

KRİTİK-ÜSTÜ KARBON-DİOKSİTİN JEOTERMAL GÜÇ ÇEVİRİMİNDE KULLANIMI ÜZERİNE

Reşit YALÇINKAYA^a, Atilla BIYIKOĞLU^a

^aGazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Maltepe, 06570 Ankara
abiyik@gazi.edu.tr, resityalcinkaya@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 24.06.2011; Kabul/Accepted: 21.06.2012)

ÖZET

Bu çalışmada, iş akışkanı olarak karbon-dioksit kullanan bir güç çevrimi tasarlanmıştır. Bu çevrim üzerinden jeotermal enerji kaynaklı bir güç üretim sisteminin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Çevrimin işletiminde, jeotermal enerji iş akışkanına doğrudan aktarılmış ve karbon-dioksit, kritik üstü bölgede işletilerek önerilen sistemin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Doğruluğunu test etmek için, sistemden elde edilen sonuçlar literatürde mevcut benzer bir sistemin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna ilaveten, termosifon etkisinin çevrim içi akışkan döngüsünü sağlayacak mertebede olduğu kabul edilerek tasarlanan sistem ile pompa kullanılarak elde edilen sistem sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji, Karbon-dioksit, Güç çevrimi, Termosifon etkisi.

ON USAGE OF SUPER-CRITICAL CARBON-DIOXIDE IN A GEOTHERMAL POWER CYCLE

ABSTRACT

In this study, a power cycle using carbon-dioxide as working fluid was designed. Thermodynamic analysis of a power generation system driven by a geothermal energy source was performed over the cycle. In the operation of cycle, geothermal energy was directly transferred to the working fluid and the applicability of the system proposed was investigated cycling the carbon-dioxide in the super-critical region. The results of the system were compared with those of a similar system present in the literature for verification. In addition to this, the results of the system which was designed assuming that thermosiphon effect would be sufficiently high to be able to cycle the working fluid were compared with the ones that were obtained using pump.

Key Words: Geothermal energy, Carbon-dioxide, power cycle, Thermosiphon effect.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyadaki jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesislerinin çoğu 1973 petrol krizinden sonra faaliyete geçmiştir. Bu dönemde elektriğe duyulan ihtiyaç ülkeleri alternatif enerji kullanımına teşvik etmiştir. Jeotermal enerji, alternatif enerji kaynaklarının en önemlilerinden bir tanesidir.

İlk jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesisinin kurulmasından günümüze kadar geçen sürede, teknolojiye gerçekleşen hızlı ilerleme sonucu, bu alandaki yeniliklerin ve araştırmaların önü açılmıştır. Fakat yer altı uygulamalarında, ısı transfer akışkanı

olarak karbon-dioksitin kullanılması ilk kez 2000 yılında incelenmeye başlanmıştır [1]. Bu incelemenin ardından 2006 yılında Pruess [2], jeotermal rezervuarda karbon-dioksit kullanımı ile oluşan ısı transfer ve akışkan hareketlerini araştırmak amacıyla, karbon-dioksitin termofiziksel özelliklerini hesaplamış ve problemi nümerik olarak simüle etmiştir. 2008 yılında Gürgenci ve arkadaşları [3] tarafından, ikili çevrim ile çalışan jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesisi yerine, tek çevrim ile çalışan ve kritik-üstü karbon-dioksit kullanılan bir sistem önerilmiştir.

İş akışkanı olarak kritik-üstü karbon-dioksitin kullanılmasının ana nedenleri arasında, karbon-dioksitin diğer iş akışkanlarına göre düşük kritik basınç ve sıcaklığa sahip olması; bunun yanı sıra, yanmaması, temininin kolay ve ucuz olması, ısı olarak kararlı ve inert olması, zehirli olmaması ve çevre kirliliğine etkisinin diğer iş akışkanlarına göre az olması gelmektedir [4].

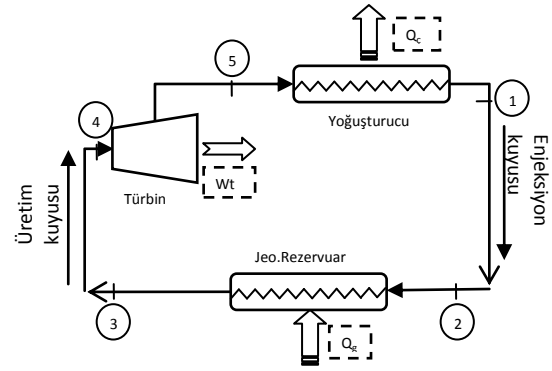
Bugüne kadar yapılan araştırmalar ve fiziko-kimyasal özellikleri dikkate alındığında, gelişmiş jeotermal sistemlerin (GJS) işletiminde karbon-dioksitin iş akışkanı olarak kullanılmasının avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Karbon-dioksitin GJS'de kullanılmasıyla avantaj oluşturan özellikleri şunlardır: (i) *Yüksek Genleşme Oranı*. Karbon-dioksitin sahip olduğu yüksek genleşme oranı, enjeksiyon kuyusundaki soğuk CO₂ ile üretim kuyusundaki sıcak CO₂ arasında yüksek yoğunluk farklılıklarına sebep olur ve bu yoğunluk farklılığının oluşturduğu kaldırma kuvveti akışkan sirkülasyon sisteminde güç tüketimini azaltır. (ii) *Düşük Viskozite*. Karbon-dioksitin sahip olduğu düşük viskozite, verilen bir basınç gradyanı için daha büyük akış hızlarına sebep olur. (iii) Karbon-dioksitin yer altındaki kayalar üzerindeki çözücü etkisi çok azdır. Bu yüzden, su kaynaklı sistemlerdeki çökeltme ve asit ayrışması gibi problemler en aza indirgenir [2].

2. GÜÇ ÇEVRİMİ TASARIMI (DESIGN OF A POWER CYCLE)

Bu bölümde iş akışkanı olarak kritik-üstü karbon-dioksit kullanan, jeotermal enerji kaynaklı iki güç çevrimi tasarlanmıştır. Termosifon etkisinin çevrim içi akışkan döngüsünü sağlayacak mertebede olduğu kabul edilerek tasarlanan sistem ile pompa kullanılarak elde edilen sistemin termodinamik analizi yapılmıştır.

2.1 Pompasız CO₂ Güç Çevrimi (A CO₂ - POWER CYCLE WITHOUT A PUMP)

Gelişmiş jeotermal sistemlerde, enjeksiyon ve üretim kuyusu arasındaki statik basınç farkı, çevrimde kullanılan karbon-dioksit için bir nevi itici güç görevi görür. Bu olay, termosifon etkisi olarak adlandırılır. Bu etki, yüzeyde kurulacak sistemde büyük kapasiteli pompa kullanımı gereksinimini ortadan kaldırır [5]. Bu işletim kolaylığı dikkate alınarak, Atrens vd. [6] jeotermal enerji kaynaklı bir elektrik üretim tesisinde, iş akışkanı olarak karbon-dioksit kullanan ve sadece türbin ve soğutma kulesinden oluşan bir çevrim önermişlerdir (Şekil 1).



