



Makale / Research Paper

Tipik Bir Buji Ateşlemeli Motorda Egzoz Atık Isısı Enerjisinin Geri Kazanımı İçin Geliştirilen Termoelektrik Jeneratörün HAD Analizi

Hüsameddin AKÇAY^{1a*}, Habib GÜRBÜZ^{1b}, Ümit TOPALCI^{1c}, Selim DEMİRTÜRK^{2d}

¹Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Automotive Engineering, Isparta, Turkey.

²Vocational High School of Technical Sciences, Uşak University, Uşak, Turkey

*husameddinakcay@sdu.edu.tr

Received/Geliş:21.04.2020

Accepted/Kabul: 10.06.2020

Öz: Bu çalışmada, buji ateşlemeli bir motorun egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü termoelektrik jeneratörün (TEJ) hesaplamalı akışınlar dinamiği (HAD) kullanılarak sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Biri orta egzoz eşanjörü ve orta egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine yerleştirilen iki adet soğutma suyu eşanjöründen oluşan 3 katmanlı bir TEJ tasarımı gerçekleştirilmiştir. TEJ tasarımında, 2 silindri, su soğutmalı buji ateşlemeli bir motorun egzoz gaz sıcaklık ve debi değerlerinin yanında motor soğutma suyu (MSS) sıcaklık ve debi değerleri kullanılmıştır. TEJ’de sıcak ve soğuk taraf eşanjör yüzey alanı, hedef belirlenen 300 W DC elektrik enerjisi üretimi için seçilen 50x50 mm boyutlarındaki termoelektrik modüllerden 2x12 = 24 adet yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır. Orta egzoz eşanjörüne bir seperatör plaka eklenmiştir. Seperatör plakasının her iki yüzeyine, egzoz gazı akışına direnç göstermeyecek şekilde, belirli açılarda yönlendirme kanatçıkları konumlandırılmıştır. Orta egzoz eşanjörünün girişine bir yayıcı, çıkışına ise bir lüle eklenmiştir. Soğutma suyu eşanjörü içerisinde, MSS’nun dolaşacağı labirent şeklinde kanallar oluşturulmuştur. Sonuç olarak, sıcak eşanjör iç hacmin seperatör plaka ile iki eşit parçaya bölünmesi ile sıcaklık farkı ΔT %32,45 ve seperatör plaka yüzeylerine akış yönlendirme kanatlarının eklenmesi ile de ΔT sıcaklık farkının ilave olarak %18,79 arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, referans TEJ’e göre seperatör plaka ve akış yönlendirme kanatlarının eklendiği TEJ yapısı ile sıcak-soğuk eşanjör yüzeylerinde daha homojen sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Buji ateşlemeli motor, Egzoz atık ısı enerjisi, Termoelektrik Jeneratör, HAD analizi.

CFD Analysis of Thermoelectric Generator Developed for Exhaust Waste Heat Recovery in a Typical Spark Ignition Engine

Abstract: In this study, numerical analysis of thermoelectric generator (TEJ) where exhaust waste heat energy of a spark-ignition engine conversion to electrical energy performed using computational fluid dynamics (CFD). A 3-layer TEJ design, consisting of a middle exhaust exchanger and two cooling water exchangers placed on both surfaces of the middle exhaust exchanger created. In the TEJ design, the engine cooling water (MSS) temperature and flow values used in addition to the exhaust gas temperature and flow values of the 2-cylinder, water-cooled spark ignition engine. In TEJ, the hot and cold side heat exchanger surface area designed to be placed 2x12 = 24 pieces of 50x50 mm sized thermoelectric modules selected for the target to produce 300 W DC electrical energy. A separator plate placed in the middle exhaust exchanger. Flow guiding fins at certain angles positioned on both surfaces of the separator plate as not to resistance the exhaust gas flow. A spreader added to the inlet of the middle exhaust exchanger and a nozzle at the outlet. In the cooling water heat exchanger, labyrinth channels created in which MSS can circulate. As a result, it was determined that the temperature difference (ΔT) increased by 32.45% by dividing the heat exchanger internal volume with the separating plate into two equal parts, and also the ΔT increased by 18.79% by adding flow guide vanes on the separator plate surface. Also, according to reference TEJ, a more homogeneous temperature distribution was obtained on hot-cold heat exchanger surfaces with the TEJ structure where the separator plate and flow guiding wings added.

Keywords: Spark plug ignition engine, Exhaust waste heat energy, Thermoelectric Generator, CFD analysis.

Bu makaleye atf yapmak için

Akçay, H., Gürbüz, G., Topalci, Ü., Demirtürk, S., “Tipik Bir Buji Ateşlemeli Motorda Egzoz Atık Isısı Enerjisinin Geri Kazanımı İçin Geliştirilen Termoelektrik Jeneratörün HAD Analizi” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7(3); 1088-1100.

How to cite this article

Akçay, H., Gürbüz, G., Topalci, Ü., Demirtürk, S., “HAD Analysis of Thermoelectric Generator Developed for Exhaust Waste Heat Recovery in a Typical Spark Plug Ignition Engine” El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7(3); 1088-1100.

ORCID: ^a0000-0002-5704-670X, ^b0000-0001-5157-6227, ^c0000-0001-7069-8633, ^d0000-0001-7861-2427

