



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **ELEKTRONİK CİHAZLARIN SOĞUTULMASININ FARKLI TÜRBÜLANS MODELLERİ VE DUVAR YAKLAŞIMLARI İLE CFD SİMÜLASYONU**

**FUAT TAN  
AHMET SERHAN CANBOLAT  
BURAK TÜRKAN  
BAHADIR ERMAN YÜCE  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ**



# ELEKTRONİK CİHAZLARIN SOĞUTULMASININ FARKLI TÜRBÜLANS MODELLERİ VE DUVAR YAKLAŞIMLARI İLE CFD SİMÜLASYONU

Fuat TAN  
Ahmet Serhan CANBOLAT  
Burak TÜRKAN  
Bahadır Erman YÜCE

## ÖZET

Bu çalışmada elektronik sistemlerin soğutulması hakkında kısaca bilgi verildikten sonra iki ve üç boyutlu olarak elektronik devre kartını simüle eden dört adet yonganın zorlanmış taşınım soğutulmasının hız ve sıcaklık dağılımları Fluent programında nümerik olarak incelenmiştir. Sürekli rejimde ve sıkıştırılmaz akış kabulü ile yapılan analizlerde farklı türbülans modellerinin ve duvar yaklaşımlarının çözüme olan etkileri değerlendirilmiştir. Sistemde sabit ısı akısı kabulü yapılmıştır. Ansys Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak elektronik sistemlerinin soğutulması için yapılan analizlerde farklı türbülans modellerinin ve duvar yaklaşımlarının karşılaştırılması yapılmış, bu alanda çalışma yapacak araştırmacılara uygun türbülans modeli ve duvar yaklaşımı seçiminde kaynak oluşturulması amaçlanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Elektronik soğutma, HAD, Ansys, Zorlanmış taşınım.

## ABSTRACT

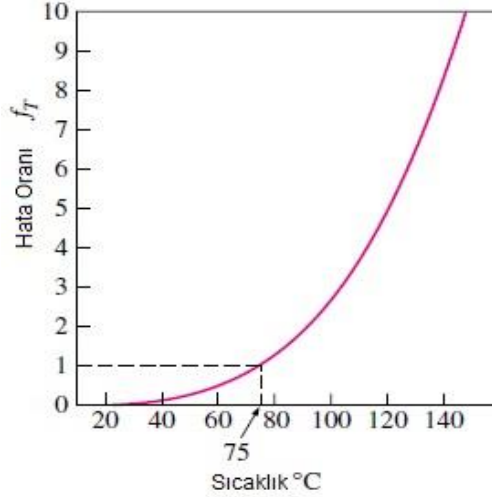
In this study, after giving brief information about the cooling of the electronic systems, the velocity and temperature distribution of the four chip that simulates two and three-dimensional electronic circuit board for the forced convection cooling are investigated numerically in Fluent. The impacts to the solutions for the analysis which conducted with steady and incompressible flow were investigated under different turbulence models and wall approach. Constant heat flux was adopted in the system. Some information is given about the Ansys Fluent computational fluid dynamics (CFD) software. The data obtained from the studies were analyzed. As a result, the comparison of different turbulence models and wall approach in the analysis conducted for the cooling of electronic systems was made and to create the source for the choice of suitable turbulence model and the wall approach was targeted for researchers who work in this area.

**Keywords:** Electronics cooling, CFD, Ansys, Forced convection.

## 1. GİRİŞ

Elektronik alanındaki hızlı gelişmeler, günlük hayatımızı önemli derecede etkilemektedir. Elektronik cihazlar oyunculardan yüksek güçlü bilgisayarların uygulama alanlarına kadar modern yaşamın her alanına girmiştir. Elektronik cihazların minyatürleştirilmesi birim hacim başına üretilen ısı miktarında

belirgin bir artışa neden olmuştur. Bu yüzden elektronik sistemler düzgün şekilde tasarlanmaz ve kontrol edilmezse ısı üretiminin yüksek oranları ve artan kullanım sıcaklıkları emniyet ve güvenilirlik için tehlike oluşturmaktadır. Elektronik cihazların hata oranı sıcaklıkla orantılı olarak artmaktadır. Bu yüzden termal kontrol; elektronik cihazların tasarımı için önemli hale gelmektedir. Yüksek çalışma sıcaklıklarında oluşabilecek performans azalmasını önlemek için elektronik cihazların uygun tasarlanması gerekmektedir. Bu gerçek ile soğutma sistemlerinin geliştirilmesi ve yeni araştırmaların yapılması önem arz etmektedir.[1]



**Şekil 1.** Hata Oranının Sıcaklığa Bağlı Değişimi[22]

Literatürde bu konuda yapılmış oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. Can ve Pulat [2] çalışmalarında elektronik cihazların, çarpan hava jetleri kullanılarak soğutulmasını incelemiş, ilk yatırım ve işletim harcamalarını, lüle tasarımı ve ihtiyaç duyulan fan gücüne bağlı olarak ifade ederek optimizasyon ilkelerini sunmuşlardır. Poulikakos ve Wietrzak [3] mikroelektronik bir cihazın zorlanmış taşınım soğutulması için türbülanslı akışta sayısal bir çalışma yapmışlardır. Akış, sıkıştırılmaz, daimi ve iki boyutlu olarak ele alınmış ve  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada eşlenik (iletim+taşınım) ısı transferi etkileri incelenmiş ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Igarashi ve Takasaki [4] tarafından yapılan çalışmada laminer bir sınır tabaka içine yerleştirilmiş iki boyutlu dikdörtgen bir blok etrafındaki akış ve ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada akış, blok yüksekliğinin sınır tabaka kalınlığına oranına ve Reynolds sayısına bağlı olarak üç tipe ayrılmıştır. Bunlar, laminer, ayrılma ve yeniden birleşme tipi akışlardır. Çalışmada her yüzdeki ortalama Nusselt sayısı ifadeleri çıkarılmıştır. Zahn ve arkadaşları [5] tek bir seramik mikroelektronik paketin soğutulmasını üç boyutlu sürekli laminer akış şartlarında Ansys-Flotran programını kullanarak analiz etmişlerdir. Elde edilen nümerik sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu rapor edilmiştir. Sözbir ve ark.[6] elektronik sistemlerin ısı taşınımı ile soğutulmasının genel bir değerlendirmesini yapmışlardır. Bu çalışmada elektronik sistemlerin soğutulmasının önemi anlatılmış olup hava ve sıvı ile soğutma hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca doğal taşınım ve zorlanmış taşınım ile elektronik sistemlerin soğutulmasının karakteristik özellikleri de kısaca açıklanmıştır. Kılıçarslan ve ark.[7] elektronik yonga dizilişlerinin zorlanmış taşınım soğutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında iki farklı dizilişteki yongalar soğutma performansı açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada yongalar iki paralel levha arasında alttaki üzerine monte edilmiştir. Bu deney sonucunda kanal ve yonga dizilişlerinin elektronik sistemlerin soğutulmasında taşınım ile ısı transferi için önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır. Zhao ve Lu [8] bir mikro kanalda zorlanmış taşınım ile olan ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında yonga üzerinde kanatçık ve gözenekli ortam olmak üzere iki durumu incelemişlerdir ve Nusselt sayısı üzerine ısı iletim katsayısını ve kanal geometrisinin etkilerini belirlemişlerdir. Sonuçları, sabit ısı akısı ve sabit yüzey sıcaklığı şartları için test etmişlerdir. Etemoğlu ve ark.[9] yaptıkları çalışmada elektronik sistem soğutulmasında bir yongayı simüle eden tek bir blok üzerindeki akış ve sıcaklık dağılımlarını hesaplamışlardır. Analizler laminer ve türbülanslı akış için yapılarak Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığı görülmüştür. Cammarata ve ark. [10] yaptıkları nümerik çalışmada elektronik sistemi çevreleyen havanın termal davranışının ve akış alanının modellenmesi için Navier Stokes denklemleri ve enerji denklemlerini çözmüşlerdir. Elektronik cihazlar