Şekil 1. Pompasız CO₂ güç çevriminin şematik görünümü [6] (Schematic view of a CO₂ Power Cycle without Pump)

Bu çalışmada, Atrens vd. [6]'nin elde ettiği rezervuar sıcaklık ve basınç değerleri kullanılarak, önerilen çevrimin tüm noktalarındaki akışkan özellikleri hesaplanmıştır ve Tablo 1'de sunulmuştur. Enjeksiyon ve üretim kuyusu içerisindeki akış tersinir adiabatik (izantropik) olarak kabul edilmiştir [3]. Karbon-dioksitin çevrimdeki kütle debisi, rezervuardan çekilen ısı akısı 80 MW olacak şekilde yapılan iterasyonlarla hesaplanmıştır. Enjeksiyon ve üretim kuyusunun çapı (D) 0,5 metre, rezervuar derinliği 5000 m olarak alınmıştır. Ortam sıcaklığı 25 °C, rezervuar sıcaklığı 235 °C, rezervuar basıncı ise 35 MPa kabul edilmiştir [6]. Enjeksiyon ve üretim kuyusu boyunca hesaplanan sürtünme faktörü için gerekli olan pürüzlülük katsayısı ise (ϵ) 0,0004 m olarak alınmıştır. Teoride kullanılan türbin tam yalıtımlı (adiyabatik) olarak öngörülmesi ve türbin izantropik olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Ayrıca termosifon etkisinin çevrim içi akışkan döngüsünü sağlayacak mertebede olduğu kabul edilmiştir.

Çevrimde karbon-dioksit, $T_1=25$ °C sıcaklık ve yaklaşık $P_1=6.4$ MPa basınç değerinde rezervuara enjekte edilmektedir. Karbon-dioksitin kritik sıcaklığı $T_{kr}=31.1$ °C ve kritik basıncı $P_{kr}=7.39$ MPa olduğundan, enjeksiyon kuyusuna gönderilmeden önceki basınç ve sıcaklık değerlerinde karbon-dioksit doymuş sıvı fazındadır. Buna göre kuyu boyunca pürüzlülük oranının (ϵ) ve kuyu çapının (D) sabit olduğu varsayılarak, türbülanslı akış için yüzey ve akışkan arasındaki sürtünme faktörü aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir [7].

$$f = \left[-1,8 \cdot \log \left[\frac{6,9}{Re_D} + \left(\frac{\epsilon}{3,7 \cdot D} \right)^{1,11} \right] \right]^{-2} \quad (1)$$

Enjeksiyon kuyusu boyunca izantropik olarak kabul edilen proses süresince karbon-dioksitin basınç değişimi termodinamiğin birinci yasası uygulanarak hesaplanabilir [6].

$$\Delta P_z = \rho g \Delta z \quad (2)$$

Burada Δz rezervuar derinliğindeki değişimi ifade etmektedir. Kuyu boyunca sürtünmeden kaynaklanan

basınç kaybı ise aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilir.

$$\Delta P_{f,kuyu} = f \frac{\Delta z}{D} \rho \frac{v^2}{2} = f \frac{8\dot{m}^2 \Delta z}{\rho \pi^2 D^5} \quad (3)$$

Böylece enjeksiyon/üretim kuyularındaki basınç düşümü Denklem 4 ile hesaplanabilir [8].

$$\Delta P_{enj/üret} = \Delta P_z \mp \Delta P_{f,kuyu} \quad (4)$$

Enjeksiyon ve üretim kuyularındaki basınç düşüşünü hesaplamak için kullanılan denklemler (denklem 1 – 4) 50 m aralıklarla hesaplanarak kuyu boyunca oluşan toplam basınç kaybı hesaplanmıştır.

Düşük sıcaklık ve basınçta yer altına gönderilen iş akışkanı, yer altı kayalarındaki enerjiyi üzerine çekerek sıcaklığını $T_3=235^\circ\text{C}$ 'ye ve basıncını ise $P_3=35$ MPa'a yükseltir (Şekil 1). Termodinamiğin birinci kanunu, jeotermal rezervuar için uygulanarak aşağıdaki eşitlik elde edilir,

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_{CO_2}(h_3 - h_2) \quad (5)$$

Enerji korunum denklemi aracılığı ile kayalardan iş akışkanına aktarılan ısı enerjisi 80 MW alınarak akışkanın debisi teorik olarak hesaplanabilir. Tablo 1'de sunulan karbon-dioksit ait entalpi değerleri kullanılarak akışkan debisi 277 kg.s^{-1} olarak hesaplanmıştır.

Rezervuar için Termodinamiğin ikinci kanunu, kararlı durum işletiminde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir,

$$\left(\dot{S}_{gen}\right)_{rez} = \dot{m}(s_3 - s_2) - \frac{\dot{Q}_g}{T_{rez}} \quad (6)$$

Bu çalışmada, karbon-dioksitin jeotermal iş akışkanı olarak kullanılması, enjeksiyon kuyusundaki soğuk kritik-üstü CO_2 ile üretim kuyusundaki sıcak kritik-üstü CO_2 yoğunlukları arasında oluşan farkın, kaldırma kuvvetlerine sebep olarak iş akışkanının sirkülasyonu için gereken pompalama güç gereksinimini karşıladığı kabul edilmiştir [1]. Üretim kuyusundan yeryüzüne çıkan kritik-üstü CO_2 gazının entropisi $s_4 = -0,756 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ s (üretim kuyusundaki prosesin adyabatik olduğu kabul edilerek) ve basıncı ise 18.6 MPa olarak hesaplanmıştır. Üretim kuyusundan çıkan kritik-üstü CO_2 gazı Türbine gönderilmekte ve iş üretimi gerçekleşmektedir. Türbindeki genişleme prosesinin izantropik olarak gerçekleştiği ve yoğuşturucudaki basınç kayıplarının ihmal edilecek mertebede olduğu kabul edilmiştir. Bu kabuller ışığında, Termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak türbinde üretilen mekanik iş 17568 kW olarak hesaplanmıştır. (bkz. Şekil 1, Denklem 8).

