

Article Arrival Date**11.04.2020****Article Type****Research Article****Article Published Date****12.06.2020****Doi Number:** <http://dx.doi.org/10.38063/ejons.205>

ATIK ISI GERİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ: BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORDA ÖRNEK BİR UYGULAMA

Ahmet Baturalp ÖKMEN*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,
ahmetbaturalp@gmail.com, Isparta/Türkiye, ORCID: 0000-0002-8036-145X

Doç. Dr. Habib GÜRBÜZ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü,
habibgurbuz@sdu.edu.tr, Isparta/Türkiye, ORCID: 0000-0001-5157-6227

*** Sorumlu yazar**

ÖZET

Bu çalışmada, enerji üretiminin gerçekleştiği sistemlerde kayıp enerji olarak atmosfere atılan ısı enerjisinin yeniden kullanılabilir hale getirildiği atık ısı geri dönüşüm sistemleri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, içten yanmalı motorlarda egzoz gazları ile atmosfere atılan atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü termoelektrik jeneratör sistemin örnek bir uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 190x160x50 mm boyutlarında dikdörtgen geometrik yapıya sahip şekilde tasarlanarak 3 mm alüminyum levha malzemeden üretilmiş egzoz eşanjörü tek silindirli buji ateşlemeli bir motorun egzoz yoluna bağlanarak 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d sabit motor devrinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, egzoz eşanjörü üzerinden egzoz gazlarının giriş-çıkış sıcaklıkları ile birlikte eşanjör yüzeyinden seçilen 6 farklı noktadan K tipi termokupl kullanılarak sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen eşanjör egzoz gazı giriş sıcaklığı ve debisi kullanılarak aynı eşanjör geometrisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile zamandan bağımsız ve sabit basınç altında sayısal akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal analizi sonuçları karşılaştırılarak HAD programında gerçekleştirilen sonuçların doğruluğu tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen bulgulardan, atık ısı dönüşüm sistemleri kullanılarak enerji üretim sistemlerinde toplam sistem veriminin artırılacağı görülmüştür. Ayrıca, tasarlanarak deneysel çalışmaları gerçekleştirilen egzoz eşanjörü giriş-çıkış sıcaklıkları ile birlikte eşanjör içerisindeki sıcaklık dağılımının HAD programı yardımıyla %10'a yakın bir hata ile tespit edilebileceği, hata oranının düşük motor devirlerinde yüksek motor devirlerine oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İçten yanmalı motor, Egzoz atık ısı dönüşümü, Termoelektrik jeneratör, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

WASTE HEAT RECOVERY SYSTEMS: A SAMPLE APPLICATION IN A SPARK IGNITION ENGINE

ABSTRACT

In this study, waste heat recovery systems were examined in terms of reuse which is heat energy discarded to atmosphere as a lost energy at the energy production systems. In the study also in which

the waste heat energy discarded into the atmosphere with exhaust gases in internal combustion engines is converted into electrical energy had been performed an exemplary application of the thermoelectric generator system. In this scope, the exhaust exchanger, which has design rectangular geometric structure of 190x160x50 mm dimensions and produced from 3 mm aluminum plate material and connected to the exhaust way of a single-cylinder spark ignition engine at a constant engine speed of 1800 rpm, 2200 rpm and 2600 rpm experimental studies had been performed. In experimental studies, using K type thermocouple from 6 different points selected from the heat exchanger surface via the inlet-outlet temperatures of the exhaust gases over the exhaust heat exchanger temperature measurement was carried out by. Using the heat exchanger exhaust gas inlet temperature and flow rate obtained in the experimental studies, computational fluid dynamics (CFD) method of the same heat exchanger geometry was performed in a steady and pressure-based analysis. By comparing the experimental and numerical analysis results, the correctness of the results performed in the CFD program was determined.

From the results obtained within the scope of the study, it was observed that total system efficiency can be increased in energy generation systems by using waste heat recovery systems. Also, by designing experimental work carried out exhaust heat exchanger inlet-outlet temperatures combined heat exchanger in which the temperature distribution of the CFD program aid can be detected by a close error to 10%, compared to high engine speed at low engine speed error rate was found to be lower.

Keywords: Internal combustion engine, Exhaust waste heat conversion, Thermoelectric generator, Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlarda (İYM) motora alınan yakıttan elde edilen ısı enerjisinin bir kısmı mekanik enerjiye (%25-40) dönüştürülürken geri kalan kısmı egzoz gazları, soğutma sıvısı, radyasyonla ısı transferi kayıpları, mekanik ve yardımcı sistemlere harcanan kayıplar olarak kullanılamıyan enerjiye dönüşmektedir. Pistonlu içten yanmalı motorlarda, çevrimin devamlılığını sağlayabilmek ve egzoz zamanındaki pompalama kaybını azaltabilmek için egzoz supabının alt ölü noktadan (AÖN) önce açılması gerekir. Böylece motora alınan yakıttan elde edilen ısıнын bir kısmı egzoz gazları ile atmosfere atılarak kayıp ısı enerjisini ortaya çıkartmaktadır (Borat vd.,1995; Çetinkaya, 2000; Newton vd., 1997; Zammit, 1987; Beck vd., 1988; Yalçın-tepe, 1977). Silindir içinde gerçekleşen yanma sonu oluşan ısıнын yaklaşık %40'lık kısmı egzoz gazları ile atmosfere atılırken, yaklaşık %28'i soğutma sıvısına giden ısı kaybı, yaklaşık %4'ü radyasyon ile meydana gelen ısı kaybı, yaklaşık %4'ü yardımcı sistemler ve sürtünmeye harcanan ısı kaybı ve yaklaşık %24-30'luk kısmı motorun çıkış milinden mekanik enerjiye dönüşür (Taymaz vd., 2003; Mruk vd., 1994, Haidar ve Ghajel, 1997). İçten yanmalı motorlu araçlarda egzoz ve soğutma sıvısı yoluyla kaybedilen atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanma yöntemi, aracın elektrik ihtiyacını karşılamak için alternatif bir çözümdür. İYM'un egzoz sistemine dayalı atık ısı dönüşüm sistemin kurulması durumunda, enerjinin verimli kullanımının sağlanmasının yanında atmosfere zararlı sera gazı emisyonlarının azaltılabilmesi mümkün olabilmektedir. Birçok çalışmada, termoelektrik jeneratörler tarafından üretilen elektrik enerjisinin, alternatörün ürettiği enerjinin bir kısmını karşılayacak önemli bir etkiye sahip olabileceği vurgulanmaktadır (Ivankovic, 2012). Termoelektrik sistemlere, ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemler olarak bilinmektedir. Termoelektrik olay Joule yasası, Peltier etkisi, Seebeck etkisi ve Thomson etkisi ile izah edilebilir. Termoelektrik modülün iki yüzeyi arasında istenilen sıcaklık farkı oluşturulabilirse, modülde oluşan Seebeck etkisi ile modül bir doğru akım (DC) güç kaynağı gibi davranmaktadır (Yavuz, vd., 2010). Termoelektrik modüller yarı-iletken malzemelerden oluşup, elektrik kullanarak ısıtma veya soğutma işlemini yapabilirler. Modülün en küçük biriminde negatif (n) ve pozitif (p) tipi yarı-iletkenler kullanılmaktadır. Bir termoelektrik modülde her bir n ve p tipi yarı iletkenler bir çift oluşturacak şekilde dizilirler ve her bir çiftte ternelement denir. Çiftler ve bunların elektriksel bağlantıları genellikle bir seramik elektrik yalıtıcısı

ile bir yığın haline getirilir. Termoelektrik modüller çalışma prensiplerine göre termoelektrik jeneratör ve termoelektrik soğutucu olmak üzere iki gruba ayrılırlar (Doğdu, 2013). Bir dizi termoelektrik modülden oluşan termoelektrik jeneratörler (TEJ), sıcaklık farkından elektrik enerjisi üreten yarı iletken yapıya sahip DC elektrik üreteçleridir. Bir termoelektrik modül (TEM), p ve n tip yarı iletkenlerin, üretilen elektrik gerilimini arttırmak için elektrikselsel olarak seri, ısıl genişlemeyi sağlamak için de seramik plakalar yardımıyla termal olarak paralel bağlanmasıyla oluşturulur. TEJ’de üretilen elektrik gücü yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır (Lertsatitthanakorn, 2007). Araçlarda elektrik enerjisi üretimi açısından alternatörlere alternatif olabilecek termoelektrik üretim (TEJ) sistemlerinin varlığı önemlidir, çünkü TEJ sistemleri sadece motorun atık ısı enerjisini kullanmaktadır. Isı enerjisinin elektrik enerjisine aktarılmasını sağlayan termoelektrik modülün sessiz olması, kirlenici etkisinin olmaması ve hareketli parçaların bulunması ve uzun çalışma süreleri gibi birçok önemli avantajı bulunmaktadır (Temizer vd., 2012; Niu vd., 2009, Liang vd., 2011). İçten yanmalı motorların atık ısı enerjisini kullanan TEJ sistemlerinin performansı, İYM ve egzoz gazlarındaki reaksiyon ile ilişkilidir. İYM’da ortaya çıkan ısı enerjisinin bir kısmı soğutma suyu ve egzoz gazı ile çevreye atılmakta, bu yüzden motorda üretilen enerjinin büyük bir yüzdesi kullanılmamaktadır (Balcı, 2011). Egzoz gazları ile belirli bir hız ve sıcaklıkta atılan ısı enerjisi önemli bir potansiyeldir. Bu nedenle, atık enerji geri kazanımı alanındaki çalışmalar her geçen gün büyük önem kazanmaktadır (MEB, 2013). İYM’da termoelektrik jeneratörlerin kullanımı yakıt ekonomisini artırmak, egzoz emisyonları azaltmak ve motor verimini artırmak için iyi bir yöntemdir (Kunt, 2016). Otomobil üzerinde elektrik üretimi için harcanan enerji miktarı ortadan kaldırılabirirse toplam yakıt tüketiminin %10 azalması öngörülmektedir (Vazquez, 2002). Bunun dışında, TEJ’ler atık ısılar ve ortam arasındaki sıcaklık farkları ile elektrik gücünün elde edilmesinde, sıcaklık algılayıcılarında, enerji kaynağı olarak bataryayı kullanan küçük enerji gereksinimi olan cihazlarda (saat, kablosuz ağırlar vb.) yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Dalola vd., 2009; Khattab ve El Shenawy, 2006).

