



**Makale / Research Paper**

**Buji Ateşlemeli Motorun Egzoz Atık Isı Dönüşümü İçin  
Tasarlanan Termoelektrik Jeneratörde Optimum Egzoz  
Eşanjörü Düzenlemesinin HAD Analizi**

Ahmet Baturalp ÖKMEN<sup>1</sup>, Habib GÜBÜZ\*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta/TÜRKİYE

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Isparta/TÜRKİYE  
[habibgurbuz@sdu.edu.tr](mailto:habibgurbuz@sdu.edu.tr)

Received/Geliş: 06.04.2021

Accepted/Kabul: 17.05.2021

**Öz:** İçten yanmalı bir motorda alınan yakıtın ısı enerjisinin yaklaşık %40'ı egzoz gazları ile atık ısı olarak atmosfere atılmaktadır. Bu ısı enerjisinin bir kısmının geri kazanılması yakıt dönüşüm verimini önemli oranda artırabilir. Bu çalışmada, buji ateşlemeli motorun egzoz atık ısı enerjisinden elektrik enerjisinin üretildiği termoelektrik jeneratörde sıcak taraf (egzoz) eşanjör yüzey sıcaklığı ve dağılımının optimize edilebilmesi için farklı kanatçık sayısı ve düzenlemesine sahip eşanjörler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile analiz edilmiştir. Çalışmada, daha önceki çalışmada tasarlanarak ana boyutları belirlenen egzoz eşanjörünün iç hacmi, bir seperatör plaka yardımıyla iki eşit parçaya bölünerek literatürde akordiyon şekli, balık kılıcı şekli ve seri plaka şekli olarak bilinen kanatçık dizilimlerinin kullanıldığı eşanjör düzenlemeleri oluşturulmuştur. Eşanjör düzenlemelerinde literatürde yaygın olarak kullanılan kanatçık geometrilerinden (kare, dikdörtgen, üçgen ve yamuk prizmalar) farklı olarak yağmur damlası geometrisi kullanılmıştır. Ayrıca, seperatör plakasının giriş yayıcı ağız düzlemine dikdörtgen prizma geometriye sahip akış yönlendirme kanatçıkları eklenmiştir. Eşanjör düzenlemeleri için gerçekleştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde, tek silindri buji ateşlemeli bir motorun 2200 devrinde yapılan deneysel çalışmada elde edilen egzoz gaz sıcaklık ve debi değerleri kullanılmıştır. Her bir eşanjör düzenlemesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri sürekli rejimde gerçekleştirilerek sıcaklık dağılımı, hız vektörleri, giriş-çıkış sıcaklıkları, eşanjör içi basınç düşümüne ait konturlar elde edilmiştir. Tasarlanan egzoz eşanjörü düzenlemeleri için gerçekleştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz sonuçlarına göre; girişte altı adet akış yönlendirme kanadı ile birlikte 15°, 30° ve 45° açılı ver ters yönlü seri plaka dizilimi ile oluşturulan eşanjör düzenlemelerinin diğer modellere oranla eşanjör yüzey sıcaklığı, dağılımı ve eşanjör içi basınç düşümü açısından daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yağmur damlası kanatçık yapısına sahip eşanjör düzenlemeleri ile referans (içi boş) eşanjör düzenlemesine göre daha yüksek eşanjör içi basınç düşümüne karşın daha yüksek ve homojen eşanjör yüzey sıcaklığı elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Buji ateşlemeli motor; egzoz atık ısı enerjisi, termoelektrik jeneratör; hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD).

**CFD Analysis of Optimum Exhaust Heat Exchanger Arrangement  
in Thermoelectric Generator Designed for Exhaust Waste  
Heat Recovery of Spark Ignition Engine**

**Abstract:** Approximately 40% of the heat energy of the fuel in internal combustion engines is emitted to the atmosphere as waste heat along with exhaust gases. Recovery of some of the exhaust waste heat energy could remarkably increase the fuel conversion efficiency. In this study, to optimize the hot side (exhaust) heat exchanger surface temperature and distribution in the thermoelectric generator where electrical energy is generated from the exhaust waste heat energy of the spark-ignition engine, the heat exchangers having different fin number and arrangement were analyzed by computational fluid dynamics method. In the study, the internal volume of the exhaust heat exchanger, whose main dimensions were determined by designing in the previous

*How to cite this article*

Ökmen, A. B., Gürbüz, H., "Buji Ateşlemeli Motorun Egzoz Atık Isı Dönüşümü İçin Tasarlanan Termoelektrik Jeneratörde Optimum Egzoz Eşanjörü Düzenlemesinin HAD Analizi" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (2); 1060-1080.

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Ökmen, A. B., Gürbüz, H., "CFD Analysis of Optimum Exhaust Heat Exchanger Arrangement in Thermoelectric Generator Designed for Exhaust Waste Heat Recovery of Spark Ignition Engine" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2021, 8 (2); 1060-1080.

ORCID ID: \*0000-0002-8036-145X; \*0000-0001-5157-6227

study, was divided into two equal parts with the using a separator plate, and heat exchanger arrangements were created by three different fins ranking types using in the literature (i.e., accordion, fishbone, and serial plate). Different from the fin geometries (i.e., square, rectangular, triangular, and trapezoidal prisms) commonly used in the literature, raindrop geometry was used in heat exchanger arrangements. Also, flow guiding vanes having rectangular prism geometry was added to the plane of the inlet diffuser of the separator plate. Exhaust gas temperature and flow rate values obtained in the experimental study performed at 2200 rpm of a single-cylinder spark-ignition engine was used in the computational fluid dynamics analyzes performed for exchanger arrangements. For each heat exchanger arrangement, computational fluid dynamics analyzes were performed steady-state, and the contours of temperature distribution, velocity vectors, inlet-outlet temperatures, pressure drop inside the exchanger were obtained. According to the results of the computational fluid dynamics analysis performed for the designed exhaust exchanger arrangements; the reverse direction serial plate arrangement having six flow guiding fins and 15°, 30°, and 45° angled raindrop geometries have more optimum values in terms of heat exchanger surface temperature, distribution and pressure drop in the exchanger compared to other models. Furthermore, with the heat exchanger arrangements with raindrop fin structure, a higher and homogeneous heat exchanger surface temperature was achieved despite higher pressure drop compared to the reference (empty) heat exchanger arrangement.

**Keywords:** Spark ignition engine; exhaust waste heat energy; thermoelectric generator; computational fluid dynamics (CFD).

## 1. Giriş

İçten yanmalı motorlarda (İYM) silindir içine alınan yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin  $\approx 40\%$ 'lık kısmı egzoz gazları ile atmosfere atılırken  $\approx 28\%$ 'i soğutma sıvısına,  $\approx 4\%$ 'ü radyasyonla ısı transferine ve  $\approx 4\%$ 'ü yardımcı sistemler ve sürtünme kayıplarına harcanmakta ve  $\approx 24-30\%$ 'luk kısmı motorun çıkış milinden faydalı enerjiye dönüşmektedir [1-3]. Bununla birlikte, gelişen teknoloji ve artan tüketici taleplerine bağlı olarak İYM'lerin kullanıldığı taşıtlarda enerji ihtiyacı da hızla artmaktadır. Özellikle taşıtlarda kullanılan iklimlendirme sistemleri, elektrikli camlar, mini bar, yol bilgisayarı, müzik sistemi, açılabilir tavan, mekatronik güvenlik sistemleri ve sensörler gibi birçok ekipmanın çalışması için elektrik enerjisine gereksinim duyulmaktadır. Buna karşın, elektrik enerjisinin üretildiği sistemlerin İYM'den çektiği kayıp güç ve elektrik enerjisinin depolandığı batarya sistemlerinin araç üzerinde oluşturduğu ekstra yükler yakıt tüketimini arttırmaktadır. Bu nedenle enerjinin araç üzerinde daha hafif elemanlar ile üretimi, gereksiz yüklerden kaçınılmasını, fosil yakıtların daha az kullanılması [4] ya da İYM'lerin atık ısı enerjisinin faydalı enerjiye dönüştürülmesi gerekmektedir. Taşıt üzerinde elektrik üretimi için harcanan enerji miktarı ortadan kaldırılabilirse toplam yakıt tüketiminin  $\%10$  azaltılabileceği öngörülmektedir [5].

İYM'li taşıtlarda egzoz ve soğutma sıvısı yoluyla kaybedilen atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılması aracın elektrik ihtiyacını karşılamak için alternatif bir çözümdür. Ayrıca, İYM'de egzoz atık ısı geri dönüşüm sisteminin kullanılması, enerjinin verimli kullanımının yanında atmosfere atılan zararlı emisyonların azaltılmasına da katkı sağlayabilmektedir. Son zamanlarda, İYM'lerin egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünde termoelektrik jeneratörlerin (TEJ) kullanımı yaygınlaşmaktadır. Birçok çalışmada, TEJ'ler tarafından üretilen elektrik enerjisinin alternatörün ürettiği enerjinin bir kısmını karşılayacak önemli bir etkiye sahip olabileceği vurgulanmaktadır [6]. Termoelektrik dönüşüm sistemleri, ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemler olarak bilinmektedir. Termoelektrik olayı; Joule yasası, Peltier etkisi, Seebeck etkisi ve Thomson etkisi ile izah edilebilmektedir. Bir termoelektrik modülün (TEM) iki yüzeyi arasında oluşturulan sıcaklık farklı ile modülde oluşan Seebeck etkisi ile TEM bir doğru akım (DC) güç kaynağı gibi davranmaktadır [7]. TEJ'de üretilen elektrik enerjisi TEM'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır [8]. Taşıtlarda elektrik enerjisi üretimi açısından alternatörlere alternatif olabilecek TEJ sistemlerinin varlığı önemlidir. Çünkü TEJ sistemleri sadece İYM'nin egzoz gazları ve soğutma sıvısına giden atık ısı enerjisini kullanmaktadır. Isı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan TEM'in sessiz olması, kirlenici etkisinin olmaması, hareketli parçaların bulunmaması ve uzun çalışma süreleri gibi birçok önemli avantajı bulunmaktadır [9-11]. İYM'li taşıtlarda TEJ'in kullanımı yakıt ekonomisini

artırmak, egzoz emisyonlarını azaltmak ve motor verimini artırmak için iyi bir yöntemdir [12] Geçtiğimiz 30 yılda İYM'lerin egzoz atık ısı enerjisinin TEJ kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi üzerine birçok deneysel ve teorik çalışma gerçekleştirilmiştir.