1. Giriş

Atık ısı geri kazanım sistemleri, hükümetler tarafından getirilen katı emisyon sınırlamaları, mevcut fosil kökenli yakıtların tükenmesi ve çevresel faktörlerin etkisiyle alternatif yakıt ve enerji sistemleri arayışının bir sonucu olarak özellikle içten yanmalı motor (İYM) araştırmacıların odağı olmuştur [1]. İYM'a alınan yakıtın yanması sonucu ortaya çıkan ısı enerjisinin yaklaşık olarak üçte biri çıkış milinde faydalı enerjiye dönüşürken geri kalan enerjinin yaklaşık üçte ikilik kısmı egzoz ve soğutma sistemleri vasıtasıyla atık ısı enerjisi olarak atmosfere atılmaktadır [2-5]. Yakıt verimliliği için yapılacak önemli iyileştirmelerle, bu atık ısı enerjisi, elektrik ve mekanik enerji gibi kullanılabilir enerji türlerine dönüştürülebilmesi mümkün olabilmektedir [6]. Atık ısı dönüşüm sistemlerinde, atık ısının sıcaklık değerinin artışı niteliğini artırmakta ve bu durum atık ısı dönüşüm sistemlerinin optimum şekilde tasarlanmasında kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle, geri kazanılabilecek olan maksimum atık ısı enerjisi miktarının tespit edilmesi ve atık ısı geri kazanım sisteminden elde edilecek maksimum verimin sağlanması oldukça önemlidir [7]. Atık ısı dönüşüm sistemleri içerisinde; egzoz turbo şarj sistemleri, rankine çevrimi ve termoelektrik jeneratörlerin (TEJ) kullanıldığı teknikler yer almaktadır. Bu teknikler kullanılarak, her bir alt sistemin verimliliği, toplam enerji dönüşüm verimliliği ve sistem tasarımına bağlı olarak İYM'un termal verimliliğinde %2 ila %20 aralığında artış elde edilebileceği tespit edilmiştir [8]. Atık ısı geri kazanım teknikleri içerisinde yer alan TEJ sistemleri, diğer uygulamalara kıyasla sessiz çalışmaları, daha küçük boyutlarda sistem tasarımı ve uzun çalışma ömrü gibi birçok avantajlara sahiptir [9]. Hareketli parçalarının olmaması ve yapısında kimyasal reaksiyonların gerçekleşmemesinden dolayı aşınma ve korozyon etkisi ortaya çıkmadığı için daha az bakıma ihtiyaç duymaları TEJ'lerin temel özellikleri arasındadır [10]. TEJ'lerde üretim verimliliğinin, rankine çevrimi ile elde edilen atık ısı geri kazanım sistemlerine kıyasla nispeten daha düşüktür [11], ancak kullanılan enerjinin atık ısı ile sağlanması ve sistem maliyetleri göz önüne alındığında, TEJ sistemleri verimlilik açısından tercih sıralamasında ikinci sırada yer almaktadır [12]. Bu kapsamda TEJ'lerin, İYM'larda egzoz ve soğutma sistemleri ile atmosfere atılan ısı enerjisinin geri kazanıldığı sistemlerde, her bir alt sistemin verimi ve toplam sistem veriminin artırılması için literatürdeki çalışmaların üzerine yoğunlaştıkları birçok etken vardır [13, 14]. Bunlar özellikle, TEJ sistemlerinde kullanılan sıcak ve soğuk yüzey eşanjör tasarımı, kullanılan termoelektrik modül (TEM) yapısı, TEM'lerin elektrik enerjisi üretim verimliliği ve üretilen elektrik enerjisinin kullanılacağı elektriksel sistemlere aktarılması veya depolanma yöntemleridir [15]. Çeşitli konfigürasyonlar kullanılarak [16] farklı çalışma koşulları [17] altındaki TEJ'lerin atık ısı geri kazanımı ve çıkış gücü değerlerinin tespiti, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak gerçekleştirilecek sayısal simülasyonlar ile analiz edilebilmektedir. HAD analizleri; akış, ısı ve kütle transferi problemlerinin sayısal olarak çözümlendiği bir yöntemdir. Bu yöntem, genellikle deneysel çalışmalarla elde edilemeyen kayma gerilmesi, hız, basınç ve sıcaklık dağılımları, akışa ait akım çizgileri gibi akış alanı hakkındaki ayrıntıları elde etmek için kullanılmaktadır [18]. TEM'ler ve ısı eşanjörleri kullanılarak tasarlanan TEJ sistemlerinde çıkış performansının tespit edilmesi için, TEJ'lerde kullanılan ısı eşanjörleri için simülasyonların gerçekleştirilmesi önemli bir olgudur. HAD kullanılarak gerçekleştirilecek sayısal simülasyonlar, yalnızca deneysel çalışma sayısını ve süresini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kurulan sistem için tahmin ve tasarımda oldukça yardımcı bilgiler sunmaktadır. HAD yöntemi ile TEJ çıkış performansını optimize etmek için sistemin parametre ayarlarını kontrol etmek mümkündür [19]. Birçok çalışma, çeşitli ısı kaynaklarına uygulanan TEJ'lerin performansını simüle etmiştir. TEJ'ler için literatürde mevcut çalışmaların birçoğu TEM'lerin ve üretim sisteminde yer alan ısı eşanjörlerinin tasarımlarının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bazı araştırmacılara göre, günümüz araçları üzerinde yer alan radyatör ve egzoz sistemlerinin TEJ'lerin kullanılması için en uygun yapı olduğu belirtilmektedir [20, 21]. Hsiao ve vd., TEJ'ler için geliştirdikleri matematiksel modeller ve deneysel çalışmalarla, TEJ'in egzoz sisteminde kullanımının radyatör sisteminde kullanılmasından daha yüksek performans sunduğunu belirtmişlerdir [22]. Rezania ve vd., mikro yapıdaki ısı değiştirici ile TEJ'ün ısı transfer karakteristiğine geometrik yapının etkisini incelemişlerdir [23]. Kepmf ve vd., sayısal analiz ile geliştirdikleri çalışmalarında, maksimum

yakıt verimliliği sağlamak için üç boyutlu bir TEJ konfigürasyonunda ısı eşanjörü tasarımının optimizasyonu üzerine yeni stratejiler geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, ısı eşanjöründe kullanılan malzemenin ısı iletkenliğinin oldukça önemli olduğunu belirtmişlerdir [24]. Kim, TEJ sisteminin çıkış performansını optimize etmek için TEM'ün Seebeck katsayısı ile ΔT sıcaklık farkı arasındaki ilişkiyi deneysel olarak incelemiştir [25]. Liu ve vd., TEJ sisteminin performansını analiz etmek için geliştirdikleri deney düzeneğinde 944 W maksimum TEJ çıkış gücü elde etmişlerdir [26]. Favarel ve vd., geliştirdikleri üç farklı TEJ tasarımının termal ve elektriksel davranışını tahmin etmek için oluşturdukları sayısal model ile TEJ'de kullanılan termoelektrik modül sayısı ve çıkış akımının, TEJ'in çıkış gücüne etkisi üzerine analizler gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca bu modeli karşılaştırmak ve doğrulamak için bir deney düzeneği oluşturmuşlardır [27]. Kunt, içten yanmalı motorlarda atık ısı geri dönüşümünün gerçekleştirildiği TEJ'lerin teknik özellikleri ve elektriksel çıkışını incelediği teorik çalışmada, TEJ'lerin içten yanmalı motorlarda egzoz ve soğutma sistemi ile kaybedilen atık ısının kullanılabilir (elektrik) enerjiye dönüştürülmesi için umut verici özelliklere sahip olduğunu bildirmiştir [28].

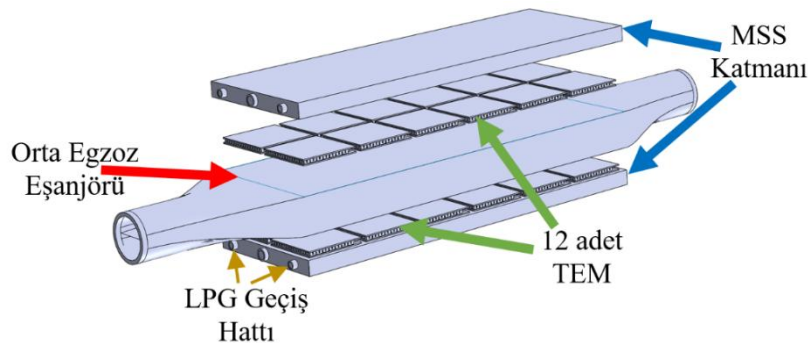
Bu çalışmada, buji ateşlemeli bir motorun egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için ön tasarımı gerçekleştirilen bir TEJ sisteminde, eşanjör yapısı ve eşanjörde kullanılan kanatçık düzenlemesinin eşanjör yüzey sıcaklık dağılımına etkisi HAD yöntemi ile analiz edilmiştir. 3 katmanlı bir TEJ tasarımı için elde edilen sonuçlar ile TEJ sisteminin boyutsal ve geometrik yapısı optimize edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, içi boş olarak geliştirilen referans TEJ düzenlemesinde (Model-1), orta egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanının seperatör plaka kullanılarak iki eşit parçaya bölünmesi (Model-2) ve seperatör plaka yüzeylerine akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi (Model-3) ile TEM'lerin sıcak-soğuk taraf yüzeyleri arasındaki ortalama ΔT sıcaklık farkının artırdığı ve eşanjör yüzeylerindeki sıcaklık dağılımının daha homojen hale geldiği, ancak eşanjör içerisindeki basınç düşümünün ise arttığı tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. TEJ Sisteminin Tasarımı

