

GAZ TÜRBİN MOTORU EGZOZU İÇİN ATIK ENERJİ GERİ KAZANIMI VE BOİLER TASARIMI – DENEYSEL SONUÇLAR

Mustafa Çağrı KIRSEVEN* ve Volkan KIRDAR† İbrahim Sinan Akmandor‡ ve Süleyman EFE§
ODTÜ, ANKARA; PARS Makina, ANKARA ODTÜ, ANKARA; PARS Makina, ANKARA

ÖZET

Öngörülen çalışmada gaz türbinli motorların egzozundan atılan enerjinin bir kısmının sisteme geri kazandırılması ve bu sayede verimin artırılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalar ve elde edilen veriler sonucu verimin ciddi oranlarda artırılacağı ispatlanmıştır. Su pompası ile sürülen, yeni, tek akış yönlü, spiral bir boiler, gaz türbinli motor egzozundan atık ısı geri kazanımı amacıyla Rankine Çevrimi referans alınarak tasarlanmıştır. Boilerin ve Rankine Çevriminin termodinamik değişkenleri hesaplanmış ve boilerin verimi, kayıplar ve gaz türbinli motora etkileri incelenmiştir. Bu aşamada, sistemde akışkan olarak sadece su kullanılmasına rağmen, deney düzeneği oluşturulurken, sistem farklı akışkanlar kullanılabilir şekilde kurulmuştur. Bununla birlikte gaz türbinli motor olarak Allison 250-C18 model bir turbo şaft motor kullanılmıştır. Ayrıca boilerden çıkan su buharı Scroll tipi bir türbinde kullanılmıştır. Türbinin ürettiği gücü ölçmek için de çeşitli yük gruplarının ve bir jeneratörün yardımına başvurulmuştur. Deneyler sırasında sistemden geri kazanılan atık enerji elektrik enerjisine çevrilerek kullanılmış ve ölçülmüştür. Sürekli olarak 40 kW güç üretimi sağlanabilmiş, en yüksek olarak da 40kW değerine anlık olarak ulaşılmıştır. Gerekli düzenlemeler ve dişliler vasıtasıyla, üretilen enerji, sisteme mekanik enerji olarak da geri kazandırılabilir. Daha sonra yapılabilecek düzenlemeler (kullanılan türbinin iyileştirilmesi veya farklı akışkanlar denenmesi) ile sistem geliştirilebilir ve verim artışı daha da yükseltilebilir. Yapılan çalışmayı geliştirmek adına, boiler çeşitli kodlar ve optimizasyon araçları vasıtasıyla geliştirilmeye devam etmektedir.

GİRİŞ

Amaçlanan çalışma kapsamında oluşturulan makalede gaz türbinli motorlar için verimlilik ve buna bağlı olarak motorun performans artışı amaçlanmıştır. Bu verim artışı, egzozda atık olarak bulunan gazın bir boiler içerisinden geçirilmesi sonucu motora herhangi bir yük bindirmeden veya zarar vermeden, enerjinin bir kısmını sisteme geri döndürerek veya farklı sistemlerde kullanarak geri kazanımı amaçlar.

Atık ısıdan güç geri kazanımı potansiyeli; gaz türbinli itki sistemine sahip hafif ve ağır hava araçları için gerekli elektrik enerjisinden (80-240 kW) daha fazlasını karşılayabilecek kapasitededir. Bu nedenle, atık ısı geri kazanımı teknolojisi sayesinde araç üzerindeki tüm elektrikli ekipmanların ek

* Yüksek Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: e156112@metu.edu.tr

† Uzman, E-posta: volkan.kirdar@parsmakina.com

‡ Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: sinan.akmandor@parsmakina.com

