

Bir Kalina Çevriminin Termodinamik ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi

Osman KARA^{1*}, Önder KAŞKA²

Öz

Günümüzde, ülkelerin en önemli dikkat ettiği konulardan bir tanesi enerjidir ve sürekli gelişen teknolojilerle enerji tüketimi de hızla artış göstermektedir. Bu taleplerin karşılanması için fosil kaynak esaslı farklı güç teknolojilerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Fosil kaynakların, tükenecek olması, çevreye zarar vermesi gibi farklı problemler, bu tür teknolojilerin daha verimli çalıştırılmasına yönelik araştırmaların artmasına neden olmuştur. Orta ve düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarında Kalina çevrimiyle (KC) elektrik üretimi önemli teknolojilerdendir. Kalina çevrimini oluşturan ekipmanlar, türbin, seperatör, pompa, buharlaştırıcı, kondenser, karışım odası, kısma valfi ve ısı değiştiricileridir. Bu çalışmada, ele alınan çevrimin detaylı termodinamik analizlerini yapabilmek için bir model oluşturulmuş ve Mühendislik Denklem Çözücüsü (EES) programı kullanılarak sistemde bulunan tüm noktaların özellikleri analitik olarak hesaplanmıştır. Sistemin türbin giriş basıncı, kondenser çıkış sıcaklığı, pompa ve türbinin izentropik verimlerine bağlı olarak sistem performansı enerji ve ekonomik açıdan analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalina çevrimi, Amonyak su karışımı, Atık ısı geri kazanımı.

Thermodynamic and Economic Evaluation of a Kalina Cycle

Abstract

Nowadays, one of the most important issues that countries pay attention to is energy, and energy consumption is increasing rapidly with constantly developing technologies. In order to meet these energy demands, the use of different fossil resource-based power technologies has become widespread. Additional problems such as the depletion of fossil resources and damage to the environment have led to increased in research on the more efficient operation of such technologies. Electricity generation by the Kalina cycle (KC) in medium- and low-temperature heat sources is one of the important technologies. The equipment of the Kalina cycle is a turbine, separator, pump, evaporator, condenser, mixing chamber, throttling valve, and heat exchangers. In this study, a model was created in order to make detailed thermodynamic analyses of the cycle in question, and the properties of all points in the system were calculated analytically using the Engineering Equation Solver (EES) program. The system performance is analyzed in terms of energy and economy depending on the turbine inlet pressure, condenser outlet temperature, and isentropic efficiency of the pump and turbine.

Keywords: Kalina cycle, Ammonia water mixture, Waste heat recovery.

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü ve Mühendislik Fakültesi, Osmaniye, Türkiye, osmankara@osmaniye.edu.tr

²Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Mühendislik Fakültesi, Osmaniye, Türkiye, onderkaska@osmaniye.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-1501-677X>

²<https://orcid.org/0000-0002-7284-2093>

1. Giriş

Termodinamik güç çevrimlerinde Carnot döngüsü, ısı kayıplarının olmadığı ve ikisi izotermal ve ikisi adyabatik olmak üzere dört tersinir süreçten oluşan mümkün olan en verimli termal döngüdür. Bu çevrimler arasında Rankine döngüsü çalışma akışkanı olarak suyu kullanan, Carnot döngüsüne en yakın gerçek çevrimdir ve dünya çapında elektrik enerjisi üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2012). İnsanoğlu için temel ihtiyaçlarının karşılanmasında enerji üretimi, hem nüfus artışı hem de artan sanayileşme için önemlidir (Fertelli, 2022). Elektrik enerji üretiminde, konvansiyonel enerji kaynaklarının tüketimi günümüzde çok yaygındır. Birincil (konvansiyonel) enerji kaynaklarının tükenmesi ve sera etkisi gibi dezavantajı ile yenilenebilir enerji kaynaklarının temiz, sürdürülebilir gibi avantajlarından dolayı gün geçtikçe daha fazla talep olmaktadır (Wang ve ark., 2015; Yaniktepe ve ark., 2021). Güneş enerjisi, jeotermal, biyokütle ve endüstriyel atık ısı gibi çok büyük miktarlarda yenilenebilir enerji kaynakları bulunmaktadır. Bu kaynaklardan elde edilen orta sıcaklıktaki ısı, geleneksel Rankine yöntemleriyle verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülemez. Bu nedenle, buhar Rankine çevrimi ilkesini uygulayan, ancak düşük kaynama noktalı organik çalışma sıvıları kullanan Organik Rankine Çevrimi (ORC), daha düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından ısıyı geri kazanmak için kullanılabilir (Zhang ve ark., 2012).

1980'lerin başında Kalina, çalışma sıvısı olarak bir amonyak-su karışımı kullanan yeni bir termodinamik güç çevrimi önerdi (Kalina, 1983). KC, çeşitli yeni termodinamik çevrimlerde, 1800'lerin ortalarında Rankine çevriminin ortaya çıkışından bu yana termik santral tasarımındaki önemli gelişmedir ve Organik Rankine Çevrimine karşı iddialı bir rakip olarak kabul edilmiştir. Rankine çevrimi ile kıyaslandığında, her iki çevrim benzer ekipmanlara sahiptir. Ancak KC, amonyak-su karışımının fraksiyonuna sahiptir. Bu nedenle KC'nin termodinamik performansı, amonyak-su karışımının fraksiyonundan ve çevrimin çalışma parametrelerinden etkilenmektedir (Zhang ve ark., 2012).

