

## MİKRO-GAZ TÜRBİN ÇEVİRİMİNİN SİMÜLASYONU VE SİSTEM KOMPONENTLERİNİN OPTİMİZASYONU

*Tolga ÇAKMAK\**

*Muhsin KILIÇ\**

**Özet:** Son yıllarda, günümüzdeki ağır bataryaların yerini alacak hafif ve kompakt bir güç kaynağı geliştirilmesi yönünde çalışmalar devam etmektedir. Güç üretimi için mikro-gaz türbinlerinden faydalanma üzerine artan ilgi, bu sistemlerin geniş bir aralıkta işletme şartlarını sağlayabilmesi için, araştırmacıları çok etkin sistemler tasarlamaya yönlendirmektedir. Mikro güç üretim sistemlerini önemli kılan neden, yakıt bazlı güç üretim sistemlerinin hala en iyi şarj edilebilir güç üretim sistemlerinden 100 kat daha fazla enerji yoğunluğu içermesidir. Yakıt pillerinden beklenen yüksek verim iken mikro gaz türbinlerinden umulan yüksek güç yoğunluğunu sunmasıdır. Bu çalışmada, bir mikro gaz türbininin, belirli termal ve mekanik yüklemeler altında çalışma durumu bir benzetim programı kullanarak incelenmiştir ayrıca komponent geometrilerinin multidisipliner optimizasyon sonucu elde edilmesi anlatılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro-Gaz Türbini, Multidisipliner Optimizasyon, Termodinamik Çevrim.

### The Simulation of a Micro-gas Turbine Cycle and Optimization of the System Components

**Abstract:** Recently, developing a light-weight and compact power source to replace the nowadays heavy batteries is underway. The increasing interest in the micro-gas turbine utilization for power generation solicits the researchers to define the most effective systems for ensuring satisfactory operation within a wide range of operating conditions. The energy density of most fuel types is still 100 times higher than that of the best rechargeable batteries, which makes the use of a fuel-based micro power unit interesting. While fuel cells are expected to offer the highest efficiency, micro gas turbines are expected to offer the highest power density. In this article, operating conditions of a micro-gas turbine under certain thermal and mechanical loads are investigated using a simulation tool and obtaining of the blade geometries by means of multidisciplinary optimization is presented.

**Key Words:** Micro-Gas Turbine, Multidisciplinary Optimization, Thermodynamic Cycle.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda ısı ve güç üretiminin birleşik kullanılabildiği mikro-gaz türbinleri üzerine artan bir ilgi söz konusudur. Büyük enerji yoğunlukları (Wh/kg) bu taşınabilir güç üretim sistemlerini cazip hale getirmektedir.

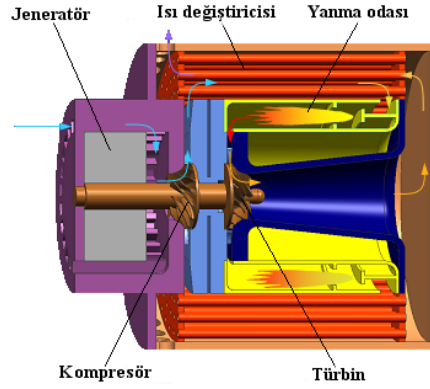
Ölçekleme, bir geometrinin daha büyük veya daha küçük benzer geometrilerini karakterize etmek için kullanılan bir yöntemdir. Fakat basitçe yüksek performanslı bir gaz türbinini küçültme işlemi performans açısından iyi bir sonuç vermeyecektir. Sorun oluşturan ana etkenler

- Reynolds sayısındaki büyük değişiklikler,
- Sıcak ve soğuk komponentler arasındaki kütleli ısı transferi (büyük makinelerde ihmal edilebilir),
- Minyatürleşmiş komponentlerin verimleri, malzeme ve üretim zorluklarından kaynaklanan geometrik kısıtlamalar

olarak belirtilebilir.

Bu çalışmanın konusu olan mikro-gaz türbin sistemi temel olarak Şekil 1'de gösterildiği gibi kompresör, ısı değiştiricisi, yanma odası, türbin ve elektrik jeneratöründen oluşmaktadır.

\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle, Bursa.

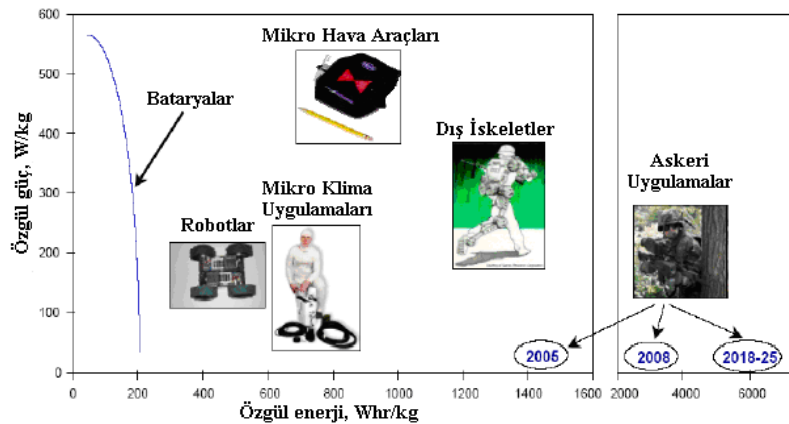


Şekil 1:  
Mikro-gaz türbinin şematik gösterimi

Büyük gaz türbinleri ile mikro-gaz türbinleri arasındaki temel fark, neredeyse hiç değişmeyen termodinamik çevrim boyunca kullanılan gazın miktarıdır. Bu nedenle hızlar, sıcaklık ve basınç değerleri küçültme yapılırken aynı kalmaktadır. Kompresör veya türbinin akışkan ile arasındaki iş ilişkisi çevresel hız ile orantılıdır. Bu durum devir ile çap arasında ters orantı olduğunu gösterir ve 20 mm'den daha düşük çaplı rotorlarda 500.000 dev/dak'dan daha fazla dönme hızları ortaya çıkmaktadır.