§ Uzman, E-posta: suleyman.efe@parsmakina.com

bir güç sistemine ihtiyaç duyulmaksızın çalıştırılabilmesi teorik olarak mümkün gözükmektedir. Bu sistemlerin tek dezavantajı araca ekstra ağırlık bindirecek olmasıdır. Bu ek ağırlık, ikincil sistemler ve kontrol sistemleri de dahil olmak üzere 5-15 kg/kW aralığında olmaktadır. Atık ısı geri kazanımı sistemi, motora başarılı bir şekilde entegre edildiğinde, araçtaki elektrik ihtiyacını karşılama görevindeki sistemlerin yerini dolduracak ve bu sayede toplam ağırlıkta bir azalma elde edilecektir. Atık ısı geri kazanım sistemleri ile üretilen her kW enerji direk olarak itki sisteminin de yakıt tüketiminde azalma sağlarken, üretilen güç miktarı kadar yük fazlalığını ortadan kaldırır. Soğutucu fan ve pompa yüklerinin ortadan kalkması ile azami irtifa ve yükler de değişeceğinden, turbo şaft motorunun performansı daha da gelişecektir. Her bir 10 kW'lık geri kazanım motor termodinamik toplam verimini %1 oranında (türbin performansı da hesaba katıldığında) arttıracığı öngörülmüştür.

Geri dönüşüm sistemini Rankine veya Organik Rankine Çevrimleri ile yapılmaktadır. Bu çevrimlerde türbin, boiler, kondansör ve pompa olmak üzere dört ana eleman bulunur. Bu makalede, 4 ana eleman içerisinde boiler üzerine çalışılmıştır. Gaz türbinli motorlar üzerine çalışıldığı için motoru korumak ve performansına etki etmemek adına, egzoz çıkış alanını korumak tasarım sınırlamalarının başında gelmiştir. Bu yüzden %90'lara kadar çıkabilen boiler verimleri bu uygulama tarz uygulamalar için ortalama %40 seviyesinde kalmıştır.

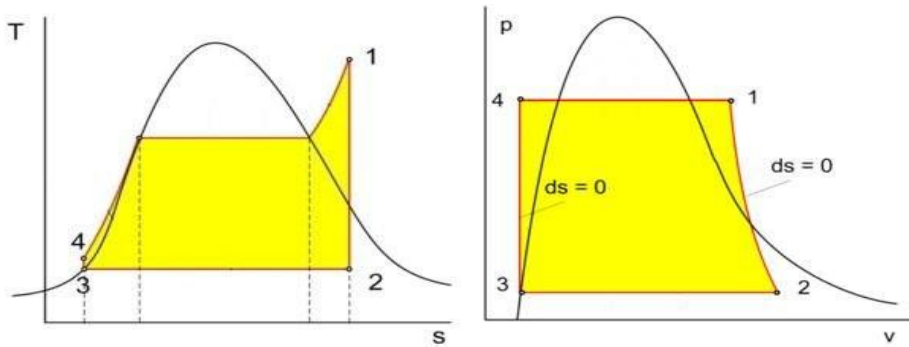
YÖNTEM

Boiler tasarımı gerekli ısı transferi alanı ve su hacmi hesaplandıktan sonra test edilecek sistem göz önünde bulundurularak egzoz çapı sabit tutulacak şekilde yapılmış ve deneme yanılma yöntemleri ile geliştirilmiştir. Tasarım sırasında termodinamik çevrim olarak Rankine çevrimi benimsenmiştir.

Termodinamik çevrim detayları

Rankine Çevrimi analizlerinin asıl hedefi, test edilen dinamik atık ısı geri kazanım teknolojileri hakkında genel bir bilgi vermektir. Bu makalede, ısı transferi için avantajlardan, dezavantajlardan ve muhtemel uygulamalarıyla birlikte yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Dikkate alınan ana değişkenler; verim, özgül iş ve basitlik/sadelik olarak yorumlanabilir.

Herkesçe bilinen Rankine çevrimi genellikle MW ebadındaki endüstriyel enerji santralleri tarafından kullanılmaktadır. Çalışılan akışkan olarak genellikle su tercih edilir ve buharlaşmanın olacağı boilerde pompalanır ve sonrasında bu su türbini besler ve sonunda da yoğunlaştırılır. İdeal çevrimde, türbindeki genleşme ve kompresördeki sıkıştırma isentropiktir, buna ek olarak evaporatör ve kondansördeki ısı transferi ise isobariktir.