Kalina çevriminin performansı ve avantajları, KC'nin farklı konfigürasyonları, amonyak-su karışımının fraksiyonları ve çalışma parametreleri gibi birçok farklı çalışmaları ile incelenmiştir. Birinci yasa etkinliğine göre, sistemdeki tüm cihazlar arasında, döngüyü etkileyebilecek anahtar parametreler: ayırıcı sıcaklığı (Marston, 1990), türbin giriş basıncı (Marston, 1990) Madhawa ve ark., 2007), türbin giriş sıcaklığı (Zhang ve ark., 2008) ve türbin çıkış basıncı (Zhang ve ark., 2008; Kim ve ark., 2020)'dir. Ayrıca, türbin çıkış basıncı sabit tutulduğunda, amonyak kütle oranı arttırıldığında sistem verimi artmaktadır. Kütle oranı sabit tutulup ise türbinden çıkış basıncını düşürülerek sistem verimini artmaktadır (Usvika ve ark., 2009). Arslan (2010), Simav jeotermal sahasından elektrik üretiminde, KCS-34 sistemi için, eksergoekonomik analiz etmişlerdir. %90'lık bir amonyak kütle fraksiyonu ile optimum sistem tasarımı için enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %14.9'luk, %36.2

olarak hesaplamışlardır. Seçkin (2023) güç ve soğutma üretimi için iki yenilikçi termodinamik çevrimden (Kalina Çevrimi ve Ejektörlü Soğutma Çevrimi) oluşan kombine bir çevrimin termodinamik analizini ele almıştır. Kalina Çevriminin türbin basınç ve sıcaklıklarının sistemin çıktı parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Türbin basıncının artırılması (2500 kPa-4000 kPa) ile enerji (10%) ve ekserji verimi (70%) artışı bulmuştur.

Koç ve Yağlı (2020), atık ısıdan enerji geri kazanımı için kombine ısı-güç çevrimi adına bir metod olan KC'nin birinci ve ikinci kanun termodinamik analizini yapmışlar. Sonuçta, maksimum ekserji yıkımının buharlaştırıcıda görüldüğünü, KC enerji verimi ve ekserji verimlerinin sırasıyla yaklaşık %12 ve %27 olarak bulmuşlardır. Bir tanker gemisindeki gerçek bir ısı-güç kombine çevriminde mevcut durumda bulunan egzoz gazındaki atık ısı enerjisinin geri kazanımını tasarlanan bir KC açısından değerlendirilmiştir. KC ile atık ısıdan dönüştürülebilir enerji miktarı Rankine çevrimli sisteme nazaran %30 daha fazla olduğunu hesaplamışlardır. Ayrıca, yakıttan yaklaşık 610 ton/yıl tasarruf sağlanabileceği ve enerji verimliliğinde %4.8 lik bir iyileştirmenin olduğu da belirtmişlerdir (Yücel ve ar., 2021). Sentürk (2020), jeotermal enerjiyle çalışan KC'nin optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi için termodinamik ve ekonomik açıdan incelemiştir. Çalışmada, sistemdeki toplam ekserji yıkımı en fazla evaporatörde olduğu, KC'nin enerji ve ekserji verimliliği ise sırasıyla % 13.04 ve % 51.81 olarak hesaplamıştır. Arslan ve ark. (2006) Kütahya-Simav jeotermal sahasında kaynağın sıcaklık ve debi değerleri kullanılarak, Kalina ve Binary güç santrali dizaynlarını ele almışlardır. Sistem verimlerini; KC için % 19.8, R134 akışkanlı binary çevrim için %12.9, HCFC-124 akışkanlı binary çevrim için % 10.6 olarak hesaplamışlardır. Sentürk (2021), jeotermal enerji ile çalışan KC'ni çok aşamalı bir yapay sinir ağı (ANN) analizi kullanılarak optimize edilmiştir. KC çevrimini, farklı türbin giriş basıncı, evaporatördeki jeotermal su çıkış sıcaklığı, kondenser basıncı ve amonyak kütle oranı için tasarlanmıştır. Sonuçlarda, optimum KC modeli için net bugünkü değer (NPV), enerji ve ekserji verimleri sırasıyla 113.0732 M\$, %6.7285 ve %46.8701 olarak hesaplamıştır. Yüksel ve Öztürk (2020) jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu bir enerji üretim sisteminin termodinamik analizi incelemişlerdir. Jeotermal enerji kullanılarak elektrik, hidrojen, sıcak su, ısıtma ve soğutma üreten bir tesis önermişler ve her bir bileşen için kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemleri belirlemişlerdir. Sonuçta, çalışma şartlarına göre, KC, ORC, sistemin hidrojen üretiminin, soğutma sisteminin ve entegre sisteminin ekserji verimleri sırasıyla, %22.73, %26.35, %37.56, %13.93 ve %34.18 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, Yılmaz (2023), düşük sıcaklıkla çalışan jeotermal enerjili bir Kalina çevriminde hidrojen ve güç üretimi değerlendirmiştir. Ele alınan tesisin, enerji ve ekserji verimliliği, net güç miktarı ve hidrojen oranı sırasıyla, %7.94, %37.64, 100.5 kW ve 0.0001191 kgs⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Wang ve ark. (2013), amonyak-suyunun değişken sıcaklıktaki buharlaşma özelliğini kullanması ile güneş enerjisiyle çalışan bir KC'yi incelemişlerdir. Kararlı durum koşulları altında güneş enerjili

KC simüle etmek için bir matematiksel model geliştirip ve genetik algoritma aracılığıyla sistem verimliliğini optimize etmişlerdir. Sonuçlarda, net güç çıkışı ve modifiye edilmiş sistem verimliliğini maksimize etmek için verilen koşullar altında optimum bir türbin giriş basıncı olduğunu göstermişlerdir, ayrıca belirtilen performans özellikleri, türbin giriş sıcaklığındaki değişikliğe karşı daha az etkilenmektedir. Optimize edilmiş modifiye edilmiş sistem verimliliğini, %8.54 olarak bulmuşlardır. Jeannot ve ark. (2021) sistemin giriş ısısı olarak güneş enerjisinin kullanıldığı PTC'li bir KC'nin performansını incelemiştir. Türbin giriş basıncının ve türbin giriş amonyak konsantrasyonunun çevrim verimliliği üzerindeki etkilerini parametrik analizini yapmışlardır. Türbin çıkış basıncının çevrim verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu göstermişlerdir. Ayrıca, 140 bar türbin giriş basıncında ve 0.8 türbin giriş amonyak konsantrasyonunda maksimum verimi %33 olarak hesaplamışlardır. Ashouri ve ark.(2015), küçük ölçekli bir PTC, bir yardımcı ısıtıcı ve bir termal depolama tankına sahip döngüyü KC'ye bağlanmış ve sistemin hem termodinamik hem de ekonomik performansını incelemiştir. Ayrıca, sistemi, yakıtla çalışan bir KC ile karşılaştırılmışlardır. KC, toplam ekserji yıkımının küçük bir kısmından sorumlu olduğunu saptamışlardır, dolayısıyla güneş kollektörlerine daha fazla yatırım yapılmaktadır. Ekonomik analizde, solar KC'nin seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin 0.4274 \$/kWh iken, yakıtla çalışan çevrimde 0.3113 \$/kWh olarak hesaplamışlardır.