için kritik soğutma koşullarının araştırılmasına katkıda bulunmaktadır. Aradağ ve ark. [11] çalışmalarında elektronik sistem soğutması için vortex hızlandırıcı kullanmışlardır. İki kısım halinde nümerik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. İlk kısımda ısı taşınım katsayısı ve maksimum sıcaklık elektronik devrenin laminer akışta soğutulmasında elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise iki ısı kaynağı arasındaki uzaklığın etkisi incelenmiştir. İki farklı tip girdap hızlandırıcıların sistemdeki maksimum sıcaklığı azalttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak üçgen girdap hızlandırıcıların dikdörtgen hızlandırıcılarından daha fazla maksimum sıcaklığı azaltabildiği görülmüştür. Weng ve ark. [12] elektronik soğutmada faz değiştiren ısı borusunun termal performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Isı borusu adyabatik olarak faz değiştiren malzeme ile kaplanarak buharlaştırıcının ısıtma gücüne ve yoğuşturucu fan hızına bağlı termal enerji açığı çıkarılmıştır. Sıcaklık dağılımlarının bulunmasında deneysel araştırmalar yapmışlardır. Balaji [13] çalışmasında taşınabilir elektronik sistemlerde faz değişimi olan malzemenin kullanıldığı kanatlı ısı alıcılarının performansını deneysel olarak incelemiştir. Termal iletkenliği düşük olan alüminyum malzemesi kullanarak deneyleri gerçekleştirmiştir. Farklı ayar noktası sıcaklıkları ve gizli ısı faz durumu için çalışma süresinin artırılmasında farklı güç seviyesinde farklı tür kanatların etkisi araştırılmıştır. Yang ve Wang [14] yaptıkları çalışmada faz değişim malzemesinin soğutulmasını nümerik olarak incelemişlerdir. Kontrol hacmi için korunum denklemlerini sonlu eleman metodunu kullanarak çözmüşlerdir. Son olarak oluşturdukları teorik modelin sonuçlarını deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Zhou ve Yu [15] termoelektrik soğutma sistemlerinin optimizasyonu için teorik bir model oluşturmuşlardır. Sistemin sıcak ve soğuk tarafındaki termal iletkenliği hesaba katmışlardır. Analiz sonuçlarında maksimum performans katsayısı ve maksimum soğutma kapasitesine, sonlu termal iletkenliğinin optimum elde edilebilir olduğu anda ulaşıldığını görmüşlerdir. Saenen ve Baelmans [16] çalışmalarında mikrokanal soğutucu kullanan iki fazlı soğutma sistemleri için nümerik model geliştirmişlerdir. Sonlu hacim ayrıklaştırması ve Simple algoritması, kütle momentum ve enerji korunum denklemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Mancin ve ark. [17] yaptıkları çalışmada aviyonik uygulamalarda elektronik termal yönetimi için mini buhar çevrim sisteminin deneysel analizini yapmışlardır. Su soğutmalı minyatür ölçekli soğutma sistemi yeni tip kompresör tiplerinde de kullanılan R134a kullanılmaktadır. Jeng ve Theng [18] sıvı soğutma sisteminin avantajlarını ve buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminin (VCRS) avantajlarını birleştiren hibrid soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Çeşitli deneysel parametreler altında ısıtma modülü yüzey sıcaklığı ve pompalama güç tüketimi, hibrid soğutma sisteminin kullanılabilirliğini ve performansını test etmek amacıyla ölçülmüştür. Yaptıkları deney çalışmaları sonucu sıvı, VCRS ve hibrid soğutma sistemlerinin maksimum soğutma kapasitelerinin sırası ile 450W, 270W ve 540W olduğu görülmüştür. Xu ve ark. [19] çalışmalarında spreyci soğutma sisteminde ısı transferini artırmak için entegre bir sistem geliştirmişlerdir. Sistemleri soğutma çevrimine ve soğutucu akışkan olarak izobütan (R600) kullanımına dayanmaktadır. Deneysel olarak yüzey sıcaklığı, ısı taşınım katsayısı ve yüzey sıcaklık dağılımlarını incelemişlerdir. Enescu ve Virjoghe [20] yaptıkları çalışmada son zamanlarda yayınlarda öne çıkan termoelektrik soğutma cihazları performansını etkileyen parametrelerin formülasyonunu incelemişlerdir. Soğutma kapasitesi ve soğutma performans katsayısı (COP) ele alınan özelliklerden öne çıkanlarıdır. Khaleduzzaman ve ark. [21] yaptıkları deneysel çalışmada soğutucu akışkan olarak nano sıvı kullanarak dikdörtgen şekilli mini kanalın soğutulmasının enerji ve ekserji analizini incelemişlerdir. Ekserji kazancının nanopartiküllerin hacim fraksiyon artışı ile arttığını ve akış hızının yükselmesi ile azaldığını tespit etmişlerdir. İkinci yasa (ekserji) verimliliğinin nanosıvı hacim fraksiyon artışı ile yükseldiği görülmüştür. Son olarak sürtünme faktörünün akış hızının artışı ile azaldığı ve nanopartiküllerin hacim fraksiyonlarının artışı ile doğru orantılı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

## 2. ELEKTRONİK SİSTEMLERİN SOĞUTULMASI

Yonga tek kristal silikonun bir dikdörtgen dilimi olup, mikroskobik elektronik devre içermektedir. Bir modül birden fazla yonga içerir. Baskı devre kartları üzerine monte edilmiştir. Sistem de devre kartlarından oluşmuştur.

Mikroelektronik elemanların aynı ısı akısında yüzey sıcaklıklarının 50-100°C arasında olması güvenilirliği, ideal fiyatı ve üniformluğu sağlamaktadır. Elektronik teknolojisindeki hızlı gelişmeler için akışkanlar mekaniği, ısı transferi, mikroelektronik ve kontrol teknolojisi alanındaki bilgilere ihtiyaç

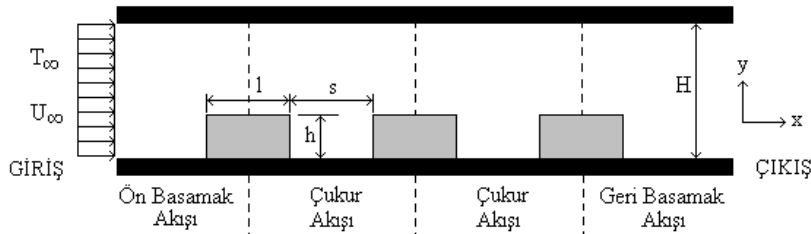
duyulmaktadır. Entegre devreler ilerleyen teknoloji ile gitgide küçülmektedir. Bu durum ısı akılarının artmasına neden olmaktadır. Termal kontrol ile güvenliğin sağlanması için elemanların sıcaklığının müsaade edilen değerlerde tutulması gerekmektedir. Isınmayı engellemek için iç ve dış etkilerin azaltılmasını sağlayacak uygun bir soğutma metodu kullanılmalıdır.[6]

## 2.1. Elektronik Sistemlerin Termal Tasarımı

Elektronik elemanların termal kontrolü, ısı transferinin uygulanmasında başlıca alanlardan biri olmuştur. Elektronik elemanların soğutulması işleminde güvenilirlik derecesini sağlamak için sınırlanan maksimum ve minimum eleman sıcaklığına önem verilmesi gerekmektedir. Optimum performansı elde etmek için parçalar arası sıcaklık farklı en aza indirilmelidir. Elektronik elemanların ısı direncini azaltıp uygun soğutma koşulları sağlanmalıdır.

İncelemek üzere alınan sistem tek bir yongadan (chip) oluşabileceği gibi birden fazla yongadan da oluşabilir. Her iki durumda da yonga veya yongalar baskı devre üzerine, baskı devreyle aynı hizada olacak şekilde ya da baskı devre üzerinde çıkıntı oluşturacak şekilde monte edilebilirler. Buradan hareketle, gerçek sisteme benzer olarak, fiziksel sistemdeki yongaları simüle eden bloklar, düzlem levha üzerinde modellenenlerdir. Böylece birer ısı kaynağı olan ve levhalardan biri üzerine monte edilmiş bloklar için, iki paralel levha arasındaki akış halinde ısı transferi analizi yapılabilir. Bloklarda ve blokların monte edildiği levhada iletimle olan ısı transferi önemli ise analize bu etkinin de ilave edilmesi gerekmektedir ve o zaman bu özel ısı transferi analizi “eşlenik (conjugate)” ısı transferi analizi olarak adlandırılmaktadır. Çünkü bloklarda üretilen ısının bir bölümü, taşınım yanında iletimle çekilmektedir. Birinci durumda ısıtılmış bloklardan olan ısı kaybı sadece soğutucu akışkana taşınım ile, ancak monte edildiği levhaya iletimle olmaktadır. Bundan dolayı elektronik devreler tasarlanırken devrelerle birlikte, bu devrelerin yapıldığı malzemeler ve monte edildiği plakaların yapıldığı malzemeler de önem kazanmaktadır.

İki paralel levhadan alttaki düzlem levha üzerine monte edilmiş bloklar etrafındaki akış, tam gelişmiş akış bölgesinde olabileceği gibi gelişmekte olan akış bölgesinde de olabilir. Şekil 2’de akış bölgeleri ve ısı transferi analizinde kullanılan geometrik boyutlar gösterilmektedir.



Şekil 2. Akış bölgeleri ve geometrik büyüklükler [9]

Burada geometrik büyüklükler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$\frac{h}{H}$  = Blok yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranı (Blokaj oranı)

$\frac{l}{H}$  = Blok uzunluğunun blok yüksekliğine oranı (Paket görünüş oranı)

$\frac{h}{H-h}$  = Kanal genişleme oranı

$\frac{s}{l}$  = Bloklar arası mesafenin blok uzunluğuna oranı

Günümüzde elektronik sistemlerin sıcaklık kontrolü güvenilirliği açısından çok önemlidir. Çalışma sıcaklığı ve termal dayanıklılık elektronik sistemlerde zaman zaman sorunlara yol açmaktadır. Bu yüzden üretici firmaların çoğunluğu aşağıdaki yöntemleri uygulamak durumundadır.

1.Ampirik tahmin metodları

2.Endüstriyel standartlara dayalı hızlandırılmış testler (simülasyon programları)

Farklı elektronik cihazlar için hata oranının ampirik tahminleri, değişken olan özelliklerin sabit kabul edilmesine dayanır. Endüstriden elde edilen veriler bu modellerin geliştirilmesinde ve doğrulanmasında kullanılır.

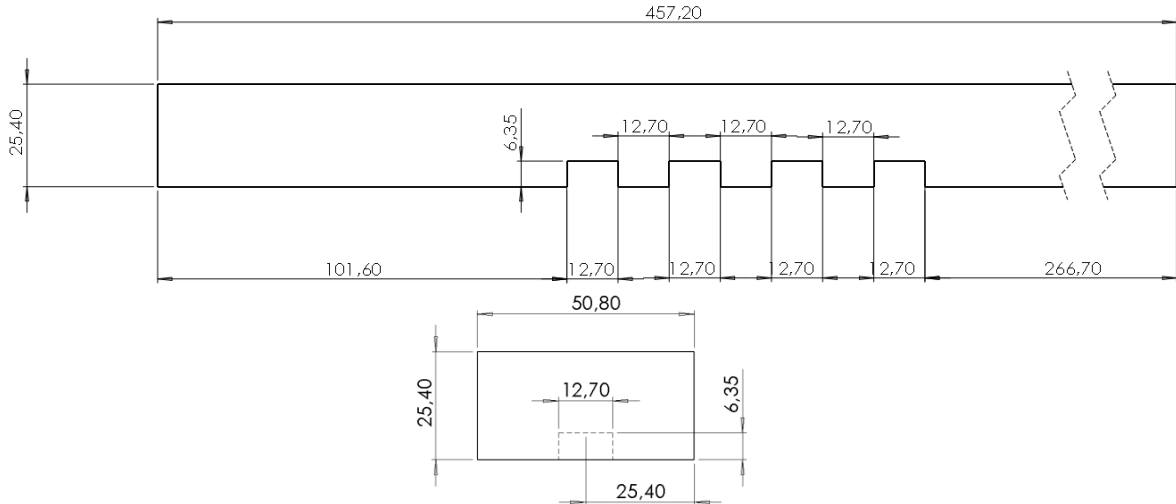
Hızlandırılmış testler ise genellikle potansiyel başarısızlık mekanizmalarını tanımlamak için sanayi tarafından üstlenilmiştir. Yapılan testlerin amacı gerçek koşullarda daha yüksek sıcaklıklarda sistemin dayanıklı olup olmayacağını anlamaktır. Bu testler ile ürünün güvenilirliği zaman ve maliyet azaltılarak sağlanmış olur. Ancak tasarımın daha hızlı yapılması, zayıflıkların giderilmesi ve yeni teknolojilere daha hızlı uyumun sağlanması için görsel programlara ihtiyaç duyulmaktadır.[23] Simülasyon ile modelleme fiziksel durumu tanımlamak için kullanılan kısmi diferansiyel denklemlerinin çözülmesi esasına dayanır. Yazılım programları elektronik sistem soğutmasında akış alanı için oluşturulan süreklilik, enerji ve momentum denklemlerinin çözümüne olanak sağlar.

