

## EGZUZ ATIK ISISINDAN TERMoeLEKTRİK MODÜL İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

*Burak SEYYAR\**   
*İsmet TIKIZ\*\** 

Alınma: 07.07.2022; düzeltme: 21.04.2023; kabul: 05.05.2023

**Öz:** Bu çalışmada, yakıtın kimyasal enerjisinden ısı enerjisine dönüşümü ve ısı enerjisinden mekanik enerjiye dönüşüm sağlanan içten yanmalı motorlarda kayıp olarak atmosfere verilen ısı enerjisinin kullanılabilir hale getirmek için bir atık ısı geri dönüşüm sistemi incelenmiştir. İçten yanmalı motordan elde edilen sıcak egzoz gazlarından termoelektrik modül (TEM) ile elektrik enerjisine dönüştürülen bir termoelektrik jeneratör (TEJ) tasarımı yapılmıştır. TEM'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını artırmak için modülün soğuk yüzeyini atmosfere açık olarak düşünmek yerine soğuk su eşanjörü tasarımı yapılmış ve su akımı sağlanmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile TEM'in yüzeylerindeki sıcaklıklar tespit edilmiştir. Tespit edilen yüzey sıcaklıkları TEM'in sınır koşullarını oluşturmuş ve bu sıcaklıklara göre analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda 39,35 W güç elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Egzoz Gazı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Termoelektrik Eşanjör, Termoelektrik Modül

### Electricity Generation from Exhaust Waste Heat with Thermoelectric Module

**Abstract:** In this study, the conversion of fuel from chemical energy to heat energy and the conversion of heat energy to mechanical energy in internal combustion engines have been studied as a waste heat recycling system to make available the heat energy supplied to the atmosphere as a loss. A Thermoelectric generator design has been made that converts hot exhaust gases obtained from an internal combustion engine into electrical energy with a thermoelectric module (TEM). In order to increase the temperature difference between the surfaces of the TEM, instead of considering the cold surface of the module as open to the atmosphere, a cold water exchanger was designed and water flow was provided. The temperatures on the surfaces of the TEM have been determined by the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The detected surface temperatures formed the boundary conditions of the TEM and its analysis was carried out according to these temperatures. As a result of the analysis, 39.35 W of power was obtained.

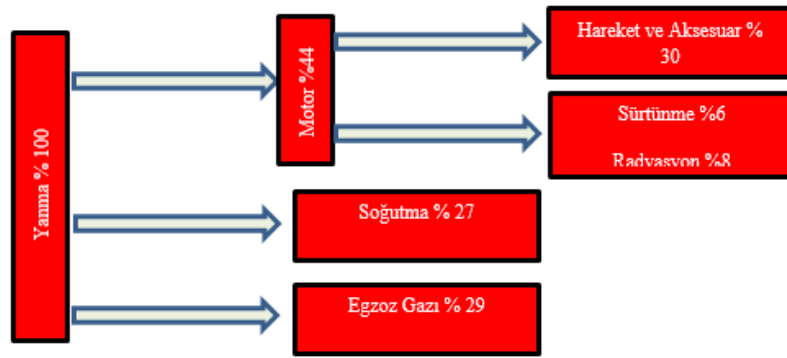
**Keywords:** Exhaust Gas, Computational Fluid Dynamics, Thermoelectric Heat Exchanger, Thermoelectric Module

\* Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

\*\* Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye  
İletişim Yazarı: Burak SEYYAR (burakhann77@gmail.com)

## 1. GİRİŞ

Enerji tüketiminin gittikçe arttığı günümüzde, enerjinin üretimi ve tüketimi hem ekonomik hem de endüstriyel faaliyetleri ciddi şekilde etkilemektedir. Bu artan enerji ihtiyacını karşılamak için fosil yakıtlar yoğun olarak kullanılmaktadır. Kullanılan fosil yakıtlar da hem hava kirliliğini artırmakta hem de küresel ısınmaya sebep olmaktadır (Brown ve diğ., 2017). Bundan dolayı günümüzde enerjinin tüketimini azaltacak ve verimliliği artıracak yeni teknolojilerin geliştirilmesine öncelik verilmiştir. Günümüzde bilindiği gibi içten yanmalı motorların ısı verimleri %30 civarındadır. Bu değer yakıtın kimyasal enerjisinin %70'lik bir kısmının kaybedildiğini göstermektedir. Bu kayıplar Şekil 1'de görüldüğü üzere; egzoz, soğutma, sürtünme ve radyasyon gibi yollarla ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 1:**  
Isı enerjisinin dağılımı

İçten yanmalı motorlarda çevreye atılan ısının kullanılması alanında, enerji verimliliğinin arttığı bu dönemlerde yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır. İçten yanmalı motorlu araçlarda egzoz gazı yoluyla kaybedilen atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanma yöntemi, aracın elektrik ihtiyacını karşılamak için alternatif bir çözümdür. Bu atık ısı dönüşüm sistemi, hem atık ısıdan faydalı enerji elde edilmesini sağlar hem de atmosfere zararlı sera gazı emisyonlarının salınımının azaltılmasına yardımcı olur. Bu alanda yapılan çalışmalarda TEM ile üretilen elektrik enerjisinin, alternatörün ürettiği enerjinin bir kısmını karşılayacak önemli bir etkiye sahip olabileceği vurgulanmaktadır (Ivankovic ve diğ., 2012).

Termoelektrik sistemler, ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemler olarak bilinmektedir. Termoelektrik etkiler Joule yasası, Peltier etkisi, Seebeck etkisi ve Thomson etkileridir. TEM'in yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluştuğunda, Seebeck etkisi ile modül doğru akım (DC) güç kaynağı gibi çalışabilmektedir (Yavuz ve diğ., 2010). TEM'ler yarı-iletken malzemelerden oluşmaktadır. Elektrik kullanarak amacına göre ısıtma veya soğutma işlemini yapabilirler. Modülün en küçük biriminde negatif (n) ve pozitif (p) tipi yarı-iletkenler kullanılmaktadır. Modülde p ve n tipi yarı iletkenlerin dizilimleri bir çift oluşturacak şekildedir. Bu oluşan çiftlere termolement denir. Çiftler ve bunların elektriksel bağlantıları genellikle bir seramik elektrik yalıtıcısı ile bir yığın haline getirilir. TEM'ler çalışma durumlarına göre elektrik üretimi ve soğutma olmak üzere iki alana ayrılırlar (Doğdu, 2013). Bir dizi TEM'den oluşan TEJ'ler, sıcaklık farkından elektrik enerjisi üreten yarı iletken yapıya sahip DC elektrik üreteçleridir. TEM'de üretilen elektrik gücü doğrudan iki yüzey arası sıcaklık farkıyla ilişkilidir. Sıcaklık farkı arttıkça üretilen elektrik enerjisi de artmaktadır. TEM'ler hafiflikleri, küçük boyutları, hareketli parçalarının bulunmaması ve bakım masraflarının olmamasından dolayı araç egzoz sistemlerinde uygulanabilir ekipmanlardır. Bu bağlamda bakıldığında araçlarda TEJ sistemleri, motorun yanma sonrasında atık olarak doğaya gönderdiği ısı enerjisini kullanmaktadır. Doğaya salınan bu ısı enerjisi büyük bir potansiyel taşımaktadır. Taşınan bu büyük potansiyelin

farkında olan insanlar bu potansiyelin faydalı bir enerjiye dönüştürülmesi anlamında çalışmalarını gerçekleştirmektedirler.

Temizer ve ark. (2017) üzerinde çalıştıkları buji ateşlemeli motorda, egzoz sistemine montajını yaptıkları TEJ sistemi ile atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünü gerçekleştirmişlerdir. Motorun farklı çalışma devirlerinde (1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250 d/dk) TEM'lerin yüzey sıcaklıklarını ölçmüşlerdir. Motor devri arttıkça egzoz gazı sıcaklıklarının arttığı ve aynı zamanda TEM yüzeyinin sıcaklığının arttığını gözlemlemişlerdir. TEM'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı arttıkça üretilen elektrik enerjisi miktarının da arttığını ve yüksek devirde TEM'in daha fazla elektrik enerjisi ürettiğini belirlemişlerdir. Yine aynı şekilde Gequn ve ark. motor koşullarının değişmesinin TEJ sistemlerinin performansı üzerinde bir değişim yaratıp yaratmadığını incelemişlerdir. İlker ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmadan farklı olarak akış yönü boyunca düz kanatçıklar yerleştirmenin, ısı transfer yoğunluğunu iyileştireceğini ve termal direnci azaltacağını belirlemişlerdir (Gequn ve diğ.,2018).