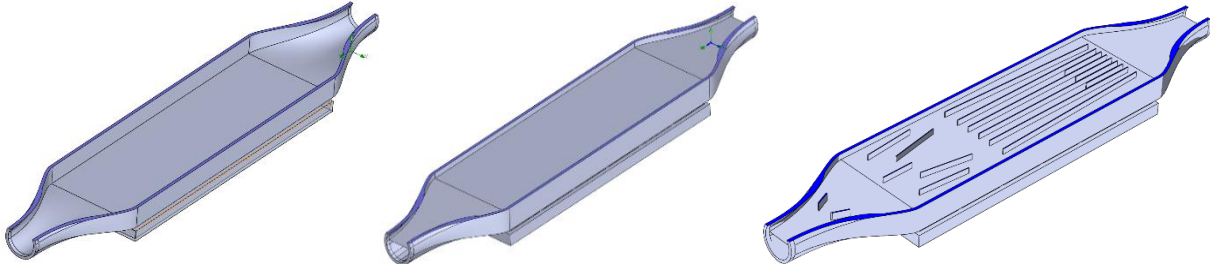
Çalışmada, biri orta egzoz eşanjörü ve orta egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine yerleştirilen iki adet soğutma suyu eşanjöründen oluşan 3 katmanlı bir TEJ tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen TEJ'e ait katı model resim Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi tasarımı yapılan TEJ sisteminde orta egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine yerleştirilen MSS eşanjörleri ile oluşturulan 2 adet sıcak-soğuk yüzeyler arasında $12 \times 2 = 24$ adet TEM (termoelektrik katman) yerleştirilmiştir. Ayrıca, MSS katmanlarının içerisine akış boyunca uzanan ve içerisinden LPG gazlarının geçtiği ısı değiştirici borular yerleştirilmiştir. Bu şekilde, hem motora alınan LPG yakıtının ısıtılması hem de TEJ'de soğuk taraf sıcaklığının düşürülerek sıcak-soğuk yüzeyler arasındaki ΔT sıcaklık farkının artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 1. Tasarlanan 3 katmanlı TEJ sistemine ait katı model resmi

Tasarlanan TEJ yapısının ana geometrik yapısı ve boyutlarında herhangi bir değişiklik yapılmadan orta egzoz eşanjörünün (sıcak taraf) iç hacmini 2 eşit parçaya bölen 8 mm kalınlığında seperatör tabaka ve seperatör tabakanın her iki yüzeyine yerleştirilen akışı yönlendiren kanatçıklar ile oluşturulan konfigürasyonlar ile 3 farklı TEJ yapısı geliştirilmiştir. Kullanılan seperatör tabaka ile egzoz eşanjörünün iç hacmi iki eşit parçaya bölünmüş ve her bir termoelektrik katmanın sıcak tarafı için akış kontrolü sağlanmıştır. Seperatör tabaka üzerinde kanatçık yapısının düzenlenmesi için literatürde akordiyon şekli (accordion-shape) olarak tanımlanan yapı kullanılmıştır. Geliştirilen farklı TEJ yapılarına ait katı model resimler Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü gibi 3 katmanlı içi boş seperatör tabakasız TEJ, Model-1; 3 katmanlı seperatör tabakaya sahip TEJ, Model-2; 3 katmanlı seperatör tabaka ve kanatçık yapısına sahip TEJ, Model-3 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2. 3 farklı TEJ yapısının (soldan sağa: Model-1, Model-2, Model-3) katı model resimleri

2.2. HAD Analizinin Yapısı

HAD, akışkan davranışının etkin olduğu problemlerin sayısal metotlarla bilgisayar ortamında çözülerek analiz edilmesini sağlayan akışkanlar mekaniği bilimi dalıdır [29]. Akış analizinin gerçekleştirildiği bir bilgisayar paket programında, sonlu hacimler metodu kullanılarak akışın kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri ve geliştirilmiş türbülans modeli olarak adlandırılan Navier-Stokes denklemleri ile çözülmektedir. Çalışmada, geliştirilen TEJ tasarımlarının HAD programında analizi için kullanılan eşitlikler aşağıda sıralanmıştır (Eşitlik 1-7) [30].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} \quad (4)$$

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen HAD analizleri için Solid-Works programının Flow-Simulation modülü kullanılmıştır. TEJ’in sıcak ve soğuk taraf eşanjörleri içerisindeki türbülanslı akışa ait çözümlerinin yapılabilmesi için “k-ε modeli” kullanılmıştır. k-ε modelinde türbülanslı kinetik enerji ve yayılma oranı için transport denklemleri kullanılmaktadır. Türbülans kinetik enerjinin-k transport denklemi aşağıdaki gibi yazılır [30]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B \quad (5)$$

Türbülanslı kinetik enerjinin dissipasyon oranının- ε transport denklemi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_B \right] - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

Türbülanslı viskozite şu şekilde tanımlanır:

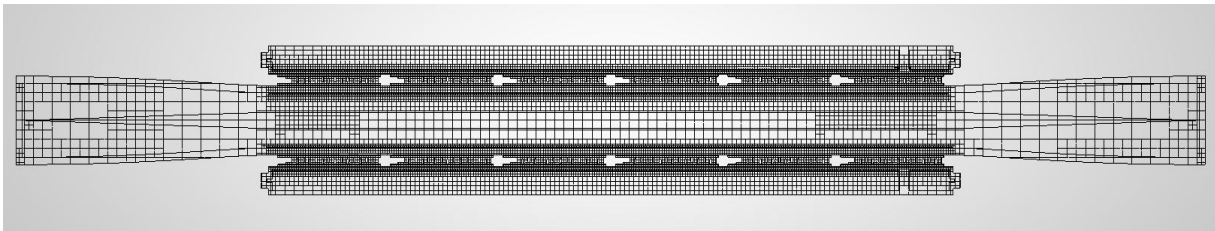
$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

HAD analiz programında kullanılan denklemler belirlendikten ve TEJ sistemine ait katı model geometrileri programa tanımlandıktan sonra, TEJ sistemine egzoz gazları, MSS ve LPG giriş ve çıkışlarının sağlanacağı geçiş bölgelerine ilk olarak sınır yüzeyler oluşturulmuştur. Daha sonra, eşanjörler içerisinde geçecek akışlara ait “akış hacimleri” oluşturulmuştur. Sonraki aşamada, TEJ’in eşanjör malzemesi 6061 serisi alüminyum olarak tanımlanmış ve iki seramik katman arasında bizmut tellür (Bi_2Te_3) yarı iletken malzemenin kullanıldığı p-n çiftlerinden oluşturulan 3 katmanlı TEM yapısı programa tanımlanmıştır. HAD analizi için oluşturulan katı modelin geometri hacmindeki ağ (mesh) sayısı, ağ yapısı düzenlemesinin doğruluğu akış analizinde kullanılan yaklaşımların doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Bununla birlikte, ağ yapısındaki hücreler ne kadar küçük seçilirse, çözüm o kadar güvenilir olmakta, fakat çözüm için gerekli zaman artmakta ve daha performanslı bilgisayar gerektirmektedir.

