

Bir Gaz Temizleme Prosesinde Isı Değiştiricilerin Darboğaz Yöntemi ile Verimlilik Analizi

Ersin ÜRESİN^{1*} 

¹TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, Türkiye

Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: ersin.uresin@tubitak.gov.tr

Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received: 27.04.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 18.11.2024

Öz

Endüstriyel proseslerde enerji tüketiminin en aza indirilmesi bakımından ısı değiştiricilerin verimli kullanılması oldukça önemlidir. Bu durum, çevre kalitesini artırmanın yanı sıra, endüstride finansal güvenliği ve maliyet bakımından kazancı olumlu yönden etkilemektedir. Darboğaz analizi işletme koşullarının optimizasyonu ile endüstriyel proseslerde enerji tüketimini azaltmak için kullanılabilen bir yöntemdir. Bu çalışmada, ısı değiştiricilerin mevcut işletme şartlarında değişiklik yapılmasının verime olan etkisi, darboğaz yöntemi ile analiz edilmiştir. Mevcut ısı değiştirici prosesinde en yüksek verim %95,75 olarak elde edilmiştir. İşletme şartları sıcaklık ve debi bakımından değiştirilerek verim etkileri incelenmiştir. Proseste sıcaklık farklarının 10 °C, 20 °C ve 25 °C yükseltilerek değiştirildiği çalışmalarda, verimin mevcut durumdaki verime göre %14 oranında azaldığı belirlenmiştir. Debi değerinin %5, %10 ve %20 azaltılarak değiştirildiği çalışmalarda ise, verimin mevcut durumdaki verime göre %1 oranında arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Darboğaz yöntemi, Endüstriyel prosesler, Isı değiştiriciler, Darboğaz noktası, Isı entegrasyonu

Efficiency Analysis of Heat Exchangers In A Gas Cleaning Process By Pinch Analysis

Abstract

In industrial processes, efficient use of heat exchangers is very important in terms of minimizing energy consumption. In addition to increasing environmental quality, this situation positively affects financial security and cost gain in the industry. Pinch analysis is a method that can be used to reduce energy consumption in industrial processes by optimizing operating conditions. In this study, the effect of making changes in the current operating conditions of heat exchangers on efficiency was analyzed with the pinch analysis. The highest efficiency was obtained as 95.75% in the current heat exchanger process. The efficiency effects were examined by changing the operating conditions in terms of temperature and flow rate. In the studies where the temperature differences in the process were changed by increasing them by 10 °C, 20 °C and 25 °C, it was determined that the efficiency decreased by 14% compared to the current efficiency. In the studies where the flow rate was changed by decreasing them by 5%, 10% and 20%, it was determined that the efficiency increased by 1% compared to the current efficiency.

Keywords: Pinch analysis, Industrial processes, Heat exchangers, Pinch point, Heat integration

Cite as;

Üresin, E. (2025). Bir Gaz Temizleme Prosesinde Isı Değiştiricilerin Darboğaz Yöntemi ile Verimlilik Analizi. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6 (1), 32-50. Doi: 10.53501/rteufemud.1471516

1. Giriş

Termal enerji genellikle toplam enerji talebinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle, enerji verimliliğini artırmak için proses içi ısı geri kazanımını sağlamak oldukça önemlidir. Proses ısısının çoklu kullanımıyla ve/veya yeniden kullanımıyla tesislerde enerji maliyetleri azaltılabilmektedir.

Proses entegrasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılmakta olan darboğaz analizi genel olarak enerji tesislerinde, enerji kullanımını hedeflemede ve optimize etmede oldukça etkilidir. Yöntem %20'den %40'a kadar enerji tasarrufu sağlayabilmektedir (Hamsani vd., 2018). Darboğaz yönteminde, termodinamik olarak uygulanabilir enerji hedefleri (veya minimum enerji tüketimi) hesaplanarak ve ısı geri kazanım sistemleri, enerji besleme yöntemleri ve proses çalışma koşulları optimize edilerek proseslerin enerji tüketimi en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Proses akımlarının sayısı ve ısı kapasitesi akış hızı göz önünde bulundurularak optimum ısı ağları elde edilmektedir.

Bu çalışmada, endüstriyel tesisler için darboğaz yöntemine dayalı verimlilik analizi üzerine odaklanılmıştır. Darboğaz yöntemi ile ilgili birçok çalışma yapılmış olup, bu çalışmalardan bazıları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Endüstriyel bir etilen prosesinin enerji entegrasyonunun ve verimliliğinin geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmada, termal kaynaklardaki ekserji kayıplarını azaltmak için soğuk ve sıcak akımlar belirlenmiştir ve darboğaz analizi vasıtasıyla bu akımların değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde, ekserji kayıplarının azaltılması için ön ısıtma ve ön soğutma süreçlerinde, kompresörlerdeki ara soğutmada ve atık ısı geri kazanımında iyileştirmeler önerilmiştir (Ghannadzadeh ve Sadeqzadeh, 2017). Etanolün fermantasyon sıvılarından benzine katalitik dönüşüm yoluyla geri kazanılması işleminde enerji analizi yapmak, yeni bir ısı değiştirici ağı elde etmek ve işletme maliyetlerini azaltmak amacıyla darboğaz analizi kullanılmıştır. Sistemin kolonunda üst ürünün saflığı arttıkça enerji gereksinimlerinin de arttığı

görülmüştür. Daha büyük saflık istenildiğinde, etanol ve suyun ayrılması için daha fazla enerji girilmesi gerektiğinden dar boğaz analizi etkili bir yaklaşımla enerji tasarrufunda büyük rol aldığı değerlendirilmiştir (Khan ve Riverol, 2007).

Enerji verimliliğini artırmaya yönelik bir deniz aracının organik Rankine çevrimli (ORC) entegre atık ısı geri kazanım sisteminde en uygun ısı değiştirici ağını tasarlamak için darboğaz analizinin kullanıldığı bir çalışmada, darboğaz noktasının üzerindeki ısı yükü arttıkça, kullanılabilir atık ısı yüzdesinin de arttığı görülmüştür (Konur vd., 2020). Darboğaz analizinin kullanıldığı bir başka çalışmada, bir distilasyon ünitesinin ısı değiştirici ağının termal verimliliği değerlendirilmiştir. Isı değiştirici ağında gerçekleştirilebilecek iyileştirme ile sağlanabilecek enerji tasarrufunu belirlemek amaçlanmıştır. Mevcut 148,6 MW'lık kullanım yüküne kıyasla yaklaşık 67,5 MW maksimum soğutma ve ısıtma kullanımının muhtemelen geri kazanılabileceği elde edilmiştir (Mrayed vd., 2021). Bir petrol rafinesinde enerji tasarrufu için uygulanan darboğaz yöntemi ile mevcut şartlara göre %27'e varan potansiyel enerji tasarrufu elde edilebileceği görülmüştür (Alhajri vd., 2021).

Endüstriyel bir etil-benzen tesisinde ısı değiştirici ağının darboğaz yöntemi ile iyileştirildiği çalışmada, yıllık enerji maliyetinde %5,6 azalma kaydedilmiştir. Düşük sıcaklıkta atık ısının elektriğe dönüştürüldüğü bir organik Rankine çevrimde (ORC), darboğaz analizinin önemi ve uygulaması sunulmuştur. Atık ısı miktarının belirlenmesinin yanı sıra ORC için en uygun akımların belirlenerek kavramsal tasarımın geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır (Olsen vd., 2017). Darboğaz analizinin enerji verimliliğini yükseltmesi ve yakıt tüketimini en aza indirmesi düşüncesiyle gerçekleştirilen bir çalışmada ısı değiştirici ağının sentezlenmesiyle ve ısı entegrasyonunun kurulmasıyla %17'lik bir enerji tasarrufu sağlanabileceği kanıtlanmıştır (Gadalla, 2015).

Çeşitli potansiyel katkı maddelerinin ısı değiştiriciler üzerindeki etkilerinin araştırılması

için bir CO₂ tutma ve depolama sisteminde darboğaz analiz yöntemi uygulanmıştır ve gaz halindeki katkıların saf CO₂'ye eklenmesi, darboğaz noktasının daha düşük sıcaklıklara kaydırılmasında olumlu bir etki meydana getirdiği saptanmıştır (Ladislav vd., 2016). Darboğaz analizinin uygulandığı endüstriyel bir etilen glikol tesisinde, ısı değiştirici ağının iyileştirilmesi ile harici ısıtma kullanımının %93,3, harici soğutma kullanımının ise %45,5 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Ali vd., 2022). Benzer bir çalışma olarak, doğalgaz tesisinde darboğaz analizi vasıtasıyla revize edilen ısı değiştirici ağı sonucunda ısıtma ve soğutma kaynaklarının kullanımında sırasıyla %42 ve %21 tasarruf elde edilmiştir (Temtamy vd., 2010).