Bu çalışmada, ele alınan bir KC çevrimi modellenmiş ve EES programına aktarılmıştır. Elektrik üretimi için KC, türbin giriş basıncı, kondenser çıkış sıcaklığı, pompa ve türbinin izentropik verimlerinin değişimleri termodinamik ve ekonomik açıdan analiz edilmiştir.

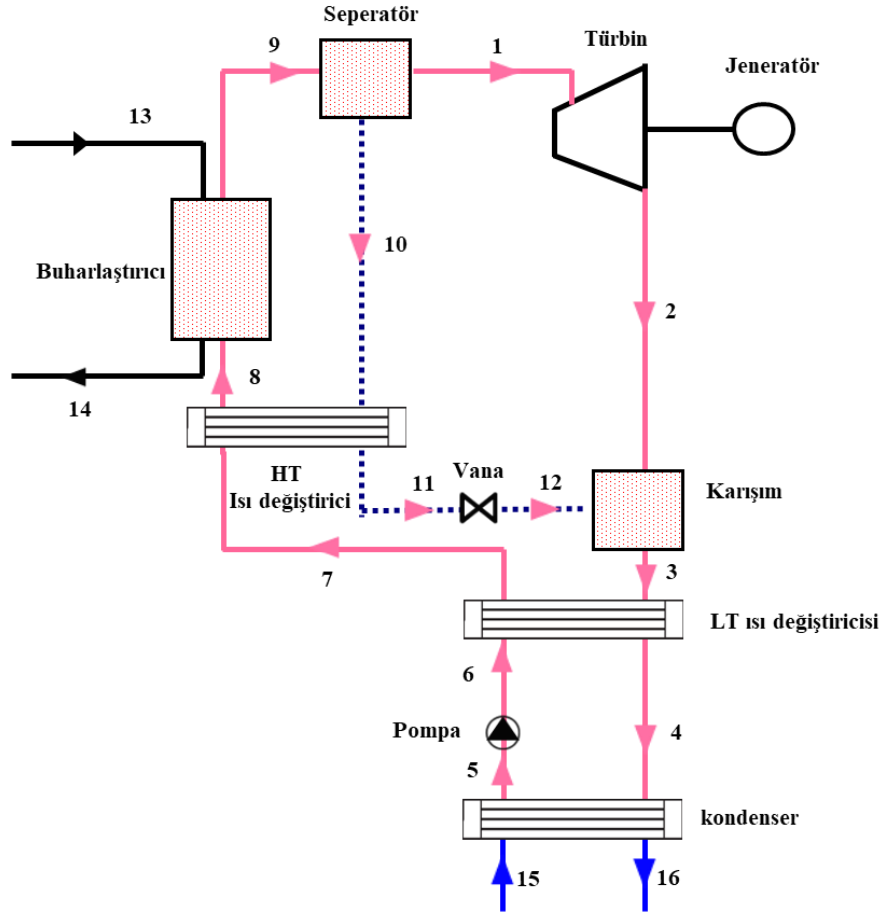
2. Materyal ve Metot

Bu bölümde çalışmanın birinci kısımda sistem tanıtımı ve ikinci bölümde sistemin detaylı analizinin yapılabilmesi için gereken kütle, enerji ve ekonomik eşitlikler verilmiştir.

2.1. Sistem Tanıtımı

Şekil 1'de çalışma kapsamında bir KC sisteminin genel görünüşü verilmiştir. Sistemi oluşturan ekipmanlar sırasıyla; buharlaştırıcı, kondenser, kısılma vanası, pompa, yüksek sıcaklıklı ısı değiştiricileri (HT) ve düşük sıcaklıklı ısı değiştiricileri (LT), karıştırıcı, seperatör ve türbin-jeneratörden oluşmaktadır. Isı transfer akışkanı (13 noktası), buhar türbinini çalıştırmak için amonyak-su karışımına faydalı ısı vermek üzere buharlaştırıcıya girer. Amonyak-su karışımı kısmen buharlaştırılır (8-9 noktası), ve seperatöre girer. Seperatörün üst kısmından neredeyse saf fazında olan amonyak gazı (zengin amonyak buharı) çıkarak güç sağlamak için türbine (1 noktası) geçer. Seperatör

tabanından neredeyse saf su (sıvı amonyok su karışımı) çıkar (10 noktası) ve enerjisi HT ısı değiştiricisinde kullanılarak (11 noktası) geri kazanılır. Daha sonra enerjisini bırakan akışkan, türbinin çıkış akışıyla karıştırılacak basıncına azaltmak için bir kısma valfi yardımıyla (12 noktası) kısılır. Karışık akış (3 noktası) enerjisinin geri kazanılması için LT geri kazanım cihazına girer. Daha sonra iki fazlı akışkan (4 noktası) su soğutmalı kondenserde yoğuşturulur. Son olarak, temel çözelti, çevrimi tamamlamak için buharlaştırıcıya pompa yardımıyla pompalanır.



Şekil 1. Kalina Çevrimin (KCS11) akış diyagramı (Fallah ve ark., 2016)

2.2. Modelleme ve Enerji-Ekonomi Analizi

Sistem, kinetik ve potansiyel enerjide değişiklik olmayan, izole elemanlardan oluşan açık bir sistem olarak kabul edilmiştir. Sistemde borularda basınç kaybı olmadığı, sistemde akışkan kaçağı gerçekleşmediği ve türbin, pompa kayıplarının izentropik verimler aracılığıyla hesaplanmıştır. Kondenser çıkışında, amonyak-su karışımının doymuş sıvı halinde olduğu ve seperatör çıkışında zengin ve zayıf amonyak-su karışımlarının sırasıyla doymuş buhar ve doymuş sıvı olduğu varsayılmıştır (Fallah ve ark., 2016; Seckin, 2018). Sistemin modellenmesi ve hesaplanmasından EES

programı kullanılmıştır. Amonyak-su karışımının özellikleri için programın kütüphanesinden faydalanılmıştır. Sistemin ekipmanlarına ait kütle korunumu aşağıdaki verilmiştir (Moran ve ark., 2010).

