

YÜKSEK MİKTARDA YOĞUŞMAYAN GAZ İÇEREN SAHALARDA KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRAL KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

An Evaluation Of Single Flash Geothermal Power Plants With Bottoming ORC Units At High NCR Content

Baran KAYPAKOGLU
Ugo BARBON

ÖZET

Organik rankin çevrimlerinin buhar türbinleri ile seri bir biçimde kullanılması, konvansiyonel buhar türbini çevrimlerine kıyasla bazı avantajları beraberinde getirmekte. En gözle görünür avantajlardan biri, buhar yoğuşması atmosferik basıncın üstünde gerçekleştiği için, yoğuşmayan gazların çıkarılmasının ekstra güç gerektirmemesi. Fakat, organik rankin çevrimleri, konvansiyonel buhar çevrimlerine kıyasla daha düşük bir termal verime sahip oldukları için, bu kombinasyon toplam olarak daha düşük bir üretime yol açmaktadır. Durum böyle olmasına rağmen, eğer buhar içindeki gaz, ekstrasyon sistemine fazla yük olacak kadar yüksek miktarda ise, organik rankin ünitesi kombinasyonu daha avantajlı bir opsiyon haline gelebilir. Bu çalışmada, yaklaşık olarak hangi NCG (Non Condensable Gases - Yoğuşmayan Gazlar) oranında organik rankin çevriminin bottoming ünitesi olarak kullanılmasının konvansiyonel buhar çevrimine kıyasla daha avantajlı hale geldiğini araştıracağız.

Anahtar Kelimeler: Rankin çevrimi, Jeotermal Enerji, kondense olmayan gazlar, kombine çevrim

ABSTRACT

The use of ORC bottoming units in series with steam turbines bring forth some advantages compared to single flash units with conventional cooling circuits. One of the most evident advantages is that an ORC unit does not require power for the extraction of non-condensable gases since the condensing process takes place at a pressure higher than atmospheric pressure. However, the ORC unit has lower thermal efficiency compared to conventional single flash units, and therefore the power produced with this integration is lower in terms of overall produced net power. Although this is the case, the use of an ORC as a bottoming unit might help produce more overall net power in cases where the NCG content is high enough to make the gas extraction process demanding in terms of power consumption. In this study, we will try to identify roughly at which percentage of NCG content in steam, the use of an ORC as a bottoming unit will be advantageous against the conventional single flash cycle in terms of net power production.

Key Words: Indonesia, Geothermal Energy, Energy saving, Solar heating.

GİRİŞ

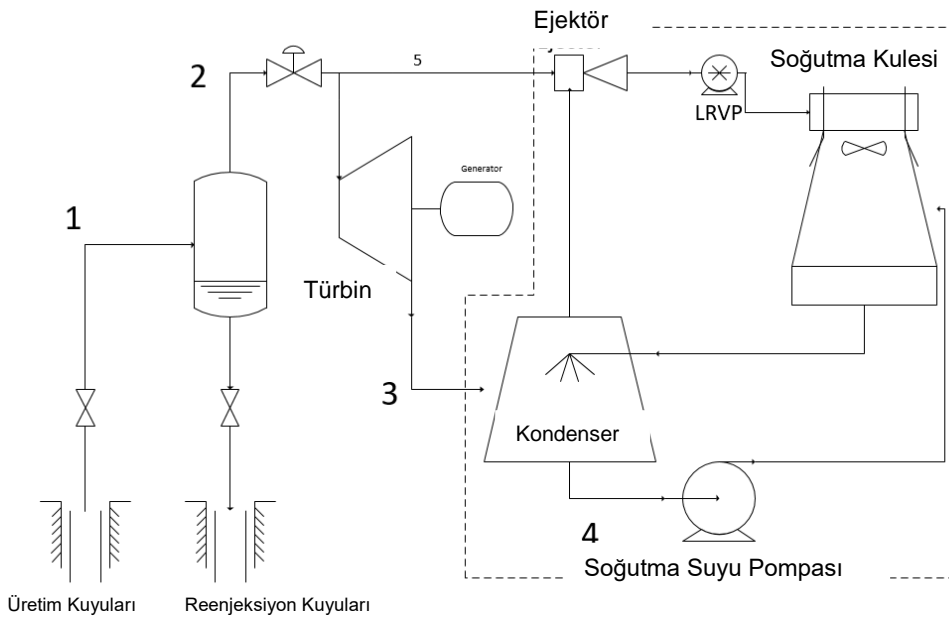
Bu çalışmada, konvansiyonel bir tek flaş buhar santralini, organik rankin çevrimi ile seri bağlayıp, konvansiyonel çevrim ile kombine çevrim arasındaki net güç üretim farkını ve bu farkın farklı yoğuşmayan gaz miktarlarındaki değişimini incelenmiştir. Tek flaş buhar santral değerleri şu an operasyonda olan gerçek bir santralden alınmıştır. Organik rankin çevrimi proses koşulları ise Sarulla sahasında kullanılan değerler ile hesaplanmıştır [1]. Not edilmelidir ki, rankin çevrimi her ne kadar faz ayrışmasından sonra direkt olarak reenjeksiyona gönderilen sıvının da kullanılmasına olanak sağlasa