Mikro-gaz türbinleri, yüksek enerji yoğunluğunun yanında, işletme esnekliği, sistemdeki fazlalık ve sistem dayanıklılığı için de avantajlar sunar. Kompaktlık ve taşınabilirlik diğer avantajlar olarak sayılabilir. Diğer güç üretim sistemlerine kıyasla en büyük dezavantajları, yüksek güç çıkışı için gerekli olan yüksek işletim sıcaklığıdır [1]. Bu çalışmadaki gaz türbin sisteminde, basınç oranı 3 olarak kabul edildiğinde, pozitif verim elde edebilmek için türbin giriş sıcaklığının 1200 K civarı olması gerekmektedir [2]. Diğer önemli sorun, minyatürleştirmeye beraber Reynolds sayısındaki büyük azalmadır ki buda yüksek viskoz kayıplarına ve düşük genel çevrim verimine neden olmaktadır. Minyatür yapıdan dolayı türbin kanatlarında soğutma yapılamaması, sıcak komponentlerden soğuk komponentlere ısı transferi ve gerekli olan yüksek devir sayısı diğer sorunlardır, ayrıca mevcut türbülans modellerinin ve akış çözücü programlarının, bu kadar düşük Reynolds sayılarında ne kadar doğru sonuçlar verdiği henüz netleşmiş değildir.

Mikro-gaz türbinlerinin uygulama alanlarını 2 ana grupta toplamak mümkündür. Birincisi bu çalışmanın da amacı olan taşınabilir güç üretim sistemleri diğeri ise itki gücü veya bir taşıtı iletirmek için kullanılacak güç üretim sistemleridir. Şekil 2'de mikro-gaz türbinlerinin mümkün olabilecek uygulama alanları gösterilmiştir. Bunlarla beraber, matkap, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar vb. aletler, güvenlik sorunlarının üstesinden gelenebildiği zaman mümkün olabilecek sivil uygulamalardır.



Şekil 2:  
Mikro-gaz türbin uygulama alanları [1]

Bu çalışmada sözü geçen mikro-gaz türbin sisteminin mekanik güç çıkışı 1-2 kW arası öngörülmüştür. Tablo 1'de diğer mekanik özellikler belirtilmiştir.

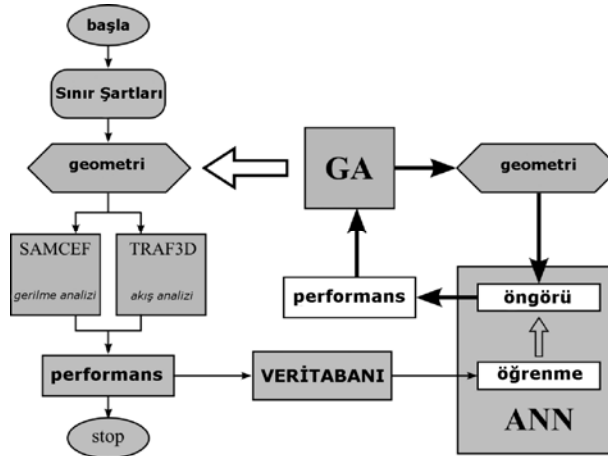
**Tablo 1.**  
**Hedeflenen Mikro-gaz türbin sisteminin temel özellikleri**

Mikro-GT özellikleri	
Mekanik düzenleme	Tek şaft
Basınç oranı	3.0
Türbin Giriş sıcaklığı	<1200 K
Mekanik güç/devir	1-2 kW / 500.000 dev/dak.
Kompresör	1 radyal akışlı kompresör
Türbin	1 radyal akışlı türbin

## 2. TÜRBİN VE KOMPRESÖR GEOMETRİSİNİN OPTİMİZASYONU

Optimizasyon metodu, von Karman Enstitüsü'nde radyal akışlı fanlar için geliştirilmiş bir aerodinamik optimizasyon yazılımının uzantısıdır. Optimizasyon Algoritması (şek.3), Genetik Algoritma (GA), Yapay sinirsel ağ (Artificial Neural Network, ANN), veri tabanı (Database), Akış Çözücü (Navier-Stokes Solver, TRAF3D), ve Sonlu Elemanlar Gerilme Analiz yazılımı (Stress Analysis, SAMCEF) içermektedir. Bu metodun temel fikri, iki aşamalı optimizasyondur. Önce, Genetik Algoritma tarafından oluşturulan geometrilerin hesaplanması ve aralarından en iyisini seçilmesi için hızlı, fakat daha az doğru analiz metodu (ANN) ve daha sonra ANN öngörülerine göre seçilen optimum geometriyi, ANN öngörülerini doğrulamak için, daha doğru fakat daha çok bilgisayar zamanı alan Navier-Stokes ve gerilme hesaplamaları ile analiz edilmesidir. İlk optimizasyondan elde edilen geometri veritabanına eklenmektedir. Her yeni ANN uygulamasından sonra, sonraki öngörülerin daha fazla bilgiye dayalı olmasından dolayı daha doğru olması beklenmektedir. Bu optimizasyon döngüsü Navier-Stokes ve sonlu elemanlar analiz sonuçları, ANN öngörülerini doğrulayana kadar devam etmektedir.

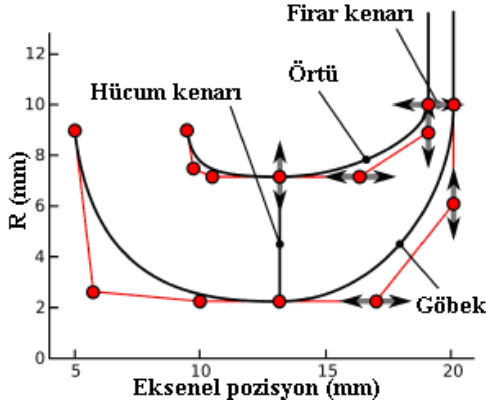
Burada sadece kompresör geometrisi optimizasyonu anlatılmıştır. Benzer adımlar türbin geometrisi için de geçerlidir. Detaylı bilgi [3] ve [4] kaynaklarından bulunabilir. Bu çalışmada radyal kompresör geometrisi seçiminin nedeni, tek kademede radyal turbo makinelerin daha yüksek basınç oranları sağlayabilmesidir [5].



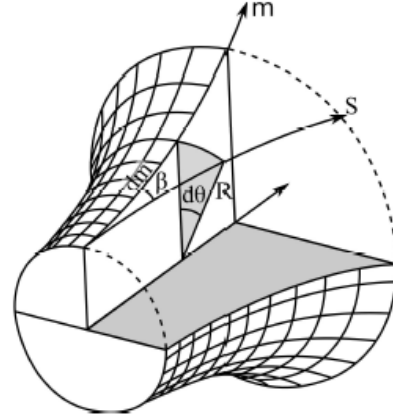
Şekil 3:  
Optimizasyon Algoritması [3]

### 2.1 Geometri Tanımlanması

3 boyutlu radyal kompresör, göbük ve örtüdeki dış hatlar (şek.4), ana ve dallandırıcı kanat kavis eğrisi (şek.5), aynı konumdaki kalınlık dağılımı ve kanatların sayısı ile tanımlanmıştır. Göbük ve örtü kısmındaki akış dış hattı, hücum kenarından firar kenarına 3. dereceden Bezier eğrileri ile tanımlanmıştır (şek.4). Kontrol noktalarının koordinatları, optimizasyon programı tarafından değiştirilebilen parametrelerdir. Tekil olarak bu noktaların değişimleri şek.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4:  
Bezier kontrol noktaları ile tanımlanan  
akış dış hatları



Şekil 5:  
β ile tanımlanmış kanat  
kavis eğrisi

Kompresör geometrisi optimizasyonu, aero performansın düşmesiyle ve aero mekanik gereksinimlerin karşılanmadığında artan bir amaç fonksiyonu içermektedir. Amaç fonksiyonu bu gereksinimleri karşılayabilmek için debi, verim, Mach sayısı ve gerilme değerlerine penaltı uygulamaktadır.