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{CO_2}(h_4 - h_5) \quad (8)$$

Termodinamiğin birinci kanunu yoğuşturucu için yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir,

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{CO_2}(h_5 - h_1) \quad (9)$$

Denklem (9) kullanılarak, yoğuşma prosesi süresince açığa çıkan ısı enerjisi $\dot{Q}_c = 62319 \text{ kW}$ olarak hesaplanmıştır. Termodinamiğin ikinci kanunu uygulanarak yoğuşturucudaki entropi üretimi,

$$\left(\dot{S}_{gen}\right)_{yoğ} = \dot{m}(s_1 - s_5) + \frac{\dot{Q}_c}{T_0} \quad (10)$$

Tablo 1. Pompasız CO_2 güç çevriminin termodinamik özellikleri (Thermodynamic properties of a CO_2 Power Cycle without a Pump)

Durum	Faz	Sıcaklık [°C]	Basınç [MPa]	Entalpi [kJ.kg ⁻¹]	Entropi [kJ.(kg.K) ⁻¹]	Özgül Hacim [m ³ .kg ⁻¹]	İç enerji [kJ.kg ⁻¹]
1	Doymuş sıvı	25*	6,4**	-232	-1,491	0,0014	-241,0
2	Kritik-üstü gaz	71**	46,5**	-183,3	-1,491	0,0011	-235,8
3	Kritik-üstü gaz	235*	35,0*	105,7	-0,756	0,0025	16,9
4	Kritik-üstü gaz	172,4**	18,7**	56,6	-0,756	0,0037	-12,7
5	Kritik-üstü gaz	75**	6,4**	-6,9	-0,756	0,0081	-58,9

* Atrens vd.[6]'ne ait sıcaklık ve basınç değerleri ** Bu çalışmada hesaplanan CO_2 - termodinamik özellikleri

Termodinamiğin ikinci kanunu ışığında, Tablo 1'deki karbon-dioksit ait veriler ile Denklem 6 kullanılarak rezervuardaki entropi üretimi, $\dot{S}_{gen} = 45,916 \text{ kWK}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Tersinmezlik ile entropi üretimi arasındaki ilişki aşağıda sunulmuştur.

$$\dot{I} = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (7)$$

Çevre sıcaklığı, $T_0=25^\circ\text{C}$ alınarak rezervuarda oluşan tersinmezlik miktarı yaklaşık $\dot{I} = 13.7 \text{ MW}$ olarak hesaplanmıştır.

olarak elde edilir. Denklem (10) kullanılarak, yoğuşturucudaki entropi üretimi, $\left(\dot{S}_{gen}\right)_{yoğ} = 5,67 \text{ kW} \cdot \text{K}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

Tersinmezlik ile entropi üretimi arasındaki bağıntı kullanılarak ve ortam sıcaklığı, $T_0=25^\circ\text{C}$ seçilerek, yoğuşturucudaki tersinmezlik miktarı, $\dot{I}_{yoğ} = 1690 \text{ kW}$ olarak hesaplanmıştır.

Çevrimin birinci kanun verimi,

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{Q}_g} \quad (11)$$

olarak tanımlanır. Pompa kullanılmadığı için net iş, türbin işine eşit alınmıştır. Denklem (11) kullanılarak, çevrimin birinci kanun verimi $\eta_I = 0,220$ olarak hesaplanmıştır.

Çevrimin ikinci kanun verimi, sistemden elde edilen işin elde edilebilecek maksimum işe oranı olarak tanımlanır ve çevrimin tersinmezliği cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta_{II} = \frac{|\dot{W}_{net}|}{|\dot{W}_{tr}|} = 1 - \frac{\dot{i}}{|\dot{W}_{tr}|} \quad (12)$$

Bu denklemde, tersinir iş \dot{W}_{tr} ile temsil edilmiştir. Termodinamiğin ikinci kanuna göre, jeotermal enerji kaynağı kullanan güç çevrimi için elde edilebilecek maksimum iş (tersinir iş) aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunur.

$$|\dot{W}_{tr}| = |\dot{Q}_g| \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{rez}}\right) \quad (13)$$

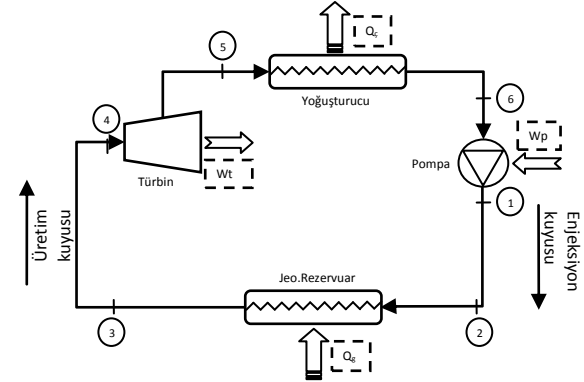
Çevre sıcaklığı, $T_0 = 25$ °C ve rezervuar sıcaklığı, $T_{rez} = 235$ °C olarak kabul edildiğinden, Denklem (13) kullanılarak çevrimden elde edilebilecek tersinir iş miktarı $|\dot{W}_{tr}| = 33061$ kW olarak hesaplanmıştır.

Böylece Denklem (12) kullanılarak, çevrimin ikinci kanun verimi $\eta_{II} = 0,535$ olarak elde edilmiştir.

2.2 Pompalı CO₂ Güç Çevrimi (A CO₂ Power Cycle with a Pump)

İncelemesini yapmış olduğumuz diğer bir çevrimde ise, ilk çevrimden farklı olarak, termosifon etkisinin çevrim içi döngüyü sağlayamadığı kabul edilip, yoğuşturucudan çevre sıcaklığında doymuş sıvı fazında çıkan karbon-dioksitin bir pompa yardımıyla rezervuara gönderilmesi ön görülmüştür, (Şekil 2). Çevrimdeki genleşme ve sıkıştırma proseslerinin ilk çevrimde olduğu gibi izantropik olarak gerçekleştiği

kabul edilmiştir.



Şekil 2. Pompalı CO₂ güç çevriminin şematik görünümü (Schematic view of a CO₂ Power Cycle with a Pump)

Pompalı ve pompasız çevrimde iş akışkanı olarak karbon-dioksit kullanılmıştır. İlk çevrimde olduğu gibi karbon-dioksitin çevrimdeki kütle debisi rezervuardan çekilen ısı enerjisi 80 MW olacak şekilde yapılan iterasyonlar ile hesap edilmiştir. Enjeksiyon ve üretim kuyusu içerisindeki akış tersinir adyabatik (izantropik) olarak kabul edilmiştir [3]. Böylece çevrimin kütle debisi 278 kg.s⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kuyulardaki basınç hesaplamaları ise bir önceki çevrimde kullanılan denklemler yardımıyla hesaplanmıştır. Tablo 2'de sunulan entalpi değerleri kullanılarak Denklem 4 yardımıyla, izantropik genleşme prosesi için türbin işi 17653 kW olarak hesaplanmıştır.

Yoğuşturucudaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Dolayısıyla, 5 ve 6 noktalarının basınçları birbirine eşit alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, yoğuşturucu çıkışında iş akışkanının doymuş fazda olduğu ve pompalama işleminin izantropik olarak gerçekleştiği kabul edilmiştir. Dolayısıyla 6 ve 1 noktalarının entropileri birbirine eşit alınmıştır.

Izantropik olarak gerçekleştiğini kabul ettiğimiz pompalama işi, Termodinamiğin birinci kanuna uygulanarak aşağıdaki şekilde entalpi farkları cinsinden yazılabilir.