Tablo 1. Akışkanlar için tanımlanan değerler

Egzoz gazı	MSS	Propan
	Kütlesel Debi, (kg/s)	
0,008059	0,0175	0,0005
	Tam Geliştirilmiş Akış	
Evet	Evet	Evet
	Yaklaşık Basınc, (Pa)	
121325	201325	121325
	Sıcaklık, (°C)	
336,6	71,8	20,05
	Verilen Sıcaklıktaki Spesifik Isı Değeri (cp), (j/kgK)	
1054.39	4191.21	1649.80
	Verilen Sıcaklıktaki Termal İletkenlik, (W/mK)	
0.04685	0.66430	0.01725
Molekül Kütle (kg/mol)	71,8 °C’da Yoğunluk, (kg/m³)	Molekül Kütle (kg/mol)
0,02896	976.77	0,044094

Bu nedenle, çözüm ağı oluşturulurken bu dengeyi gözetmek için kritik bölgeler (açıklıklar, inlet-outlet) tespit edilerek diğer bölgelere oranla daha sık ağ yapısı oluşturulmalıdır [31]. Bu amaçla, tasarlanan TEJ yapıları için, TEM’ler ile eşanjör yüzeylerinin temas ettiği yani ısı transferinin etkili bir şekilde gerçekleşeceği bölgeler kritik bölge olarak tespit edilerek programa tanımlanmıştır. Kullanılan akışkanlar için tanımlanan değerler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 3. Ağ yapısı oluşturulmuş olan TEJ’ün kesit görüntüsü

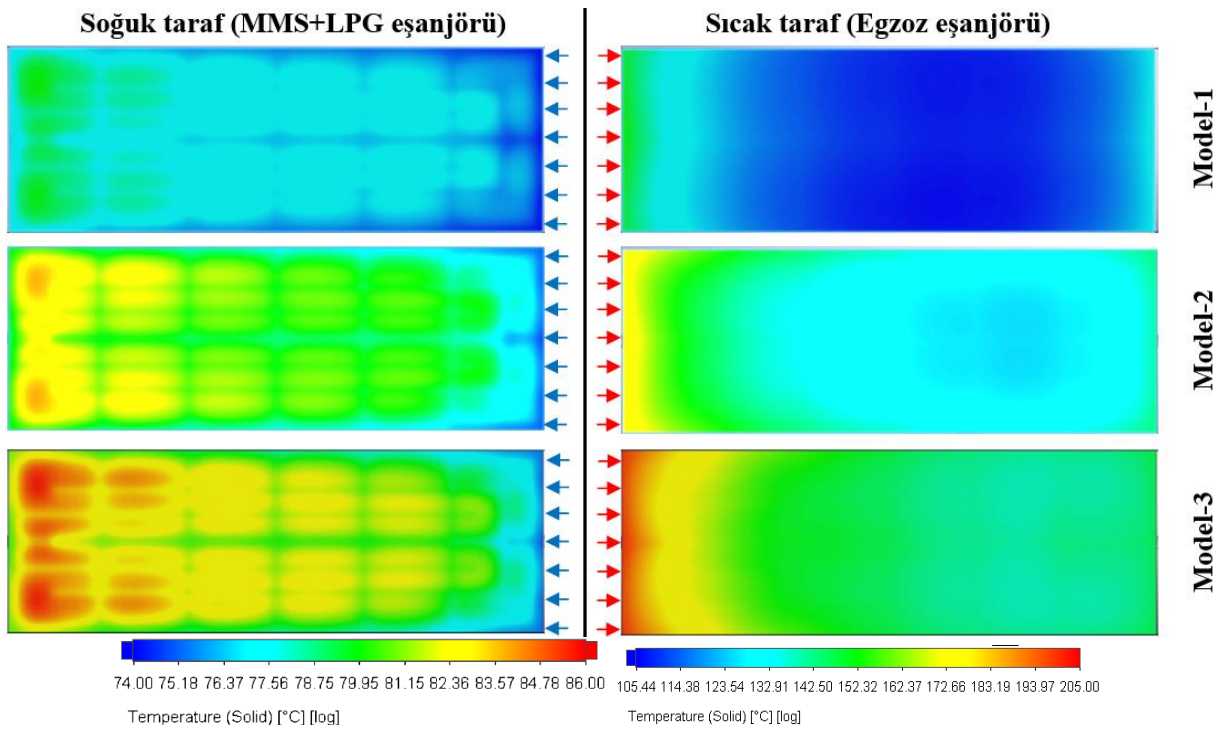
Program tarafından otomatik olarak oluşturulan ağ yapısına ilave olarak bölgesel ağ oluşturma özelliği kullanılarak Şekil 3’de görüldüğü gibi seçilen kritik bölgelerin ağ sayısı yoğunlaştırılmıştır.

HAD analizi için yapılan kabuller şu şekildedir:

- Çalışma zamandan bağımsız gerçekleştirilmiş ve iç analiz tipi seçilmiştir,
- Türbülans modeli olarak k-ε modeli kullanılmıştır,
- Katıdan katıya olan ısı iletimi aktif edilmiş,
- Radyasyonla ısı transferi ihmal edilmiştir,
- Dış duvarlar için belirlenen sınır şartlarında adyabatik duvar özelliği kullanılmıştır,
- Ortam basıncı 101,325 kPa kabul edilmiştir,
- Ortam sıcaklığı ve katıların başlangıç sıcaklığı 20,05 °C kabul edilmiştir.

3. Araştırma Bulguları

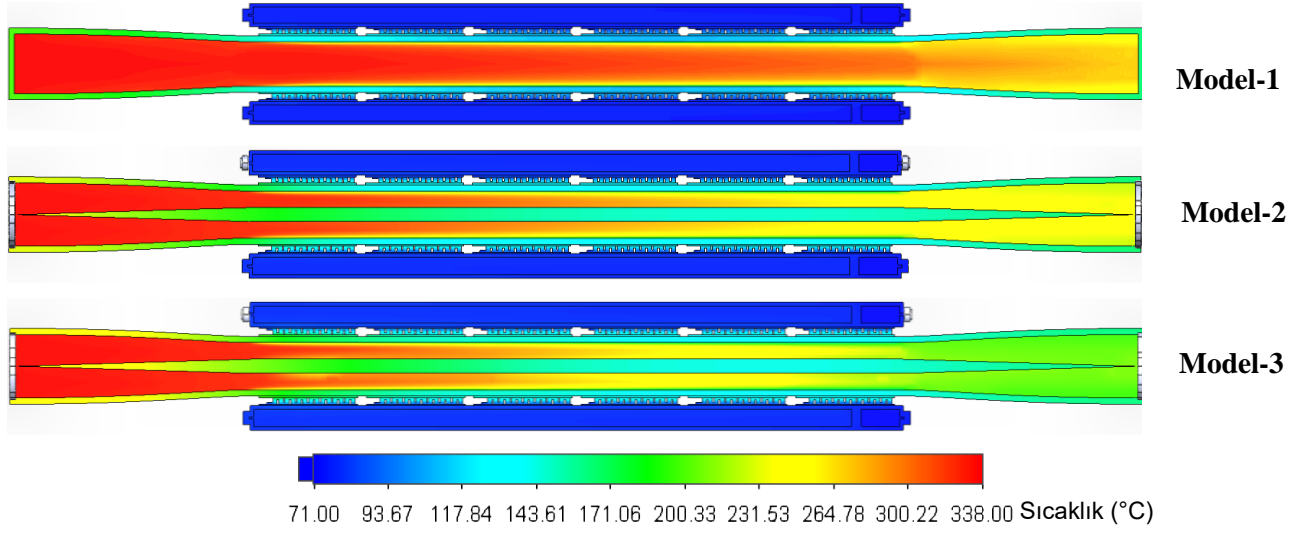
Bu çalışmada, orta egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine yerleştirilen, her biri 12 adet TEM’den oluşan termoelektrik modül katmanı simetrik olduğundan aynı kontrol görüntüleri ve sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle, sonuçların irdelenmesi aşamasında yalnızca bir katmana ait kontrol görüntüleri ve sayısal sonuçlar sunulmuştur. Şekil 4’de geliştirilen 3 farklı TEJ modelinde HAD analizinden elde edilen soğuk ve sıcak taraf eşanjör yüzeyi sıcaklık dağılımı verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, TEM’lere temas eden sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki ΔT sıcaklık farkının artırılabilmesi için ters akışlı olarak dizayn edilen tüm TEJ modellerinde; sıcak taraf yüzey sıcaklığı eşanjör çıkışına doğru azalmakta, soğuk taraf yüzey sıcaklığı ise eşanjör çıkışına doğru artmaktadır. TEJ modelleri arasında yapılacak karşılaştırmada; orta egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanının seperatör plaka ile iki eşit parçaya bölünmesiyle, egzoz eşanjörünün çıkışına doğru yüzey sıcaklığındaki azalma düşmekte soğuk yüzey sıcaklığı ise artmaktadır.