Yazılım teknolojilerinin şirketlere sağladığı yararlar şu şekildedir;

- Ürün tasarlanmadan önce hata tahmini sağlanır.
- Fiziksel ürün boyutları optimize edilerek model minimum maliyete tasarlanabilir.
- Kalite ve performansın geliştirilmesine olanak sağlanır.
- Optimum özellikleri önceden tahmin edilebilir.
- Ürünün daha erken zamanda piyasaya çıkartılması mümkün olabilir.

### 3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE SİSTEM ANALİZİ

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan Ansys'in Fluent modülü kullanılarak sistem modellenmiş ve çözülmüştür. Sistem kabulleri akışın sıkıştırılmaz, iki boyutlu ve sürekli rejimde olduğu şeklindedir. Farklı türbülans modellerinin çözüme olan etkisi araştırılırken ayrıca mümkün olduğunca fazla duvar yaklaşımı denenmiştir. İncelenecek geometrinin hem iki boyutlu hem üç boyutlu hali Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3. Analizlerin yapıldığı 4 yongalı model

#### 3.1. Kartezyen Kordinantlarda Sıkıştırılmaz Akış İçin Korunum Denklemleri

##### Süreklilik Denklemi

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

**Momentum Denklemleri (x,y ve z yönü)**

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

**Enerji Denklemi**

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Burada x,y ve z koordinatlarındaki kanal içi akışa ait süreklilik denklemlerinde;

$\rho$ : yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )

u,v ve w: sırası ile x,y ve z yönündeki hızlar (m/s)

p: basınç (Pa)

$\mu$ : viskozite ( $\text{Ns/m}^2$ )

$\alpha$ : ısı yayılım katsayısı ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

olarak ifade edilmektedir.

**3.2. Analiz Parametreleri**

Çözümler farklı eleman sayıları ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yapılmasındaki amaç; eleman sayısının çözüme olan etkisini görmek ve meshten bağımsızlığı sağlamak ayrıca minimum eleman sayısı ile maksimum doğruluğa ulaşabilmektir. Böylece zamandan da tasarruf sağlanmıştır. İki boyutlu analiz için 21850 eleman, üç boyutlu analiz için 58566 eleman kullanılmıştır. Daha sık mesh yapısında çözümün değişmediği görülmüştür.

Geometri gereği;

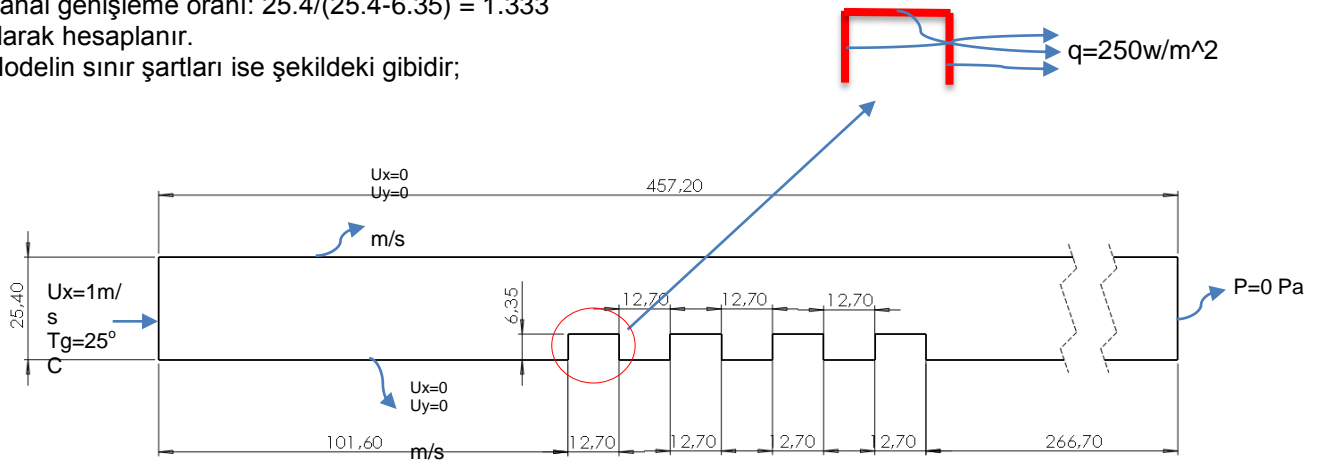
Blokaj oranı:  $6.35/25.4 = 0.25$

Paket görünüş oranı:  $12.7/24.4 = 0.54$

Kanal genişleme oranı:  $25.4/(25.4-6.35) = 1.333$

olarak hesaplanır.

Modelin sınır şartları ise şekildeki gibidir;



**Şekil 4.** Sınır şartlarının model üzerinde gösterilmesi



Akışkan (hava) kanala bütün durumlar için 25°C üniform sıcaklıkta girmektedir. Her bir blok üzerinde 250 W/m<sup>2</sup> sabit ısı akısı olduğu kabul edilmiştir. Analiz için yakınsama kriterleri Çizelge 1’de, başlangıç ve sınır şartları ise Çizelge 2’de gösterilmiştir.

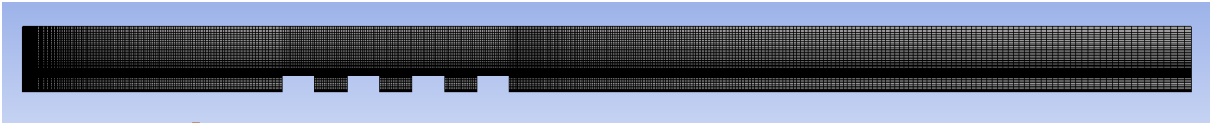
**Çizelge 1.** Her bir parametre için ayarlanan yakınsama kriteri

Parametreler	Yakınsama Kriteri
Süreklilik	1.10 <sup>-4</sup>
x-yönündeki hız	1.10 <sup>-4</sup>
y-yönündeki hız	1.10 <sup>-4</sup>
z-yönündeki hız	1.10 <sup>-4</sup>
Enerji	1.10 <sup>-6</sup>
k	1.10 <sup>-4</sup>
Epsilon (ε)	1.10 <sup>-4</sup>

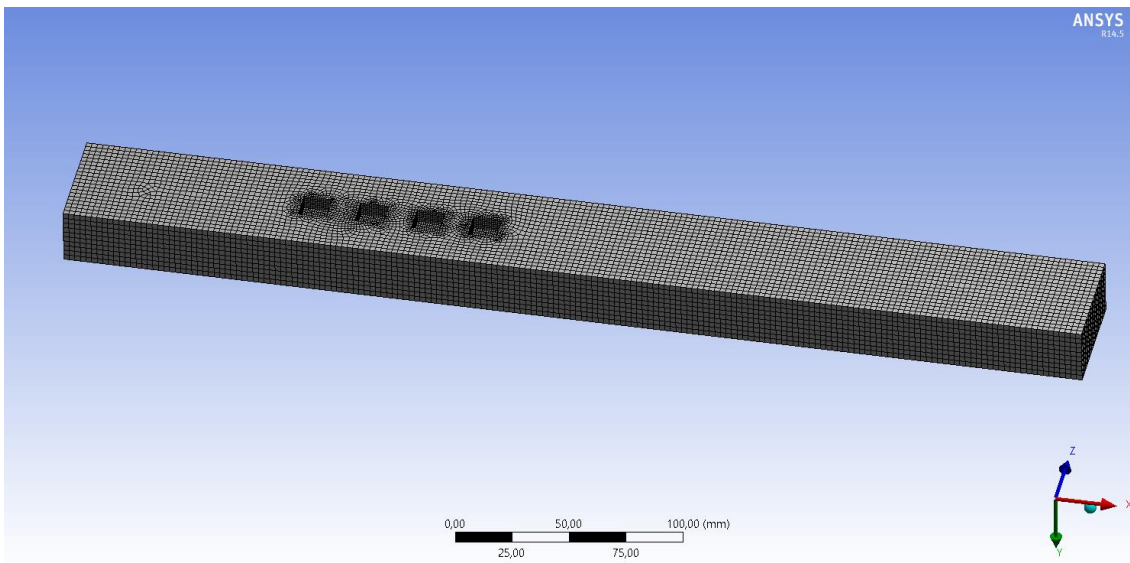
**Çizelge 2.** Başlangıç ve sınır şartları

Bölgeler	Tipi	Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Basınç (Pa)
Air inlet	Velocity Inlet	1	35	-
Air outlet	Pressure Outlet	-	-	0

2 ve 3 boyutlu modellerin ağ yapıları sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6’daki gibidir.