Tablo 2. Pompalı CO₂ güç çevriminin termodinamik özellikleri (Thermodynamic properties of a CO₂ Power Cycle with a Pump)

Durum	Faz	Sıcaklık [°C]	Basınç [MPa]	Entalpi** [kJ.kg ⁻¹]	Entropi** [kJ.(kg.K) ⁻¹]	Özgül Hacim** [m ³ .kg ⁻¹]	İç enerji** [kJ.kg ⁻¹]
1	Sıkıştırılmış sıvı	27**	7,4**	-230,8	-1,491	0,0014	-241,0
2	Kritik-üstü gaz	72**	47,6**	-181,9	-1,491	0,0011	-235,5
3	Kritik-üstü gaz	235*	35,0*	105,7	-0,756	0,0025	16,9
4	Kritik-üstü gaz	172**	18,7**	56,6	-0,756	0,0037	-12,6
5	Kritik-üstü gaz	75**	6,4**	-6,9	-0,756	0,0081	-58,9
6	Doymuş sıvı	25*	6,4**	-232,0	-1,491	0,0014	-241,0

* Atrens vd.[6]'ne ait sıcaklık ve basınç değerleri ** Bu çalışmada hesaplanan CO₂ - termodinamik özellikleri.

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{CO_2}(h_1 - h_6) \quad (14)$$

Denklem 14 kullanılarak pompalama işi 333,8 kW olarak hesaplanmıştır.

Çevrimin birinci kanun verimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_p}{\dot{Q}_g} \quad (15)$$

Denklem 15 kullanılarak çevrimin birinci kanun verimi 0,216 olarak elde edilmiştir.

Çevrimin ikinci kanun verimi, ekserji cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}_W}{\dot{E}_Q} = \frac{|\dot{W}_{net}|}{|\dot{Q}_g| \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{rez}}\right)} \quad (16)$$

Denklem 16'de geçen $|\dot{W}_{net}|$ terimi, çevrimden elde edilen net işi temsil etmektedir ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$|\dot{W}_{net}| = |\dot{W}_{tr}| - |\dot{W}_{kayıp}| \quad (17)$$

2.3 Farklı Enjeksiyon Şartlarında Çalışan Pompasız CO₂ Güç Çevrimi (A CO₂ Power Cycle without a Pump Working at Different Injection Conditions)

Kıyaslama amacıyla yukarıda termodinamik analizini yaptığımız çevrimlere göre rezervuar sıcaklık ve basınç değerleri farklı olan, Gurgenci vd. [3] tarafından incelenen, iş akışkanı olarak CO₂ kullanan, jeotermal enerji kaynaklı Rankine çevriminin termodinamik özellikleri Tablo 3'de sunulmuştur. Bu çevrimde de termosifon etkisinin çevrim içi döngüyü sağlayacak mertebede olduğu kabul edilmiştir. Diğer çevrimlerde olduğu gibi üretim ve enjeksiyon kuyusunun tersinir adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Çevrimde rezervuar sıcaklığı 235 °C, rezervuar basıncı 48,1 MPa ve çevre sıcaklığı ise 20 °C olarak kabul edilmiştir. Ayrıca bir önceki pompasız güç çevrimiyle karşılaştırma yapmak amacıyla, çevrimin kütle debisi 277 kg s⁻¹ olarak alınmıştır.

Gurgenci vd. [3] tarafından yapılan çalışmada karbon-dioksitin çevrim boyunca kritik-üstü fazda olduğu jeotermal enerji kaynaklı bir güç çevrimi daha incelenmiştir. Kıyaslama amacıyla yukarıda termodinamik analizi yapılan çevrimlere göre rezervuar sıcaklık ve basınç değerleri farklı olan,

Tablo 3. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan pompasız CO₂ Rankine çevriminin termodinamik özellikleri (Thermodynamic properties of a CO₂ Rankine Cycle without a pump, working at different injection conditions)

Durum	Faz	Sıcaklık [°C]	Basınç [MPa]	Entalpi** [kJ.kg ⁻¹]	Entropi** [kJ.(kg.K) ⁻¹]	Özgül Hacim** [m ³ .kg ⁻¹]	İç enerji*** [kJ.kg ⁻¹]
1	Doymuş sıvı	20*	5,7**	-250,9	-1,551	0,0013	-258,4
2	Kritik-üstü gaz	61**	48,1*	-201,7	-1,551	0,0011	-253,8
3	Kritik-üstü gaz	235*	48,1*	110,9	-0,804	0,0021	12,1
4	Kritik-üstü gaz	191**	26,2*	59,2	-0,804	0,0028	-14,6
5	Kritik-üstü gaz	54**	5,7**	-28,6	-0,804	0,0082	-75,4

* Gurgenci vd.[3]'ne ait sıcaklık ve basınç değerleri ** Bu çalışmada hesaplanan CO₂ - termodinamik özellikleri.

Denklem 17'te geçen kayıp iş terimi, $|\dot{W}_{kayıp}|$, çevrim süresince oluşan toplam kayıp işi temsil etmektedir ve termodinamiğin ikinci kanunu uygulanarak aşağıdaki gibi elde edilir,

$$|\dot{W}_{kayıp}| = T_0 \dot{S}_{gen} = T_0 \left[\frac{\dot{Q}_c}{T_0} - \frac{\dot{Q}_g}{T_{rez}} \right] \quad (18)$$

Denklem 18 kullanılarak çevrim süresince yitirilen iş miktarı 15683,1 kW olarak hesaplanmıştır. Denklem 17 yardımı ile çevrimden elde edilen gerçek iş 17378 kW olarak elde edilmiştir. Denklem 16 kullanılarak çevrimin ikinci kanun verimi 0,526 olarak elde edilmiştir.

Gurgenci vd. [3] tarafından incelenen, iş akışkanı olarak CO₂ gazının kullanıldığı, jeotermal enerji kaynaklı Brayton gaz çevriminin termodinamik özellikleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Bu çevrimde de termosifon etkisinin çevrim içi döngüyü sağlayacak mertebede olduğu kabul edilmiştir. Diğer çevrimlerde olduğu gibi üretim ve enjeksiyon kuyusunun tersinir adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Çevrimde rezervuar sıcaklığı 235 °C, rezervuar basıncı 25 MPa ve enjeksiyon sıcaklığı ise 47 °C olarak kabul edilmiştir. Ayrıca bir önceki pompasız güç çevrimiyle karşılaştırma yapmak amacıyla, çevrimin kütle debisi 277 kg s⁻¹ olarak alınmıştır.

Tablo 4. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan kompresörsüz CO₂ Brayton çevriminin termodinamik özellikleri(Thermodynamic properties of a CO₂ Brayton Cycle without compressor working at different injection conditions)

Durum	Faz	Sıcaklık [°C]	Basınç [MPa]	Entalpi** [kJ.kg ⁻¹]	Entropi** [kJ.(kg.K) ⁻¹]	Özgül Hacim** [m ³ .kg ⁻¹]	İç enerji** [kJ.kg ⁻¹]
1	Kritik-üstü gaz	47*	8*	-78,4	-1,001	0,0043	-113,0
2	Kritik-üstü gaz	136**	25*	-29,6	-1,001	0,0022	-84,6
3	Kritik-üstü gaz	235*	25*	125,6	-0,659	0,0035	38,7
4	Kritik-üstü gaz	168**	13*	74,3	-0,659	0,0055	3,1
5	Kritik-üstü gaz	122**	8*	41,8	-0,659	0,0079	-21,5

3. SONUÇLAR (RESULTS)**2.4 Farklı Enjeksiyon Şartlarında Çalışan Pompalı CO₂ Güç Çevrimi** (A CO₂ Power Cycle with a Pump Working at Different Injection Conditions)

Yukarıdaki çevrimlerden farklı olarak, sistemdeki iş akışkanı karbon-dioksitin sirkülasyonunun pompa yardımıyla sağlandığı, jeotermal enerji kaynaklı çevrimin termodinamik özellikleri Tablo 5'de sunulmuştur. Çevrimdeki karbon-dioksitin kütle debisi bir önceki pompalı güç çevrimiyle karşılaştırma yapmak amacıyla 278 kg.s⁻¹ olarak alınmıştır.

