Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi

Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering

AKÜ FEMÜBİD 16 (2016) 025901(431-445) AKU J. Sci. Eng. 16 (2016) 025901(431-445)
DOI:10.5578/fmbd.25301

Araştırma Makalesi / Research Article

Dizel Motor Egzoz Sistemi için Termoelektrik Jeneratör Uygulaması ve Akış Analizi

İlker Temizer[1], Cumali İlkılıç[2], Cengiz Öner[3]

[1] *Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Bölümü, Sivas.*
[2,3] *Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Bölümü, Elazığ*
e-posta: ilktemizer@gmail.com.

Geliş Tarihi: 27.01.2016; Kabul Tarihi: 25.05.2016

Anahtar kelimeler
"Termoelektrik Jeneratör; Enerji Geri Kazanımı, Atık ısı"

Özet

Bu çalışmada, termoelektrik jeneratörlerin çalışma prensiplerine uygun bir prototip geliştirilmiştir. Isıtılacak yüzey için bir dizel motorunun egzoz sistemi kullanılmış ve motorun çalışması sonucu açığa çıkan egzoz gazlarının ısı enerjisinden faydalanılmıştır. Termoelektrik modüllerde (TEM) fark sıcaklığının oluşmasında ihtiyaç duyulan soğutma ise motordan harici bir soğutma sistemi tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu sistem 20 Watt gücünde anlık elektrik enerjisi ihtiyacı ile çalışmaktadır. Alüminyum 6061 malzemesinden oluşan sekizgen yapıya montajı gerçekleştirilen termoelektrik modüller kendi aralarında elektriksel olarak seri bağlanmıştır. Termoelektrik jenaratör (TEJ) sisteminin ürettiği maksimum elektriksel çıkış gücü motorun 3500 dak^{-1} devir ve 100 Nm yükte çalışma şartlarında 156.7 Watt olarak kaydedilmiştir. Elde edilen elektriksel güç DA/DA konvertöre iletilerek boş bir akünün şarj işlemi gerçekleştirmiştir. Daha sonra sistemin, Ansys Workbench 12.0 içinde yer alan ve aynı zamanda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan Fluent programı yardımıyla akış analizleri gerçekleştirilmiştir.

Thermoelectric Generator Aplication and Flow Analysis for Diesel Engine Exhaust System

Keywords
"Thermoelectric Generation; Energy Recovery, Waste Heat"

Abstract

In this study, A prototype has been developed as the working principle of thermoelectric generators. The exhaust system of a diesel engine used for the surface will be heated and as a result of operation of the engine profit by heat energy of the exhaust gases. Required cooling effect in the occur of the different temperature of thermoelectric modules (TEM) is realised by an cooling system without engine. Reguired electric power of this system is 20 Watt as instant. Electrically are connected as series with each other thermoelectric modules realised assembly octagonal structure consisted from the aluminum 6160 material. The maximum electrical output power produce of the thermoelectric Generation (TEG) system is registered as 156.7 Watt at the 3500 rpm and 100 Nm as of the engine working condition. The discharged battery charging is performed with electrical power supplied to DC / DC converter. Then in the system, heat-flow analysis was realised with the help Fluent which contained in the Ansys Workbench 12.0 and in the same time meaning Computational Fluid Dynamics (CFD) software.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

İçten yanmalı bir motorun egzoz gaz sıcaklığından yararlanılarak üretilecek elektrik enerjisi taşıtlar için son derece önemlidir. Çünkü günümüz araçlarında teknolojik gelişmelere paralel olarak enerji tüketimi de her geçen gün artmaktadır. Bu artış beraberinde taşıt alternatörünün elektrik üretim kapasitesinin de artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine doğrudan dönüşümünü gerçekleştirecek sistemler büyük bir öneme sahiptirler. Isı akışının doğrudan yararlı elektrik enerjisine çevrildiği birçok sistemden biri olan termoelektrik enerji üretimi yüksek güvenilirlik, sessizlik, hareketli parçaların olmayışı

ve uzun ömürlü bakımsız çalışması gibi sebeplerle ön plana çıkmaktadır (Temizer, 2012). İçten yanmalı motorlarda yakıt hava karışımı kullanılarak elde edilen enerjinin belirli bir yüzdesi faydalı işe dönüşmektedir. Oluşan bu verim değeri otomobil motorlarında %30-%35 arasındadır. Dolayısıyla üretilen enerjinin %65-%70'i motorlarda kullanılmadan atılmaktadır. Üretilen enerjinin bir kısmı motorun soğutulmasına, bir kısmı egzoz gazına, geriye kalan bölüm ise radyasyonla çevreye atılmaktadır (Balcı, 2011). Atık ısının geri kazanımı alanında yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Fren sistemlerinden enerjinin geri dönüşümünün termoelektrik sistemlerle gerçekleşebileceğini gösteren Alpcon ve Aalborg üniversitesi araştırmacıları bu konuda bir takım araştırma ve yeni uygulamalar geliştirmişlerdir. İlk olarak fren balatası üzerindeki bir takım sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir. Çalışmada 30, 50 ve 70 km/h hızlarda yapılan ani frenlemelerde değerler kaydedilmiştir. Yapılan deneylerde enerjisinin geri dönüşüm miktarının az daha olsa gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Courant, 2012). İzlanda'da termoelektrik jeneratörlerin evlerde elektrik üretiminde kullanılmasına yönelik uygulamalar bulunmaktadır. Jeotermal kaynaklar yönünden zengin olan İzlanda'da sıcak ısı kaynağı olarak jeotermal sıcak su ya da kazan dairelerinde ısıtma amaçlı üretilen su, soğuk ısı kaynağı olarak kış ortam sıcaklığının kullanılması ile elde edilen sıcaklık farkından elektrik üretebilen özel termoelektrik sistemler geliştirilmiştir (Sisman,2008).

Termoelektrik teknolojisinin kullanıldığı bir başka alan ise araç koltuk sisteminin lokal olarak ısıtılması ve soğutulmasıdır. Termoelektrik sistemlerden üretilen enerji enerji, pil ve akülerin şarj edilmesinde, aydınlatma elemanlarının çalıştırılmasında kullanılmaktadır. Üzerinde çalışılan bir diğer uygulama ise motor egzoz manifoldu üzerinden egzoz gazı enerjinin geri kazanımı projesidir (Thacher, 2005). Son zamanlarda termoelektrik modülün jeneratör olarak modellenmesi alanında yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