Şekil 1: İdeal Rankine Çevrimi

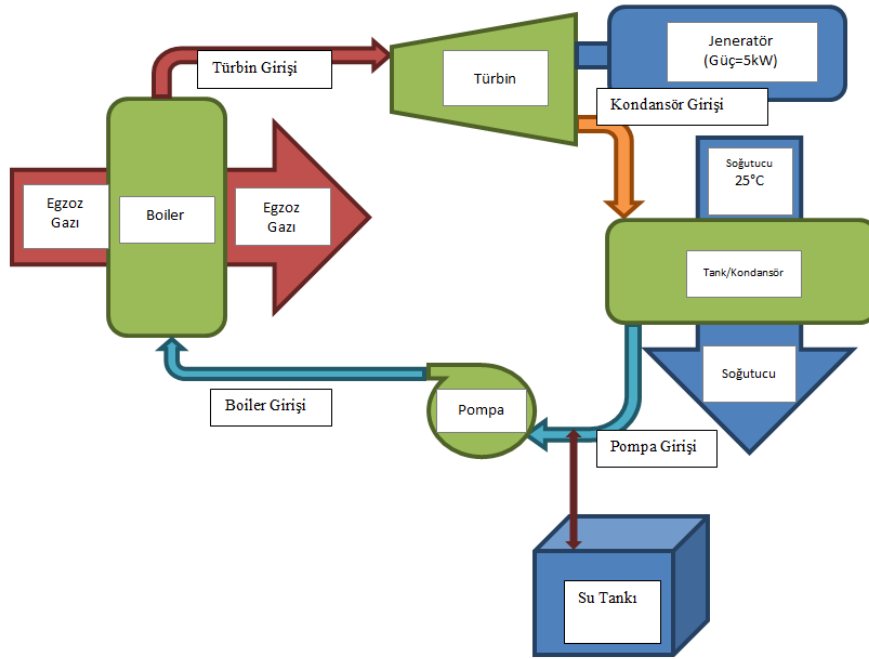
Termodinamik çevrim, belirli bir işin verimliliği değerlendirmek amacıyla kullanılır.

- Çevrim verimliliği hakkında T-s şeması önemli bir kaynaktır. Çevrim ne kadar dikdörtgenleşirse, ideal Carnot çevrimine ve maksimum verimliliğe o kadar yakın veriler elde edilir.

- p-v şeması ise çevrim aracılığıyla üretilmiş özgül iş hakkında bilgi vermektedir. Çevrimde yer alan eğriler arasında kalmış olan alandan gerekli iş hesaplamaları yapılabilir.

Bahsi geçen bu iki durum (çevrim verimliliği ve özgül iş) kendi aralarında çelişirler; daha dikdörtgen olan çevrimler, daha yassı p-v diyagramı anlamına gelir.

Geleneksel, alışlagelmiş Rankine Çevrim koşullarında, p-v diyagramı, göreceli olarak daha iyi bir özgül iş ortaya koyar; ancak T-s diyagramı dikdörtgensel bir diyagram değildir ve bu yüzden de verimliliği düşürülmüştür.



Şekil 2: Dinamik Atık Isı Geri Kazanım Sistemi Şeması

UYGULAMALAR

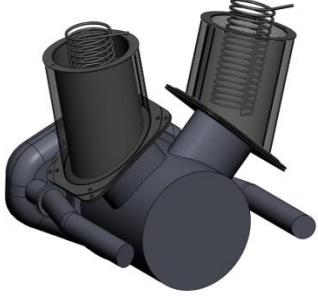


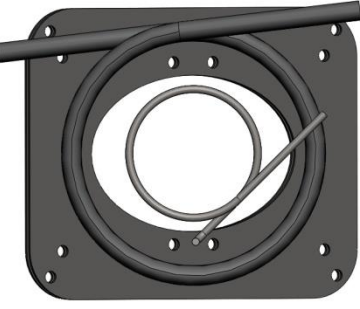
Sistem girdileri

Yapılan testler sırasında aşağıdaki sabit girdiler kullanılmıştır.