Ziółkowski ve ark. (2019) dizel bir araç ile şehir içi 11 kilometrelik bir güzergâhta aracın egzozuna yerleştirdikleri modüller ile anlık olarak egzoz gazının sıcaklığını ve kütleli debisini kayıt etmişlerdir. Benzer şekilde Demir ve Dincer sistemin güç kapasitesinin, sisteme gelen egzoz gazının giriş sıcaklığı ve kütle debisi ile doğrudan ilişkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Egzoz gazının kütle debisini (0,0405 kg/s'den 0,05046 kg/s'ye) ve giriş sıcaklığını (767°C'den 883°C'ye) artırarak sistemde üretilen gücü (148 W'tan 282 W'a) artırmanın mümkün olduğunu saptamışlardır (Demir ve Dincer, 2017). Ziółkowski ve ark. tasarladıkları kübik TEJ üzerine 24 adet TEM yerleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada egzoz gazı sıcaklıklarının TEJ üzerinde üniform olarak dağılmasını sağlayacak bir kanatçık tasarımı da gerçekleştirmişlerdir (Ziółkowski ve diğ., 2019).

Şahin ve ark. (2018) üzerinde çalıştıkları traktör egzozundan doğaya salınan ısı enerjisinin geri kazanımını sağlamak için termoelektrik eşanjör (TEE) tasarımı yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada alüminyumdan yapılmış bir altıgen blok ve TEM kullanmışlardır. Yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak TEE'de soğutma ünitesini kanatlı yapıdan oluşturmuşlardır. Tasarladıkları modelin ısı ve elektrik analizlerini HAD ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında 6 adet TEM kullanmışlardır. Altıgen bloğun her yüzeyine yerleştirdikleri TEM'ler ile toplamda 28,8 V gerilim, 0,669 A akım ve 19,26 W güç değerleri elde etmişlerdir.

Bolatlı (2019) yaptığı çalışmada diğer çalışmalara benzer olarak dizel bir motorda egzoz kısmına yerleştirmek için tasarladığı TEE ile ısı enerjisinden elektrik üretimi gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda doğaya bırakılan egzoz gazının ısı enerjisi TEM'lerin sıcak yüzeyine homojen olarak iletilmesi amacıyla ısı eşanjörü tasarımları üzerinde çalışmıştır. Üzerinde çalıştığı eşanjör tasarımlarında kanatçıklı bir yapı kullanmıştır. Diğer çalışmalardan ayrı olarak tasarladığı TEE'de kanatçık sayılarını 12, 14, 16 ve 18 adet olmak üzere belirlemiştir. Bu kanatçık sayılarının etkisini öğrenmek üzere HAD çalışmaları gerçekleştirmiş ve 14 kanatçıklı ısı eşanjörünün üretimini uygun görmüştür. Üretimini yaptığı 14 kanatçıklı ısı eşanjöründe alt yüzeyine ve üst yüzeyine 15 adet TEM yerleştirmiştir. Deneylerini motoru farklı devirlerde çalıştırarak yapmıştır. 2300 d/dk'da akım ve gerilim değerlerini maksimum elde ettiğini belirlemiştir. Bu belirlediği değerlerle maksimum güç değerini 0,61 W olarak saptamıştır. 1600 d/dk'da elde ettiği değerler ile maksimum güç değerini 7,05 W olarak saptamıştır. TEM'ler ile üretilen bu elektrik enerjisinin otomobilde bir ihtiyaç olan araç içi aydınlatma sistemlerinde kullanılabileceğini vurgulamıştır. Elde edilen bu elektrik enerjisi, Temizer ve ark. tarafından dizel bir motorun egzoz sistemine alüminyum 6061 malzemesinden oluşan sekizgen bir yapı ve bu yapının üzerine 40 adet TEM bağlanmasıyla montajını yaptıkları TEM'lerden motorun 3500 d/dk'da ve 100 Nm yükte çalıştığı koşullarda, 156,7 W güç elde etmeleriyle alternatöre alternatif bir enerji kaynağı yaratmak açısından önemli olduğunu belirtmişlerdir (Temizer ve diğ., 2016).

Niu ve ark. (2014) yaptıkları bu çalışmayla egzoz atık ısısından TEJ ile elektrik üretimi sağlamanın yanı sıra yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak TEJ kullanımının yaklaşık 0,3 kg/h yakıt sarfiyatında azalmaya yol açtığını gözlemlemişlerdir. Egzoz'dan atılan sıcak gazların sadece

% 25'inin TEM'lere aktarıldığını belirtmişlerdir. Bu ısı aktarımının artırılması için TEJ üzerinde değişiklik yapılmasının önemli olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları tasarımda farklı motor koşullarına göre yönlendiricilerin hareket etmesi TEM'lerin yüzeyine gelen ısı dağılımlarının daha iyi olacağını belirtmişlerdir.

Erdoğan ve ark. (2021) bir dizel motorun egzoz hattında ısı eşanjörü ve TEM'leri kullanarak elektrik üretiminin verimliliğini incelemiştir. Aynı zamanda yüzey sıcaklık değişimini anlamak maksadıyla egzoz hattı için tasarlanan ısı eşanjörünün farklı modellerini HAD yaklaşımı kullanılarak araştırmışlardır. Motor devri ve giriş akışkan sıcaklığı arttıkça elde edilen güç değerinin arttığı, yani benzer bir eğilim gösterdiğini saptamışlardır. Akışkanı yüzeye doğru yönlendiren farklı egzoz geometrileri tasarlanarak daha fazla güç artışı elde edilebileceğini gözlemlemiştir.

Ramírez ve ark. (2019) araçta kullanılan yakıtın farklı kimyasal yapıya sahip olmasının öncelikli emisyon değerlerindeki farklılığa ve sonrasında TEJ'de TEM'lerin verimlerine etkisini ele almıştır. Dizel karışımlarında biyodizel payının artırılması, NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırmasına rağmen, dizel kullanımına kıyasla hava kaynaklı emisyonları azaltır. B10 kullanımı, NO<sub>x</sub> emisyonlarını %23'e kadar artırmasına rağmen, dizele kıyasla %25 daha düşük CO, CO<sub>2</sub>, NO, HC emisyonlarının oluştuğunu saptamışlardır. Ayrıca biyodizelin egzoz gazlarının sıcaklığını artırdığını saptamışlardır. B5 ve B10 kullanımının dizel kullanımına göre TEJ'de %12 ve %23 daha yüksek güç çıkışı değerlerine neden olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak, dizel kullanıldığında TEJ %2,42'ye kadar geri kazanım verimliliğine sahipken, B5 kullanıldığında %2,65 ve B10 kullanıldığında %3 olduğunu gözlemlemiştir.

Aybek yaptığı çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak TEM'lerde güç çıkışlarına etki eden faktörleri araştırmıştır. Termoelektrik malzemelerin ayak kesit alanıyla güç çıkışının doğru orantılı olduğunu belirtmiştir. Tasarladığı ısı eşanjöründe silindirik ve dikdörtgen kanatlar kullanmıştır. Kanatsız yaptığı tasarımın veriminin en düşük olduğunu belirtmiştir. Isı borularının üzerinde kanatlar kullanarak verimi artırmıştır. Aybek bu çalışmada farklı olarak TEM'in soğuk yüzeyinden havayı farklı hızlarda geçirmiştir. Soğuk havanın hızının artmasıyla üretilen gücün de arttığını saptamıştır (Aybek, 2019).

Genel olarak yapılan çalışmalarda, içten yanmalı motorların sıcak egzoz gazından faydalanmak üzere farklı yapılarda TEJ'ler tasarlanmıştır. Tasarlanan bu TEJ'ler üzerine TEM'lerin montajıyla elektrik enerjisi elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda TEM'in sıcak yüzeyine egzoz gazı sıcaklığının optimum şekilde etki etmesi öncelik haline gelmiştir. Burada egzoz gazının sıcaklığını optimum şekilde yüzeye homojen olarak dağılması için çalışmalarda TEJ'ler üzerinde kanatlı yapılar tasarlanmıştır. Kanatçıkların yapısı ve sayısının TEM üzerinde etkileri incelenmiştir. Literatürde geniş olarak bu kısımlar üzerinde durulmuş fakat TEM'in soğuk yüzeyi ve bu yüzeyin soğutulma biçimi ve yöntemi üzerinde fazla durulmadığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı TEJ'in üzerine elektrik üretimi için montajı yapılan TEM'lerin yüzeyleri arasında yüksek bir sıcaklık farkı elde etmeye çalışmaktır. Bu bağlamda içten yanmalı motorun egzoz atık ısısından faydalanılarak elektrik enerjisi üretiminin gerçekleştirildiği bir dörtgen alüminyum TEJ'de HAD yöntemi kullanılarak sayısal analiz yapılmıştır. Bu tasarım üzerinde montajı yapılan TEM'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını artırmak amacıyla TEM'in soğuk yüzeyini soğutmak için su akımı sağlanmıştır. TEM'lerin yüzey sıcaklıkları belirlendikten sonra analizi gerçekleştirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada kullanılan değerler Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından kurulan tek silindri buji ateşlemeli motora sahip deney düzeneğinden alınmıştır. Gürbüz yaptığı deneysel çalışmada motoru 3 farklı devirde çalıştırmış ve 6 farklı noktadan sıcaklık verilerini kayıt etmiştir. Aşağıda Tablo 1’de kullanılan deney motorunun özellikleri verilmiştir.

**Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri (Gürbüz ve Akçay, 2015)**

Motor tipi	Tek silindri, 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	476,5 cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma oranı	8:1

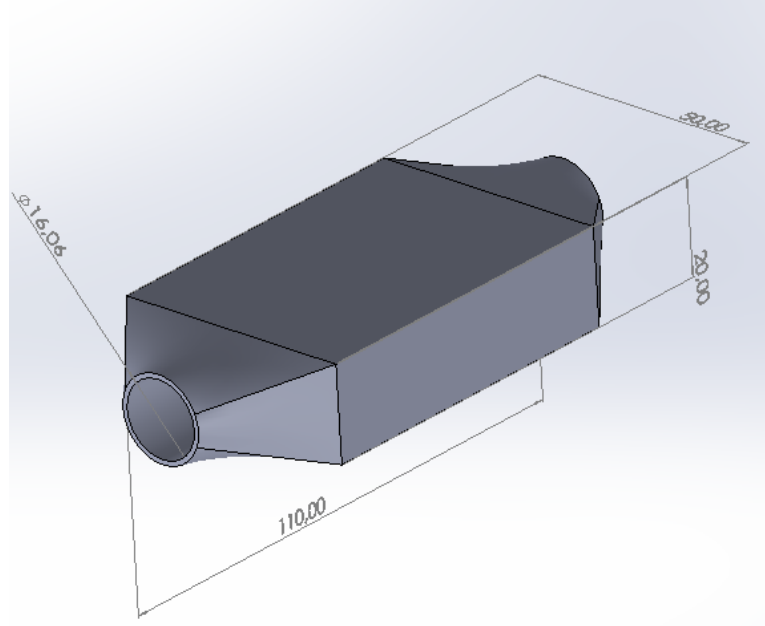
Aşağıda Tablo 2’de Gürbüz’ün yaptığı deneyin sonuçları verilmiştir.

**Tablo 2. 1800 d/dk’da ki deneysel çalışma sonuçları (Gürbüz ve Akçay, 2015)**

Parametre	Değerler
Giriş Sıcaklığı (K)	688
Giriş Hızı (m/s)	20
Egzoz debisi (kg/s)	0,00227

### 2.2. Termoelektrik Jeneratör Modeli ve Boyutlandırılması

TEJ tasarımı SolidWorks programında yapılmıştır. Model 110x50x20 mm boyutlarında 3 mm et kalınlığına sahiptir. Egzoz gazı giriş ve çıkış çapı 16 mm’dir. Şekil 2’de TEJ’in geometrik yapısı gösterilmiştir.



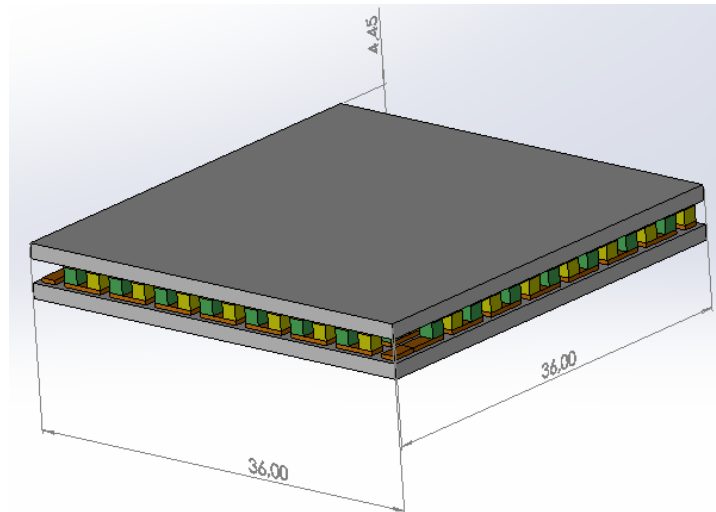
**Şekil 2:**  
Tasarlanan TEJ'in geometrik yapısı ve ölçüleri

Aşağıdaki Tablo 3'de TEJ'in malzeme özellikleri verilmiştir.

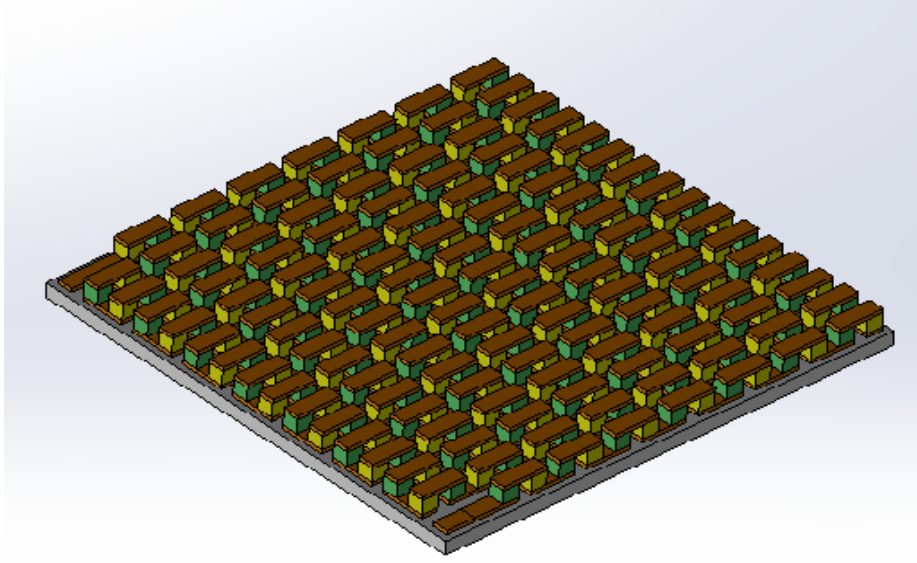
**Tablo 3. Alüminyum malzeme özellikleri (ANSYS Malzeme Kataloğu )**

Özellikler	Alüminyum
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	2719
Özgül ısı ( $\text{J/kgK}$ )	871
Termal iletkenlik ( $\text{W/mK}$ )	202,4

TEM tasarımı SolidWorks programında Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterildiği gibi yapılmıştır. Model 36x36x4,45 mm boyutlarındadır.



**Şekil 3:**  
TEM



**Şekil 4:**  
TEM'in p-n çift görünümü

TEM malzeme boyutları aşağıdaki Tablo 4'de belirtilmiştir.

**Tablo 4. TEM parça boyutları**

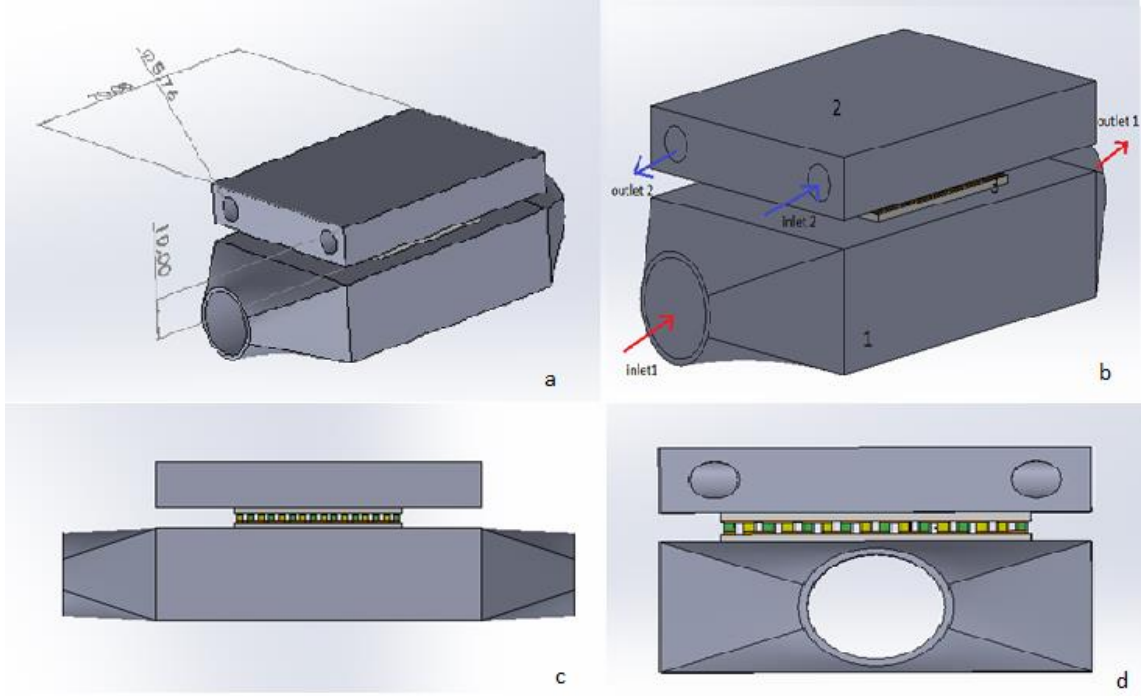
Parça	Boyutlar
Seramik Blok	36 x 36 x 1,25 mm
P ve N yarı iletken parçaları	1,25 x 1,25 x 1,25 mm
Bakır parça	3,5 x 1,25 x 0,35 mm