Şekil 4. 3 farklı TEJ düzenlemesi için soğuk ve sıcak taraf eşanjör yüzeyi sıcaklık dağılımı

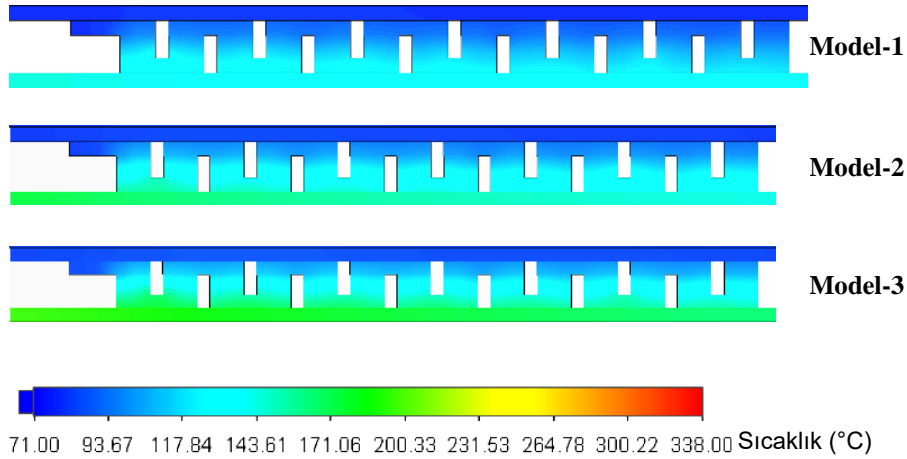
Seperatör plaka yüzeyine yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi ile eşanjör çıkışına doğru egzoz eşanjörü yüzey sıcaklığındaki azalma daha da düşük seviyelere inmekte ve soğuk yüzey sıcaklığı

ise daha fazla artmaktadır. Bununla birlikte, sıcak ve soğuk taraf eşanjör yüzeylerinin sıcaklık dağılımında, seperatör plaka ve seperatör plaka yüzeyine yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi daha yüksek sıcaklıkta homojene yakın bir yapı ortaya çıkartmaktadır.



Şekil 5. 3 farklı TEJ düzenlemesi için TEJ kesitinden alınan HAD kontur görüntüleri

Şekil 5’de 3 farklı TEJ düzenlemesi için TEJ kesitinden alınan HAD analizlerine ait kontur görüntüleri verilmektedir. Şekil 5’de görüldüğü gibi aynı giriş sıcaklığı için egzoz eşanjörü içerisindeki akışın seperatör plaka ile iki eşit parçaya bölünmesi ile eşanjör çıkışına doğru egzoz gazlarının sıcaklıkları azalmaktadır. Seperatör plaka yüzeyine akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi ile eşanjör çıkışına doğru egzoz gazlarının sıcaklıkları daha da düşmektedir. Bu durum, egzoz eşanjörü içerisine alınan egzoz gaz sıcaklığının TEM modülleri üzerinden MSS ve LPG gazına transfer edildiğinin göstermektedir.



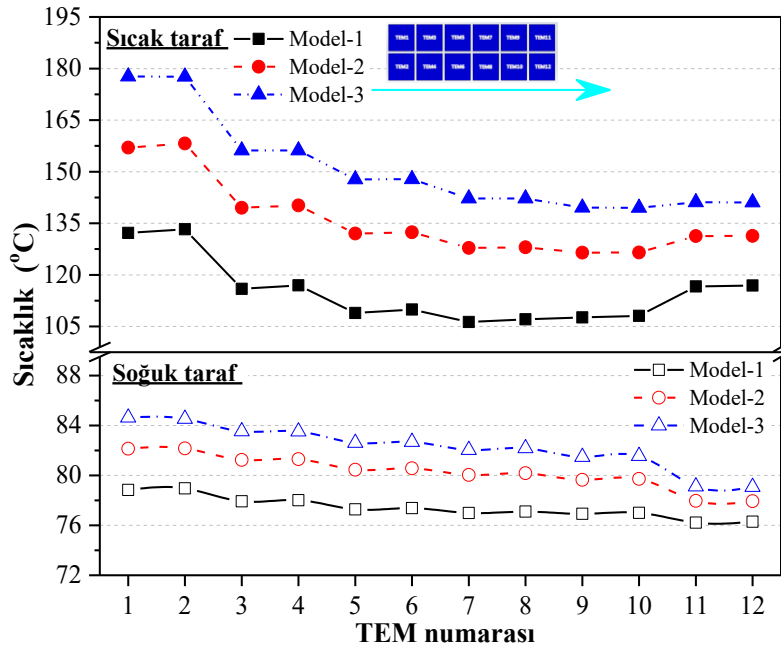
Şekil 6. 3 farklı TEJ düzenlemesi için TEM’ün kesitinden alınan HAD kontur görüntüleri

Yani, egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanı, seperatör plaka kullanılarak iki eşit parçaya bölünmesi ile egzoz gazlarından MSS ve LPG gazına olan ısı transferi miktarı artmıştır. Bununla birlikte, seperatör plaka yüzeyine eklenen akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesiyle egzoz gazlarından MSS ve LPG gazına olan ısı transferi hızı daha da artmıştır. Bu sonuçlar, TEJ’de egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanı, seperatör plaka ile iki eşit parçaya bölünmesi ve seperatör plaka yüzeylerine akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi ile egzoz gazlarının sıcaklığının daha fazla eşanjör

yüzeyine taşındığı, eşanjör veriminin artırıldığı ve buna bağlı olarak TEM'lere temas eden sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki ΔT sıcaklık farkının artması ile TEJ'de üretilen elektrik gücünün artacağını göstermektedir.

Şekil 6'da 3 farklı TEJ düzenlemesi için bir adet TEM'ün kesitinden alınan HAD analizlerine ait kontur görüntüleri verilmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi TEM'ün egzoz eşanjörü (sıcak taraf) ve MSS eşanjör (soğuk taraf) yüzeylerine temas eden yüzeyleri arasındaki ΔT sıcaklık farkının, egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanı, seperatör plaka ile iki eşit parçaya bölünmesiyle arttığı, seperatör plaka üzerine akış yönlendirme kanatlarının eklenmesiyle de ΔT sıcaklık farkındaki artış devam etmektedir. ΔT sıcaklık farkının artması ile TEM'ün elektrik üretim kapasitesinin de artması beklenmektedir. Ayrıca, kontur yapısı dikkate alındığında, egzoz eşanjörüne seperatör plaka ve seperatör plaka yüzeyine akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi ile sıcaklık dağılımının daha homojen hale geldiği görülmektedir.

