



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **ORC JEOTERMAL ENERJİ SANTRALI DOĞASINDA MEVCUT OLAN BELİRSİZLİKLERLE NASIL BAŞA ÇIKILIR?**

**REZA AGAHI  
MUSTAFA İNANLI  
ATLASCOPCO**



# ORC JEOTERMAL ENERJİ SANTRALİ DOĞASINDA MEVCUT OLAN BELİRSİZLİKLERLE NASIL BAŞA ÇIKILIR?

Reza AGAHI  
Mustafa İNANLI

## ÖZET

Orta ve düşük entalpili jeotermal kaynaklarda Organik Rankine Çevrimi (ORC) uygulamaları yükseliştir. Bir Jeotermal ORC Enerji Santrali genel olarak iki adet işletme parametresinin olasılıkları ile ilgilenir. Bahsedilen bilinmeyenler jeotermal kaynak şartları ve dış ortam sıcaklığıdır.

Jeotermal ORC santrali ilksel tasarımı tahmin edilen veya test edilen kaynak şartlarına dayandırılır. Enerji santralinin işletmeye geçmesinden sonra kısa dönemde veya uzun dönemde jeotermal kaynağın aynı karakteristikleri sağlayacağı hakkında herhangi kesinlik yoktur.

Bu, aynı zamanda tasarım aşamasında kabul edilen dış ortam sıcaklığı değeri için de geçerlidir. Ortalama dış ortam sıcaklığının yıllar boyunca alınan pek çok ölçüme dayandığı doğrudur. Ancak santralin işletmesi esnasında herhangi bir andaki dış ortam sıcaklığı başa çıkılması gereken bir bilinmeyendir.

Türbin, ORC santralindeki önemli donanımdır. ORC santrali tedarikçileri tarafından başarı ile monte edilmiş olan çeşitli tipte türbinler mevcuttur. Radyal girişli türbin, Radyal çıkışlı türbin ve eksenel türbin, ORC santralinde en yaygın olarak kullanılan türbin tasarımlarıdır. Tüm türbinlerin tasarım noktasındaki performansları aynı olacak şekilde ayarlanabilir. Türbinin tasarım noktası dışındaki şartlardaki performansı üzerinde ise yeterince kontrol olmamaktadır. Dizayn dışı şartlarda işletme esnasındaki türbin verimi ise türbomakinaların çalışma yasalarına uyacaktır.

Gerçek şudur ki, bir ORC enerji santralindeki türbin daima tasarım dışı şartlarda çalışmaktadır. Bu, ya kaynak şartlarındaki değişimlerden, ya da dış ortam sıcaklığındaki değişimlerden veya her ikisinin kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, ORC enerji, santralinde mevcut ORC türbininin tasarım dışı şartlardaki çalışma performans karakteristikleri çok önem taşımaktadır.

Bu makalede yazarlar, Türkiye de bir ORC santralinde mevcut olan Radyal girişli türbinin tasarımına karşılık saha performansı ile ilgili detaylı bir analiz sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Organik Rankin Çevrimi, Radyal Girişli Türbin, Değişken Geometrilili Türbin, Ayarlanabilir Değişken Giriş Kılavuz Kanatçıkları, Sabit Geometrilili Türbin.

## ABSTRACT

Application of Organic Rankine Cycle for medium and low enthalpy geothermal resources is on the rise. A geothermal ORC power plant is generally dealing with two probabilistic operating parameters. The latter unknowns are geothermal resource conditions and ambient temperature.

The original design of a geothermal ORC plant is based on the predicted or even tested resource conditions. There is no certainty if the resource provides the same characteristics during short or long term power plant operations.

The same applies to an ambient temperature that was assumed at design stage. It is true that the average ambient temperature is determined based on many measurements over many years. The ambient temperature at any given time during plant operation though is an unknown that should be dealt with.

Turbine is an important equipment in any ORC plant. There are several types of turbines that successfully have been installed by ORC plant suppliers. Inflow radial turbine, outflow radial turbine and axial turbine are among the most commonly used turbine designs in ORC power plant. The design point performance for all turbines could be set to be the same. There could be not much control on the turbine's off design performance. The turbine efficiency will be in accordance to the turbomachinery laws when operating in off design conditions.

The reality is that the turbine of an ORC plant always operates in an off design conditions. This could be either due to deviations in resource conditions or changes in ambient air temperature or a combination of both. Therefore the off design performance characteristics of an ORC turbine should be of great importance in an ORC plant.

In this paper the author presents a detailed analysis of design versus field performance of an inflow radial turbine in a geothermal ORC plant in Turkey.

**Key Words:** Organic Rankine Cycle, Inflow Radial Turbine, Variable Geometry Turbine, Variable Inlet Guide Vanes, Variable Geometry Turbine, Fixed Geometry Turbine

## 1. GİRİŞ

Jeotermal kaynaklara sahip tüm ülkelerde orta ve düşük entalpili jeotermal kaynakların kullanımı yükseliştir. "Flash" sistemine göre tasarlanmış mevcut yüksek entalpili jeotermal enerji santralleri de, Reenjeksiyon öncesinde santralden çıkan brine da yer alan termal enerjiyi de geri kazanacak şekilde bir son çevrimi hayata geçirebilmek için fizibilite çalışmaları yapmaktadır. "Bottoming Cycle" diye nitelenen bu son çevrim, yeni tasarlanan jeotermal flash santrallere de eklenmektedir.