Bu çalışmada, Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından tasarlanarak 3 mm kalınlığındaki aliminyum levha malzemeden imal edilen eşanjör kullanılarak L tipi silindir kafasına sahip tek silindirli bir motorun 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d sabit motor devirlerinde yakıt olarak benzin kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda; emme havası debisinin yanında eşanjör giriş-çıkış sıcaklıkları ve eşanjör yüzeyinden tespit edilen 6 farklı noktadan sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deney motorunun 3 farklı devrinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ölçülen eşanjör giriş sıcaklığı ve egzoz debi değerleri kullanılarak HAD yöntemi ile sayısal (teorik) analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve HAD analiz sonuçları karşılaştırılarak çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları içi doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

2. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ATIK ISI GERİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

İYM bir motorda soğutma ve egzoz yoluyla kaybedilen atık ısı enerjisinin mikro türbin sistemleri, organik rankin çevrimi ile egzoz atık ısı dönüşüm sistemleri, termoelektrik jeneratörler ile atık ısı dönüşüm sistemleri ve egzoz atık ısısının geri dönüşümünün gerçekleştirildiği diğer sistemler ile faydalı enerjiye dönüştürülmesi mümkündür.

2.1. Mikro Türbin Kullanımı

Mikro-türbinler, tipik olarak şanzıman içermeyen tek şaftlı motorlardır. Turbo makinaları ve elektrik jeneratörü, yüksek hızda dönen ortak bir şafta sahiptir. Jeneratörün yüksek frekanslı akımı, değişken hızda çalışmayı sağlayan bir invertör ile şebeke frekansına dönüştürülür. Mikro-türbinlerin türbin giriş sıcaklıkları tipik olarak 800-1000 °C arasındadır ve basınç oranı düşüktür. Mikro-türbinler tipik olarak yeniden kazanılmış bir döngü uygular ve %30 gibi yüksek bir enerji üretim verimliliğine ulaşırlar. Kombine ısı ve güç üretiminde, mikro-türbinlerin genel verimliliği %75- 85’e kadar artmaktadır. İçten yanmalı motorların ve yakıt hücrelerinin pistonlu teknoloji alternatifleri ile karşılaştırıldığında, mikro-türbinlerin performansı özellikle parça yük işleminden etkilenir (Hamilton, 2003). Mikro-türbinlerin maliyetinin İYM’a göre daha yüksek olmasına rağmen,

depolamada daha düşük gaz akışı, daha düşük metan, düşük nitrojen oksit emisyonu, nispeten kolay ara bağlantı gibi çeşitli avantajlara sahiptirler. Bu nedenle mikro-türbinler, İYM teknolojileri yerine enerji depolama çalışmalarında daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Gökçek, 2017). Bununla birlikte, mikro-gaz türbin sistemlerinin kullanımında sorun oluşturan ana etkenler akışın Reynolds sayısında büyük değişikliklerin olması, sıcak ve soğuk komponentler arasında kütleli ısı transferinin olması (büyük makinelerde ihmal edilebilir), minyatürleşmiş komponentlerin verimleri, malzeme ve üretim zorluklarından kaynaklanan geometrik kısıtlamalardır (Çakmak ve Kılıç, 2007).

2.2. Organik Rankin Çevrimi ile Egzoz Atık Isı Dönüşümü

Atık akışkandan enerji geri kazanımında kullanılan en yaygın yöntemlerden biri organik akışkan destekli güç üretim sistemleridir. Organik Rankine Çevrimin (ORÇ) temel prensipleri geleneksel Rankine çevriminin prensipleri ile benzerdir. Geleneksel Rankine çevrimi ile ORÇ arasındaki temel fark, ORÇ’inde organik çalışma akışkanı geleneksel Rankine çevrimindeki çalışma akışkanı olan sudan daha düşük bir kaynama noktası ve daha yüksek bir buhar basıncına sahip olmasıdır. Bu temel fark çevrimin verimini artırdığından seçilecek çalışma akışkanının kaynama noktası ne kadar düşük ve buhar basıncı ne kadar yüksek olursa türbinden elde edilen enerjide o kadar artar (Etemoglu ve Can, 2007; Etemoglu, 2008).

ORÇ sistemlerinde, sıcak ısı kaynağından gelen jeotermal su ve egzoz gazları gibi atık ısı kaynakları, buharlaştırıcıya girerek ısısının bir kısmını organik akışkana verir. Atık ısı kaynağından alınan ısı ile kızgın buhar ya da doymuş buhar fazına geçen akışkanın türbinden geçerken oluşturduğu dönme hareketi türbin çıkış şaftına bağlanan jeneratöre iletilir. Türbinden sonra ısı değiştirici de bir miktar ısısını pompadan çıkan soğuk akışkana vererek yoğuşturucu üniteye geçer. Yoğuşmuş akışkan pompada basınçlandırılarak ısı değiştiriciye gönderilir. Türbin çıkışındaki çevrim akışkanından bir miktar ısı alarak ön ısıtma yapılır. Sonrasında sırasıyla ön ısıtıcı, buharlaştırıcı ve son ısıtıcıdan geçerek aynı akış şemasını kapalı çevrim içerisinde devam ettirir (Bilgiç vd., 2016). ORÇ sistemi anı zamanda İYM’lu araçlarda atık ısı geri kazanım yöntemi olarak da kullanılmaktadır. Normal bir İYM’lu araçta %10 daha fazla güç üreterek yakıt sarfiyatında %5-30 arasında azalma gözlenmektedir. BMW ve Honda gibi araç üreticileri bu konudaki araştırmalarını yoğun şekilde sürdürmektedir. 2008 yılında sunulan sonuçlara göre saatte 62 mil ile giden bir araçta ORÇ sisteminin kullanması ile verimde %3,8 oranında artış elde edilebilmektedir (Rowshanzadeh, 2008).

Najjar ve Radhwan (1988), gaz türbini motorlarının kısmi yükte düşük verimli olduklarını belirtmiş, enerji tasarrufu ve işletme maliyetlerini azaltmak amacı ile atık ısının geri kazanımını gaz türbini çevrimiyle kapalı ORÇ arasında ısı alışverişi ile sağladıkları bir kojenerasyon sistemi üzerinde analitik bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları bilgisayar programı sayesinde kombine çevrim performansını net iş ve ısı verim cinsinden hesaplamışlardır. Ekonomik analizlerinin sonucunda kojenerasyonla ısı geri kazanımı yatırımının, kendini amorti etmesi yönünde olumlu olduğunu vurgulamışlardır.

Lee ve diğerleri (1988), organik Rankine çevriminin enerji geri kazanım sistemi üzerindeki parametrelerin analizi için sistematik bir algoritma önermişlerdir. Yaptıkları termodinamik analiz, ekonomik değerlendirme ve duyarlılık analizi, ekonomik ve tasarım parametrelerinin araştırılmasını içermektedir. Çalıştıkları durumlar için sistemin ekonomik fizibilite ve tasarım parametrelerinin etkilerinin çok önemli olduğunu belirterek, bu parametrelerin ekonomik bir kombinasyonu olduğuna değinmişlerdir. ORÇ sistemi ile düşük sıcaklık, gaz fazı atık ısı geri kazanımının ekonomik olduğunu, ancak ORÇ sistemi ile düşük basınçlı atık buhar geri kazanım orta kapasiteli tesisler için yüksek bir maliyette olduğunu bildirmişlerdir. Maizza ve diğerleri (2001), çalışmalarında atık enerji geri kazanımı ORÇ sistemlerinde kullanılmak üzere alışılmamış bir dizi akışkanın termodinamik ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Gerçekçi tasarım koşulları altında enerji gereksinimi ve geri kazanım sistemi performanslarını analiz etmişlerdir. İnceledikleri iş akışkanları R-600, R-123, R-142b, R-401A, R-401B, R-290, R-124a, R-401C olup, sistem verimlerini 35 °C asgari yoğuşma sıcaklığında hesaplamışlardır. Belirledikleri çalışma koşulları altında ORÇ sistemleri için en elverişli akışkanın R-401C olabileceğini tespit etmişlerdir.

Liu ve diğerleri (2014), çalışma sıvılarının ORÇ termik verimi ve toplam ısı geri kazanım verimi üzerinde etkilerini incelenmişlerdir. Çalışmada; su, amonyak ve etanol gibi hidrojen bağı olan akışkanların büyük buharlaşma entalpisi nedeni ile ORÇ sistemlerine uygun olmadıklarını belirlemişlerdir. Wei ve arkadaşları (2007), egzoz ısısı tarafından yönlendirilen HFC-245fa iş akışkanı kullanan bir ORÇ sisteminde, sistemin performans analizleri ve optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Sonuçlar, egzoz ısı kullanımını maksimize etmenin sistemin net gücü ve verimini artırmada olumlu rol oynadığını göstermiştir. Hettiarachchi ve diğerleri (2007), düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklardan yararlanan ORÇ sistemleri için amaç fonksiyonu olarak toplam ısı değiştiricisi alanının net güç çıkışına oranını kullanan bir optimizasyon çalışması sunmuşlardır. Organik akışkan seçiminin, amaç fonksiyonuna çok büyük etkisi olduğunu ve bu etkinin güç santrali maliyetlerini neredeyse iki kat artırabileceğini belirtmişlerdir. Diğer taraftan, Schuster ve diğerleri (2009) ORÇ' nin birleşik ısı güç üretimi için gelecek vaad eden bir çözüm olduğuna atıfta bulunarak, düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarının kullanımına olanak sağlayan sistemin, küçük ölçekli uygulamalarda verim artışı sunduğunu ifade etmişlerdir. Dai ve diğerleri (2009), ekserji verimliliğini amaç fonksiyonu olarak belirledikleri bir optimizasyon çalışmasını, düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarını kullanan bir ORÇ için gerçekleştirmişlerdir. Aynı atık ısı koşulları altında R-236EA akışkanının en fazla ekserji verimine sahip olduğunu ve sisteme bir iç ısı değiştiricisi eklenerek sistem veriminin arttırılamayacağını bildirmişlerdir.