Plakalı ısı değiştiriciler için yapılan bir incelemede darboğaz analiz yöntemi kullanılmıştır ve yatırım maliyetinde %6,6 tasarruf edilebileceği vaka çalışmasıyla test edilmiştir. Darboğaz analizi kapsamında uyarlanan ısı değiştirici ağı ile proseste bazı durumlarda gövde borulu ısı değiştiricilerin yerine plakalı ısı değiştiricileri kullanılması yatırım maliyetini azalttığı görülmüştür (Wang vd., 2022). Kriyojenik enerji depolama sisteminin termodinamik analizinin yapıldığı bir çalışmada darboğaz noktaları belirlenmiştir ve proseste mevcut duruma göre sıcaklık farkındaki azalmanın verimlikte de azalmaya neden olduğu değerlendirilmiştir (Guizzi vd., 2015). Karbon emisyonun azaltılması için petrokimya tesisi için yapılan bir incelemede kullanılan darboğaz analizi yardımıyla optimizasyon yapılmıştır ve bunun neticesinde, enerji geri kazanımının %14,3'lük bir enerji geri kazanım oranıyla 202,71 GJ/h'ye ulaştığı gözlenmiştir. Yöntemin, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğinin artırılmasında, enerji zorluklarına bir çözüm sunduğu belirtilmiştir (Zhi vd., 2024). Darboğaz analizinin kullanıldığı diğer bir vaka çalışmasında, geri ödeme süresinde %8'lik bir iyileşme sağlanabileceği saptanmıştır (Yong vd., 2015). Isı değiştiricilerde, ısı ağının iyileştirilmesine yönelik alternatifli vaka analizlerin gerçekleştirildiği çalışmada darboğaz yöntemi kullanılmıştır ve 3800 kW enerji tasarrufu sağlandığı belirlenmiştir (Bonhivers vd.,

2019). Bir tekstil endüstrisi için önerilen atık su ısı geri kazanım sistemi, atık su ısı geri kazanım sistemi olmayan geleneksel tekstil endüstrisine kıyasla toplam yıllık maliyeti %43,07'ye kadar azalttığı darboğaz analiz yönteminin kullanılması ile belirlenmiştir. Bu durumun tekstil endüstrisinde ekonomik ve çevresel iyileştirmeleri kolaylaştırabileceği değerlendirilmiştir (Kim vd., 2022).

Literatür taramasında, farklı endüstriyel alanlarda genellikle enerji tasarrufu ve verimlilik artırmaya yönelik darboğaz analizinin kullanılarak etkinliğini belirleme çalışmaları yapıldığı görülmüştür (Pavao vd., 2020; Chen vd., 2018; Ruyck vd., 2003; Sarkar, 2018; Hamsani vd., 2018; Castrillon vd., 2018; Han vd., 2018; Miseviciute vd., 2018; Kong vd., 2017; Pejpichestakul ve Siemanond, 2013). Bu çalışmada, gazlaştırma prosesi sonrası elde edilen sentez gazının içerdiği katı (partiküller) ve gazlı kirlenimlerin (hidrojen sülfür, karbonil sülfür vb.) giderildiği gaz temizleme sisteminde yer alan ısı değiştirici grubunda, darboğaz yöntemi vasıtasıyla ısı entegrasyonunun kurularak verimlilik analizinin yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada, verim analizi için ısı entegrasyonunun kurulmasının yanında, ısı değiştiricilerde debi değişimlerinin ve giriş-çıkış sıcaklıklarındaki değişimlerin verimlilik üzerindeki etkisi araştırılmıştır ve sonuçları değerlendirilmiştir.

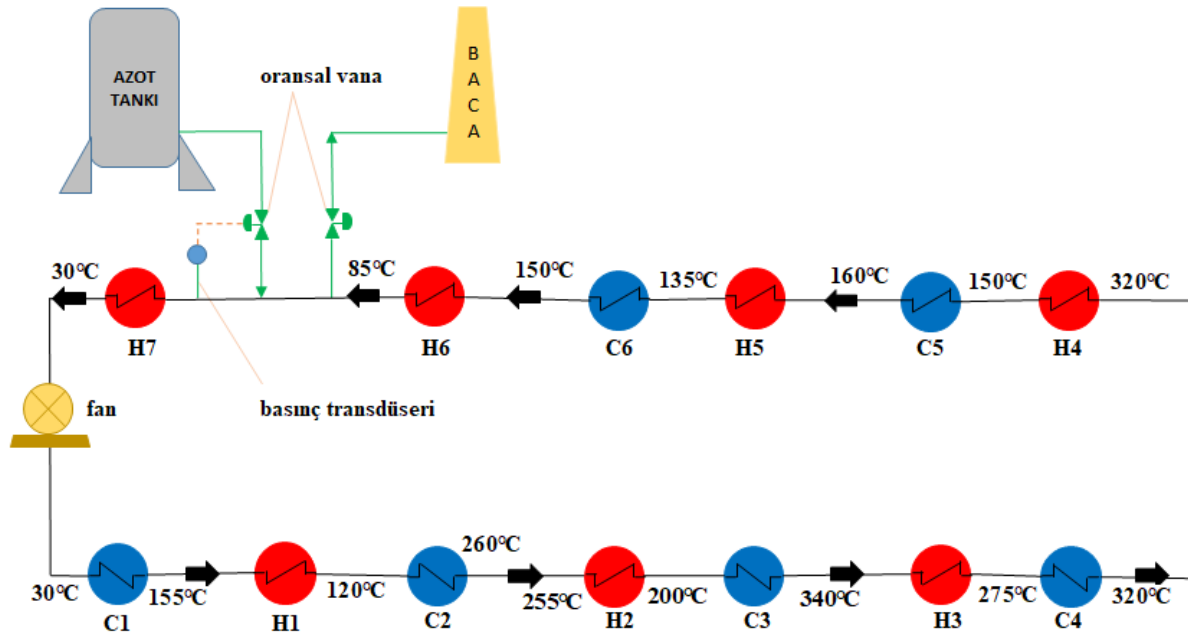
Darboğaz analizi, süreç mühendisliği alanında, özellikle endüstriyel sistemlerde enerji verimliliğini artırmak için kullanılan güçlü bir araç olduğu için, bu çalışmada bu yöntemin temel katkısı, enerji geri kazanım fırsatlarını belirlemek ve ısı entegrasyonunu optimize etmektir. Dolayısıyla, endüstriyel tesislerde enerji tüketimini azaltma gibi zorluklar için şu çerçevede önemli faydalar sağlamaktadır: i) enerji hedeflerinin belirlenmesi açısından, süreçlerin termal profillerini değerlendirerek, darboğaz analizi minimum enerji gereksinimlerini belirler ve enerji tasarrufları için gerçekçi hedefler koymaya yardımcı olmaktadır, ii) ısı değiştiricilerin optimize edilmesi bakımından, ısı değiştiricilerinin tasarımı ve yerleştirilmesini kolaylaştırarak, sıcak ve soğuk akışların etkin bir

(4) nolu bağıntıda η ; ısıtma ve soğutma yükleri için verim değerini (%) ifade etmektedir.

2.2. Sistem Tanıtımı

Isı değiştiricilerden oluşan sistemin akış şeması Şekil 2’de verilmektedir. Akış şemasına göre, ısı değiştiriciler proseste seramik filtreye, karbonil sülfür hidroliz ünitesine, karbondioksit tutma kolonlarına ve yıkama tankına destek sağlamaktadır. Sistem kapalı çevrim olarak

çalışmakta olup, akışkan olarak azot kullanılmaktadır. Azot debisi, sistemde yer alan oransal vana ile ayarlanmaktadır ve kayıplardan dolayı gerektiğinde sisteme dışarıdan azot takviyesi yapılmaktadır. Sistemde azot basıncı 2 bar değerinde sabit tutulmaya çalışılmaktadır. Azot basıncında azalma olduğu durumda basınç transdüseri ile haberleşmeli çalışan basınç kontrol vanası devreye girerek azot tankından sisteme azot tedarik etmektedir.



Şekil 2. Sistemin akış şeması

Figure 2. Flow chart of the system

Çalışmadaki vaka değerlendirmeleri sabit debide (500 kg/h) olacak şekilde $\Delta T=0$ °C (mevcut durum), $\Delta T=10$ °C, $\Delta T=20$ °C, $\Delta T=25$ °C giriş-çıkış sıcaklık farklarında ve mevcut giriş-çıkış sıcaklık değerleri sabit olacak şekilde, 400 kg/h, 450 kg/h, 475 kg/h, 500 kg/h değişken debilerde gerçekleştirilmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2’de sırasıyla değişken azot debilerine göre vaka parametreleri ve değişken sıcaklık farklarına göre vaka parametreleri özetlenmiştir

Verimlilik analizi için, sistemi oluşturan tüm ısı değiştiriciler için ısı değerleri hesaplanmıştır. Isıtma ve soğutma akımları sınıflandırılmış olup, sıcaklık farkları göz önünde bulundurularak darboğaz noktaları belirlenmiştir.

