entropi, tersinmezlik ve ısı transfer analizi

Sıkıştırılmaz Newtonian akışkan için birim hacimdeki yerel entropi üretimi aşağıdaki gibi verilir;

$$S''_{gen} = \frac{k}{T^2} (\nabla T)^2 + \frac{\mu}{T} \Phi \quad (3)$$

Bu denklemdeki ilk terim izotermal akışın sebep olduğu ısı transferi ile ilgili birim hacimdeki entropi üretimi,

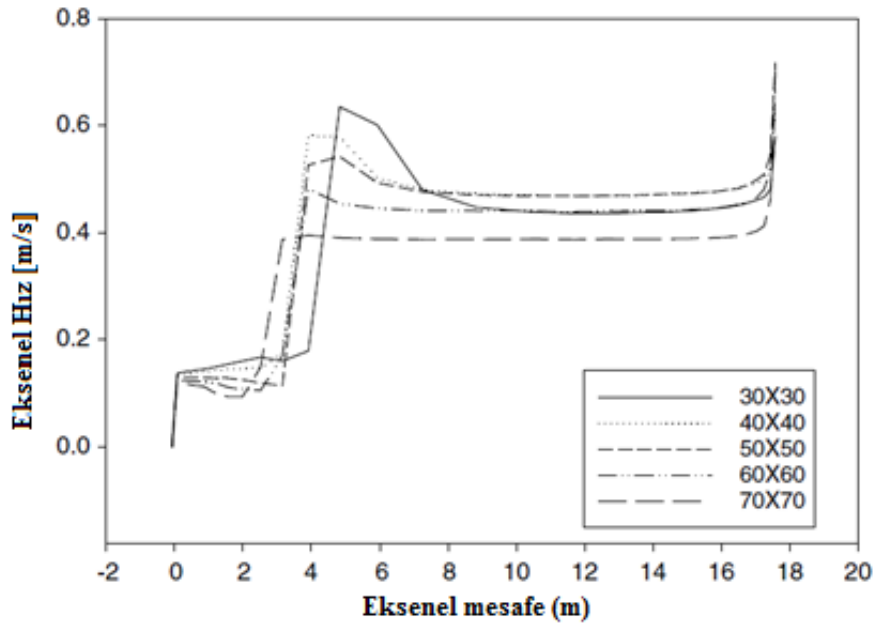
$$(S''_{gen})_{cond} = k/T^2 (\nabla T)^2 = 0$$

İkinci terim ise sürtünmenin sebep olduğu birim hacimdeki entropi üretimidir.

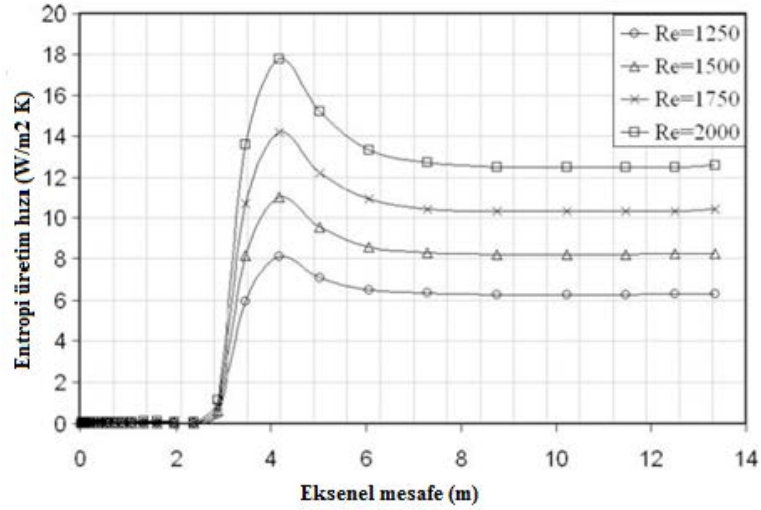
$$(S''_{gen})_{fric} = (\mu/T) \Phi$$

Burada geçen Φ terimi viskoz yutum fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