Haidar ve Ghajel bu TEM'i Porsche 944 tipi otomobilin egzoz sisteminde kullanılarak 10 W elektrik gücü elde edilmiştir [2]. Bass vd. bir kamyonun ait dizel motorun egzoz atık ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi için 72 adet TEM'in kullanıldığı bir TEJ tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarlanan sistemde; 230 °C sıcak taraf ve 30 °C soğuk taraf sıcaklığı ile elde edilen 270 °C  $\Delta T$  sıcaklık farkı altında %4,5 enerji dönüşüm verimi ile 1 kW elektrik gücü üretmişlerdir [13]. Kobayashi vd. 3000 cc'lik bir benzinli bir motorun egzoz yoluna yerleştirdikleri TEJ'de 72 adet Si-Ge TEM kullanmışlardır. TEJ'in soğuk taraf eşanjöründe İYM'nin soğutma suyu kullanılmıştır. 60 km/h taşıt hızı ile 1141 °C egzoz gaz sıcaklığında 563 °C  $\Delta T$  sıcaklık farkı ile her bir TEM'de %0,9 enerji dönüşüm verimi ile 1,2 W elektrik gücü elde etmişlerdir [14]. Ikoma vd. benzinli bir motorun egzoz yolu üzerinde bizmut tellür ( $Bi_2Te_3$ ) esaslı HZ-14s tipi TEM'ler kullanarak 60 km/h taşıt hızında %2,9 enerji dönüşüm verimi ile 193 W elektrik gücü elde etmişlerdir [15]. Thacter vd.  $Bi_2Te_3$  esaslı HZ-14s tipi TEM'lerin kullanıldığı TEJ'i bir kamyonette ait dizel motorun egzoz yoluna yerleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri testler sonucunda, İYM devrinin artışı ile TEJ'de üretilen elektriksel gücün arttığını tespit etmişler ve TEJ'den maksimum 330 W elektrik gücü üretmişlerdir [16]. Hsiao vd. İYM'nin soğutma radyatörü ve egzoz yolu üzerinde TEM'lerin kullanıldığı teorik ve deneysel çalışmalarında, soğutma radyatörü yerine egzoz sisteminde TEM'lerin kullanımı ile daha yüksek elektriksel güç elde etmişlerdir. Egzoz yolu üzerinde TEM kullanımı ile 290 °C  $\Delta T$  sıcaklık farkı altında 51,13 mW/cm<sup>2</sup> elektrik gücü üretmişlerdir [17]. Hsu vd. bir otomobilin egzoz yoluna yerleştirilen ve soğuk tarafta şartlandırılmış havanın kullanıldığı 24 adet TEM'den oluşan bir TEJ tasarlamışlardır. Egzoz eşanjörü içerisinde gazların kademeli genişlemesini sağlayan eğimli kanatçıklar yerleştirildiği TEJ sistemi ile motorun 3500 devrinde  $\Delta T=30$  K sıcaklık farkı ve %0,3 dönüşüm verimi ile 12,41 W elektrik gücü elde edilmişlerdir [18]. Deng vd. TEJ'in verimliliğini artırmak için ısı eşanjörlerin temas yüzeyi sıcaklık ve homojenliği açısından farklı iç yapılara, uzunluklara ve malzemelere sahip eşanjör karakteristiklerini incelemişlerdir. Geliştirilen eşanjör düzenlemelerinin HAD analizleri ve kızılötesi sıcaklık ölçümünün yapıldığı motor deneylerinde; 600 mm uzunluğa sahip pirinçten yapılmış plaka şeklindeki ısı eşanjöründe balık kılıçığı şeklindeki kanatçık dizilimi ile daha düşük egzoz karşı basıncının yanında eşanjör yüzeyinde daha yüksek ve homojen sıcaklık dağılımı elde edilmişlerdir [19].

Weng ve Huang bir TEJ'de p-n tipi termoelektrik çift (TÇ) sayısı ve yüzey kapsama oranının yanında egzoz eşanjörü içinde balık kılıçığı, akordeon ve seri plaka şekli dizilimlere sahip kanatçıkların kullanımının TEJ'in performansına etkilerini HAD yöntemini kullanarak analizi etmişlerdir. Sonuç olarak, daha fazla TÇ kullanımı ile daha fazla elektrik gücü üretilmediği ve TÇ başına düşen ortalama gücün azaldığını tespit etmişlerdir [20]. Bai vd. TEJ'de sıcak taraf eşanjör iç yapısının sıcaklık, hız dağılımı ve basınç düşümü üzerine etkisini araştırmak için 1,2 litre benzinli motora sahip bir otomobilin sürüş çevrimi boyunca elde edilen verileri kullanarak gerçekleştirdikleri HAD analizlerinde, 7 bölmeye sahip seri plaka yapısı ile 9,7 kPa basınç düşümü altında eşanjör yüzeyine 1,737 kW'lık ısı enerjisinin aktarıldığı optimum eşanjör düzenlemesini elde etmişlerdir. [21] Su vd. TEJ'de homojen sıcaklık dağılımı ve daha yüksek temas yüzeyi sıcaklığı elde etmek için eşanjör iç yapısı, malzemesi ve yüzey alanı ait parametreleri HAD analizi ve deneysel kızılötesi sıcaklık ölçümü ile araştırmışlardır. Kızılötesi sıcaklık ölçümü ve HAD analizleri arasındaki uyum doğrultusunda sıcak taraf için seçilen 660x305 mm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip akordiyon şekli bir pirinç ısı eşanjörü kullanılarak eşanjör ve TEM'ler arasındaki termal direncin azaltılabildiği ve TEJ'in verimliliğini artırmak için daha yüksek yüzey sıcaklığı ve homojen sıcaklık dağılımı elde edilebileceğini tespit etmişlerdir [22]. Murali ve Ikram TEJ'in sıcak taraf eşanjörü içerisinde içi boş yapının yanında seri plaka, akordeon ve balık kılıçığı şekli kanatçık diziliminin ısı aktarımına etkisini HAD analizi ile inceledikleri çalışmalarında, balık kılıçığı dizilimi ile egzoz akışı

boyunca oluşan girdap akışının sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeyine olan ısı transferini artırdığını, akordiyon ve seri plaka şekli kanatçık dizilimin ise içi boş yapı ve balık kılıcı dizilime oranla eşanjör yüzeyine daha fazla ısı aktarımına sebep olduğunu tespit etmişlerdir [23].

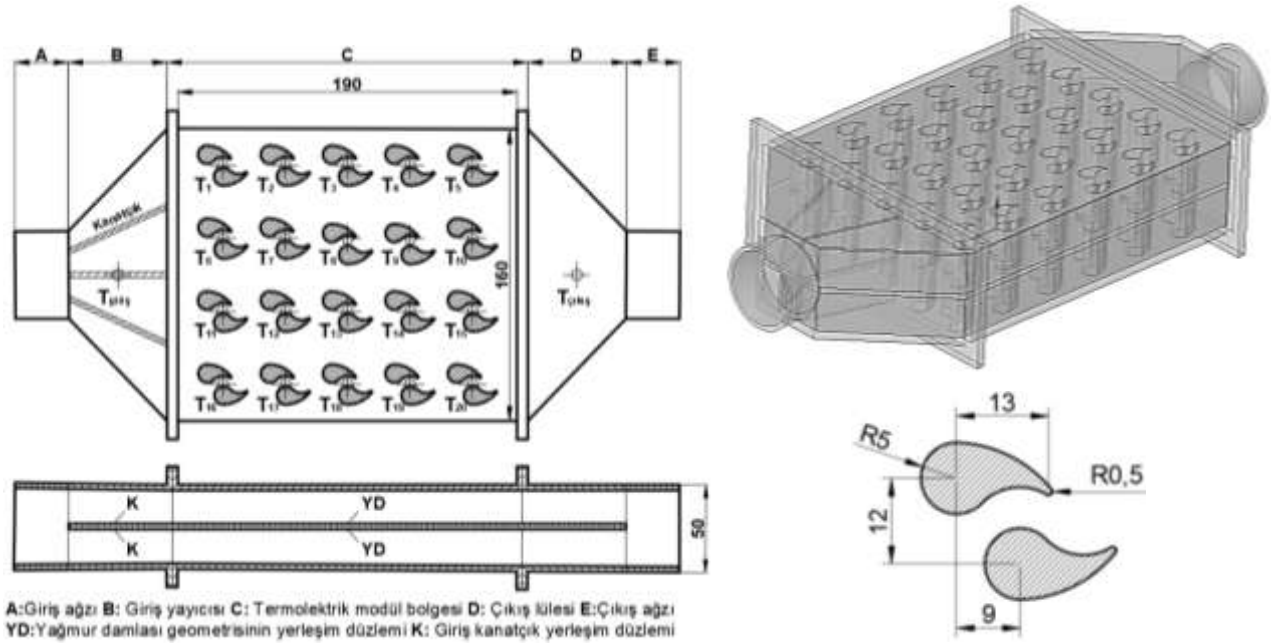
İYM motorların egzoz gazı atık ısı enerjisinin TEJ kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürüldüğü önceki çalışmalar göz önüne alındığında [24-27], TEJ’de kullanılan sıcak ve soğuk taraf eşanjör yüzeyleri arasındaki  $\Delta T$  sıcaklık farkının TEJ’in elektriksel güç üretimi üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle sıcak taraf eşanjör iç yapısında kullanılan kanatçık düzenlemeleri ile sıcak egzoz gazlardan eşanjör yüzeyine aktarılan ısı miktarının artırılması ve eşanjör yüzeyinde homojen sıcaklık dağılımının elde edilmesi önemli bir yapısal parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, İYM motorun egzoz yoluna yerleştirilen TEJ’in sıcak taraf (egzoz) eşanjör iç yapısının egzoz karşı basıncını artırarak İYM’nin verim, yakıt tüketimi ve egzoz emisyon parametrelerini olumsuz yönde etkilememesi, eşanjör düzenlemesinden istenilen özellikler arasındadır.

Bu çalışmada, buji ateşlemeli bir motorun egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü TEJ sisteminde kullanılan sıcak taraf (egzoz) eşanjörü iç yapısında kullanılan farklı kanatçık sayısı ve düzenlemelerinin eşanjör yüzeyine ısı aktarımı, eşanjör yüzeyi sıcaklık dağılımı ve eşanjör içi basınç düşümüne etkisi HAD yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. HAD analizlerinde tek silindirik buji ateşlemeli bir motorun 2200 devrinde gerçekleştirilen deneysel çalışmadan elde edilen egzoz gaz sıcaklığı ve debi değerleri kullanılmıştır. Daha önceki çalışmada [24] tasarlanarak ana boyutları belirlenen egzoz eşanjörünün iç hacmi bir seperatör plaka yardımıyla iki eşit parçaya bölünerek literatürde kullanılan akordiyon şekli (accordion-shape), balık kılıcı şekli (fishbone-shape) ve seri plaka (serial-plate) şekli [21-23] kanatçık dizilimlerinin kullanıldığı eşanjör geometrileri tasarlanmıştır. Literatürde kanatçık yapısı için yaygın olarak kullanılan kare, dikdörtgen, üçgen ve yamuk prizma geometrilerinden farklı olarak, eşanjör içi gaz akışına direnç oluşturmaması amacı ile yağmur damlası geometrisi kullanılmıştır. Ayrıca, seperatör plakanın giriş yayıcı ağız düzlemine farklı sayılarda dikdörtgen prizma geometriye sahip akış yönlendirme kanatçıkları eklenmiştir. Kullanılan eşanjör içi kanatçık dizilimleri, yağmur damlası kanatçık geometrisi ve akış yönlendirme kanatçık sayısının kombinasyonundan oluşturulan toplam 22 adet eşanjör düzenlemesi (model) tasarlanarak HAD yöntemi ile analiz edilmiş ve optimum eşanjör düzenlemesi tespit edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışmada, Gürbüz ve Akçay [24] tarafından 190x160 mm TEM temas yüzey alanı ve 50 mm kalınlığa sahip dikdörtgen prizma şeklinde tasarlanarak 3 mm kalınlığındaki alüminyum levha malzemeden imal edilen sıcak taraf (egzoz) eşanjörünün geometrik yapısı kullanılmıştır. Egzoz eşanjöründe silindirik giriş ağızından geçen egzoz gazları, bir yayıcı ile TEM yüzey alanının oluşturulduğu dikdörtgen prizma geometriye ulaşarak çıkışta bir lüle yardımı ile silindirik egzoz borusuna bağlanmaktadır. Egzoz eşanjörü iç hacmi 3 mm kalınlığındaki seperatör plaka yardımıyla iki eşit parçaya bölünmüştür. Seperatör plakanın her iki yüzeyine yağmur damlası (YD) geometrisine sahip kanatçıklar, literatürde [21-23] akordiyon şekli dizilim, balık kılıcı şekli dizilim ve seri plaka şekli dizilim kullanılarak farklı sayı ve açılarda konumlandırılmıştır. Ayrıca, seperatör plakanın giriş yayıcı ağız düzlemine farklı sayılarda dikdörtgen prizma geometrisine sahip akış yönlendirme kanatçıkları eklenmiştir. Seperatör plaka yüzeylerinde kullanılan yağmur damlası (YD) geometrileri, egzoz eşanjörü içerisinden geçen gazlara akış direnci oluşturmayacak şekilde bir çift olarak tasarlanmış ve eşanjör akış düzlemi boyunca bir YD çifti bir sıra olarak tanımlanmıştır. Tasarlanan sıcak taraf (egzoz) egzoz eşanjörüne ait ana boyutlar, egzoz eşanjörünün kısımları, katı model resmi, eşanjörde TEM’lerin temas yüzeyinden alınan 20 adet noktanın konumu ve YD geometrisinin detayları Şekil 1’de verilmektedir. Egzoz eşanjöründe seperatör plaka yüzeylerine

YD geometrisinin akordiyon şekli, balık kılıçığı şekli, seri plaka şekli dizilimine ait teknik çizimler Şekil 2’de verilmiştir.