da, amacımız konvansiyonel çevrim ile kombine çevrimi aynı koşullarda, aynı ısı miktarları ile kıyaslamaktır. Bu sebep ile, kabuklaşma potansiyeli de göz önünde bulundurularak, reenjeksiyona gönderilen sıvı güç üretimi için kullanılmayacaktır.

1. TEK FLAŞ BUHAR SANTRALİ

Tek flaş buhar santralleri, basit ve düşük maliyetli olmaları sebebi ile dünyada en çok kullanılan jeotermal santrallerdir. Kuyulardan gelen çift fazlı akışkanın separatörlerde ayrıştırılan buharı ile çalışırlar.

Bu çalışmada ele alacağımız santral 5.77 bara basınçta 269.2 t/h doymun buhardan 37,163 kW brüt güç üretmektedir. Üretim değerleri Endonezya'da üretimde olan gerçek bir santralden alınmıştır. Santralin basit bir şeması Şekil 1 de gösterilmektedir.



Şekil 1. Tek Flaş Jeotermal Buhar Santrali Şematik Gösterimi

Şekil 1'de görüldüğü gibi çift faz akışkan seperatörde ayrıştırılmakta, buhar türbine, sıvı ise reenjeksiyona geri gönderilmektedir. Seperatör basıncı akışkanın silika doymunluğu ile orantılıdır. Seperatörde ayrışan buhar türbine gider ve şaftı döndürüp jeneratörde elektrik üretilmesini sağlar. Buharın bir kısmı türbinde kondense olur ve çift faz olarak vakum halindeki kondensere gönderilir. Burada tüm buhar kondense olur ve soğutma suyu pompaları ile soğutma kulesine aktarılır. Kondenserdeki yoğuşmayan gazlar ejektör ve vakum pompalarından oluşan hibrid bir gaz ekstraksiyon sistemi ile emilir ve atmosfere salınır. Sonuç olarak çevrimde ana iç tüketim ekipmanları soğutma suyu pompaları, soğutma kulesi fanları ve vakum pompasıdır. Bunların dışında türbin ve jeneratör soğutmaları içinde düşük miktarda bir enerji gerekmektedir.

Tablo 1. Buhar Türbini Proses Koşulları

	Giriş	Çıkış
Basınç, bara	5.77	0.08
Sıcaklık, °C	158.3	41.6
Debi, t/h	269.2	269.2
Buhar Oranı	1	0.87
Şaft Gücü, kW	37,921	
İzentropik Verim	%79.6	

Tablo 1 de gösterilen koşullar ile hesaplanan güç ve iç tüketim değerleri aşağıdaki gibidir

Tablo 2. Üretilen Güç ve İç Tüketim Değerleri

	Güç, kW
Turbine Şaft Gücü	37,921
Jeneratör	37,163
Soğutma Suyu Pompası	968.2
Soğutma Kulesi Fanları	298.4
Vakum Pompası	475.2
Santral Net Üretimi	35,412

Jeneratör verimi %98 kabul edilerek santral net üretimi 35,412 kW olarak hesaplanmıştır. İzentropik türbin verimi Baumann kuralı ile, kurulum verimi %85 kabul edilerek %79.6 olarak hesaplanmıştır [2]. Dikkat edilmelidir ki türbine giden buhar aslında 267.5 t/h'dir. 1.7 t/h buhar ejektörler tarafından kullanılmaktadır.