Otomotiv endüstrisi atık gazların dönüşümü konularında önemli gelişmeler göstermektedir. 400 K ile 1000 K sıcaklık aralığına sahip egzoz gazlarındaki enerjinin geri dönüşümü ile alternatör sistemine yardımcı ya da onun yerine kullanılması sonucu yakıt tüketiminde azalmaların olabileceği vurgulanmıştır. İşletme sistemine, motor kapasitesine göre değişen atık ısı miktarı motorlarda 20 kW ile 400 kW aralığında olup son derece önemli bir kayıp olarak değerlendirilmektedir. Atık ısı enerjinin geri dönüşümü ile üretilen elektrik enerjisi yakıt etkinliğini arttırmada, artan elektrik ihtiyacını karşılamada ve sera gazı emisyonlarını azaltma konusunda etkili olabilecektir. Bu alanda devam eden çalışmalarda termoelektrik malzeme olarak kullanılan Bi_2Te_3 alaşımları yardımıyla bazı prototipler elde edilmiştir (Hatzikraniotis, 2008). Araç uygulamaları alanında farklı prototip tipleri denenmektedir. Yapılan bir başka çalışmada, egzoz gaz sıcaklığının 600 ^oC, çıkış gücünün 125 W olduğu sistem, tek silindirli motora uyarlanmıştır. (Vázquez et al,2002). Termoelektrik sistemlerde üretilen elektrik enerjinin verimli bir şekilde kullanımı için DA/DA dönüştürücülere ihtiyaç vardır. Bu sistemlerde üretilen elektriksel gücün kullanılması, alternatör üzerine düşen yükün hafiflemesi anlamına gelecektir. Bu alanda yapılan bir başka çalışmada kullanılan termoelektrik modüller Skutterudites adı verilen PbTe ve BiTe bileşikli yapıdan meydana gelmektedir. Geliştirilen bu sistemde elektrik çıkış gücü hesaplamaları yapılmış ve alternatör yükünün azalması sonucu taşıtın yakıt tüketiminin azaldığı tespit edilmiştir (Lagrandeu,2006). Termoelektrik sistemlerin bazı yazılımlarla gerçekleşebilen simülasyon çalışmaları da gün geçtikçe artmaktadır. Bu alanda yapılan bir başka çalışmada 32 çift ayaktan oluşan bir termoelektrik jeneratör tasarlanmıştır. TEJ'de geometrinin etkisini analiz etmek için 100, 500 ve 1000 mm boyutlarında 3 farklı dolgu kalınlık değerleri kullanılmıştır. Fark sıcaklıkları 100, 300 ve 500 ^oC olarak analizler yapılmıştır. Sıcaklık dağılımının üniform olduğu analizlerde, üniform olmayan sıcaklık dağılımlarına kıyasla üretilen akım ve voltaj miktarları daha fazla olduğu görülmektedir (Li,2010). Bloklar halinde üst üste tasarlanmış bir başka sistemde değişen sıcaklık, akış ve elektrik yük verilerinin elektrik enerji üzerindeki etkisi araştırılmıştır.(Crane et al, 2009). Clarkson üniversitesi ile General Motor (GM)'un ortaklaşa geliştirdiği bir başka tasarımda, sistem 343 mm uzunluğunda ısı değiştirici üzerine yerleştirilen 42

adet modülden oluşur. Egzoz gazı giriş sıcaklığının 650 ^{o}C, soğutucunun giriş sıcaklığının 90 ^{o}C olduğu deney şartlarında elektriksel çıkış gücü 177 W olarak ölçülmüştür (Eric et al, 2011). CAD yazılımı kullanılarak farklı geometrik şekillerde tasarlanan termoelektrik sistemlerin ağırlık tahminlerini de yapmak mümkündür. Üçgen, dikdörtgen, altıgen tasarımların ağırlıklarının hesaplandığı Ansys programında sırasıyla 12.4, 14.1 ve 21.3 kg ağırlık tahminlerinin olduğu tespit edilmiştir. Aynı çalışmada deneysel olarak dikdörtgen yapıya sahip sistem üzerine 18 adet TEM yerleştirilmiş ve elektrik yükü olarak 25 W gücünde üç adet, 15 W gücünde ise bir adet ampul sisteme bağlanarak çalıştırılmıştır (Int Kyn. 1). Gerçekleştirilen birçok çalışmada gaz akışkanların basınç düşüşleri üzerinde sıcaklığın etkisinin ihmal edilebilir bir seviyede olduğu vurgulanmıştır. Dolayısıyla TEJ sistemi bağlı motorda egzoz geri basınç değerleri incelendiğinde ciddi basınç değişimleri yaşanmamıştır (Kühn,2013 and Kober 2012). (Champier,2009 and Lertsatitthanakorn 2007). Termoelektrik enerji teknolojileri diğer enerji kaynaklarıyla kıyasla birçok çevresel avantajlara sahip olduğu yapılan çoğu çalışmada ispatlanmıştır. Bu avantajlar içinde en dikkat çekici olanlar ise herhangi bir emisyon ve atık ürün olmamasıdır. Ancak içten yanmalı motorlarda kullanılacak termoelektrik jeneratör sistemleri soğutma ve egzoz sistemlerinde bir takım kayıpları meydana getirebilir. Termoelektrik sistemde ek soğutma sisteminde kullanılan fan ve pompalar kayıp olarak nitelendirilir (Braig, 2009).

Bu çalışmada, içten yanmalı dizel bir motorun egzoz sistemine uyarlanan termoelektrik jeneratörünün etkisi hem sayısal hem de deneysel olarak araştırılmıştır. Taşıtlar için alternatif elektrik enerjisi üretecek bu sistem ile aynı zamanda motor egzoz sistemleriyle uyumlu çalışabilecek bir jeneratör yapısı oluşturulması amaçlanmıştır. Ayrıca, soğutma sistemlerinde su ile soğutmanın daha etkin ve yaygın kullanılması nedeniyle çalışmada kullanılan TEM'ler su yardımıyla soğutulmuştur. Sıcaklık farkını arttırmaya yönelik termoelektrik soğutma sisteminde radyatör kullanılmıştır. Ara soğutucunun (radyatör) kullanımı ile termoelektrik soğutma sistemi suyunun sıcaklığının düşürülmesi amaçlanmıştır.

1.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Mühendislik sistemlerinde akış analizleri iki temel yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu temel yaklaşımlar deneysel ve sayısal çalışmalardır. Bu yöntemlerden biri olan deneysel metot güvenilir sonuçlar vermesine rağmen belli bir düzenek gerektirdiği için pahalı ve zaman alıcı bir yöntemdir. Sayısal akışkanlar dinamiğinde analiz yapmak için kullanılan programdan birisi ve en yaygın olanı Ansys Fluent paket programıdır. Fluent paket programında yapılacak analiz için model oluşturma, hücre oluşturma, sınır ve bölge şartlarının oluşturulması gerekir. Fluent programı, ısı transferi, kütle transferi, akışkanlar dinamiği, kimyasal reaksiyon gibi olayların simülasyonunu yapan, kütle korunumu, momentum korunumu, enerji korunumu, türbülans transport ve karışım denklemlerini sonlu hacimler yöntemi ve kontrol hacmi tekniğini kullanarak ayrık (segregated) veya birleşik (coupled) çözüm yöntemi ile sayısal olarak çözebilen ve mühendislik uygulamalarında kullanılan genel amaçlı bir bilgisayar programıdır. Bütün HAD uygulamalarında temel yönetici denklemler olarak akışkanlar dinamiğinin süreklilik, momentum ve enerji denklemleri kullanılır. Bu denklemler, problemin yapısına, çözüldüğü koordinat sistemine vb, özelliklere bağlı olarak türetilerek probleme uygun çözüm geliştirilmiş olur. Bu denklemler yazılırken yapılan kabuller şunlardır;

- Çalışma iki boyutlu ve zamana bağlıdır.
- Türbülans modellemesinde k-ε model kullanılmıştır.
- Radyasyon ısı transferi diğer ısı transferi şekillerine göre ihmal edilmiştir.
- Cidarlarda duvar sınır şartı uygulanmıştır.
- Kaldırma kuvvetleri de ihmal edilmiştir.
- Çevre ile TEJ sistem arasında konveksiyon olduğu kabul edilmiştir.