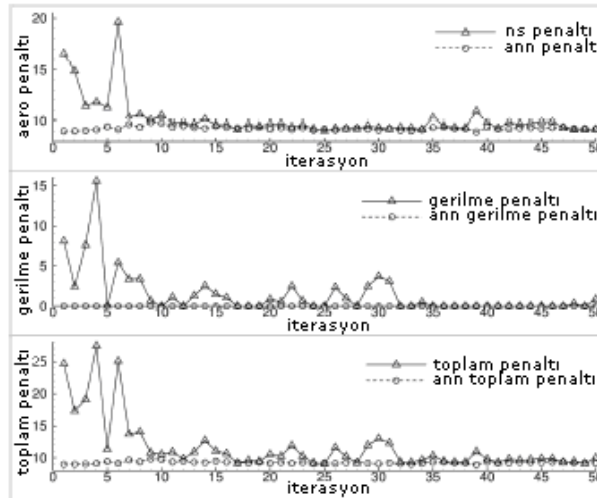
## 2.2 Tasarım Koşulları

Metot 500.000 dev/dak ile dönen 20 mm çaplı bir radyal kompresör geometrisini optimize etmek için kullanılmıştır. Çok yüksek merkezkaç gerilmelerine neden olan çevresel hız 523,6 m/s'dir. Sahip olduğu yüksek, akma gerilmesi/yoğunluk ( $\sigma_{akma}/\rho$ ) oranından dolayı Elastisite katsayısı = 113.8E+9 Pa, poisson oranı = 0,342 ve yoğunluğu  $\rho = 4.42E+3 \text{ kg/m}^3$  olan Titanyum TI-6AL-4V malzemesi analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir.

Amaç fonksiyonundaki değer faktörleri, daha önceki optimizasyondan elde edilen tecrübelerle dayanmaktadır. Giriş sıcaklığı ve basıncı sırasıyla 293 K ve 101325 Pa'dır. Tasarım debisi 21 g/s dir.

Optimizasyon gerilme hesabı yapılmamış, basit aerodinamik optimizasyonun sonucu ile başlamaktadır. Bu geometrinin verimi iyi olmasına rağmen, kullanılmamasının nedeni gerilme analizlerinde elde edilen 750 Mpa'a varan von Misses gerilmeleridir. Hâlbuki seçilen malzemenin akma gerilmesi 450 Mpa civarındadır. Bu geometri sonraki oluşturulacak geometriler için bir referans teşkil etmektedir.

Şekil.6 optimizasyon yakınsama geçmişini göstermektedir. Navier-Stokes ve FEA hesaplamalarının sonucu olan, verime, Mach sayısına ve debiye bağlı olan "Aero penaltı", "Gerilme penaltı" ve "Toplam penaltı", ANN tarafından tahmin edilenlerle karşılaştırılmıştır.

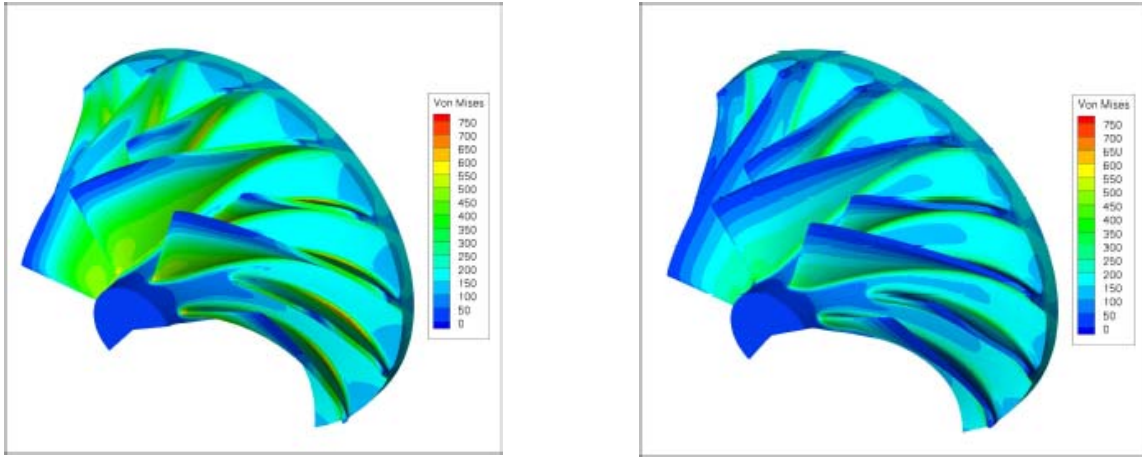


Şekil 6:  
Optimizasyonun yakınsama geçmişi

Her iterasyon bir geometriyi ifade etmektedir ve bu geometriler arasından en uygunu seçilerek optimizasyon sonlanır. Şekil.7'de gerilme hesabı yapılmamış, basit aerodinamik optimizasyonun sonucu elde edilen geometri ile optimizasyon sonucu seçilen iterasyon 25 geometrisi karşılaştırılmıştır. Gerilme değerindeki etkileyici düşüşün nedenleri şu şekilde belirtilebilir [3];

- Hücum kenarında, hücum kenar göbeğinde düşük merkezkaç kuvvetlere neden olan, kanat yüksekliğinin azaltılması
- Göbekteki kanat kalınlığının artımı
- Kanat kavisinin düzeltilmesi ile merkezkaç kuvvetlerce daha az büküme zorlanması

Benzer adımlar türbin geometrisinin elde edilmesi içinde tekrarlanmıştır. Elde edilen bu geometrilerden daha sonra karakteristik eğrileri oluşturulmuş ve bir simülasyon programına bu karakteristik eğriler empoze edilerek çevrimin termodinamik analizi yapılmıştır.