Yağmur damlası (YD) geometri çifti

Şekil 1. Egzoz eşanjörü ve yağmur damlası geometrisine ait teknik çizimler



Şekil 2. Separatör plaka düzleminde yağmur damlası geometrilerinin dizilimi

## 2.1. Eşanjörün HAD Modelinin Geliştirilmesi

Tasarlanan eşanjör düzenlemeleri için HAD programında oluşturulan akış hacimlerine egzoz gazlarının giriş(inlet)-çıkış(outlet) düzlemi tanıtılarak akış yönü belirlenmiştir. HAD programında velocity-formulation (hız formülasyonu) herhangi bir bağıl hız durumu söz konusu olmadığından absolute (kesin) olarak seçilmiştir [28]. Pressure-Based (basınç tabanlı) çözümleme seçilerek basınç bazlı Navier-Stokes çözüm algoritması etkinleştirilmiştir. Egzoz eşanjörünün akış analizinde HAD modeli olarak k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. k-ε türbülans modeli iki denklemlilik türbülans modelleri arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermesi açısından yaygın olarak kullanılan yarı ampirik bir modeldir [29]. Bu nedenle çalışmada k-ε türbülans modelinin kullanılması tercih edilmiştir. Ayrıca, literatürde benzer pek çok çalışmada da [20, 22, 23] k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Eşanjör malzemesi için seçilen alüminyum

malzemenin teknik özellikler HAD programının default değerleri kullanılarak yoğunluğu  $\rho = 2719$  ( $\text{kg/m}^3$ ), özgül ısı 871 ( $\text{J/kgK}$ ), termal iletkenlik 202,4 ( $\text{W/mK}$ ) olarak girilmiştir. Egzoz gazları için ise yoğunluk  $\rho=0,554$  ( $\text{kg/m}^3$ ), özgül ısı 1063 ( $\text{J/kgK}$ ), termal iletkenlik 0,049375 ( $\text{W/mK}$ ) ve viskozite  $\mu=3,22 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{kg/ms}$ ) değerleri kabul edilerek programa tanıtılmıştır. Egzoz eşanjörü içerisinde oluşan türbülanslı akışın duvar dibindeki viskoz etkilerini dikkate alabilmek için akışı domine eden faktörlere göre akış alanı bölgelere ayrılmıştır. Duvara en yakın ve viskoziteye bağlı yırtma (shear) stresinin en etkin olduğu bölge viskoz katman (viscous-sublayer) olarak tanımlanmıştır. Belirlenen akışkan özellikleri için duvardan uzaklığa olan hız dağılımı, tampon bölge (buffer-region), tam türbülanslı bölge (fully-turbulent-region) ya da log kanunu bölgesi (log-law-region) Tablo 1’de verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** Duvar dibi akış bölgeleri ve geçerli eşitlikler

$y^+$	Bölge	Geçerli denklem	Eşitlik
$0 < y^+ < 5$	Viskoz katman	$u^+ = y^+$	(1)
$5 < y^+ < 30$	Tampon bölge	-	
$30 < y^+ < 500$	Tam türbülans bölgesi	$u^+ = \frac{\ln(y^+)}{K} + C$	(2)

Burada  $u^+$  boyutsuz hızı,  $y^+$  ise boyutsuz duvar mesafesini, K Von Karman sabiti ( $\cong 0.41$ ) ve C sabit ( $\cong 5.1$ ) bir katsayıdır. Tablo 1’de verilen duvar dibine yerleştirilen ilk sayısal ağ elemanı yeterince küçük olursa  $y^+$  değeri 0-5 arasında seçilerek hassas çözümlene için bu elemanın viskoz katmanı olması sağlanır. Duvar dibinde biraz daha büyük bir sayısal ağ kullanılarak  $y^+$  değeri 30-500 arasında seçilerek duvar kanunu kullanarak çözüm gerçekleştirilir. Çalışmada kanal içi akış için  $y^+$  değeri ve reynold sayısı ise sırasıyla Eşitlik 3 ve 4 ile hesaplanmıştır. HAD kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerde Reynold sayısının tespiti sonuçların doğruluğu açısından büyük önem arz etmektedir [30].

$$\frac{\Delta y}{y^+} \cong 5.06 D_h Re^{-7/8} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (4)$$

Burada, V akışkan hızını (m/s),  $\rho$  akışkan yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu$  dinamik viskoziteyi ( $\text{kg/ms}$ ),  $\nu$  kinematik viskoziteyi ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), D karakteristik uzunluğu (çap, hidrolik çap, yüzey uzunluğu vb.),  $\Delta y$  duvar dibindeki ilk elemanın merkezine olan uzaklığını ve  $D_h$  hidrolik çapı (m) tanımlamaktadır [31].

Tasarlanan eşanjör üzerinde gerçekleştirilen HAD analizlerinde, deney motorunun 2200 d/d motor devrinde yakıt olarak benzin kullanarak gerçekleştirilen çalışmada elde edilen 650 K sıcaklık ve  $\rho \cong 0,544$   $\text{kg/m}^3$  [32] yoğunluktaki egzoz gazının debi değeri [ $\dot{m}=14,071$ ( $\text{kg/s}$ )] kullanılmıştır. Tasarlanan eşanjörün kesit alanı  $A_c = 0,006212$  ( $\text{m}^2$ ) olup buradan hidrolik  $D_h = 0,059$  (m) olarak hesaplanmıştır. Egzoz gazı debisi kullanılarak Eşitlik 5 ile akış hızı hesaplanmıştır.

$$\dot{m} = V.A_c.\rho \quad (5)$$

Akış hızı  $V \cong 4,947$  (m/s) olarak hesaplanmıştır. 650 K sıcaklık ve  $\rho = 0,544$  ( $\text{kg/m}^3$ ) yoğunluktaki egzoz gazı için  $\mu = 3,22 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{kg/ms}$ ),  $\nu = 0,421$ (m) değerleri Eşitlik 3 ve 4’de yerine yazıldığında

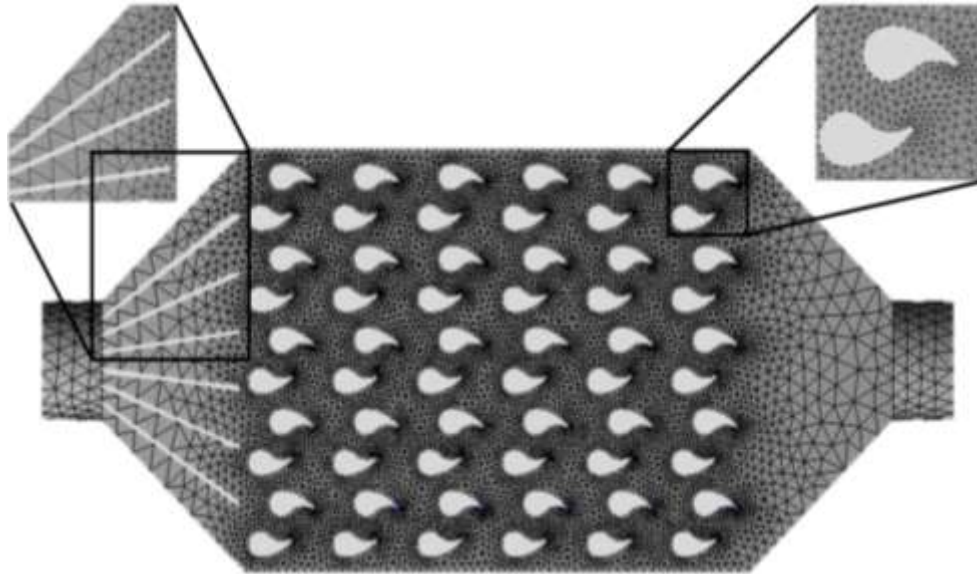
$y^+ = 5$  için  $Re \cong 4931,0221$  ve  $\Delta y \cong 8,7625 \cdot 10^{-4}$  m olarak hesaplamıştır. Elde edilen  $\Delta y$  değeri mesh (sayısal ağ) oluştururken kullanacak değer olup, programın mesh/min.-size bölümüne metre cinsinden tanımlanmıştır.

Mesh yapısında inlet ve outlet-wall olarak tanımlanan sınır koşullarının (boundary conditions) değerleri tanımlanmıştır. HAD programında giriş sınır koşulu (mass flow inlet) için  $3,9086 \cdot 10^{-3}$  kg/s değeri tanımlanmıştır. Bu değer oluşturulan akış hacminin hızını belirtmektedir. Thermal bölümünde ise 740 K'lik bir başlangıç sıcaklığı akış hacmine tanımlanmıştır. Outlet sınır şartı pressure-outlet olarak tanımlanmıştır. Wall sınır şartı için iletim (conductivity) seçilmiştir. Böylelikle adyabatik durum ortadan kaldırılmıştır. İntialization yöntemi olarak hybrid- initialization seçilmiştir. HAD programının yakınsama değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yakınsama değerleri

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

Çalışmada tasarlanan egzoz eşanjörü ve akışkan özellikleri kullanılarak hesaplanan  $\Delta y$  değeri kullanılarak mesh (sayısal ağ) yapıları oluşturulmuştur. Mesh yapısı olarak yağmur damlası geometrisinin yuvarlak katlara sahip olması nedeniyle tetrahedral mesh tercih edilmiştir. Eşanjör düzenlemesi için oluşturulan örnek mesh yapısı Şekil 3'de, verilmektedir.