Neredeyse tüm düşük ve orta entalpili sahalara kurulan jeotermal santraller, Organik Rankine Çevrimi üzerine tasarlanmaktadır. Kalina çevriminin baz alındığı (KC) bir kaç santralde bulunmaktadır.

Bir jeotermal ORC veya KC enerji santrali Jeotermal Kaynak ve Dış Ortam Şartları olmak üzere 2 adet majör belirsizlik ile karşılaşmaktadır.

Bir jeotermal kaynağın şartları (Brine akış miktarı, sıcaklığı, buhar muhteviyatı ve NCG gaz içeriği) ilk başta belirlenen tahmin edilen değerlerden sapabilir. Tüm bu sapmaların kombine etkisi içeride dolaşan akışkanın akış miktarı ve sıcaklığına yansımaktadır.

Öte yandan, dış ortam sıcaklık şartları, ORC de çalışan akışkanın yoğunlaşma basıncına doğrudan etki etmektedir.

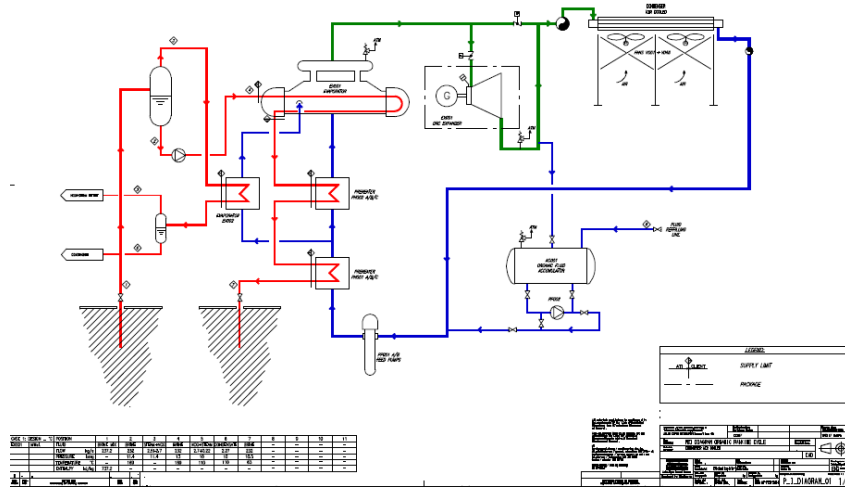
Belirsizlikler ve gelişigüzellikler sonucu meydana gelen yukarıda belirtilen sapmaların direk etkisi şudur ki; ORC türbini, tasarlanmış olduğu ve imal edilmiş olduğu şartlarda ender olarak çalışmaktadır!

Yukarıda belirtilen belirsizlikler ORC türbini üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Türbin çok ender olarak, eğer olacak olursa, daha önceden belirlenen tasarım şartlarında çalışmaktadır.

## 2. ORGANİK RANKİN ÇEVİRİMİ – ORC

Organik Rankine Çevrimi, ısı kaynağının düşük sıcaklıkta kaynayan bir organik akışkan ile ısı değişimi yaptığı bir konfigürasyondur, Şekil 1. Organik akışkan, ara akışkan, bir buharlaştırıcı (Evaporatör) içinde buharlaştığı kapalı bir çevrim içinde akmaktadır. Evaporatördeki ısı kaynağı, jeotermal akışkan, brine, buhar veya NCG den gelmektedir. ORC türbini, organik akışkan buharından ısıyı alır (çıkartır) ve yoğuşturucu (kondenser) girişi öncesinde soğutur. Kondenser de, ara akışkanın kondenser çıkışında sıvı hale yoğunlaşmasını sağlayacak miktarda yeterince ısıyı akışkandan çıkarır.

Termal verimliliği maksimize etmek için ORC'nin çeşitli varyasyonları mevcuttur. Türbin çıkış tarafında Rekuperatör (Isı geri kazanımı eşanjörü), veya Buharlaştırıcı (Evaporatör) öncesinde önısıtıcılar eklemek bu varyasyonlara dahildir.



Şekil 1. Organik Rankin Çevrimi için Proses Akış Diyagramı.

### 2.1 ORC Türbini

ORC sistemindeki en önemli donanım Organik Rankine Çevrim Türbinidir. Onun optimize performansı elektrik enerjisi üretimini ve dolayısıyla Jeotermal ORC Enerji santrali üretimini etkiler.

ORC sistemindeki kritik fonksiyonuna rağmen, onun tasarım parametreleri sadece nominal durum içindir. Bir ORC türbinin hiç bir zaman tasarım şartlarında çalışmaması olası bir durumdur. Türbinin gerçek çalışma şartları normalde tasarım dışı şartlardır, Örneğin, bir veya daha çok parametre tasarım şartlarından daha farklıdır, sapmaktadır, Tablo 1.

Tablo 1. ORC Türbin tasarımı ve tasarım dışı çalışma şartları.