Boiler Giriş Sıcaklığı (°C)	24
Su debisi (g/s)	14
Egzoz gazı debisi (kg/s)	1.2

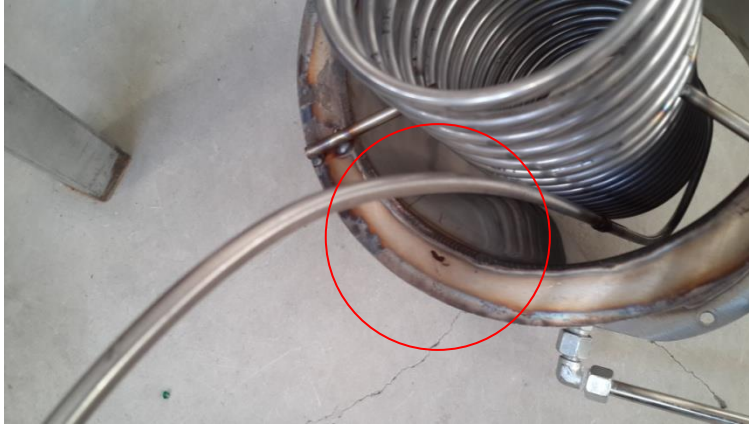
Turbo şaft egzoz uzantıları

Makale kapsamında yapılan ve test edilen boiler konfigürasyonları ve özellikleri:

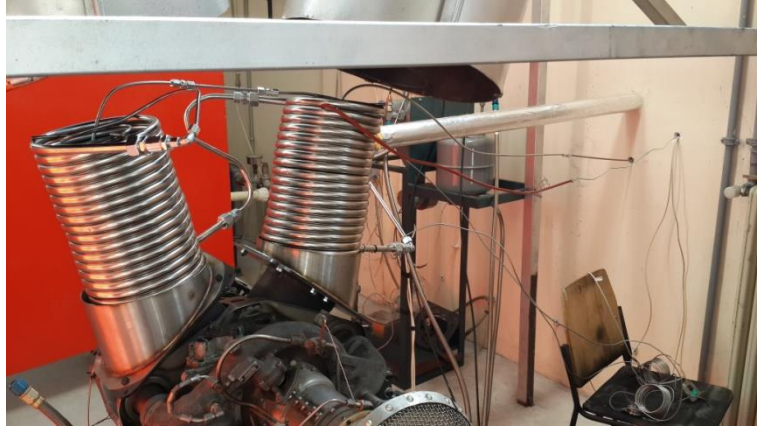
Boiler no.1			<p><i>Dış tank yüksek sıcaklık altında basınç testini geçememiş ve uygulamadan vazgeçilmiştir.</i></p>
Boiler no.2			<p><i>Boiler 350°C ve 50 barda aşırı ısıtılmış buhar üreterek başarılı olmuştur.</i></p>

Dış çap [mm]	İç Çap [mm]	İç boiler uzunluğu [m]	İç boiler ağırlığı [kg]	Toplam boiler hacmi [Litre]	Dış boiler ağırlığı [kg]	Toplam ağırlık [kg]
6	4	6	1,33	0,07 + 2,5	6,20	7,53
6	4	6	1,33	0,07 + 1,8	4,42	5,75

Birinci boiler gerekli su hacmi ve yüzey alanı hesaplanarak imal edilmiş fakat daha sonra yapılan testler sırasında üretim kaynaklı hatalar sebebiyle başarısız olmuştur. Yüksek sıcaklık ve basınca dayanamayarak üzerinde bir bombe oluşmuştur. Bu tasarımın başarısız olmasından sonra, basınca dayanaklı fakat ön ısıtma kısmının hacmi daha az olan bir boiler üretilmiştir. Yeni tasarlanan boilerin ısınma yüzeyi de daha geniş olduğu için testler sonucunda başarıya ulaşılmıştır.



Şekil 3: Boiler No.1 (dış tanktaki basınç sebebiyle meydana gelen bombe)