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

Denklem (1)'de, ekipmanlara giriş ve çıkışında ki kütleli debi miktarı sırasıyla \dot{m}_{in} ve \dot{m}_{out} şeklinde gösterilmektedir. Denklem (2), enerji dengesini ifade etmektedir.

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} \quad (2)$$

Denklem (2)'de \dot{Q} kontrol hacminde ısı transfer miktarını (kW), \dot{W} net iş miktarını (kW), h_{in} , ve h_{out} kontrol hacmine giren ve çıkan akışkanın entalpisini (kJ/kg) olarak ifade etmektedir. Tablo 1'de enerji eşitlikleri gösterilmektedir.

Tablo 1. KA için ekipmanların enerji eşitlikleri

Denklem	Ekipman	Enerji Denklikleri
3	Buharlaştırıcı	$\dot{Q}_e = \dot{m}_8(h_9 - h_8) = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{14})$
4	Türbin	$\dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2)$, $\eta_t = (h_1 - h_2)/(h_1 - h_{2s})$
5	Kondenser	$\dot{Q}_c = \dot{m}_4(h_4 - h_5) = \dot{m}_{15}(h_{16} - h_{15})$
6	Pompa	$\dot{W}_p = \dot{m}_5(h_6 - h_5)$, $\eta_p = (h_{6s} - h_5)/(h_6 - h_5)$
7	LT Isı değiştiricisi	$(h_3 - h_4) = (h_7 - h_6)$
8	HT Isı değiştiricisi	$\dot{m}_7(h_8 - h_7) = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_{11})$
9	Seperator	$\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{10} h_{10}$, $\dot{m}_9 X_9 = \dot{m}_1 X_1 + \dot{m}_{10} X_{10}$
10	Kısılma vana	$h_{11} = h_{12}$
11	Karışım odası	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_3 h_3$

Tablo (1)'de, konsantrasyon (x), amonyağın amonyak-su karışımındaki kütleli debi miktarının (\dot{m}_{NH_3}), Kalina döngüsündeki amonyak-su karışımının kütleli debi miktarına oranıdır.

Sistemin performansı için elde edilen net iş miktarı (\dot{W}_{net}) ve verimi (η_1) sırasıyla Denklem (10) ve (11)'de hesaplanmaktadır.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \quad (12)$$

$$\eta_1 = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_e} \quad (13)$$

Ekonomik açıdan değerlendirilebilmesi için, KC'de kullanılan her ekipmanın maliyet denklemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda, denklikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. KA için ekipmanların maliyetleri (Sayyaadi ve ark., 2020)

Ekipman	Maliyet	Referans
Evaporatör	$Z = 1397 (A_E)^{0.89}$	(Mosaffa ve ark., 2017)
Türbin	$Z = 4405 (W_t)^{0.7}$	(Mahmoudi ve ark., 2016)
Kondenser	$Z = 1397 (A_C)^{0.89}$	(Mosaffa ve ark., 2017)
Pompa	$Z = 1120 (W_p)^{0.8}$	(Özahi ve Tozlu, 2020)
LT	$Z = 2681 (A_{LTR})^{0.59}$	(Mahmoudi ve ark., 2016)
HT	$Z = 2681 (A_{HTR})^{0.59}$	(Mahmoudi ve ark., 2016)

Tablo 2’de verilen ekipmanların ısı eşanjörleri için ısı transfer yüzey alanlarının aşağıda verilen eşitlikle belirlenir (Moran ve ark., 2010).

$$A_i = \frac{\dot{Q}_i}{U_{LMTD}} \quad (14)$$

Denklemden, U toplam ısı transfer katsayısını göstermektedir. Ekipmanlar için kabul edilen U değerleri, evaporatör için 0.125, kondenser 0.5, LT ısı değiştiricisi 0.2, HT ısı değiştiricisi 0.6’dır (Sayyaadi ve ark., 2020; Mosaffa ve ark., 2017). Ayrıca, LMTD, logaritmik ortalama sıcaklık farkı anlamına gelmekte olup aşağıda verilen eşitlikle hesaplanır (Moran ve ark., 2010):

$$LMTD = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}\right)} \quad (15)$$

Eşitlikte, ΔT_{max} ve ΔT_{min} , seçilen ısı eşanjöründeki giriş ve çıkış buharı arasındaki maksimum ve minimum sıcaklık farklarını ifade etmektedir.

Her bileşenin ekipman maliyetleri hesaplandıktan sonra, KC ‘nın toplam yatırım maliyeti aşağıdaki eşitlikle bulunur;

$$Z_{mlyt} = Z_t + Z_p + Z_E + Z_K + Z_{LT} + Z_{HT} \quad (16)$$

KA için ekipmanların ve toplam maliyetleri hesaplandıktan sonra, sermaye geri kazanım maliyeti (CRF) şu eşitlikle hesaplanır (Sayyaadi ve ark., 2020; Mosaffa ve ark., 2017);

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (17)$$

Denklemden, faiz oranı (i , 10%), sistem ömrü (N , 20 yıl) olarak kabul edilmiştir (Sayyaadi ve ark., 2020; Mosaffa ve ark., 2017). KC'den üretilen elektriğin birim maliyeti ($\$/kWh$) (Sayyaadi ve ark., 2020) aşağıda verilen denklem ile bulunur.

$$C_{\text{unit}} = \frac{\text{CRF } Z_{\text{mlyt}+\emptyset}}{W_{\text{net}} n} \quad (18)$$

Denklemden, n yıllık çalışma süresi (8000 saat), \emptyset bakım faktörü (1.06) ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, ilk olarak ele alınan KC'yi Fallah ve ark.(2016) tarafından yapılan çalışma ile doğrulanmıştır. Fallah ve ark. (2016), tarafından düşük sıcaklıkta geliştirilmiş jeotermal sistem için KC'nin gelişmiş ekserji analizi incelerken, üç farklı çalışma durumları için incelemiştir. Bu çalışmada, gerçek durum için yapılan kabuller KC modeline uygulanmıştır. Sistemin modellenmesinde kullanılan gerekli veriler Tablo 3'de verilmiştir. Ele alınan çalışmanın doğruluğu, literatürde Fallah ve ark. (2016), tarafından yapılan düşük sıcaklıkta uygulanan KC sistemi ile mevcut çalışma kıyaslanmış ve sonuçlar Tablo 4'de gösterilmiştir. Analiz için türbin, ve pompanın izentropik ve mekanik verimleri verilmelidir. Literatürdeki farklı çalışmalarda izentropik türbin verimi 0.90 (Little ve Garimella, 2011), 0.80 (Liu ve ark., 2013), 0.70 (Shu ve ark., 2013), iken ve pompa izentropik verimleri 0.90 (Little ve Garimella, 2011), 0.85 (Peris ve ark., 2013) 0.75 (Liu ve ark., 2013) şeklinde olduğu görülmektedir.