Tablo 5'de termodinamik özellikleri sunulan, iş akışkanı olarak CO₂ kullanan, pompalı, jeotermal enerji kaynaklı çevrimin birinci kanun verimi 0,275 olarak hesaplanmıştır.

Termosifon etkisi ile çevrim içi akışkan döngüsünün sağlandığı kabul edilen sistem (Tablo 6) ile pompa yardımıyla akışkan sirkülasyonunun sağlandığı, iş akışkanı olarak kritik-üstü karbon-dioksit kullanılan jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesisinin (Tablo 7) termodinamik analizi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, termosifon etkisinin çevrim içi akışkan döngüsünü sağlayacak mertebede kabul edildiği, karbon-dioksit ile çalışan jeotermal enerji kaynaklı elektrik üretim tesisinin T-s ve P-h diyagramları aşağıda sunulmuştur (Şekil 3.a ve 3.b).

Termosifon etkisinin çevrim içi akışkan döngüsünü sağlayamayacak mertebede kabul edildiği ve pompa kullanılarak hesaplanan çevrimin T-s diyagramı (Şekil 4.a), T-s diyagramında 1 ve 6 noktalarının yakınlaştırılmış görünümü (Şekil 4.b) aşağıda sunulmuştur.

Tablo 5. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan pompalı CO₂ güç çevriminin termodinamik özellikleri (Thermodynamic properties of a CO₂ Power Cycle with a pump, working at different injection conditions)

Durum	Faz	Sıcaklık [°C]	Basınç [MPa]	Entalpi** [kJ.kg ⁻¹]	Entropi** [kJ.(kg.K) ⁻¹]	Özgül Hacim** [m ³ .kg ⁻¹]	İç enerji** [kJ.kg ⁻¹]
1	Sıkıştırılmış sıvı	23**	7,3**	-248,7	-1,551	0,0013	-258,1
2	Kritik-üstü gaz	62**	49,9**	-199,8	-1,554	0,0011	-253,6
3	Kritik-üstü gaz	235*	49,9**	110,9	-0,804	0,0021	12,0
4	Kritik-üstü gaz	191**	26,2*	59,2	-0,804	0,0028	-14,6
5	Kritik-üstü gaz	54**	5,7**	-28,6	-0,804	0,0082	-75,4
6	Doymuş sıvı	20*	5,7**	-250,9	-1,551	0,0013	-258,4

* Gurgenci vd.[3]'ne ait sıcaklık ve basınç değerleri ** Bu çalışmada hesaplanan CO₂ - termodinamik özellikleri.**Tablo 6.** Pompasız CO₂ Güç Çevriminin Termodinamik Analiz Sonuçları (Results of thermodynamic analysis for the CO₂-Power Cycle without a Pump)

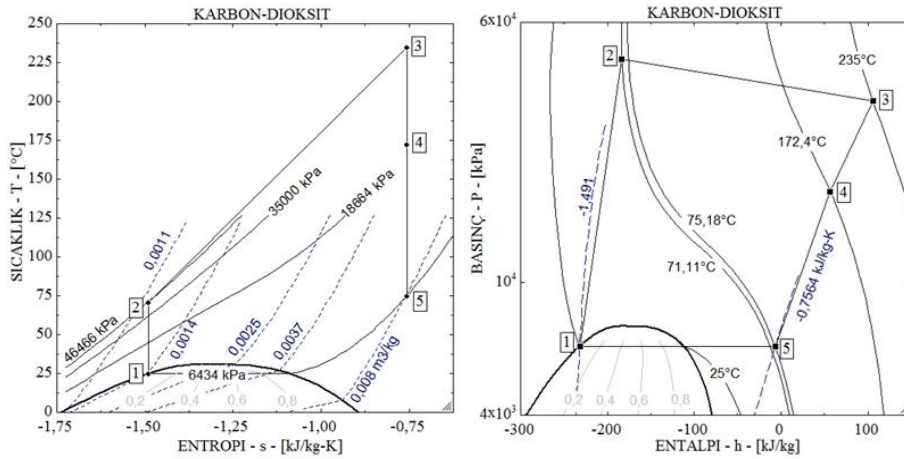
Proses	\dot{Q} [kW]	\dot{W} [kW]	\dot{S}_{gen} [kW.K ⁻¹]	\dot{I} [kW]	η_I	η_{II}
1-2 Enjeksiyon kuyusu (izantropik)	0	0	0	0	0,220	0,535
2-3 Jeotermal Rez. (Evaporator)	80000	0	45,916	13690		
3-4 Üretim kuyusu (izantropik)	0	0	0	0		
4-5 Türbin (adyabatik)	0	17568	0	0		
5-1 Yoğuşturucu	-62319	0	5,668	1690		
Çevrim	17681	17568	51,584	15380		

Elde edilen sonuçlara göre, jeotermal enerji kaynaklı pompalı ve pompasız güç çevrimlerinin Termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa göre verimleri ile elde edilen net işin karşılaştırıldığı diyagram Şekil 5'de sunulmuştur. Pompanın kullanılması ile üretilen net işin ve verimlerin azaldığı gözlemlenmektedir.

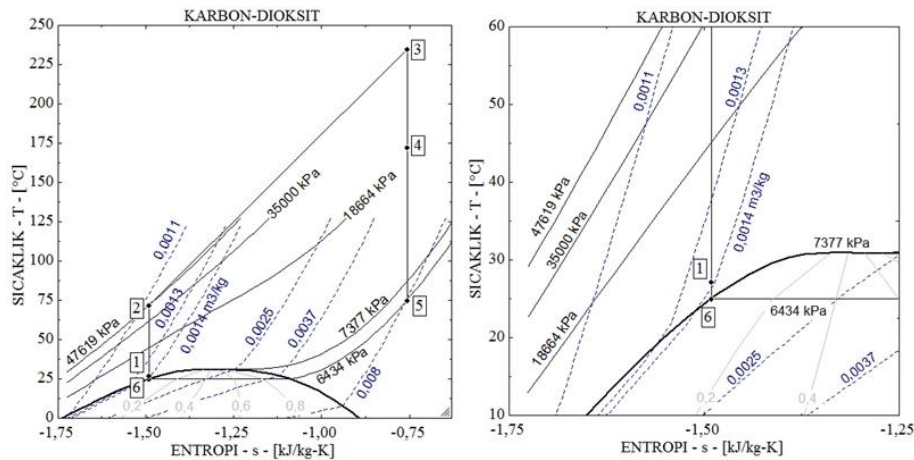
Gürgenci vd. [3] tarafından incelenen, yukarıda T-s ve P-h diyagramlarını verdiğimiz çevrimlere göre farklı rezervuar basınç ve sıcaklığına sahip, termosifon etkisinin çevrim içi döngüyü sağlayacak mertebede kabul edildiği Rankine çevriminin debisini, diğer çevrimlerin sonuçlarıyla kıyaslanması amacıyla, 277 kg/s kabul ederek elde edilen sonuçlar aşağıda tablo halinde sunulmuştur (Tablo 8).