Diferansiyel denklemler bir kontrol hacmi düşünülerek türetilebilir. Sonsuz küçük kontrol hacim için kütlenin korunumu denklemini en genel haliyle aşağıdaki gibi yazabiliriz;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho V) = 0 \quad (1)$$

Momentumun korunumunun bir ifadesi olan Newton'un ikinci kanunu şöyle açıklanabilir: Kontrol hacmine etki eden net kuvvet, kontrol hacmindeki akışkan parçacığının kütlesiyle ivmesinin çarpımıdır ki bu, kontrol hacminden çıkan akışın net momentum hızına da eşittir. Momentumun korunumu denklemi farklı koordinatlar için farklı şekillerde yazılmaktadır. En genel haliyle üç farklı koordinat düzlemi için momentum denklemleri;

x momentum,

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} \quad (2)$$

şeklinde yazılır.

y momentum,

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \nabla.V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right] + \rho f y \quad (3)$$

Enerji denklemi yazılacak olursa;

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla.(\rho e V) = +\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (4)$$

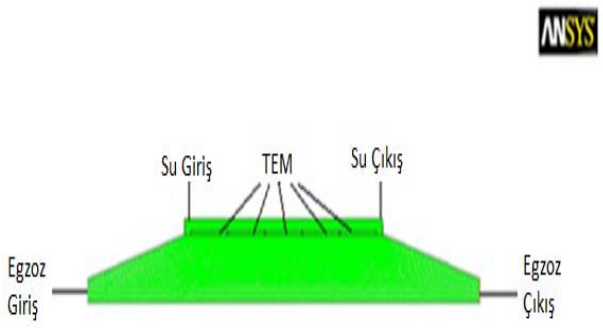
Bu çalışmada standart k- ε türbülans modeli seçildi. Seçilen bu modele göre türbülans yayılım ve kinetik enerji denklemi aşağıdaki gibidir;

$$\rho\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial xi}\left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma k}\right)\frac{\partial k}{\partial xi}\right] + Gk + Gb - \rho\varepsilon - Ym \quad (5)$$

$$\rho\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial xi}\left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma \varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial xi}\right] + C1s\frac{\varepsilon}{k}(Gk + G3sGb) - C2s\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\mu t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Bu denklemlerde Gk ortalama hız değişiminden dolayı türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu, Gb kaldırma kuvvetinden dolayı türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu, Y_m bütün yayılma oranlarında sıkıştırılabilir türbülansta genişleyen çalkantıların katkısını simgelemektedir. C1ε, C2ε ve C3ε model sabitleridir. σk ve σε sırasıyla k ve ε için türbülans Prandtl sayılarıdır. Bu çalışmada, grid yapısının oluşturulması Gambıt programı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Duvar yüzeyleri, suyun ve egzoz gazlarının giriş ve çıkış bölgeleri, TEM'ler Gambıt kod programında tanıtılmıştır. Sayısal analizlerimizde akış olarak kullanılan su ve egzoz gazları giriş hız ve sıcaklık olarak girilmiştir. Çıkış koşulları ise normal çıkış olarak verilmiştir. Ağ yapısı tamamlanan model ağ dosyası olarak Fluent yazılımına transfer edilmiştir. Bu çalışmada Piso (Presto) algoritması sönümleyici olarak kullanılmıştır. Çalışmada ağ yapısından bağımsız çözüm elde etmek için farklı hücre sayılarında çözümler denenmiştir. Bu kapsamda sırasıyla yaklaşık 5000, 11000, 23000 ve 44000 hücre sayılarında ağ yapıları oluşturularak çözümler gerçekleştirilmiştir. Gerek çözüm süresi gerekse sonuçların kıyaslanması neticesinde yaklaşık 23000 (22756) hücre sayısına sahip ağ yapısı seçilmiş ve tüm sayısal çözümlerde kullanılmıştır. Sekizgen yapının diğer çokgen çeşitlerine göre (kare altıgen vb.) üzerinde daha fazla modül taşıması ve silindirik yapıya benzer özellikleri bu geometrinin seçilmesinde önemli parametreler olarak düşünülmüştür. Çözüm kolaylığı bakımından sekizgen yapının iki boyutlu analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. TEJ sisteminin Ansys Fluent programında iki boyutlu görünümü

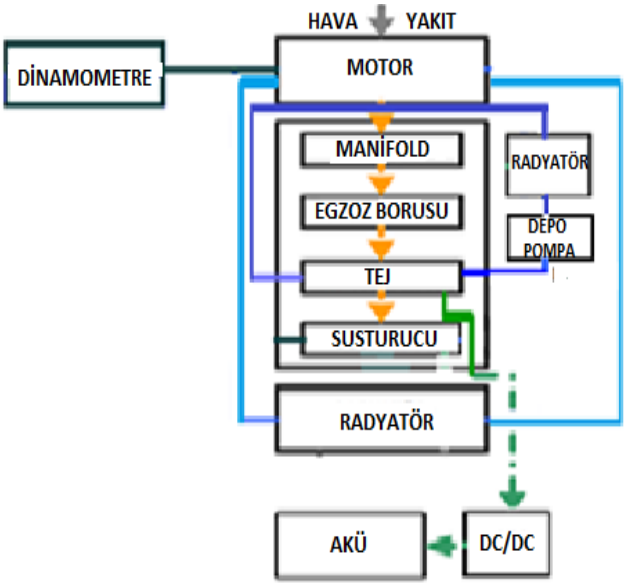
Sistem bire bir ölçülerde gerçek modelin aynısı çizilerek oluşturulmuştur. Sistem Şekil 1'de görüldüğü gibi giriş ve çıkış lüleleri, su girişi ve çıkışı ile TEM'den oluşmaktadır. Çizelge 1'de ise TEJ sistemin ölçütleri gösterilmiştir.

Çizelge 1. TEJ sistemi ölçütleri

Sistem Elemanları	Özellikler
Lüleler	Uzunluk:150 mm, Daralan kesit dış çapı:57 mm, Geniş kesit Yükseklik:144.8mm, Et kalınlığı: 2mm
Sekizgen yapı	Uzunluk: 300 mm, Yükseklik: 14.48 mm, Et kalınlığı: 2mm
Silindir ceket	Uzunluk: 300 mm, İç çapı: 180 mm, Et kalınlığı 15mm
TEM	56 mmx56 mmx5 mm

2. Materyal ve Metot

Deneylerde 4 silindirli, 4 zamanlı Fiat Doblo 1.9 Multijet marka dizel motoru ve Cussons P8602 marka motor dinamometre (bremze) tezgahı kullanılmıştır. Motorun egzoz sistemine bağlanan TEJ sisteminin performans analizlerini elde edebilmek için, motorun hız ve yük değerlerini kontrol edebilen dinamometreye bağlanması gerekir. Çalışmada değişen motor parametrelerinin TEJ sistem üzerindeki etkileri kayıt altına alınarak egzoz gaz sıcaklığı, egzoz gaz hızı, TEM alt ve üst yüzey sıcaklıkları, çıkış voltajı ve akım değerleri alınmıştır. Deney test düzeneğini Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Deney test düzeneği

Deney seti üzerinde bulunan içten yanmalı dizel motorun teknik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

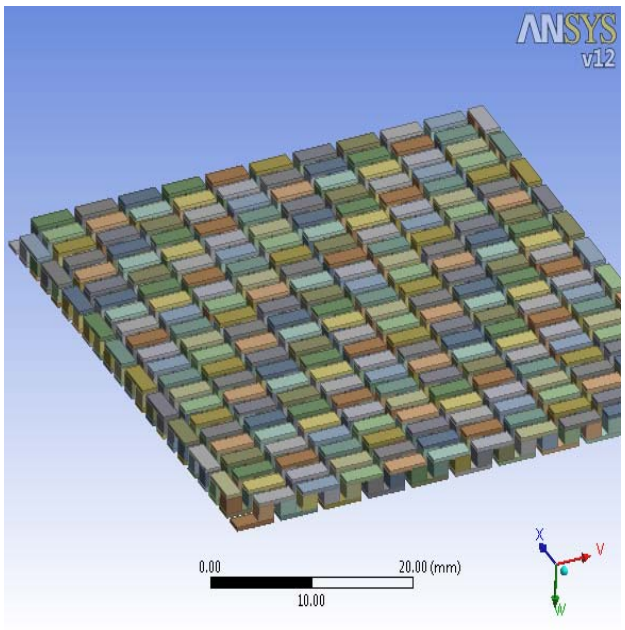
Çizelge 2. Deney motorunun teknik özellikleri