a) Merkezkaç kuvvetlerinden dolayı temel geometride meydana gelen von Mises gerilmeleri

b) Merkezkaç kuvvetlerinden dolayı it.25 geometrisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri

Şekil 7:

Temel geometri ile optimizasyon sonucu elde edilen geometrideki von Mises gerilme dağılımı

### 3. SİMÜLASYON PROGRAMI VE MODELLEME

Yeni bir gaz türbin motoru tasarlandığı zaman, tasarım ve tasarım dışı (off-design) çalışma durumlarını incelemek için sistemin termodinamik modeli oluşturulur. Bu modelden elde edilen veriler daha sonra diğer analizler (gerilme, akış analizi vb.) için girdi olarak kullanılır. Bu analizler sonucu elde edilen veriler sistemdeki tasarım değişikliklerine ve yeni eleman performanslarının ortaya çıkmasını sağlar. Bu değişimler, tasarım kriterleri yerine getirilene kadar bir döngü halinde tekrarlanır [6]. Bu süreç esnek, hızlı sonuç verebilecek ve hızlı değişimleri tüm sistemi etkilemeden yapabileceğimiz bir modülü gerektirmektedir. Bu çalışmada kullanılan benzetim programı EA International tarafından geliştirilmiş olan EcosimPro programıdır. EcosimPro programı açık bir kodla yazılmıştır ve mevcut kütüphaneleri geliştirilebilir haldedir. Kontrol, termal, hidrolik vb. sistemler için kütüphaneler ve bu kütüphanelerde sistem ile ilgili komponentler mevcuttur.

EcosimPro programı ile bir sistemin [7]

- Kararlı hal (steady state) performansını,
- Anlık (transient) davranışını,
- Parametrik çalışmasını, ve
- Fortran, C++ gibi yazılımları birlikte kullanarak tüm sistemin karmaşık uygulamalarını

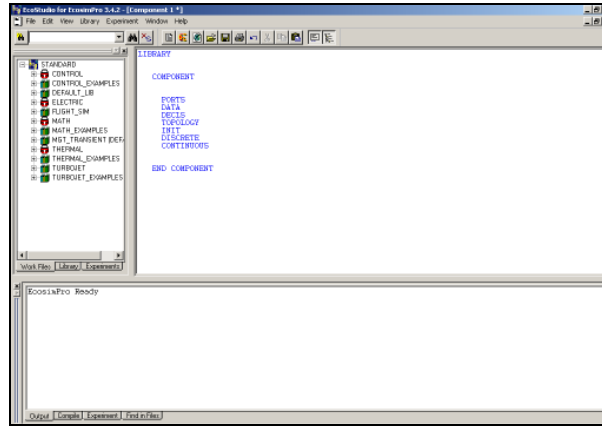
yapmak mümkündür. EcosimPro, fiziksel sistemleri modellemek için EL (EcosimPro Language) adı verilen, kendi programlama diline sahiptir. EL içerisindeki en önemli kısım *komponent* (component) ifadesidir. Komponentler, gerçek hayatta temsil ettiği fiziksel büyüklüklerin matematiksel ifadesini içermektedir.

Komponentler birbirlerine *portlar* ile bağlanmaktadır. Portlar bağlantılarda değiş tokuş edilebilen değişkenleri (debi, sıcaklık, basınç vb.) ifade eder. Öncelikle komponentler arasında bağlantı sağladığı için portlar (komponentin girdi/çıkışlarını belirtir) tanımlanır. Bir port belirtildiği zaman değişkenin o bağlantıyı sağlayan port boyunca sabit kalacağını mı yoksa diğer portlardan gelen değişkenlerle toplanacağını mı belirtilmesi gerekir. Örnek olarak, yanma odasına yakıt deposundan gelen debi eklenirken, kompresörden ısı değiştiricisine giden havada debi değişimi olmamaktadır. Yani yanma odası ile yakıt tankı arasındaki portlarda debinin toplanması gerektiği, fakat kompresör ile ısı değiştiricisini bağlayan portlarda ise debinin sabit kalması gerektiği belirtilmelidir. Tablo 2’de mikro gaz türbin kütüphanesinde tanımlanan port çeşitleri ve portlar için tanımlanmış değişken ve denklemler gösterilmiştir.

**Tablo 2.**  
**Portlar, değişkenler ve denklemler**

PORT TİPİ	DEĞİŞKENLER	DENKLEMLER
Gas	Gaz Debisi, W	WH = W * H
	Gaz Basıncı, P (total)	
	Gaz Sıcaklığı, T	
	Gaz Entalpisi, H (total)	WF = (FAR / (1 + FAR)) * W
	Yakıt Debisi, WF	
	Yakıt/Hava oranı, FAR	
	Enerji Akışı, WH	
fuel	Yakıt/Hava oranı, FAR	WFHV = W * FHV
	Bileşim H & C, X[ ]	
	Yakıt ısı değeri, FHV	WX[j] = W * X[j]
	Debi H & C, WX[ ]	
	Enerji Akışı, WFH	
Shaft	Mekanik Güç, Power	-
	Dönme Hızı, N	-
Qadd	İlave ısı, WH	-

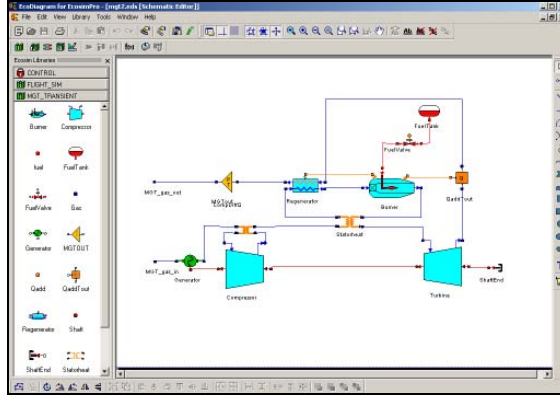
Benzetimin ilk adımı bir kütüphane oluşturmak veya varsa konu ile ilgili mevcut kütüphaneyi kullanmaktır. Daha sonra komponent ve port tiplerini EL’i veya grafik ara yüzü EcoDiagram (şek. 9) kullanarak kodlanabilir.