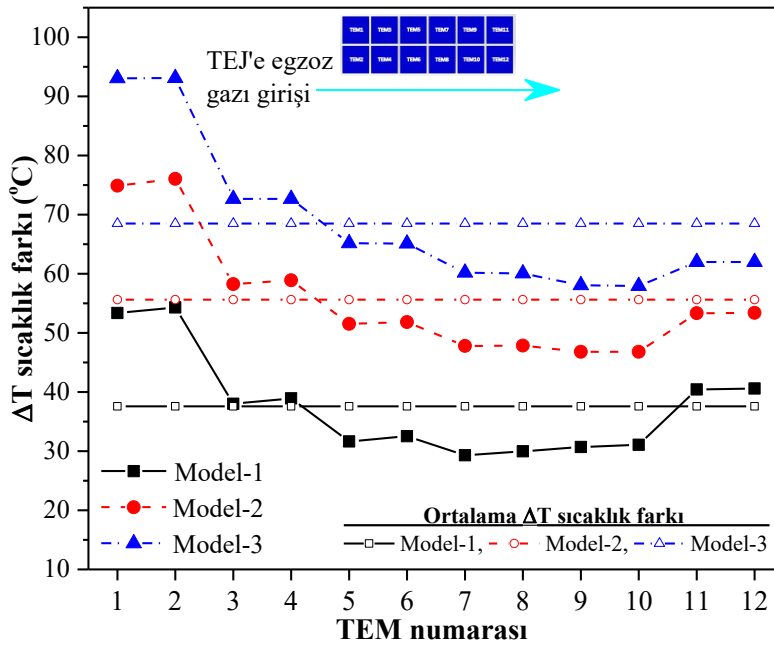
3 farklı düzenleme için 12 adet TEM'ün sıcak ve soğuk yüzeyine düşen sıcaklıkların değişimi Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi sıcak ve soğuk taraf eşanjörlerin yüzeyine 2 sıra halinde konumlandırılan 12 adet TEM'ün her iki yüzeyi (sıcak ve soğuk) üzerine düşen sıcaklık değerleri, tüm TEJ modellerinde egzoz gazlarının eşanjöre giriş düzleminden çıkış düzlemine doğru hem sıcak taraf hemde soğuk taraf eşanjör yüzeyinde azalmaktadır. 12 adet TEM için TEJ modelleri arasında yapılacak karşılaştırmada; orta egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanının seperatör palaka ile iki eşit parçaya bölünmesi ile hem sıcak taraf hemde soğuk taraf eşanjörlerde TEM'ler üzerine düşen sıcaklıklar artmaktadır. Bununla birlikte, seperatör plaka yüzeyine yönlendirme kanatçıkları eklenmesi ile TEM'lerin sıcak ve soğuk taraf yüzeylerine düşen sıcaklık değerleri daha da artmaktadır. Burada, referans eşanjör düzenlemesine (Model-1) seperatör palakanın eklenmesi ile sıcak ve soğuk taraf yüzeylerinde ortaya çıkan sıcaklık artışının seperatör plaka yüzeylerine yönlendirme kanatçıkları eklenmesi ile oluşturulan eşanjör düzenlemesinden daha fazla olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7. 3 farklı düzenleme için 20 adet TEM'ün sıcak ve soğuk yüzeyine düşen sıcaklıkların değişimi

3 farklı TEJ düzenleme için TEM'ler üzerine düşen ΔT sıcaklık farkının değişimi Şekil 7'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüm TEJ düzenlemesinde, her bir TEM'ün sıcak ve soğuk taraf yüzeyleri üzeri arasındaki ΔT sıcaklık farkı egzoz gazlarının TEJ'e giriş düzleminden çıkış

düzlemine doğru azalmaktadır. Bununla birlikte, referans TEJ düzenlemesindeki (Model-1) orta egzoz eşanjör içerisindeki akış alanının iki eşit parçaya bölündüğü TEJ düzenlemesi (Model-2) ile TEM'lerin sıcak ve soğuk yüzeyine düşen ΔT sıcaklık farkı artmaktadır. Seperatör plaka üzerine yönlendirme kanatçıları eklendiği TEJ düzenlemesinde (Model-3) ise yalnızca seperatör plakanın kullanıldığı TEJ düzenlemesine (Model-2) göre ΔT sıcaklık farkı daha fazla artmaktadır. Bu sonuçlar, 12 adet TEM modülünün sıcak ve soğuk yüzeylerine düşen ΔT sıcaklık farkının ortalama değerini gösteren düz çizgilerden net bir şekilde görülmektedir. Ortalama ΔT sıcaklık farkı üzerinden TEJ modelleri kıyaslandığında; Model-2 ile Model-1 göre % 32,45 daha yüksek ΔT sıcaklık farkı elde edildiği ve Model-3 ile Model-2'ye göre % 18,79 daha yüksek ΔT sıcaklık farkı elde edilmiştir. Genel bir sonuç olarak; Model-1 ile tanımlanan referans TEJ düzenlemesinde yapılan tasarım değişiklikleri ile (seperatör plaka ve yönlendirme kanatçıları) ortaya çıkartılan Model-3 ile ortalama ΔT sıcaklık farkı % 45,14 oranında artırılabilmiştir.

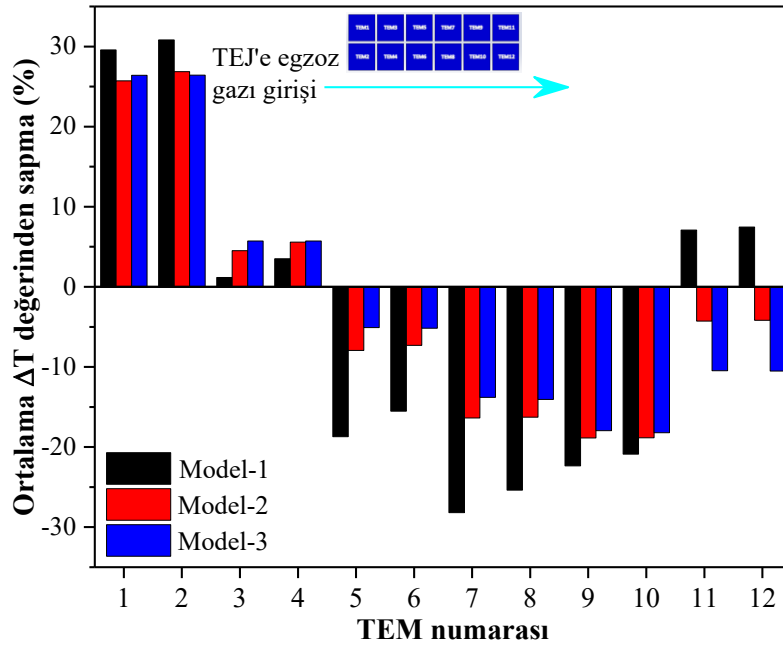


Şekil 8. 3 farklı TEJ düzenlemesi için TEM'ler üzerine düşen ΔT sıcaklık farkının değişimi

Şekil 9'da 3 farklı TEJ düzeni için ortalama ΔT sıcaklık farkından sapmaların değişimi verilmektedir. Şekil 9'da görüldüğü gibi orta egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanının seperatör plaka ile iki eşit parçaya bölünmesi ve seperatör plaka yüzeyine akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesiyle ortalama ΔT sıcaklık farkından sapmalar azalmakta ve TEM'lerin sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki ΔT sıcaklık farkı daha homojen hale gelmektedir. Bu durum, her bir TEM'ün kullanım ömrünün artırılmasına ve TEJ'ün elektrik üretim kapasitesini artırmasına katkı sağlayacaktır.