Motor modeli	P8602 Fiat Doblo
Motor teknolojisi	Multijet 2,Turbo şarjlı
Yakıt sistemi	Common Rail
Silindir sayısı	4
Silindir hacmi	1.91
Maksimum moment	2000 dak^{-1}, 280 Nm
Kullanılan yakıt	Motorin

Farklı devirlerde motorun yüklenmesinde hidrolik kavramalı dinamometre kullanılmıştır. Dizel motor sırasıyla 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak^{-1} devirde 75 ve 100 Nm olmak üzere 2 farklı yük altında çalıştırılmıştır. İçten yanmalı dizel motor, farklı yük ve devir aralıklarında çalıştırılarak termoelektrik jeneratör sisteminde oluşan değişimler kayıt altına alınmıştır. Alınan bu değerler aynı zamanda Ansys 12.0 paket programı içerisinde yer alan Fluent programlarında geliştirilen model için sınır şartlarını oluşturmaktadır. Bu sınır şartlarında gerçekleştirilen analizler, sonuçlar hakkında daha iyi yorumların yapılmasını kolaylaştırmıştır. Jeneratörde yer alan modüllerin yüzeyleri arasında ısı geçişinin azaltılması, sıcak yüzeyin ısı kaybının düşürülmesi, soğuk yüzeyin daha iyi soğutulması gibi yapılacak bazı iyileştirmelerle termoelektrik etkinlik daha da arttırılabilir. Deney düzenekleri bu tanıma göre tasarlanmıştır. Buradaki amaç termoelektrik modüller üzerinde maksimum sıcaklık farkını oluşturarak doğal şartlar altında çevre dostu alternatif bir enerji üretme sistemi meydana getirmektir. Ayrıca termoelektrik sistemlerde performans, kullanılan termoelektrik malzemenin yapısına göre de değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle termoelektrik modülün optimum çalışabileceği sıcaklık değerlerinin oluşturulması, modüllerin maksimum etkinlikte çalışması anlamına gelmektedir. Modüllerin optimum çalışma aralıkları, boyutları, akım ve voltaj değerleri göz önüne alınarak seçimi yapılmıştır. Özellikle soğuk havanın etkili olduğu iklim bölgeleri düşünüldüğünde, sistemin ihtiyaç duyduğu sıcaklık farkı artacağı için sistemin daha verimli çalışabileceği tahmin edilmiştir. Bu sistemde egzoz gazları ile birlikte soğutucu akışkanın da belirli bir sıcaklık ve debisine ihtiyaç duyulmaktadır. Burada, jeneratörün bir tek modülü için alınacak ısı enerjisi düzeyinin yüksek tutulması amaçlanmıştır. Custom Thermoelectric firmasından temin edilen 1261G-7L31-24CX1 numaralı termoelektrik jeneratör bütün çalışmalar boyunca kullanılan model olmuştur. 56x56x5 mm ölçülerinde 60 gr ağırlığa sahip olan bu modülün maksimum çalışma sıcaklığı 300 ^{o}C ve bu sıcaklıktaki termal iletkenliği 2,3 W/mK'dir. Sekizgen geometrisi üzerine kurulan sistemde her bir yüzeyde yatay olarak sıralanan toplam 5 adet TEM Şekil 3'de görüldüğü gibi elektriksel olarak seri bağlanmıştır.

Şekil 3. Elektriksel olarak seri bağlı modüller

Deneysel çalışmada kullanılan TEM'ler toplam 252 adet yarı iletken malzemeden oluşmaktadır. Genelde iki paralel yüzey arasına dilimlenmiş olarak bulunan bu sistemlerde p ve n ayakları arasında bağlantı malzemesi olarak bakır eleman bulunmaktadır. Şekil 4'de bir adet TEM içerisinde yer alan 126 adet p tipi, 126 adet ise n tipi materyalin 3 boyutlu görünümü verilmiştir. Çizelge 3'de ise bu elemanların teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 4. TE modelin görünümü

Çizelge 3. TEM ölçütleri

ÖZELLİKLER (300 K)	Termal iletkenlik (W/mK)	İsontropik Direnç (ohm.m)	Adet	Yükseklik (mm)
P tipi	1.373	1.04E-5	126	2.5
N tipi	1.456	1.04E-5	126	2.5
Bakır iletken	385	1.68E-8	257	0.5

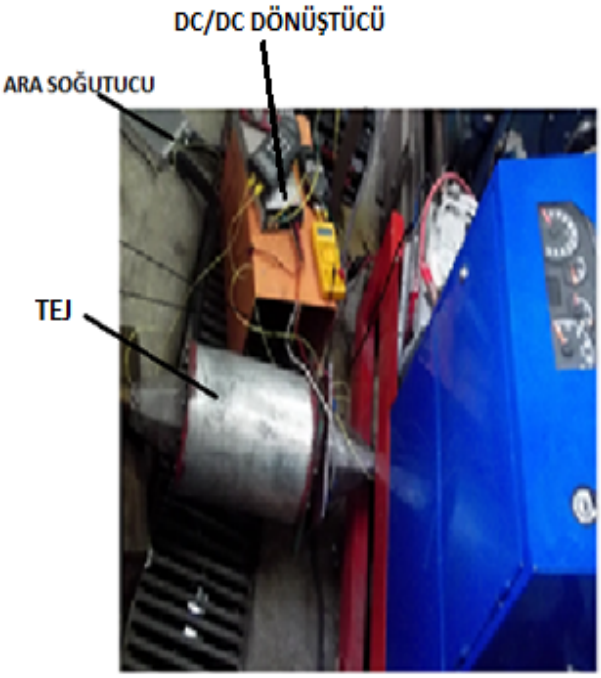
Çalışmada toplam 40 adet termoelektrik jeneratör modül kullanılmıştır. Literatür incelemesinin ardından farklı bir geometrik yapıya sahip sistem üzerinde durulmuştur. Termoelektrik jeneratör sisteminde, alüminyum 6061 olarak bilinen ve savunma sanayi, uçak sanayi, otomotiv endüstrisi ve uzay uygulamaları gibi birçok alanda etkili olan malzeme kullanılmıştır. İşlenebilir özelliği, hafif olması, korozyon dayanımı, ısı iletim katsayısının yüksek oluşu ve iyi kaynak edilebilme gibi özellikleri nedeniyle alüminyum 6061 tercih nedenleridir. Kimyasal bileşiminde Mn, Mg, Cu ve Ti gibi elementleri barındıran 6061 alüminyum alaşım malzemesi, düşük özgül ağırlık, elektrik ve ısıyı iyi iletebilme, yeterli sayılabilecek mekanik dayanım ve iyi plastik şekillendirilme kabiliyeti gibi avantajlara sahiptir. 6061 T4 (Temper 4) malzeme koduna sahip olan bu yapı 2.79E+3 kg/m^3 yoğunluğa, 1.25E+3 j/kg ^{o}C özgül ısıya ve 154 W/mK ısı iletkenliğine sahiptir. Deneylerde, alüminyum 6061 T4 malzemesinden oluşan birde silindirik boru kullanılmıştır. 300x480x2 mm ebatlarında kesilen alüminyum levha, iç açısı 135 derece olacak şekilde özel bükme makinesinde bükülerek sekizgen yapı haline getirilmiştir. Oluşturulan sekizgenin her bir yüzeyi, 5.6x5.6x5 mm ölçülerinde olan beşer adet termoelektrik modüllerini yan yana yerleştirme imkanı sağlar. Egzoz gaz akışının sisteme kademeli olarak giriş ve çıkışını sağlamak amacıyla giriş ve çıkış lüleleri oluşturulmuştur. Yatay eksenle 30 derecelik açı yapan bu lülelerin bir yüzeyi sekizgen yapıda olup diğer yüzeyi ise egzoz borusuna monte edilecek ölçülerde ve şekilde yapılmıştır. Eğik uzunluğu 15 cm olan giriş ve çıkış lülelerinin sekizgen yapıya bağlantı işlemi MİG kaynağı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Yapılan bu tasarımla hedeflenen bazı önemli hususları şöyle sıralamak mümkündür;