Proseste ısı kaynakları, elektrikli ısıtıcılardan ve

tüp-kabuk türü ısı değiştiricilerden oluşmaktadır. Isı değiştiricilerin tüp kısmından sentez gazı, kabuk kısmından ise ısıtıcılar tarafından ısıtılmış azot geçmektedir. Buna göre, ısı değiştiriciler vasıtasıyla sentez gazı ısıtılmaktadır ya da soğutulmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Darboğaz noktası, sıcak ve soğuk akışlar arasındaki sıcaklık farkının en az olduğu yerdir ve bu nokta, ısı geri kazanımı potansiyelini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Çalışmada, sıcaklık farkı değişimi, ısı değiştiriciler için verimlilik, sıcaklık farkı değişimi ve debi değişimi yönünden incelenmiştir. Darboğaz noktası, ısı değiştirici ağının tasarımında etken rol oynamaktadır.

Tablo 1. $\Delta T=0$ °C, değişken debilerde vaka parametreleri**Table 1.** $\Delta T=0$ °C, case parameters at variable flow rates

Isı Değiştirici	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Azot Debisi (kg/h)
1	155	120	
2	255	200	
3	340	275	
4	320	150	
5	160	135	
6	150	85	400
7	85	30	425
8	30	155	475
9	120	260	500
10	200	340	
11	275	320	
12	150	160	
13	135	160	

Tablo 2. $m= 500$ kg/h, değişken giriş-çıkış sıcaklıklarında vaka parametreleri**Table 2.** $m= 500$ kg/h, case parameters at variable inlet-outlet temperatures

Isı Değiştirici	$\Delta T = 0$ (°C)		$\Delta T = 10$ (°C)		$\Delta T = 20$ (°C)		$\Delta T = 25$ (°C)	
	T1 (°C)	T2 (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)
1	155	120	150	115	145	110	142,5	107,5
2	255	200	250	195	245	190	242,5	187,5
3	340	275	335	270	330	265	327,5	262,5
4	320	150	315	145	310	140	307,5	137,5
5	160	135	155	130	150	125	147,5	122,5
6	150	85	145	80	140	75	137,5	72,5
7	85	30	80	25	75	20	72,5	17,5
8	30	155	35	160	40	165	42,5	167,5
9	120	260	125	265	130	270	132,5	272,5
10	200	340	205	345	210	350	212,5	352,5
11	275	320	280	325	285	330	287,5	332,5
12	150	160	155	165	160	170	162,5	172,5
13	135	160	140	165	145	170	147,5	172,5
Azot debisi	500 kg/h							

Ayrıca sıcaklık farkı azaldıkça, yardımcı kaynakların ihtiyaçları değerlendirilmek amaçlanmıştır. Debinin artırılması veya azaltılması, ısı değiştirici sisteminde enerji geri kazanım potansiyelini etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, debi değişimleri sıcak akış ve soğuk akışların sıcaklık profillerini etkilemektedir. Bu profillerin nasıl değiştiğini

anlamak, darboğaz noktasının konumunu ve enerji geri kazanımının etkinliğini belirlemek açısından önemlidir. Debi değişiklikleri, sıcaklık profilini daha düzgün hale getirebilmektedir veya sıcaklık farklarını artırarak enerji tasarruflarını etkileyebilmektedir. Bu nedenle çalışmada debi değişimlerinin etkilerine de yer verilmiştir.

Çalışmada, sıcak ve soğuk akımların değerleri hesaplanarak toplam ısı yükü belirlenmiştir.

Elde edilen değerler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Akış değerleri ve ısı değerleri

Table 3. Flow values and temperature values

Akış Adı	Giriş sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Isı Kapasitesi Oranı (kW/K)	Isı Yükü (kW)	Akım Türü
H1	155	120	0,146	5,11	SICAK
H2	255	200	0,148	8,14	SICAK
H3	340	275	0,150	9,75	SICAK
H4	320	150	0,147	24,99	SICAK
H5	160	135	0,146	3,65	SICAK
H6	150	85	0,145	9,42	SICAK
H7	85	30	0,144	7,92	SICAK
C1	30	155	0,145	18,12	SOĞUK
C2	120	260	0,149	20,86	SOĞUK
C3	200	340	0,151	21,14	SOĞUK
C4	275	320	0,151	6,79	SOĞUK
C5	150	160	0,147	1,47	SOĞUK
C6	135	160	0,146	3,65	SOĞUK

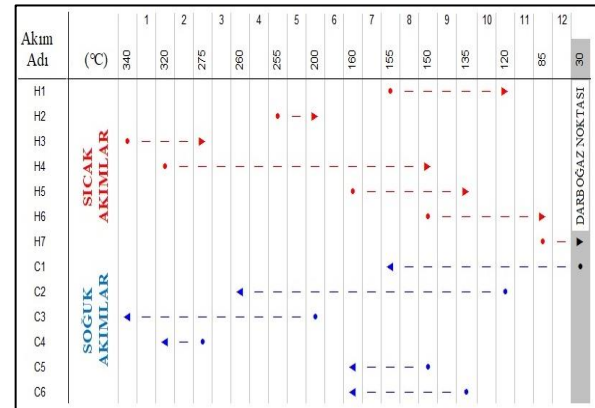
Tablo 3'te ısı akışı değerlerine göre, toplam soğutma kaynağı 68,98 kW, toplam ısıtma kaynağı ise 72,03 kW olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda, ihtiyaç duyulan ve artan ısı değerleri elde edilmiştir. Buna göre, darboğaz noktaları olan sıcaklık değerleri belirlenmiştir.

3.1 Sıcaklık Farkı Değişiminin Etkisi

Şekil 3'te 500 kg/h debi ve $\Delta T=0$ °C giriş-çıkış sıcaklık farkı için ısı değiştiricileri grid diyagramı verilmektedir. Farklı debi ve farklı giriş-çıkış sıcaklıklarındaki işletme şartlarında da buna benzer grid diyagramları oluşturularak ısı entegrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Grid diyagramları, darboğaz analizlerinin görselleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Grid diyagramları, süreçlerin enerji giriş ve çıkışlarını bir arada göstererek, ısı değişimlerinin daha etkili bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Bu diyagramlar, sıcaklık ve enerji akışlarının kesişim noktalarını belirlemeye yardımcı olmaktadır ve böylece enerji tasarrufu için potansiyel darboğaz noktaları tespit

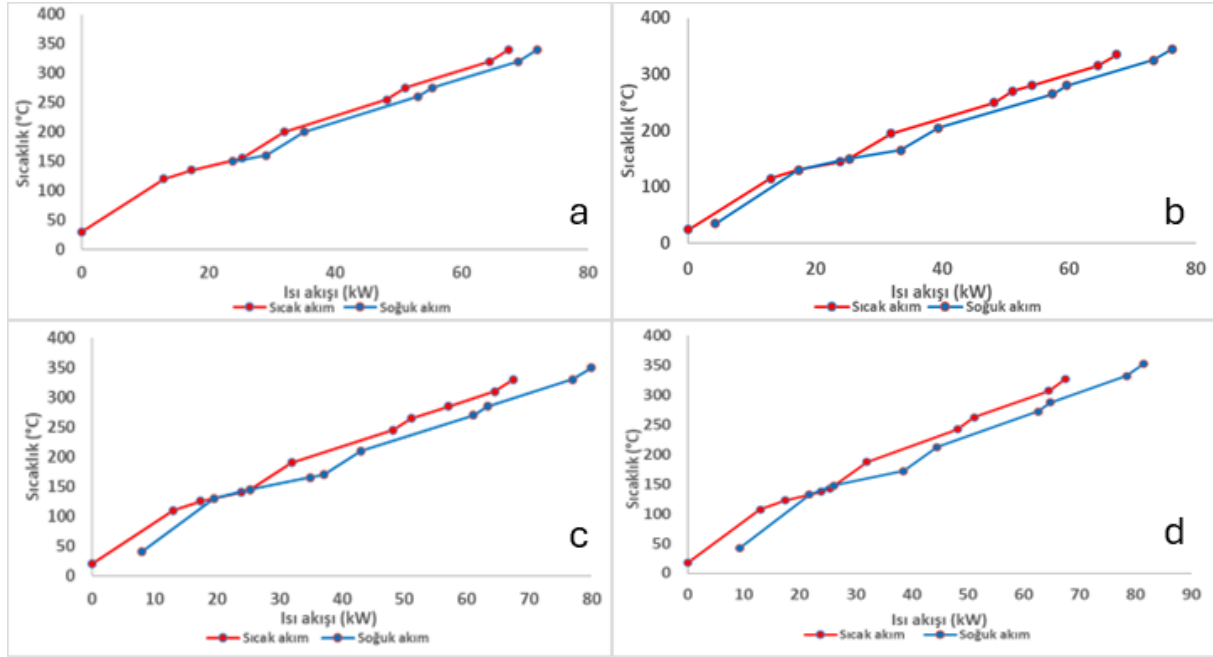
edilmektedir. Şekilde kırmızı eğriler sıcak kaynaklardan, mavi eğriler ise soğuk kaynaklardan elde edilen akımları göstermektedir. Darboğaz noktası gri renkli sütun ile belirtilmiştir.