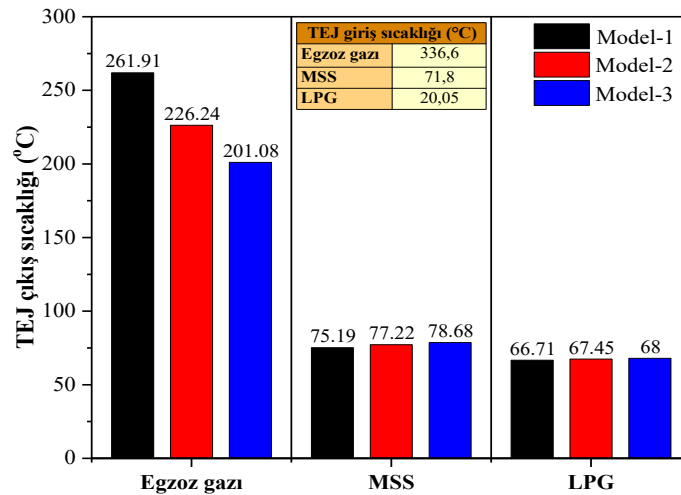
Şekil 10'da 3 farklı TEJ düzeni için egzoz gazı, MSS ve LPG gazının TEJ' den çıkış sıcaklıklarının değişimi verilmektedir. Şekil 10'da görüldüğü gibi egzoz gazı, MSS ve LPG gazının aynı giriş sıcaklıkları için farklı TEJ düzenlemesi ile TEJ' den çıkış sıcaklıkları değişmektedir. Model-1'e göre TEJ'e seperatör plakanın eklendiği Model-2'nin egzoz gazlarının TEJ' den çıkış sıcaklığı %13,62 azalmakta, Model-2'ye göre seperatör plaka yüzeyine yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi ile Model-3'ün egzoz gazlarının TEJ' den çıkış sıcaklığı %11,12 azalmaktadır. Model-1 ile Model-3'ün çıkış sıcaklıkları arasındaki fark ise %23,23 oranındadır. Buna karşın, Model-1'den Model-3'e doğru gidildiğinde MSS ve LPG gaz sıcaklıklarının kayda değer oranda arttıkları görülmektedir. Bu sonuçlar, orta egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanının seperatör plaka ile iki eşit parçaya bölünmesi ve seperatör plaka yüzeyine akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi ile egzoz gazlarından daha fazla ısınının eşanjör yüzeyine ve oradan TEM'ler üzerinden soğuk bölge

akışkanları olan MSS ve LPG gazına aktarıldığını göstermektedir. Böylece, TEJ’de kullanılan sıcak ve soğuk bölge eşanjörlerinin verimleri artmıştır.



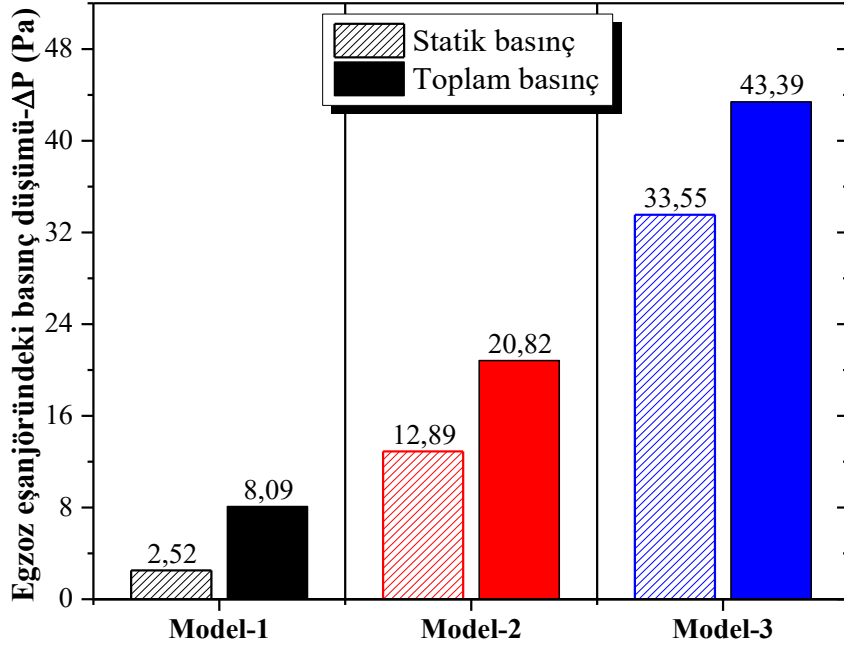
Şekil 9. 3 farklı TEJ düzenleme için ortalama ΔT sıcaklık farkından sapmaların değişimi

Şekil 10’da 3 farklı TEJ düzenleme için egzoz gazı, MSS ve LPG gazının TEJ’ den çıkış sıcaklıklarının değişimi verilmektedir. Şekil 10’da görüldüğü gibi egzoz gazı, MSS ve LPG gazının aynı giriş sıcaklıkları için farklı TEJ düzenlemesi ile TEJ’den çıkış sıcaklıkları değişmektedir. Model-1’e göre TEJ’e seperatör plakasının eklendiği Model-2’nin egzoz gazlarının TEJ’den çıkış sıcaklığı %13,62 azalmakta, Model-2’ye göre seperatör plaka yüzeyine yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi ile Model-3’ün egzoz gazlarının TEJ’ den çıkış sıcaklığı %11,12 azalmaktadır. Model-1 ile Model-3’ün çıkış sıcaklıkları arasındaki fark ise %23,23 oranındadır. Buna karşın, Model-1’den Model-3’e doğru gidildiğinde MSS ve LPG gaz sıcaklıklarının kayda değer oranda arttıkları görülmektedir. Bu sonuçlar, orta egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanının seperatör plaka ile iki eşit parçaya bölünmesi ve seperatör plaka yüzeyine akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi ile egzoz gazlardan daha fazla ısınının eşanjör yüzeyine ve oradan TEM’ler üzerinden soğuk bölge akışkanları olan MSS ve LPG gazına aktarıldığını göstermektedir. Böylece, TEJ’de kullanılan sıcak ve soğuk bölge eşanjörlerinin verimleri artmıştır.



Şekil 10. 3 farklı TEJ düzenlemesi için egzoz gazı, MSS ve LPG gazının TEJ’ den çıkış sıcaklıklarının değişimi

Şekil 11’de 3 farklı TEJ düzeni için egzoz eşanjöründeki basınç düşümünün değişimi verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, referans TEJ düzenlemesinden (Model-1) orta egzoz eşanjör içerisindeki akış alanının iki eşit parçaya bölündüğü TEJ düzenlemesi (Model-2) ve seperatör plaka üzerine yönlendirme kanatçıları eklendiği TEJ düzenlemesine (Model-3) doğru gidildiğinde egzoz eşanjörü içerisindeki ΔP basınç düşümünün arttığı görülmektedir. Egzoz eşanjörü içerisindeki ΔP basınç düşümünün artması, motorun egzoz karşı basıncını artırarak daha fazla egzoz gazının silindir içinde kalmasına ve bir sonraki yanma çevriminde yanma veriminin bir miktar düşmesine neden olacaktır. Ancak, egzoz eşanjöründe maksimum ΔP basınç düşümü ($\approx 0,00043$ bar) dikkate alındığında, egzoz karşı basıncındaki artışa karşın TEJ’ün elektrik üretimin kapasitesindeki artışın daha fazla olduğu görülecektir.