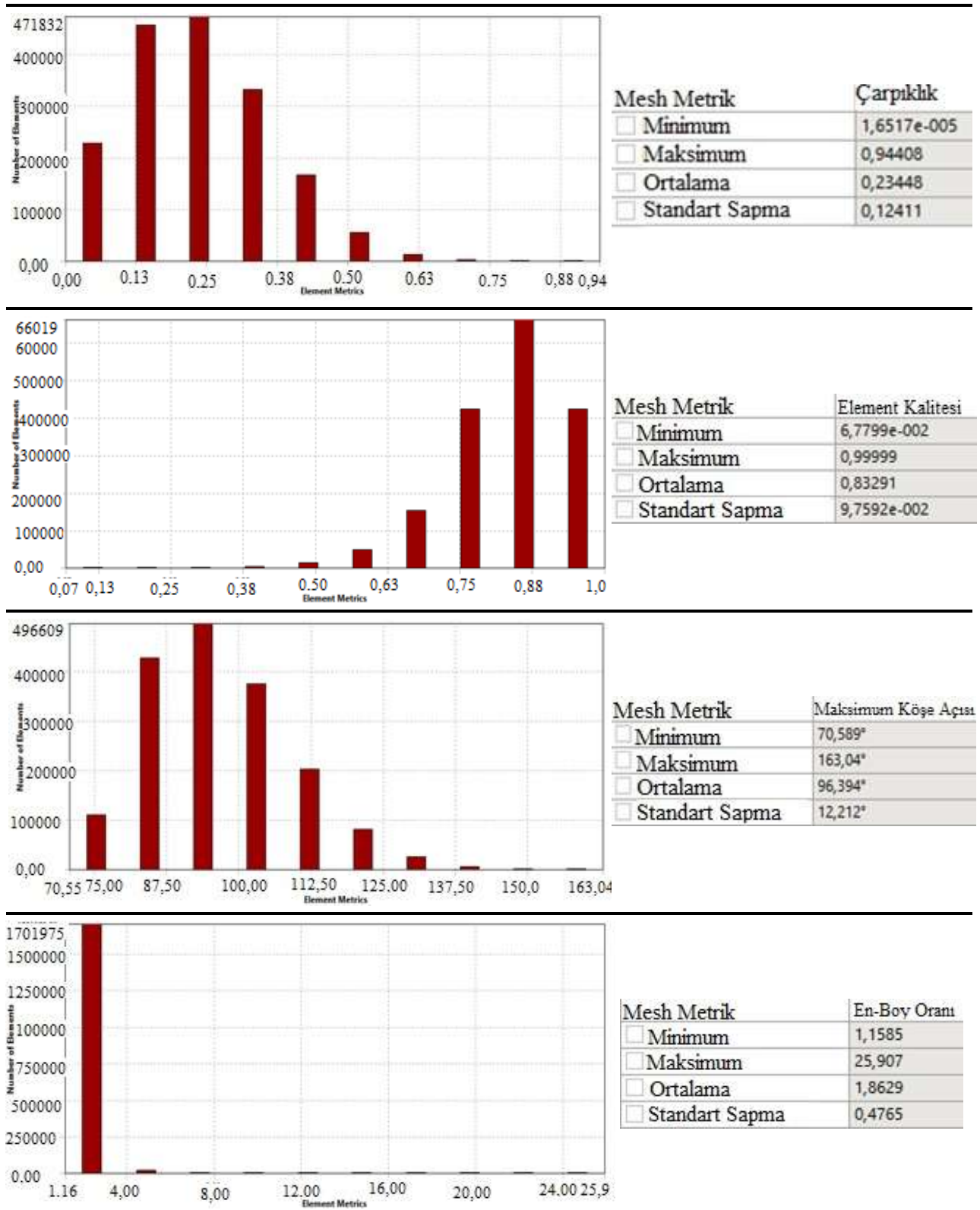


**Şekil 3.** Akordiyon şekli giriş 6 kanatlı 5 sıra YD çifti dizilimi eşanjör düzenlemesi için HAD programında oluşturulan mesh yapısı



Şekil 3’de verilen Akordiyon şekli giriş 6 kanatlı 5 sıra YD çifti dizilimi eşanjör düzenlemesi için HAD programından elde edilen mesh metrik değerleri ile maksimum, minimum ve ortalama değerleri Tablo 3’de verilmektedir.

**Tablo 3.** Mesh metrik grafikleri ve maksimum-minimum değerleri



Çalışmada, sürekli rejimde üç boyutlu ve sıkıştırılamaz akış için akışı açıklayan yönetici denklemler süreklilik denklemi, momentum denklemleri ve enerji denklemdir. Analizlerdeki yönetici



denklemlerden basınç (P) ve hız alanlarındaki (u, v ve w) bilinmeyen değişkenlerini bulmak için Eşitlik 5'deki süreklilik ve Eşitlik 6'daki momentum denklemlerinin ortak çözümü ile elde edilebilir. Isı transferi kaynaklı yoğunluk değişimlerinden dolayı oluşan sıcaklık değişkeni ise Eşitlik 7'deki enerji denklemi ile elde edilebilir. Ayrıca, türbülans etkilerini hesaplama sürecine dahil etmek üzere Eşitlik 5-6'da belirtilen standart k-epsilon denklemleri tercih edilmiştir. Standart k-ε türbülans modeli iki ayrı taşınım denkleminin çözümüne imkân vermek suretiyle türbülans hız ve uzunluk ölçeğini saptamaya izin veren en basit ve temel iki denklemlilik türbülans modelidir [21]. HAD analizlerinde egzoz akışının tamamen türbülanslı olduğu ve moleküler viskozitenin ihmal edildiği kabulü yapılarak standart k-ε modeli kullanılmıştır [22]. Tasarlanan tüm eşanjör düzenlemeleri için hesaplanan mesh yapısına ait düğüm-elman sayıları ve model numaralarının tanımlanması Tablo 4'de verilmiştir.

**Tablo 4.** Eşanjör modelleri ve HAD analizleri için hesaplanan düğüm-elman sayıları

Model	Model No	Eşanjör Geometrisi	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı
Referans	1	Boş (seperatör plakaya sahip)	78350	395899
Akordiyon şekli dizilim	2	Giriş kanatsız 1 sıra YD çifti dizilimi	80803	410321
	3	Giriş kanatsız 3 sıra YD çifti dizilimi	211817	1075474
	4	Giriş kanatsız 5 sıra YD çifti dizilimi	333213	1685011
	5	Giriş 2 kanatlı 5 sıra YD çifti dizilimi	332415	1680358
	6	Giriş 6 kanatlı 5 sıra YD çifti dizilimi	339930	1716040
	7	Giriş 6 kanatlı 5 sıra 15° açılı YD çifti dizilimi	325558	1631806
	8	Giriş kanatsız girişten çıkışa doğru artan YD çifti dizilimi	143609	703900
	Balık kılıcı şekli dizilim	9	Giriş kanatsız 3 sıra YD çifti dizilimi	331072
10		Giriş 2 kanatlı 3 sıra YD çifti dizilimi	331329	1671556
11		Giriş 3 kanatlı 3 sıra YD çifti dizilimi	205787	1001331
12		Giriş 4 kanatlı 3 sıra YD çifti dizilimi	205829	1001255
13		Giriş 6 kanatlı 3 sıra YD çifti dizilimi	331470	1669443
Seri plaka şekli dizilim	14	Giriş kanatsız düz yönlü 3 sıra YD çifti dizilimi	330970	1670732
	15	Giriş 2 kanatlı düz yönlü 3 sıra YD çifti dizilimi	331056	1669895
	16	Giriş 2 kanatlı ters yönlü 3 sıra YD çifti dizilimi	331825	1674619
	17	Giriş 6 kanatlı ters yönlü 3 sıra YD çifti dizilimi	332151	1673289
	18	Giriş 6 kanatlı ters yönlü 3 sıra 5° açılı YD çifti dizilimi	213339	1042831
	19	Giriş 6 kanatlı ters yönlü 3 sıra 10° açılı YD çifti dizilimi	324448	1624804
	20	Giriş 6 kanatlı ters yönlü 3 sıra 15° açılı YD çifti dizilimi	334387	1680415
	21	Giriş 6 kanatlı ters yönlü 3 sıra 30° açılı YD çifti dizilimi	329762	1660963
	22	Giriş 6 kanatlı ters yönlü 3 sıra 45° açılı YD çifti dizilimi	304829	1520342

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho U) = 0 \quad (5)$$

Burada  $S_m$  kaynak terimi,  $\rho$  yoğunluk,  $\vec{v}$  vektörel hızdır.

Momentum denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U) + \nabla (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + S_M \quad (6)$$

Burada  $\rho$  yoğunluk,  $U$  vektörel hız,  $\tau$  gerilme tensörüdür.

Enerji denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_{tot}) - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla (\rho U h_{tot}) = \nabla (\lambda \nabla T) + \nabla (U \tau) + U S_M + S_E \quad (7)$$

Burada,  $\rho$  yoğunluk,  $E$  entalpi,  $U$  vektörel hız,  $\lambda$  iletkenlik verimi,  $T$  referans sıcaklık,  $h$  hassas entalpi,  $\tau$  gerilme tensörü,  $S_E$  hacimsel ısı kaynağıdır. Yönetim denklemleri literatürdeki benzer çalışmalardan [21, 23] yararlanılmış olup,  $\partial/\partial t$  ise, çözümlenmeyi zamana bağlı (transient) olduğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada eşanjör yüzeyinin sıcaklık dağılımına ait akış analizleri sürekli rejimde (steady-state) gerçekleştirildiği için çözümlenmede bu ifadeler ihmal edilmiştir [33].

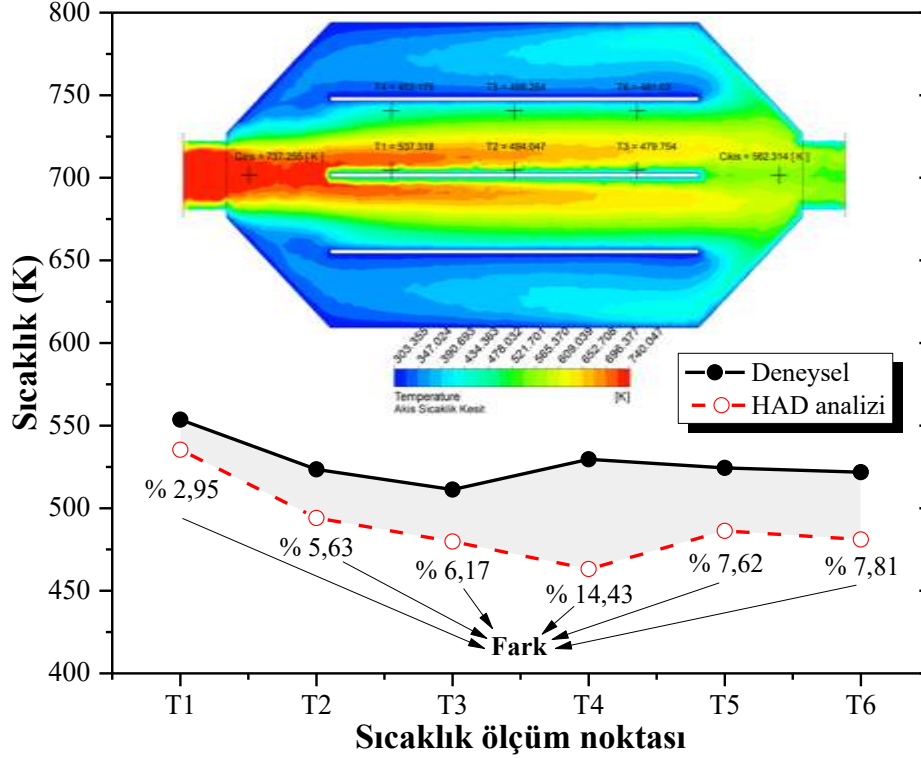
Çalışmada, tasarlanan eşanjör düzenlemeleri/modelleri (Tablo 4) için kullanılan deneysel egzoz gazı giriş sıcaklık ve debi değeri, akışkan ve eşanjör malzemesine ait özellikler, hesaplanan mesh yapısı, kullanılan analiz yöntemi, eşitlikler ve yapılan kabuller doğrultusunda gerçekleştirilen HAD analizleri ile egzoz eşanjörünün TEM temas yüzey alanı üzerinden belirlenen 20 nokta (Şekil 1) üzerinden alınan sıcaklık değerleri ve dağılımı, eşanjör içi akışa ait hız vektörlerinin dağılımı ve eşanjör içi basınç düşümüne ait konturlar elde edilmiştir.

Çalışmada TEJ'e ait sıcak taraf eşanjörü olan egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine 3x3 cm boyutlarına sahip 20 adet termoelektrik modül ve toplamda 40 adet termoelektrik modül yerleştirilerek yaklaşık 250 W'lık DC elektrik enerjisi üretimi planlanmıştır. HAD sayısal analizlerine ait sıcaklık konturları üzerinde tespit edilen 20 adet nokta her bir termoelektrik modülün orta noktasına karşılık gelmektedir. HAD sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde her bir eşanjör modeli için 20 adet noktanın maksimum, minimum, ortalama ve ortalamadan sapma değerleri dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır.