*Şekil 8:*  
*EcosimPro ana penceresi*

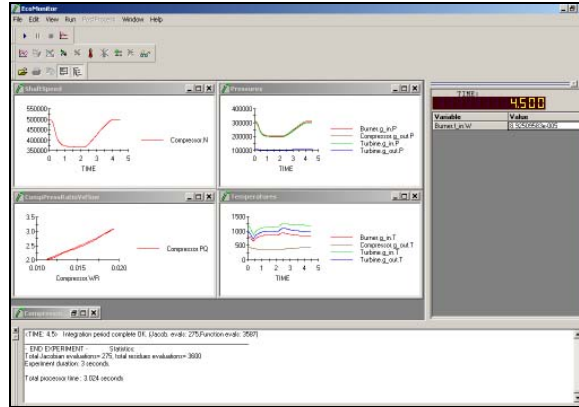
Kullanıcının komponentlerin kodlarını değiştirebileceği veya inceleyebileceği EcosimPro’nun ana penceresi şekil 8’de gösterilmiştir. Bu pencerede yapılabilen operasyonlar; kütüphaneleri, komponentleri, portları, fonksiyonları, uygulamaları vb. oluşturmak ve grafiksel bir sonuç gerekmediğinde benzetimleri sonuçlandırmak sayılabilir. Komponentlerden meydana gelen bir modeli en kolay şekilde meydana getirmek şek. 9’da gösterilen grafik ara yüzü (EcoDiagram) kullanmaktır. Bu pencerenin sol tarafındaki kısmında her bir komponenti ve portu ifade eden ikonlar bulunmaktadır. Sistem modelini oluşturmak, bu sol taraftaki kısımdan komponent ikonları ana pencereye sürükleyerek ve daha sonra portlarından bağlantı yapılarak gerçekleştirilebilir. İlgili komponent ikonuna sürüklenip bırakıldığı bu ana pencerede çift tıklan-

dığında EL kodunda girdi datası olarak belirtilen değişkenler (dönme hızı, atalet momenti vb.) yeni bir pencerede karşımıza çıkmaktadır. Bu yeni açılan pencerede kullanıcının bu değişkenlere yeni değer ataması mümkündür.



Şekil 9:  
EcoDiagram penceresi

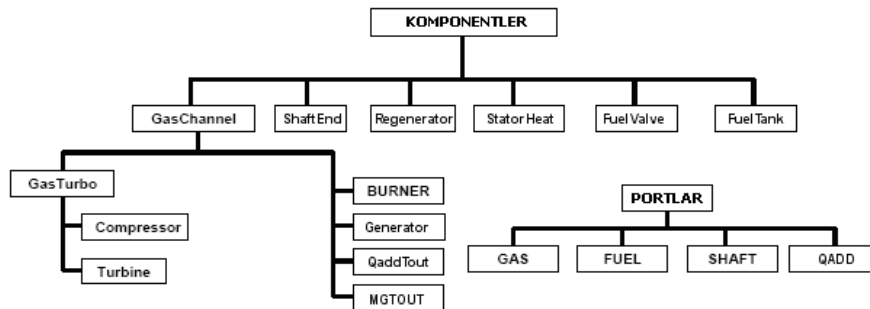
EcosimPro içerisinde sonuçları grafiksel bir biçimde görüntüleyebilmek için bir modül (şek. 10) mevcuttur. Bu kısımda kullanıcı, her bir değer için birçok grafik oluşturabilir, kararlı hal ve anlık analizler yapılabilir ve dinamik verileri ve sınır şartlarını değiştirebilir. Bu modül içerisinde, değişkenlerin görüntülenebilmesi için, değişken ölçek, termometre ve ölçme aleti gibi oldukça kullanışlı araçlar mevcuttur.



Şekil 10:  
Grafiksel Sonuç Penceresi

### 3.1 Komponentler

Komponentlerin matematik modellemesinde veya ara yüz benzerliklerinde, ortak kodlama özet komponentlerde yazılarak, uzun kodlama engellenmiş ve alt komponentlerin bağlı olduğu özet komponentlerden, özellikleri miras alması sağlanmıştır. Şekil 11’de mikro-gaz türbin kütüphanesinin bütün komponent ve port çeşitleri ve aralarındaki hiyerarşik ilişki gösterilmiştir.



Şekil 11:  
Komponent Hiyerarşisi

Özet komponentler konusunda belirtilmesi gereken önemli husus; bu komponentlerin fiziksel komponentleri ifade etmediğidir. Şekil 11’deki hiyerarşik dallandırma statik değildir ve sistem geliştirilip komponent eklenmesiyle veya komponentlerin geliştirilmesi ile daha da genişleyebilir.

*GasChannel* bir giriş ve bir adet çıkışta bulunmak üzere 2 “Gas” portu bulunan bir *özet komponenttir*. Tanımlı olduğu alt komponentlerde, boyutsuz toplam giriş basıncı, boyutsuz toplam giriş sıcaklığı ve basınç oranı verilerini tanımlamaktadır.

*GasTurbo* bir *özet komponent* olmakla beraber *GasChannel* komponentinin de alt komponenti olma özelliğine sahiptir. Her iki turbo makinenin de (kompresör, türbin), ana komponentidir. Bir giriş ve bir çıkış “*Shaft*” portu içermektedir. Atalet momenti (*I*) girdi verisini ve şaft dinamiğinin modellenme metodunu içermektedir.

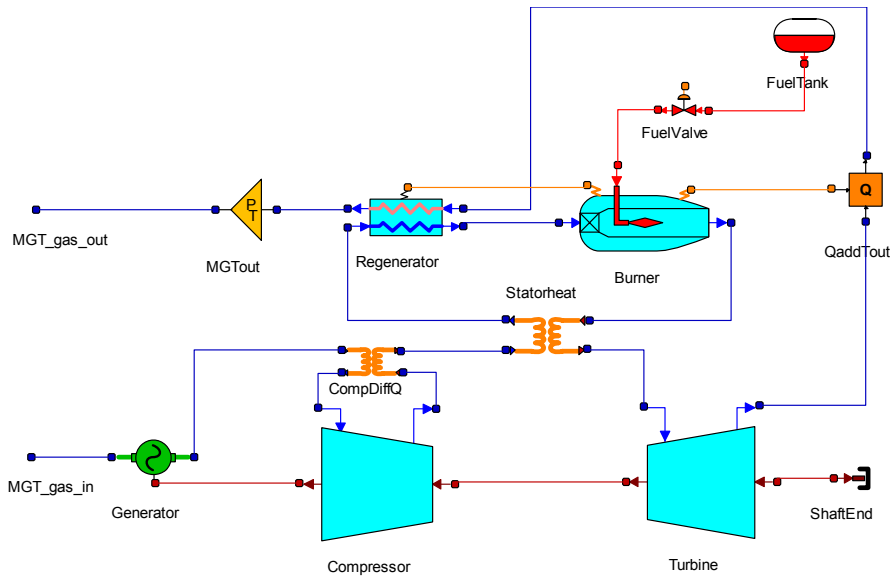
*Compressor*, *GasTurbo* komponentinin alt komponentidir ve kompresörü ifade eder. Kullanıcı tarafından girdi verisi olarak belirtilen kompresör karakteristik eğrilerini kullanarak, havanın giriş şartlarından, çıkış şartlarını hesaplar. Bu çalışmada kullanılan kompresör ve türbin karakteristik eğrileri, multidisipliner optimizasyon sonucu elde edilen geometriler için farklı basınç ve hız değerlerinde yapılmış olan akış analizleri ve bazı hız değerleri için yapılan varsayımlar sonucu oluşturulmuştur. Kompresör karakteristik eğrilerinde debi, izantropik verim ve özgül işin farklı şaft hızı ve *beta* ( $\beta$ ) değerleri kullanılmıştır. Beta ( $\beta$ ), tek başına fiziksel anlamı olmayan, karakteristik eğrilerin matematiksel açıdan okunmasını kolaylaştırmak için kullanılan bir parametredir.