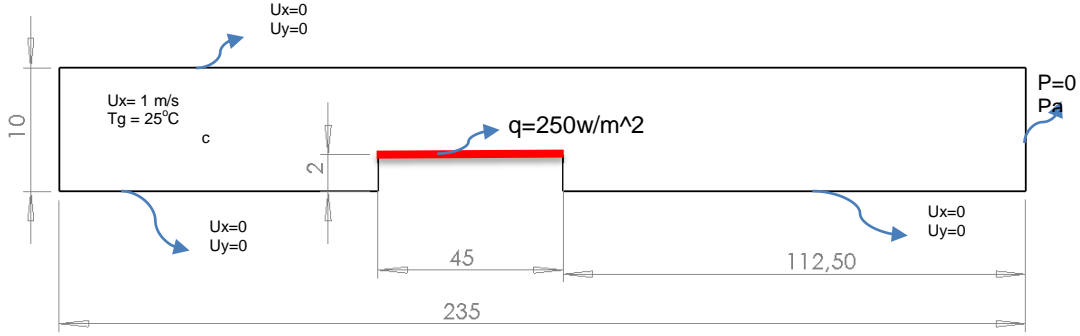
**Şekil 5.** 2 boyutlu modelin ağ yapısı



**Şekil 6.** 3 boyutlu modelin ağ yapısı

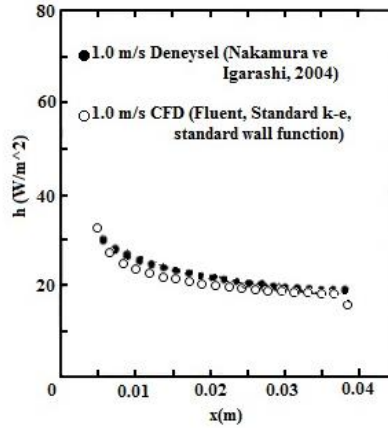
### 3.3. Doğrulama İşlemi

Hesaplama akışkanlar dinamiğine dayalı programlar ile yapılan çalışmaların güvenilirliğini test etmek için bir doğrulama (validasyon) işlemi yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada da doğrulama testi için Nakamura ve Igarashi'nin 2004'de yaptıkları deneysel çalışmadan faydalanılmıştır. Doğrulama testinde kullanılan model aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 7. Doğrulama işleminde kullanılan model ve sınır şartları

Nakamura ve Igarashi'nin çalışmalarında kullandıkları model, aynı ölçülerle 2 boyutlu olarak modellenmiş ve aynı sınır şartları girilerek Ansys'in Fluent modülünde çözdürülmüştür. Yonganın hemen üzerinden alınan veriler kullanılarak yüzeydeki ısı taşınım katsayısının grafiği çizilmiştir ve daha önceden yapılmış olan deneysel çalışma ile kıyaslanmıştır.



Grafik 1. Deneysel veriler ile yapılan analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Grafikten görüldüğü üzere sonuçlar birbirine paralel çıkmıştır. Bu da gerçekçi bir model oluşturulduğu, sonlu elemanlara ayırma işleminin güzel bir şekilde yapıldığı, başlangıç ve sınır şartlarının doğru verildiği anlamına gelmektedir.

### 4. BULGULAR

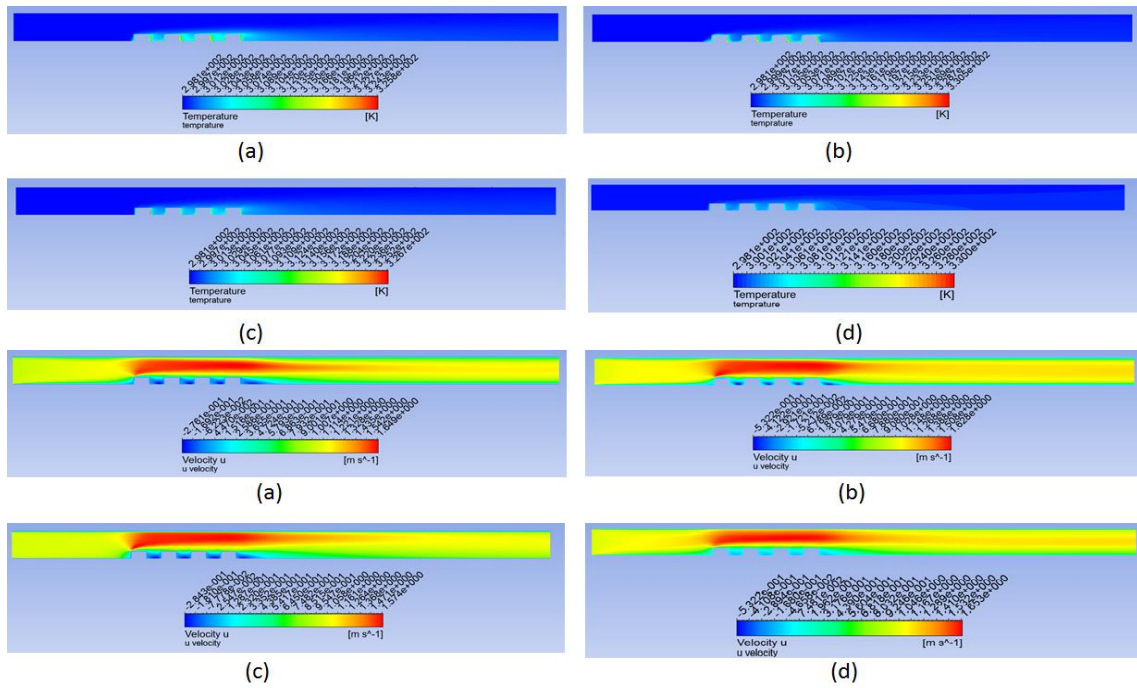
Dört yongalı elektronik cihazın iki ve üç boyutlu modellerinin soğuma analizleri yapılırken Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε, Standard k-ω ve SST k-ω olmak üzere 5 farklı türbülans modeli kullanılmıştır. Farklı türbülans modellerinin yanı sıra Standard Wall Function, Enhanced Wall Treatment, Scalable Wall Function ve Non-Equilibrium Wall Function olmak üzere 4 farklı duvar yaklaşımı da analizlerde kullanılmıştır. Farklı türbülans modelleri ve farklı duvar yaklaşımları kullanarak, iki ve üç boyutlu olarak toplamda 28 adet analiz yapılmıştır.

Aynı türbülans modeli ve duvar yaklaşımı kullanılarak iki ve üç boyutlu modeller üzerinde analizler yapılmıştır ve bu analizler sonunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analizlerin sonunda her bir analiz için sıcaklık dağılımı ve hız dağılımı elde edilmiştir. Yongaların hemen üstünden veriler alınarak yüzeydeki ısı taşınım katsayısının uzaklığa bağlı olarak değişimi incelenmiştir ve ilgili grafikler çizilmiştir.

#### 4.1. Dört Yongalı Elektronik Cihaz İçin Yapılan Analiz Sonuçları

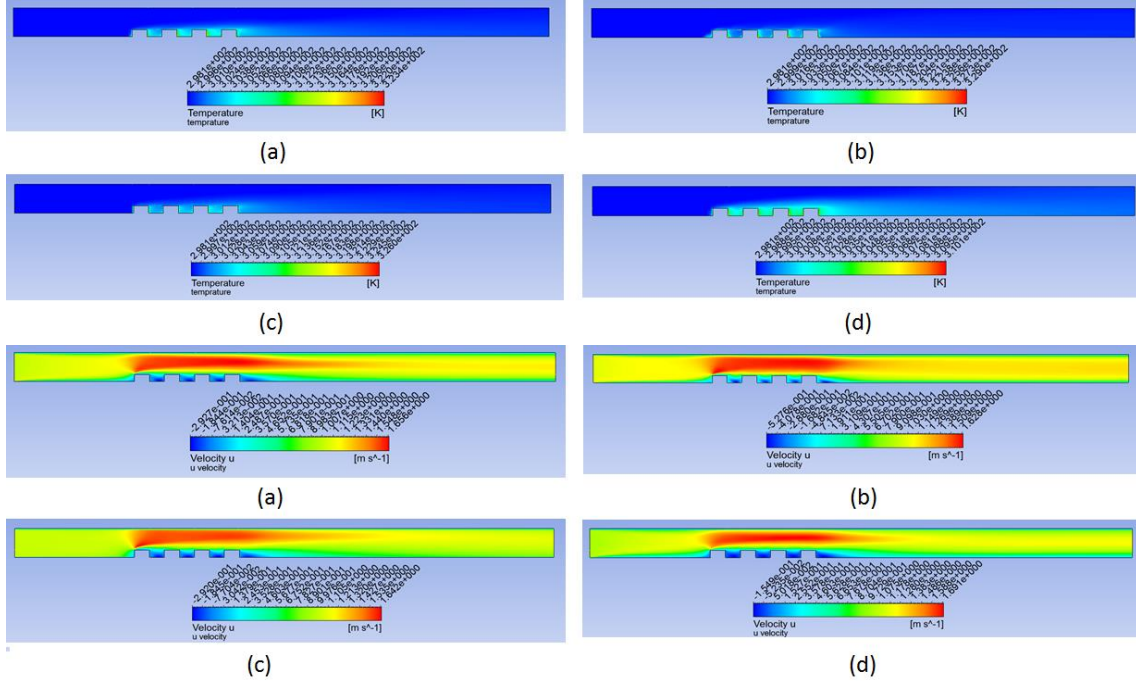
Başlangıç ve sınır değerlerini değiştirmeden sadece türbülans modelleri ve duvar yaklaşımları değiştirilerek iki ve üç boyutlu olarak analizler yapılmıştır. Aşağıda analizler sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımları ve hız dağılımları gösterilmiştir.