## 2.2. Deneysel Doğrulama

Çalışmada HAD analizlerinde kullanılan egzoz eşanjörü, daha önceki çalışmada [24] tasarlanarak 3 mm kalınlığındaki alüminyum levha malzemenen üretilmiştir. Mevcut eşanjör kullanılarak 476 cc hacmine sahip tek silindirik, hava soğutmalı, buji ateşlemeli motorun 2200 d/d sabit motor devrinde yakıt olarak benzin kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda motorun egzoz yoluna bağlanan egzoz eşanjörünün üst yüzeyinde seçilen 6 farklı noktadan deneyler sırasında K tipi yüzey temaslı termokuplar kullanılarak sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği motor çalışma şartlarında tespit edilen egzoz eşanjörü giriş sıcaklık ve debi değerleri kullanılarak, HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinde, deneysel çalışmalarda sıcaklık ölçümünün gerçekleştirildiği noktaların sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. HAD programı ile elde edilen sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Şekil 4'de görüldüğü gibi deneysel sıcaklık sonuçları ve HAD programı ile elde edilen sayısal analiz sıcaklık sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. İçi boş şekilde dizayn edilen egzoz eşanjöründe sıcak egzoz gazlarının eşanjör girişinden çıkışına doğru akış hattı üzerindeki  $T_1$ ,  $T_2$  ve  $T_3$  noktalarındaki deneysel ve sayısal analiz sonuçları arasındaki farkın %2,95-6,17 arasında değiştiği, eşanjör

duvarına yakın bölgelerde deneysel ve sayısal analiz sonuçları arasındaki farkın daha fazla olduğu görülmektedir. Doğrulama analiz sonuçları, çalışma kapsamında oluşturulan HAD sayısal modeli sıcaklık sonuçları ile deneysel sıcaklık sonuçları arasındaki farkın  $T_4$  noktası dışında %10'un altında olduğunu göstermektedir. Şekil 4'de verilen doğrulama çalışmalarında kullanılan deney düzeneği ve detaylı karşılaştırma yazarlar tarafından sunulan [33, 34] numaralı referanslarda detaylı olarak sunulmaktadır.



Şekil 4. Deneysel ve HAD analizinin sıcaklık sonuçlarının karşılaştırması

### 2.3. Hata Analizi

Deneysel çalışmalarda ölçüm sonuçlarının gerçek değerinden sapmasını gösteren hata analizi, ölçümlerin gerçekleştirildiği cihazların doğruluk değerleri kullanılarak gauss dağılımı kullanılarak Eşitlik 8 ile hesaplanabilir [35].

$$\Delta R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial X_1} \Delta X_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial X_2} \Delta X_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial X_N} \Delta X_N \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

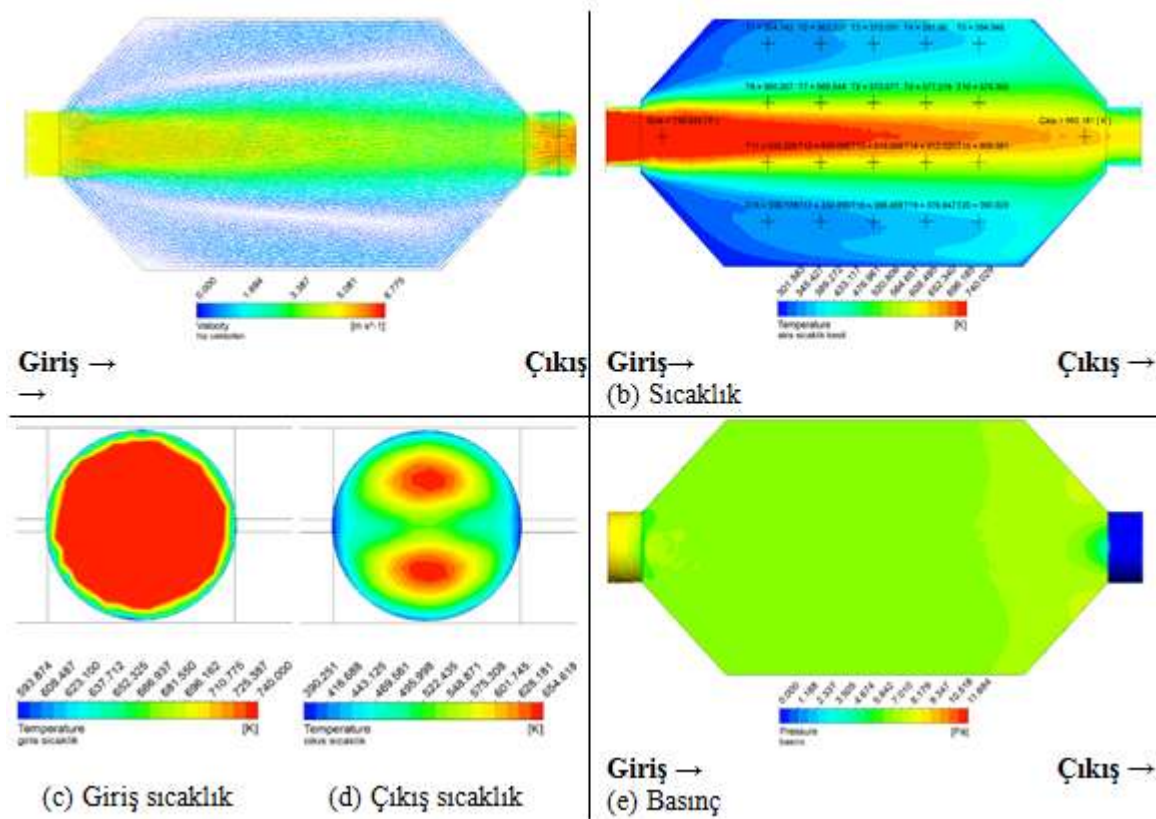
Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm cihazlarının doğruluk değerleri ve deneysel sonuçların hata analizi Tablo 5'de verilmektedir.

Tablo 5. Ölçüm cihazlarının doğruluğu ve deneysel sonuçlarının hata analizi

Parametre	Ölçüm cihazı	Doğruluğu	Parametre	Ölçüm	Hata	(%)
Motor devri	Manyetik sensör	$\pm 6$ d/d	Motor devri	2200 d/d	8 d/d	0,36
Emme havası debisi	Aalborg GFM77	$\pm 1.5\%$	Emme havası debisi	289 l/d	2,12 l/d	0,73
Egzoz gaz sıcaklığı	K tipi termokupl	$\pm 1$ °C	Egzoz gaz sıcaklığı	464°C	2,27 °C	0,49

### 3. Bulgular ve Tartışma

Referans içi boş eşanjör düzenlemesinin HAD analizleri sonucu elde edilen akış, sıcaklık ve basınç konturları Şekil 5’de verilmektedir. Şekil 5’de görüldüğü gibi eşanjör girişinde akış yönlendirme kanatları ve eşanjör içerisinde YD geometrilerinin dizilimi olmadan, eşanjör içerisinde oldukça düşük oranda basınç düşümü gerçekleşmekte olsa da eşanjör içerisine alınan egzoz gazları, giriş ağzından çıkış ağzına doğru hızla yönlenmekte ve sadece bu akış düzlemi boyunca eşanjör yüzeyine ısı aktarımı gerçekleşmektedir. Buda eşanjör yüzeyinde homojen olmayan bir sıcaklık dağılımı ortaya çıkartmaktadır.

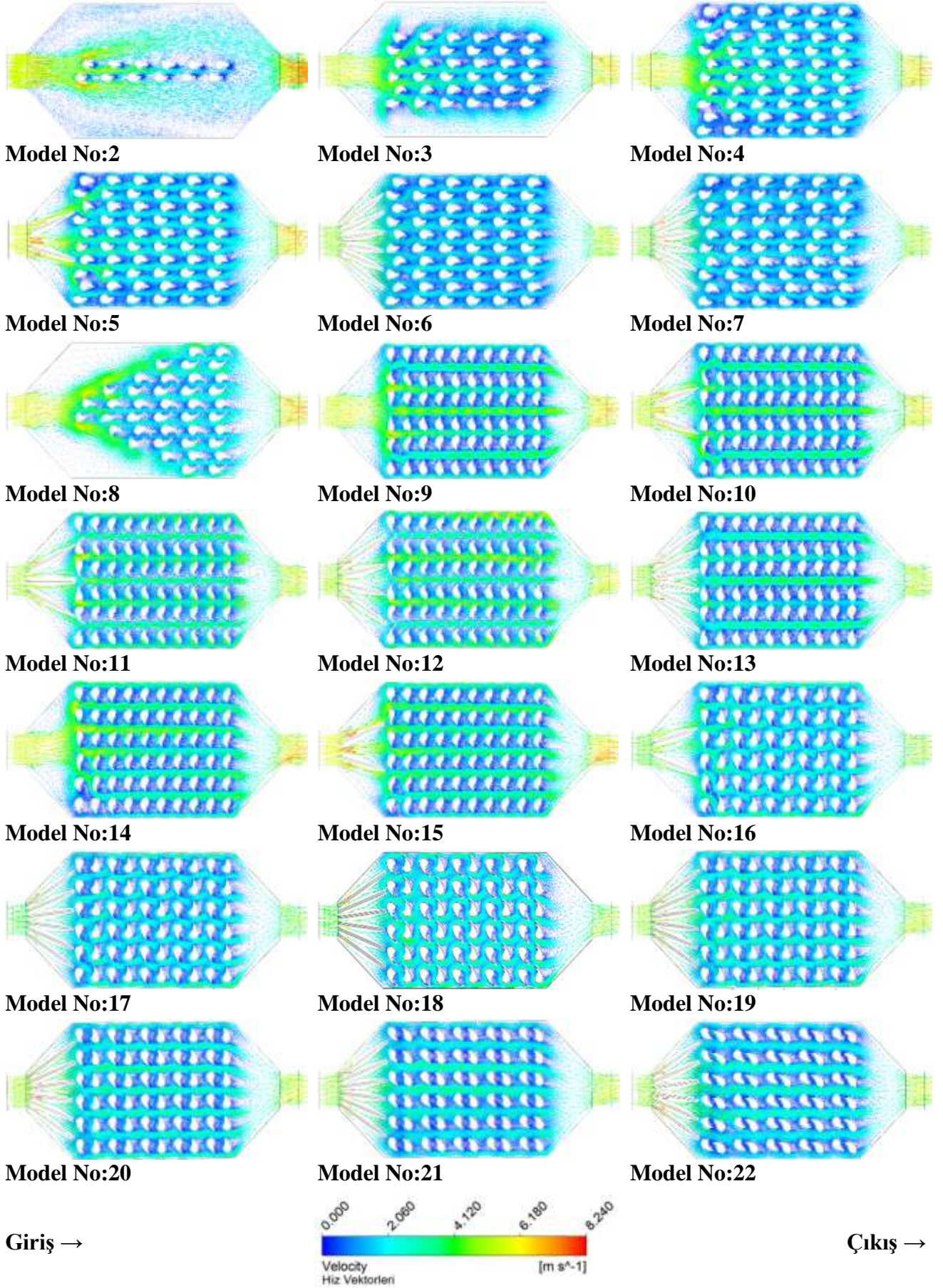


Şekil 5. Model No:1 referans içi boş eşanjörün akış, sıcaklık ve basınç analiz konturları

Tasarlanan 2-22 numaralı eşanjör düzenlemeleri (modelleri) için kullanılan YD geometrilerinin dizilimi ve girişte kullanılan kanatçık sayısına bağlı olarak eşanjör içi akış hızları ve sıcaklıkların dağılımları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’deki analiz konturlarından ayrıntılı bir şekilde görülmektedir. Şekil 6’daki akış konturlarından, eşanjör içerisindeki egzoz gazlarının akış hızlarının YD geometrileri etrafındaki geçişleri esnasındaki akış sürtünmeleri sonucu ortaya çıkan hidrolik kayıplar nedeniyle yavaşladığını görülmektedir. Ancak, YD geometrilerine akış sürtünmesi yoluyla sıcak egzoz gazlarından aktarılan ısınının, eşanjör yüzeyine taşınarak eşanjör yüzey sıcaklıklarını artırdığı görülmektedir. Bununla birlikte, kullanılan YD dizilim yöntemlerine bağlı olarak eşanjör içerisindeki akış hızları ve sıcaklık dağılımlarının değiştiği görülmektedir. Öte yandan, eşanjör girişine eklenen akış yönlendirme kanatçıklarının eşanjör girişinde akış hızlarını azaltmasına karşın eşanjörün yatay düzlemi boyunca egzoz gazlarının yayılımına katkı sağladığı görülmektedir. Eşanjör modellerinde TEM’lerin temas yüzeyinin 20 farklı noktasından alınan sıcaklık değerleri ve dağılımının incelendiği Şekil 8’de, sıcaklık konturlarından elde edilen sayısal sıcaklık değerleri, dağılımı ve ortalama değerden sapma miktarları karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