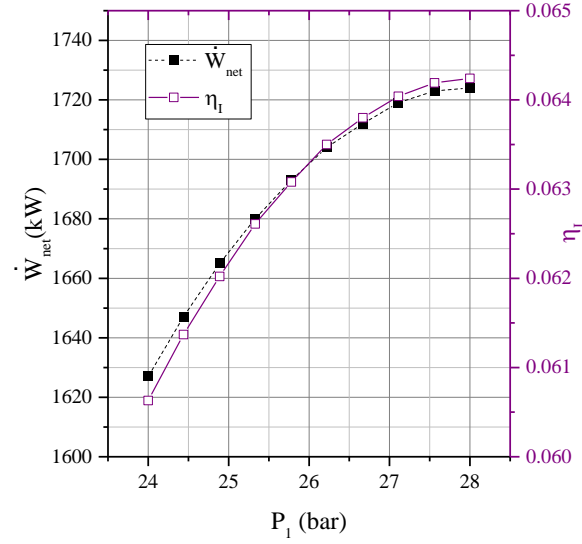
Tablo 3. Sistemin modellenmesinde kullanılan kabuller (Fallah ve ark., 2016; Rodríguez ve ark., 2013)

Ekipmanlar	Kabuller	Ekipman	Kabuller
Buharlaştırıcı	$\Delta T_{\text{min}} = 10,$ $\Delta P = 2\%$	Türbin izentropik verimi	$\eta_t = 85\%$
Türbin	$\eta_t = 0.85$	Pompa izentropik verimi	$\eta_p = 80\%$
Kondenser	$\Delta T_{\text{min}} = 10,$ $\Delta P = 1\%$	Konsentrasyon	$x_9 = 84\%$
Pompa	$\eta_p = 0.80$	Türbin giriş basıncı	$P_1 = 25 \text{ bar}$
LT Isı değiştiricisi	$\Delta T_{\text{min}} = 10,$ $\Delta P = 2\%$	Kondenser çıkış basıncı	$P_5 = 12 \text{ bar}$
HT Isı değiştiricisi	$\Delta T_{\text{min}} = 10,$ $\Delta P = 3\%$	Kondenser çıkış sıcaklığı	$T_5 = 310.15 \text{ K}$
Jeneratör	$\eta_g = 0.97$		

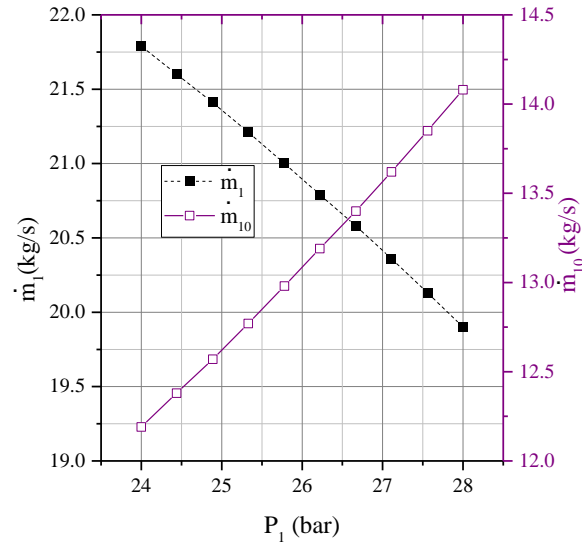
Tablo 4. Mevcut sistemin ve Fallah ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışma ile kıyaslanması

	Akışkan	Mevcut çalışma T (°C)	(Fallah ve ark., 2016) T (°C)	Mevcut çalışma m (kg/s)	(Fallah ve ark., 2016) m (kg/s)	Mevcut Çalışma x	(Fallah ve ark., 2016) x
1	Nh ₃ H ₂ O	89.85	90.00	21.36	21.39	0.99	0.99
2	Nh ₃ H ₂ O	52.45	52.60	21.36	21.39	0.99	0.99
3	Nh ₃ H ₂ O	58.05	57.80	33.98	33.98	0.84	0.84
4	Nh ₃ H ₂ O	53.95	53.70	33.98	33.99	0.84	0.84
5	Nh ₃ H ₂ O	36.95	37.00	33.98	33.10	0.84	0.84
6	Nh ₃ H ₂ O	37.45	37.40	33.98	33.10	0.84	0.84
7	Nh ₃ H ₂ O	48.05	47.80	33.98	33.10	0.84	0.84
8	Nh ₃ H ₂ O	58.75	59.30	33.98	33.10	0.84	0.84
9	Nh ₃ H ₂ O	89.85	90.00	33.98	33.10	0.84	0.84
10	Nh ₃ H ₂ O	89.85	90.00	12.62	12.58	0.5862	0.5852
11	Nh ₃ H ₂ O	60.65	57.80	12.62	12.58	0.5862	0.5852
12	Nh ₃ H ₂ O	59.55	57.80	12.62	12.58	0.5862	0.5852
13	Su	100	100	200			
14	Su	68	68	200			
15	Su	25	25	601.4			
16	Su	35	35	601.4			
Net elektrik üretimi		Mevcut Çalışma; 1669 (kW)		Fallah ve ark., 2016; 1672 (kW)			
Termal verim		Mevcut Çalışma; 0.06219		Fallah ve ark., 2016; 0.06241			

Bu çalışma kapsamında yapılan ikinci kısımda, türbin giriş basıncının değişimi ile sistemin W_{net} ve η_1 değişimleri incelenmiştir. Türbin giriş basıncının 24-28 bar aralığında değişimi Şekil 2’de gösterilmektedir. Şekil 2’de, KC çevrimin η_1 ’si artan türbin giriş basıncı ile artmaktadır. P_1 arttıkça, P_2 sabit olduğu için aradaki entalpi farkı (h_1-h_2) artmaktadır. Bu da \dot{W}_{net} ve η_1 artmasına neden olmaktadır. Şekil 3’de P_1 basıncının artması ile sistemdeki karışımın kütleli debi değişimini göstermektedir. Sistemin toplam kütleli debisi (\dot{m}_9) 33.98 kg/s kabul edilmiş olup (Fallah et al., 2016), P_1 basıncının artması ile seperatörden türbine giden kütleli debi miktarının (\dot{m}_1) azaldığı, m_{10} ‘un ise arttığı görülmüştür. Seçkin (2018), türbin giriş basıncının artmasına bağlı benzer trendleri elde etmiştir.