TEM malzeme özellikleri aşağıdaki Tablo 5'de verilmiştir.

**Tablo 5. TEM parçalarının malzeme özellikleri (Gürcan, 2019)**

Malzeme	Seramik Plaka	Bakır Plaka	P – tipi T.E ayak	N – tipi T.E ayak
Termal İletkenlik (W/mK)	22	401	1,373	1,456
Özgül Isı Kapasitesi ( J/kgK)	850	381	188	188
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	3600	8978	6600	6600
İzotropik direnç (Ω·m)	-	$1,694 * 10^{-8}$	$1,024 * 10^{-5}$	$1,024 * 10^{-5}$
Seebeck katsayısı (V/K)	-	-	$162,8 * 10^{-6}$	$-162,8 * 10^{-6}$

TEM'in soğutulması amacıyla 50x70x10 mm boyutunda soğutma eşanjörü tasarlanmıştır. Soğutucu akışkan 5,76 mm çaplı kanaldan geçmektedir. Aşağıdaki Şekil 5a'da soğutma eşanjörü gösterilmiştir.



**Şekil 5:**

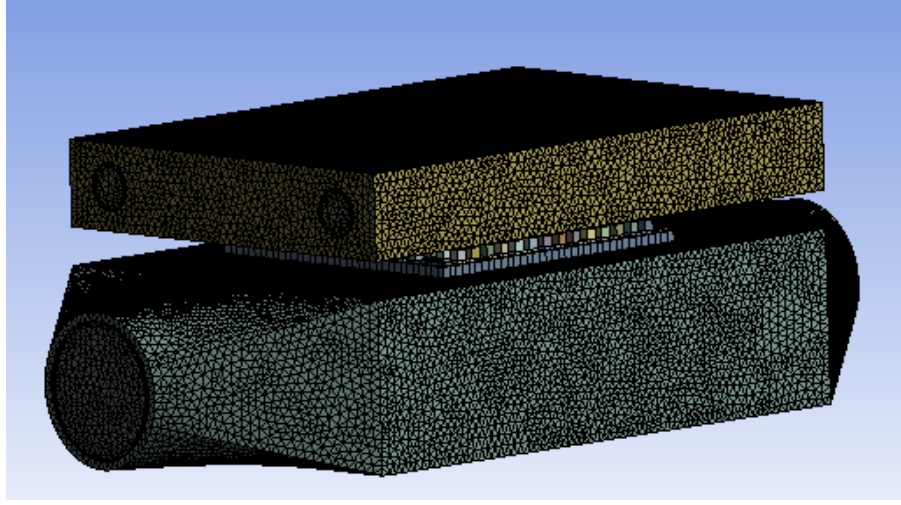
a) Soğutma eşanjörü b) TEJ giriş ve çıkış koşulları c) TEJ üzerine TEM montajı yandan görünüm d) TEJ üzerine TEM montajı önden görünüm

Yukarıda Şekil 2 ve Şekil 3'de TEJ'in ve TEM'in genel boyutları belirtilmişti. TEJ üzerine TEM'in montajı yukarıda Şekil 5c ve Şekil 5d'de görüldüğü gibidir.

TEJ'de egzoz gazının ve soğutma suyunun geçtiği akış hacimleri ANSYS programı üzerinde oluşturulmuştur. Egzoz gazlarının girişi Şekil 5b'de görüldüğü üzere (inlet1), çıkışı (outlet1), soğutma suyunun girişi (inlet2) ve soğutma suyunun çıkışı (outlet2) gösterilmiştir. Şekil 5b'de 1 numaralı yapı TEJ'i, 2 numaralı yapı soğutma eşanjörünü ve 3 numaralı yapı ise TEM'i göstermektedir.

Aşağıdaki Şekil 6'da TEJ'in mesh yapısı gösterilmiştir. Akışkanın duvarlardaki hız gradyenlerini yakalayabilmesi için Inflation yöntemi kullanılmıştır. Atılan meshin kalitesiyle ilgili bilgiye sahip olmak için Skewness ve Orthogonal Quality değerlerine bakabiliriz. Skewness değeri max 0,84 ve ortalama 0,24'tür. Bu değer max 0,95 ten az olması gerekmektedir. 0 a yaklaştıkça meshin kalitesi artmaktadır. Orthogonal Quality 1 değerine yaklaştıkça meshin kalitesi artmaktadır. Ortalama Orthogonal Quality değeri 0,76 değerindedir. TEJ'in düğüm sayısı 214414 ve eleman sayısı 790904'tür.





**Şekil 6:**  
TEJ mesh yapısı

Yapılan bu çalışmada analizler zamandan bağımsız (Steady State) yapılmıştır. Velocity formulation (hız formülasyonu) herhangi bir bağıl hız durumu söz konusu olmadığından dolayı absolute (kesin) olarak seçilmiştir. Pressure-Based (basınç tabanlı) çözümlere seçilerek basınç bazlı Navier-Stokes çözüm algoritması etkinleştirilmiştir. Enerji denklemlerini aktifleştirmek modellerde kullanılan enerji ya da ısı transferi ile ilgili parametrelerin ayarlanmasına olanak sağlamaktadır. Akış laminar olmadığı için k-ε türbülans modeli uygulanmıştır. Aşağıdaki Tablo 6'da egzoz gazının, Tablo 7'de ise soğutma suyunun özellikleri belirtilmiştir. Bu değerler programa tanımlanmıştır.

**Tablo 6. Egzoz gazı özellikleri (Ökmen, 2020)**

Özellikler	Egzoz gazı
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	0,554
Özgül ısı (J/kgK)	1063
Termal iletkenlik (W/mK)	0,049375
Viskozite (kg/ms)	3,22x10 <sup>-5</sup>

**Tablo 7. Soğutma suyu özellikleri (ANSYS Malzeme Kataloğu)**

Özellikler	Soğutma suyu
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	998,2
Özgül ısı (J/kgK)	4182
Termal iletkenlik (W/mK)	0,6
Viskozite (kg/ms)	0,001003

Sınır koşullarında egzoz gazı giriş sıcaklığı 688 K olarak girilmiştir. Egzoz gazı hızı 20 m/s olarak girilmiştir. Egzoz gazı çıkış koşulu pressure outlet olarak tanımlanmıştır. Soğutucu akışkan giriş sıcaklığı 283 K olarak girilmiştir. Soğutucu akışkan giriş hızı 0,5 m/s olarak tanımlanmıştır.

Soğutucu akışkan çıkış koşulu pressure outlet olarak tanımlanmıştır. Çözüm metotlarından Simple Scheme seçilmiştir. Hybrid Initialization yapılmıştır.

Akışkanlar mekaniğinde ısı ve kütle transfer sürecini tanımlamak için çok mertebeden diferansiyel denklemlerin matematiksel yöntemleri kullanılır. N-S denklemleri (Navier-Stokes denklemleri) akış sürecindeki viskoz akışkanların temel mekanik yasalarını yansıtabilir ve viskoz sıkıştırılmaz akışkanların momentumunun korunumunu açıklar. Newtonian viskoz akışkanlar için, fiziksel korunum ilkesine dayanan kütle, momentum ve enerji kontrol denklemleri:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Bir akışkan parçasının birim hacminin x, y ve z yönlerindeki momentum artış hızı sırasıyla  $\rho \frac{D_u}{D_t}$ ,  $\rho \frac{D_v}{D_t}$ ,  $\rho \frac{D_w}{D_t}$  terimleri ile ifade edilir.