Grid diyagramlarında belirtilen ısı değiştirici sıcaklık aralıklarına göre, sıcak ve soğuk birleşik eğrileri elde edilmiştir. Farklı sıcaklık farklarına göre ($m=500$ kg/h; $\Delta T=0$ °C; $\Delta T=10$ °C; $\Delta T=20$ °C; $\Delta T=25$ °C) elde edilen birleşik eğriler Şekil 4'te gösterilmektedir



Şekil 3. Grid diyagramı ($m=500$ kg/h; $\Delta T=0$ °C)

Figure 3. Grid diagram ($m=500$ kg/h; $\Delta T=0$ °C)



Şekil 4. Sıcak ve soğuk birleşik eğrileri (a) $m=500$ kg/h; $\Delta T=0$ °C (b) $m=500$ kg/h; $\Delta T=10$ °C (c) $m=500$ kg/h; $\Delta T=20$ °C (d) $m=500$ kg/h; $\Delta T=25$ °C

Figure 4. Hot and cold combined curves (a) $m=500$ kg/h; $\Delta T=0$ °C (b) $m=500$ kg/h; $\Delta T=10$ °C (c) $m=500$ kg/h; $\Delta T=20$ °C (d) $m=500$ kg/h; $\Delta T=25$ °C

Mevcut işletme şartlarına göre ($m=500$ kg/h; $\Delta T=0$ °C) yapılan ısı entegrasyonu sonucunda, darboğaz noktası 30 °C olarak bulunmuştur. Buna göre, proseste gerekli ısı değiştirici eşleştirmeleri

gerçekleştirildiğinde, minimum ısıtma ihtiyacı 3,06 kW olarak elde edilebileceği görülmektedir (Tablo 4). Bu durumda, ısıtma ihtiyacı bakımından %95,75 verim elde edilmektedir.

Tablo 4. Darboğaz sıcaklık noktaları ve kaskat değerleri ($m=500$ kg/h; $\Delta T=0$ °C)

Table 4. Temperature pinch points and cascade values ($m=500$ kg/h; $\Delta T=0$ °C)

Sıcaklık Aralıkları (°C)	$T_{(i+1)}-T_i$ (°C)	mCp_{net} kW/K	dQ kW	Kaskat
340 – 320	20	-0,001	-0,020	3,055
320 – 275	45	-0,005	-0,225	3,035
275 – 260	15	-0,004	-0,060	2,810
260 - 255	5	-0,153	-0,765	2,750
255 - 200	55	-0,005	-0,275	1,985
200 - 160	40	-0,002	-0,080	1,710
160 - 155	5	-0,149	-0,745	1,630
155 - 150	5	-0,148	-0,740	0,885
150 - 135	15	-0,003	-0,045	0,145
135 - 120	15	-0,003	-0,045	0,100
120 - 85	35	0	0	0,055
85 - 30	55	-0,001	-0,055	0,055
				0

Proseste giriş-çıkış sıcaklık değişimlerinin 10 °C olmasına yönelik yapılan çalışmada ($m=500$ kg/h, $\Delta T=10$ °C), darboğaz noktası 140 °C olarak belirlenmiştir. Tablo 5'te de görüldüğü üzere bu durumda, minimum soğutma ve sıcaklık

ihtiyaçları sırasıyla, 4,27 kW ve 7,33 kW olmaktadır. Isı entegrasyonu öncesi toplam soğutma ve ısıtma kaynaklarına göre ise %89,82 ısıtma, %93,80 soğutma verimi elde edildiği görülmektedir.

Tablo 5. Darboğaz sıcaklık noktaları ve kaskat değerleri ($m=500$ kg/h; $\Delta T=10$ °C)

Table 5. Temperature pinch points and cascade values ($m=500$ kg/h; $\Delta T=10$ °C)

Sıcaklık Aralıkları (°C)	$T_{(i+1)}-T_i$ (°C)	$mC_{p_{net}}$ kW/K	dQ kW	Kaskat
345 - 335	10	-0,151	-1,510	7,325
335 - 325	10	-0,001	-0,010	5,815
325 - 315	10	-0,152	-1,520	5,805
315 - 280	35	-0,005	-0,175	4,285
280 - 270	10	0,146	1,460	4,110
270 - 265	5	-0,004	-0,020	5,570
265 - 250	15	-0,153	-2,295	5,550
250 - 205	45	-0,005	-0,225	3,255
205 - 195	10	0,146	1,460	3,030
195 - 165	30	-0,002	-0,060	4,490
165 - 160	5	-0,295	-1,475	4,430
160 - 155	5	-0,440	-2,200	2,955
155 - 150	5	-0,147	-0,735	0,755
150 - 145	5	-0,001	-0,005	0,020
145 - 140	5	-0,003	-0,015	0,015
140 - 130	10	0,143	1,430	0,000
130 - 125	5	-0,003	-0,015	1,430
125 - 115	10	0,146	1,460	1,415
115 - 80	35	0	0	2,875
80 - 35	45	-0,001	-0,045	2,875
35 - 25	10	0,144	1,440	2,830
				4,270

Tablo 6'da proseste giriş-çıkış sıcaklık değişimlerinin 20 °C artırılmasıyla ($m=500$ kg/h, $\Delta T=20$ °C) ısı entegrasyonu sonucu elde edilen hesaplamalar verilmektedir. Darboğaz noktasının 145 °C olarak elde edildiği bu vaka çalışmasında,

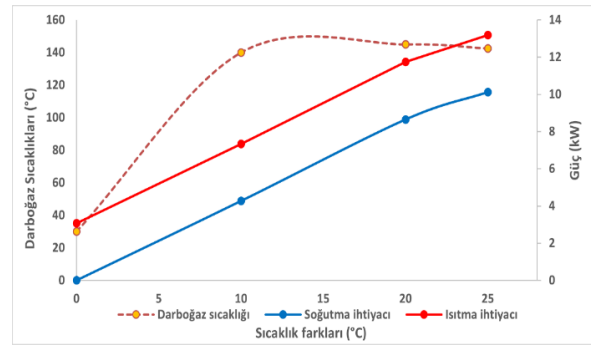
minimum soğutma ihtiyacı 8,65 kW, minimum ısıtma ihtiyacı ise 11,75 kW'dır. Bu ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarına göre, ısıtma ve soğutma verimleri sırasıyla, %83,68 ve %87,46 olarak belirlenmektedir.

Tablo 6. Darboğaz sıcaklık noktaları ve kaskat değerleri ($m=500$ kg/h; $\Delta T=20$ °C)**Table 6.** Temperature pinch points and cascade values ($m=500$ kg/h; $\Delta T=20$ °C)

Sıcaklık Aralıkları (°C)	$T_{(i+1)}-T_i$ (°C)	$mC_{p_{net}}$ kW/K	dQ kW	Kaskat
350 - 330	20	-0,151	-3,02	11,705
330 - 310	20	-0,152	-3,04	8,685
310 - 285	25	-0,005	-0,125	5,645
285 - 270	15	0,146	2,190	5,520
270 - 265	5	-0,003	-0,015	7,710
265 - 245	20	-0,153	-3,060	7,695
245 - 210	35	-0,005	-0,175	4,635
210 - 190	20	0,146	2,920	4,460
190 - 170	20	-0,002	-0,040	7,380
170 - 165	5	-0,295	-1,475	7,340
165 - 160	5	-0,440	-2,200	5,865
160 - 150	10	-0,293	-2,930	3,665
150 - 145	5	-0,147	-0,735	0,735
145 - 140	5	0,145	0,725	0
140 - 130	10	0,143	1,430	0,725
130 - 125	5	0,292	1,460	2,155
125 - 110	15	0,146	2,190	3,615
110 - 75	35	0	0	5,805
75 - 40	35	-0,001	-0,035	5,805
40 - 20	20	0,144	2,880	5,770
				8,650