2. RANKİN ÇEVİRİMİ SANTRALİ

Eğer jeotermal kaynağın entalpi değeri düşük ise, separatördeki buharlaşma prosesi buhar türbinini verimli bir biçimde çalıştırmaya yetecek basınçta ve debide buhar üretmez. Bu durumda, buharlaşma sıcaklığı düşük ikinci bir akışkan buharlaştırılıp, bir gaz türbini aracılığı ile elektrik üretilebilir. Çift çevrimli santraller bu prensip ile çalışmaktadır. Çift çevrimli santraller düşük entalpili jeotermal sahalardan elektrik üretimini mümkün kıldıkları için yüksek bir öneme sahiptirler. Fakat, Endonezya Sarulla sahası gibi yüksek entalpili jeotermal kaynaklar için de kullanımı söz konusu olmuştur.

3. RANKİN ÇEVİRİMİNİN TEK FLAŞ SANTRALİNE ENTEGRE EDİLMESİ

Bu çalışmada amacımız Şekil 1 de gösterilen kesik çizikli bölme yerine bir rankin çevrimi yerleştirmektir. Öncelikle türbin çıkış basıncı belirlenir. Isı eşanjöründe gerçekleşecek basınç kaybı 0.25 bar kabul edilerek türbin çıkış basıncı 1.25 bara olarak alınmıştır ki bu değer hali hazırda operasyonda olan kombine çevrimler ile örtüşmektedir. 1.25 bara çıkış basıncı ile hesaplanan türbin üretim değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Görüldüğü üzere, çıkış basıncını arttırmanın getirdiği bir avantaj, çıkışta daha yüksek kurulum oranı sayesinde türbinin biraz daha verimli çalışmasıdır.

Tablo 3. Çıkış Basıncı artışı ardından Buhar Türbini Proses Koşulları

	Giriş	Çıkış
Basınç, bara	5.77	1.25
Sıcaklık, °C	158.3	105.8
Debi, t/h	269.2	269.2
Buhar Oranı	1	0.94
Şaft Gücü, kW	16,406	
İzentropik Verim	%82.5	

3.1 Rankin Çevrimi Tasarım Parametreleri

Santral tasarımında kullanılan termodinamik hesaplar için Microsoft Excel ile CoolProp kullanılmıştır. CoolProp ücretsiz dağıtılan, 100'den fazla akışkanı barındıran bir termodinamik kütüphanedir.

Rankin çevrimini optimize etmeden önce bazı sabit tutulacak değerlere karar verilmesi gerekmektedir. Bu değerler ikincil akışkanın buharlaşma ve soğuma sıcaklığıdır. İkincil akışkanın buharlaşma sıcaklığı buharın yoğuşma sıcaklığına bağlıdır. Genel olarak iki değer arasında 10°C sıcaklık farkı kullanılır. Buhar yoğuşma sıcaklığı 105.8°C olacağından (1.25 bara doyumluk sıcaklığı), ikincil akışkan buharlaşma sıcaklığı 95.8° olarak seçilmiştir.

İkincil akışkan buharı türbinde genleştikten sonra tekrar yoğuşmak üzere hava soğutma sistemine gidecektir. Ortalama hava sıcaklığını 25° kabul edip, endüstride kullanılan fark sıcaklıklarını göz önünde bulundurup, yoğuşma sıcaklığını 32°C olarak alacağız.