Momentum denkleminin x bileşeni:

$$\rho \frac{D_u}{D_t} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2)$$

Momentum denkleminin y bileşeni:

$$\rho \frac{D_v}{D_t} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (3)$$

Momentum denkleminin z bileşeni:

$$\rho \frac{D_w}{D_t} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (4)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = -\nabla \cdot q + W_v + E_k + Q_v + \Phi + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5)$$

Burada  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) akışkan yoğunluğunu,  $t$  (sn) zamanı,  $p$  (Pa) basıncı,  $u$  (m/s) hız vektörünü,  $e$  ( $\text{kJ/kg}$ ) akışkanın iç enerjisini,  $q$  ( $\text{W/m}^2$ ) ısı akışı vektörünü,  $W_v$  (J) viskoz kuvvetlerin yaptığı işi,  $E_k$  (J) kinetik enerjiyi,  $\Phi$  (J) viskoz stresler tarafından üretilen ısıyı ve  $Q_v$  (J) kimyasal enerji salınımı veya radyasyonun neden olduğu ısı artışıdır.

Pratik mühendislik uygulamalarında, zamandan ve emekten tasarruf etmek için, akışı tahmin etmek için genellikle ampirik tabanlı bir türbülans modeli tanıtılır. Egzoz gazı akışının türbülanslı olduğu düşünüldüğünde, akışı modellemek için Launder ve Spalding tarafından önerildiğinden beri pratik mühendislik akış hesaplamalarının beygir gücü haline gelen bir  $k-\epsilon$  türbülans modeli benimsenmiştir. Kararlı durumda sıkıştırılmaz akışkanlar için  $k-\epsilon$  modelinin taşıma denklemleri:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (7)$$

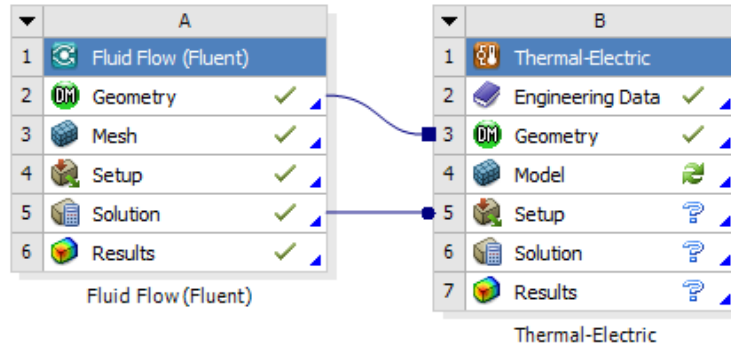
Türbülanslı viskozite:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

$u_i$  ve  $u_j$  (m/s) hız bileşenleridir,  $\mu$  (kg/ms) dinamik viskozite,  $\mu_t$  türbülans eddy viskozitesi,  $k$  (J) türbülans kinetik enerjisi,  $\varepsilon$  türbülans enerji dağılım oranı,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ .

$k$ - $\varepsilon$  modelinde standart tercih edilmiştir. Çünkü standart, endüstriyelden çevresel akışlara kadar çeşitli uygulamalara sahip en yaygın kullanılan ve onaylanan türbülans modelidir.

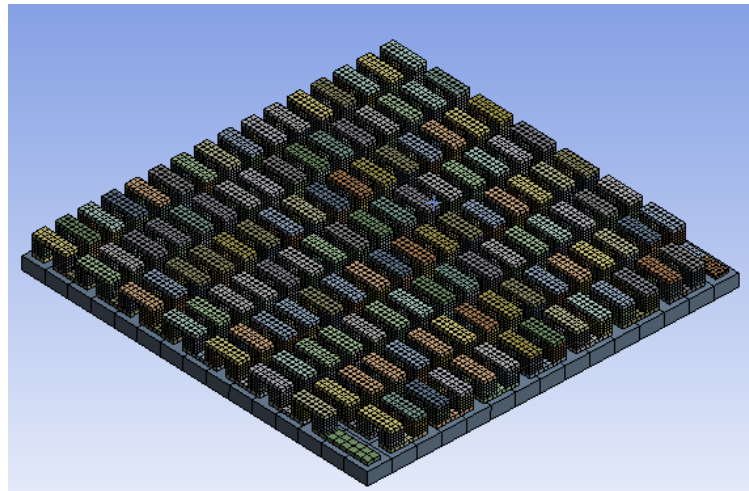
TEM analizine geçmek için Fluent ile Thermal-Electric sistemlerinin birleştirilmesi gerekmektedir. Aşağıdaki Şekil 7'de Ansys workbench analiz birleştirme görüntüsü gösterilmiştir.



**Şekil 7:**

*Ansys workbench analiz birleştirme görüntüsü*

Engineering Data kısmına yukarıda Tablo 5'de bahsedilen malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Aşağıdaki Şekil 8'de TEM'in mesh yapısı gösterilmiştir. Atılan bu meshin Skewness değeri  $1,30 \times 10^{-10}$  ve Orthogonal Quality değeri 1'dir. TEM'in düğüm sayısı 251486 ve eleman sayısı 38070'dir.

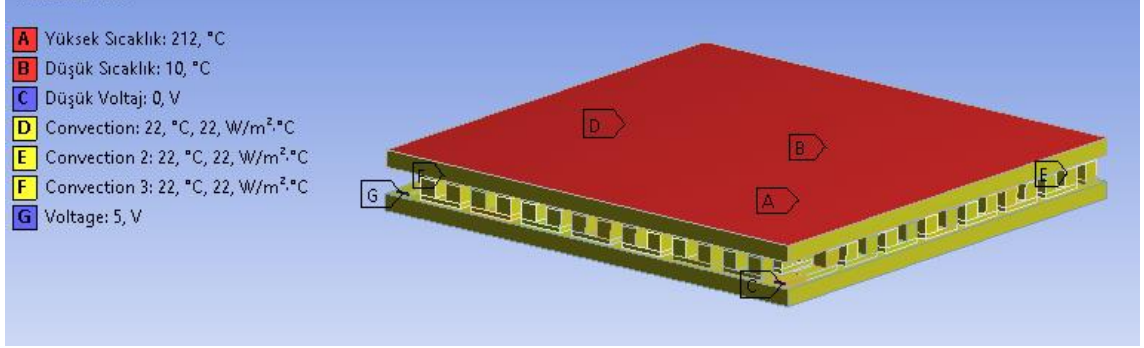


**Şekil 8:**

*TEM'in mesh yapısı*

TEM'in yüzeylerine gelen sıcaklıklar tam olarak homojen dağılmamaktadır. Aşağıdaki Şekil 9'da gösterildiği üzere modülün yüzey sıcaklıkları, Fluent kısmında elde edilen sıcaklık değerlerinin ortalamaları alınarak sanki sıcaklık homojen dağılmış gibi kabul edilmiştir. Bu

şekilde akış analizinden alınan sıcaklık değerleri sınır şartı olarak girilmiştir. Aşağıdaki Şekil 9’da sınır koşulları gösterilmiştir.



**Şekil 9:**  
TEM'in sınır koşulları

Sınır koşulları girildikten sonra çözüm yapılmıştır.  
Termoelektrik analizde ısı akışı;

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = \dot{q} \quad (9)$$

Elektrik yükünün sürekliliği;

$$\nabla \left( \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial t} + J \right) = 0 \quad (10)$$

Termoelektrik süreklilik denklemi ile birleştirilirse;

$$\vec{q} = [\Pi]J - [\lambda]\nabla T \quad (11)$$

$$\vec{J} = [\sigma](E - [a] \cdot \nabla T) \quad (12)$$

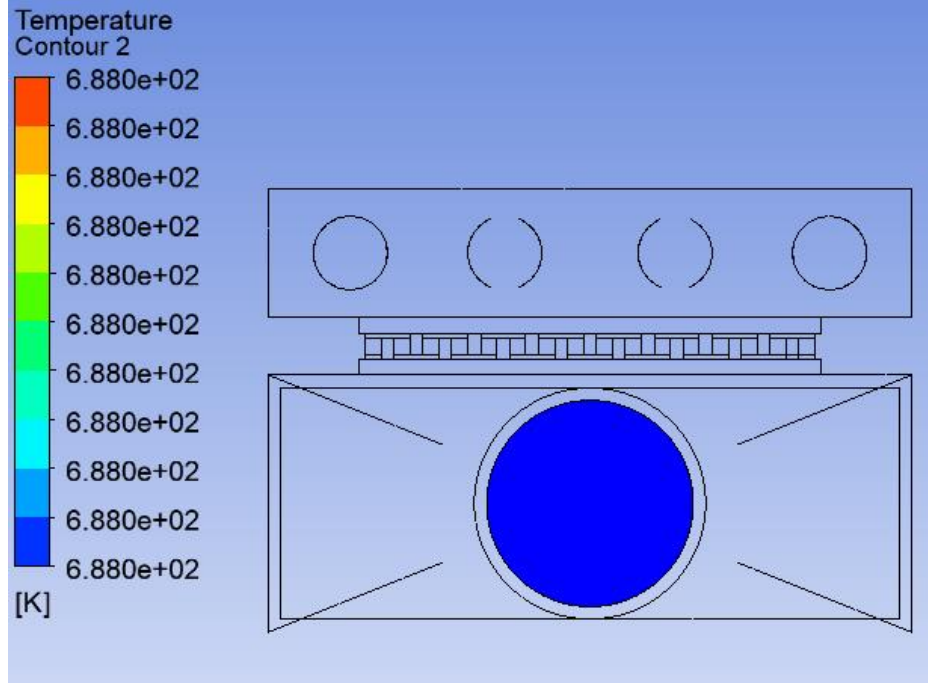
$$\vec{D} = [\varepsilon]E \quad (13)$$

Elde edilir.