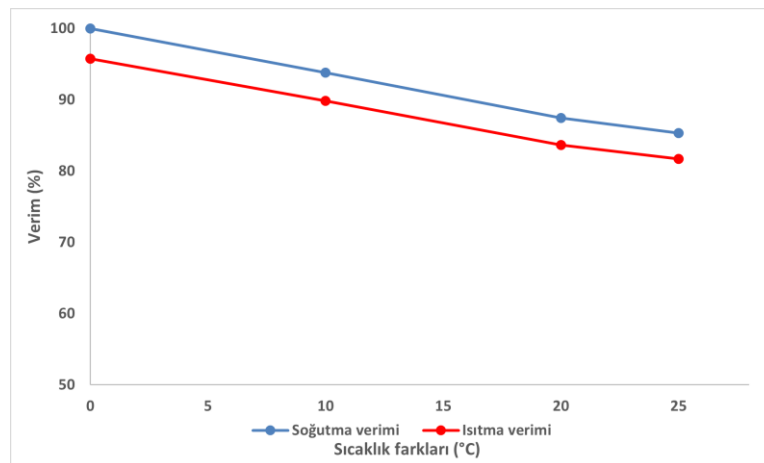
Giriş-çıkış sıcaklık değişimi proseste 25 °C'ye çıkarıldığında ($m=500$ kg/h, $\Delta T=25$ °C), darboğaz noktasının 142,5 °C olduğu görülmektedir (Tablo 7). Bu durumda, minimum soğutma ihtiyacının 10,12 kW olmasıyla %85,32 soğutma verimi, minimum ısıtma ihtiyacının 13,8 kW olmasıyla %81,70 ısıtma verimi sağlanmaktadır

Şekil 5'te ve Şekil 6'da sırasıyla sıcaklık farkı değişimlerine göre elde edilen ısıtma ve soğutma güç değerleri ve verim değişimleri verilmektedir. Şekil 5'te görüldüğü üzere, sıcaklık farkı arttıkça yüksek darboğaz noktaları elde edilmektedir. Buna göre, ısıtma ve soğutma güçleri de artış göstermiştir. Isıtma ve soğutma güçleri arttığından, verim değerlerinde azalma meydana gelmiştir (Şekil 6).

**Şekil 5.** Farklı sıcaklık farklarına göre ısıtma ve soğutma güçleri**Figure 5.** Heating and cooling flow according to different temperature differences

Tablo 7. Darboğaz sıcaklık noktaları ve kaskat değerleri ($m=500$ kg/h; $\Delta T=25$ °C)**Table 7.** Temperature pinch points and cascade values ($m=500$ kg/h; $\Delta T=25$ °C)

Sıcaklık Aralıkları (°C)	$T_{(i+1)}-T_i$ (°C)	$mC_{p,net}$ kW/K	dQ kW	Kaskat
352,5 – 332,5	20	-0,151	-3,020	13,175
332,5 – 327,5	5	-0,302	-1,510	10,155
327,5 – 307,5	20	-0,152	-3,040	8,645
307,5 – 287,5	20	-0,005	-0,100	5,605
287,5 – 272,5	15	0,146	2,190	5,505
272,5 – 262,5	10	-0,003	-0,030	7,695
262,5 – 242,5	20	-0,153	-3,060	7,665
242,5 – 212,5	30	-0,005	-0,150	4,605
212,5 – 187,5	25	0,146	3,650	4,455
187,5 – 172,5	15	-0,002	-0,030	8,105
172,5 – 167,5	5	-0,295	-1,475	8,075
167,5 – 162,5	5	-0,440	-2,200	6,600
162,5 – 147,5	15	-0,293	-4,395	4,400
147,5 – 142,5	5	-0,001	-0,005	0,005
142,5 – 137,5	5	0,145	0,725	0
137,5 – 132,5	5	0,143	0,715	0,725
132,5 – 122,5	10	0,292	2,920	1,440
122,5 – 107,5	15	0,146	2,190	4,360
107,5 – 72,5	35	0	0	6,550
72,5 – 42,5	30	-0,001	-0,030	6,550
42,5 – 17,5	25	0,144	3,600	6,520
				10,120

**Şekil 6.** Farklı sıcaklık farklarına göre verim değerleri**Figure 6.** Yield values according to different temperature differences

Sıcaklık farkı değişimi şu hususlardan dolayı ele alınmıştır: i) ısı geri kazanımı üzerindeki etkisi

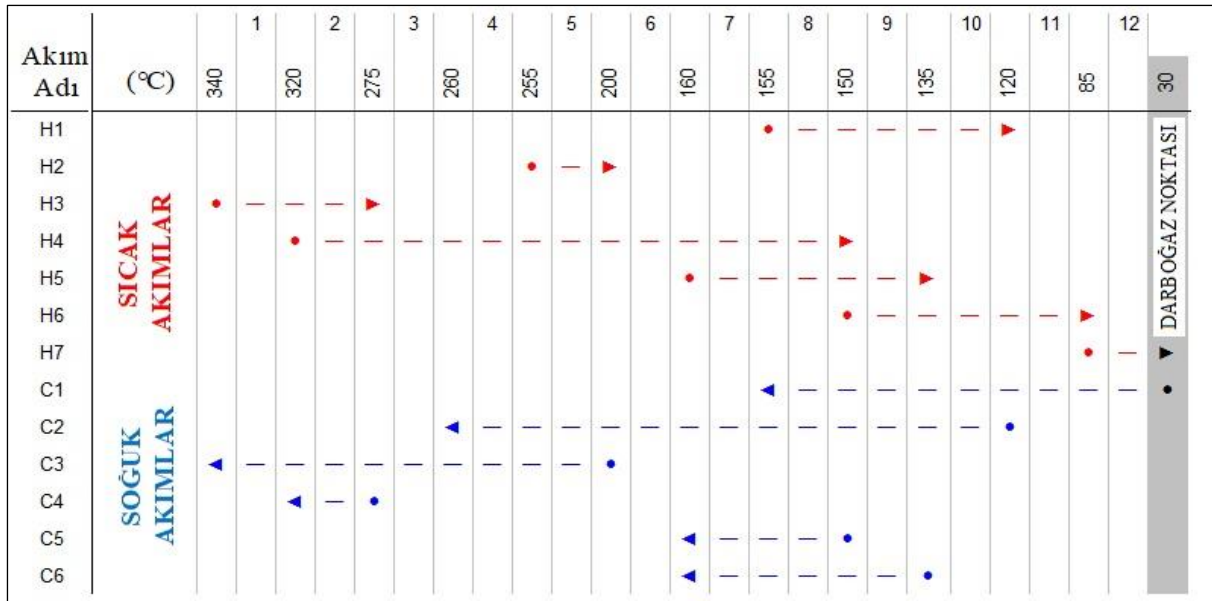
bakımından incelendiğinde, darboğaz noktasındaki daha küçük bir sıcaklık farkı, ısı

değişimi için daha verimli bir ortam sağlamaktadır ve sıcak akıştan soğuk akışa daha fazla ısı geri kazanımına olanak tanımaktadır. Tam tersi durumda, daha büyük bir sıcaklık farkı, ısı transfer etkinliğini azaltarak daha az enerji geri kazanımına neden olmaktadır, ii) tasarım üzerindeki etkiler yönünden bakıldığında, ısı değiştiricilerin tasarımı darboğaz noktasından önemli ölçüde etkilenmektedir. Darboğaz noktasındaki daha küçük bir sıcaklık farkı, istenen ısı transferini sağlamak için daha geniş bir ısı değiştirici yüzey alanı gerektirebilmekte olup, yatırım maliyetlerini artırabilmektedir. Dolayısıyla, sıcaklık farkını optimize etmek, zamanla artırılmış enerji verimliliği ile işletme maliyetlerini düşürebilmektedir, iv) ekonomik yönden değerlendirildiğinde, iyi optimize edilmiş bir darboğaz noktası, enerji maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlarken, sera gazı emisyonlarını da azaltarak endüstriyel süreçlerin ekonomik uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Sıcaklık farkları 10 °C, 20 °C ve 25 °C olduğunda, minimum sıcak yardımcı kaynağı ihtiyacı sırasıyla, 7,33 kW, 11,71 kW, 13,18 kW olduğu, minimum soğuk yardımcı kaynağı ihtiyacı ise sırasıyla, 4,27 kW, 8,65 kW, 10,12 kW olduğu görülmektedir. ΔT_{min} azaldıkça, yardımcı kaynakların ihtiyaçları azalmaktadır, ancak ısı değiştiricide ısı transferini sağlamak için gereken alan artmaktadır. Bu durum, yatırım maliyetinin de artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ΔT_{min} , darboğaz analizinin kalbidir. Farklı darboğaz noktalarının incelendiği bir çalışmada, sıcaklık farkının 5 °K azalmasıyla, verimde %2,2 oranında artma olduğu gözlenmiştir (Guizzi vd., 2015).