3.2 Isı Transfer Hesapları

ORC hesaplarına başlamadan önce, buhardan ne kadar ısı alınabileceği hesaplanmalıdır. Buharın tamamını yoğuşturursak elde edeceğimiz ısı:

$$(\hat{h}_{\text{vapor}} - \hat{h}_{\text{liquid}}) * \dot{m} = 161,221 \text{ kW} \quad (1)$$

olarak hesaplanır. Burada h_{vapor} ve h_{liquid} sırasıyla 105.8°C'deki buhar ve sıvı entalpileri, \dot{m} ise toplam buhar debisi olan 269.2 t/h dir. Bu değer tek flaş santral çevriminde ejektörler için sarf edilen buharı da kapsamaktadır.

Buhar yoğuştuktan sonra sıcaklığının 60°C' ye kadar düşürülmesi öngörülmüştür. Bu soğumadan elde edilen ısı:

$$(\hat{h}_{@105} - \hat{h}_{@60}) * \dot{m} = 10,028 \text{ kW} \quad (2)$$

Şeklinde hesaplanır. h değerleri 106°C ve 60°C 'ye tekabül eden sıvı entalpi değerleridir. Daha fazla soğuma kayda değer bir getiri sağlamayacağı gibi, kabuklaşmayı da tetikleyebilir. Bu nedenle 60°C altına inilmemiştir. Eğer gerçek bir santral tasarımı yapılıyor olsaydı, kabuklaşma ihtimalleri ampirik testler ile incelendikten sonra soğuma sıcaklığına karar verilebilirdi.

Sonuç olarak, ikincil akışkanı buharlaştırmak üzere toplam 171250 kW ısı bulunmaktadır.

Deneme yanılma yöntemi ile n-bütan'ın, n-pentane'a kıyasla daha yüksek türbin üretim değerleri elde ettiği görülmüştür. Bunun sebebi bütan'ın buharlaşma sıcaklığı noktasının sistemi yoğuşma sıcaklığı değeri ile daha uyumlu olmasıdır.

Bu noktada ikincil akışkan miktarı hesaplanabilir:

$$\dot{m} = \frac{171,250}{\hat{h}_{\text{vapor}@95} - \hat{h}_{\text{liquid}@32}} = 1392.3 \text{ t/h} \quad (3)$$

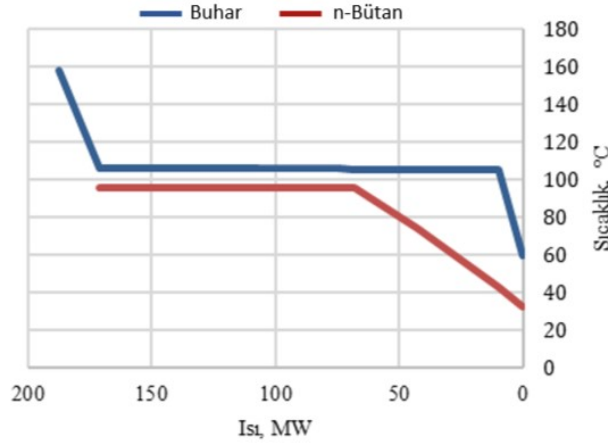
Burada $\hat{h}_{\text{vapor}@95}$ bütanın 95.8°C 'de buhar, $\hat{h}_{\text{liquid}@32}$ ise 32°C 'de sıvı entalpisidir. Bundan sonra ön ısıtma ve buharlaşma için gerekli ısı yükleri hesaplanabilir. N-Bütanı 32°C'den 95.8°C'ye çıkarmak için gereken ısı:

$$(\hat{h}_{@95} - \hat{h}_{@32}) * \dot{m} = 67,719 \text{ kW} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır. n-bütanı buharlaştırmak için gereken ısı:

$$(\hat{h}_{V95} - \hat{h}_{L95}) * \dot{m} = 103,531 \text{ kW} \quad (5)$$

olarak hesaplanmıştır. Isı transfer işlemi bir T-H diyagramı ile Şekil 2'deki gibi özetlenebilir.