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan birimler; T (K) cinsinden mutlak sıcaklıktır,  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) yoğunluktur, özgül ısı kapasitesi C ( $\text{J/kgK}$ )’dir, birim hacimdeki ısı üretimi  $\dot{q}$  ( $\text{J/m}^3$ )’dur, ısı akısı vektörü  $\vec{q}$  ( $\text{W/m}^2$ )’dur, elektriksel akım yoğunluğu vektörü J ( $\text{A/m}^2$ )’dir, elektrik alan yoğunluğu vektörü (V/m) cinsinden E’dir, elektriksel akı yoğunluğu vektörü  $\vec{D}$ ’dir, termal iletkenlik matrisi  $\lambda$  ( $\text{W/mK}$ ), elektriksel iletkenlik matrisi  $\sigma$  (S), Seebeck katsayısı a (V/K) ve dielektrik geçirgenlik matrisi  $[\varepsilon]$ ’dir (Antonova ve Looman).

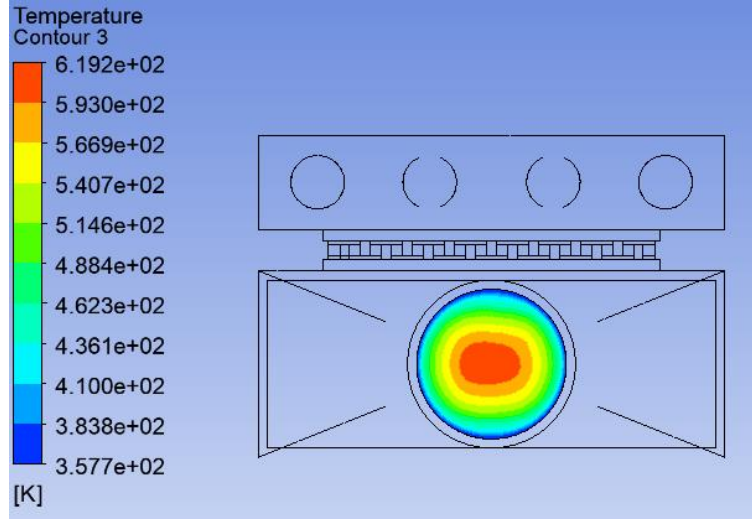
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Analizler ANSYS Fluent 19.2 programında 4 çekirdekli bilgisayarda yapılmıştır. Deneysel olarak belirlenen egzoz gazının TEJ'e giriş sıcaklığı 688K olarak belirlenmiştir. Analizi yapılan eşanjörün egzoz gazının giriş sıcaklığı dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir.



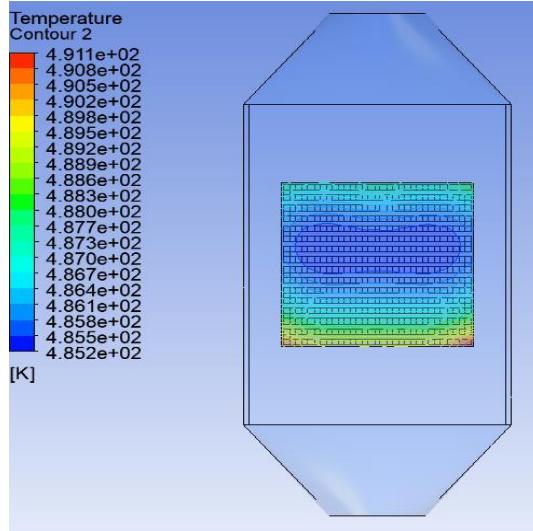
**Şekil 10:**  
*Egzoz gazı giriş sıcaklığı*

(Gürbüz ve Akçay, 2015) Gürbüz ve Akçay'ın yaptıkları deneysel çalışmada egzoz gazı çıkış sıcaklığını K tipi termokupullar yardımıyla ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışmada çıkış sıcaklığını ortalama 524K olarak saptamışlardır. Analizi yapılan eşanjörün egzoz gazı çıkış sıcaklık dağılımı aşağıdaki Şekil 11'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Deneysel çalışma ile analizi yapılan eşanjörün çıktılarının yakın olduğu gözlemlenmiştir.



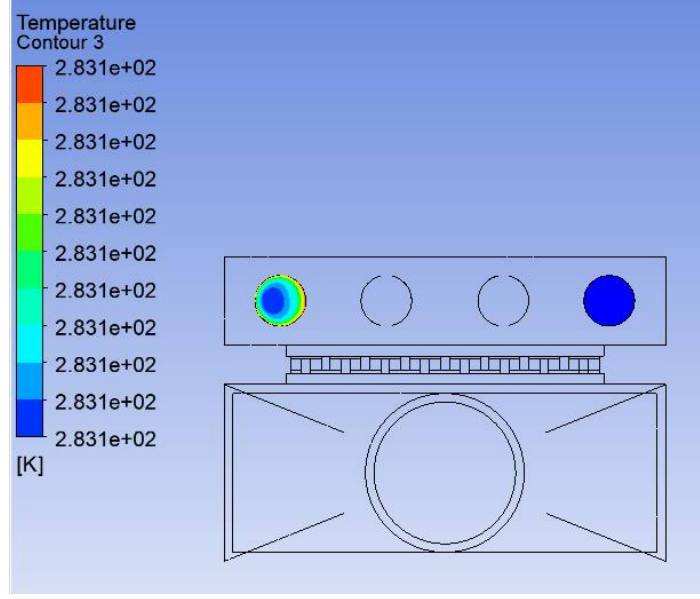
**Şekil 11:**  
Egzoz gazı çıkış sıcaklığı dağılımı

Sıcak egzoz gazının eşanjörden geçişiyle birlikte eşanjörün üzerine montajı yapılan TEM'in eşanjör ile temas halinde olan yüzeyi ısınmıştır. Bu yüzeyde analizde de görüldüğü üzere homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilememiştir. Homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanabilmesi için egzoz gazının TEM ile eşanjörün temas ettiği yüzeye yönlendirilmesi uygun olacaktır. TEM üzerinde yüksek ve homojen bir sıcaklık dağılımı için Ökmen, A. B. (2020) yaptığı çalışmada 30° açılı altı giriş kanatlı seri plaka tipi bir eşanjör tasarlamıştır. TEM'in sıcak yüzeyinin sıcaklık dağılımı aşağıdaki Şekil 12'de gösterilmiştir. TEM'in yüzeyinin büyük oranla 485K sıcaklıkta olduğu görülmekte ve ileriki TEM analizinde bu sıcaklık değeri kullanılmaktadır.



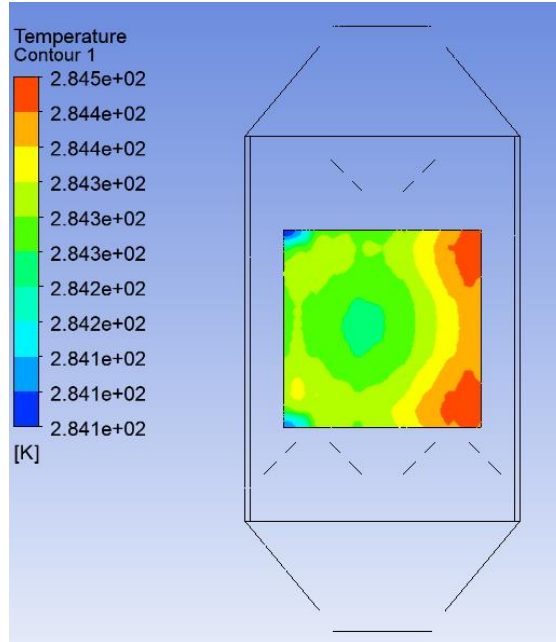
**Şekil 12:**  
TEM'in sıcak yüzeyinin sıcaklık dağılımı

Analizleri yapılan TEJ'in soğutucu akışkanın giriş sıcaklığı ve çıkış sıcaklık dağılımları aşağıdaki Şekil 13'de gösterilmiştir. Soğutucu akışkanın burada giriş ve çıkış sıcaklıklarında bir değişim olmadığı belirlenmiştir.