1. Daha düzlemsel bir tasarıma kıyasla termal kuvvetleri daha iyi dağıtma ve yönetme kabiliyetine sahip olması,
2. Egzoz gazlarının kullanılan giriş ve çıkış lüleleri vasıtasıyla kademeli geçişini sağlama,
3. Termal iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık ve su sızdırmazlığı sağlamak için ısı değiştirici soğuk tarafa cidar uygulanması,
4. Egzoz gazlarının geçiş yaptığı yüzey alanını daha fazla arttırmayacak kenar uzunluklarına sahip olunması ve ayrıca

daha fazla TEM'den faydalanma imkanı şeklinde sıralayabiliriz.

Düz ve pürüzsüz olmayan yüzeylerden dolayı oluşan mikroskobik hava boşluklarının doldurularak ısı iletkenliğinin arttırılması için termal macun kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan termal macun, modüller ile alüminyum destekleyici yapı arasında ısı transferinin artmasına katkı sağladığı gibi ısının üniform dağılımını sağlamaktadır. Sekizgen yüzey üzerine montajı gerçekleştirilen modüllerin kablo bağlantıları da oldukça önemlidir. Nitekim modüllerin üst kısmında gerçekleştirilen soğutma suyu ile kesinlikle bağlantı kablolarının temas etmemesi gerekir. Bunun önüne geçebilmek için 0,4 mm kalınlığında galvanizli sac kullanılmıştır. Cidarın görevi modüllerin direk su ile temasının önüne geçmektir. Sıkı geçebilecek şekilde üretilen cidar ile silindir yapısı arasında soğutma suyu geçirilerek modüllerin soğutulması amaçlanmaktadır. Cidar, sekizgen üzerine yerleştirilen termoelektrik modüllerin soğuk (üst) yüzeyine bakan tarafın tamamını kapsayacak ölçütlerde tasarlanmıştır. Cidar ile modüller arasındaki mikroskobik boşlukların oluşturabileceği olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla bu iki yüzeyin her ikisine de termal macun uygulanmıştır. TEJ soğutma sistemi kendi içerisinde ara soğutucu ünite, soğutma hortumları, soğutma deposu ve DC gerilim ile çalışan elektrikli pompadan oluşur. Deney motoruna bağlantısı gerçekleştirilen TEJ sistem Şekil 5'de gösterilmektedir.



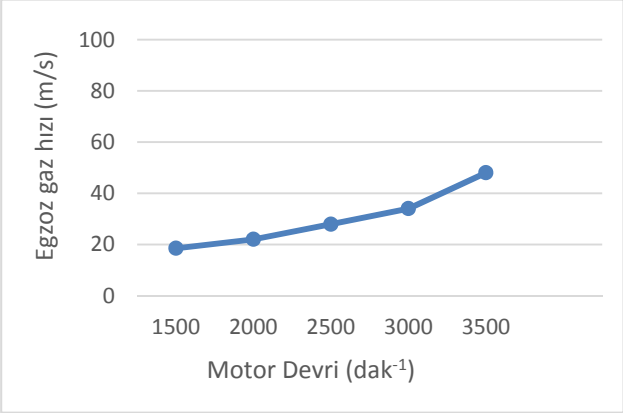
Şekil 5. Deney motoruna bağlantısı gerçekleştirilen TEJ sistemi

TEJ sistem, egzoz manifoldu ile egzoz susturucu arasında konumlandırılmıştır. Çalışmada egzoz gazının sıcaklık değerleri, TEM alt ve üst yüzey sıcaklıkları, soğutma suyu sıcaklıkları 3 adet portatif termometre ve K tipi termokpul kullanılarak ölçülmüştür. TEJ sistem tarafından üretilen elektriksel değerler ise 2 adet multimetre yardımıyla ölçülmüştür. Egzoz gaz hızı ölçümleri TEJ girişinde Testo Marka anemometre probunun yardımıyla ölçülmüştür.

3. Bulgular

Motorda artan devir sayısı ile birlikte hava hareketleri de artış göstermektedir. Bu artış beraberinde motor güç değerlerinde artışlara sebep olur (Can,2009). Artan motor devri ve güç ihtiyacı egzoz gazı hareketlerini de artırır ve bunun sonucunda yanma hızı artar ve yanma iyileşir. Artış gösteren yanma hızının oluşan egzoz gaz hızını etkilediği düşünülmektedir. Bu nedenle motor devrinin artmasıyla birlikte egzoz gaz hızlarında artışlar gözlemlenmiştir. TEJ sisteminin egzoz giriş uçunda ölçülen egzoz gaz hızları her bir motor devri

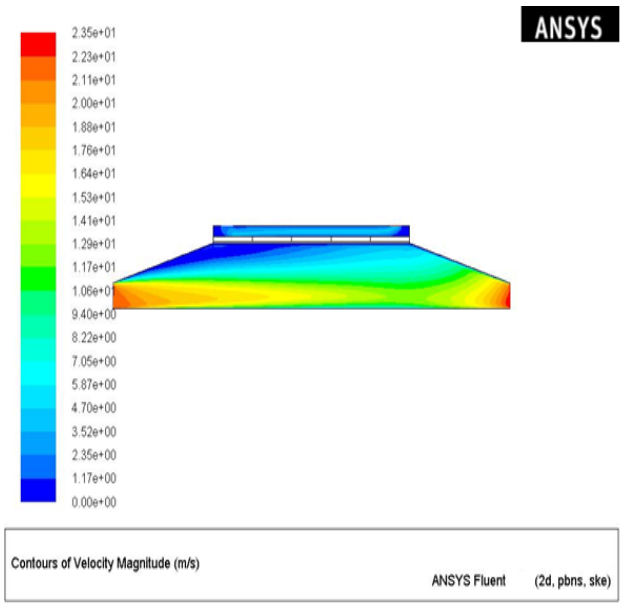
için 75 ve 100 Nm olmak üzere iki farklı yükte ölçülmüştür. Yük değişimi altında egzoz gazları akış hızının stabil olmadığı ve aynı devirde farklı yükte fazla bir değişim gözlemlenmesi nedeniyle iki yük şartı için ortalama hız değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerler Şekil 6'da görülmektedir.