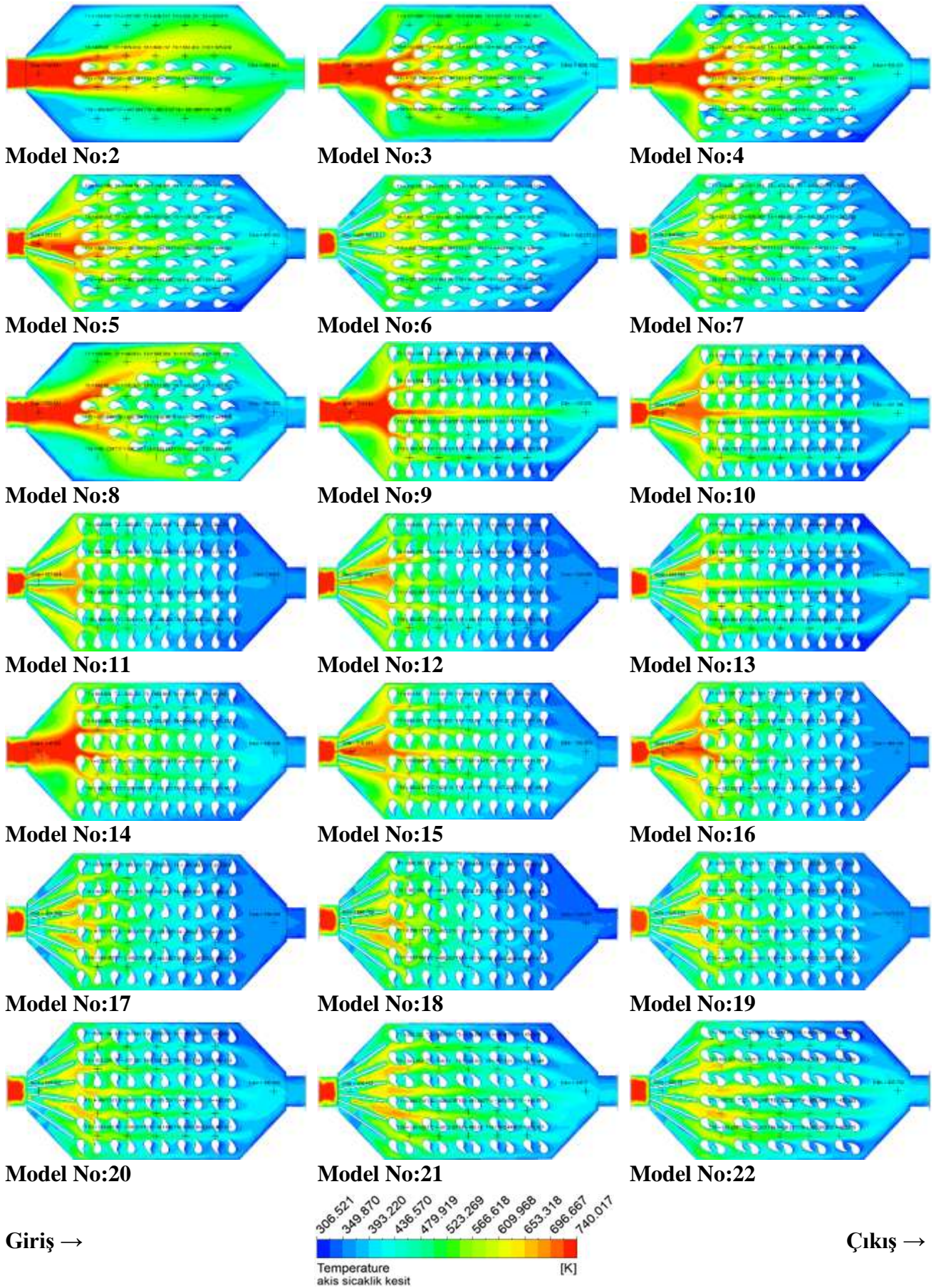
Tasarlanan eşanjör modellerinin HAD analizlerinden elde edilen noktasal sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 8’de verilmektedir.





Şekil 6. 2-22 numaralı eşanjör modellerinin akış analiz konturları





Şekil 7. 2-22 numaralı eşanjör modellerinin sıcaklık analiz konturları

Akordiyon şekli diziliminin gerçekleştirildiği eşanjör modellerinde, referans içi boş eşanjör düzenlemesine göre girişi kanatsız 1 ve 3 sıralı YD dizilimi (Model No:2 ve 3) ile sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeye taşınan ısı miktarı artmakta ve sıcaklık dağılımı daha homojen hale gelmektedir. Ancak, 5 sıralı YD dizilimi (Model No:4) ile sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeye taşınan ısı miktarı ve sıcaklık dağılımının homojenliği azalmaktadır. 5 sıralı YD diziliminde, eşanjör girişine akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi ile (Model No: 5-7) egzoz gazlarından eşanjör yüzeye taşınan ısı miktarındaki azalma devam etse de sıcaklık dağılımının homojenliği artmaktadır. Bununla birlikte, giriş kanatsız girişten çıkışa doğru artan YD çifti dizilimi (Model No: 8) ile sıcaklık dağılımının homojenliğinde ciddi bir değişim olmadan sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeyine taşınan ısı miktarı tekrardan artmaktadır.

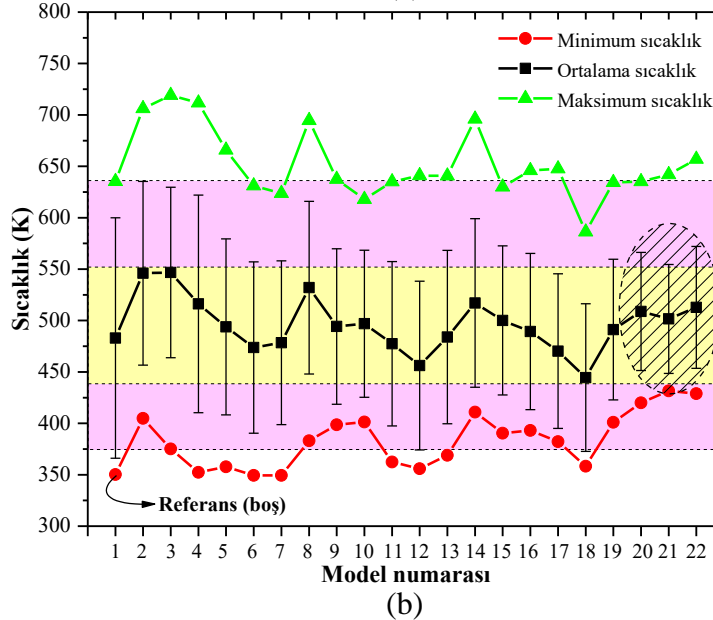
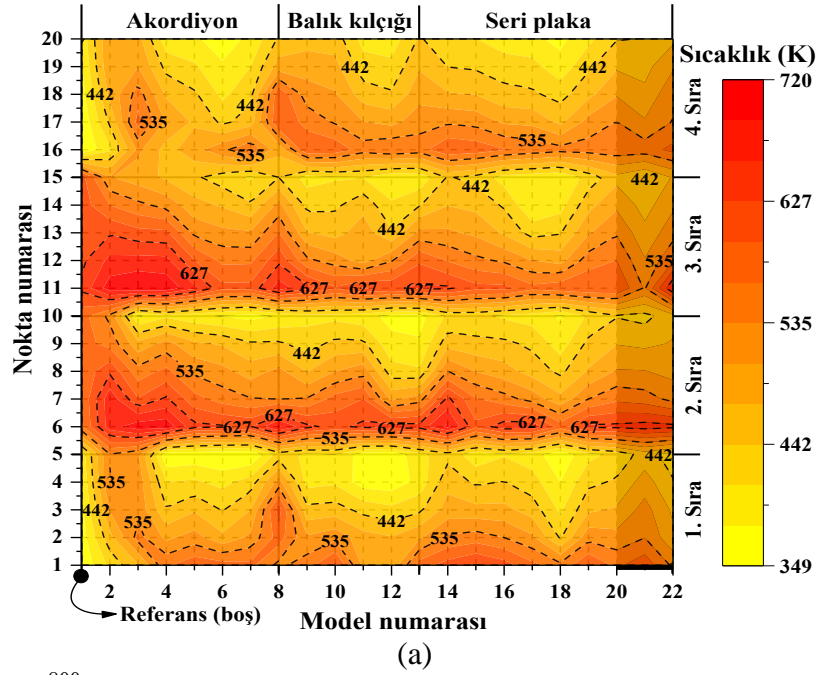
Balık kılıçığı şekli dizilimin gerçekleştirildiği eşanjör modellerinde, akordiyon şekli dizileme oranla daha homojen sıcaklık dağılımı elde edilse de sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeyine taşınan ısı miktarı azalmıştır (Model No: 9-12). Balık kılıçığı şekli dizilimde, girişte 6 adet akış yönlendirme kanatçığının eklendiği eşanjör düzenlemesi (Model No: 13) ile sıcak gazlardan eşanjör yüzeyine taşınan ısı miktarı bir miktar artsa da eşanjör girişinde 2, 3 ve 4 adet akış yönlendirme kanadının eklenmesi ile sıcak gazlardan eşanjör yüzeyine taşınan ısı miktarı azalmaktadır.

Seri plaka şekli diziliminin gerçekleştirildiği eşanjör modellerinde, başlangıçta girişte herhangi bir akış yönlendirme kanadının kullanılmadığı düz yönlü YD geometrisi dizilimine sahip eşanjör düzenlemesinde (Model No: 14) referans içi boş eşanjör düzenlemesi ve 4-13 model numaralı aralığındaki eşanjör düzenlemelerine göre sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeye daha fazla ısının taşındığı ve diğer modellere oranla kabul edilebilir seviyede sıcaklık dağılımının elde edildiği görülmektedir. Ancak hem düz yönlü hem de ters yönlü YD geometrisi diziliminde girişte 2 ve 4 adet akış yönlendirme kanatçıklarının eklenmesi (Model No: 15-18) ile sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeyine taşınan ısı miktarı azalmaktadır. Bununla birlikte, seri plaka şekli ters yönlü YD geometrisi diziliminde, girişte 6 adet akış yönlendirme kanatçığı ile birlikte YD geometrilerine açılması ile sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeyine taşınan ısı miktarı ve sıcaklık dağılımının homojenliği artmaktadır. YD geometrilerine verilen açının miktarının  $10^\circ$  den  $45^\circ$  ye artırılması (Model No:19-22) ile hem sıcak gazlardan eşanjör yüzeyine taşınan ısı miktarı hem de sıcaklık dağılımının homojenliği artmaktadır.

Çalışma kapsamında HAD analizleri gerçekleştirilen eşanjör modelleri içerisinde seri plaka şekli dizilimin gerçekleştirildiği 20, 21, 22 numaralı eşanjör modelleri ile optimum yüzey sıcaklık değeri ve dağılımı elde edilirken 20 adet noktanın standart sapma değerleri dikkate alındığında 21 numaralı seri plaka dizilimine sahip eşanjör düzenlemesinin en verimli eşanjör düzenlemesi olduğu görülmektedir.