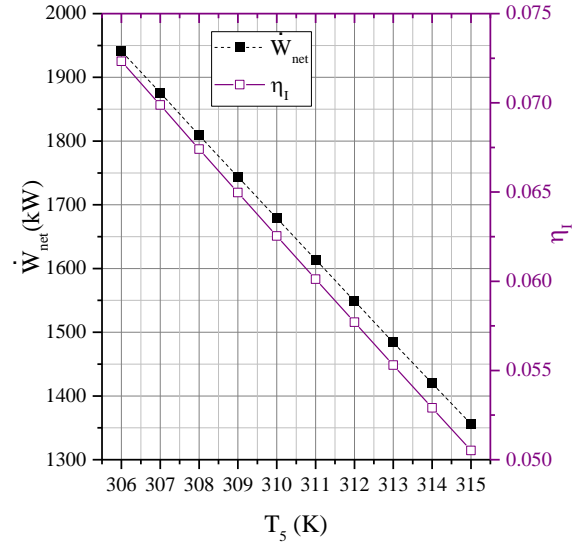


Şekil 2. Türbin giriş basıncının değişiminin \dot{W}_{net} ve η_I 'e etkisi



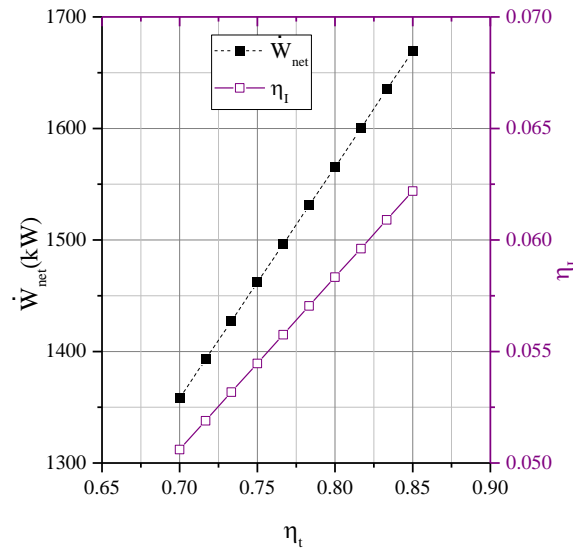
Şekil 3. Türbin giriş basıncının değişiminin \dot{m}_1 ve \dot{m}_{10} 'a etkisi

Çalışmanın bir diğer kısmında, Şekil 4'de kondenser sıcaklığının değişimi ile net elde edilen iş ve sistemin termal verimi gösterilmektedir. Kondenser sıcaklığının yükselmesi sistemin kondenser basıncını artırmakta, bu da türbin çıkışında basınç değeri artmasından dolayı, türbinden elde edilen iş miktarı azalmaktadır. Böylece, sabit enerji girdisi için elde edilen iş miktarının azalması sistemin termal verimi düşürdüğü görülmektedir.

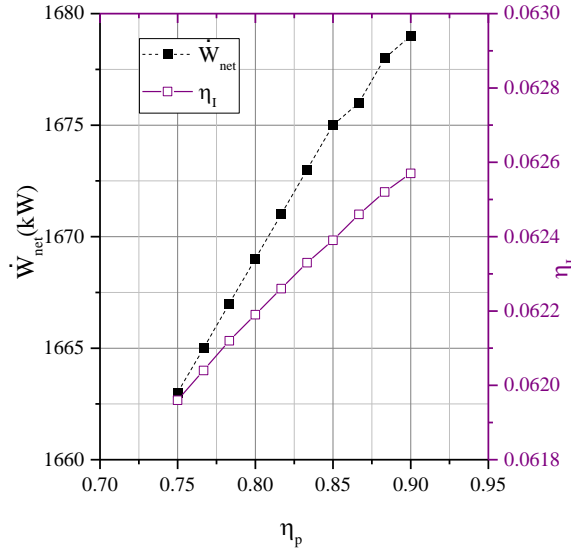


Şekil 4. Kondenser çıkış sıcaklığının \dot{W}_{net} ve η_t etkisi

Çalışmada, türbinin ve pompanın izentropik verim değişiminin çevrim üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 5’de türbinin izentropik verim değişiminin, Şekil 6’da pompanın izentropik verim değişiminin çevrimdeki \dot{W}_{net} ve η_t üzerindeki etkisi incelenmiştir. Türbin ve pompa için izentropik verim değişimi sırasıyla 0.7-0.85, 0.75-0.90 olarak ele alınmıştır. Türbin veriminin yaklaşık %21 artış miktarında, yaklaşık %23 artış hesaplanmışken, Pompanın %20 verim artışında, %0.96 artış gerçekleşmiştir.



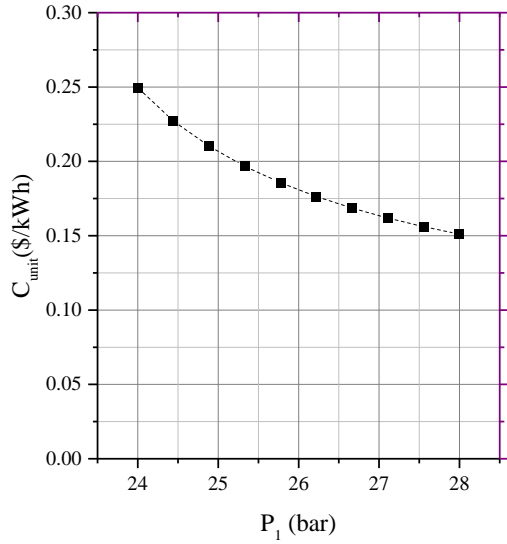
Şekil 5. Türbin izentropik veriminin \dot{W}_{net} ve η_t 'e etkisi