*Turbine* komponenti de *Compressor* komponentine benzer şekilde, Türbin karakteristik eğrilerini kullanarak, türbin giriş şartlarından çıkış şartlarını hesaplar. Debi ve izantropik verimin farklı iş ve şaft hızı değerlerine bağlı ifadesi, türbin modelinin performansını belirlemek için karakteristik eğrilerinde kullanılan parametrelerdir.

*Burner* komponenti yanma odasını ifade etmektedir. *GasChannel* komponentinin alt komponentidir. Yanma verimi (bu çalışmada sabit kabul edilmiştir) ve basınç kaybı katsayısı ifadelerini içermektedir. Tüm komponentlerdeki basınç kayıpları debi, sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

*Regenerator* ısı değiştiricisini ifade eden komponenttir. İki giriş ve iki çıkış “*Gas*” ve yanma odasından ısı değiştiricisine olan ısı transferini tanımlayabilmek için “*Qadd*” portuna sahiptir.

Şekil 12’de, oluşturulan mikro-gaz türbin sistemi gösterilmiştir. Burada komponentler arası ilişki daha net incelenebilmektedir. *CompDiffQ*, *StatorHeat* ve *QaddTout* komponentleri sistem içerisindeki ısı transferlerini modellemek için oluşturulmuştur. *MgtOut* komponenti ise sistem çıkışındaki ısı ve basınç kayıplarını modellemek için sisteme eklenmiştir. *Generator*, *Compressor* ve *Turbine* komponentleri aynı şafta bağlı olacak şekilde modellenmiş ve “*Shaft*” portu sayesinde aralarındaki güç ilişkisi sağlanmıştır.

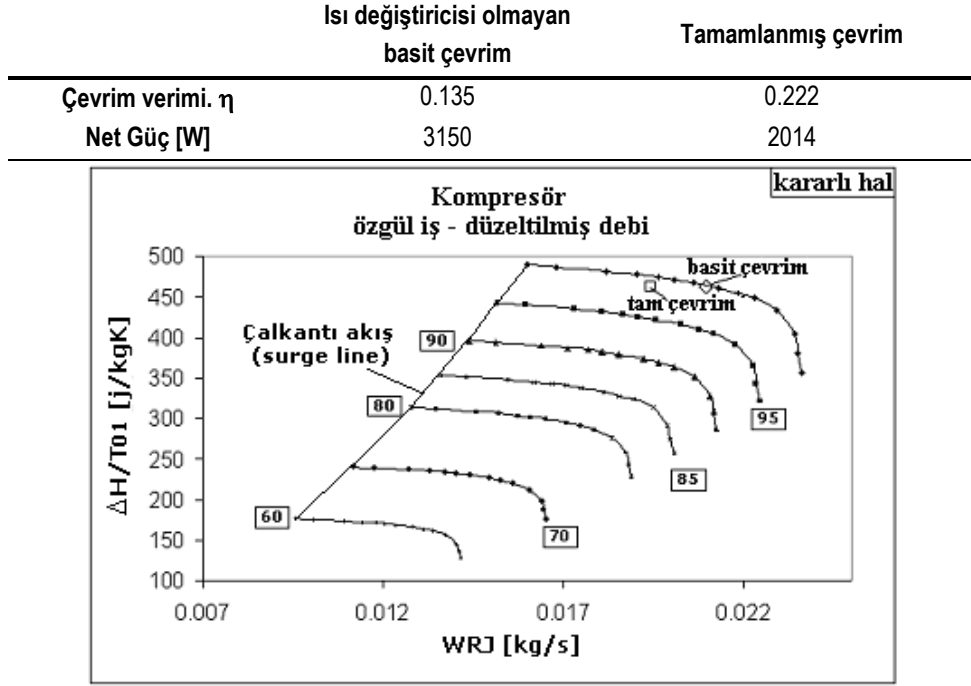


Şekil 12:  
Mikro-gaz türbin şematik diyagramı



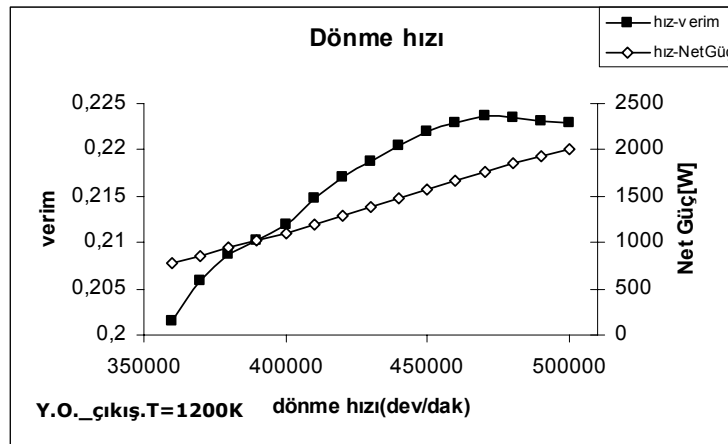
#### 4. UYGULAMALAR VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Şekil 12’de oluşturulan mikro-gaz türbin modeli kararlı hal (steady state), anlık (transient) ve parametrik çalışmalar için kullanılmıştır. Parametrik çalışmada bazı parametrelerin(türbin giriş sıcaklığı, dönme hızı vb.) net güç ve çevrim verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kararlı hal çalışmalarında şaftın dönme hızının değişimi  $\theta$  olarak tanımlanmıştır. Yapılan tüm analizler, kompresör karakteristik eğrileri üzerinde gösterilmiştir.