Tablo 7. Pompalı CO₂ Güç Çevriminin Termodinamik Analiz Sonuçları (Results of thermodynamic analysis for the CO₂ Power Cycle with a Pump)

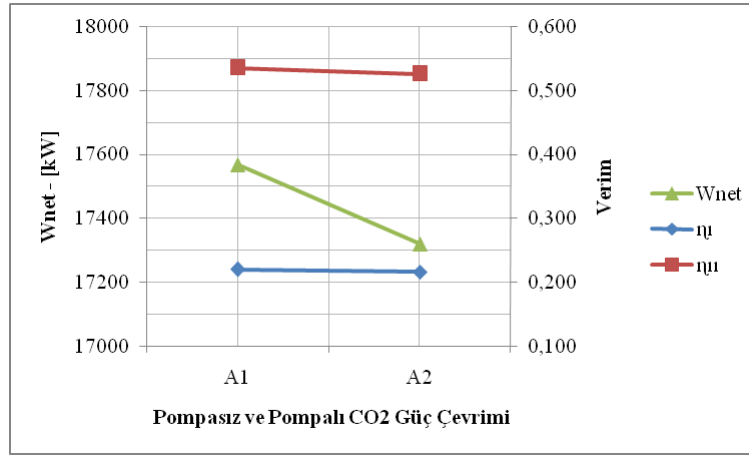
Proses	\dot{Q} [kW]	\dot{W} [kW]	\dot{S}_{gen} [kW.K ⁻¹]	\dot{I} [kW]	η_I	η_{II}
1-2 Enjeksiyon kuyusu (izantropik)	0	0	0	0	0,216	0,526
2-3 Jeotermal Rez. (Evaporator)	80000	0	46,906	13985		
3-4 Üretim kuyusu (izantropik)	0	0	0	0		
4-5 Türbin (adyabatik)	0	17653	0	0		
5-1 Yoğuşturucu	-62622	0	5,696	1698		
6-1 Pompa (adyabatik)	0	-333	0	0		
Çevrim	17378	17319	52,601	15683		



Şekil 3. a. Pompasız CO₂ Güç Çevriminin T-s diyagramı (T-s diagram of the CO₂ Power Cycle without a Pump) **b.** Pompasız CO₂ Güç Çevriminin P-h diyagramı (P-h diagram of the CO₂ Power Cycle without a Pump)



Şekil 4. a. Pompalı CO₂ Güç Çevriminin T-s diyagramı (T-s diagram of the CO₂ Power Cycle with a Pump) **b.** T-s diyagramında 1 ve 6 noktalarının yakınlştırılmış görünümü (Zoomed view of the points 1 and 6 in T-s diagram)



Şekil 5. Net iş, birinci ve ikinci kanun verimlerinin farklı CO₂ Rankine çevrimleri için aldığı değerler. **A1.** Pompasız, **A2.** Pompalı (Values of net work, the first and second law efficiencies for different CO₂ Rankine cycles. **A1.** Without pump, **A2.** With pump)

Tablo 3’de termodinamik özellikleri verilen iş akışkanı olarak CO₂ kullanan, pompasız, jeotermal enerji kaynaklı çevrimin birinci kanun verimi 0,281 olarak hesaplanmıştır (Tablo 8). Aynı çevrim Gürgenci vd. [3] tarafından incelenmiş ve birinci kanun verimi 0,295 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen çevrim verimi Gürgenci vd. [3]’nin elde etmiş olduğu verimden %1,4 daha düşük

Gürgenci vd. [3] tarafından incelenen, yukarıda T-s ve P-h diyagramlarını verdiğimiz çevrime göre karbon-dioksitin kritik üstü fazda kullanıldığı, termosifon etkisinin çevrim içi döngüyü sağlayacak mertebede kabul edildiği Brayton çevriminin T-s ve P-h diyagramı Şekil 6.a ve Şekil 6.b’de sunulmuştur.

Tablo 4’de termodinamik özellikleri verilen iş

Tablo 8. Farklı Enjeksiyon Şartlarında Çalışan Pompasız CO₂ Rankine Çevriminin Termodinamik Analiz Sonuçları (Results of the CO₂ Rankine Cycle without a Pump, working at different injection conditions)

Proses	\dot{Q} [kW]	\dot{W} [kW]	\dot{S}_{gen} [kW.K ⁻¹]	\dot{I} [kW]	η_I	η_{II}
1-2 Enjeksiyon kuyusu (izantropik)	0	0	0	0	0,281	0,683
2-3 Jeotermal Rez. (Evaporator)	86534	0	36,52	10706		
3-4 Üretim kuyusu (izantropik)	0	0	0	0		
4-5 Türbin (adyabatik)	0	24302	0	0		
5-1 Yoğuşturucu	-61526	0	3,07	899		
Çevrim	25008	24302	39,59	11605		

çıkıştır. İki çalışma arasındaki verim farklılığının karbon-dioksit aıt termodinamik değerlerin hesaplanmasındaki metod farklılığından olduğu tahmin edilmektedir.

Gürgenci vd. [3] tarafından incelenen, yukarıda T-s ve P-h diyagramlarını verdiğimiz çevrime göre karbon-dioksitin kritik üstü fazda kullanıldığı, termosifon etkisinin çevrim içi döngüyü sağlayacak mertebede kabul edildiği Brayton çevrimin debisini, diğer çevrimlerin sonuçlarıyla kıyaslanması amacıyla, 277 kg/s kabul ederek elde edilen sonuçlar aşağıda tablo halinde sunulmuştur (Tablo 9).