**Şekil 2.** ORC T-H Diyagramı

3.3 ORC Türbin Üretimi

ORC türbin üretimini hesaplamak için, türbin çıkışındaki entalpi değerinin bilinmesi gerekmektedir. Türbin çıkış entalpisi sıcaklık ve basınca bağlıdır. Çıkış basıncının 32°C'deki doymuluk basıncına eşit olduğu bilinmektedir. Eksik olan değer sıcaklıktır, ki bu da türbinin izentropik verimi kullanarak hesaplayabilir.

ORC türbin izentropik verim değerleri %86 ile %90 arasında değişmektedir. İzentropik verim aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta_t = \frac{W_{actual}}{(h_{inlet} - h_{outlet iso}) * \dot{m}} \quad (7)$$

Burada $h_{outlet iso}$ türbinin %100 izentropik verimine tekabül eden çıkış entalpisidir. Türbin çıkış sıcaklığı türbin izentropik verimi %86'ya denk gelene kadar iterasyona tabi tutularak hesaplanmıştır. Türbin gücü ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$W = (h_{inlet} - h_{outlet}) * \dot{m} \quad (6)$$

Dolayısı ile ORC türbini proses değerleri aşağıdaki tabloda gösterildiği gibidir.

Tablo 4. ORC Türbini Proses Koşulları

	Giriş		Çıkış
T, °C:	95.8		49.9
P, bara:	14.09		2.99
h, kJ/kg:	716.6		630.6
s, kJ/kg.K:	2.49		2.42
Güç : 21,506 kW			İzentropik Verim: 86%

3.4 İç Tüketim Hesapları

Türbin çıkışındaki bütanın yoğuşturulması gerekmektedir. Yoğuşma için gereken toplam ısı yükü:

$$(h_{t out} - h_{g32}) * \dot{m} = 150,758 \text{ kW} \quad (8)$$

şeklinde hesaplanır. Organik rankin çevrimlerinde genelde hava soğutmalı kondenserler kullanılır. Bu kondenser için gerekli fan gücü empirik korelasyonlar ile hesaplanmıştır. Bazı projelerden biliniyor ki yaklaşık 150,000 kW termal güç yaklaşık 1,300 kW fan gücü gerektirmektedir. Lineer bir ilişki kurarak ihtiyacımız olan fan gücünü 1,311 kW olarak hesaplayabiliriz.

İkincil akışkan pompasının enerji tüketimi:

$$P = (\dot{m} * p * g * h / \eta) / 3.6E6 = 1,014 \text{ kW(9)}$$

şeklinde hesaplanır. Burada \dot{m} m³/saat cinsinden debi, p kg/m³ cinsinden bütan yoğunluğu, g m/s² cinsinden yerçekimi, h metre cinsinden hidrolik yük ve η 65% olarak kabul edilmiş pompa verimidir.

4. TEK FLAŞ ÇEVİRİMİ İLE KOMBİNE ÇEVİRİMİN KIYASLANMASI

Bu bölümde iki alternatifin güç üretimleri karşılaştırılmıştır.

Güç üretimi ve termal verim karşılaştırması aşağıdaki tabloda verilmektedir. Verim hesabı için kullanılan eşitlik:

$$\eta_{\text{net}}(\%) = \frac{W}{\dot{m} * h} * 100 \quad (11)$$

Burada W üretilen net güç, \dot{m} toplam buhar miktarı ve h türbin girişindeki sıvı entalpisidir. Bu durumda kütle ve entalpi değerleri iki alternatif için de aynıdır.