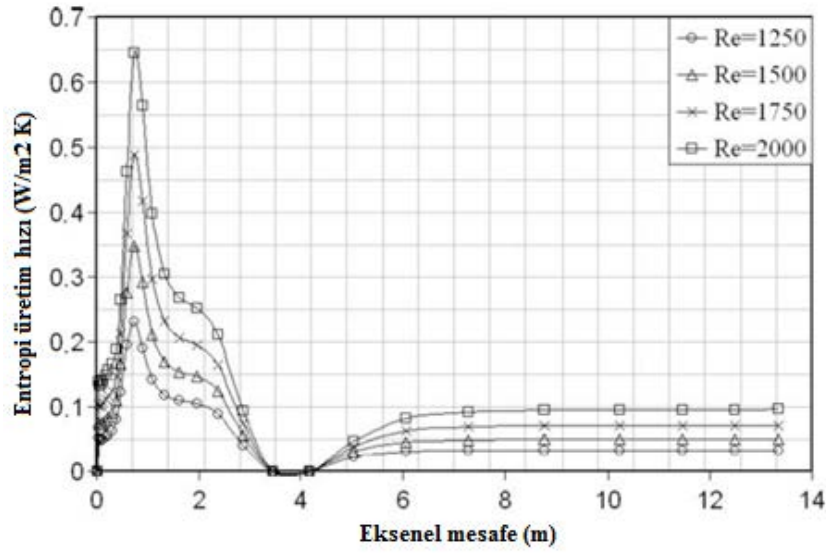
$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{V}{r} \right)^2 \right] + \frac{\partial W}{\partial r} \quad (4)$$



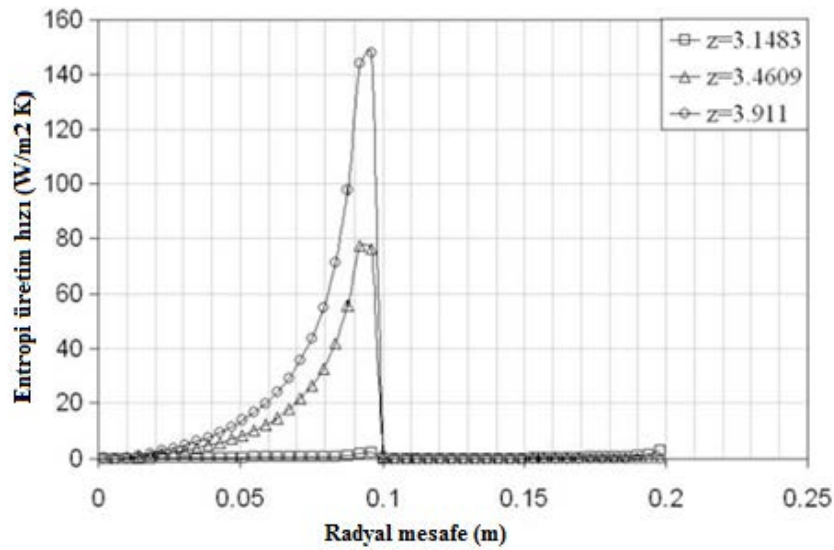
Şekil 10. Farklı düğüm sayıları (30x30, 40x40, 50x50, 60x60 ve 70x70) için borunun merkezindeki aksel hız için Ağdan bağımsızlık testleri



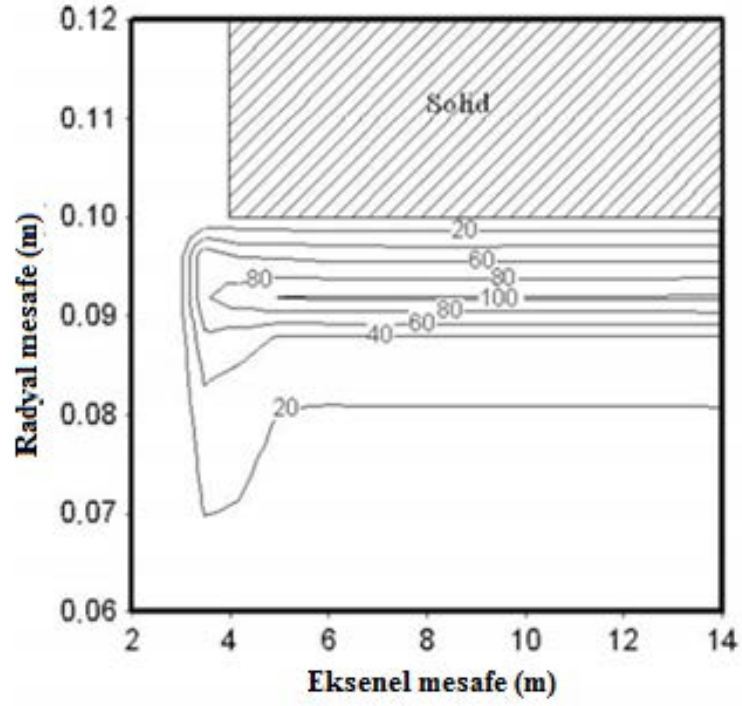
Şekil 11. Farklı Reynolds sayıları için $r = (1/3) R2$ mesafesinde eksen boyunca entropi üretim hızı