Durum/Parametre	Giriş Basıncı, Bara	Giriş Sıcaklığı, °C	Çıkış Basıncı, Bara	Çıkış Sıcaklığı, °C	Akış, kg/sa	Güç, KW
<b>Tasarım,</b> Ortalama Hava Sıcaklığı, 18 °C	25.0	125.70	4.0	60.70	594,000	10,250
<b>Tasarım Dışı,</b> Yaz Dış Ortam Sıcaklığı, 35 °C	25.0	127.50	5.10	70.70	594,000	8,500

<b>Tasarım Dışı,</b> Kış Dış Ortam Sıcaklığı, 5 °C	25.0	125.70	2.90	54.70	594,000	11,500
--	------	--------	------	-------	---------	--------

Aynı jeotermal enerji santrali'nde 2013/2014 sezonunda gerçekleşen işletme şartları Tablo 2'de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Bir ORC Türbinin gerçekleşen işletme şartları.

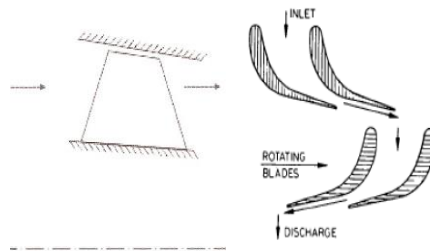
Durum/Parametre	Giriş Basıncı, Bara	Giriş Sıcaklığı, °C	Çıkış Basıncı, Bara	Çıkış Sıcaklığı, °C	Akış, kg/sa	Güç, KW
<b>Tasarım,</b> Ortalama Dış Ortam Sıcaklığı, 20.7°C	25.01	129.75	4.66	70.31	386,000	10,250
<b>Tasarım Dışı,</b> Yaz Dış Ortam Sıcaklığı, 32.7 °C	25.01	129.63	6.14	78.64	365,000	8,500
<b>Tasarım Dışı,</b> Kış Dış Ortam Sıcaklığı, 2.8 °C	25.94	133.62	3.23	59.72	511,220	10,600

ORC Türbini çalışma şartlarının kesinlikle türbinin tasarım şartlarından farklı olacağı reddedilmez gerçeğini düşündüğümüzde, türbin tipi seçimi çok önemlidir ve yatırımın kar etmesi açısından çok etkilidir.

## 2.2 Türbin Tipleri

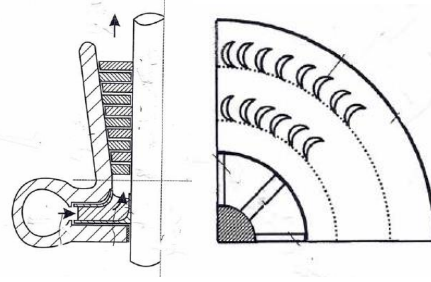
Genelde Jeotermal ORC Santrallerinde monte edilmiş olan 3 tip türbin mevcuttur; eksenel türbin, radyal çıkışlı (outflow radial) türbin ve radyal girişli (inflow radial) türbin.

Bir eksenel türbinde yüksek basınçlı akışkan, türbin çarkına eksenel yönde girmektedir ve genişleme sonrası eksenel yönde bir çıkış olur, Şekil 2a.



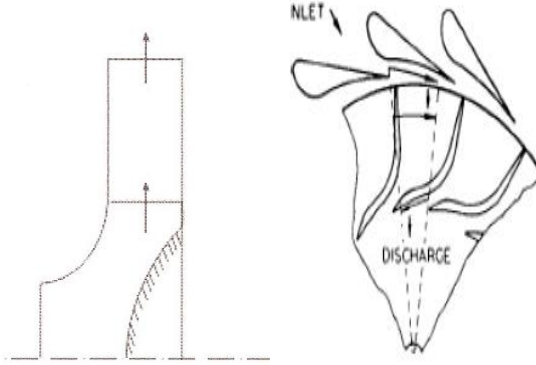
**Şekil 2a.** Aksiyal Türbin.

Bir radyal çıkışlı türbinde yüksek basınçlı akışkan türbin çarkına eksenel yönde girmektedir ve genişleme sonrası radyal yönde bir çıkış olur, Şekil 2b.



**Şekil 2b.** Radyal Çıkışlı Türbin.

Bir radyal girişli türbinde yüksek basınçlı akışkan türbin çarkına radyal yönde girmektedir ve genleşme sonrası aksiyal yönde bir çıkış olur, Şekil 2c.



**Şekil 2c.** Radyal Girişli Türbin.

Another categorization for turbine design is in term of geometry, variable geometry and fixed geometry. Among the three types turbines shown above, inflow radial turbine is the only one that is categorized as variable geometry turbine because it is the only turbine type that could be equipped with variable inlet guide vanes, IGV's.

### 2.3 Bir Jeotermal Enerji Santraline Ait Olasılık Yönleri

Aşağıda bahsedilen parametreler bir jeotermal ORC Enerji santralinde, santral tasarımı esnasında en iyi tahmin veya ortalama değere göre belirlenir. Bu parametrelere ait gerçek işletme şartları değerleri santralin işletme ve elektrik üretimini etkiler.

**Jeotermal kaynak akış debisi:** Kısa ve uzun süreli testler sonucunda bu değer tahmin edilir. ORC deki akışkan debisi, gerçekleşen kaynak akış miktarı tahmini değerden yüksek olduğu takdirde, yüksek olur ve düşük olması halinde ise tahmini değerden az olur.