##### 4.1.2. İki Boyutlu Model İçin Elde Edilen Sıcaklık ve Hız Dağılımları

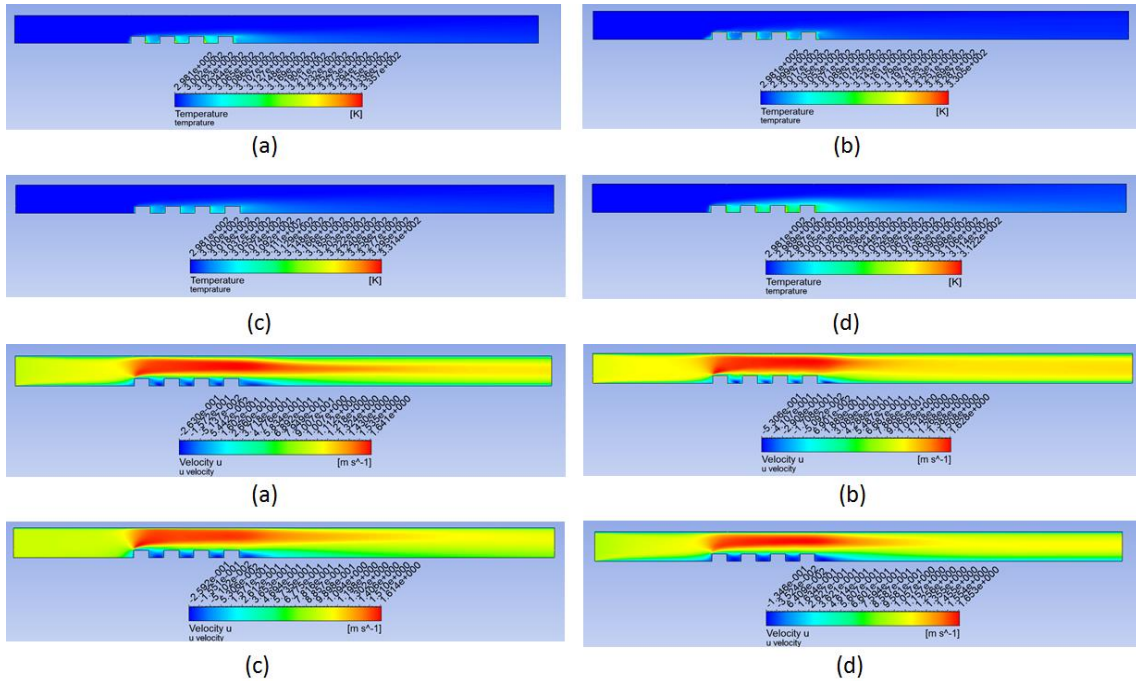


**Şekil 8.** Standard  $k-\epsilon$  Türbülans Modelinde Farklı Duvar Yaklaşımlarındaki Sıcaklık ve Hız Dağılımı

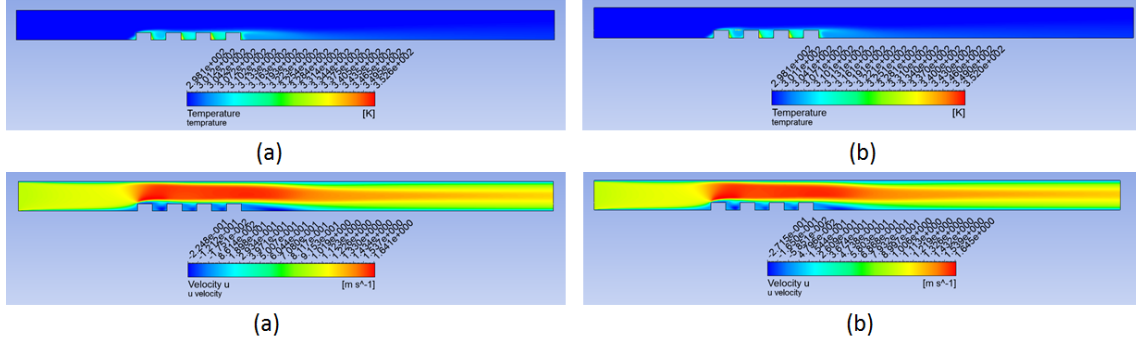
**a)** Standard Wall Function **b)** Enhanced Wall Treatment  
**c)** Scalable Wall Function **d)** Non-Equilibrium Wall Function



**Şekil 9.** RNG k- $\epsilon$  Türbülans Modelinde Farklı Duvar Yaklaşımlarındaki Sıcaklık ve Hız Dağılımı  
**a)** Standard Wall Function **b)** Enhanced Wall Treatment  
**c)** Scalable Wall Function **d)** Non-Equilibrium Wall Function

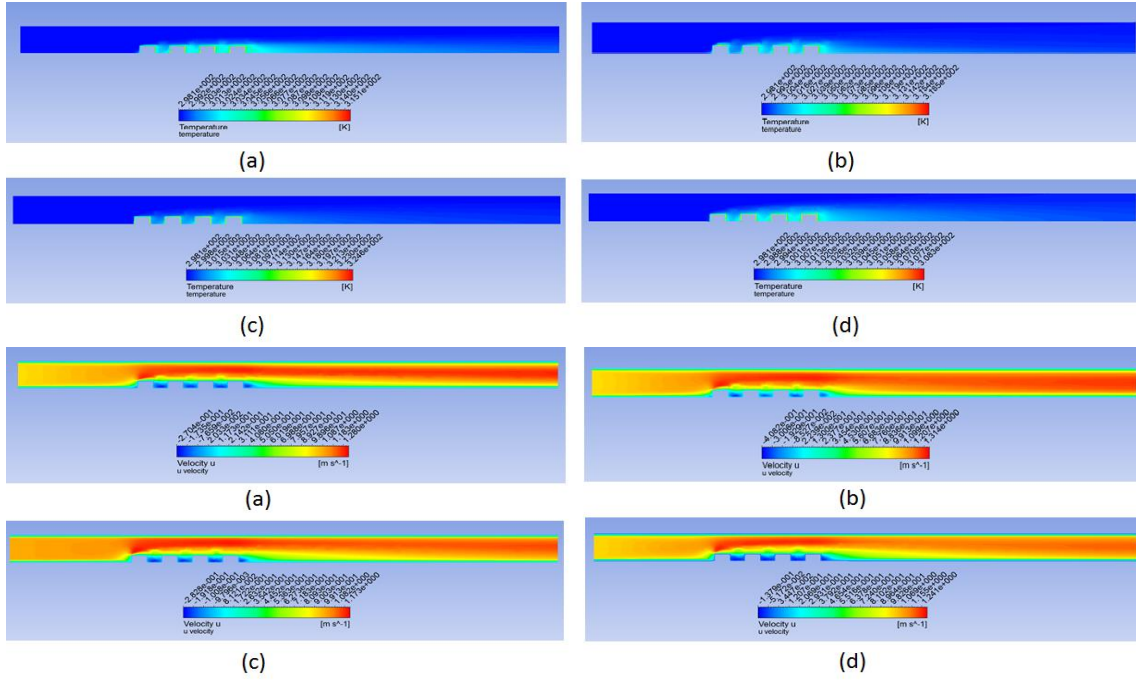


**Şekil 10.** Realizable k- $\epsilon$  Türbülans Modelinde Farklı Duvar Yaklaşımlarındaki Sıcaklık ve Hız Dağılımı  
**a)** Standard Wall Function **b)** Enhanced Wall Treatment  
**c)** Scalable Wall Function **d)** Non-Equilibrium Wall Function

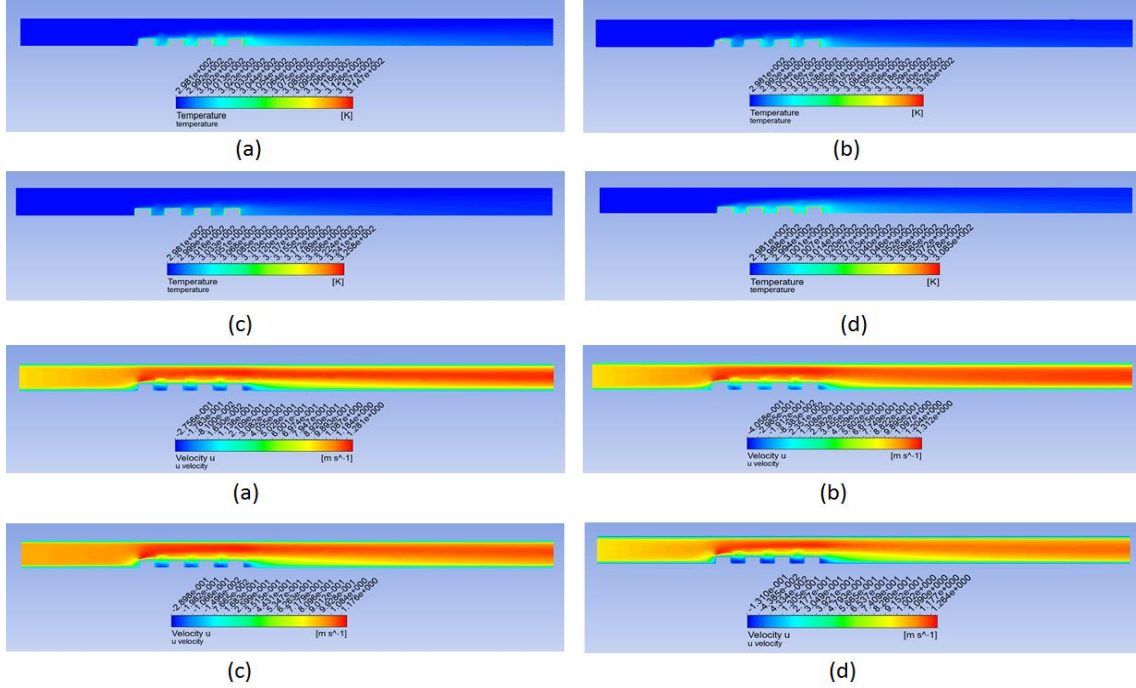


**Şekil 11.** Standard k- $\omega$  ve SST k- $\omega$  Türbülans Modellerinde Sıcaklık ve Hız Dağılımı  
a) Standard k- $\omega$  b) SST k- $\omega$

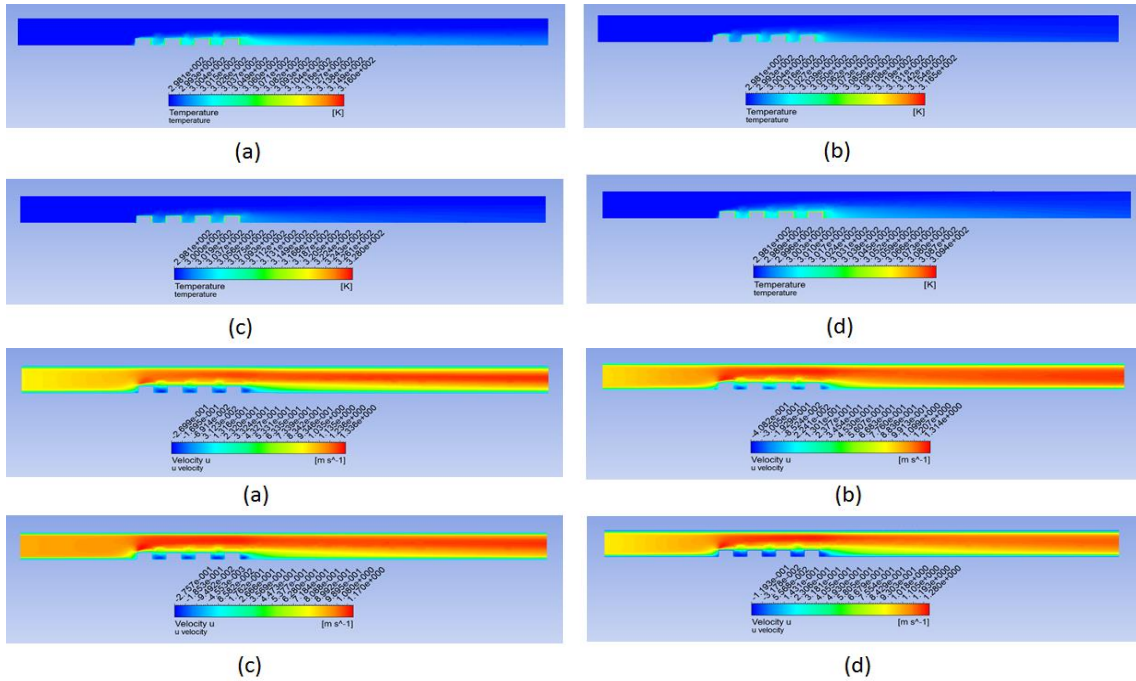
#### 4.1.3. Üç Boyutlu Model İçin Elde Edilen Sıcaklık ve Hız Dağılımları