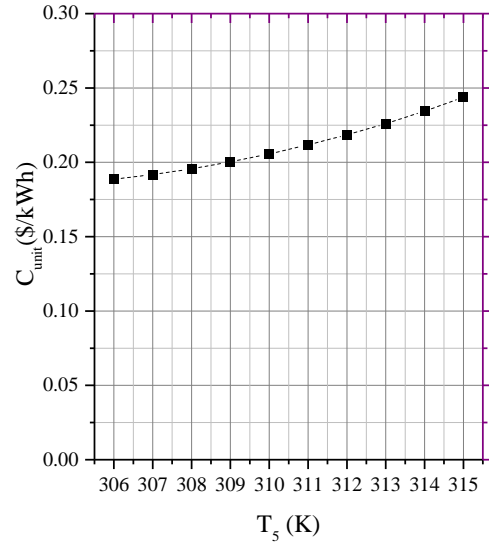
Şekil 6. Pompa izentropik veriminin \dot{W}_{net} ve η_I 'e etkisi

Çalışmanın son kısmında, üretilen elektrik enerjisinin birim maliyeti hesaplanmıştır. Şekil 7 (a)'da sistemin türbin giriş basıncının, Şekil 7 (b)'de sistemin kondenser çıkış sıcaklığının, Şekil 7 (c)'de çevrimin türbin izentropik veriminin, Şekil 7 (d)'de çevrimin pompa izentropik verimin artırılması ile birim maliyetin değişimi gösterilmiştir. Çalışmada yapılan kabuller ile, sistemden elde edilen elektrik üretim birim maliyeti en düşük değerleri sırasıyla, türbin giriş basıncın 28 bar değerinde iken, kondenser sıcaklığının 306 K olduğu görülmektedir. Ayrıca, türbin izentropik verimin, pompanın izentropik verimine göre birim enerji maliyetine etkisi daha fazla olduğu görülmektedir. Bu kısımda, pompanın enerji tüketiminin türbin elektrik üretimi yanında kıyaslandığında çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

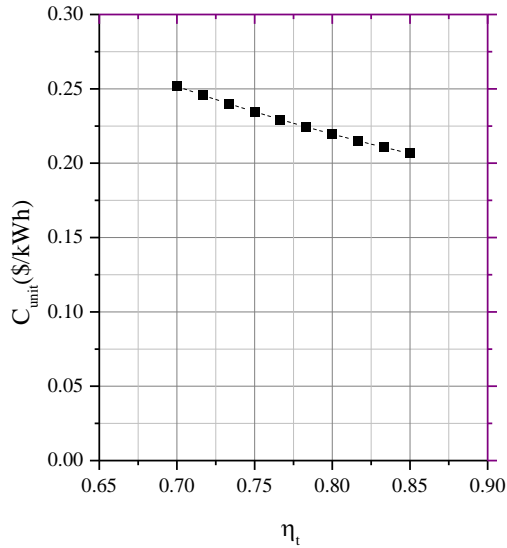
Bu kapsamda, literatürde birim enerji maliyeti de benzer trend oluşmuştur. Sistemde kullanılan çalışma akışkanlarının termodinamik davranışı ve çalışma parametreleri ekonomik sonuçlar için oldukça önemli bilgiler sunmaktadır. Sayyadi ve ark. (2020) Kalina çevrimine sahip bir elektrik üretim tesisi için elektrik satış fiyatı sistem ömrü 20 yıl olan bir çevrim için 0.25 \$/kWh'den büyük olması gerektiğini hesaplamışlardır.



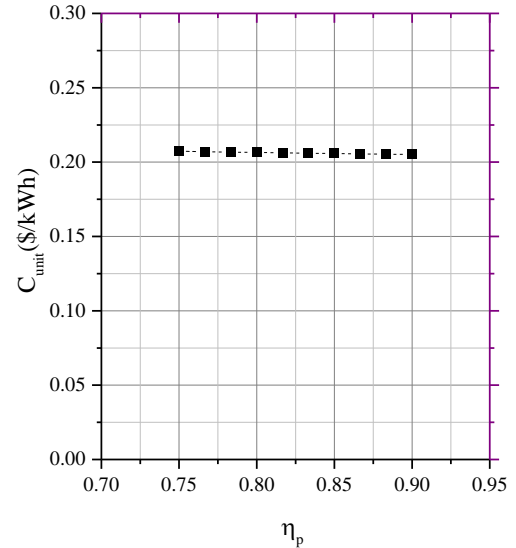
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7. Çevrimin birim enerji başına düşen maliyeti

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, bir sıcak su ısı kaynağı ile güç sağlamak için bir Kalina çevrimi araştırılmıştır. Sistem, EES programında termodinamik ve ekonomik olarak analiz edilmiştir. Çalışmada, çevrimi etkileyen en önemli parametrelerden türbin giriş basıncı, kondenser çıkış sıcaklığı, türbin ve pompanın izentropik etkisi incelenmiştir. Türbin giriş basıncı 24-28 bar'a artırıldığında, sistem \dot{W}_{net} miktarında 1627 kW'dan 17245 kW değerine ve η_1 'si 0.060 'dan 0.064 artmıştır. Kondenser çıkış sıcaklığı 306 K' den 315 K'ne artırıldığında, \dot{W}_{net} miktarında 1941 kW'den 1356 kW ve η_1 'si