Tablo 5. Güç üretimi ve verim bakımından karşılaştırma

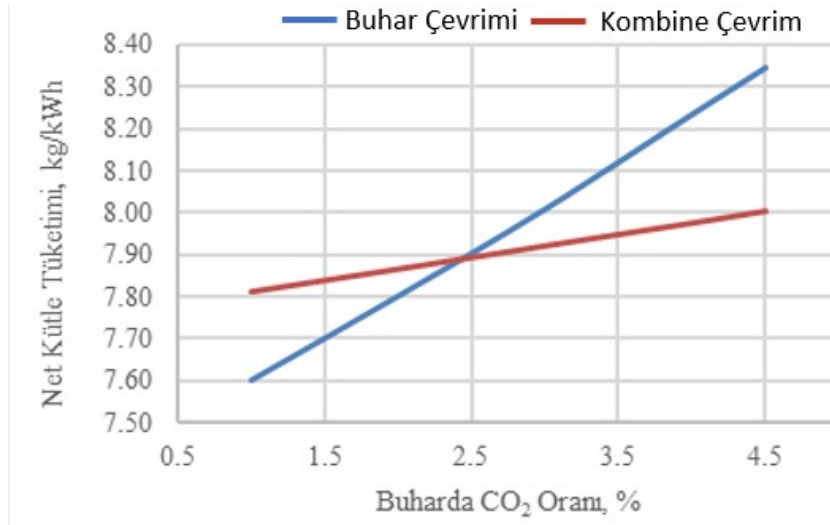
	Tek Flaş Santrali	Kombine Çevrim Santrali
Generator Power, kW	37,163	37,154
Net Power, kW	35,412	34,830
Efficiency: %	%17.1	%16.9

Sonuç olarak iki alternatif de güç üretimi bakımından birbirine çok yakındır. Rankin çevrim santralleri tek flaş santrallara kıyasla daha düşük verime sahip olduğu için kombine çevrimin daha düşük güç üretmesi beklenebilirdi. Verim değerlerinin ve dolayısı ile üretilen güçlerin birbirine yakın olmasının sebebi buhar türbin çıkış basıncındaki artışın türbin verimine olumlu etkisinden kaynaklanmaktadır.

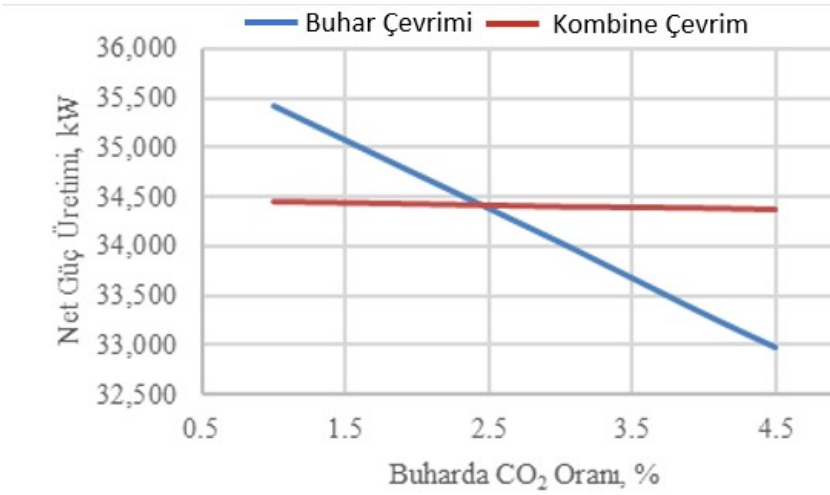
Bir organik rankin çevriminde buhar yoğuşması atmosfer basıncının üstünde gerçekleşir ve dolayısı ile yoğuşmayan gazlar ekstra ekipman ve enerji gerektirmeden atmosfere salınabilir. Bu sebepten, iki alternatif farklı yoğuşmayan gaz oranlarında karşılaştırması öngörülmüştür. Beklenti yoğuşmayan gazların yeterince yüksek olduğu bir noktada kombine çevrim santral veriminin konvansiyonel çevrime kıyas ile hatırı sayılır derecede yüksek olmasıdır.

4.1 Artan Yoğuşmayan Gaz Oranı ile Kıyaslama

İki çevrim de %4.5 karbon dioksit oranına kadar %1'lik artışlar ile modellenmiştir. Aşağıdaki figürler %0.5 ile %4.5 arasındaki karbon dioksit miktarı değişimlerine karşılık gelen net güç üretimi ve çevrim verimlerini göstermektedir.