Elde edilen bulgular, tasarlanan eşanjör geometrisi için kullanılan akordiyon şekli, balık kılıçığı şekli ve seri plaka şekli kanatçık dizilimleri arasında; sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeyine ısının aktarılması ve eşanjör yüzeyi sıcaklık dağılımı açısından kullanılan YD geometrileri için en uygun dizilimin seri plaka şekli dizilim olduğunu göstermektedir. Seri plaka şekli dizilimde, YD geometrilerinin birbiri ile ters yönde konumlandırılmasının eşanjör yüzeyine aktarılan ısı ve sıcaklık dağılımını artırdığı, girişte akış yönlendirme kanatlarına sahip ters yönlü dizilim ile birlikte YD geometrilerine verilen  $10^\circ$ - $45^\circ$  arasında verilen açının eşanjör yüzeyine aktarılan ısı ve sıcaklık dağılımına olumlu katkı sağladığı görülmektedir. Böylece, TEJ'de TEM'lerin temas yüzeyindeki sıcaklık değeri ve dağılımının aynı anda optimize edilmesi ile kullanılan TEM'ler arasında elektriksel güç dengesi sağlanarak TEM'lerin kullanım ömürlerinin artırılması ve TEJ'den daha yüksek elektriksel güç çıkışının elde edilmesi mümkün olabilecektir.

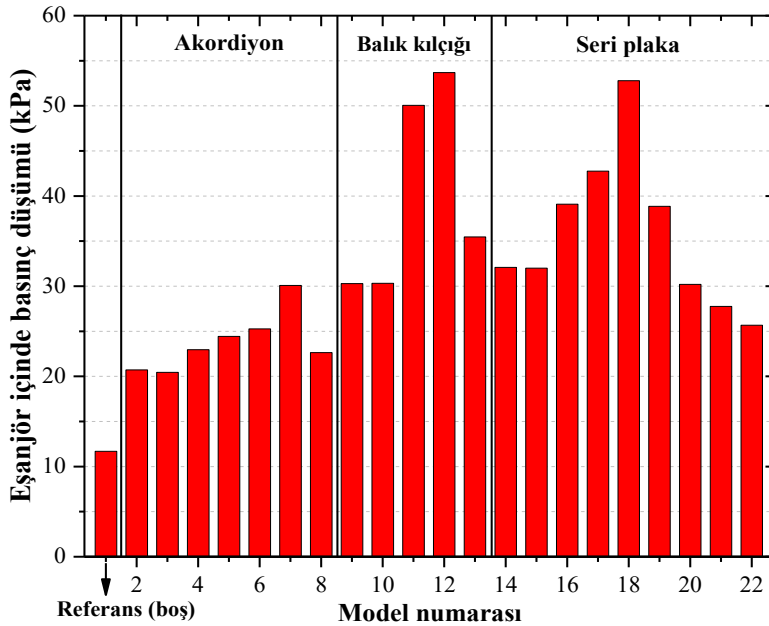




**Şekil 8.** Tasarlanan eşanjör modellerinin HAD analizlerinden elde edilen (a) noktasal sıcaklık değerlerinin dağılımı, (b) noktasal sıcaklık değerlerinin maksimum, minimum, ortalama değerleri ve standart sapmaları

Çalışmada, tespit edilen seri plaka dizilimine sahip 20, 21 ve 22 numaralı eşanjör modellerinin işi boş referans eşanjör düzenlemesine göre sırasıyla yaklaşık %5,2, %3,6 ve %5,7 ortalama eşanjör yüzey sıcaklığı sunmaktadır. Bu modellerin ortalama sıcaklık değerinden sapmaları (hata çubukları) ise, içi boş referans eşanjör düzenlemesine göre sırasıyla yaklaşık %50, %46 ve %49 olmuştur. Egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü termoelektrik jeneratörlerde kullanılan ve piyasadan temin edilebilecek termoelektrik modüller genellikle 3x3 cm veya 5x5 cm ölçülerinde olup, atık ısıdan elektrik üretim veriminin artırabilmek için birçok termoelektrik modülünün eşanjör yüzeyine dikey ve yatay olarak dizayn edilen yığınlar haline montajı gerçekleştirilir. Çalışmada tasarlanan egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine 3x3 cm boyutlarına sahip 20 adet termoelektrik modül ve toplamda 40 adet termoelektrik modül yerleştirilecek şekilde bir tasarım sağlanarak yaklaşık 250 W'lık DC elektrik enerjisi üretimi planlanmıştır. Bu nedenle, her bir termoelektrik modüle yüzeyine düşen sıcaklığın eşit dağıtılabilmesi termoelektrik jeneratörün elektrik üretim

kapasitesi ve termoelektrik modüllerini ömrü açısından oldukça önemlidir. Şekil 8 incelendiğinde, akordiyon ve balık kılıçığı şekli kanatçık dizilimin gerçekleştirildiği bazı eşanjör düzenlemelerinde (2, 3, 11 ve 8 numaralı modeller) 20, 21 ve 22 numaralı modellere göre daha yüksek maksimum, minimum ve ortalama eşanjör yüzeyi sıcaklık değerlerinin elde edilebileceği görülmektedir. Ancak bu modellerin ortalama eşanjör yüzeyi sıcaklık değerinden sapması (hata çubukları) daha yüksek olduğu için çalışma kapsamında 20, 21 ve 22 numaralı modellerin diğerlerine göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Literatürde incelenen çalışmalarda; Deng vd. [19] 2500 d/d sabit motor devrinde pirinç malzemeden tasarlanan egzoz eşanjörü ile gerçekleştirdikleri HAD sayısal analizlerinde labirent ve balık kılıçığı modellerini karşılaştırmıştır. Sayısal analizler sonucunda balık kılıçığı modelinin daha verimli olduğunu ve maksimum 550 K eşanjör yüzey sıcaklığı elde etmişlerdir. Su vd. [22] 3350 d/d sabit motor devrinde pirinç malzemeden tasarlanan egzoz eşanjörü ile gerçekleştirdikleri HAD sayısal analizlerinde akordeon, balık kılıçığı ve dağılmış kanatçık modeline sahip egzoz eşanjörlerini karşılaştırmışlardır. Sayısal analizler sonucunda akordeon tipi eşanjör düzenlemesinin daha verimli olduğunu ve maksimum 550 K eşanjör yüzey sıcaklığı elde ettiklerini belirtmişlerdir. Murali ve Ikram [23] akordeon, balık kılıçığı, seri plaka ve içi boş egzoz eşanjör modelleri üzerinde analizler gerçekleştirmiştir. Seri plaka ve akordeon şekli tasarımının diğer iki ısı eşanjöründen daha verimli olduğunu tespit ve tasarlanan eşanjörde maksimum 673 K eşanjör yüzey sıcaklığı elde etmişlerdir. Literatürde benzer çalışmalarda sunulan sonuçlara göre, termoelektrik jeneratörlerde kullanılan egzoz eşanjörü düzenlemesi için verimlilik açısından balık kılıçığı ve akordeon şekli üzerinde yoğunlaşmıştır. Mevcut çalışma sonuçları, yağmur damlası geometrisinin etkisini göstermektedir. Literatürde benzer çalışmalarda dikdörtgen geometriye sahip kanatçık yapıları ile oluşturulan eşanjör düzenlemelerinde verim açısından ön plana çıkan balık kılıçığı ve akordeon modellerinden farklı olarak mevcut çalışmada yağmur damlası geometrisi ile birlikte seri plaka düzenlemesi ön plana çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlar, egzoz eşanjörü içerisinde akışa direnç göstermeyecek geometrik yapıya sahip yağmur damlası geometrisinin uygun kanatçık düzenlemesi ile eşanjör yüzey sıcaklığının maksimum 627 K'e kadar artırılabilceğini, farklı motor çalışma şartlarında ortaya çıkacak daha yüksek egzoz gazı debisi ve eşanjör giriş sıcaklıkları ile eşanjör yüzey sıcaklığının daha da artırılabilceğini göstermektedir. Tasarlanan eşanjör modellerininin HAD analizlerinden elde edilen basınç düşümlerinin karşılaştırılması Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil 9. Tasarlanan eşanjör modellerinin HAD analizlerinden elde edilen basınç düşümlerinin karşılaştırılması

Referans içi boş eşanjör düzenlemesi tasarlanan modeller arasında en düşük basınç düşümüne sahip olmuştur. Akordiyon şekli dizilime sahip eşanjör düzenlemelerinde, eşanjör içerisindeki YD geometrisi ve girişte kullanılan akış yönlendirme kanatlarının artışı (Model No:2-7) basınç düşümünü artırmıştır. Bununla birlikte, giriş kanatsız girişten çıkışa doğru artan YD çifti dizilimi (Model No: 8) diğer akordiyon şekli dizilimlere göre, nispeten daha düşük basınç düşümüne neden olmuştur. Balık kılıcı şekli dizilime sahip eşanjör düzenlemeleri akordiyon şekli dizilime oranla daha yüksek basınç düşümüne sebep olmuştur. Eşanjör girişinde 2, 3 ve 4 adet akış yönlendirme kanadının kullanılması (Model No: 10-12) ile basınç düşümü ciddi oranda artarken 6 adet akış yönlendirme kanadının kullanılması (Model No: 13) durumunda basınç düşümündeki artış daha makul değerlerde olmuştur. Seri plaka şekli dizilime sahip eşanjör düzenlemeleri de akordiyon şekli dizilime göre daha yüksek basınç düşümlerine neden olmuştur. Seri plaka şekli dizilimde girişe akış yönlendirme kanatlarının eklenmesi (Model No: 14-18) ile basınç düşümü daha da artmıştır. Ayrıca, YD geometrilerinin ters ya da düz yönlü diziliminin (Model No: 16-18) basınç düşümü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ancak, eşanjör girişine 6 adet akış yönlendirme kanadı ile birlikte ters yönlü YD diziliminin gerçekleştirildiği eşanjör düzenlemelerinde, YD geometrilerine 5°'den fazla verilen açı ile basınç düşümü azalma eğilimine girmiştir. YD geometrilerine verilen açısının 10°'den 45°'ye artırılması (Model No:19-22) ile eşanjör içi basınç düşümü dikkate değer oranda azalmıştır.

Elde edilen sonuçlardan, tasarlanan egzoz eşanjörü geometrileri içerisinde referans içi boş eşanjör düzenlemesine sahip TEJ'in motorun egzoz yolunda kullanılması ile daha az egzoz karşı basıncı oluşturarak motorun performansını diğer modellere oranlan daha az etkileyeceği görülmektedir. Çünkü, artan egzoz karşı basıncı silindirde bir önceki çevrimden kalan artık gazların miktarının artmasına sebep olarak silindir içi dolgunu seyreltilmesi ve silindir içi yanmanın kötüleşmesi sonucunda motor performansının azalmasına, yakıt tüketimin artmasına ve egzoz emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, belirli oranda artan egzoz karşı basıncı bir önceki çevrimden silindir içinde kalan egzoz gazları içerisindeki yanmamış HC'ların tekrardan yakılmasına sebep olacağından HC emisyonlarının azalmasına neden olabilir [36].