Heberle ve Brüggemann (2010), 450K' in altındaki sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklarla birleşik ısı güç üretimi sağlamak amacı ile ısı üretimini ORÇ ile seri ve paralel düşünerek ikinci kanun analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yüksek kritik sıcaklığa sahip izopentan gibi organik akışkanları seri devreler için, R-227EA gibi düşük kritik sıcaklığa sahip organik akışkanları ise paralel devreler için önermişlerdir. Roy ve arkadaşları (2010), enerji üretimi için 140 °C sıcaklık ve 312 kg/s debide baca gazını kullanan ORÇ' ne dayalı bir atık ısı geri kazanım sisteminin parametrik optimizasyon ve performans analizlerini çalışma akışkanı R-12, R-123 ve R-134a kullanarak incelenmişlerdir. Sonuçlarda incelenen akışkanlar arasında maksimum iş ve verimin R-123 ile elde edildiğini bildirmişlerdir. Sun ve Li (2011), iş akışkanı olarak R-134a kullanan bir ORÇ ısı geri kazanım santralini incelemişlerdir. Santralin performansını değerlendirmek ve optimize etmek üzere evaporatör, genişletici, hava soğutmalı kondenser ve pompa için matematiksel model geliştirmişlerdir. Kontrollü değişkenler olarak tanımladıkları iş yapan akışkan debisi, kondenser hava debisi, genişletici giriş basıncının sistemin ısı verimi ve net gücü üzerindeki etkileri incelenmişlerdir. Optimizasyon sonuçlarına dayanarak, kontrollü ve kontrolsüz değişkenler (ısı kaynağı sıcaklığı ve ortam kuru termometre sıcaklığı) arasındaki ilişkiyi veren ifadenin, net güç üretimi için lineer bir fonksiyon, ısı verim için ikinci dereceden bir fonksiyon olduğunu belirtmişlerdir.

2.3. Egzoz Atık Isısının Geri Dönüşümünün Gerçekleştirildiği Diğer Sistemler

Atık ısı geri dönüşüm yöntemleri arasında eşanjörler (ısı eşanjörleri), reküperatörler, ısı kazanları, pasif hava ısıtıcıları, rejeneratörler ve ekonomizerler sayılabilir. Isı eşanjörleri genellikle egzoz gazlarının atık ısını yakma sistemine giren yanma havasına transfer etmek için kullanılmaktadır. Reküperatörler baca gazındaki atık ısının yakma havasına aktarıldığı ısı değiştiricilerdir. Atık ısı kazanları, sıcak gazın önüne yerleştirilerek atık sıcak gazın enerjisinden yararlanılıp suyun ısıtılması sağlanmaktadır. Pasif hava ısıtıcılar, düşük ve orta sıcaklık uygulamaları için gazdan gaza ısı kazanımı yapan cihazlardır. Ekonomizerler düşük ve orta sıcaklıktaki sıvıları ısıtmak için kullanılan egzoz gazlarından ısıyı geri kazanmak için kullanılırlar (Yıldıran vd., 2015). Bu sisteme ilave olarak elektrik üretme amaçlı termoelektrik ve termofotovoltaik (TPV) sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Termoelektrik sistemler ısıнын doğrudan elektriğe çevrilmesi yöntemi ile çalışır iken, termofotovoltaik sistemler ışıının ile elektrik üretimini hedeflemektedir (Önal ve Utlu, 2017).

Kojenerasyon sistemler, kendi elektrik üretimini yapmak isteyen endüstriyel oluşumlar için cazip ekonomik ortam, enerji tasarrufunu mümkün kılan birleşik ısı ve güç üretimiyle (kojenerasyon) mümkün olabilmektedir. Dizel motorlu kojenerasyon sistemleri, elde edilme ve taşınma kolaylıkları nedeni ile ağır yakıtlar kullanmakta ve buna bağlı olarak egzoz gazları istenmeyen bir şekilde katı partiküller, kükürt oksit (SO_x) ve azot oksit (NO_x) bileşikleri gibi zararlı emisyonları çevreye

bırakmaktadır. Pistonlu İYM'lar ile tahrik edilen kojenerasyon sistemleri genellikle 2,5-50 MW aralığında güç üretimi için tercih edilirler (Energy Nexus Group, 2002). Bu sistemler, paket sistem çözümleri sunmaları ve montajlarının kolay olması nedeni ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik üretiminde kullanılan içten yanmalı motorlar, turbo-şarjlı, ara soğutmalı endüstriyel motorlardır ve genel olarak standart dizel motor bloklarından oluşmaktadırlar. Yakıt olarak çoğunlukla ağır yakıt (No.6 fuel oil) tercih edilmesinin yanında doğal gaz, motorin, LPG, propan ve biyogaz da kullanılmaktadır. Dizel motor tahrikli kojenerasyon uygulamalarında, düşük maliyet ve kolay elde edilebilirlik bakımından ağır yakıt ve doğal gaz kullanımı ilk sırayı almaktadır (Pulkrabek, 1997; Stenhede, 2004).

Literatürde, kojenerasyon sistemlerinin yakıt kullanım tasarrufu ve emisyon azalımı yönünde verimliliğini ölçmek için 2 ayrı yöntem kullanılmaktadır. Birinci çalışmada kojenerasyon sistemleri ile ayrı ısı ve güç üretim sistemlerinin emisyonları, geleneksel fosil yakıtlı sistemlerle kojenerasyon sistemleri arasındaki ısı oranları farkını kullanarak karşılaştırılmıştır (Kaarsberg vd., 1999; Kaarsberg vd., 1998; Voorspools ve D'Haeseleer, 2000; 2001). Sevilgen ve arkadaşları (2003) tarafından yapılan diğer çalışmada ise, kojenerasyon sistemlerinin emisyon değerleri ürettikleri güç ve ısıya oranları ölçüsünde dağıtılarak geleneksel, ayrı ısı ve güç üretim sistemlerinin emisyonlarıyla karşılaştırılmaktadır.

Termofotovoltaik sistemler, yüksek sıcaklıklı atık ısılardan ve güneş radyasyonundan ısı enerjisi ve elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Fotovoltaik hücre üzerine gelen güneş ışınları hücre tarafından absorbe edilerek ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirirler. Bu sistem; seçici yayıcı, ısı kaynağı, filtre ve bir fotovoltaik hücreden oluşmaktadır. Sistemdeki ısı kaynağı, ısı enerjisini seçici yayıcıya iletir, fotovoltaik hücre modülü de termal enerjiyi elektrik enerjisine çevirir (Önal ve Utlu, 2017).

Yoğuşmalı ekonomizer sistemler, kazandan çıkan baca gazının enerjisini geri kazandıran ısı değiştiricileridir. Bu sistemlerde baca gazı sıcaklığı, su buharının çığlenme noktasının altına düşürülür. Duyulur ve gizli ısıların her ikisi de baca gazlarından geri kazanılır ve kazanın termal verimliliği gözle görülür şekilde artmaktadır (Butcher ve Litzke, 1994).

Rekuperatör sistemler, rekuperatörler yüzeyli ısı değiştiricilerden farklı olmayıp, çeşitli amaçlarla ısıtılacak havanın baca gazları ile ısıtılmaları söz konusudur. Rekuperatörleri ısı geçiş şekline göre; Isı taşınım ağırlıklı rekuperatörler, Isı ısınımı ağırlıklı rekuperatörler ve Isı taşınımı ve ısınımı olan kombine rekuperatörler olarak sınıflandırılabilir (Enç ve Kasırga, 2013).

Rejeneratif sistemler, rejeneratif özelliğe sahip trenler, frenleme esnasında kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir ve hatta bu enerjiyi geri verirler (Okada vd., 2003). Raylı sistemlerde kullanılan enerjinin %40'a varan kısmının rejeneratif frenleme ile geri kazanılabileceği yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur (Gunselmann, 2005). Rejeneratif frenlemenin sağladığı tek fayda geri kazanılan enerji değildir. Yakılarak ısı enerjisine dönüşmesi engellenen elektrik enerjisi ile tünel ve istasyon havalandırma sistemi de çalışma frekanslarının düşürülmesi ile korunmuş olur (Adinolfi vd., 1998). Rejeneratif frenlemenin (Dinamik frenleme) bir diğer faydası da mekanik (sürtünme) freni ekipmanlarının aşınma periyodunu uzatmasıdır (Martin, 1999).

2.4. Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı ile Elektrik Üretimi ve Kullanımı

İYM'a sahip bir araçta egzoz yoluyla atmosfere atılan sıcak gazların bir kanal yardımı ile termoelektrik eşanjörün alt kısmında bulunan evaporatör bölümüne ulaşması sağlanır. Sabit tesis sistemlerde baca gazından evaporatöre geçen ısı, ısı borusu içerisindeki çalışma sıvısını buharlaştırır ve bu buhar kondenser duvarına kadar yükselir ve sahip olduğu ısıyı kondenser duvarına bırakarak yoğunlaşır. Kondenser duvarından ise iletim vasıtasıyla elektriğin elde edileceği termoelektrik modüllerin sıcak yüzeyine ulaşır. Modüllerin diğer yüzeyi ise soğutucuyla temastadır ve bu sayede termoelektrik modülün diğer yüzeyi soğuk kalır. Böylece termoelektrik modüllerin iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı oluşur ve Seebeck etkisi sayesinde termoelektrik modüller, elektriksel bir üreteç görevi görerek elektrik üretimi gerçekleşmektedir (Güneş ve Hançer, 2017). TEJ' ler atık ısılarda bulunan sıcaklık farklarından elektrik gücü elde edilmesinde, sıcaklık algılayıcılarında, enerji

kaynağı olarak batarya kullanan küçük enerji gereksinimi (saat, kablosuz ağlar, vb.) olan cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Dalola vd., 2009; Khattab ve El Shenawy., 2006).

Birkholt (1988) Porsche firmasının desteklediği bir projede, otomobillerde ilk TEJ uygulamasını gerçekleştirmiştir. Bu uygulamada sıcak tarafı karbon çeliği ve soğuk tarafı alüminyumdan imal edilen ısı değiştiriciler arasında demir esaslı (FeSi_2) termoelektrik malzemelerden yapılan bir egzoz gazı atık ısı geri kazanım sistemi oluşturulmuştur. FeSi_2 malzemesinden imal edilen TEJ modülün her biri 1 W elektrik gücü üretmektedir. Bu sistem Haidar ve Ghojel (1997) tarafından Porsche 944 tipi otomobilin egzoz sisteminde kullanılmış ve 10 W elektrik gücü elde edilmiştir. Bass ve diğerleri (1990) 72 adet termoelektrik modül kullanarak dizel kamyonlarda egzoz gazı geri kazanımı konusunda çalışmalar yapmıştır. Tasarlanan sistem 230 °C sıcak bölge ve 30 °C soğuk bölge sıcaklığında %4,5 enerji dönüşüm verimi ve 1 kW elektrik gücü elde etmiştir. Sistem sonraki yıllarda bazı askeri dizel araçlarda kullanılmıştır. Kobayashi ve diğerleri (1998) 3000 cc'lik bir benzinli motor üzerinde 72 adet SiGe termoelektrik modül kullanmış ve dikdörtgen kesitli bir egzoz borusu üzerine termoelektrik modüller (TEM) yerleştirmiştir. TEM'lerin soğuk bölgesi için araç motorunun soğutma suyu kullanılmıştır. Bu sistem; 60 km/h taşıt hızında 1141 °C egzoz sıcaklığı ile 563 °C sıcaklık farkında olup her bir TEM için 1,2 W elektrik gücü, 0,7 V gerilim ve %0,9 enerji dönüşüm verimi elde edilmiştir.