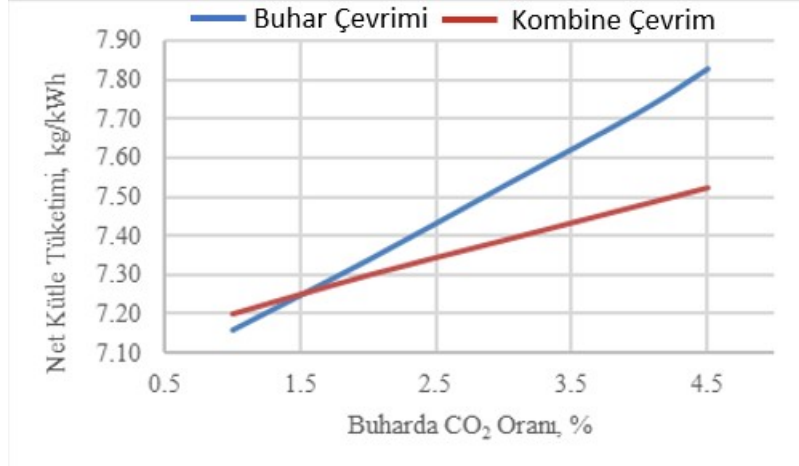
Şekil 3. Net Kütle Tüketim Kıyaslaması



Şekil 4. Üretilen Net Gücün Kıyaslaması

Şekillerden de görüleceği gibi, kombine çevrim santrali %2.5 karbondioksit miktarı ve üstünde kombine çevrime kıyasla daha avantajlı hale gelmektedir.

Aynı hesapları daha yüksek türbin giriş basıncı ile yaptığımızda ayrışma noktasının daha da aşağıya indiği görülmektedir. Örneğin 7.5 bara türbin giriş basıncı değeri ile yapılan hesap sonuçları aşağıdaki gibidir:



Şekil 5. Yüksek Türbin Giriş Basıncı ile Verim Kıyaslaması

Bu durumda kombine çevrim santrali tek flaş çevrime kıyasla %1.5 CO₂ oranında daha verimli hale gelmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada tek flaş buhar çevrimi santrali ile aynı koşullarda bir kombine çevrim santral karşılaştırılmıştır. Düşük yoğuşmayan gaz oranlarında iki opsiyon arasında ciddi bir fark bulunmaz iken, gaz oranı arttıkça kombine çevrimin daha verimli bir seçim olduğu görülmüştür. Buhar basıncı arttıkça, kombine çevrimin daha düşük CO₂ oranlarında da avantajlı hale geldiği gözlenmiştir. İleriki çalışmalarda iki alternatif çevrim yatırım maliyeti bakımından da kıyaslanıp, jeotermal sahaların spesifik termodinamik ve kimyasal özelliklerine göre uygun güç üretim üniteleri tavsiye eden bir algoritma yazılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Nir Wolf, Amnon Gabbay., 2015 Sarulla 330 MW Geothermal Project Key Success Factors in Development, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne Australia 19-25 April 2015
- [2] DiPippo, R., 2005. Geothermal Power Plants: Principles, Applications and Case Studies, Elsevier Advanced Technology

ÖZGEÇMİŞ

Baran KAYPAKOGLU

1984 İzmir doğumludur. 2009 yılında Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünden mezun olmuştur. 2014 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Jeotermal Enerji yüksek lisansını tamamlamıştır. 2012-2015 yılları arasında Maren Enerji Şirketinde Rezervuar Sorumlusu ve Ar-Ge müdürü olarak görev almış, 2015 yılından itibaren Endonezya'da ELC- Electroconsult firmasında Power Engineer olarak çalışmakta ve Endonezya hükümetine danışmanlık hizmeti sunmaktadır.

Ugo BARBON

1976 Milano doğumlu İtalyan vatandaşıdır. 1999 yılında Milano Politeknik Üniversitesinden Makine Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2001'den bu yana hidroelektrik, jeotermal ve termal güç santral projelerinde çalışmaktadır. Şu an Endonezya'da ELC-Electroconsult firmasında Hululais Projesinin Proje Müdürlüğü yürütmektedir.