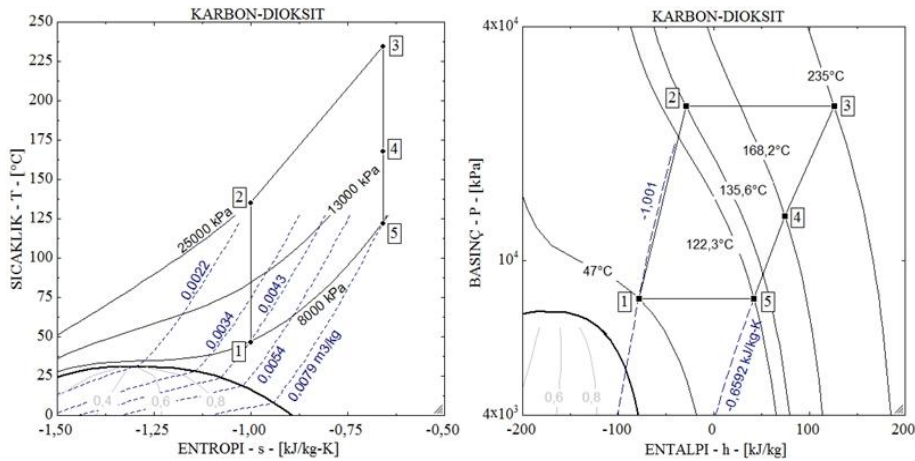
akışkanı olarak kritik üstü karbon-dioksit kullanan, kompresörün kullanılmadığı, jeotermal enerji kaynaklı çevrimin birinci kanun verimi 0,210 olarak hesaplanmıştır (Tablo 9). Aynı çevrim Gürgenci vd. [3] tarafından incelenmiş ve birinci kanun verimi 0,237 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen çevrim verimi Gürgenci vd. [3]’nin elde etmiş olduğu çevrim veriminden %2,7 daha düşük çıkıştır. İki çalışma arasındaki verim farklılığının karbon-dioksit aıt termodinamik değerlerin hesaplanmasındaki metod farklılığından olduğu tahmin edilmektedir.

Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan, jeotermal enerji kaynaklı pompasız Rankine ve Brayton çevrimlerinden elde edilen sonuçlara göre, çevrimlerin Termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu verimleri ile elde edilen net işin karşılaştırıldığı diyagram Şekil 7’de sunulmuştur.

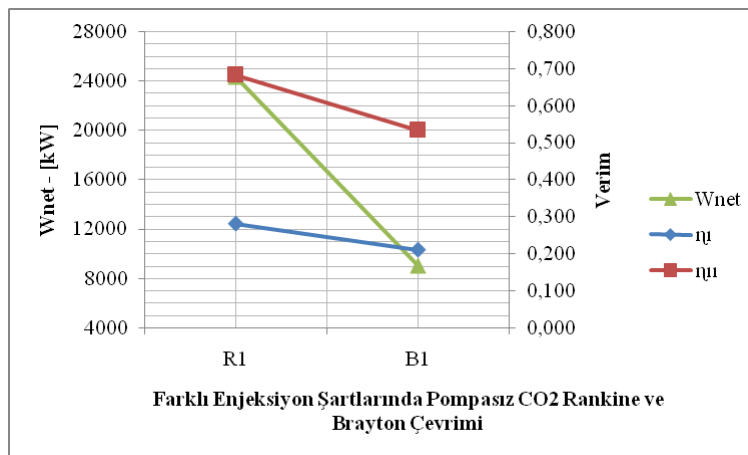
Çevrim içi döngünün pompa yardımıyla sağlandığı, iş akışkanı olan karbon-dioksitin rezervuara yaklaşık 7,4 MPa basınç ve 23 °C sıcaklıkta enjekte edildiği Rankine çevriminin debisi 278 kg/s kabul edilerek elde edilen sonuçlar aşağıda tablo halinde sunulmuştur (Tablo 10). Çevrim içi döngünün pompa yardımıyla sağlandığı Rankine çevriminde, karbon-

Tablo 9. Farklı Enjeksiyon Şartlarında Çalışan Kompresörsüz CO₂ Brayton Çevriminin Termodinamik Analiz Sonuçları (Results of Thermodynamic Analysis of the CO₂ Brayton Cycle without Compressor working at different injection conditions)

Proses	\dot{Q} [kW]	\dot{W} [kW]	\dot{S}_{gen} [kW.K ⁻¹]	\dot{I} [kW]	η_I	η_{II}
1-2 Enjeksiyon kuyusu (izantropik)	0	0	0	0	0,210	0,533
2-3 Jeotermal Rez. (Evaporator)	42954	0	10,087	2957		
3-4 Üretim kuyusu (izantropik)	0	0	0	0		
4-5 Türbin (adyabatik)	0	9016	0	0		
5-1 Yoğusturucu	-33266	0	18,859	5528		
Çevrim	9688	9016	28,945	8485		



Şekil 6. a. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan kompresörsüz CO₂ Brayton çevriminin T-s diyagramı (T-s diagram of the CO₂ Brayton Cycle without compressor working at different injection conditions) **b.** Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan kompresörsüz CO₂ Brayton çevriminin P-h diyagramı (P-h diagram of the CO₂ Brayton Cycle without compressor working at different injection conditions)



Şekil 7. Net iş, birinci ve ikinci kanun verimlerinin farklı CO₂ çevrimleri için aldığı değerler. **R1.** Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan pompasız Rankine çevrimi, **B1.** Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan kompresörsüz Brayton çevrimi (Values of net work, the first and second law efficiencies for different CO₂ cycles. **R1.** Rankine cycle without pump at different injection conditions, **B1.** Brayton cycle without compressor at different injection conditions,)

dioksit enjeksiyon kuyubaşı basıncı 7,4 MPa, sıcaklığı ise 23°C'dir. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan, jeotermal enerji kaynaklı pompalı ve pompasız Rankine çevrimlerinden elde edilen sonuçlara göre, çevrimlerin Termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu verimleri ile elde edilen net işin karşılaştırılması Şekil 8'de sunulmuştur.

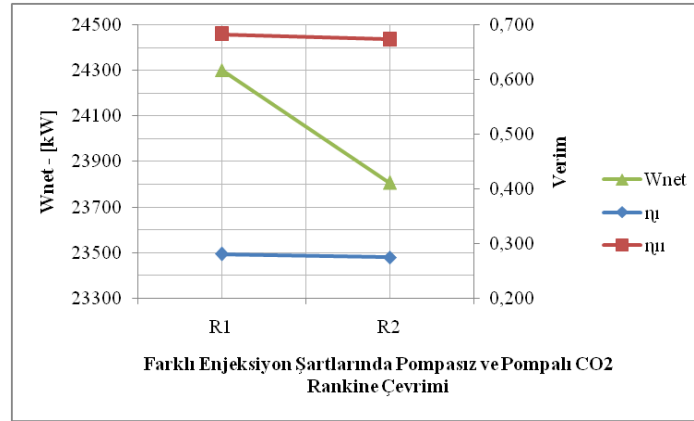
4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, dört değişik rezervuar giriş şartı için pompalı ve pompasız Rankine çevriminin ve kompresörsüz Brayton çevriminin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. İş akışkanı karbon-

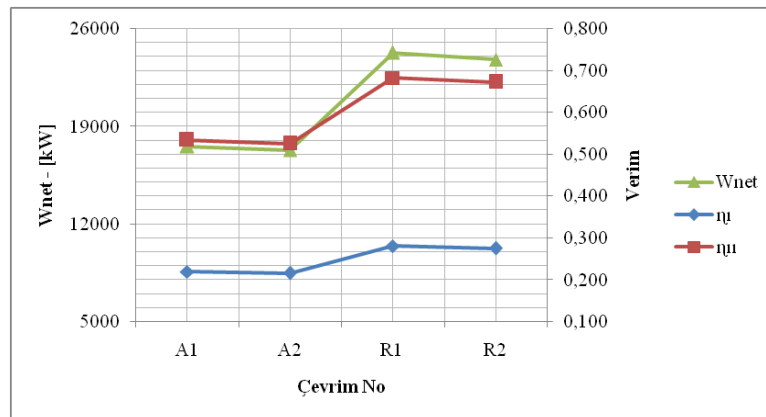
Tablo 10. Farklı enjeksiyon şartlarında çalışan pompalı CO₂ güç çevriminin Termodinamik Analiz Sonuçları