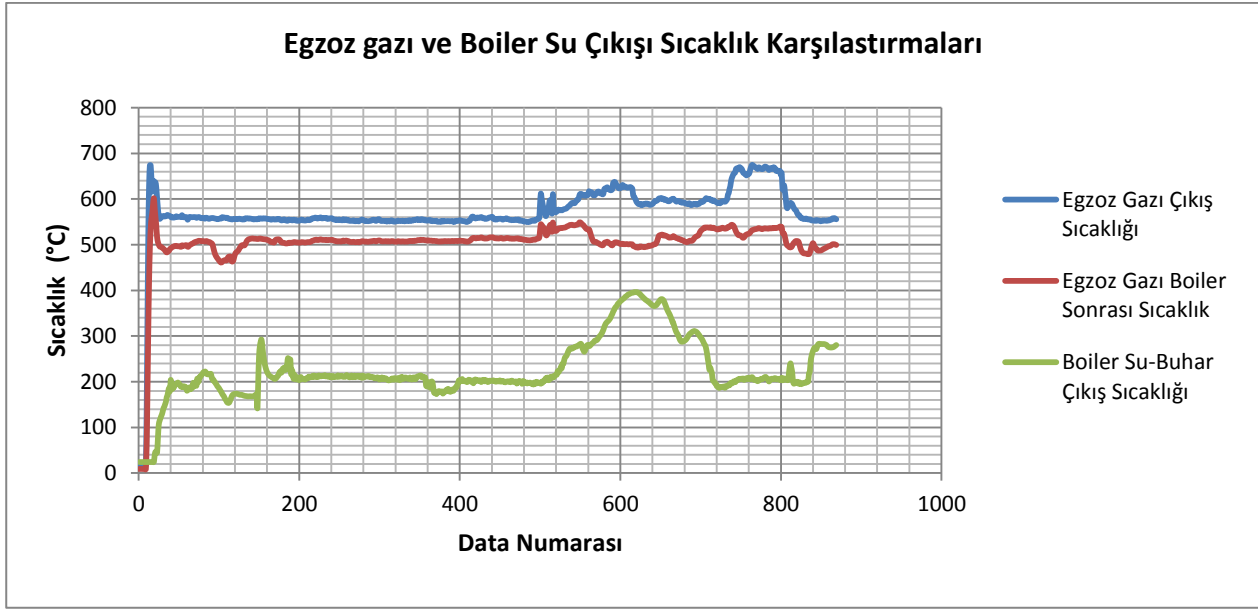


Şekil 4: Boiler No.2 (sonuç alınan boiler)



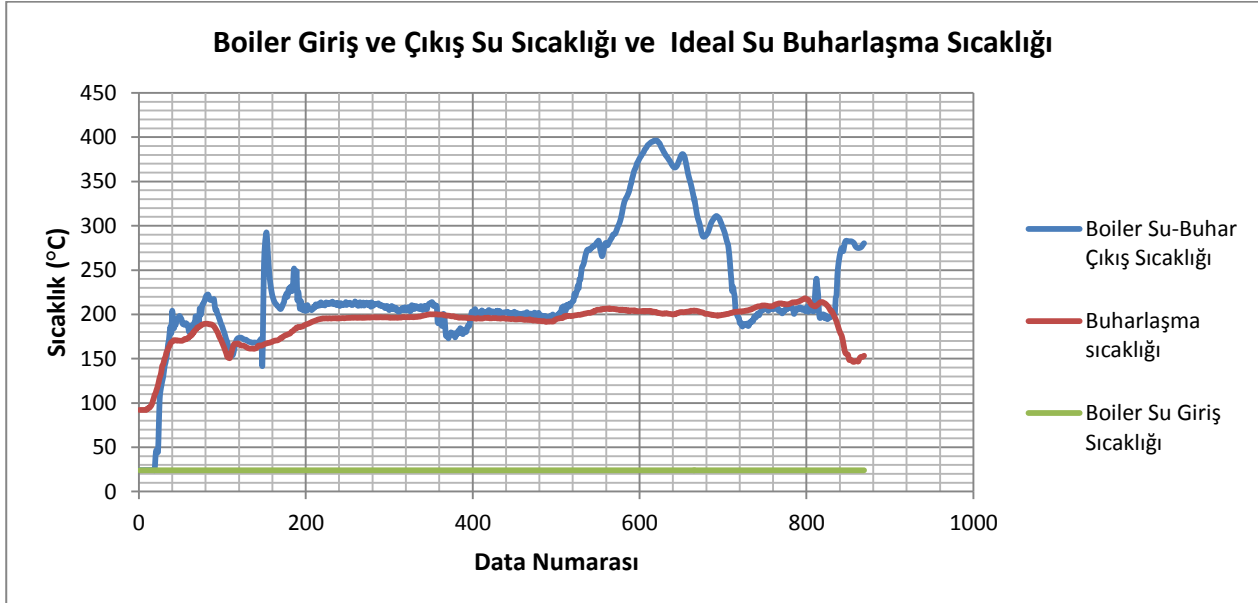
Şekil 5: Son konfigürasyonda kullanılan boiler detay resimleri