3.2 Debi Değişiminin Etkisi

Proseste azot debilerinin % 5-10-20 değerlerinde azaltılarak verim değişimleri de gözlenmiştir. Şekil 7’de $\Delta T=0$ °C sıcaklık farkı ve 450 kg/h debi için ısı değiştiricileri grid diyagramı verilmektedir.

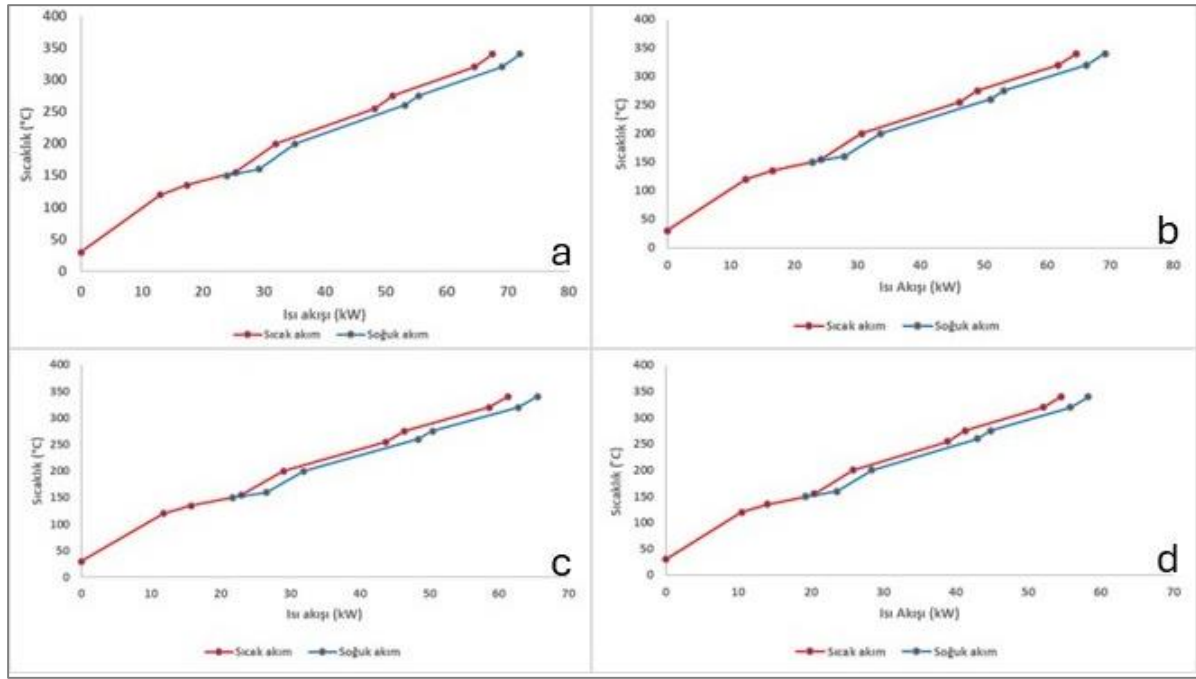


Şekil 7. Grid diyagramı ($\Delta T=0$ °C; $m=450$ kg/h)

Figure 7. Grid diagram ($\Delta T=0$ °C; $m=450$ kg/h)

Grid diyagramlarında belirtilen ısı değiştirici sıcaklık aralıklarına göre, sıcak ve soğuk birleşik eğrileri elde edilmiştir. Farklı debi değerlerine

göre ($\Delta T=0$; $m=500$ kg/h; $m=475$ kg/h; $m=450$ kg/h; $m=400$ kg/h) elde edilen birleşik eğriler Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Sıcak ve soğuk birleşik eğrileri (a) $\Delta T=0$ °C; $m=500$ kg/h (b) $\Delta T=0$ °C; $m=475$ kg/h (c) $\Delta T=0$ °C; $m=450$ kg/h (d) $\Delta T=0$ °C; $m=400$ kg/h

Figure 8. Hot and cold combined curves (a) $\Delta T=0$ °C; $m=500$ kg/h (b) $\Delta T=0$ °C; $m=475$ kg/h (c) $\Delta T=0$ °C; $m=450$ kg/h (d) $\Delta T=0$ °C; $m=400$ kg/h

Farklı debi değerlerinde, sıcaklık farklarının eşit ve sabit olduğu için, darboğaz noktalarının aynı ($T_{\text{darboğaz}}=30$ °C) olduğu görülmüştür. Daha önce ($\Delta T=0$ °C, $m=500$ kg/h) için darboğaz noktası Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 8'de de

görüldüğü üzere, proseste azot debisinin %5 azaltılması durumunda ($\Delta T=0$ °C, $m=475$ kg/h) minimum sıcaklık ihtiyacı 3,09 kW olmaktadır. Bu durumda, %95,71 ısıtma verimi elde edildiği görülmektedir.

Tablo 8. Darboğaz sıcaklık noktaları ve kaskat değerleri ($\Delta T=0$ °C; $m=475$ kg/h)

Table 8. Temperature pinch points and cascade values ($\Delta T=0$ °C; $m=475$ kg/h)

Sıcaklık Aralıkları (°C)	$T_{(i+1)}-T_i$ (°C)	$mC_{p_{\text{net}}}$ kW/K	dQ kW	Kaskat
340 - 320	20	-0,002	-0,031	3,090
320 - 275	45	-0,006	-0,250	3,058
275 - 260	15	-0,005	-0,067	2,809
260 - 255	5	-0,148	-0,738	2,742
255 - 200	55	-0,006	-0,320	2,004
200 - 160	40	-0,003	-0,100	1,684
160 - 155	5	-0,143	-0,716	1,584
155 - 150	5	-0,142	-0,712	0,868
150 - 135	15	-0,003	-0,046	0,156
135 - 120	15	-0,003	-0,046	0,111
120 - 85	35	0,0	0	0,065
85 - 30	55	-0,001	-0,065	0,065
				0

Tablo 9. Darboğaz sıcaklık noktaları ve kaskat değerleri ($\Delta T=0$ °C; $m=450$ kg/h)**Table 9.** Temperature pinch points and cascade values ($\Delta T=0$ °C; $m=450$ kg/h)

Sıcaklık Aralıkları (°C)	$T_{(i+1)}-T_i$ (°C)	$mC_{p_{net}}$ kW/K	dQ kW	Kaskat
340 - 320	20	-0,002	-0,030	2,928
320 - 275	45	-0,005	-0,236	2,898
275 - 260	15	-0,004	-0,064	2,661
260 - 255	5	-0,140	-0,700	2,598
255 - 200	55	-0,006	-0,303	1,898
200 - 160	40	-0,002	-0,095	1,596
160 - 155	5	-0,136	-0,678	1,500
155 - 150	5	-0,135	-0,674	0,823
150 - 135	15	-0,003	-0,043	0,148
135 - 120	15	-0,003	-0,043	0,105
120 - 85	35	0	0	0,062
85 - 30	55	-0,001	-0,062	0,062
				0

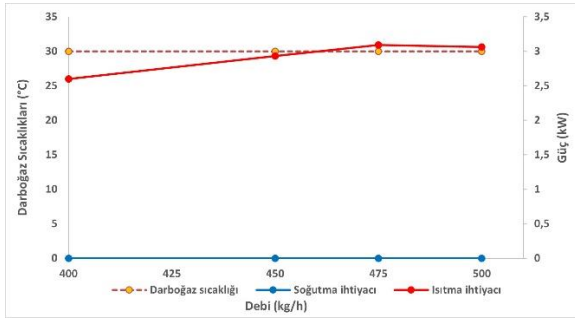
Tablo 10. Darboğaz sıcaklık noktaları ve kaskat değerleri ($\Delta T=0$ °C; $m=400$ kg/h)**Table 10.** Temperature pinch points and cascade values ($\Delta T=0$ °C; $m=400$ kg/h)

Sıcaklık Aralıkları (°C)	$T_{(i+1)}-T_i$ (°C)	$mC_{p_{net}}$ kW/K	dQ kW	Kaskat
340 - 320	20	-0,001	-0,027	2,602
320 - 275	45	-0,005	-0,210	2,575
275 - 260	15	-0,004	-0,057	2,365
260 - 255	5	-0,124	-0,622	2,309
255 - 200	55	-0,005	-0,269	1,687
200 - 160	40	-0,002	-0,084	1,418
160 - 155	5	-0,121	-0,603	1,334
155 - 150	5	-0,120	-0,599	0,731
150 - 135	15	-0,003	-0,038	0,132
135 - 120	15	-0,003	-0,038	0,093
120 - 85	35	0	0	0,055
85 - 30	55	-0,001	-0,055	0,055
				0

Proseste azot debisi azaltımı %10'a çıkartıldığında ($\Delta T=0$ °C, $m=450$ kg/h), soğutma ihtiyacı olmamaktadır ve minimum ısıtma ihtiyacının 2,93 kW olarak elde edilmesiyle, %95,93 ısıtma verimi sağlanacağı görülmüştür (Tablo 9).