Ikoma ve diğerleri (1999) bizmut tellurid (Bi_2Te_3) esaslı HZ-14s TEM modüllerini benzinli bir motorun egzoz yolu üzerinde kullanmış ve TEM'lerden 60 km/h taşıt hızında 193 W elektrik gücü ve %2,9 enerji dönüşüm verimi elde edilmiştir. Thacher ve diğerleri (2007), Matsubara (2001), Matsubara (2002), HZ-20s bizmut tellurid (Bi_2Te_3) termoelektrik modüllerini kamyonette kullanılan bir dizel motorlarda egzoz atık ısı geri dönüşümü için kullanmışlardır. Testler sonucunda motor devrinin artmasıyla birlikte TEJ'lerin ürettiği elektriksel gücün arttığını ve sistemin 330 W elektrik gücü ürettiğini tespit etmişlerdir. Hsiao ve diğerleri (2010) İYM'un soğutma radyatörü ve egzoz sistemi üzerinde TEM kullanımına yönelik matematiksel modeller kurmuş ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. TEM'lerin radyatör yerine egzoz sisteminde kullanımının daha başarılı olduğu sonucuna varmışlardır. Kullanılan TEM'lerin çalışma karakteristiğini tahmin etmek için tek boyutlu bir termal direnç modeli oluşturmuş ve elde ettikleri sonuçları deneylerle doğrulamışlar. Termoelektrik modülden üretilen maksimum güç 290 °C sıcaklık farkı ile 51,13 mW/cm² olduğunu tespit etmişler.

Nissan firması, 1998 yılında ilk kez TEJ kullanılan otomobili üretmiştir. Otomobilde kullanılan TEJ sisteminde Si-Ge yarı iletken elementlerinden imal edilmiş TEM'lerden 72 adet kullanmışlar ve 563 °C sıcaklık farkı için 35,6 W güç üretmişlerdir. Sistemin toplam dönüşüm verimi %0,1 olarak ölçülmüş olup, verimin %2,5'a kadar yükseltilmesi durumunda 950 W güç üretimi yapabileceği bildirilmiştir (Kunt, 2016). Hi-Z firması 2001 yılında 72 yarı iletken çiftten oluşan HZ-14 TEM modülü ile 300 HP maksimum güç üreten içten yanmalı bir motorda egzoz gazı geri kazanımı için kullanmıştır. Motorun maksimum gücünü elde ettiği devirde HZ-14 TEJ modüller ortalama modül başına 12,5 W güç üreterek toplamda 900 W'ın üzerinde elektriksel güç elde etmiştir (Ikoma vd., 1998; Kushch vd., 2001). Bizmut tellurid (Bi_2Te_3) yarı iletken kullanan HZ-14 TEJ modüllerin teorik verimleri %5' tir (Yang, 2005).

BMW firması ilk ürettiği TEJ sistemi ile maksimum 200 W elektrik gücü üretmişler. Bu sisteme sahip araçlar ilk olarak 2008'de satışa sunulmuştur. TEJ'lerin gelişmesi ile egzoz sistemi içerisinde 600 W elektrik gücü üreten araçların üretilmesi mümkün olmuştur. 2009'da BMW grubu yeni bir TEJ kullanım projesi açıklamış ve sistemde TEJ'leri doğrudan monte etmek yerine aracın altında EGR radyatörü içerisine komple bir dönüştürme sistemi olarak yerleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre sistem 250 W elektrik gücü üretmiş, CO₂ ve yakıt tüketimini %2 azaltmıştır. Ford firması atık ısı geri kazanım sistemleri üzerinde çalışmalar yapmış, aynı zamanda TEJ üretimi de yapmaktadır. Ford firması atık ısılarından elektrik gücü üretmek için Half Heusler ve bizmut tellurid (Bi_2Te_3) yarı iletken elemanları kullanarak 500 W elektrik gücü üretebilecek bir geri kazanım sistemi imal etmiştir. Bu sistem 3,0 L 6V Ford Fusion model taşıtta uygulanmıştır. Ford firmasına göre bu sistem, taşıtların mevcut sistemleri üzerine yeni sistemlerin entegrasyonunun başarısını gösteren önemli örnektir.

Ancak sistemin performans, ısı yönetimi, sistem entegrasyonu, üretim ve dayanıklılık alanlarında hala önemli araştırma ve yatırım maliyetlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Kunt, 2016).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, buji ateşlemeli bir motorda egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümün gerçekleştirilmesi için Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından tasarlanarak 3 mm kalınlığındaki alüminyum levha malzemeden imal edilen termoelektrik jeneratöre ait egzoz eşanjörünün geometrik yapısı kullanılmıştır. Egzoz eşanjörü, Gürbüz (2010) tarafından kurulumu gerçekleştirilen tek silindirli buji ateşlemeli motora sahip deney düzeneğinde test edilmiştir. Deneysel çalışmalarda motor 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d olmak üzere 3 farklı sabit motor devirlerinde çalıştırılmıştır. Deneylerde, egzoz eşanjörü giriş-çıkış sıcaklıkları ile birlikte eşanjör yüzeyinde tespit edilen 6 farklı noktadan sıcaklık verileri alınarak bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Her bir motor devri için ölçülen egzoz eşanjörü giriş-çıkış sıcaklıkları ve egzoz gazı debisi kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak sayısal eşanjör içi sayısal akış analizi gerçekleştirilerek sıcaklık konturları elde edilmiştir. HAD programı ile elde edilen sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

3.1. Deney Düzeneğinin Kurulumu ve Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, Gürbüz 2010 tarafından kurulumu gerçekleştirilen 476 cm³ silindir hacmine ve L tipi silindir kafasına sahip tek silindirli, hava soğutmalı benzinli bir motorda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, motorun 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d sabit motor devirlerinde yakıt olarak benzin kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motorun farklı devirlerde çalıştırılabilmesi için motor çıkış miline bağlı hidrolik dinamometre kolu üzerinden çıkış mili yükü ayarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından tasarlanarak imal edilen egzoz eşanjörü motorun egzoz yolu üzerine bağlanmıştır. Egzoz eşanjör giriş-çıkış boğazına ve eşanjör üzerinden tespit edilen 6 nokta üzerine yerleştirilen K tipi termokupllar yardımıyla sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, K tipi termokupllardan alınan sıcaklık verileri Measurement Computing USB-1616HS4 tipi veri toplama kartı yardımıyla bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Deneyler esnasında, motora alınan emme havası debisi Allborg tipi termal kütleli debi ölçer kullanılarak, motora alınan yakıt miktarı ise Techfluid marka değişken alanlı manyetik debi metre kullanılarak ölçülmüştür. Motora alınan emme havası ve yakıt debisi kullanılarak egzoz gaz debisi hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar, motorun rejim sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her bir motor devri için deneysel çalışmalar egzoz yolu üzerine bağlanan eşanjör giriş sıcaklık değerlerinin stabil hale geldiği sıcaklık değerine kadar devam ettirilmiştir. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1’de ve deney düzeneğine ait resimler Şekil 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri

Motor tipi	Tek silindiri, L tipi, 4 zamanlı
Supap düzenlemesi	1 emme, 1 egzoz
Maksimum motor devri	3600 d/d
Maksimum güç	≈ 8.82 kW
Maksimum tork	≈ 25 Nm
Silindir çapı	85,7 mm
Piston kursu	82,6 mm
Kurs hacmi (V _c)	476,5 cm ³
Sıkıştırma oranı (ε)	8:1



Şekil 1. Deney düzeneğine ait resimler

Deney motorunun 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d sabit motor devirlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ölçülen eşanjör giriş çıkış sıcaklıkları ve egzoz gaz debileri Tablo 2’de verilmiştir.

166

Tablo 2. 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d’deki deneysel çalışma sonuçları

Parametre	1800 devir	2200 devir	2600 devir
Giriş sıcaklığı	414 °C (688K)	465 °C (739K)	484 °C (758K)
Çıkış sıcaklığı	251°C (524K)	292 °C (565K)	330 °C (603K)
Egzoz debisi	0,00363 (kg/s)	0,00391 (kg/s)	0,00416 (kg/s)

3.2. Hata analizi

Deneysel sonuçların hata analizi gauss dağılımı kullanılarak Eşitlik 1 ile hesaplanabilir (Gürbüz ve Akçay, 2015).

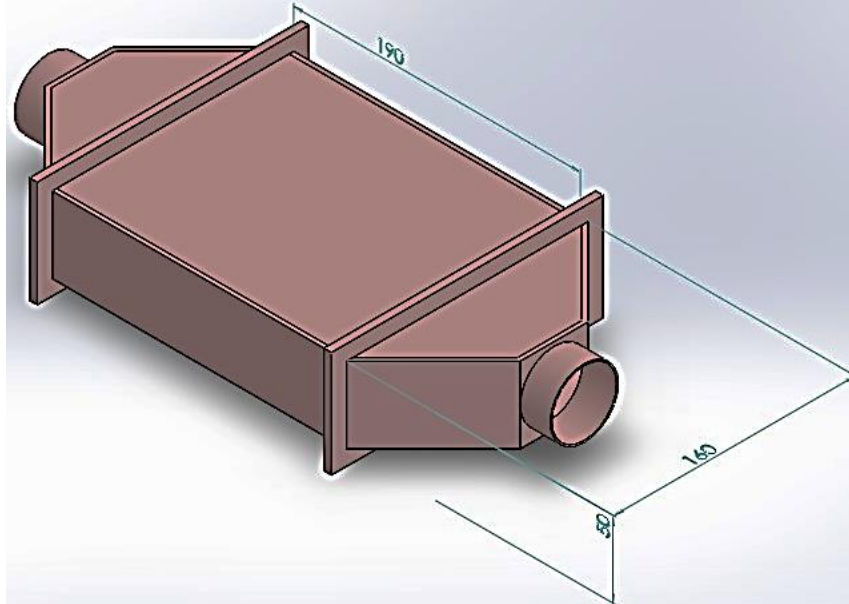
$$\Delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \Delta x_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Tablo 3. Ölçüm sonuçlarının hata analizi