(Results of the CO₂ Power Cycle with a pump, working at different injection conditions)

Proses	\dot{Q} [kW]	\dot{W} [kW]	\dot{S}_{gen} [kW.K ⁻¹]	\dot{I} [kW]	η_I	η_{II}
1-2 Enjeksiyon kuyusu (izentropik)	0	0	0	0	0,275	0,673
2-3 Jeotermal Rez. (Evaporator)	86424	0	37,737	11063		
3-4 Üretim kuyusu (izentropik)	0	0	0	0		
4-5 Türbin (adyabatik)	0	24420	0	0		
5-1 Yoğuşturucu	-61824	0	3,082	903		
6-1 Pompa (adyabatik)	0	-612	0	0		
Çevrim	24600	23808	40,819	11966		



Şekil 8. Net iş, birinci ve ikinci kanun verimlerinin farklı CO₂ Rankine çevrimleri için aldığı değerler **R1**. Farklı enjeksiyon şartlarında pompasız, **R2**. Farklı enjeksiyon şartlarında pompalı (Values of net work, the first and second law efficiencies for different CO₂ Rankine cycles. **R1**. Different injection conditions without pump, **R2**. Different injection conditions with pump)



Şekil 9. Net iş, birinci ve ikinci kanun verimlerinin farklı CO₂ Rankine çevrimleri için aldığı değerler **A1**. Pompasız, **A2**. Pompalı, **R1**. Farklı enjeksiyon şartlarında pompasız, **R2**. Farklı enjeksiyon şartlarında pompalı

(Values of net work, the first and second law efficiencies for different CO₂ Rankine cycles. **A1**. Without pump, **A2**. With pump, **R1**. Different injection conditions without pump, **R2**. Different injection conditions with pump)

dioksitin rezervuara enjekte edildiği pompasız ile pompalı çevrimlerin termodinamik analizinde, entropi üretimi sonuçları pozitif çıkmıştır. Bütün çevrimlerdeki sonuç, çevrimin uygulanabilir olduğunun bir göstergesidir.

Önerilen güç çevrim modelinin doğruluğunu test etmek amacıyla, Gürgenci vd. [3] tarafından belirlenen çevrim verileri kullanılarak model çalıştırılmıştır ve pompasız Rankine çevrimi için birinci kanun verimi Gürgenci vd.'lerinin hesapladığı verimden sadece % 1,4 düşük, kompresörsüz Brayton çevrimi için birinci kanun verimi ise % 2,7 düşük hesaplanmıştır. Bu farklılıkların, karbon-dioksite ait termodinamik değerlerin hesaplanmasındaki metod farklılığından olduğu tahmin edilmektedir.

Analiz sonuçları incelendiğinde pompanın kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlardaki birinci ve ikinci kanun verimleri birbirine yakın çıkmıştır. Bunun yanında karbon-dioksitin kritik üstü fazda kullanıldığı çevrim dışındaki farklı enjeksiyon şartlarında çalışan pompasız ve pompalı güç çevrimlerinin birinci ve ikinci kanun verimleri, çevre sıcaklığının 25°C olarak kabul edildiği sisteme göre daha yüksek çıkmıştır (Şekil 9). Termosifon etkisinin çevrim içi akışkan döngüsünü sağlayamayacak mertebede kabul edildiği sistemde pompanın kullanımı, Termodinamiğin birinci yasasına göre, çevrim verimini ilk sistemde %0,4 ikinci sistemde ise % 0,6 azaltmıştır.

İncelenen bu çevrimlerin uygulanabilirliğinin değişik rezervuar giriş şartlarına göre analiz edilerek optimum işletim parametrelerinin tayin edilmesi ileride yapılması planlanan çalışmalar arasındadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başlatılmasında fikir öncülüğü yapan ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Bekir Zühtü Uysal'a şükranlarımızı sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] BROWN, D.W., "A Hot Dry Rock Geothermal Energy Concept Utilizing Supercritical CO₂ Instead of Water", **Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering**, Stanford University, SGP-TR-165, 2000.
- [2] PRUESS, K., "Enhanced Geothermal Systems (EGS) Using CO₂ as Working Fluid – A Novel Approach for Generating Renewable Energy with Simultaneous Sequestration of Carbon", **Geothermics** 35, 351-367, 2006.
- [3] GURGENCI, H., RUDOLPH, V., SAHA, T., LU, M., "Challenges for Geothermal Energy Utilisation", **Thirty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering**, Stanford University, SGP-TR-185, 2008.
- [4] ZHANG, X.R., YAMAGUCHI, H., UNENO, D., FUJIMA, K., ENOMOTO, M., SAWADA, N., "Analysis of a Novel Solar Energy-powered Rankine Cycle for Combined Power and Heat Generation Using Supercritical Carbon-dioxide", **Renewable Energy**, 31, 1839-1854, 2006.
- [5] ATRENS, A., GURGENCI, H., RUDOLPH, V., "Exergy Analysis of a CO₂ Thermosiphon", **Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering**, Stanford University, SGP-TR-187, 2009.
- [6] ATRENS, A.D., GURGENCI, H., RUDOLPH, V., "CO₂ Thermosiphon for Competitive Geothermal Power Generation", **Energy&Fuels** 23, 553-557, 2009.
- [7] HAALAND, S.E., "Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow", **J Fluid Eng ASME** 105(1): 89-90, 1983.
- [8] WHITE F. M., "Fluid Mechanics", **McGraw-Hill**, Boston, MA, USA, 864, 2008.

Semboller (Nomenclature)

\dot{m}	kütle debisi, (kg s ⁻¹)	\dot{W}	iş, (kW)
h	entalpi, (kJ kg ⁻¹)	$\dot{W}_{kayıp}$	kayıp iş, (kW)
s	entropi, (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	\dot{W}_{tr}	tersinir iş, (kW)
u	toplam iç enerji, (kJ kg ⁻¹)	\dot{Q}	birim zamanda ısı geçişi, (kW)
v	özgül hacim, (m ³ kg ⁻¹)	\dot{I}	toplam tersinmezlik, (kW)
x	kuruluk derecesi	\dot{E}	ekserji (kW)
P	basınç, (MPa)	η_I	birinci yasa verimi
T	sıcaklık, (K)	η_{II}	ikinci yasa verimi
T_0	ortam sıcaklığı, (K)	f	Sürtünme faktörü
T_{rez}	rezervuar sıcaklığı, (K)	Re_D	Reynolds sayısı
D	Kuyu çapı, (m)	Δz	Yükseklik farkı, (m)
g	Yer çekim ivmesi, (m s ⁻²)	ρ	Yoğunluk, (kg m ⁻³)
\dot{S}_{gen}	toplam entropi üretimi, (kW K ⁻¹)		