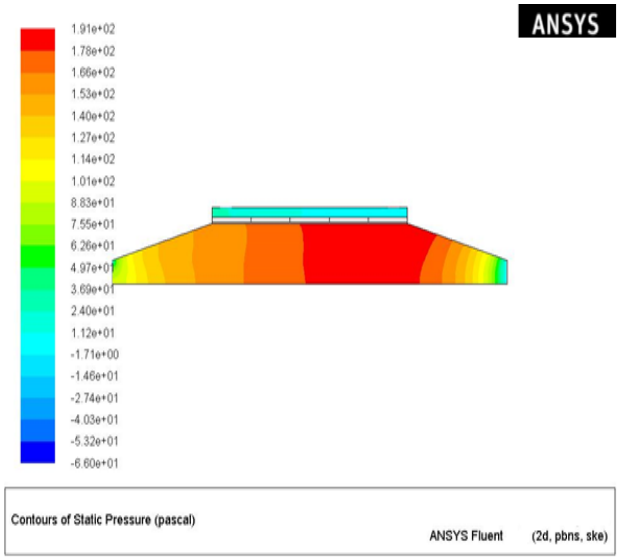
Şekil 6. TEJ girişinde ölçülen egzoz gaz hızı

Deneysel çalışmada egzoz gaz hızında elde edilen değerler Ansys Fluent programında gerçekleştirilen akış analizlerinin giriş sınır şartını oluşturmuştur. Gerçekleştirilen analizler sonuçları incelendiğinde özelikle köşe noktalarında egzoz gaz hızının etkisini kaybettiği, yine aynı şekilde yatay eksen boyunca önce azaldığı, daha sonra daralan kesit yapısıyla birlikte kademeli bir şekilde hızın tekrardan arttığını söylemek mümkündür. Yanma sonucunda belirli bir hız ve sıcaklığa sahip olan egzoz gazlarının iç cidar bölgelerinde soğuması ve alan ile birlikte hızın düşmesi maksimum basıncı doğurmuştur. Hızın TEJ sistemin orta bölümlerde yavaş olmasından dolayı yüksek basınç egzoz gaz moleküllerini hızlı bölgedeki düşük basınç bölgesine itmiştir. Hızla daralan bölgeyi geçen egzoz gazları geniş bir bölüme geldiğinde önünde yer alan yüksek basınç nedeniyle yavaşlamışlardır. Hızın yüksek olduğu bölgelerde basıncın düştüğü, hızın azaldığı bölgelerde ise basıncın arttığı görülmektedir. Egzoz gazlarının TEJ sisteme giriş bölgesi ile çıkış bölgesi arasında da statik basınç farkının oluştuğu görülmektedir. Düzensiz gelişen hız dağılımı ve sıcaklık azalmalarının beraberinde basınç düşüşlerini oluşturduğu düşünülmektedir. Hız ve statik basınç parametreleri incelendiğinde bu değerlerin birbirlerine bağımlı geliştiğini söylemek mümkündür. Bütün hız ve basınç analizleri incelendiğinde TEJ sistem içerisinde oluşan farklı basınç dalgalanmalarının olduğu söylenebilir. Örneğin motorun 1500 dak^{-1} devirde çalıştırılması sonucunda egzoz gazları TEJ sistemi içinde maksimum 191 Pascal statik basınç oluşturmuştur. Aynı devir farklı yük şartlarında girilen egzoz gaz akış hızının sabit kabul edildiğinden yük şartlarına göre basınç miktarlarında değişme olmamıştır. Bu nedenle aynı yük şartlarında benzer sonuçların elde edildiği söylenebilir.

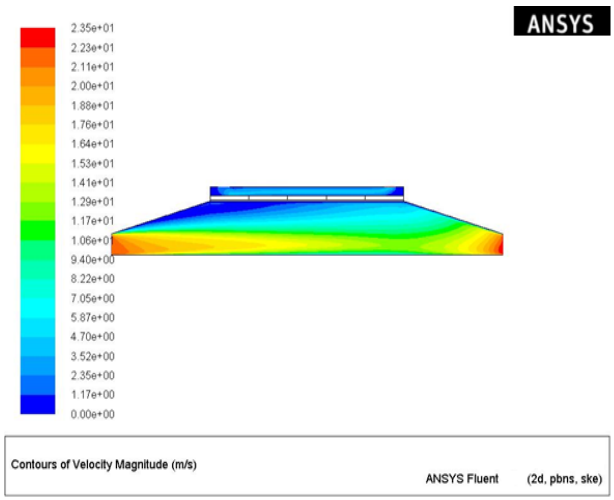
Egzoz gazların önce lüle daha sonra sekizgen kanal içerisinden geçirilerek akışın ısıl olarak gelişimi sağlanmıştır. Çözümler kararlı rejim ve türbülanslı akış şartlarında yapılmıştır. Özellikle ısı transferinin olduğu ara yüzey bölgesindeki hızların da oldukça düşük olduğu görülmüştür. Hız dağılımları incelendiğinde beklenilen sonuçların oluştuğu görülmüştür. Daralan modül kesitleri arasındaki hız büyüklükleri arasındaki farklılıklar eşit kütlesel debiden dolayı kesit çapı ile orantılı olarak değişmiştir. Benzer şekilde merkezden dış cidara doğru hızın azaldığı görülmektedir. Şekil 7, Şekil 9, Şekil 11, Şekil 13, Şekil 15 motorun farklı devirlerinde TEJ sistemde elde edilen hız dağılımlarını, Şekil 8, Şekil 10, Şekil 12, Şekil 14 ve Şekil 16 ise sistemlerde oluşan statik basınç dağılımlarını göstermektedir.



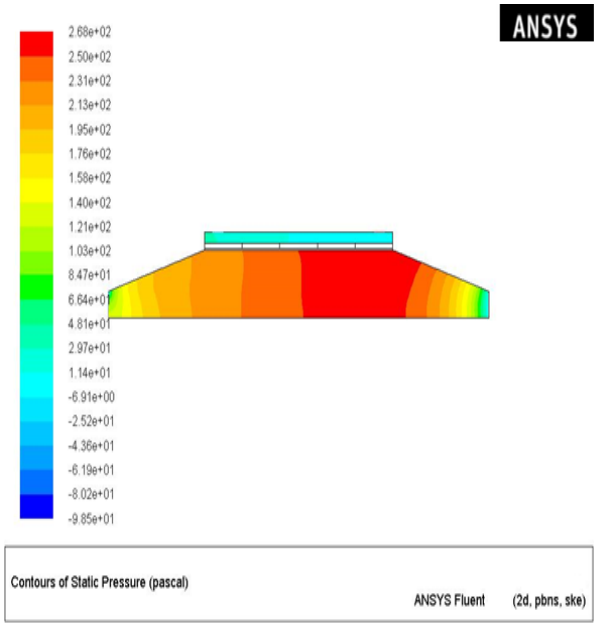
Şekil 7. Motorun 1500 dak^{-1} devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı



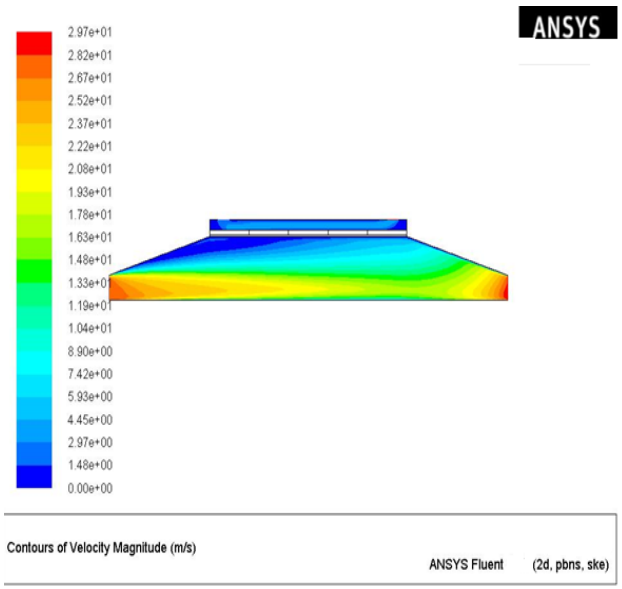
Şekil 8. Motorun 1500 dak^{-1} devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı



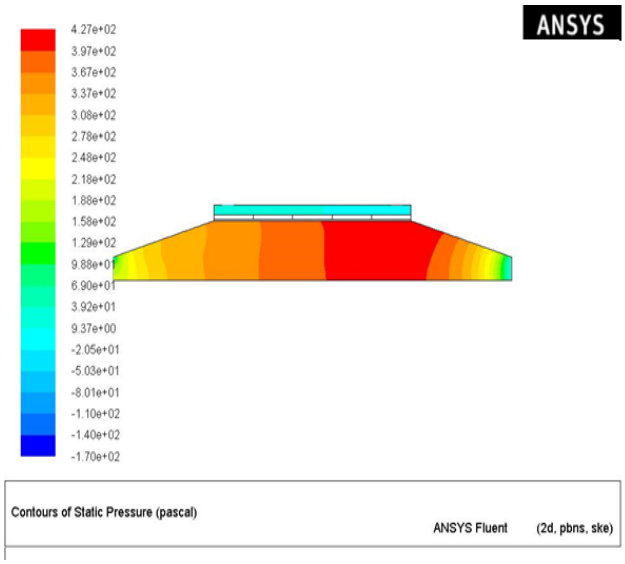
Şekil 9. Motorun 2000 dak^{-1} devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı



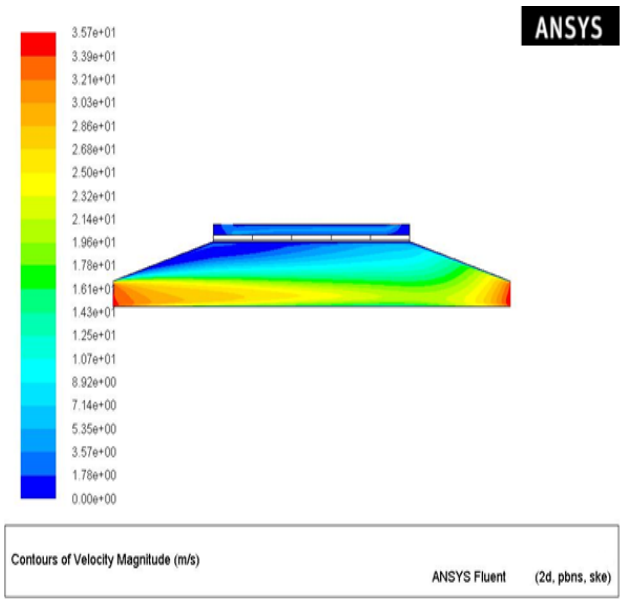
Şekil 10. Motorun 2000 dak^{-1} devirde çalışmasıyla TEJ sistemde oluşan statik basınç dağılımı



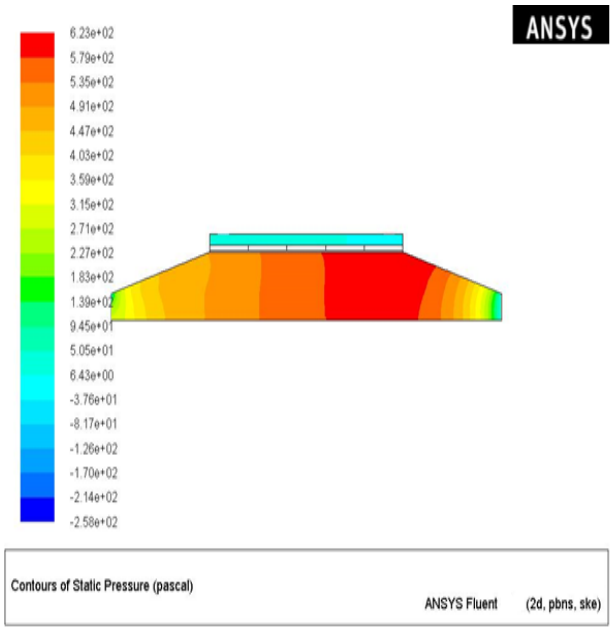
Şekil 11. Motorun 2500 dak^{-1} devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı



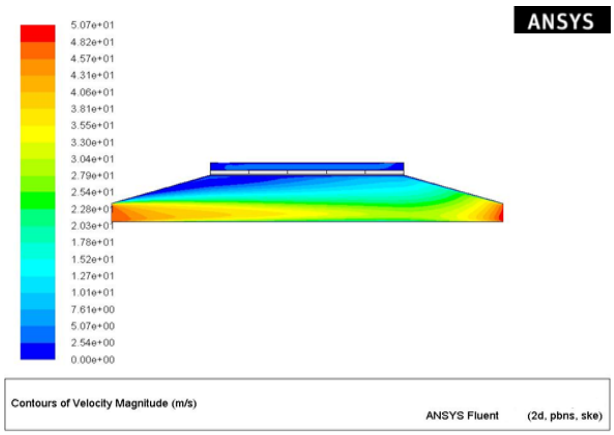
Şekil 12. Motorun 2500 dak^{-1} devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı



Şekil 13. Motorun 3000 dak^{-1} devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı



Şekil 14. Motorun 3000 dak^{-1} devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı



Şekil 15. Motorun 3500 dak^{-1} devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı

Şekil 16. Motorun 3500 dak^{-1} devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı

Motorun 2000 dak^{-1} devir çalışma şartları için TEJ sisteminde oluşan hız ve statik basınç dağılımları sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da görülmektedir. Basınç analizleri incelendiğinde egzoz gazlarının TEJ sistem içerisinde oluşturdukları maksimum basınç değeri 267 Pascal'dır. 22 m/sn hıza sahip olan egzoz gazları kademeli bir şekilde sistemin basıncını arttırdığı görülmektedir. Hız analizi sonuçları incelendiğinde özelikle egzoz gazlarının giriş yaptığı köşe noktasında hız sıfıra yakın çıkmıştır. Egzoz gazlarının geçtiği alanın artmasıyla paralel olarak egzoz gaz hızının etkisini kaybettiği ve daha sonra daralan kesit yapısıyla birlikte kademeli şekilde hızın tekrar arttığını söylemek mümkündür. Yanma sonucunda belirli bir hız ve sıcaklığa sahip olan egzoz gazlarının iç cidar bölgelerinde soğuması ve alan ile birlikte hızın düşmesi maksimum basıncı doğurmuştur

Atık ısı enerjinin kullanılabilir enerjiye dönüşümünü gerçekleştiren TEM'lerin performansı birçok etkene bağlı olarak değişmektedir. Elektriksel çıkış gücünü doğrudan ilgilendiren en önemli etkenlerden biri ise TEM yüzeylerinin sahip oldukları sıcaklık değerleridir. Oluşan bu sıcaklık değerlerinin kaynağı elbette egzoz gazlarının sahip olduğu ısı enerjisidir. Deney sonuçları gösteriyor ki egzoz gazlarının sahip olduğu bu enerji motor devir sayısı ve yükü birlikte artış göstermiştir. Bu artış aynı zamanda TEJ sistemindeki elektriksel çıkış değerlerini doğrudan değiştirmektedir. Çizelge 4'de bu değerler gösterilmektedir.