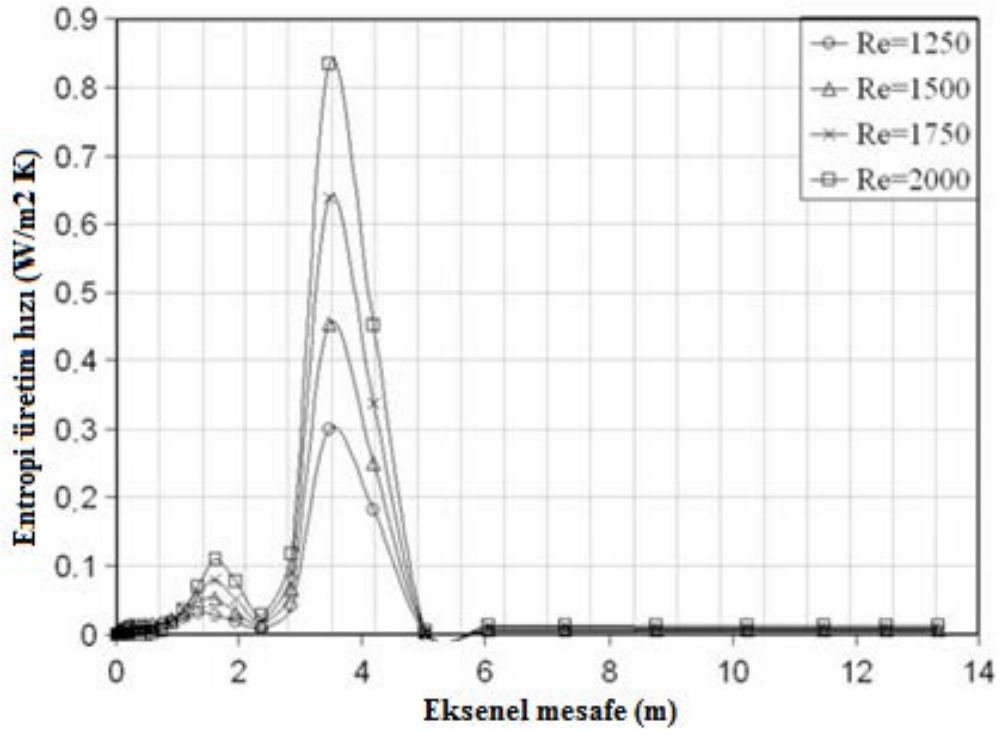
Şekil 12. Farklı Reynolds sayıları için $r = R2$ 'de eksen boyunca entropi üretim hızı



Şekil 13. $Re = 1250$ için farklı eksenel konumlarda radyal boyunca entropi üretim hızı



Şekil 14. $Re = 1250$ için entropi üretim hızının kontur çizimi ($r = 0$ simetri eksen)



Şekil 15. Farklı Reynolds sayıları için $r = 0$ 'da eksen boyunca entropi üretim hızı