0.072'den 0.050 değerine azalmıştır. Türbin izentropik verimin 0.7-0.85 değerine artırıldığında, 1358 kW'dan 1669 kW' a yükselmiştir. Pompa izentropik verimin 0.75-0.9 değerine artırıldığında, 1663 kW'dan 1679 kW' a artışı hesaplanmıştır. Çalışmada türbin basıncının ve kondenser çıkış sıcaklığının etkisinin birim elektrik başına düşen maliyet hesaplanmıştır, sistem elektrik maliyetinin yaklaşık 0.20 \$/kWh değerinden başlayıp, 0.24 \$/kWh değerine kadar değiştiği bulunmuştur. Atık ısı kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynaklarından KC ile elektrik enerjisi üretiminin sağlanması, konvansiyonel enerji kaynaklarına olan bağımlılıktan uzaklaşmada en önemli yöntemlerden bir tanesidir. Bu tür teknolojilerin kullanılmasıyla, çevresel açıdan da pek çok avantaj kazanılması mümkün olacaktır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Arslan, Oguz. (2010). Exergoeconomic evaluation of electricity generation by the medium temperature geothermal resources, using a Kalina cycle: Simav case study. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(9), 1866–1873.
- Arslan, Oğuz, Köse, R., Alakuş, B., & Özgür, M. A. (2006). Examining of Power Generation Potential in Simav Geothermal Field. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (012), 57–67.
- Ashouri, M., Vandani, A. M. K., Mehrpooya, M., Ahmadi, M. H., & Abdollahpour, A. (2015). Techno-economic assessment of a Kalina cycle driven by a parabolic Trough solar collector. *Energy Conversion and Management*, 105, 1328–1339.
- Fallah, M., Mahmoudi, S. M. S., Yari, M., & Ghiasi, R. A. (2016). Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system. *Energy Conversion and Management*, 108, 190–201.
- Fertelli, A. (2022). Electric tariffs and thermal energy storage systems for buildings. *European Mechanical Science*, 6(4), 257–262.
- Jeannot, I., Rahman, M. M., Saat, A., Faizal, H. M., & Wahid, M. A. (2021). Thermodynamic Evaluation of a Solar Based Kalina Cycle.
- Kalina, A. I. (1983). Combined cycle and waste heat recovery power systems based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low-temperature heat for power generation. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 79368, p. V001T02A003). American Society of Mechanical Engineers.

- Kim, K. H., Ko, H. J., & Han, C. H. (2020). Exergy Analysis of Kalina and Kalina Flash Cycles Driven by Renewable Energy. *Applied Sciences*, 10(5), 1813.
- Koç, Y., & Yağlı, H. (2020). Isı-güç kombine sistemlerinde kullanılan kalina çevriminin enerji ve ekserji analizi. *Politeknik Dergisi*.
- Little, A. B., & Garimella, S. (2011). Comparative assessment of alternative cycles for waste heat recovery and upgrade. *Energy*, 36(7), 4492–4504. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.069>
- Liu, C., He, C., Gao, H., Xie, H., Li, Y., Wu, S., & Xu, J. (2013). The environmental impact of organic Rankine cycle for waste heat recovery through life-cycle assessment. *Energy*, 56, 144–154. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.045>
- Madhawa Hettiarachchi, H. D., Golubovic, M., Worek, W. M., & Ikegami, Y. (2007). The performance of the Kalina cycle system 11 (KCS-11) with low-temperature heat sources.
- Mahmoudi, S. M. S., Pourreza, A., Akbari, A. D., & Yari, M. (2016). Exergoeconomic evaluation and optimization of a novel combined augmented Kalina cycle/gas turbine-modular helium reactor. *Applied Thermal Engineering*, 109, 109–120. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.011>
- Marston, C. H. (1990). Parametric analysis of the Kalina cycle.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2010). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- Mosaffa, A. H., Hasani Mokarram, N., & Garousi Farshi, L. (2017). Thermoeconomic analysis of a new combination of ammonia/water power generation cycle with GT-MHR cycle and LNG cryogenic exergy. *Applied Thermal Engineering*, 124, 1343–1353. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.126>
- Özahi, E., & Tozlu, A. (2020). Optimization of an adapted Kalina cycle to an actual municipal solid waste power plant by using NSGA-II method. *Renewable Energy*, 149, 1146–1156. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.102>
- Peris, B., Navarro-Esbrí, J., & Molés, F. (2013). Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 364–371. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.08.016>
- Rodríguez, C. E. C., Palacio, J. C. E., Venturini, O. J., Lora, E. E. S., Cobas, V. M., Dos Santos, D. M., ... Gialluca, V. (2013). Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 109–119.
- Sayyaadi, H., Khosravanifard, Y., & Sohani, A. (2020). Solutions for thermal energy exploitation from the exhaust of an industrial gas turbine using optimized bottoming cycles. *Energy Conversion and Management*, 207(October 2019), 112523. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112523>
- Seckin, C. (2018). Thermodynamic analysis of a combined power/refrigeration cycle: Combination of Kalina cycle and ejector refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*, 157(August 2017), 631–643. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.047>
- Seckin, C. (2023). Energy and Exergy Analysis of an Innovative Power/Refrigeration Cycle: Kalina Cycle and Ejector Refrigeration Cycle. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 35(2), 193–202.
- Sentürk Acar, M. (2021). Multi-stage artificial neural network structure-based optimization of geothermal energy powered Kalina cycle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(3), 829–849.
- Sentürk, M. (2020). Thermodynamic and economic analysis of geothermal energy powered kalina cycle. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 40(2), 335–347.
- Shu, G., Liu, L., Tian, H., Wei, H., & Xu, X. (2013). Performance comparison and working fluid analysis of subcritical and transcritical dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 74, 35–43. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.037>
- Usvika, R., Rifaldi, M., & Noor, A. (2009). Energy and exergy analysis of kalina cycle system (KCS) 34 with mass fraction ammonia-water mixture variation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23(7), 1871–1876.
- Wang, J., Yan, Z., Zhou, E., & Dai, Y. (2013). Parametric analysis and optimization of a Kalina cycle driven by solar energy. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 408–415.
- Wang, Y., Liu, Q., Lei, J., & Jin, H. (2015). Performance analysis of a parabolic trough solar collector with non-uniform solar flux conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 236–249.
- Yaniktepe, B., Osman, K., & Parlak, T. K. (2021). Enerji tüketimi ve ekonomik büyüme ilişkisi: Türkiye.

- Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(3), 452–465.
- Yılmaz, F. (2023). Modeling of the Thermodynamic and Environmental Impact Assessment of a Geothermal Energy-Based Power and Hydrogen Generation Plant. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(2), 654–668.
- Yücel, E., Doğanay, B., Gökalp, F., Baycık, N., & Durmuşoğlu, Y. (2021). Integration of the Kalina Cycle in a Tanker Ship and Analysis of its Effect on Energy Efficiency. *SeaTific*, 1(1), 26–35.
- Yüksel, Y. E., & Öztürk, M. (2020). Jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu enerji üretim sisteminin termodinamik analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 113–121.
- Zhang, X., He, M., & Zhang, Y. (2012). A review of research on the Kalina cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5309–5318.
- Zhang, Y., He, M., Jia, Z., & Liu, X. (2008). First law-based thermodynamic analysis on Kalina cycle. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2(2), 145–151.