TEJ'in etkinliğinin de dikkate alındığı bir karşılaştırmada; sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeyine ısının aktarılması, eşanjör yüzeyi sıcaklık dağılımı ve eşanjör basınç düşümü birlikte değerlendirildiğinde, TEM'in ömürleri ve TEJ'in elektriksel çıkış gücü açısından seri plaka şekli dizilimin gerçekleştirildiği 20, 21, 22 numaralı eşanjör modellerinin incelenen modeller arasında en uygun değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, 20, 21 ve 22 numaralı eşanjör modellerinin işi boş referans eşanjör düzenlemesine göre sırasıyla yaklaşık %30, %22 ve %19 daha yüksek eşanjör içi basınç düşümüne sahiptir. Buna karşın akordiyon şekli yağmur damlası geometrisi dizilimine sahip 2-6 numaralı modellerin 20,21 ve 22 numaralı modele göre daha düşük basınç düşümüne sahip olduğu görülmektedir. Termoelektrik jeneratörün elektrik çıkış verimi ve termoelektrik modüllerin ömrüne etkileyen eşanjör yüzeyi sıcaklık değeri ve sıcaklık dağılımı dikkate alındığında 2-6 numaralı modellerin veriminin daha düşük olacağı Şekil 8'den görülmektedir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında tasarımı gerçekleştirilen sıcak taraf (egzoz) eşanjörlerinin HAD analizi sonucu elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Referans içi boş eşanjör düzenlemesi ile eşanjör içerisinde düşük oranda basınç düşümü gerçekleşse de sıcak gazlardan eşanjör yüzeyine ısı aktarımı ve sıcaklık dağılımı olumsuz yönde etkinleşmiştir.
- Akordiyon şekli dizilime sahip eşanjör düzenlemelerinde, girişte akış yönlendirme kanatlarının kullanılmadığı eşanjör modelleri ile referans içi boş modele göre sıcak egzoz

gazlardan eşanjör yüzeyine ısı aktarımı ve sıcaklık dağılımı açısından avantaj sağlansa da bu modelde giriş kanatlarının eklenmesi ile ısı aktarımı ve sıcaklık dağılımı olumsuz yönde etkilenmektedir. Bununla birlikte, giriş kanatsız girişten çıkışa doğru artan YD çifti dizilimi (Model No: 8) ısı aktarımı, sıcaklık dağılımı ve basınç düşümü açısından tatmin edici sonuçlar sunmaktadır.

- Balık kılçığı şekli dizilime sahip eşanjör düzenlemeleri, referans içi boş model ve akordiyon şekli dizilime göre sıcak gazlardan eşanjör yüzeyine ısı aktarımı, sıcaklık dağılımı ve basınç düşümü açısından daha düşük performans sunmaktadır.
- Seri plaka şekli dizilime sahip eşanjör düzenlemeleri YD geometrilerine herhangi bir açı verilmeden hem ters hem de düz yönlü YD dizilimi için; referans içi boş model, akordiyon şekli dizilim ve balık kılçığı dizilime göre sıcak gazlardan eşanjör yüzeyine ısı aktarımı, sıcaklık dağılımı ve basınç düşümü açısından daha düşük performans sunmaktadır. Ancak, girişte 6 adet akış yönlendirme kanatçığının kullanıldığı ters yönlü YD dizilime sahip düzenlemede YD geometrilerine açı verilmesi ( $10^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ) ile sıcak egzoz gazlarından eşanjör yüzeyine ısı aktarımı, sıcaklık dağılımı ve basınç düşümü açısından oldukça yüksek performans sunmuştur.

Çalışma kapsamında tasarlanan eşanjör geometrileri arasında, motor performansına etkileyen egzoz karşı basıncı, eşanjör yüzeyine ısı aktarımı, eşanjör yüzeyi sıcaklık dağılımı, TEM ömrü ve TEJ elektriksel çıkış performansı açısından en uygun eşanjör düzenlemesinin seri plaka diziliminin gerçekleştirildiği Model No: 20, 21 ve 22 olduğu tespit edilmiştir. Bu üç model arasından da Model No: 21 (Giriş 6 kanatlı ters yönlü 3 sıra  $30^{\circ}$  açılı YD çifti dizilimi)'in daha uygun olduğu söylenebilir.

Konu ile ilgili gelecek çalışmalarda, eşanjör tasarımında kullanılan akordeon (according), balık kılçığı (fishbone) ve seri (serial) plaka modelleri birleştirilerek oluşturulacak kaos modelinin eşanjör yüzey sıcaklığı ve eşanjör içi basınç düşümüne etkisi HAD analizleri ile tespit edilebilir. Ayrıca, çalışma kapsamında HAD analiz sonuçları ile optimize edilen optimum eşanjör düzenlemesinin imal edilerek gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile HAD analiz sonuçlarının karşılaştırılması, mevcut çalışmanın sonuçlarının doğruluğunu artıracaktır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Doç. Dr. Habib GÜRBÜZ'ÜN danışmanlığında yürütülen ve Ahmet Baturalp ÖKMEN tarafından hazırlanan "İçten Yanmalı Motorun Egzoz Atık Isı Geri Kazanımı İçin Termoelektrik Jeneratörün HAD Analizi" başlıklı yüksek lisans tezi [33] kapsamında gerçekleştirilmiştir

## Yazar(lar)ın Katkıları

Her iki yazar da makalenin son halini okudu ve onayladı.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Kaynaklar

- [1]. Mruk A., Jordan W., Taler J., Lopata S. and Weglowski B., "Heat Transfer Through Ceramic Barrier Coatings Used in Internal Combustion Engines", SAE Technical Paper 941779, 1994.

- [2]. Haidar J., Ghojel J., “Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators”, Proceedings ICT2001 20 International Conference on Thermoelectrics (Cat. No.01TH8589), China, 413-418.
- [3]. Taymaz I., Cakir K., Gur M. and Mimaroglu A., “Experimental Investigation of Heat Losses in a Ceramic Coated Diesel Engine”, Surface and Coatings Technology, 2003: 169-170.
- [4]. Özgün H., “Termoelektrik Jeneratörlerin Çok Düşük Sıcaklıklarda Teorik ve Deneysel Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, (2009).
- [5]. Vazquez J., Palacios R., Sanz-Bobi M.A. and Arenas A., “State of the Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered from the Exhaust Gases of Automobiles,” Proceedings of the 7th European Workshop on Thermoelectrics, (2002).
- [6]. Ivankovic R., Cros J., Taghizadeh M., Martins C. A., and Viarouge P., “Power Electronic Solutions to Improve the Performance of Lundell Automotive Alternators”, New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering, InTech, Croatia, (2012).
- [7]. Yavuz C., Özkaymak M., and Kaya M., “Termoelektrik Modüllü Su Soğutucusunda Farklı Hava Debilerinin Sistem Performansına Etkileri”, e-Journal of New World Sciences Academy, 2010, 5(2): 131-143.
- [8]. Lertsatitthanakorn C., “Electrical Performance Analysis and Economic Evaluation of Combined Biomass Cook Stove Thermoelectric (BITE) Generator”, Bioresource Technology, 2007, 98(8): 1670-1674.
- [9]. Niu X., Yu J., and Wang S., “Experimental Study on Low-Temperature Waste Heat Thermoelectric Generator”, Journal of Power Sources, 2009, 188(2): 621-626.
- [10]. Liang G., Zhou J., and Huang X., “Analytical Model of Parallel Thermoelectric Generator”, Applied Energy, 2011, 88(12): 5193-5199.
- [11]. Temizer İ., İlkılıç C., Tanyeri B. and Ömer C., “Effects on Vehicle Systems of Technology Thermoelectric”, Batman University Journal of Life Sciences, 2012, 1(2): 199-209.
- [12]. Kunt M. A., “İçten Yanmalı Motor Atık Isılarının Geri Kazanımında Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı”, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2016, 3(2): 192-203.
- [13]. Bass J. C., Elsner N. B., and Leavitt F. A., “Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines,” AIP Conference Proceedings, USA, 295-298, (1994).
- [14]. Kobayashi M., Ikoma K., Furuya K., Shinohara K., Takao H., Miyoshi M., Imanishi Y. and Watanabe T., “Thermoelectric Generation and Related Properties of Conventional Type Module Based on Si-Ge Alloy”, Fifteenth International Conference on Thermoelectrics, USA, Proceedings ICT, (1998).
- [15]. Ikoma K., Munkiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Komatsu H. and Shinohara K., “Thermoelectric Generator for Gasoline Engine Using Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Modules”, J. Japan Inst. Met., 1999, 63(11): 1475-1478.
- [16]. Thacher E. F., Helenbrook B. T., Karri M. A. and Richter C. J., “Testing of an Automobile Exhaust Thermoelectric Generator in a Light Truck”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007, 221 (1): 95-107.
- [17]. Hsiao Y., Chang W. and Chen S., “A Mathematic Model of Thermoelectric Module with Applications on Waste Heat Recovery from Automobile Engine”, Energy, 2010, 35, (3): 1447-1454.
- [18]. Hsu C. T., Huang G. Y., Chu H. S., Yu B. and Yao D. J., “Experiments and Simulations on Low-Temperature Waste Heat Harvesting System by Thermoelectric Power Generators”, Applied Energy, 2011, 88(4): 1291-1297.
- [19]. Deng Y. D., Liu X., Chen S. and Tong N. Q., “Thermal Optimization of the Heat Exchanger in an Automotive Exhaust-Based Thermoelectric Generator”, Journal of Electronic Materials, 2013, 42(7): 1634-1640.

- [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]. Bai S., Lu H., Wu T., Yin X., Shi X. and Chen L., “Numerical and Experimental Analysis for Exhaust Heat Exchangers in Automobile Thermoelectric Generators”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2014, 4: 99-112.
- [22]. Su C., Wang W., Liu X. and Deng Y., “Simulation and Experimental Study on Thermal Optimization of the Heat Exchanger for Automotive Exhaust-Based Thermoelectric Generators”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2014, 4: 85-91.
- [23]. Murali G., Vikram G., “A Study on Performance Enhancement of Heat Exchanger in Thermoelectric Generator Using CFD”, *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2016, 2(10): 128-133.
- [24]. 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.
- [25]. Akçay, H., Gürbüz, G., Demirtürk, S. ve Topalcı, Ü. “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.
- [26]. Topalcı, Ü., Gürbüz, H., Akçay, H. ve Demirtürk, S. "Egzoz Atık Isı Geri Kazanımının Gerçekleştirildiği Termoelektrik Jeneratörde Farklı Yarı İletken Malzeme Performansının Teorik Analizi", *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 2020, 8, 588-600.
- [27]. Topalcı, Ü., Gürbüz, H., Akçay, H. ve Demirtürk, S. “Buji Ateşlemeli Bir Motorda Egzoz Atık Isı Geri Kazanımı İçin Termoelektrik Jeneratör Modelinin Geliştirilmesi”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2020, 8(2): 582-596.
- [28]. Bağatur, T., Can Ö. F., “Numerical Investigation of Nappe Flow Regime in Stepped Spillway”, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2018, 5(3): 856-861.
- [29]. Kaya, F., Karagöz İ., “Girdaplı Akışlarda Türbülans Modellerinin Uygunluğunun İncelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2007, 2(1), 85-96.
- [30]. Bayındırlı, C., “Drag Reduction of a Bus Model by Passive Flow Canal,” *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 2019, 6(1), 24-30.
- [31]. Soğancı S., Hepkaya E., İnci U.İ., Gargı Y., Erman C., Elmas Z. ve Tutkun M.O., “Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)”, Ankara: TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, (2018).
- [32]. Perry, R.H., Green, D.W., “Perry's Chemical Engineers' Handbook/ 9th Edition”, McGraw-Hill, New York, (1984).
- [33]. Ökmen A.B., “İçten Yanmalı Motorun Egzoz Atık Isı Geri Kazanımı İçin Termoelektrik Jeneratörün HAD Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Isparta, (2020).
- [34]. Ökmen A. B. and Gürbüz H., “Atık Isı Geri Dönüşüm Sistemleri: Buji Ateşlemeli Motorda Örnek Bir Uygulama,” *EJONS International Journal of Mathematic, Engineering and Natural Sciences*, 2020, 4 (14): 158–177.
- [35]. Gürbüz, H., “The Effect of H<sub>2</sub> Purity on the Combustion, Performance, Emissions and Energy Costs in an SI Engine,” *Thermal Science*, 2020, 24(1): 37-49.
- [36]. Özcumalı, R.U., “Biyodizelin Bir Gemi Dizel Motorunun Egzoz Emisyon Karakteristiklerine Olan Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).