Çizelge 4. TEJ sisteminde üretilen akım ve voltaj miktarları

Motor Devri (dak^{-1})	Motor Yükü (Nm)	Akım (A)	Voltaj (V)
1500	**75**	0.73	14.6
	100	0.74	15
2000	**75**	0.95	21.06
	100	1.15	26.9
2500	**75**	1.29	31.2
	100	1.42	34.4
3000	**75**	1.96	48.66
	100	2.18	55.3
3500	**75**	2.38	63
	100	2.4	65.3

Atık egzoz gazı ısısının ne kadarının kullanılabilir olduğu gösteren Çizelge 5'de yer alan değerlerden üretilen elektrik enerjisi dışındaki diğer değerler

Ansys Fluent programı yardımıyla gerçekleştirilen ısı ve akış analizleri sonucunda elde edilmiştir. Sonuçlar gösteriyor ki egzoz gazlarının sahip olduğu ısı enerjisinin bir kısmı sistemde tutulmuş ancak büyük bir kısmı ise sistemden atmosfere atılmıştır. Motorun bütün çalışma devir ve yük şartlarında TEJ sistem tarafından absorbe edilen ısı enerjisinin yaklaşık %50-%60'ı lüle ve cidarlardan dış ortama ısı transferi edilmiştir. TEM'ler yardımıyla ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştüğü sistemde, en yüksek TEM verimi motorun 3500 dak^{-1} devrinde ve 100 Nm yükte çalışması ile elde edilmiştir. 40 adet termoelektrik modülden elde edilen elektrik enerjisi DC/DC konvertör yardımıyla akü şarjında kullanılmış tır.

Çizelge 5. Üretilen elektrik enerjisi ve Fluent programında elde edilen değerler

Motor Devir (dak^{-1})	Motor Yükü (Nm)	Egzoz gazı giriş Isısı (kW)	Egzoz gazı çıkış Isısı (kW)	Transfer edilen Isı (kW)	Kalan Net Isı (kW)	Üretilen Elektrik Enerjisi (W)	Enerjinin Dönüşümü (%)
1500	75	7.66	7.38	0.28	0.161	10.6	0.82
	100	8.44	8.13	0.304	0.168	11.1	0.82
2000	75	12.7	12.34	0.395	0.218	20.4	1.16
	100	15.06	14.59	0.466	0.257	30.9	1.50
2500	75	20.85	20.29	0.558	0.287	40.2	1.75
	100	23	22.46	0.561	0.305	48.8	2
3000	75	30.68	30.04	0.636	0.350	95.3	3.4
	100	32.83	32.15	0.682	0.377	120.5	4.2
3500	75	50	49.3	0.755	0.431	150.3	4.3
	100	53.1	52.3	0.8	0.455	156.7	4.3

4. Tartışma ve Sonuç

TEJ sistemden elde edilen maksimum akım-gerilim, motorun 3500 dak^{-1} devir ve 100 Nm yük ile çalıştırılması sonucunda meydana gelmiştir. Egzoz sistemine bağlantısı gerçekleştirilen 40 adet termoelektrik modülün ürettiği maksimum elektrik enerjisi 156.7 W olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu elektrik enerjisi taşıtlarda bataryanın şarjlı kalmasını sağlayabileceği gibi araçlarda bulunan klima, ısıtıcı, lambalar vb, gibi alıcılara elektrik enerjisi sağlaması noktasında alternatöre alternatif bir enerji kaynağı olabileceği bu çalışma ile kanıtlanmıştır. Ayrıca, çalışmada Ansys Fluent 12.0 paket programında termoelektrik egzoz sistemin iki boyutlu ısı ve akış analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizlerde sistem içerisinde egzoz gaz hızı ile statik basıncın ters orantılı geliştiğini görmekteyiz. Sekizgen prizmanın sahip olduğu yüzey alanının büyük seçilmesi kuşkusuz ani genişleme ve ani daralma katsayılarını değiştirecektir. Bu nedenle sistem tasarımında egzoz gazlarının geçtiği alanın büyüklüğü büyük önem arz eder. Çok daha yüksek alan büyüklükleri akış şeklini bozarak sistemde motora geri basınç oluşturabilir. Bu durum motor performansını olumsuz yönde etkiler.

Termoelektrik üretim kusursuz derecede temiz ve güvenilir bir enerji kaynağıdır. Termoelektrik enerji üretimi yüksek güvenilirlik, sessizlik, hareketli parçaların olmayışı ve uzun ömürlü bakımsız çalışması gibi sebeplerle ön plana çıkmaktadır. Yüzeyler arası ısı geçişinin azaltılması, sıcak yüzeyin ısı kaybının düşürülmesi, soğuk yüzeyin daha iyi soğutulması gibi yapılacak bazı iyileştirmelerle bu etkinlik daha da arttırılabilir. Böylece termoelektrik enerji üretim sistemleri önümüzdeki yıllarda önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak düşünülebilir.

Araç radyatörü, sobalar, doğal sıcak su kaynakları, gazlı su ısıtıcıları, güneş ışınlarının odaklanması gibi atıl ısının değerlendirilebileceği kaynaklardan TEJ sistemleri ile daha etkin yararlanılabilir. Ayrıca kanatçık kullanımı ile egzoz gazı geri basıncının artacağı ve bu durumun motoru olumsuz etkileyebileceği düşüncesiyle sistemde kanatçık kullanımından kaçınılmıştır. Ayrıca, atık ısıdan termoelektrik modülleri ile elektrik enerjisi elde edilmesinde maksimum verim almak için termoelektrik jeneratörlerin iç direnciyle yük direncinin birbirine eşit olması gereklidir

Teşekkür

Bu çalışmayı, TEF 13.03 No'lu proje kapsamında maddi olarak destekleyen FÜBAP'a ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

Balcı,C., 2011. Egzoz gaz enerjisiyle çalışan NH_3-H_2O absorbsiyonlu soğutma sistemiyle taşıt kabininin iklimlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Braig,T., Ungethüm,J., 2009. System-level modeling of an ICE-powered vehicle with thermoelectric waste-heat-utilization,Proceedings 7th Modelica Conference, Como, Italy, sep. 20-22.

Can,İ., 2009. Lpg ile çalışan benzinli bir motora kademeli doldu yapılmasının performans üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Courant, L., 2012. Waste heat recovery in brake pad using a thermoelectric generator Department of Energy Technology, Alborg University.

Crane D.T., vd., Performance results of a high power density thermoelectric generator:beyond the couple, Irwindale, 91706 USA.

Eric F. Thacher, Joseph R. Wagner, S., Thermoelectric generator'', Clarkson University.

Hatzikraniotis, E.. Study of thermoelectric power generators and application in a small sized car, Physics Department, Solid State Physics Section, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.

Lagrandeu,J., 2006. Automotive waste heat conversion to electric power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe'', Thermoelectrics, 2006. Ict '06. 25th İnternational Conference on, 343 – 348.

Li,S.,2010. Thermo-mechanical analysis of thermoelectric modules, Industrial Technology Research Institute,Taiwan.

Kober,M., 2012. Methodical concept development of automotive thermoelectric generators (TEG), 3. International Conference Thermoelectrics goes Automotive, Methodical Concept Development of Automotive TEG.

Kühn,R., Koeppen,O., Kitte,J., 2013. Influence of an optimized thermoelectric generator on the back pressure of the subsequent exhaust gas system of a vehicle, Journal of Electronic Materials, 1521-1526.

Temizer,İ., 2012. Energy conversion of systems used thermoelectric technology, 12thInternational Combustion Symposium, Turkey, May 24-26.

Thacher,E,F., 2005. Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck, Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering, 221-95.

Sisman, A. ve Özgün, H., 2008. Thermoelectric generators and their applications for energy from space. Efs 2008, international workshop on Energy from space for a sustainable environment. Istanbul, Turkey.

Vázquez,J, vd., 2007. State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles'', AGH University of Science and Technology , İspanya.

İnternet kaynakları

1- www.doiserbia.nb.rs.,(20 Mart 2012)