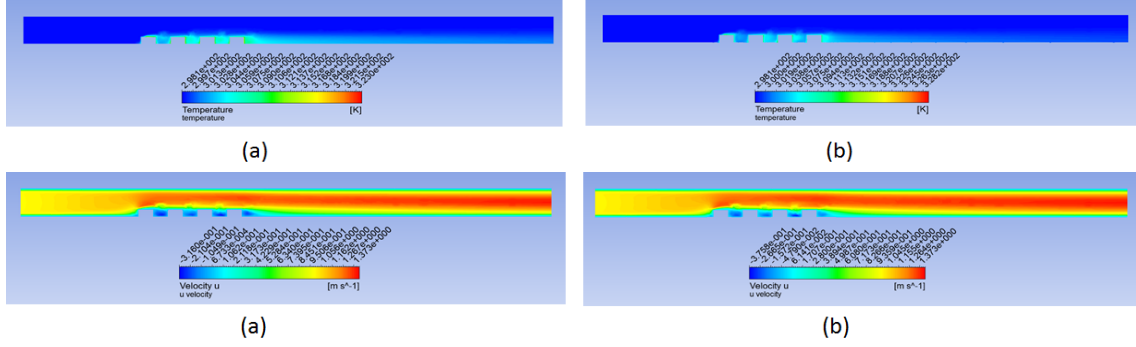
**Şekil 12.** Standard k- $\epsilon$  Türbülans Modelinde Farklı Duvar Yaklaşımlarındaki Sıcaklık ve Hız Dağılımı  
a) Standard Wall Function b) Enhanced Wall Treatment  
c) Scalable Wall Function d) Non-Equilibrium Wall Function



**Şekil 13.** RNG  $k-\epsilon$  Türbülans Modelinde Farklı Duvar Yaklaşımlarındaki Sıcaklık ve Hız Dağılımı  
**a)** Standard Wall Function **b)** Enhanced Wall Treatment  
**c)** Scalable Wall Function **d)** Non-Equilibrium Wall Function



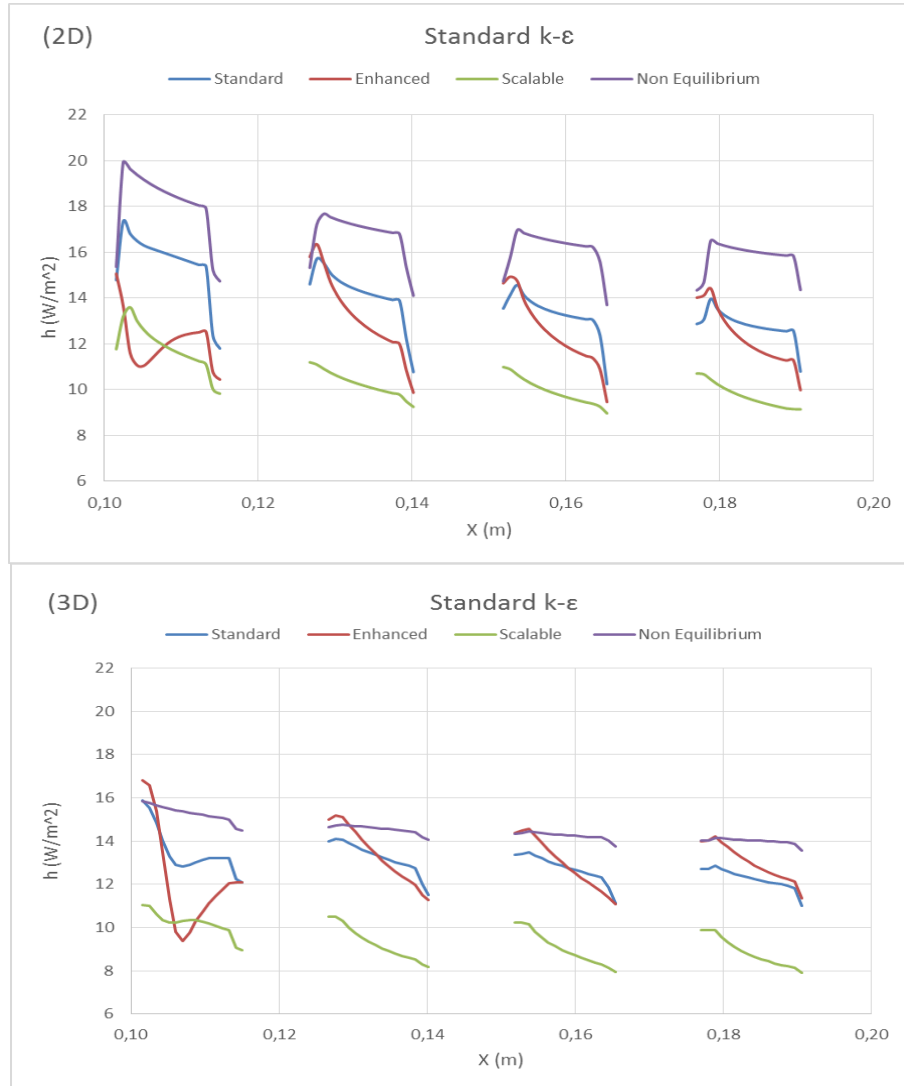
**Şekil 14.** Realizable  $k-\epsilon$  Türbülans Modelinde Farklı Duvar Yaklaşımlarındaki Sıcaklık ve Hız Dağılımı  
**a)** Standard Wall Function **b)** Enhanced Wall Treatment  
**c)** Scalable Wall Function **d)** Non-Equilibrium Wall Function



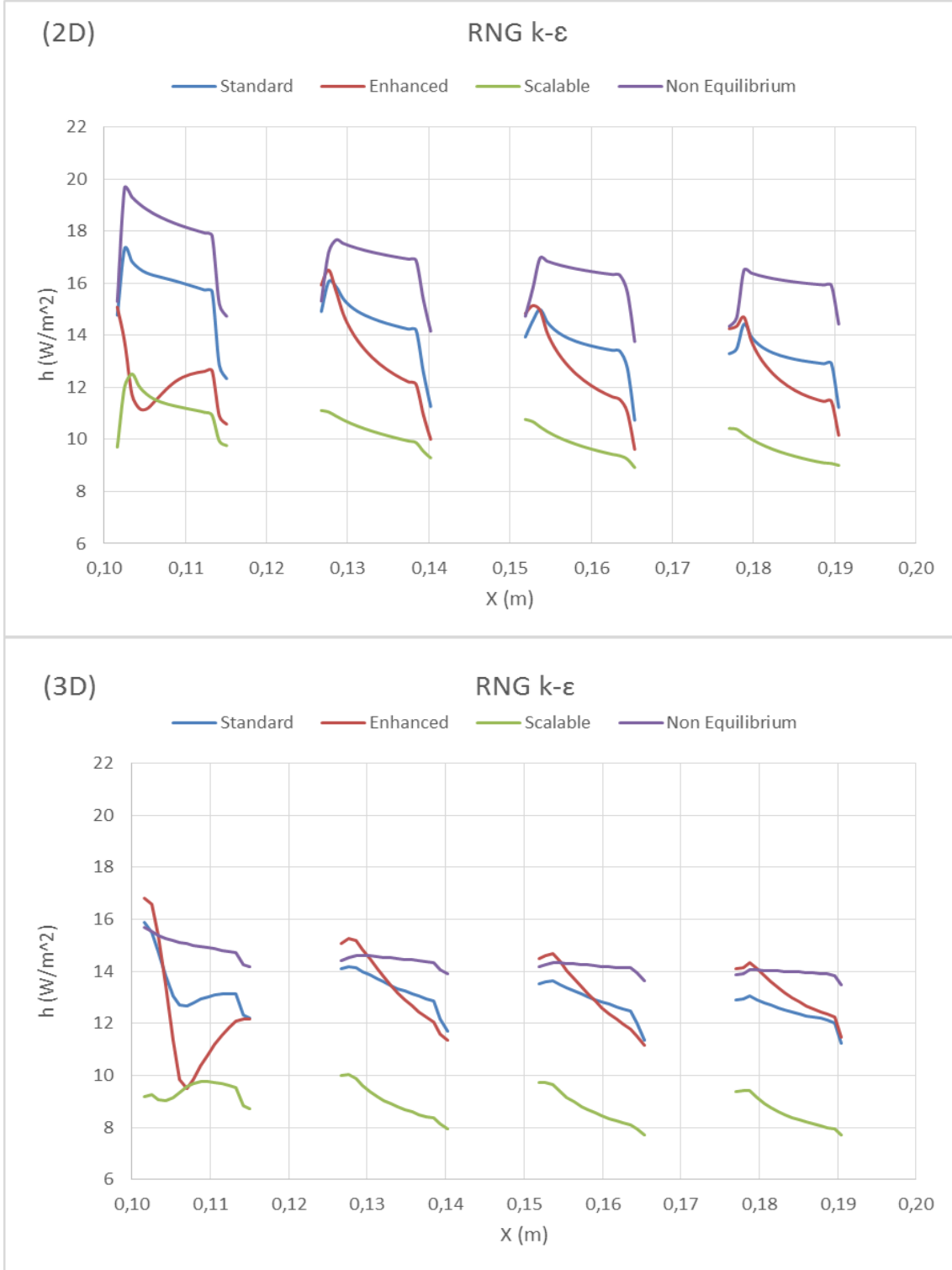
Şekil 15. Standard k- $\omega$  ve SST k- $\omega$  Türbülans Modellerinde Sıcaklık ve Hız Dağılımı  
a) Standard k- $\omega$  b) SST k- $\omega$

#### 4.1.4. İki ve Üç Boyutlu Modellerdeki Yüzeydeki Isı Taşınım Katsayılarının Karşılaştırılması

Yongaların hemen üstünden alınan verilere göre yüzeydeki ısı taşınım katsayısının uzaklığa bağlı değişimi incelenmiştir ve her bir türbülans modeli ve duvar yaklaşımı için ayrı ayrı grafikler çizilmiştir. Grafikler iki boyutlu ve üç boyutlu analizler için de ayrı ayrı çizilip karşılaştırma yapılmıştır.