**Jeotermal kaynak sıcaklığı:** Kısa ve uzun süreli testler sonucunda bu parametre de tahmin edilir. ORC deki dolaşan akışkan sıcaklık ve basıncı, gerçekleşen kaynak sıcaklığı belirlenen tahmini değerden yüksek olduğu takdirde dizayn akış değerlerine göre daha yüksek olur ve düşük olması halinde ise tahmin edilen değerden az olur.

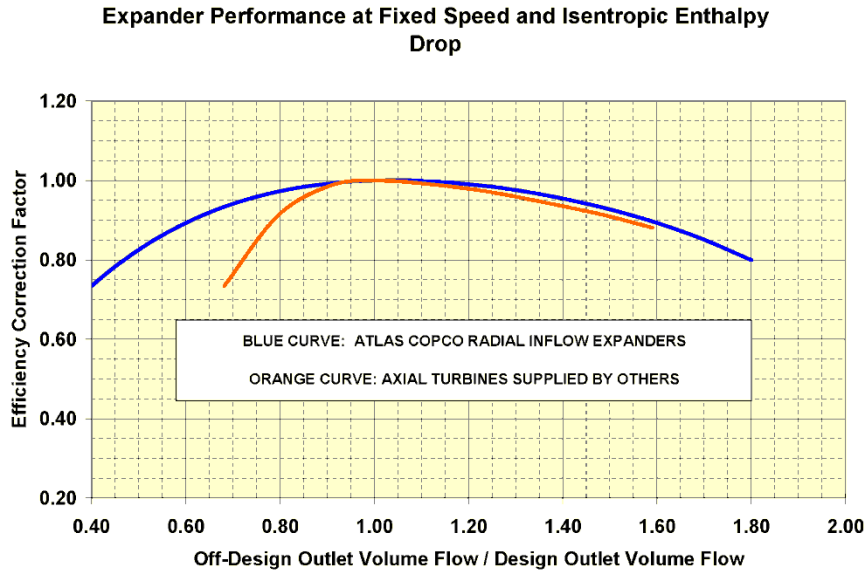
**Dış ortam sıcaklığı:** Bu parametre hava soğutmalı kondensere sahip bir santralde, su soğutmalı kondensere sahip bir santrale göre çok daha etkilidir. Tasarım normalde santral lokasyonundaki ortalama meteorolojik verilere dayanır. Gerçek dış ortam sıcaklığı, bir ORC enerji santralinde türbin giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkını etkiler. Dış ortam sıcaklığı ne kadar düşük ise türbinde oluşan fark basıncı da o kadar yüksektir ve Dış ortam sıcaklığı ne kadar yüksek ise türbinde oluşan fark basıncı da o kadar düşüktür.

Yukarıda belirtilen ORC parametrelerindeki tüm sapmalar ORC türbininde; onun verimliliği ve üretilen güç üzerinde direk bir etki yaratır.

Değişken geometrili türbin kendisini proses parametrelerindeki varyasyonlara ayarlayabilir, ve dolayısıyla yüksek verimliliği ve yüksek enerji üretimini devam ettirebilir, koruyabilir.

Sabit geometrili türbin ise içsel bir ayarlama yapma kabiliyetine sahip değildir ve dolayısıyla daha düşük bir verimlilikte ve sonuçta daha düşük bir enerji üretimi ile çalışır.

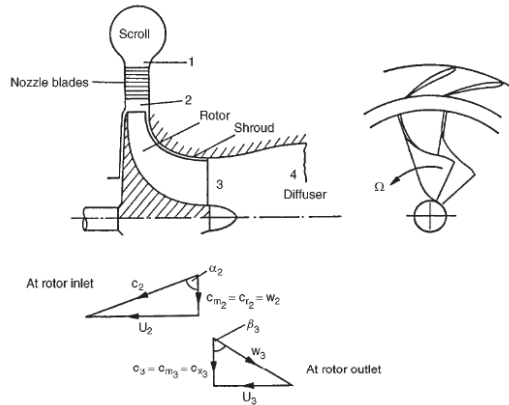
Şekil 3 te, bir eksenel türbin ile bir radyal girişli türbin arasındaki izantropik verimlilik karşılaştırılarak yukarıdaki tartışmalar göz önüne serilmektedir.



Şekil 3. Organik Rankin Çevrimi için proses akış diyagramı.

### 3. RADYAL GİRİŞLİ TÜRBİN

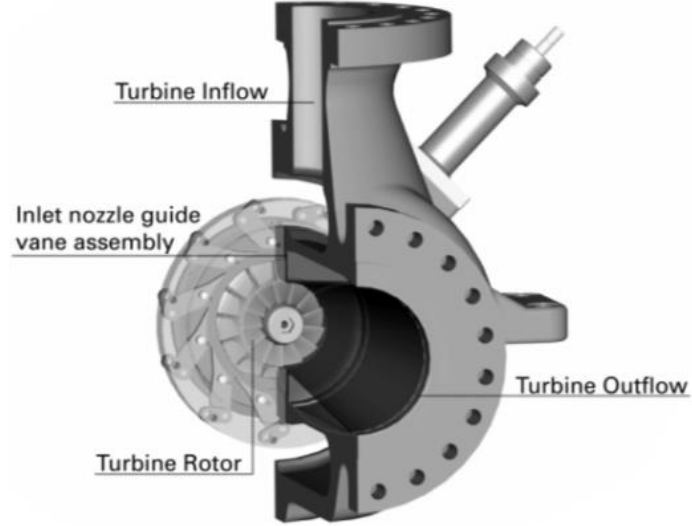
Radyal girişli türbin – turbo genişletirici “turboexpander”, gelen akışkanın radyal yönde girdiği ve 90 derecelik bir dönüş sonrasında aksiyal yönde çıktığı bir türbomakinadır (Şekil 4).