Parametre	Ölçüm Aleti	Doğruluğu	Parametre	Ölçüm	Hata	(%)
Motor devri	Manyetik sensör	± 6 d/d	Motor devri	1800 d/d	6 d/d	0,33
Emme havası debisi	Aalborg GFM77	± 1.5%	Emme havası debisi	230 l/d	1,65 l/d	0,72
Egzoz gaz sıcaklığı	K tipi termokupl	± 1 °C	Egzoz gaz sıcaklığı	414 °C	1,98 °C	0,47

3.3. Termoelektirik Jeneratörünün Boyutlandırılması

Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından 190x160x50 mm ana boyutlara ve 3 mm et kalınlığına sahip şekilde tasarlanarak imala edilen egzoz eşanjörünün giriş-çıkış boğaz çapları 48 mm'dir. Egzoz eşanjörünün geometrik yapısı ve ölçüleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Tasarlanan egzoz eşanjörünün geometrik yapısı ve ölçüleri

Tasarlanan egzoz eşanjörünün her iki yüzeyinden de termoelektrik malzemeler yardımıyla elektrik üretilebilmesi için eşanjör iç hacmi 3 mm kalınlığında bir plaka yardımıyla iki eşit parçaya bölünmüştür. Bu şekilde, termoelektrik eşanjörün her iki sıcak yüzeyinde de homojen bir sıcaklık dağılımının elde edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, orta plaka üzerine egzoz gazlarının akış düzlemi boyunca 3 adet ayırıcı plaka yerleştirilerek akış yönlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

167

3.4. Termoelektirik Jeneratörün HAD Modelinin Geliştirilmesi

Egzoz eşanjörü içerisindeki akış hacmi 3D tasarım programında oluşturulmuştur. Akış hacmi içerisinde mesh yapısı oluşturulurken akış yönünü programa tanıtmak amacıyla egzoz gazlarının giriş yapacağı yüzey giriş (inlet), çıkış yapacağı yüzey ise çıkış (outlet) olarak tanımlanarak akışa yön verilmiştir. Tablo 4'de eşanjör iç hacminde oluşturulan meshlerin nodes(düğüm) ve elements (eleman) sayıları verilmiştir.

Tablo 4. Nodes (düğüm) ve elements (eleman) sayıları

Motor devri (d/d)	Nodes (Düğüm) Sayısı	Elements (Eleman) Sayısı
1800	24532	114076
2200	24532	114076
2600	24532	114076

Çalışmada, eşanjör yüzeyinin sıcaklık dağılımına ait akış analizleri zamandan bağımsız (steady state) şekilde gerçekleştirilmiştir. HAD programında velocity formulation (hız formülasyonu) herhangi bir bağıl hız durumu söz konusu olmadığından absolute (kesin) olarak seçilmiştir. Pressure-Based

(basınç tabanlı) çözümleme seçilerek basınç bazlı Navier-Stokes çözüm algoritması etkinleştirilmiştir. Birçok ticari HAD modelinde endüstri standardı model olduğundan egzoz eşanjörünün akış analizinde k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir. Eşanjör malzemesi ve egzoz gazlarına ait Tablo 5’de verilen teknik özellikler HAD programına tanıtılmıştır. Eşanjör malzemesi olarak seçilen alüminyum ile ilgili teknik özellikler HAD programının default değerleri kullanılarak belirlenmiştir. HAD programında, akış hacminin materyali hava olarak seçilmiştir. Fakat egzoz gazının havadan farklı özellikler gösterdiğinden eşanjör içi akış için yoğunluk $\rho \approx 0,554 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, özgül ısı 1063 (j/kgK) , termal iletkenlik $0,049375 \text{ (W/mK)}$, vizkozite $3,22 \cdot 10^{-5} \text{ (kg/ms)}$ kabul edilmiştir.

Tablo 5. Kullanılan maddeler ve özellikleri

Özellikler	Egzoz gazı	Alüminyum
Yoğunluk (kg/m ³)	0,554	2719
Özgül ısı (j/kgK)	1063	871
Termal iletkenlik (W/mK)	0,049375	202,4
Vizkozite (kg/ms)	$3,22 \cdot 10^{-5}$	-

Mesh yapısında inlet ve outlet wall olarak tanımlanan sınır koşullarının (boundary conditions) değerleri tanımlanmıştır. HAD programında giriş sınır koşulu (mass flow inlet) için $3,9086 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$ değeri tanıtılmıştır. Bu değer oluşturulan akış hacminin hızını belirtmektedir. Thermal bölümünde ise 740 K ’lik bir başlangıç sıcaklığı akış hacmine tanımlanmıştır. Outlet sınır şartı pressure outlet olarak tanımlanmıştır. Wall sınır şartı için iletim (conductivity) seçilmiştir. Böylelikle adyabatiklik durumu ortadan kaldırılmıştır. İntialization yöntemi olarak hybrid initialization seçilmiştir. Tablo 6’da HAD programının yakınsama değerleri verilmiştir.

168

Tablo 6. Yakınsama değerleri

Yakınsama	Yakınsama kriteri
Süreklilik (continuity)	0,001
X-hızı (x-velocity)	0,001
Y-hızı (y-velocity)	0,001
Z-hızı (z-velocity)	0,001
Enerji (energy)	$1 \cdot 10^{-6}$
K	0,001
Epsilon	0,001

Çalışmada, zamandan bağımsız, üç boyutlu ve sıkıştırılamaz akış için akışı açıklayan yönetici denklemler süreklilik denklemi, momentum denklemleri ve enerji denklemdir. Analizlerdeki yönetici denklemlerden basınç (P) ve hız alanlarındaki (u, v ve w) bilinmeyen değişkenlerini bulmak için denklem 3.1.’deki süreklilik ve denklem 3.2.’deki momentum denklemlerinin ortak çözümü ile elde edilebilir. Isı transferi kaynaklı yoğunluk değişimlerinden dolayı oluşan sıcaklık değişkeni ise denklem 3.3.’deki enerji denklemi ile elde edilebilir. Ayrıca, çalışmada türbülans etkilerini hesaplama sürecine dahil etmek üzere denklem 3.4. ve denklem 3.5.’de belirtilen standart k-epsilon denklemleri tercih edilmiştir. Standart k- ε türbülans modeli iki ayrı taşınım denkleminin çözümüne imkan vermek suretiyle türbülans hız ve uzunluk ölçeğini saptamaya izin veren en basit ve temel iki denklemlilik türbülans modelidir. Birçok ticari HAD modelinde endüstri standardı model olduğundan egzoz eşanjörünün akış analizinde tercih edilmiştir. Bu modelin kararlı ve sayısal olarak

sağlam olduğu kanıtlanmıştır (Bai vd., 2014). Simülasyon modeli, ısı eşanjöründeki egzoz akışının tamamen türbülanslı olduğu ve moleküler viskozitenin ihmal edilebileceğinden emin olduğundan standart $k-\varepsilon$ modeli HAD simülasyonunda kullanılmıştır (Su vd., 2014). Standart model, endüstriyelden çevresel akışlara kadar çeşitli uygulamalara sahip en yaygın kullanılan ve onaylanan modeldir (Ansys Guide).

Süreklilik denklemi;

$$S_m = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v}) \quad (2)$$

Denklem 3.1’de verilen S_m kaynak terimi, ρ yoğunluk, $\vec{v}$ vektörel hızdır. Momentum denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Denklem 3.2’de ρ yoğunluk, $\vec{v}$ vektörel hız, τ gerilme tensörü, $\rho \vec{g}$ yerçekim kütle kuvveti, $\vec{F}$ dış kütle kuvvetleridir. Enerji denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \vec{v}) \right) + S_h \quad (4)$$

Denklem 3.3’de verilen ρ yoğunluk, E entalpi, $\vec{v}$ vektörel hız, k_{eff} iletkenlik verimi, T referans sıcaklık, h hassas entalpi, $\vec{J}_j$ türlerin difüzyon akısı, τ gerilme tensörü, S_h hacimsel ısı kaynağıdır. Türbülans kinetik enerjisi ve dağılıma hızı, k -epsilon taşıma denklemlerinden elde edilir;

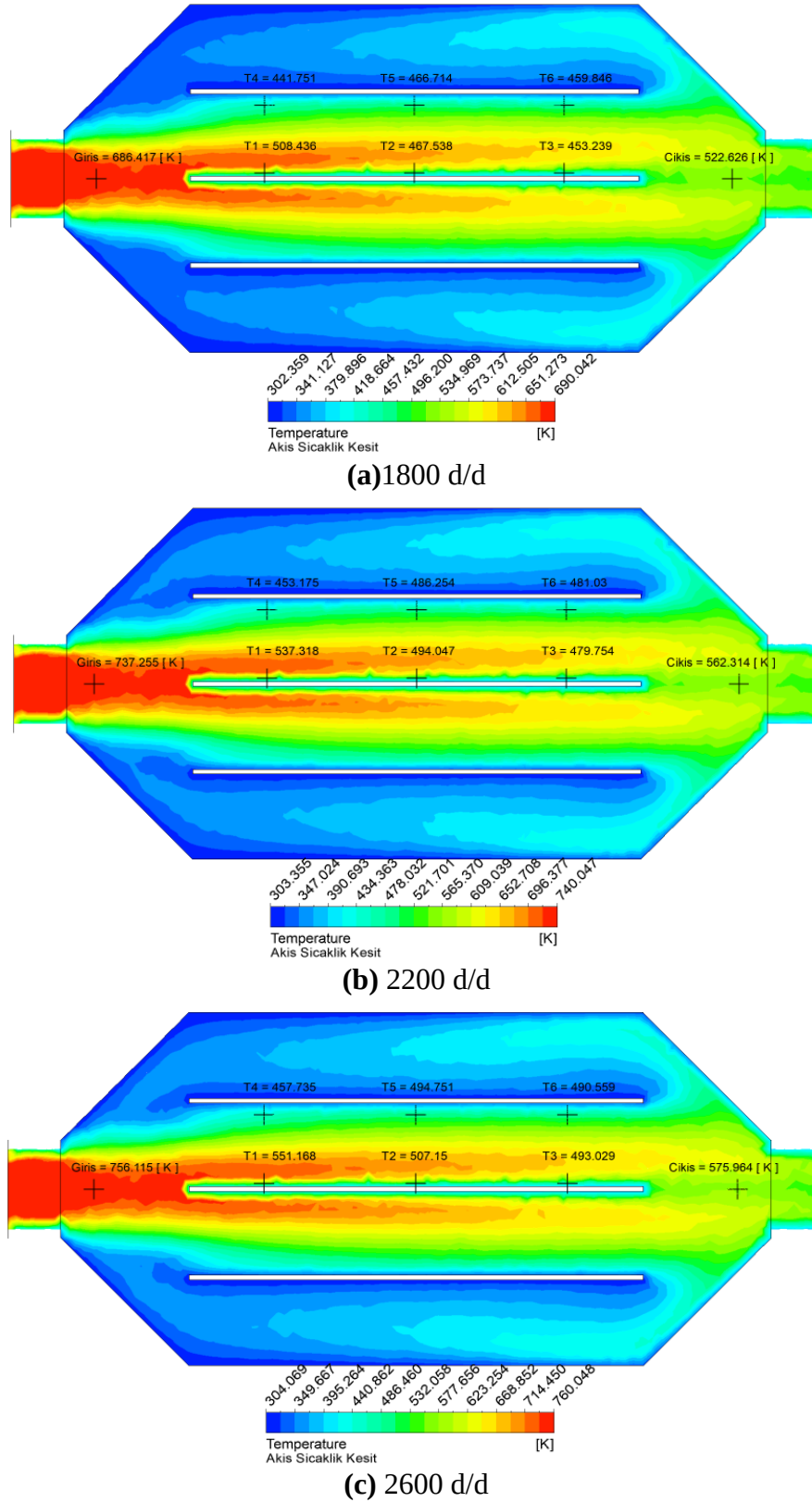
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