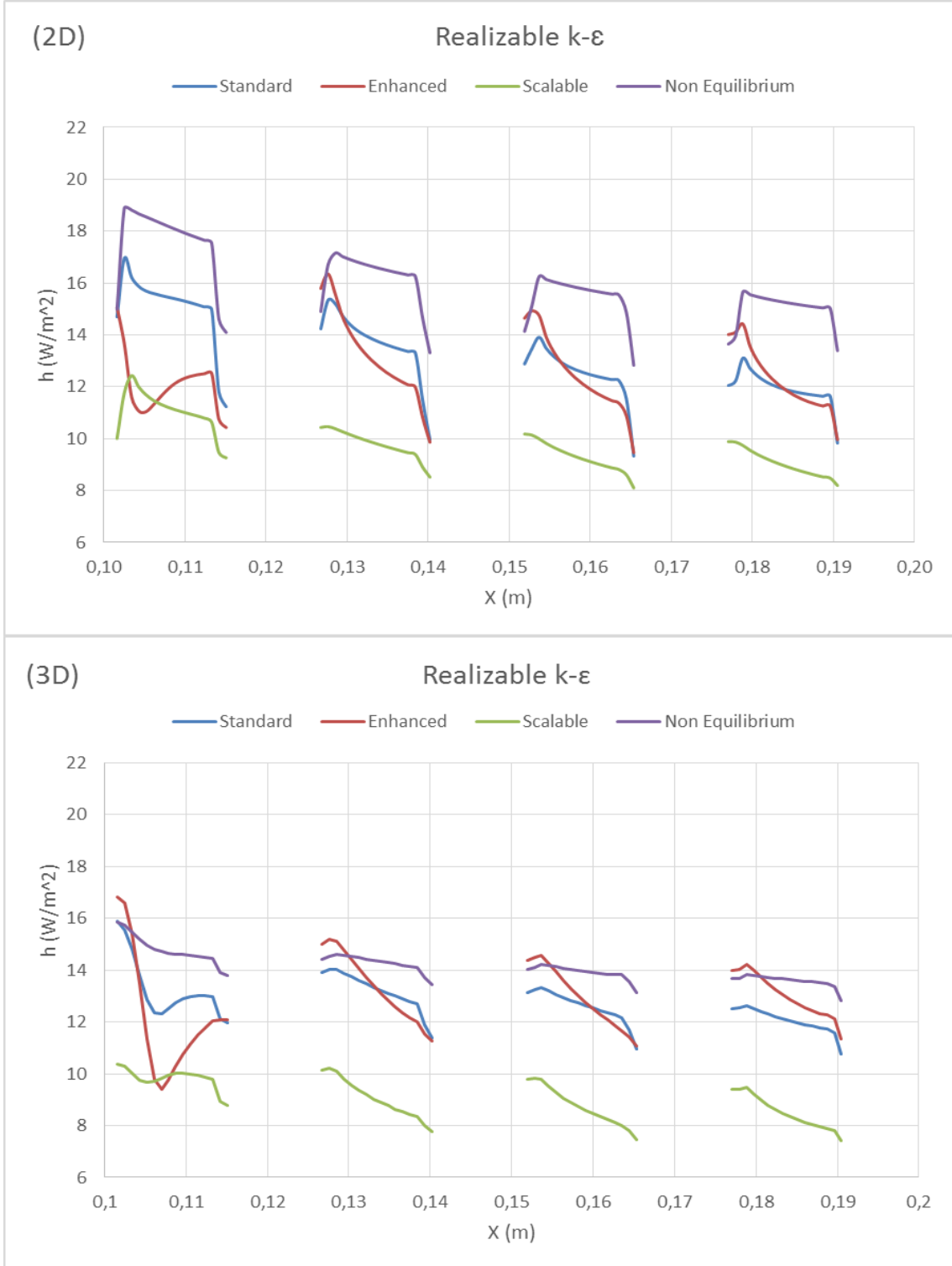


Grafik 2. Yüzeydeki ısı taşınım katsayısı değişiminin iki ve üç boyutlu modellerde karşılaştırılması (Standard k- $\epsilon$ )