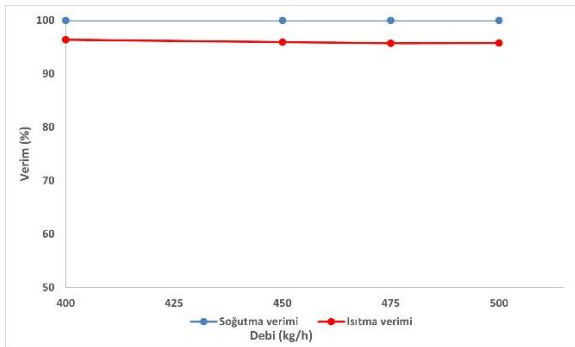
Tablo 10'da azot debisinin %20 azaltılması durumundaki ($\Delta T=0$ °C, $m=400$ kg/h) güç ihtiyaçları verilmektedir. Bu vaka çalışmasında, minimum ısıtma ihtiyacı 2,60 kW'tır. Elde edilen bu ısıtma ihtiyacına göre, ısıtma verimi %96,39 olarak belirlenmiştir.

Şekil 9'da ve Şekil 10'da sırasıyla farklı azot debilerine göre elde edilen ısıtma ve soğutma güç değerleri ve verim değişimleri gösterilmektedir. Sıcaklık farkı sabit olduğundan, darboğaz noktası da debi değişimlerine göre sabit kalmıştır. Grafikteki eğrilerden de anlaşılabileceği üzere, azot debisi azaldıkça verim değerinde artış olmuştur (Şekil 10).



Şekil 9. Farklı azot debilerine göre ısıtma ve soğutma güçleri

Figure 9. Heating and cooling flow according to different nitrogen flow rates



Şekil 10. Farklı azot debilerine göre verim değerleri

Figure 10. Yield values according to different

nitrogen flow rates

Debi değişimi, ısı transfer etkinliği, dar boğaz noktasının konumu, sıcaklık profilleri, ekonomik etkiler ve tasarım yönünden ele dolayı ele alınmıştır. i) ısı transfer etkinliği açısından bakıldığında, akış hızları, sıcak ve soğuk akışların ısı transfer verimliliğini doğrudan etkilediği görülmektedir. Yüksek akış hızları, genellikle ısı değiştiricilerde daha fazla akışkan hareketi sağladığı için ısı transferini artırmaktadır. Ancak, çok yüksek akış hızları, akışkanın zamanla ısıtma veya soğutma işlemi yapmasını engelleyebileceği ve sıcaklık farklarını azaltabileceği için darboğaz noktasında verimliliği olumsuz etkileyebilmektedir, ii) darboğaz noktasının konumu bakımından incelendiğinde, akış hızının darboğaz noktasının yerini de değiştirebileceği değerlendirilmektedir. Sıcak akışın debisi artırıldığında, bu akışın sıcaklığı daha hızlı düşmektedir ve bu durum soğuk akış ile sıcak akış arasındaki etkileşimi değiştirebilmektedir. Dolayısıyla, darboğaz noktası farklı bir noktaya kayabilir, bu da sistemin enerji verimliliğini etkileyebilmektedir, iii) sıcaklık profilleri yönünden incelendiğinde, düşük akış hızlarının, sıcaklık değişimlerinin daha belirgin olmasına neden olabileceği ve bundan dolayı darboğaz noktasının daha kolay tanımlanmasını sağlayacağı değerlendirilmektedir. Ancak, akış hızının artırılması, sıcaklık değişimlerini daha düz bir profile dönüştürebileceğinden, bu durumun darboğaz noktasının belirlenmesini zorlaştırabileceği düşünülmektedir, iv) ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, enerji maliyetlerini azaltabileceği ve aynı zamanda ısı değiştiricilerin tasarımında daha verimli bir çözüm sağlayabileceği belirlenmiştir. Ancak, akış hızlarının artışı, ekipman maliyetlerini de artırmaktadır, bu nedenle bir denge sağlamak önemlidir, v) ısı değiştirici tasarımı bakımından incelendiğinde, tasarım aşamasında uygun akış hızlarının belirlenmesi, ısı değiştiricilerin performansını artırırken, aynı zamanda süreçteki enerji kayıplarını minimize etmeye yardımcı olabilmektedir.

Elde edilen tüm bulgular, literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında dikkat

çekici bir uyum ve olumlu sonuçlar sunmaktadır. Öncelikle, mevcut işletme koşullarında (500 kg/h azot debisi ve $\Delta T=0$ °C) yapılan analizde, giriş-çıkış sıcaklıklarının 25 °C'ye çıkarılmasının ardından soğutma ve ısıtma gücünde yaklaşık 10 kW'lık bir artış gözlemlenmiştir. Ancak bu sıcaklık değişiminin, darboğaz yöntemi ile sağlanan verimliliğin %14 oranında azalmasına yol açması, literatürdeki bulgularla paralellik göstermektedir. Örneğin, Ghannadzadeh ve Sadeqzadeh (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, termal kaynaklardaki ekserji kayıplarını azaltmak için sıcaklık ve akış şartlarının optimize edilmesinin önemine vurgu yapılmış, sıcaklık değişikliklerinin sistem üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu bulgular, sıcaklık ayarlarının dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini ve her değişimin istenilen performansı sağlamayabileceğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Ayrıca, azot debisinin %20 oranında artırılması durumunda elde edilen 0,5 kW'lık soğutma ve ısıtma gücündeki azalma ile birlikte verimlilikte %1'lik bir artış gözlemlenmesi, literatürdeki diğer çalışmalarla da örtüşmektedir. Özellikle, Konur vd. (2020) çalışmasında, akış hızının artırılmasıyla birlikte atık ısı yüzdesinin arttığı ve dolayısıyla enerji geri kazanımının iyileştiği bulunmuştur. Bu durum, debi optimizasyonunun enerji tüketimini azaltma ve genel süreç verimliliğini artırma potansiyelini vurgulamaktadır.

Literatürde yer alan birçok çalışma, darboğaz analizi yönteminin enerji verimliliği üzerindeki olumlu etkilerini desteklemektedir. Örneğin, Alhajri vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, enerji tasarrufunun %27'ye varan oranlarda gerçekleştirileceği belirtilmiştir. Benzer şekilde, Olsen vd. (2017) çalışmasında, bir etil-benzen tesisinde ısı değiştirici ağının darboğaz yöntemi ile iyileştirilmesi sonucunda yıllık enerji maliyetinde %5,6 azalma sağlandığı ifade edilmiştir. Bu veriler, mevcut çalışmada elde edilen sonuçların, literatürdeki diğer araştırmalarla tutarlı olduğunu ve ısı

değiştiricilerin verimliliğini artırma potansiyelini net bir şekilde ortaya koyduğunu göstermektedir.

Bu çalışma ile elde edilen verim değerleri, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, darboğaz analizinin etkin bir şekilde uygulanması, enerji verimliliğinin artırılması ve işletme maliyetlerinin azaltılması açısından kritik bir strateji olduğunu bir kez daha doğrulamaktadır. Bu bulgular, endüstriyel süreçlerde ısı değiştiricilerin verimli kullanımı için önemli bir temel oluşturmakta ve gelecekteki araştırmalar için değerli bir referans noktası sunmaktadır.

4. Sonuç

Isı değiştiricilerin etkin kullanımı, endüstriyel proseslerde enerji verimliliği ve işletme maliyetleri açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, bir gaz temizleme sisteminde yer alan ısı değiştiricilerin verimliliğini artırmak için darboğaz yöntemiyle gerçekleştirilen sayısal değerlendirmeleri içermektedir. Elde edilen bulgular, endüstri uygulamaları ve gelecekteki araştırmalar için önemli çıkarımlar sunmaktadır:

- Çalışma kapsamında, ısı değiştiriciler için dört farklı vaka senaryosu geliştirilmiş ve bu senaryolar, giriş-çıkış sıcaklıkları ile debi değişimlerine göre analiz edilmiştir. Bu çoklu vaka analizleri, sistemin dinamiklerini anlamaya yardımcı olmakta ve özelleştirilmiş çözümler geliştirilmesi açısından önemli bir temel oluşturmaktadır.
- Mevcut işletme koşullarında (500 kg/h azot debisi ve $\Delta T=0$ °C), giriş-çıkış sıcaklık değişimlerinin etkisi incelenmiştir. Sıcaklık değişiminin 25 °C'ye çıkarılması durumunda, sistemde soğutma ve ısıtma gücünde yaklaşık 10 kW'lık bir artış gözlemlenmiştir. Ancak, bu değişim, darboğaz yönteminin sağladığı verimliliğin %14 oranında azalmasına neden olmuştur. Bu bulgu, sıcaklık ayarlarının dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini ve her sıcaklık değişiminin istenilen performansı sağlamayabileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, proses kontrol parametrelerinin

daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

- Debi değişikliklerinin etkisi de çalışmanın önemli bir bileşenini oluşturmuştur. Azot debisinin %20 oranında artırılması durumunda, sistemde soğutma ve ısıtma gücünde 0,5 kW'lık bir azalma gözlemlenmiştir ve bu değişimle birlikte verimlilikte %1'lik bir artış gerçekleşmiştir. Bu sonuç, debi optimizasyonunun enerji tüketimini azaltma ve genel süreç verimliliğini artırma potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Debi yönetimi, hem enerji tasarrufu hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir faktördür.