Denklem 3.4 ve 3.5’de verilen G_k ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülans kinetik enerji üretimini, G_b kaldırma kuvveti nedeniyle türbülans kinetik enerji üretimini, Y_M sıkıştırılabilir türbülanstaki dalgalanan dilatasyonun toplam dağılım oranına katkısını, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ sabitleri, σ_k ve σ_ε türbülanslı Prandtl sayılarını, S_k ve S_ε kullanıcı tanımlı kaynak terimleri, k türbülans kinetik enerjisini ve ε türbülans yayılım oranı temsil eder (Ansys Guide). Ayrıca denklemlerdeki $\partial/\partial t$ ifadeleri çözümlemeyi zamana bağlı (transient) olduğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada eşanjör yüzeyinin sıcaklık dağılımına ait akış analizleri zamandan bağımsız (steady state) şekilde gerçekleştirildiği için çözümlemelerde bu ifadeler ihmal edilebilir. Çözümlemeler HAD programında gerçekleştirildiğinden dolayı yönetici denklemlerin korunumlu formları kullanılmıştır.

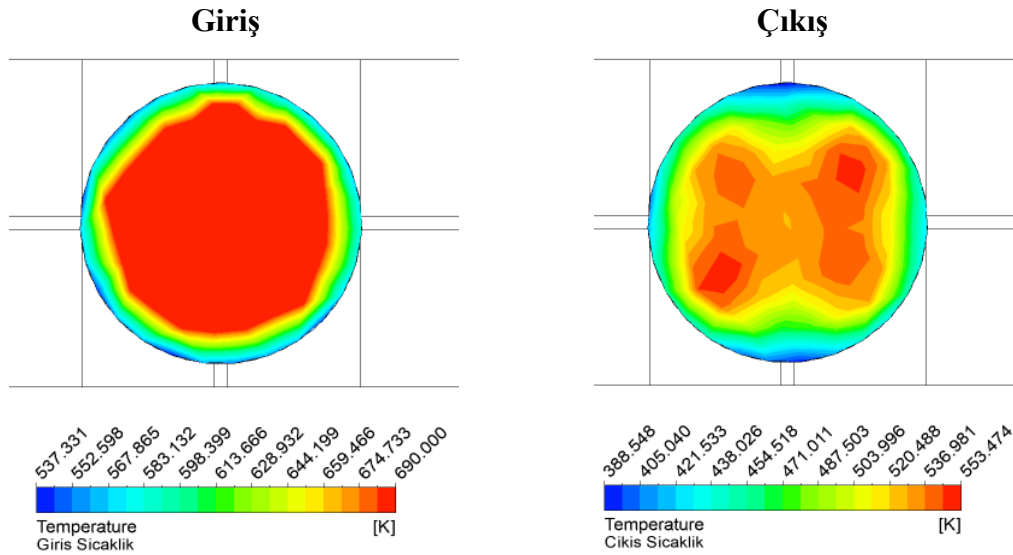
4. TARTIŞMA VE BULGULAR

Şekil 3’de 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d’deki eşanjör sıcaklık konturları verilmiştir. Şekil 3’deki HAD analiz sonuçları incelendiğinde, motor devrinin artışı ile birlikte eşanjör girişindeki egzoz gazlarının sıcaklıkları ve eşanjör içine alınan egzoz gazının debisi artmakta buna bağlı olarak farklı noktalardan alınan sıcaklık değerleri de artış göstermektedir. Diğer yandan, motor devrinin artışı ile birlikte eşanjörün iç hacmi içerisindeki sıcaklık dağılımının homojenliğinin arttığını söylemek mümkündür. Bununla birlikte, egzoz gazlarının eşanjör girişinden çıkışına doğru düz bir hat boyunca ilerlediği, eşanjör çıkış nozuluna çarpan bir miktar egzoz gazlarının eşanjör yan duvarları boyunca geri dönerek giriş doğrultusuna tekrardan yönlendiği görülmektedir. Bu etki, eşanjör içerisine daha fazla egzoz gaz debisinin alındığı yüksek motor devrilerinde artmaktadır.

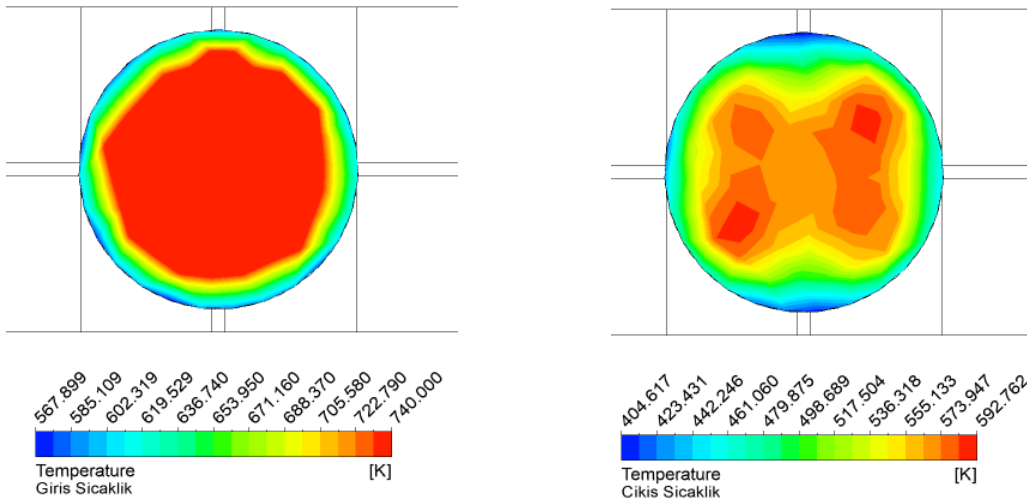


Şekil 3. 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d’da eşanjör sıcaklık konturları

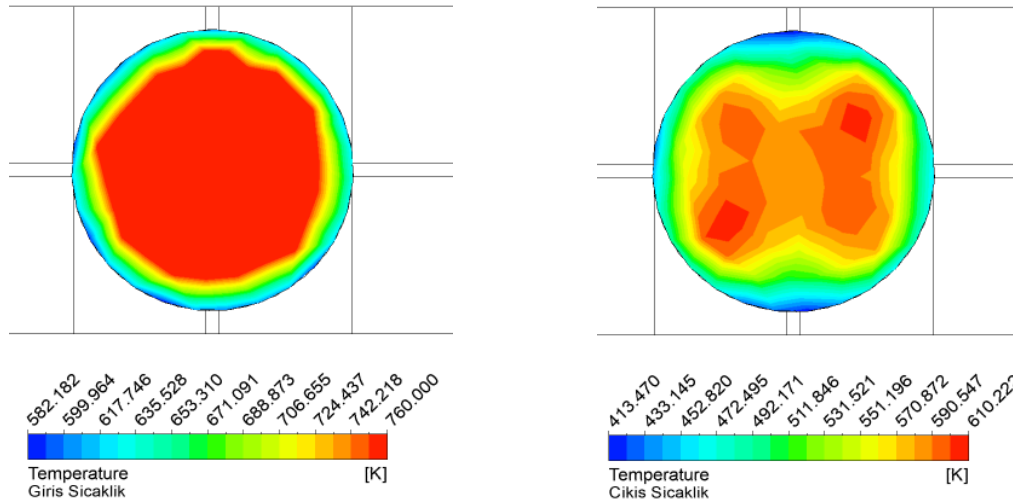
Şekil 4’de 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d’deki eşanjör giriş-çıkış sıcaklık konturları verilmiştir. Şekil 4’deki HAD analizleri incelendiğinde, eşanjörün giriş bölgesinde motor devrinin artmasıyla birlikte giriş sıcaklıkları artsada giriş bölgesinde sıcaklık dağılımı değişmemektedir. Çıkış bölgesinde ise motor devrinin artmasıyla birlikte çıkış sıcaklıkları artsada çıkış bölgesinde sıcaklık dağılımı neredeyse değişmemektedir.