Yukarıda gösterilen boiler konfigürasyonu ile en yüksek 400°C, ortalama 15barda 14g/s buhar üretmiştir. Bu sonuç aşağıda detaylı olarak gösterilen 2 no.lu boiler ile alınmıştır.



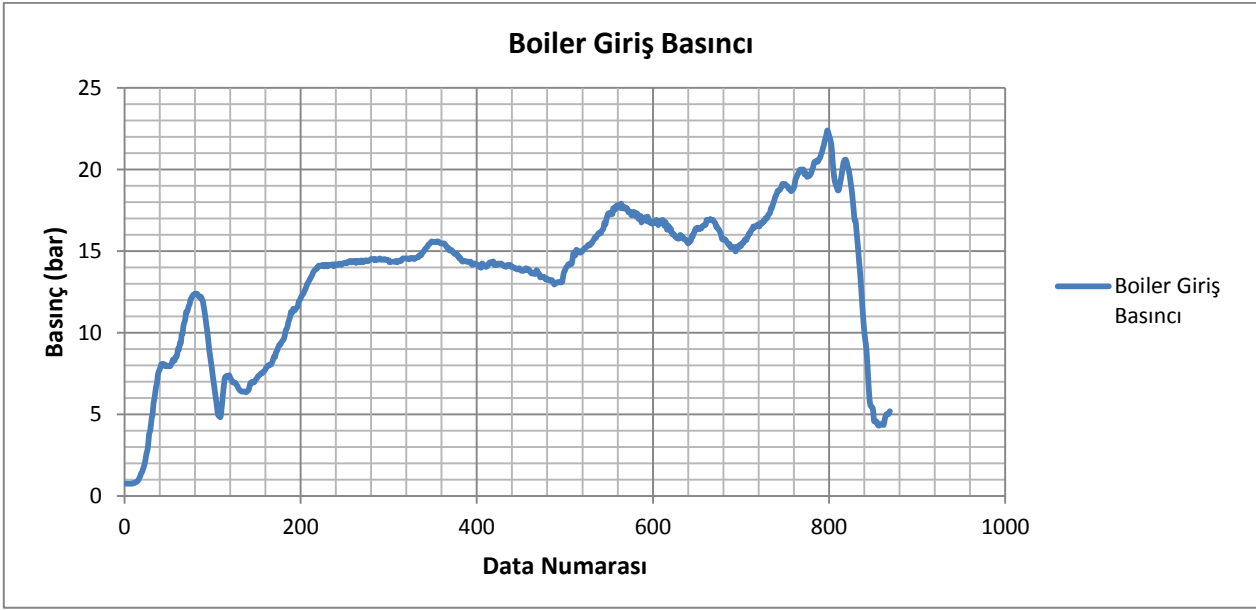
Şekil 6: Allison 250 C18 turbo şaft motoru egzoz sıcaklığı giriş (boiler öncesi) ve çıkışları (boiler sonrası) (Data numarasına göre çizilmiş olan grafiklerde her bir birim 2 saniyeye denk gelmektedir.)

Egzoz boiler öncesi ve sonrası çıkış sıcaklıkları boilerlere verilen enerjiyi ifade etmektedir. Boilerlere giren enerji daha sonra boiler verim hesabında kullanılacaktır. İlk 50 veride oluşan olağan sıçrama motorun başlatılmasına tekabül etmektedir. Ayrıca 520'inci veriden sonra oluşan dalgalanmanın sebebi motorun şaft yükünün artırılmasıdır.