Şekil 4. Radyal Girişli türbine ait şematik hız üçgenleri.

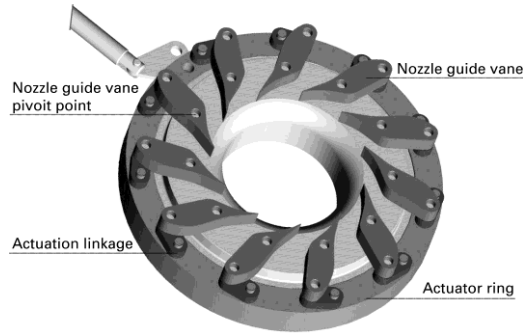


Bir radyal genişletirici (Expander) ise değişken giriş kılavuz kanatları (IGV) ile donatılmış olabilir. Bu durumda proses akışkanı radyal çarka girmeden önce IGV'lerden geçer. IGV'ler Turboexpander boyunca yaklaşık olarak %50 fark basıncını kinetik enerjiye dönüştürür ve akışı Expander çarkına doğru hızlandırır, Şekil 5.



Şekil 5. Değişken IGV li Radyal Girişli Türbin.

Değişken giriş kılavuz kanatçıkları (IGV), Expander in hizmet ettiği procese ait belirlenmiş olan parametreyi kontrol etmesini sağlar. Ayrıca, IGV ler akışkanı radyal çark üzerine optimal bir açıda yönlendirerek Expander verimliliğini maksimize eder (Şekil 6). Bu karakteristik özellik, proses akış şartlarının Expander'ın başlangıçta dizayn edilmiş olduğu şartlardan farklı olduğu durumlarda önem taşımaktadır.



Şekil 6. Değişken Giriş Kılavuz Kanatçıkları (IGV'ler).

#### 4. SONUÇLAR

Endüstri de Değişken Giriş Kılavuz Kanatçıklı Radyal girişli türbin genişletiricileri uzun ve başarılı uygulama tarihçesi ve sürekli işletme kayıtlarına sahiptir. Genelde, Enerji Geri Kazanımı ve Jeotermal Santralleri 30 yılı aşkın süredir bu Expanderların yüksek verimlilik, güvenilirlik ve kullanılabilirliklerinden faydalanmıştır. Jeotermal Organik Rankin Çevrimli (ORC) enerji santralleri radyal girişli Türbin Expander ları ilk tercih olarak düşünmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Heinz Bloch & Claire Soares, “Turboexpanders and Process Applications”, Gulf Professional Publishing, 2001.
- [2] Jacob Rheuban, “Turboexpanders: Harnessing the Hidden Potential of Our Natural Gas Distribution System”, Jacobrheuban.com, 2009.
- [3] Dan Hoyer, Kevin Kitz & Darrell Gallup, “Salton Sea Unit 2, Innovation and Successes”, Geothermal Resource Council Transactions, Vol. 15, 1991.
- [4] Ben Holt & Richard G. Campbell, “The Mammoth Geothermal Project”, Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Vol. 8 No. 4, 1984.
- [5] Reza Agahi & Mike Allen, “Geothermal Energy Using Turboexpanders”, Geothermal Power in Asia 1997 Conference, 24-28 February 1997, Bali, Indonesia, 1997.
- [6] Reza Agahi & Claudio Spadacini, “Comparison between Variable and Fixed Geometry Turbine in Geothermal Power Plants”, Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, April 25-29, 2010.

## Mustafa İNANLI

1970 Ordu doğumludur. İzmir BAL, ve sonrasında 1992 de İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun olduktan sonra Northeastern Üniversitesi, Boston, ABD de Mühendislik Yönetimi Yüksek Lisans programını 1996 yılında tamamlamıştır. Makina Mühendisi olarak yoğunlukla Yardımcı Tesisler, Fabrikalar, Yenilenebilir Enerji Tesisleri proje ve yatırımlarında çeşitli aşamalarda çalışmıştır. Özellikle, 2001-2006 yılları arası Petkim’ de Proje Mühendisi, 2008-2012 yılları arasında ise ENDA Enerji Holding’ te Proje Koordinatörü olarak çalışmıştır. Halen Atlas Copco firması Gaz ve Proses bölümünde Proje Müdürü olarak çalışmaktadır.