(a) 1800 d/d



(b) 2200 d/d



(c) 2600 d/d

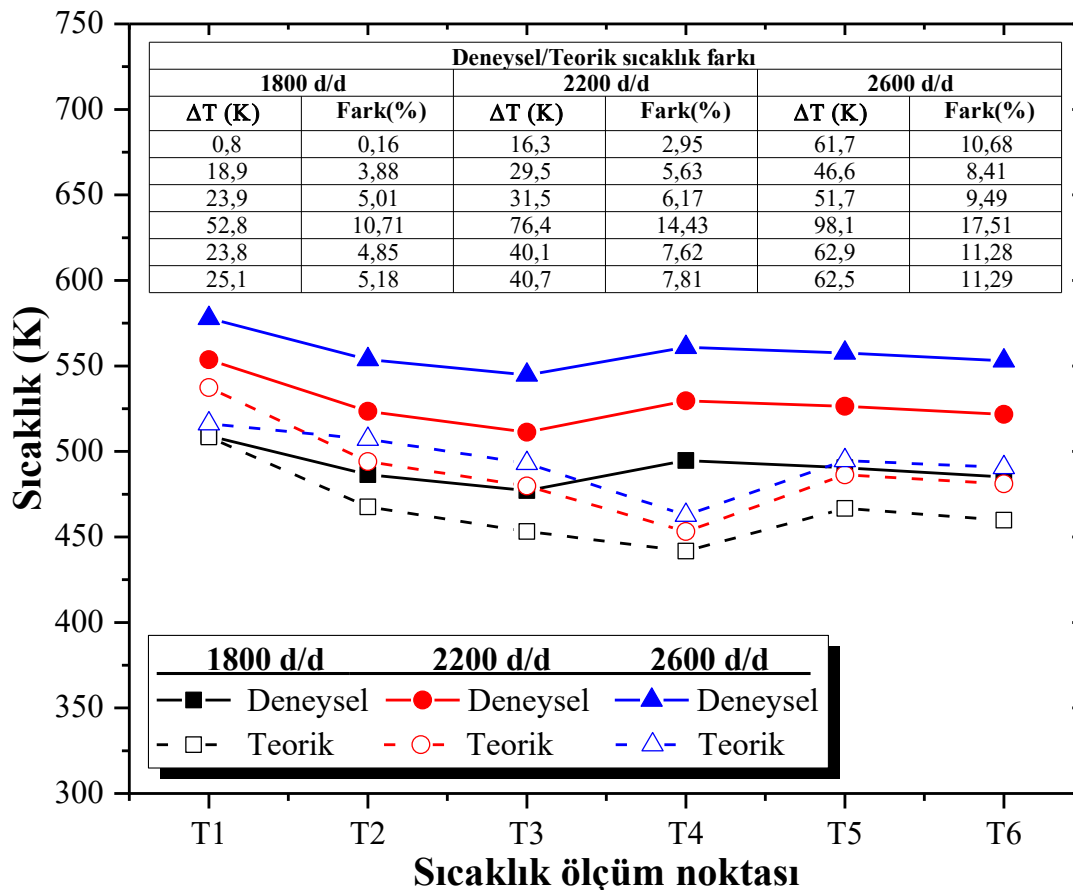
Şekil 4. 1800 d/d, 2200 d/d ve 2600 d/d'deki eşanjör giriş-çıkış sıcaklık konturları

Eşanjör yüzeyinde belirlenen 6 nokta için deneysel çalışmalar ve HAD analizleri sonucu elde edilen sıcaklık değerleri Tablo 7'de, deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması ise Şekil 4'de verilmiştir.

Tablo 7. Deneyisel çalışmalar ve HAD analizleri sonucu elde edilen eşanjör sıcaklık değerleri

Motor devri	Yöntem	Sıcaklık Noktaları					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
1800 d/d	Deneyisel	509,26	486,40	477,14	494,72	490,51	484,96
	Teorik	508,44	467,54	453,24	441,76	466,71	459,85
2200 d/d	Deneyisel	553,64	523,51	511,29	529,57	526,37	521,75
	Teorik	537,32	494,05	479,75	453,18	486,25	481,03
2600 d/d	Deneyisel	577,88	553,72	544,78	560,92	557,63	553,05
	Teorik	511,17	507,15	493,03	457,74	494,75	490,56

Şekil 4’de görüldüğü gibi deneyisel ve teorik sonuçlar arasındaki maksimum sıcaklık farkının 1800 d/d’da %5, 2200 d/d’da %8 ve 2600 d/d’da %11 civarında olduğu görülmektedir. Şekilden görülebileceği gibi motor devrinin artışı yani eşanjör içine alınan egzoz gazlarının sıcaklık ve debisindeki artış ile birlikte deneyisel ve teorik sonuçlar arasındaki fark artmaktadır. Yinede, HAD analizleri ile elde edilen sonuçların deneyisel sonuçlara oldukça yakın olduğu ve hataların kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçlar, literatürde benzer çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile uyum içerisindedir. Hoang (2018), 1500 ve 200 d/d da bir dizel motor üzerinde yaptığı çalışmada deneyisel ve HAD simülasyonu sonuçları arasındaki farkın ortalama %9 civarında olduğunu belirtilmiştir. Serageldin vd. (2016), göre bir toprak-hava ısı eşanjörünün termal performansı incelenmiş ve hava debisi arttıkça HAD simülasyonu ve deneyisel çalışma için ortalama hata katsayısı % 2,89 olarak belirtilmiştir.



Şekil 5. Deneyisel çalışmalar ve HAD analizleri sonucu elde edilen eşanjör sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, buji ateşlemeli bir motorun 1800, 2200 ve 2600 devirlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen egzoz gaz debisi ve egzoz gazı sıcaklık değerleri kullanılarak ana boyutları belirlenen egzoz gaz eşanjörünün HAD programında sayısal olarak analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

- Yakıtın kimyasal enerjisinin ısı enerjisine dönüştürüldüğü yakma sistemlerinde, kaydağar bir ısı enerjisinin egzoz ve/veya baca gazları ile birlikte atmosfere atıldığı, bu atık ısı enerjisinin farklı yöntemler kullanılarak kullanılabilir enejjiye dönüştürülebileceği tespit edilmiştir.
- Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve HAD analizi sonucunda, artan motor devrine bağlı olarak eşanjör içerisine alınan egzoz gazların sıcaklık ve debisindeki artışa bağlı olarak eşanjör yüzeyindeki sıcaklık dağılımının homojenliğinin arttığı tespit edilmiştir.
- Öten yandan, artan motor devri ile birlikte deneysel çalışmaların sonuçları ile HAD analizi sonuçları arasındaki fark artmıştır. Eşanjör yüzeyinde belirlenen 6 farklı nokta için deneysel sonuçlar ile HAD analizi sonuçları arasındaki ortama fark; 1800 d/d'da yaklaşık %5 ($\approx 24^\circ\text{C}$), 2200 d/d'da yaklaşık %7,5 ($\approx 39^\circ\text{C}$), 2600 d/d ise yaklaşık %11,5 ($\approx 65^\circ\text{C}$) olmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Doç. Dr. Habib GÜRBÜZ'ün danışmanlığında yürütülen ve Ahmet Baturalp ÖKMEN tarafından hazırlanan “İçten Yanmalı Motorun Egzoz Atık Isı Geri Kazanımı İçin Termoelektrik Jeneratörün HAD Analizi” başlıklı yüksek lisans tezi kapsamında gerçekleştirilmiştir (Ökmen, 2020). Ayrıca, çalışmanın özeti “Ankara III. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar” kongresinde sunulmuştur.

6. KAYNAKLAR

- Adinolfi, A., Lamedica, R., Modesto, C., Prudenzi, A., & Vimercati, S. (1998). Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(4), 1536-1542.
- Bai, S., Lu, H., Wu, T., Yin, X., Shi, X., & Chen, L. (2014). Numerical and experimental analysis for exhaust heat exchangers in automobile thermoelectric generators. *Case Studies in Thermal Engineering*, 4, 99-112.
- Balcı, C. (2011). *Egzoz gazı enerjisiyle çalışan nh3-h2o absorpsiyonlu soğutma sistemiyle taşıt kabininin iklimlendirilmesi* (Doctoral dissertation, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Bass, J.C., Campana, R.J., & Elsner, N.B. (1990). Thermoelectric Generator for Diesel Engines. *Proceedings of the 1990 Coatings for Advanced Heat Engines Workshop*, USA.
- Beck, N. J., Uyehara, O. A., & Johnson, W. P. (1988). Effects of fuel injection on diesel combustion. *SAE transactions*, 475-502.
- Bilgiç, H. H., Yağlı, H., Koç, A., & Yapıcı, A. (2016). Deneysel Bir Organik Rankine Çevriminde Yapay Sinir Ağları (YSA) Yardımıyla Güç Tahmini. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 4(1), 7-17.
- Birkholt, U., Grob, E., Stohrer, U., Voss, K., (1988). Conversion of Waste Exhaust Heat in Automobiles Using FeSi₂ Thermoelements. *Proceedings of the 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion*, Arlington, USA, 124-128.
- Borat, O.; Balcı, M., ve Sürmen, A. (1995). İçten Yanmalı Motorlar, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Cilt 1, Ankara.
- Butcher, T. A., & Litzke, W. (1994). *Condensing economizers for small coal-fired boilers and furnaces* (No. BNL-65887). Brookhaven National Lab., Upton, NY (United States).

- Çakmak, T., & Kılıç, M. (2007). Mikro-Gaz Türbin Çevriminin Simülasyonu ve Sistem Komponentlerinin Optimizasyonu. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 12(1).
- Çetinkaya, S. (2000). İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarı Ders Notları, MEB Yayınevi, Ankara.
- Dai, Y., Wang, J., & Gao, L. (2009). Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 576-582.
- Dalola, S., Ferrari, M., Ferrari, V., Guizetti, M., Marioli, D., & Taroni, A. (2009). Characterization of Thermoelectric Modules Powering Autonomous Sensors, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 58(1), 99-107.
- Doğdu, M.F. (2013). *Termoelektrik Soğutucuların Performansına Doğrudan Temaslı Isı Değiştiricilerin Etkilerinin DeneySEL İncelenmesi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Enç, V., & Kasırga, M. (2013). Depo Gazı Enerji Üretim Tesisi Baca Gazı Atık Isısının Seralarda Değerlendirilmesi: İstanbul Örneği/Utilization of Waste Heat in Energy Production Plant from Landfill Gas at Greenhouses Case Study in Istanbul. *Journal of History Culture and Art Research*, 1(4), 298-309.
- Energy Nexus Group (2002). Technology Characterization: Reciprocating Engines. *Environmental Protection Agency Climate Protection Partnership Division*, Washington, USA.
- Etemoglu, A. B., & Can, M. (2007). Classification of geothermal resources in Turkey by exergy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(7), 1596-1606.
- Etemoglu, A.B., (2008). Thermodynamic Evaluation of Geothermal Power Generation Systems in Turkey. *Energy Sources*, 30(10), 905-916.
- Gökçek, M. (2017). Waste to Energy: Exploitation of Landfill Gas in Micro-Turbines. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 6, 710-716.
- Guide, A. F. U. S. (2011). Ansys, Inc. Release, 14.
- Gunsellmann, W. (2005). Technologies for increased energy efficiency in railway systems. In *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, 10.
- Güneş, S., & Hançer, E. (2017). Termoelektrik Modül Kullanarak İçten Yanmalı Bir Otomobilin Egzozundan Atılan Isıdan Enerji Geri Kazanımının Termal Analizi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 33(3), 1-12.
- Gürbüz, H. (2010). *Tek silindirli buji ateşlemeli hidrojen motorunda yanma optimizasyonu* (Doctoral dissertation, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Gürbüz, H., & Akçay, H. (2015). Experimental investigation of an improved exhaust recovery system for liquid petroleum gas fueled spark ignition engine. *Thermal Science*, 19(6), 2049-2064.
- Haidar, J. G., & Ghajel, J. I. (2001). Waste Heat Recovery from the Exhaust of Low-Power Diesel Engine Using Fabrication and Evaluation of Size/Electrode. *Proceedings 16th International Conference on Thermoelectrics*, 26-29 August, Dresden, Germany, 599-602.
- Hamilton, S. (2003). The handbook of microturbine generators. PennWell Books.
- Heberle, F., & Brüggemann, D. (2010). Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation. *Applied Thermal Engineering*, 30(11-12), 1326-1332.
- Hettiarachchi, H. M., Golubovic, M., Worek, W. M., & Ikegami, Y. (2007). Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy*, 32(9), 1698-1706.