VAKA (B) SONUÇLAR

- Ani boru daralması sonucu akış alanındaki entropi üretimi incelenmiştir.
- Entropi üretim hızı üzerine akış yukarı hızının etkisini sınamak için, farklı Reynolds sayıları simülasyona dahil edilmiştir.
- Akış yönetici denklemlerini ayırklaştırmak için kontrol hacim yaklaşımı kullanılmıştır.
- Eksenel yöndeki basınç gradyenindeki değişim sonucu daralma düzlemi civarında eksenel hız beklenenden fazla tespit edilmiştir.
- Daralma düzleminden hemen sonra oluşan ani yüksek akışkan gerinme hızları sebebiyle entropi üretim hızı, artan Reynolds sayısı ile artmaktadır.
- Entropi üretimi, simetri eksenini boyunca eksenel yönde kademeli olarak azalmadan önce artarak iki ardışık zirve yapar
- Basınç gradyeninin radyal yöndeki değişimi sonucu olarak, radyal konum simetri ekseninden uzaklaştıkça, entropi üretim hızının ilk zirvesi küçülür.
- Akış sisteminin işletim şartlarını değiştirerek basınç kayıpları azaltılabilir. Bu durumda, basınç kayıplarını azaltmanın etkin yöntemlerinden biri Reynolds sayısını düşürmektir.
- Dahası, akış sistemindeki viskoz kayıplar, sistemdeki entropi üretimi ile ilişkilendirilebilirler.
- Sonuç olarak, tasarım aşamasında, ani daralmalara sahip borulama sisteminin kullanılmasından mümkün olduğu kadar kaçınılmalıdır ve ani daralmalardan kaçınmanın mümkün olmadığı durumlarda ise düşük Reynolds sayılarında sistemin işletilmesi tavsiye edilir.
- Daralma düzleminden sonra yüksek entropi üretim hızına sebep olan hız aşımını elimine ederek tasarım aşamasında, alternative bir çözüm üretilebilir.
- Bu, daralmış borunun duvarına ve daralma düzleminin yan duvarına küçük delikler açarak ve daha sonra bu delikleri birbirine herhangi bir araçla bağlayarak, akışı akış aşağısına yönlendirerek mümkün olabilir.
- Bunun yanı sıra, maliyet, hangi metodun seçileceği ve hangi işletim şartının devreye alınacağına bağlı olan bir belirleme faktörüdür.
- Bu yüzden, entropi üretiminin tasarım safhasından önce tahmin edilmesi bir gerekliliktir.

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

1. Ekserji tabanlı optimizasyon yöntemi ile işletim parametrelerini (parametrik optimizasyon) ve tasarım parametrelerini (yapısal optimizasyon) optimize etmenin mümkün olduğu anlaşılmaktadır.
2. Akış problemlerinde, ekserji tabanlı optimizasyonun, diğer optimizasyon yöntemlerine göre daha faydalı sonuçlar ürettiği söylenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Rant Z. Energy value and pricing. Strojniški vestnik-J Mech Eng 1955;1:4–7.
- [2] Gaggioli RA, Paulus DM. Available energy – Part II: Gibbs extended. J Energy Res Technol 2002;124:110–5
- [3] Gaggioli RA, Richardson DH, Bowman AJ. Available energy – Part I: Gibbs revisited. J Energy Resour Technol – Trans ASME 2002;124:105–9.
- [4] Sciubba E, Wall G. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. Int J Thermodyn 2010;10:1–26.
- [5] Rocco MV, Colombo, E, Sciubba, E, Advances in exergy analysis: a novel assessment of the Extended Exergy Accounting Method, Applied Energy, 2014; 113: 1405-1420.
- [6] Romeo, JC and Linares, P, Exergy as a global energy sustainability indicator. A review of the state of the art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014; 33: 427-442.
- [7] Biyikoglu, A. "Optimization of a sensible heat cascade energy storage by lumped model," Energy Conversion and Management 43 (2002) 617-637.
- [8] Biyikoglu, A. "Entropy generation due to flow across the abrupt contraction of pipe joints," Applied Thermal Engineering 29 (2009) 841-847.

ÖZGEÇMİŞ

Atilla BIYIKOĞLU

Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1989 yılında lisans derecesi aldı. 1992 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden Yüksek Lisans derecesi ve 1998 yılında Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden doktora derecesi aldı. 2003-2007 Yılları arasında Yardımcı Doçent, 2007-2013 yılları arasında Doçent olarak Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde görev yaptı. 2013-2017 yılları arasında Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölüm Başkanlığı görevini yürüttü. 2013 yılından bu yana Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Profesör olarak görev yapmaktadır.

Gazi Üniversitesi Temiz Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TEMENAR)'nin kurucuları arasındadır ve Yönetim Kurulu üyesidir. 2018 yılından beri Türk Isı Bilimi ve Tekniği Derneği (TIBTD) Yönetim Kurulu Başkanı olarak görev yapmaktadır. ASHRAE Turkish Chapter kurucuları arasındadır. Termodinamik kanunların uygulamaları, entropi üretimi, yanma, reaktif akışlar, yakıt hücreleri, bor üretimi, doğal taşınım, soğutma sistemleri ve kömür gazlaştırması alanlarında çalışmaları bulunmaktadır.