## Reza AGAHI

Reza Agahi, Pazarlama Müdürüdür ve Atlas Copco Gaz ve Proses Bölümü için dünya çapında Jeotermal ve atık ısı enerji geri kazanımı iş geliştirme sorumlusudur. Turboexpander dizaynı ve Cryogenic ve enerji kazanımı santrallerinde 30 yılı aşkın tecrübesi vardır. Güney Kaliforniya daki Üniversitelerde ders vermiştir ve sistem mühendisliği, expander uygulamaları ve enerji kazanımı üzerinde 40 dan fazla makalesi ve çalışması vardır. Dr. Agahi pekçok Rotoflow Expander (genleştirici) patentinin mucidi veya eş yazarıdır.



# HOW TO COPE WITH INHERENT UNCERTAINTIES IN AN ORC GEOTHERMAL POWER PLANT

Reza AGAHI  
Mustafa İNANLI

## ABSTRACT

Application of Organic Rankine Cycle for medium and low enthalpy geothermal resources is on the rise. A geothermal ORC power plant is generally dealing with two probabilistic operating parameters. The latter unknowns are geothermal resource conditions and ambient temperature.

The original design of a geothermal ORC plant is based on the predicted or even tested resource conditions. There is no certainty if the resource provides the same characteristics during short or long term power plant operations.

The same applies to an ambient temperature that was assumed at design stage. It is true that the average ambient temperature is determined based on many measurements over many years. The ambient temperature at any given time during plant operation though is an unknown that should be dealt with.

Turbine is important equipment in any ORC plant. There are several types of turbines that successfully have been installed by ORC plant suppliers. Inflow radial turbine, outflow radial turbine and axial turbine are among the most commonly used turbine designs in ORC power plant. The design point performance for all turbines could be set to be the same. There could be not much control on the turbine's off design performance. The turbine efficiency will be in accordance to the turbomachinery laws when operating in off design conditions.

The reality is that the turbine of an ORC plant always operates in an off design conditions. This could be either due to deviations in resource conditions or changes in ambient air temperature or a combination of both. Therefore the off design performance characteristics of an ORC turbine should be of great importance in an ORC plant.

In this paper the author presents a detailed analysis of design versus field performance of an inflow radial turbine in a geothermal ORC plant in Turkey.

**Key Words:** Organic Rankine Cycle, Inflow Radial Turbine, Variable Geometry Turbine, Variable Inlet Guide Vanes, Variable Geometry Turbine, Fixed Geometry Turbine.

## 1. INTRODUCTION

Utilization of medium and low enthalpy geothermal resources is on the rise in all countries with geothermal resources. The existing high enthalpy geothermal power plants that have been designed based on flash system are engaged in feasibility studies to adding bottoming cycle to extract the remainder thermal energy in of brine before reinjection. Most of the new geothermal flash plants are designed with the bottoming cycle system included.



## 2.1 ORC Turbine

Organic Rankine Cycle turbine is the most important equipment in an ORC system. It's optimized performance impacts electric power production and hence the output of a geothermal ORC power plant.

In spite of its critical function in an ORC system its design parameters are just nominal conditions. It is possible that an ORC turbine never operates at the design conditions. The turbine actual operating conditions are normally an off design, i.e. one or more parameters are different from the design conditions, Table 1.

**Table 1.** Design and Off Design Conditions for an ORC Turbine.

Condition/Parameter	Inlet Press. Bara	Inlet Temp. C°	Outlet Press. Bara	Outlet Temp. C°	Flow, Kg/hr	Power, KW
Design, Average Ambient Temp. 18 C°	25.0	125.70	4.0	60.70	594,000	10,250
Off Design, Summer Ambient Temp 35 C°	25.0	127.50	5.10	70.70	594,000	8,500
Off Design, Winter Ambient Temp. 5 C°	25.0	125.70	2.90	54.70	594,000	11,500

The actual operating conditions of the same geothermal power plant in 2013/2014 were as shown in Table 2.

**Table 2.** Actual Operating Conditions for an ORC Turbine.

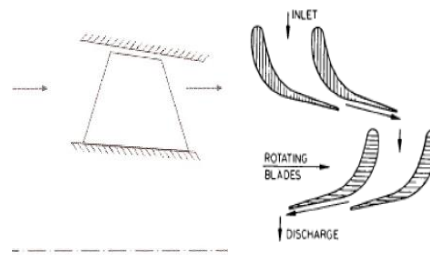
Condition/Parameter	Inlet Press. Bara	Inlet Temp. C°	Outlet Press. Bara	Outlet Temp. C°	Flow, Kg/hr	Power, KW
Design, Average Ambient Temp. 20.7 C°	25.01	129.75	4.66	70.31	386,000	10,250
Off Design, Summer Ambient Temp 32.7 C°	25.01	129.63	6.14	78.64	365,000	8,500
Off Design, Winter Ambient Temp. 2.8 C°	25.94	133.62	3.23	59.72	511,220	10,600

Considering the undeniable reality that operating conditions of an ORC turbine will certainly be different from that of the original design conditions selection of the turbine type is very important and influential in profitability of capital investment.

## 2.2 Types of Turbine

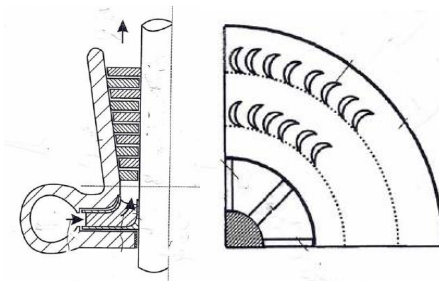
In general there are three types of turbine that have been installed in geothermal ORC plants, axial turbine, radial outflow turbine and radial inflow turbine.