**Şekil 13:**  
*Soğutucu akışkanın giriş ve çıkış sıcaklığı dağılımı*

TEM'in soğuk yüzeyinin sıcaklık dağılımı aşağıdaki Şekil 14'de gösterilmiştir. Burada soğutucu akışkanın geçtiği soğutma eşanjörünün tasarımı ve soğutucu akışkanın TEM'in soğuk yüzeyinin her yerine temasıyla birlikte homojen bir sıcaklık dağılımı yakalandığı gözlemlenmektedir.

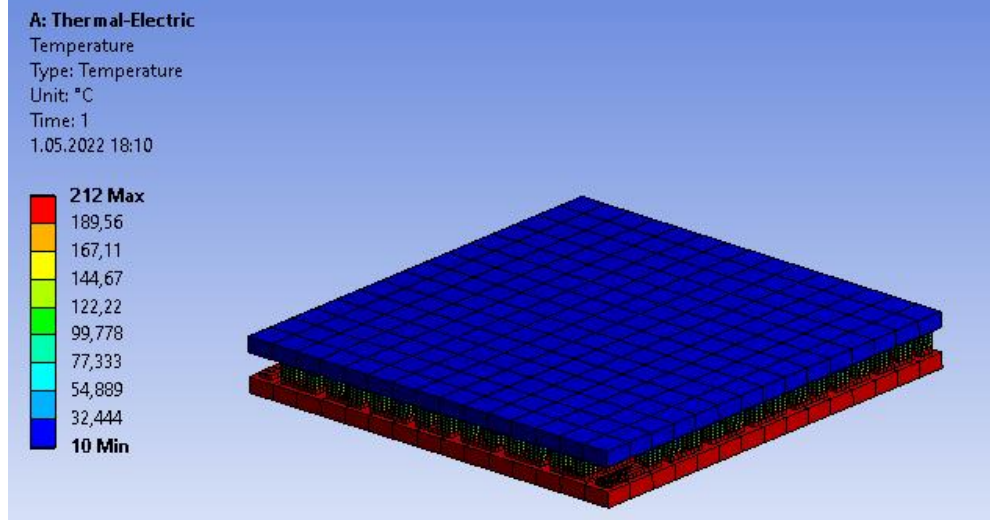


**Şekil 14:**  
*TEM'in soğuk yüzeyinin sıcaklık dağılımı*

Analizlerde elde edilen yüzey sıcaklıkları TEM'in giriş koşullarında kullanılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

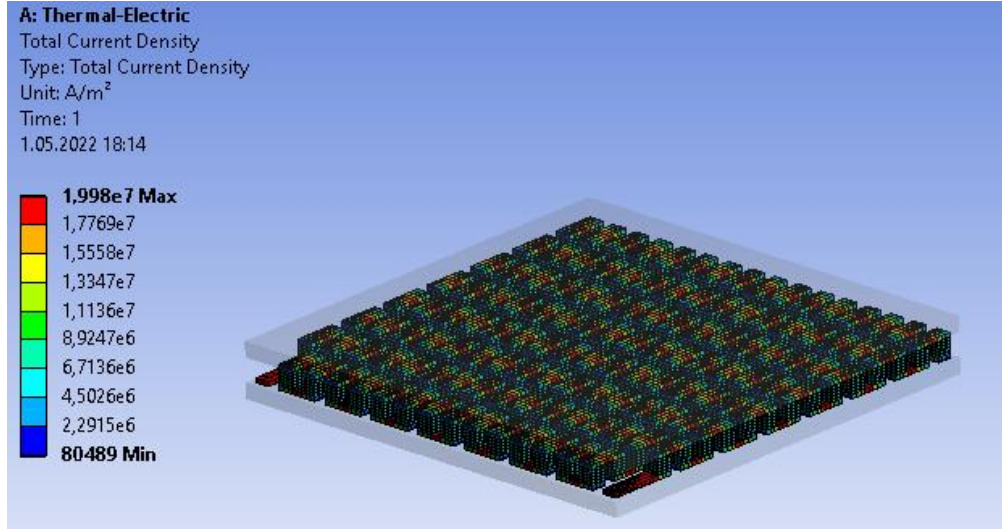
Aşağıdaki Şekil 15'de TEM'in sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Ortalama sıcaklık değeri 114°C, maksimum sıcaklık değeri 212°C ve minimum sıcaklık değeri 10°C olarak TEM'in seramik parçalarında olduğu belirlenmiştir.

Temizer ve İlkılıç (2017) yaptıkları eşanjör tasarımında TEM'in soğuk yüzeyini su ile soğutmak istemişlerdir. 3500 rpm motor devrinde 100 Nm motor yükünde soğutma suyunu 60°C de göndermişlerdir. TEM'in sıcak yüzeyine ise 258°C sıcaklık elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada TEJ üzerine 40 adet TEM yerleştirmişler ve TEM'in soğuk yüzeylerinde homojen dağılım elde edilmemiş ve 100°C yüzey sıcaklığı görülmüş olup, 156,7 W bir güç elde etmişlerdir.



**Şekil 15:**  
*TEM'in sıcaklık dağılımı*

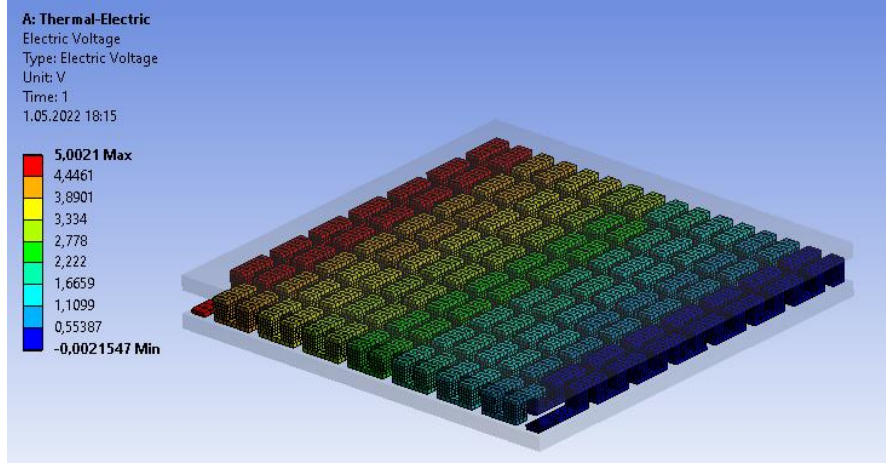
Aşağıdaki Şekil 16'da TEM'in akım yoğunluğu gösterilmiştir. Maksimum akım yoğunluğunun TEM'in bakır ucunda gerçekleştiği belirlenmiştir.



**Şekil 16:**  
*TEM'in akım yoğunluğu dağılımı*

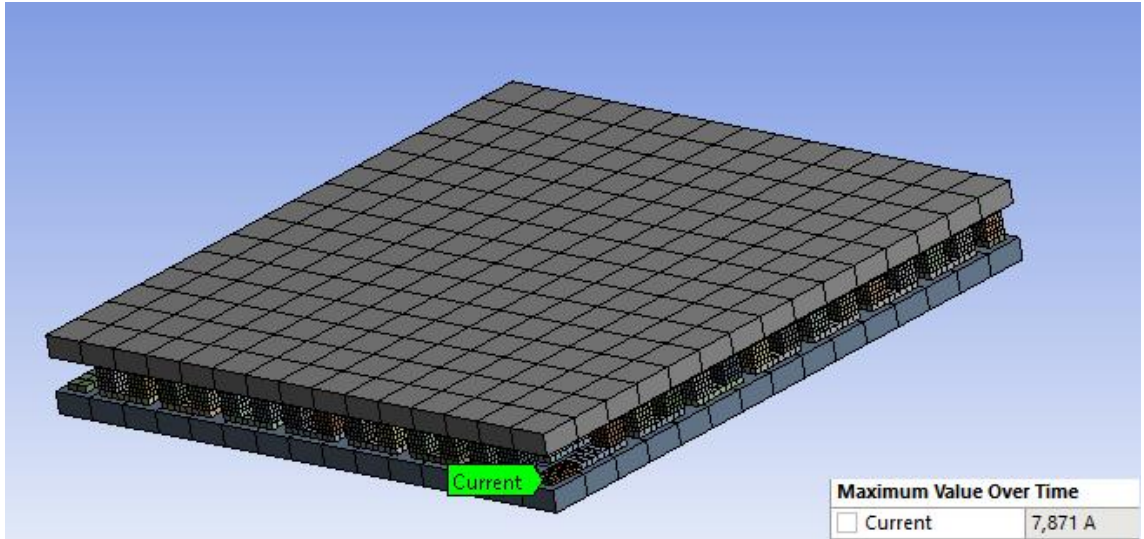
Aşağıdaki Şekil 17'de TEM'in uçları arasındaki voltaj dağılımı gösterilmiştir.