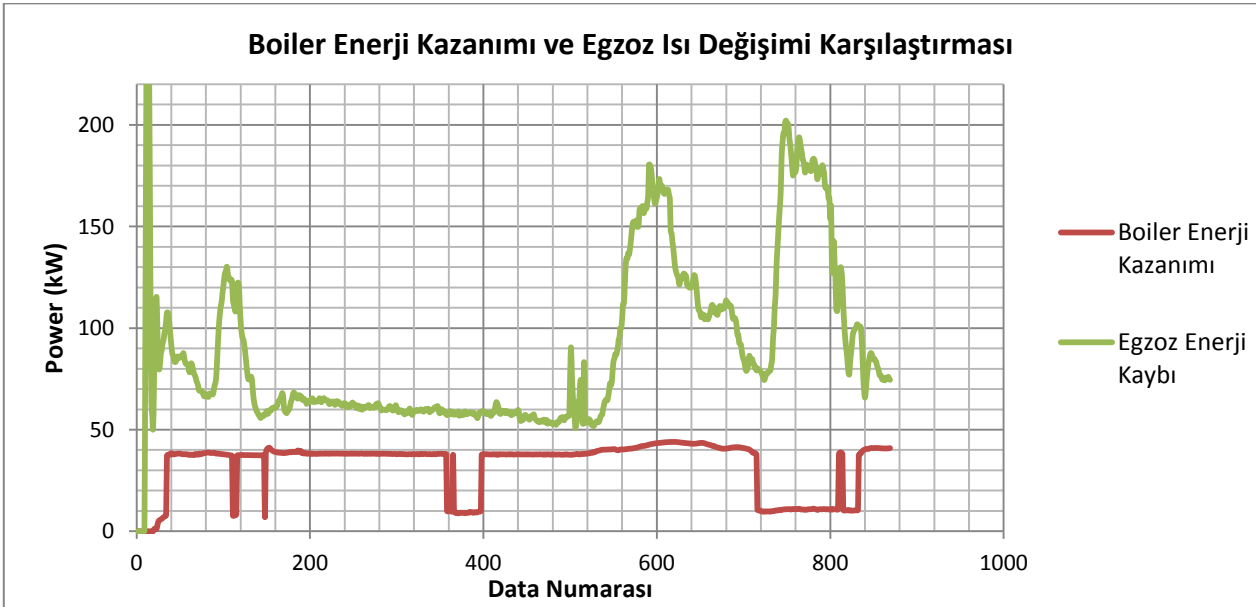
Şekil 7: Boiler Su Giriş ve Çıkış Sıcaklıkları

Allison 250C 18 motorunda yapılan deneylerde aşırı ısıtılmış buhar sadece 520-720 verileri arasında motor şaftının yüklenmesinden sonra görülmüştür. Bunun haricindeki kısımlar su-buhar karışımı olarak nitelendirilebilir. Enerji hesaplamalarında buhar-su karışımı entalpi hesaplanırken buhar-su oranı hesaba katılmamıştır. Buharlaşma sıcaklığının altında kalan boiler çıkış sıcaklığı bölgelerinde Buhar-su oranı 0 alınmıştır. (%100 su) Bu yüzden entalpi değerlerinde anlık düşmeler ve sıçramalar görülmesi normaldir.