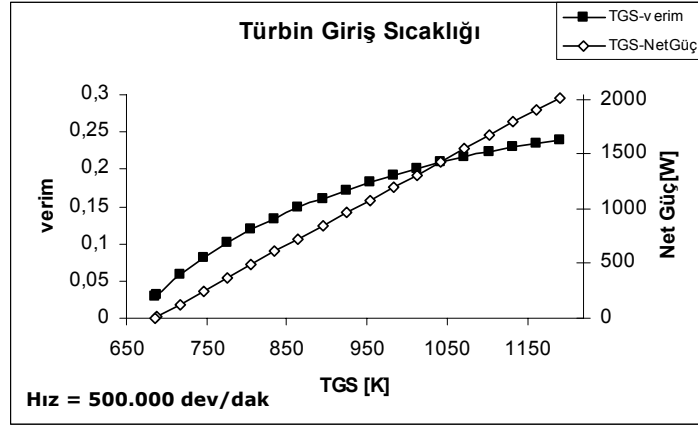


Şekil 13:  
Basit çevrimin tamamlanmış çevrim ile karşılaştırılması

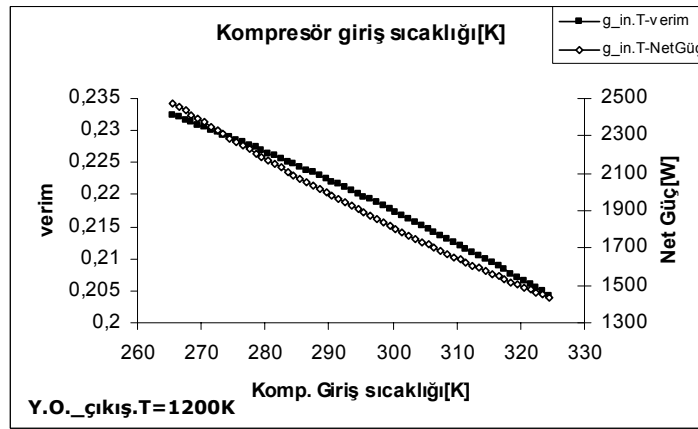
Şekil 13’de ısı değiştiricisi bulunmayan basit çevrim ile ısı değiştiricisi ve tüm basınç kayıpları, ısı transfer etkileri eklenmiş tamamlanmış çevrimin (şek.12) karşılaştırılması gösterilmiştir. Böylece ısı değiştiricisi, basınç kayıpları ve ısı transfer parametrelerinin etkisi gözlemlenmiştir. Şek. 13’den görüldüğü gibi bu parametrelerin eklenmesi ile çalışma noktası çalkantılı akış hattına (surge line) yaklaşmaktadır. Şekil 14’den şekil 17’ye kadar bazı parametrelerin, net güç ve çevrim verimi üzerine etkileri gösterilmiştir. Bu analizlerin tutarlı sonuçları, sistem benzetiminin doğru yapıldığı hakkında fikir vermektedir.



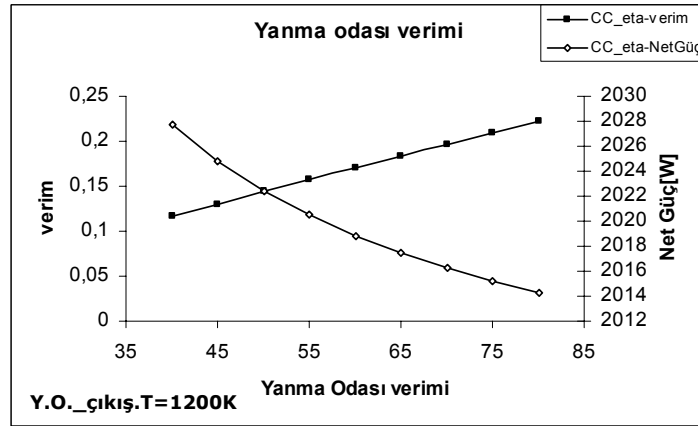
Şekil 14:  
Dönme hızının net güç ve çevrim verimi üzerindeki etkisi



Şekil 15: Türbin giriş sıcaklığının net güç ve çevrim verimi üzerindeki etkisi



Şekil 16: Kompresör giriş sıcaklığının net güç ve çevrim verimi üzerindeki etkisi

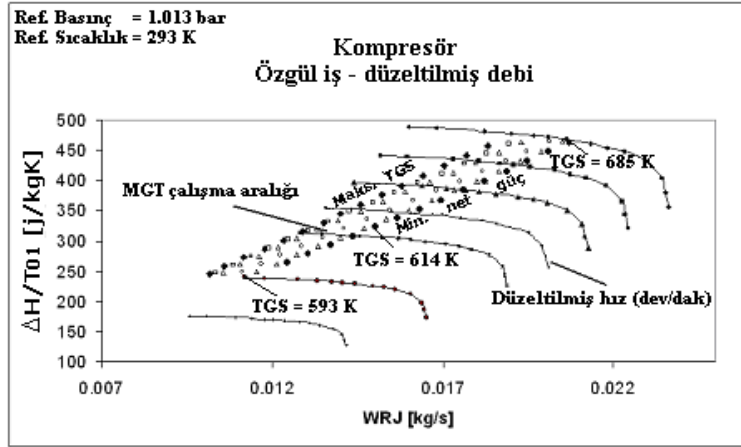


Şekil 17: Yanma odası veriminin net güç ve çevrim verimi üzerindeki etkisi

Şekil 17'den görüleceği gibi, yanma odası çıkışında aynı sıcaklığı elde etmek için yanma verimi arttıkça daha az yakıt debisinin gerekliliği söz konusudur. Dolayısıyla, yanma verimi artarken çevrim verimi artmıştır, net güçteki küçük azalma ise, verimdeki artış enerjisinin, debideki düşümün getirdiği enerji eksikliğinden daha düşük olmasındandır.

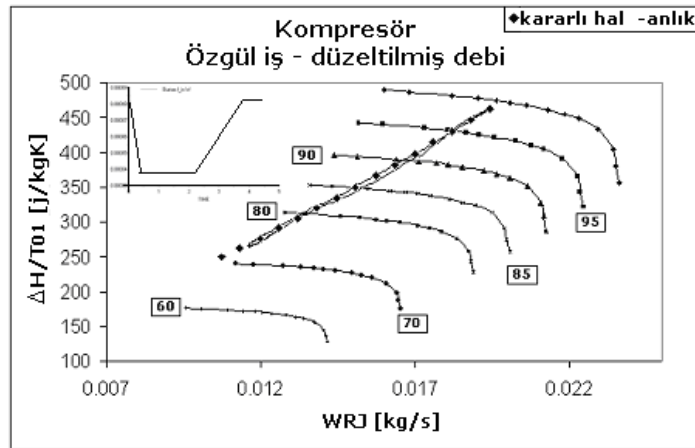
Tasarım dışı (off-design) çalışmalar durumunda, çalışma aralığı, her iki turbo makinenin kısıtlamaları (ör: kompresör çalkantı akış veya boğulma, türbin boğulma vb.) ve fonksiyonel durumlardan (mümkün olan maksimum türbin giriş sıcaklığı, dönme hızı, net güç vb.) ötürü sınırlandırılmıştır. Şekil 18'de mikro-

gaz türbinin değişik kısıtlamalardan dolayı mümkün olan çalışma aralığı kompresör karakteristik eğrilerinde gösterilmiştir.