In an axial turbine high pressure fluid enters into the turbine wheel in an axial direction and discharge in an axial direction after expansion Figure 2a.



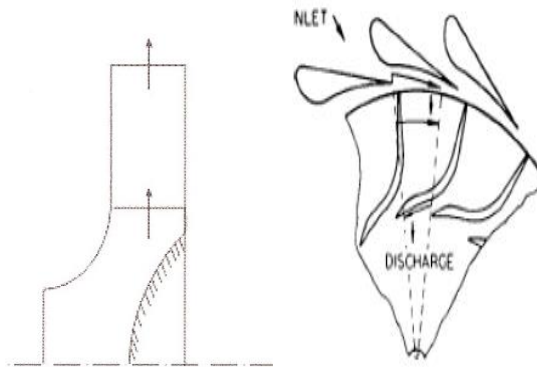
**Figure 2a.** Axial Turbine.

In an outflow radial turbine high pressure fluid enters into the turbine in an axial direction and discharge from the wheel in a radial direction, Figure 2b.



**Figure 2b.** Outflow Radial Turbine.

In radial turbine high pressure fluid enters in a radial direction and exit in an axial direction after expansion Figure 2c.



**Figure 2c.** Inflow Radial Turbine.

Another categorization for turbine design is in term of geometry, variable geometry and fixed geometry. Among the three type's turbines shown above, inflow radial turbine is the only one that is categorized as variable geometry turbine because it is the only turbine type that could be equipped with variable inlet guide vanes, IGV's.

### 2.3 Probabilistic Aspects in a Geothermal ORC Power Plant

The following parameters in a geothermal ORC power plant are subject to the best estimate or an average value at the time plant design. The actual operating values for these parameters impact plant's operation and electrical output.

**Geothermal Resource Flow:** These parameters are estimated based on short run and long run tests. The intermediate fluid flow will be higher than the design flow if the actual resource flow is more than estimated value and less if the resource flow is less.

**Geothermal Resource Temperature:** These parameters are also estimated based on short run and long run tests. The intermediate fluid temperature and pressure will be higher than the design flow if the actual resource temperature is higher than estimated value and less if the resource temperature is lower.

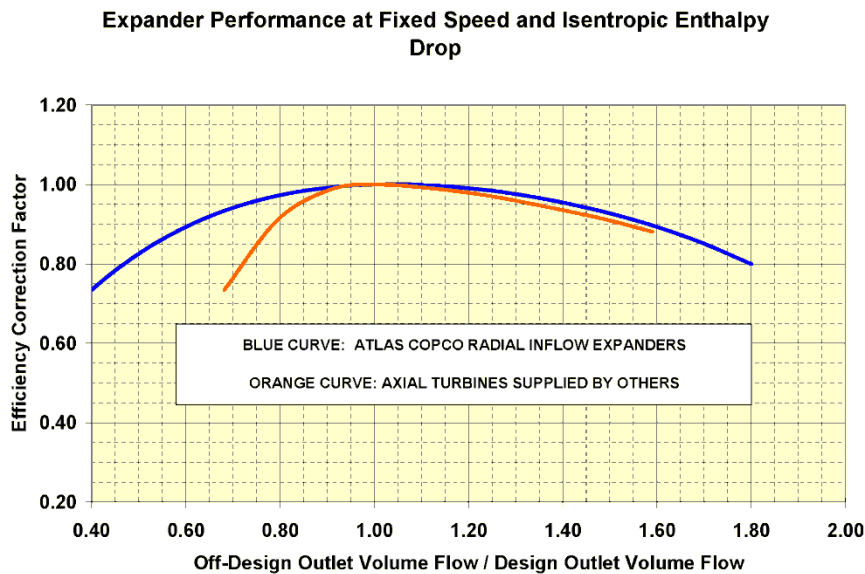
**Ambient Air Temperature:** This parameter is more influential in air cooled condenser plant than water cooled condenser plant. The design is normally based on an average meteorological data for the plant location. The actual ambient temperature will impact the differential pressure across the turbine in an ORC power plant. The lower the ambient temperature is the higher the differential pressure across the turbine. The differential pressure across the turbine will be lower in a warmer than the design ambient temperature.

All the variations in the above ORC parameters have a direct impact on the ORC turbine, its efficiency and produced power.

The turbine with variable geometry could adjust itself to the variations in the process parameters and hence maintain its high efficiency and high power production.

The turbine with fixed geometry is not capable of internal adjustment and hence performs at a lower efficiency and the resulting lower power production.

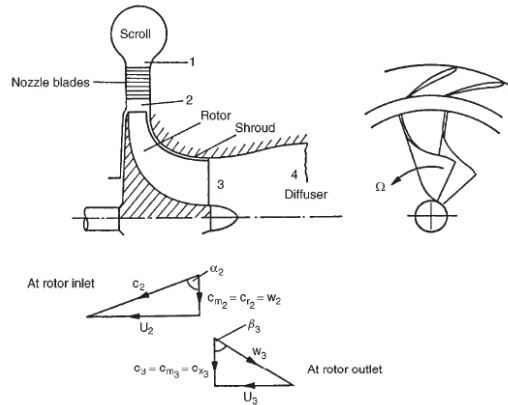
Figure 3 depicts the above discussion in terms of comparing isentropic efficiency between an axial and a radial inflow turbine.