Gelecek araştırmalarda, ısı değiştiricilerin performansını artırmaya yönelik yenilikçi tasarım ve işletme stratejilerinin araştırılması önem taşımaktadır. Özellikle, farklı proses koşullarının ve malzeme özelliklerinin etkisi, enerji verimliliğini artıracak yeni teknolojilerin geliştirilmesi açısından göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, ısı değiştiricilerin entegre edildiği sistemlerde, sistem optimizasyonu ve veri analitiği yöntemlerinin kullanımı, proses verimliliğini daha da artırmak için önemli bir fırsat sunmaktadır.

Endüstriyel süreçlerde ısı değiştiricilerin verimli kullanımı, maliyetlerin düşürülmesi ve çevresel etkilerin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada elde edilen veriler, endüstri uygulamaları için kılavuz niteliğinde olabilirken, aynı zamanda gelecekteki araştırmalara da ışık tutmaktadır.

Yazar katkısı (Author contribution)

Üresin, E: Literatür taraması, veri işleme, verilerin analizi ve yorumlanması, makalenin yazımı

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Finansman beyanı

Bu araştırma herhangi bir fon kuruluşundan, ticari veya kar amacı gütmeyen sektörlerden özel bir hibe almamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Etik standartlar

Bu çalışma için Etik Kurul Kararı gerekmemektedir.

Kaynaklar

- Alhajri, İ.H., Gadalla, M.A., Abdelaziz, O.Y., Ashour, F.H. (2021). Retrofit of heat exchanger networks by graphical pinch analysis-a case study of a crude oil refinery in Kuwait. *Case Study In Thermal Engineering*, 26, 101030. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101030>
- Ali, E., Wazeer, I., Almutlaq, A., Rallapalli, J., Kali, M.K.H. (2022). Retrofitting heat exchanger network of industrial ethylene glycol plant using heat integration based on pinch analysis. *Polish Journal of Chemical Technology*, 24, 8-20. <https://doi.org/10.2478/pjct-2022-0009>
- Bonhivers, J.C., Moussavi, A., Hackl, R., Sorin, M., Stuart, P.R. (2019). Improving the network pinch approach for heat exchanger network retrofit with bridge analysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97, 687-696. <https://doi.org/10.1002/cjce.23422>
- Castrillon, L.C., Leon, J.A., Bereche, M.C.P., Bereche, R.P., Nebra, S.A. (2018). Improvements in fermentation and cogeneration system in the ethanol production process: Hybrid membrane fermentation and heat integration of the overall process through pinch analysis. *Energy*, 156, 468-480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.092>
- Chen, S., Xu, J., Dong, X., Zhang, H., Gao, Q., Tan, C. (2018). Pinch point analysis of heat exchange for liquid nature gas (LNG) cryogenic energy using in air separation unit. *International Journal of Refrigeration*, 90, 264-276. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.12.015>

- Gadalla, M.A. (2015). A new graphical method for pinch analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration. *Energy*, 81, 159-174. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.011>
- Ghannadzadeh, A. ve Sadeqzadeh, M. (2017). Combined pinch and exergy analysis of an ethylene oxide production process to boost energy efficiency toward environmental sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 2145-2160. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1402-5>
- Guizzi, G.L., Manno, M., Tolomei, L.M., Vitali, R.M. (2015). Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system. *Energy*, 93, 1639-1647. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.030>
- Hamsani, M.N., Walmsley, T.G., Liew, P.Y., Alwi, S.R.W. (2018). Combined pinch and exergy numerical analysis for low temperature heat exchanger network. *Energy*, 153, 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.023>
- Han, T., Wang, C., Zhu, C., Che, D. (2018). Optimization of waste heat recovery power generation system for cement plant by combining pinch and exergy analysis methods. *Applied Thermal Engineering*, 140, 334-340. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.039>
- Khan, S. ve Riverol, C. (2007). Performance of a pinch analysis for the process of recovery of ethanol from fermentation. *Chemical Engineering Technology*, 30, 1328-1339. <https://doi.org/10.1002/ceat.200700183>
- Kim, Y., Lim, J., Shim, J.Y., Hong, S., Lee, H., Cho, H. (2022). Optimization of heat exchanger network via pinch analysis in heat pump-assisted textile industry wastewater heat recovery system. *Energies*, 15, 2-16. <https://doi.org/10.3390/en15093090>
- Kong, L., Avadiappan, V., Huang, K., Maravelias, C.T. (2017). Simultaneous chemical process synthesis and heat integration with unclassified hot/cold process streams. *Computers and Chemical Engineering*, 101, 210-225. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.02.024>
- Konur, O., Saatçioğlu, O.Y., Korkmaz, S.A., Erdoğan A., Colpan, C.O. (2020). Heat exchanger network design of an organic rankine cycle integrated waste heat recovery system of a marine vessel using pinch point analysis. *International Journal of Energy Research*, 44, 12312-12328. <https://doi.org/10.1002/er.5212>
- Ladislav, V., Vaclav, D., Ondrej, B., Vaclav, N. (2016). Pinch point analysis of heat exchanges for supercritical gaseous admixtures in CCS systems. *Energy Procedia*, 86, 489-499. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.01.050>
- Miseviciute, V., Motuziene, V., Valancius, K. (2018). The application of the pinch method for the analysis of the heat exchangers network in a ventilation system of a building. *Applied Thermal Engineering*, 129, 772-781. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.051>
- Mrayed, S., Shams, M.B., Khayyat, M.A., Alnoaimi, N. (2021). Application of pinch analysis to improve the heat integration efficiency in a crude distillation unit. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100168. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100168>
- Olsen, D., Abdelouadoud, Y., Liem, P., Wellig, B. (2017). The role of pinch analysis for industrial ORC integration. *Energy Procedia*, 129, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.193>
- Pavao, L.V., Caballero, J.A., Ravagnani, M.A.S.S., Costa, C.B.B. (2020). A pinch-based method for defining pressure manipulation routes in work and heat exchange networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 109989. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109989>
- Pejpichestakul, W. ve Siemanond, K. (2013). Process heat integration between distillation columns for ethylene hydration process. *Chemical Engineering Transactions*, 35, 181-186. <https://doi.org/10.3303/CET1335030>
- Ruyck, J.D., Lavric, V., Baetens, D., Plesu, V. (2003). Broadening the capabilities of pinch analysis through virtual heat exchanger networks. *Energy Conversion and Management*, 44, 2321-2329. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00258-](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00258-)

3

- Sarkar, J. (2018). Generalized Pinch Point Design Method of Subcritical-Supercritical Organic Rankine Cycle For Maximum Heat Recovery. *Energy*, 143, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.057>
- Temtam S.A.E., Hamid, I., Gabr, E.M., Sayed, E.R. (2010). The use of pinch technology to reduce utility consumption in a natural gas processing plant. *Petroleum Science and Technology*, 28, 1316-1330. <https://doi.org/10.1080/10916460902839248>
- Wang, B., Arsenyeva, O., Zeng, M., Klemes, J.J., Varbanov, P.S. (2022). An advanced grid diagram for heat exchanger network retrofit with detailed plate heat exchanger design. *Energy*, 248, 123485. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123485>
- Yong, J.Y., Varbanov, P.S., Klemes, J.J. (2015). Heat exchanger network retrofit supported by extended grid diagram and heat path development. *Applied Thermal Engineering*, 89, 1033-1045. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.025>
- Zhi, K., Wang, B., Guo, L., Chen, Y., Wei, L., Oclon, P., Wang, J., Chen, Y., Tao, H., Li, X., Varbanov, P.S. (2024). Graphical pinch analysis-based method for heat exchanger networks retrofit of a residuum hydrogenation process. *Energy*, 299, 131538. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131538>