**Şekil 17:**  
*TEM'in voltaj dağılımı*

Akım değeri aşağıdaki Şekil 18'de belirtildiği üzere bakır levhanın uç kısımdan 7,871 A olarak ölçülmüştür.



**Şekil 18:**  
*TEM akım değeri*

Üretilen güç, gerilim ve akım değerlerinin çarpılmasıyla bulunmaktadır. Böylelikle güç değeri 39,35 W olarak bulunmuştur.

#### 4. SONUÇ

Çalışmada, buji ateşlemeli bir motorun 1800 devrinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen egzoz gazının sıcaklık değerleri kullanılarak ana boyutları belirlenen TEJ'in Solidworks programında 3 boyutlu modellenmesi gerçekleştirilmiştir. ANSYS Fluent programında ise sayısal olarak analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yakıtın kimyasal enerjisinin büyük bir bölümünün atmosfere atıldığı tespit edilmiştir. TEM'in soğuk yüzeyinin sıcaklığı azaldıkça elde edilen gücün arttığı belirlenmiştir. Bilindiği üzere TEM'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı arttıkça elde edilecek güç artmaktadır. TEM'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını artırmak için modülün soğuk yüzeyini atmosfere açık olarak düşünmek

yerine soğuk su eşanjörü tasarımı yapılmıştır. Yapılan bu tasarımda TEM'in yüzeyini homojen bir şekilde soğutmak için eşanjör üzerinde kanal açılmış ve suyun dolaşımı sağlanmıştır. Tasarlanan TEJ ile TEM'in analizleri belirlenen koşullarda gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen HAD analizi sonucu TEM'in sıcak yüzeyinin homojen bir sıcaklık dağılımına sahip olmadığı fakat ortalama olarak 212°C sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir. Soğuk yüzeyinin homojen bir sıcaklık dağılımına sahip olduğu ve 10°C olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca TEM'in ısı-elektriksel analizi, HAD analizi sonucu elde edilen değerler çerçevesinde yapılmıştır. Isı-elektriksel analiz sonucu akım yoğunluğunun TEM'in bakır ucunda olduğu belirlenmiştir. Akım değeri ise 7,871 A tespit edilmiştir. Bu koşullar altında çalışacak olan TEM'den 39,35 W güç eldesi sağlanmıştır.

## 5. ÖNERİLER

İleriki çalışmalarda farklı motor çalışma koşullarında, egzoz gazı sıcaklıklarındaki değişimin TEM'in yüzeyindeki sıcaklık dağılımına etkisi araştırılabilir. Egzoz gazının giriş hızındaki değişimin aynı şekilde TEM'in yüzeyindeki sıcaklık dağılıma etkisi belirlenebilir.

Egzoz gazlarının geçtiği TEJ üzerinde yapılacak çeşitli tasarımlar ile modül yüzeyindeki sıcaklığa etkisi araştırılabilir.

TEM'in yüzeyinin soğutulması için farklı tasarımlar ve farklı soğutucu akışkanlar kullanılarak TEM'den elde edilen güç değerleri karşılaştırılabilir. Herhangi bir soğutma işlemi yapılmadan elde edilecek değerler soğutmanın etkisini saptamak amacıyla gerçekleştirilebilir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## YAZAR KATKISI

Burak Seyyar, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulmasında görev almıştır. İsmet Tıkız, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesi ile son onay ve tam sorumluluk kısımlarına katkı sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

1. ANSYS 19.2 (2018) Fluent Database Materials Properties.
2. Antonova, E.E ve Looman, C.D. (2005) Finite elements for thermoelectric device analysis in ansys, *24th International conference on thermoelectrics*, Clemson, SC, USA. doi:10.1109/ICT.2005.1519922
3. Aybek, Ş.A. (2019). Motorlu taşıtlar için egzoz sistemine uygun termoelektrik jeneratör geliştirilmesi ve deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
4. Bolatlı, G. (2019). Termoelektrik modül ile atık ısıdan elektrik üreten bir sistem uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, S.U.B.Ü. Teknoloji Fakültesi, Sakarya.
5. Brown, K. E., Henze, D. K., Milford, J. B. (2017) How accounting for climate and health impacts of emissions could change the US energy system, *Energy Policy*, 102, 396-405. doi:10.1016/j.enpol.2016.12.052

6. Demir, M.E and Dincer, İ. (2017) Development and heat transfer analysis of a new heat recovery system with thermoelectric generator, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 2002-2010. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.102
7. Doğdu, M.F. (2013). Termoelektrik soğutucuların performansına doğrudan temaslı ısı değiştiricilerin etkilerinin deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Enerji Enstitüsü, İstanbul.
8. Erdogan, B., Duran, K., Zengin,İ. (2021) Experimental and numerical analysis of using thermoelectric generator modules on hexagonal exhaust heat exchanger, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 11(1),54-60. doi:10.7212/karaelmasfen.803741.
9. Gequn Shu, Xiaonan Ma, Hua Tian, Haoqi Yang, Tianyu Chen, Xiaoya Li. (2018) Configuration optimization of the segmented modules in an exhaust-based thermoelectric generator for engine waste heat recovery, *Energy*, 160, 612-624 doi:10.1016/j.energy.2018.06.175
10. Gürcan, A. (2019). Farklı boyutlarda termoelektrik jeneratörler kullanılarak egzoz ısı enerjisinin geri kazanımı. *Yüksek Lisans Tezi*, P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale.
11. Gürbüz, H. and 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. doi:10.2298/TSI150417181G.
12. Ivankovic, R., Cros, J., Kakhki, M. T., Martins, C. A., & Viarouge, P. (2012). Power electronic solutions to improve the performance of Lundell automotive alternators, *New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering*, 6, 169-190. doi:10.5772/48459
13. Niu, Z., Diao, H., Yu, S., Jiao, K., Du, Q., Shu, G. (2014) Investigation and design optimization of exhaust-based thermoelectric generator system for internal combustion engine, *Energy Conversion and Management*, 85,85-101. doi:10.1016/j.enconman.2014.05.061
14. Ökmen, A. B. (2020). İçten yanmalı motorun egzoz atık ısı geri kazanımı için termoelektrik jeneratörün had analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
15. Ramírez, R. Gutierrez, A. S. Eras, J.J.C. Valencia,K. (2019) Evaluation of the energy recovery potential of thermoelectric generators in diesel engines, *Journal of Cleaner Production*, 241, 118412. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118412
16. Şahin, U.R., Coşkun, G., Soyhan, H.S. (2018) Traktör egzozundan atılan ısı enerjisinin elektrik enerjisi olarak kazanımı sağlayan termoelektrik jeneratör, *Uluslararası Yakıtlar, Yanma ve Yangın Dergisi*, 6, 10-19
17. Temizer, İ. ve İlkılıç, C. (2017) Electrical energy production by using waste exhaust energy of internal combustion diesel engines, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 330-336. doi:10.5505/pajes.2016.64935
18. Temizer, İ., İlkılıç, C., Öner, C. (2016) Dizel motor egzoz sistemi için termoelektrik jeneratör uygulaması ve akış analizi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 431-445. doi:10.5578/fmbd.25301
19. Temizer, İ., Yüksel, T., Can, İ. (2017) Benzinli bir motorda egzoz gazı ısı enerjisinden termoelektrik jeneratörü ile elektrik enerjisi üretimi, *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(3), 116-125.

20. Yavuz, C., Özkaymak, M., Kaya, M. (2010) Termoelektrik modüllü su soğutucusunda farklı hava debilerinin sistem performansına etkileri, *Technological Applied Sciences*, 5(2), 131-143. doi:10.12739/10.12739
21. Ziółkowski, A., Fuc, P., Dobrzyński, M. (2019) Analysis of the construction of TEG thermoelectric generator using CFD tools, *AIP Conference Proceedings*, 2078, 020052. doi:10.1063/1.5092055