- Hoang, A. T. (2018). A design and fabrication of heat exchanger for recovering exhaust gas energy from small diesel engine fueled with preheated bio-oils. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 13(7), 5538-5545.
- Hsiao, Y. Y., Chang, W. C., & Chen, S. L. (2010). A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine. *Energy*, 35(3), 1447-1454.
- Ikoma, K., Munekiyo, M., Furuya, K., Kobayashi, M. A. K. M., Izumi, T. A. I. T., & Shinohara, K. A. S. K. (1998). Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicles. In *Seventeenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings ICT98 (Cat. No. 98TH8365)*, 464-467.
- Ikoma, K., Munekiyo, M., Furuya, K., Kobayashi, M., & Komatsu, H. (1999). Thermoelectric generator for gasoline engine vehicles using Bi₂Te₃ modules. *Nippon Kinzoku Gakkaishi*, 63(11), 1475-1478.
- Ivankovic, R., Cros, J., Kakhki, M. T., Martins, C. A., & Viarouge, P. (2012). Power electronic solutions to improve the performance of Lundell automotive alternators. *Chapter 6 in New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering*, 169-190.
- Kaarsberg, T. M., Elliott, R. N., & Spurr, M. (1999). An integrated assessment of the energy savings and emissions-reduction potential of combined heat and power. In *Industry and innovation in the 21st century, proceedings*.
- Kaarsberg, T., Fiskum, R., Romm, J., Rosenfeld, A., Koomey, J., & Teagan, W. P. (1998). *Combined heat and power (CHP or cogeneration) for saving energy and carbon in commercial buildings* (No. CONF-980815-). Northeast-Midwest Inst., Washington, DC (US).
- Khattab, N. M., & El Shenawy, E. T. (2006). Optimal operation of thermoelectric cooler driven by solar thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*, 47(4), 407-426.
- Kobayashi, M., Ikoma, K., Furuya, K., Shinohara, K., Takao, H., Miyoshi, M., Imanishi, Y., & Watabane, T. (1998). Thermoelectric Generation and Related Properties of Conventional Type Module Based on Si-Ge Alloys. *Proceedings of the 15th International Conference on Thermoelectrics*, 26-29 March, Pasadena, USA, 373- 377.
- Kunt, M. A. (2016). İçten Yanmalı Motor Atık Isılarının Geri Kazanımında Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 3(2).
- Kushch, A. S., Bass, J. C., Ghamaty, S., & Eisner, N. B. (2001). Thermoelectric development at Hi-Z technology. In *Proceedings ICT2001. 20 International Conference on Thermoelectrics (Cat. No. 01TH8589)*, 422-430.
- Lee, K. M., Kuo, S. F., Chien, M. L., & Shih, Y. S. (1988). Parameters analysis on organic Rankine cycle energy recovery system. *Energy Conversion and Management*, 28(2), 129-136.
- Lertsatitthanakorn, C. (2007). Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. *Bioresource technology*, 98(8), 1670-1674.
- Liang, G., Zhou, J., & Huang, X. (2011). Analytical model of parallel thermoelectric generator. *Applied Energy*, 88(12), 5193-5199.
- Liu, X., Deng, Y. D., Chen, S., Wang, W. S., Xu, Y., & Su, C. Q. (2014). A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2, 62-66.
- Maizza, V., & Maizza, A. (2001). Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems. *Applied thermal engineering*, 21(3), 381-390.
- Martin, P. (1999). Train Performance and Simulation. *1999 Winter Simulation Conference*, 5-9 December, Phoenix, USA, 1287-1294.
- Matsubara, K. (2001). The performance of a segmented thermoelectric convertor using Yb-based filled skutterudites and Bi₂Te₃-based materials. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 691.

- Matsubara, K. (2002). Development of a high efficient thermoelectric stack for a waste exhaust heat recovery of vehicles. In *Twenty-First International Conference on Thermoelectrics, 2002. Proceedings ICT'02*, 418-423.
- Milli Eğitim Bakanlığı (MEB). (2013). Emisyon Azaltıcı Sistemler. Motorlu Taşıtlar Teknolojisi, Egzoz Emisyon Kontrolü, 1-64.
- Mruk, A., Jordan, W., Taler, J., Lopata, S., & Weglowski, B. (1994). *Heat Transfer Through Ceramic Barrier Coatings Used in Internal Combustion Engines* (No. 941779). SAE Technical Paper.
- Najjar, Y. S., & Radhwan, A. M. (1988). Cogeneration by combining gas turbine engine with organic Rankine cycle. *Heat Recovery Systems and CHP*, 8(3), 211-219.
- Newton, K; Steeds, W. & Garrett, T.K. (1997). *The Motor Vehicle*, Butterworth Heinemann Press, England.
- Niu, X., Yu, J., & Wang, S. (2009). Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator. *Journal of Power Sources*, 188(2), 621-626.
- Okada, Y., Koseki, T., & Sone, S. (2003). C504 Energy Management for Regenerative Brakes on a DC Feeding System. In *The Proceedings of International Symposium on Seed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems: STECH 2003*, 376-380.
- Ökmen A.B., (2020), *İçten Yanmalı Motorun Egzoz Atık Isı Geri Kazanımı İçin Termoelektrik Jeneratörün HAD Analizi*, Yüksek Lisans Tezi Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Önal B.S., & Utlu Z. (2017). Endüstriyel Sistemlerde Yüksek Sıcaklıklı Atık Isı Kazanım Amaçlı Termofotovoltaik Uygulamalarında Teorik Modelleme. *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 19-22 Nisan, İzmir, 181-191.
- Pulkrabek, W.W. (1997). *Engineering Fundamentals of Internal Combustion Engines*, Prentice-Hall, USA, 411.
- Rowshanzadeh, R. (2008). *Performance and Cost Evaluation of Organic Rankine Cycle at Different Technologies*. M.Sc. Thesis, KTH Vetenskapp Och Konst. Department of Energy Technology, Sweden, 101.
- Roy, J. P., Mishra, M. K., & Misra, A. (2010). Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle. *Energy*, 35(12), 5049-5062.
- Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., & Spliethoff, H. (2009). Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Applied thermal engineering*, 29(8-9), 1809-1817.
- Serageldin, A. A., Abdelrahman, A. K., & Ookawara, S. (2016). Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. *Energy conversion and management*, 122, 25-38.
- Sevilgen, S. H., Erdem, H. H., Akkaya, A. V., & Çetin, B. (2003). Comparison cogeneration system with conventional power plant and evaluation of their environmental impacts. In *Proceedings of the First International Energy, Exergy and Environment Symposium*, İzmir, Turkey.
- Stenhede, T. (2004). Cogeneration and Emissions. *10th International Energy and Environmental Technology Systems Fair and Conference*, Istanbul, Turkey.
- Su, C. Q., Wang, W. S., Liu, X., & Deng, Y. D. (2014). Simulation and experimental study on thermal optimization of the heat exchanger for automotive exhaust-based thermoelectric generators. *Case Studies in Thermal Engineering*, 4, 85-91.
- Sun, J., & Li, W. (2011). Operation optimization of an organic Rankine cycle (ORC) heat recovery power plant. *Applied Thermal Engineering*, 31(11-12), 2032-2041.

- Taymaz, I., Cakir, K., Gur, M., & Mimaroglu, A. (2003). Experimental investigation of heat losses in a ceramic coated diesel engine. *Surface and coatings technology*, 169, 168-170.
- Temizer, İ., İlkılıç, C., Tanyeri, B., & Ömer, C. (2012). Effects on vehicle systems of technology thermoelectric. *Batman University Journal of Life Sciences*, 1(2), 199-209.
- Thacher, E. F., Helenbrook, B. T., Karri, M. A., & Richter, C. J. (2007). Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 221(1), 95-107.
- Vazquez, J., Sanz-Bobi, M. A., Palacios, R., & Arenas, A. (2002). State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles. In *Proc. 7th European Workshop on Thermoelectrics* (No. 17).
- Voorspools, K. R., & D'haeseleer, W. D. (2001). Dynamic simulation of the entire electric power generation system for evaluating CO₂-emissions. In *Sustainable Energy And Environmental Technologies*, 556-561.
- Voorspools, K., & D'haeseleer, W. (2000). The impact of cogeneration in a given energetic context. In *IEA GHG Technology Conference* (Vol. 5).
- Wei, D., Lu, X., Lu, Z., & Gu, J. (2007). Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery. *Energy conversion and Management*, 48(4), 1113-1119.
- Yalçintepe, M.R. (1977). Dizel Motorları Teknolojisi, Erkek Teknik Yüksek Öğretmen Okulu, 115s.
- Yang, J. (2005). Potential applications of thermoelectric waste heat recovery in the automotive industry. In *ICT 2005. 24th International Conference on Thermoelectrics*, 170-174.
- Yavuz, C., Özkaymak, M., & Kaya, M. (2010). Termoelektrik Modüllü Su Soğutucusunda Farklı Hava Debilerinin Sistem Performansına Etkileri. *Technological Applied Sciences*, 5(2), 131-143.
- Yıldıran, İ., Öner, D., & Çetin, B. (2015). GPU-Computation of 2-Dimensional Laplace Equation Using Boundary Element Method. *20th National Conference on Thermal Sciences*, 2-5 September, Balıkesir, Turkey.
- Zammit, S. J. (1987). *Motor Vehicle Engineering Science for Technicians, Level 2*. Longman Scientific & Technical.