Şekil 11. 3 farklı TEJ düzenlemesi için egzoz eşanjöründeki basınç düşümünün değişimi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, buji ateşlemeli bir motorun egzoz atık ısı enerjisinin geri kazanılması için 3 farklı TEJ düzenlemesi (Model-1, Model-2 ve Model-3) geliştirilerek HAD yöntemiyle sayısal olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Çalışma kapsamında geliştirilen referans TEJ düzenlemesinde (Model-1), orta egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanının seperatör plaka kullanılarak iki eşit parçaya bölünmesi (Model-2) ve seperatör plaka yüzeylerine akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi (Model-3) ile TEM’lerin sıcak ve soğuk taraf yüzeyleri arasındaki ortalama ΔT sıcaklık farkı artırdığı ve eşanjör yüzeylerindeki sıcaklık dağılımının daha homojen hale geldiği tespit edilmiştir.
- Ortalama ΔT sıcaklık farkı üzerinden TEJ modelleri kıyaslandığında; Model-2 ile Model-1’e göre %32,45 daha yüksek ΔT sıcaklık farkı, Model-3 ile Model-2’ye göre %18,79 daha yüksek ΔT sıcaklık farkı ve Model-3 ile Model 1’e göre %45,14 oranında daha yüksek ΔT sıcaklık farkı elde edilmiştir. Bu artışın TEJ’ün elektrik üretim kapasitesinin artmasına katkı sağlayacağı beklenen bir sonuçtur.
- Bununla birlikte, orta egzoz eşanjörü içerisindeki akış alanının seperatör plaka ile iki eşit parçaya bölünmesi ve seperatör plaka yüzeylerine akış yönlendirme kanatçıları eklenmesi

ile egzoz eşanjörü içerisindeki ΔP basınç düşümünün bir miktar arttığı görülmektedir. Bu artışın motor performansına etkisi deneysel çalışmalar ile tespit edilebilir.

- Çalışmada gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda, TEJ'ün elektrik üretimi için; Model-3 ile tanımlanan eşanjör düzenlemesinin, sıcak ve soğuk taraf yüzeyleri arasındaki ortalama ΔT sıcaklık farkını artırması ve sıcak-soğuk eşanjör yüzeylerinde daha homojen sıcaklık dağılımına sebep olması nedeniyle en uygun model olduğu tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2018-6726 nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Süleyman Demirel Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz. Bu çalışmada HAD analizlerinde kullanılan 3 farklı TEJ düzenlemesi, Doç. Dr. Habib GÜRBÜZ ve Arş. Gör. Hüsameddin AKÇAY tarafından tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan Solid-Works yazılım programı Hüsameddin AKÇAY adına 2021 yılına kadar öğrenci lisansı kapsamında kayıtlıdır.

Kaynaklar

- [1]. Bettoja, F., Perosino, A., Lemort, V., Guillaume, L., Reiche, T., Wagner, T., No Waste: waste heat re-use for greener truck. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14, 2734-2743.
- [2]. Arsie, I., Cricchio, A., Marano, V., Pianese, C., De Cesare, M., Nesci, W., Modeling analysis of waste heat recovery via thermo electric generators for fuel economy improvement and CO₂ reduction in small diesel engines. *Energy Procedia*, 2015, 82, 81-88.
- [3]. Lefebvre, A., Guilain, S., Transient response of a Turbocharged SI engine with an electrical boost pressure supply. *SAE Technical Paper 2003-01-1844*, 2003.
- [4]. Arsie, I., Cricchio, A., Pianese, C., Ricciardi, V., De Cesare, M., Evaluation of CO₂ reduction in SI engines with electric turbo-compound by dynamic powertrain modelling. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(15), 93-100.
- [5]. Zhang, C., Shu, G. Q., Tian, H., Wei, H., Yu, G., Liang, Y., Theoretical Analysis of a Combined Thermoelectric Generator (TEG) and Dual-loop Organic Rankine Cycle (DORC) System Using for Engines' Exhaust Waste Heat Recovery, *SAE Technical Paper 2014-01-0670*, 2014.
- [6]. Naik-Dhungel, N., Waste heat to power systems. *United States Environmental Protection Agency*, 2012, 1-9.
- [7]. Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., Tassou, S. A., Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, 6, 268-289.
- [8]. Armstead, J.R., Miers, S.A., Review of waste heat recovery mechanisms for internal combustion engines. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2014, 6(1), 014001(9 pages).
- [9]. Shu, G., Liang, Y., Wei, H., Tian, H., Zhao, J., Liu, L., A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19, 385-401.
- [10]. Bell, L.E., Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*, 2008, 321(5895), 1457-1461.
- [11]. Ringler, J., Seifert, M., Guyotot, V., Hübner, W., Rankine cycle for waste heat recovery of IC engines. *SAE International Journal of Engines*, 2009, 2(1), 67-76.
- [12]. Orr, B., Akbarzadeh, A., Mochizuki, M., Singh, R., A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 101, 490-495.
- [13]. He, J., Tritt, T. M., Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward. *Science*, 2017, 357(6358), eaak9997.

- [14]. Chen, W. H., Lin, Y. X., Chiou, Y. B., Lin, Y. L., Wang, X. D., A computational fluid dynamics (CFD) approach of thermoelectric generator (TEG) for power generation. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 173(5), 115203.
- [15]. Enescu, D., Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications. In *Green Energy Advances*. Book chapter, IntechOpen, 2019, 1-39.
- [16]. Yu, J., Zhao, H., Xie, K., Analysis of optimum configuration of two-stage thermoelectric modules. *Cryogenics*, 2007, 47(2), 89-93.
- [17]. Chen, W.H., Lin, Y.X., Wang, X.D., Lin, Y.L., A comprehensive analysis of the performance of thermoelectric generators with constant and variable properties. *Applied energy*, 2019, 241, 11-24.
- [18]. Çengel, Y.A., Cimbala, J.M. Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları. Çeviri: Engin T., Öz, H.R., Küçük, H., Çeşmeci, Ş., Güven Bilimsel Yayınevi, İzmir, 2010, 818-830.
- [19]. Chen, W.H., Wu, P.H., Lin, Y.L., Performance optimization of thermoelectric generators designed by multi-objective genetic algorithm. *Applied Energy*, 2018, 209, 211-223.
- [20]. Weng, C.C., Huang, M.J., A simulation study of automotive waste heat recovery using a thermoelectric power generator. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 71, 302-309.
- [21]. Gürbüz, H., Akçay, H., Experimental investigation of an improved exhaust recovery system for liquid petroleum gas fueled spark ignition engine, *Thermal Science*, 2015, 19(6), 2049-2064.
- [22]. Hsiao, Y.Y., Chang, W.C., Chen, S.L., A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine. *Energy*, 2010, 35(3), 1447-1454.
- [23]. Rezanian, A., Rosendahl, L.A., Thermal effect of a thermoelectric generator on parallel microchannel heat sink. *Energy*, 2012, 37(1), 220-227.
- [24]. Kempf, N., Zhang, Y., Design and optimization of automotive thermoelectric generators for maximum fuel efficiency improvement. *Energy Conversion and Management*, 2016, 121, 224-231.
- [25]. Kim, S., Analysis and modelling of effective temperature differences and electrical parameters of thermoelectric generators. *Applied energy*, 2013, 102, 1458-1463.
- [26]. Liu, X., Deng, Y.D., Li, Z., Su, C.Q., Performance analysis of a waste heat recovery thermoelectric generation system for automotive application. *Energy Conversion and Management*, 2015, 90, 121-127.
- [27]. Favarel, C., Bédécarrats, J.P., Kousksou, T., Champier, D., Experimental analysis with numerical comparison for different thermoelectric generators configurations. *Energy Conversion and Management*, 2016, 107, 114-122.
- [28]. Kunt, M. A., İçten Yanmalı Motor Atık Isılarının Geri Kazanımında Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2016, 3(2), 192-203.
- [29]. Demir, H., "Doğal Havalandırma Yöntemlerinin Sayısal Modellemesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- [30]. Solid-Works, "Enhanced turbulence modeling in SolidWorks flow simulation," Dassault Systèmes SolidWorks Corporation Waltham, USA, 2013, MKTURBMO DWPENG0313.
- [31]. Balık, G., "Geniş Hacimlerde Duman Hareketinin Sayısal İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.