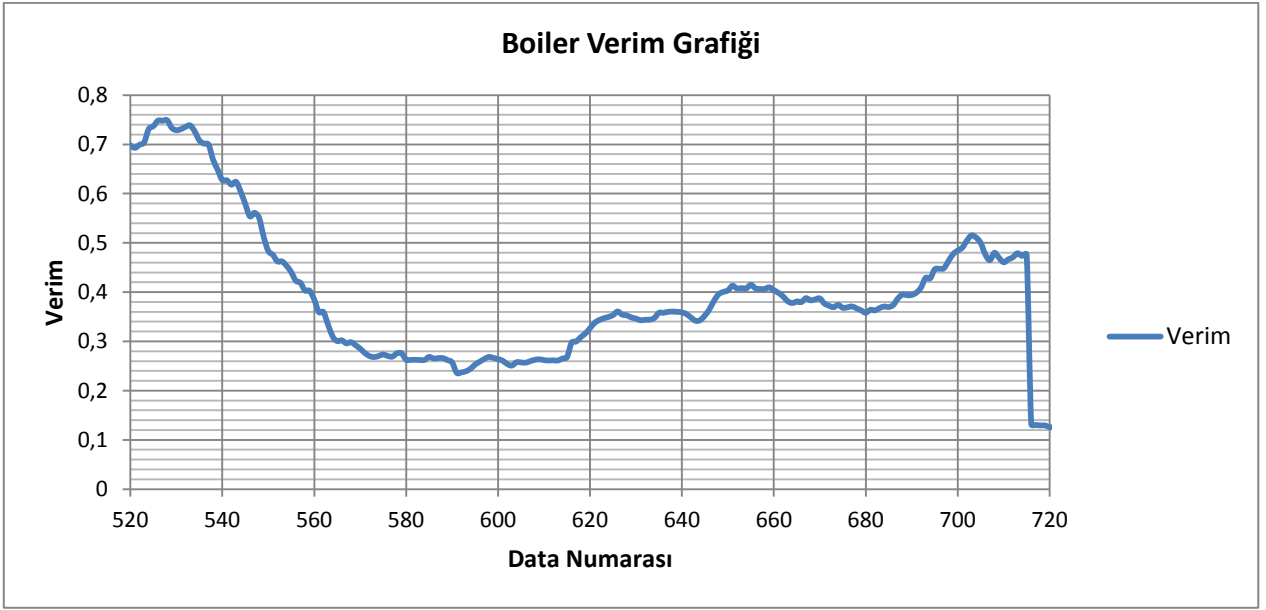
Şekil 8: Boiler Giriş Basıncı

Boiler enerji kazanımı boiler giriş basıncı ve sıcaklığı ile hesaplanmıştır. İdeal buhar tablosu kullanılarak her sıcaklık ve basınç değeri için entalpi ve güç hesabı yapılmıştır.



Şekil 9: Boilerin kazandığı anlık enerji ile egzoz enerji kaybının karşılaştırılması grafiği

Daha önce belirtildiği gibi boiler enerji kazanımındaki ani düşüşler yukarıdaki şekilde gözlenebilir. Buhar doyum sıcaklığında buhar-su oranı belirsiz olduğundan aşırı ısıtılmış buhar kısımları haricinde yapılan hesaplamalarda doyum sıcaklığına yakınlığına göre bu oran 0 veya 1 olarak alınmıştır. Aşırı ısıtılmış buhar kısımları (520-720 verileri arası) 400 saniyelik 40kW üzeri buhar enerji kazanımı sağlamıştır.



Şekil 10: Boiler Verim Grafiği

Boiler verimi buhar enerjisinin giren enerjiye oranı ile hesaplanmıştır. Aşırı ısıtılmış buharın görüldüğü noktalardaki boiler verimleri yukarıdaki gibidir. Motor egzoz sıcaklığı yükleme sırasında çok dalgalandığından durağan bir verim grafiği yakalanamamıştır. Ortalama olarak %39.76 boiler verimi elde edilmiştir.

SONUÇ

Yapılan deneyler sonucunda amaçlanan egzozdan ısı geri kazanımı ile turbo şaft motorlu araçların elektrik ihtiyacının karşılanabileceği veya şaftta direkt olarak verilebileceği ortaya konulmuştur. Rankine çevrimi yerine kullanılabilecek bir organik Rankine çevrimi ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bu sayede verim artışı sağlanacağı düşünülmektedir. Geri kazanım sistemleri geliştirilerek atık ısıya sahip farklı uygulama alanlarında da kullanılabilir. Buna ek olarak egzoz boğulması ihtimali turbo şaft motorlara göre düşük olabilecek sistemlerde verim çok daha yüksek seviyeye çekilebilir. Bu aşamada elde edilmiş olan sürekli 40 kW'lık güç doğru türbin ve jeneratör tercihleri ile sisteme 9 kW'a kadar enerji geri kazandırılabilir.

Kaynaklar

Borgnakke, C., Sonntag, R.E., 2009. Fundamentals of Thermodynamics, 7. Basım, Wiley Inc.

Incropera, F.P. [et. al.], 2006. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6. Basım, Wiley Inc.

Quoilin, S., 2007. Experimental Study and Modeling of a Low Temperature Rankine Cycle for Small Scale Cogeneration, Electro-Mechanical Engineer, University of Liege Aerospace And Mechanical Engineering Department.