Şekil 18: Mikro-gaz türbininin kompresör karakteristik eğrisi üzerinde çalışma aralığı

Mikro-gaz türbin performansının analizinin tamamlanabilmesi için, anlık elektrik yüklemelerindeki veya termal çıkış gereksinimlerinin değişimlerinden dolayı meydana gelebilecek durumların çalışmasını da incelemek gerekir. Sistemin cevap karakteristiğinin nedeni, maksimum devir, gaz sıcaklığının sınırlamaları veya yakıt enerji tüketiminden dolayı olabilir [8]. Sistemin anlık performansının incelenebilmesi, dönel komponentlerin atalet momentleri göz önünde bulundurularak, her bir komponentin sistem cevabı gecikmesi ile sağlanmıştır. Kararlı hal yaklaşımı, sistemin gerçek mekanik ve akışkan ataletini daha iyi benzete-bilen bir sayısal plana dayalı, yakıt debisinin azaltılıp artırılması ile yer değiştirilmiştir. Yakıt debisi önce  $6.9e-5$  kg/s'den  $4.5e-5$  kg/s'ye ve daha sonra tekrar  $6.9e-5$  kg/s'ye yükseltilerek, anlık yavaşlama hızlanma analizleri yapılmış ve sistem cevabı gözlemlenmiştir. Şekil 19'da yakıt debisinin zamana göre değişimi sol üst köşede gösterilmiştir, farklı dönme hızlarındaki kararlı hal çalışma durumları noktalar halinde ve bu aralıktaki anlık çalışma boyunca sistemin izlediği eğri kompresör karakteristiği üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 19: Mikro-gaz türbininin yavaşlama, hızlanma ve kararlı hal çalışma durumları

EcosimPro ile kararlı hal analizleri 0,22 s'den daha kısa sürmektedir. Tüm analizler için Centrino 1.6GHz, 1GB Ram özellikli dizüstü bir bilgisayar kullanılmıştır. Anlık zaman süreci ise 3.8 s'dir. Bunun için CPU zamanı 1.84 s'dir. Sistem için tanımlı 372 değişken ve 183 denklem vardır, yakınsama  $10^{-6}$  olarak tanımlanmıştır.

## 5. SONUÇLAR

Mikro-gaz türbininin küçük boyutları gerekli tasarım hedefleri için sorunlar çıkarmaktadır, komponentlerin verimi, üretilebilirliği ve montajlanması bu sorunların başlıcalarıdır. Yüksek termal gerilmeler ve merkezkaç kuvvetleri, tasarım zorluğunda karşımıza çıkan diğer sorunlardır.

EcosimPro programında, mikro-gaz türbininin komponentlerinden oluşan bir kütüphane, tüm sistemin kararlı hal ve anlık performansının incelenmesi için oluşturulmuştur. Programın esnekliği, geliştirilebilirliği ve bununla beraber oldukça kullanışlı grafik ara yüzü Ecosimpro'yu sistemin termodinamik analizi için oldukça faydalı bir araç haline getirmiştir. Bu çalışmada, kompresör ve türbin karakteristik eğrileri, multidisipliner optimizasyon sonucu elde edilen geometriler için oluşturulmuştur. Karakteristik eğrileri üzerinde sistemin hem kararlı hal hem de anlık performansı incelenmiştir. Bazı parametrelerin net güç ve çevrim verimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonunda, basınç kayıpları ve sistem içerisindeki ısı transfer etkileri göz önüne alındığında, çalışma noktasının, kompresör karakteristik eğrileri üzerinde, çalkantı akış hattına (surge line) yaklaştığı gözlemlenmiştir. Kompresör giriş sıcaklığı, türbin giriş sıcaklığı ve dönme hızının net güç ve verim üzerinde etkili olan en önemli parametreler olduğu anlaşılmıştır.

İleriki çalışmalarda C++, fortran vb. programlarda yazılmış harici fonksiyonların EcosimPro programında kullanımı ile tüm çevrim optimizasyonu için bir çalışma yapılabilir. Ayrıca turbo makinelerin karakteristik eğrilerinin oluşturulmasında her bir dönme hızı ve basınç oranı değeri için Navier-Stokes analizlerinin yapılması gerçeğe daha yakın değerler elde edilmesini sağlayacaktır.

## 6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Belçika'da SBO 030288 PowerMEMS projesi tarafından desteklenmiştir. Çalışmanın gerçekleşmesindeki katkılarından dolayı Prof. Dr. Van den BRAEMBUSSCHE, Dr. Zuheyr ALSALIHİ ve Tom VERSTRAETE'ye teşekkür ederiz.

## 7. KAYNAKLAR

1. Decuypere, R. ve Verstraete, D. (2005) Micro Turbines from the Standpoint of Potential User, VKI RTO-AVT-131, *Micro Gas Turbines*, Mart 14-18, 2005, Rhode-St-Genèse, Belçika.
2. <http://www.powermems.be>.
3. Verstraete, T., Alsalihi, Z. ve Van den Braembussche, R. A. (2007) *Multidisciplinary optimization of a radial compressor for a micro gasturbine applications*, von Karman Enstitüsü.
4. Verstraete, T., Garreau, M., Alsalihi, Z., ve Van den Braembussche, R. A. (2006) Multidisciplinary optimization of a radial turbine for a micro gasturbine applications, *Avrupa Türbin Konferansı*.
5. Peirs, J., Reynaerts, D., Verplaetsen, F., Norman, F., ve Lefever, S. (2003) Development of a micro gas turbine for a electric power generation, *Euroensors XVII, The 17<sup>th</sup> European Conference on Solid-State Transducers*, Guimarães, Portekiz, 311-314.
6. Alexiou, A. ve Mathioudakis, K. (2005) *Development of a turbofan performance model using a generic simulation tool*, Atina Teknik Üniversitesi.
7. EcosimPro kullanıcı klavuzu.
8. Tuccillo, R. (2005) Performance and Transient Behaviour of MGT Based Energy Systems, *Vki/Rto Lecture Series on Micro Gas Turbines*, Volume Rto-Mp-Avt-131, Mart 2005.