**Figure 3.** Process Flow Diagram for Organic Rankine Cycle.

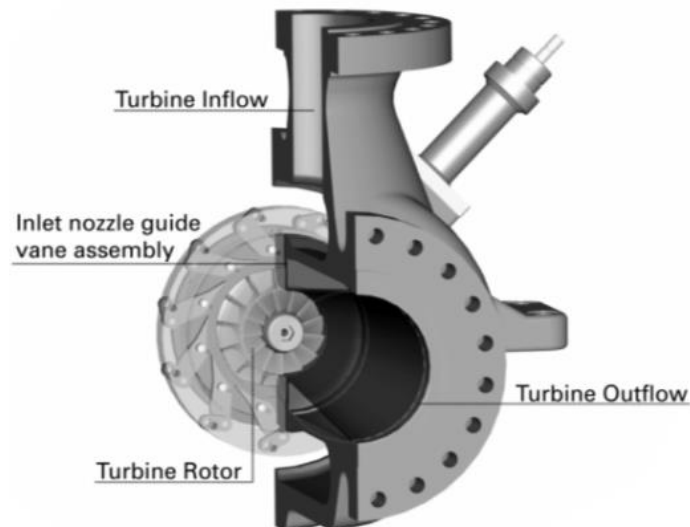
### 3. INFLOW RADIAL TURBINE

The inflow radial turbine turboexpander is a turbo machine in which incoming flow enters in a radial direction and exits in an axial direction after making a 90-degree turn (Figure 4).



**Figure 4.** Radial Inflow Turbine Schematic with Velocity Triangles.

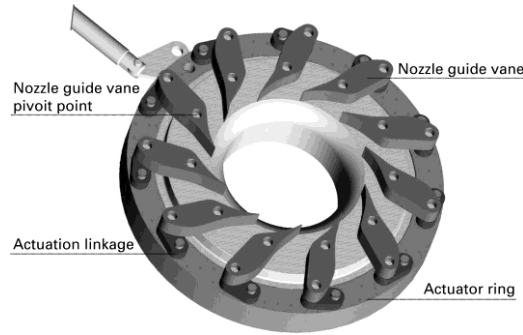
A radial expander may be fit with variable Inlet Guide Vanes (IGV). In this case, process fluid flows through the IGV before entering into a radial wheel. IGV convert approximately 50% of differential pressure across a turboexpander into kinetic head and accelerate flow into the expander wheel Figure 5.



**Figure 5.** Radial Inflow Turbine with Variable IGV.

Variable Inlet Guide Vanes (IGV) enable the expander to control defined parameter of the process it serves. Furthermore, it directs fluid flow into the radial wheel in an optimal direction to maximize expander efficiency (Figure 6). This characteristic is particularly important for process flow conditions that are different from the initial design conditions of an expander.





**Figure 6.** Variable Inlet Guide Vanes.

#### 4. CONCLUSIONS

Inflow radial turbine expanders with variable Inlet Guide Vanes (IGV) have a long and successful history of applications and continuous operation in the industry. Energy recovery in general and geothermal plants in particular have benefited from their high efficiency, reliability and availability for more than 30 years. Geothermal Organic Rankine Cycle (ORC) plants are considering inflow radial turbine expanders as the first choice. This turbine with its variable geometry characteristics enables a geothermal ORC power plant to cope with probabilistic nature of geothermal resource and ambient conditions.

#### REFERENCES

- [1] Heinz Bloch & Claire Soares, "Turboexpanders and Process Applications", Gulf Professional Publishing, 2001.
- [2] Jacob Rheuban, "Turboexpanders: Harnessing the Hidden Potential of Our Natural Gas Distribution System", Jacobrheuban.com, 2009.
- [3] Dan Hoyer, Kevin Kitz & Darrell Gallup, "Salton Sea Unit 2, Innovation and Successes", Geothermal Resource Council Transactions, Vol. 15, 1991.
- [4] Ben Holt & Richard G. Campbell, "The Mammoth Geothermal Project", Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Vol. 8 No. 4, 1984.
- [5] Reza Agahi & Mike Allen, "Geothermal Energy Using Turboexpanders", Geothermal Power in Asia 1997 Conference, 24-28 February 1997, Bali, Indonesia, 1997.
- [6] Reza Agahi & Claudio Spadacini, "Comparison between Variable and Fixed Geometry Turbine in Geothermal Power Plants", Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, April 25-29, 2010.

#### BIOGRAPHY

Reza Agahi is Marketing Manager and responsible for worldwide business development of geothermal and waste heat energy recovery for Atlas Copco, Gas and Process Division. He has more than 30 years experience in turbo expander design, its applications in cryogenic plants and energy recovery. He has taught in universities in Southern California and has authored more than 40 articles and papers in system engineering, expander applications and energy recovery. Dr. Agahi is the inventor or co-inventor of several Rotoflow expander patents.