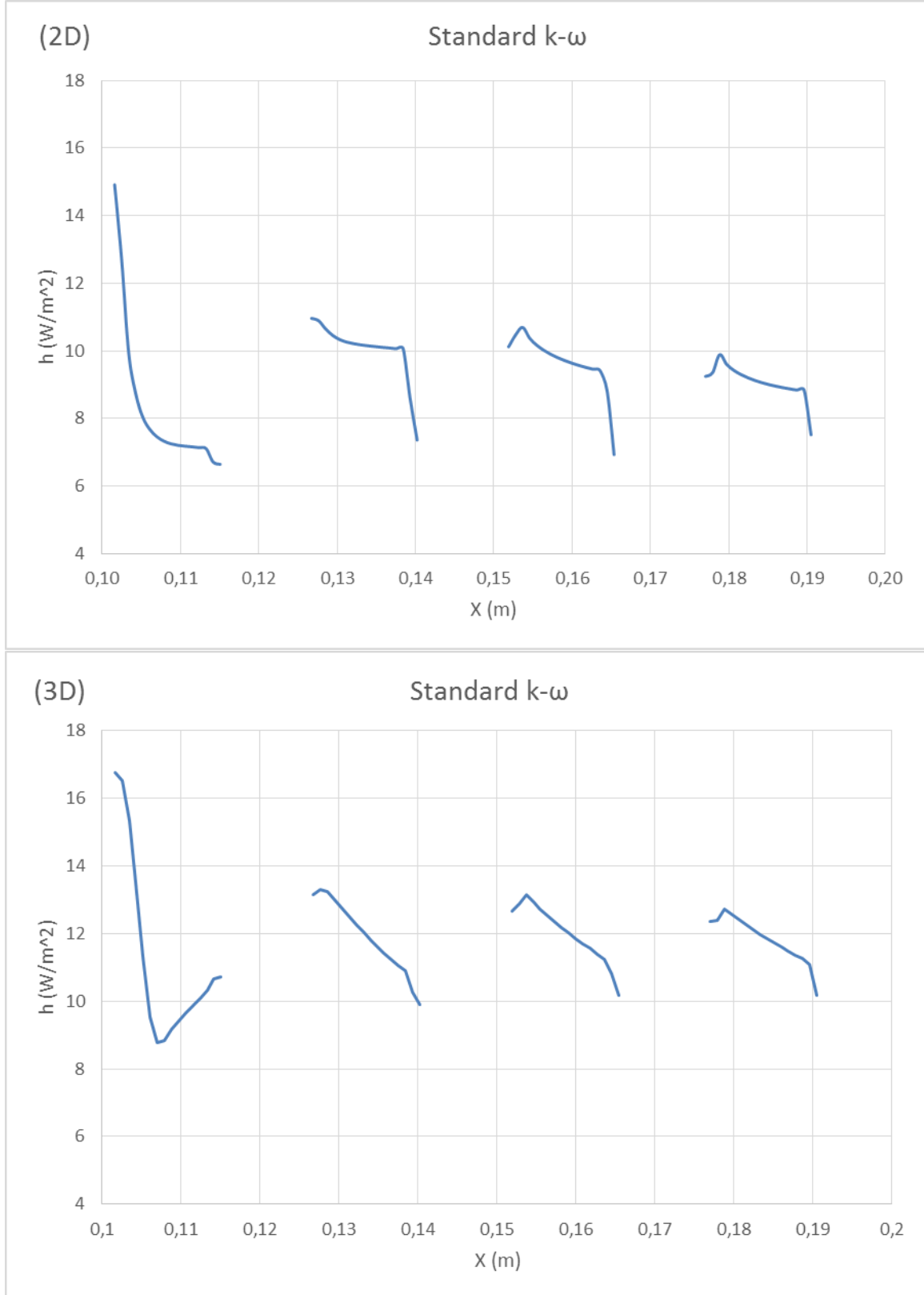


**Grafik 3.** Yüzeydeki ısı taşınım katsayısı değişiminin iki ve üç boyutlu modellerde karşılaştırılması ( RNG k-ε)

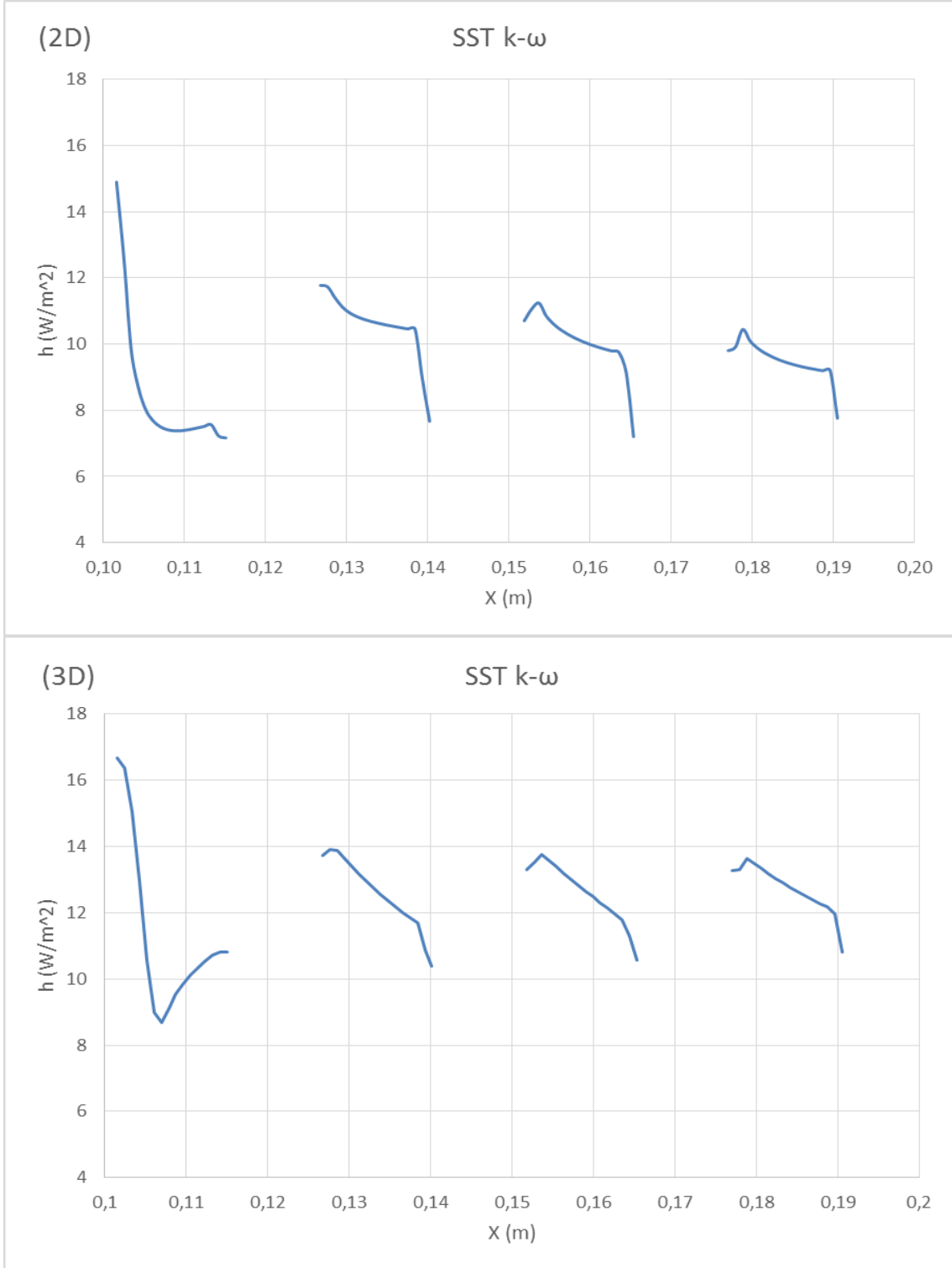




**Grafik 4.** Yüzeydeki ısı taşıma katsayısı değişiminin iki ve üç boyutlu modellerde karşılaştırılması ( Realizable k-ε)



**Grafik 5.** Yüzeydeki ısı taşınım katsayısı değişiminin iki ve üç boyutlu modellerde karşılaştırılması ( Standard k-  $\omega$  )



**Grafik 6.** Yüzeydeki ısı taşınım katsayısı değişiminin iki ve üç boyutlu modellerde karşılaştırılması (SST k-  $\omega$ )

## 5. SONUÇLAR

Yapılan analizler sonucunda görülmüştür ki farklı türbülans modelleri ve duvar yaklaşımları sonuca gözle görülür şekilde etki etmektedir. Doğrulama çalışmasında görüldüğü üzere tek yongalı sistemlerde en iyi sonucu Standart k-ε türbülans modelinde standart duvar yaklaşımında elde edilmektedir. Bu çalışmada aynı sınır şartlarında hem iki boyutlu hem üç boyutlu modelden alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bazı modellerde geometri farkı sıcaklıkta bir farklılığa sebep olmazken bazı modellerde ise maksimum sıcaklık farkı 10 K'in üzerine çıkabilmektedir. Böylelikle bu hususta çalışma yapacak araştırmacılar çeşitli modellerin birbirlerine olan üstünlüklerini aşağıdaki tablodan referansla önceden kestirebileceklerdir.

Türbülans Modeli	Duvar Yaklaşımı	En Yüksek Sıcaklık 2D (K)	En Yüksek Sıcaklık 3D (K)
<b>Standard k-ε</b>	Standard Wall Function	325	315
	Enhanced Wall Treatment	330	318
	Scalable Wall Function	326	324
	Non Equilibrium Wall Function	330	308
<b>Rng k-ε</b>	Standard Wall Function	324	314
	Enhanced Wall Treatment	329	316
	Scalable Wall Function	326	325
	Non Equilibrium Wall Function	310	308
<b>Realizable k-ε</b>	Standard Wall Function	335	316
	Enhanced Wall Treatment	330	316
	Scalable Wall Function	331	328
	Non Equilibrium Wall Function	312	309
<b>Standart k-ω</b>	-	352	323
<b>Sst k-ω</b>	-	352	328

## KAYNAKLAR

- [1] Çengel, Y.A., Heat Transfer-A Practical Approach (2nd Ed.), The McGraw-Hill Companies Inc. USA, 932 p.2003.
- [2] Can, M., Pulat, E., Cooling of Electronic Systems by Impinging Air Jets, Cooling of Electronic Systems (Eds. S.Kakaç, H.Yüncü, K.Hijikata)-NATO ASI Series, Serie E:Applied Sciences, Kluwer Academic Publishers, 258, 339-359, 1994.
- [3] Poulikakos, D., Wietrzak, A., Cooling of Microelectronic Sensor by Turbulent Forced Convection, Cooling of Electronic Systems (Eds. S.Kakaç, H.Yüncü, K.Hijikata)-NATO ASI Series, Serie E:Applied Sciences, Kluwer Academic Publishers, 203-224, 1994.



- [4] Igarashi, T., Takasaki, H., Fluid Flow and Heat Transfer Around A Rectangular Block Fixed on a Flat Plate Laminar Boundary Layer, Proc. of the ASME/JSME Thermal Engineering, Book No.H0933A, pp.295-302, 1995.
- [5] Zahn, B.A., Stoutand, R.P., Billings, D. A. Thermal Comparative Study of a Ceramic Dual In-Line Pressed Microelectronics Package Using Both Computational Fluid Dynamics and Solid Modelling Techniques on the ANSYS Finite Element Analysis System, ANSYS Conference Proceedings, II, pp.371-380, 1996.
- [6] Sözbir, N., Sözbir, M., Ekmekçi, İ., Saraç, H.İ., Çallı, İ., Elektronik Sistemlerin Isı Taşınımı İle Soğutulması, ULIBTK'97-11. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiriler Kitabı, Edirne, 546-555, 1997.
- [7] Kılıçarslan, İ., Yiğit, S.K., Sayın, C. Forced Convective Cooling Enhancement by Elektronik Chip Configuration , ULIBTK'99 12. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildirisi, Sakarya, 28-29 Şubat, 411-416, 2000.
- [8] Zhao, C.Y., Lu, T.J., Analysis of Microchannel HeatSinks for Electronics Cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45, 4857-4869, 2002.
- [9] Etemoğlu, A. B., İşman, M. K., Pulat, E., Can, M., Tek Yongalı Elektronik Cihazların Laminer ve Türbülanslı Akışta Soğutulmalarının Analiz, Mühendis ve Makina, 45-535: 18-22, 2004.
- [10] Cammarata G., Petrone G., Sorge G., Three-Dimensional Simulations Of Electronic Memory Modules Cooling In Natural Convection Conditions, 5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics ,Sun City, South Africa, 2007.
- [11] Aradag, S., Olgun, U., Akturk, F., and Basibuyuk, B., CFD Analysis of Cooling of Electronic Equipment as an Undergraduate Design Project, Computer Applications in Engineering Education, 2009.
- [12] Weng, Y.C., Cho, H.P., Chang, C.C., Chen, S. L., Heat pipe with PCM for electronic cooling, Applied Energy 88, 1825–1833, 2011.
- [13] Baby, R., Balaji, C., Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling, [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 1642-1649, 2012.
- [14] Wang, Y.H., Yang, Y.T., Numerical simulation of three-dimensional transient cooling application on a portable electronic device using phase change material, [International Journal of Thermal Sciences](#), 51:155, 2012.
- [15] Zhou, Y., Yu, J., Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices, International journal of refrigeration ,vol 35, no 4, 1139-1144, 2012.
- [16] Saenen, T., Baelmans, M., Numerical model of a two-phase microchannel heat sink electronic cooling system, International Journal of Thermal Sciences 59, 214-223, 2012.
- [17] Mancin, S., Zilio, C., Righetti, G., Rossetto, L., Mini Vapor Cycle System for high density electronic cooling applications” international journal of refrigeration 36, 1191-1202, 2013.
- [18] Jeng, L.Y., Teng, T.P., Performance evaluation of a hybrid cooling system for electronic chips, Experimental Thermal and Fluid Science 45, 155–162, 2013.
- [19] Xu, H., Si, C., Shao, S., Tian, C., Experimental investigation on heat transfer of spray cooling with isobutane (R600a), International Journal of Thermal Sciences, 86 ,21-27, 2014.
- [20] Enescu, D., Virjoghe, E. O., A review on thermoelectric cooling parameters and performance, Renewable and Sustainable Energy Reviews 38 ,903–916, 2014.
- [21] Khaleduzzamana, S.S., Sohel, M.R., Saidur, R., Mahbul, I. M., Shahrula, I.M., Akashc, B.A., Selvaraj, J., Energy and exergy analysis of alumina–water nanofluid for an electronic liquid cooling system, International Communications in Heat and Mass Transfer 57, 118–127, 2014.
- [22] Reliability Prediction of Electronic Equipment. U.S. Department of Defense, MIL-HDBK-2178B, NTIS, Springfield, VA, 1974.
- [23] Parry J., Rantala, J., Lasance, C., Enhanced Electronic Systems Reliability - Challenges for Temperature Predictio,



[24] Bailey, C., Modelling the Effect of Temperature on Product Reliability, 19th IEEE SEMI-THERM Symposium, 7803-7793 ,2003.

## ÖZGEÇMİŞ

### Fuat TAN

1979 yılı Balıkesir doğumludur. 1997 yılında, Uludağ Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümünde başladığı yükseköğrenimini, 2002 yılında bitirdi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalından 2005 yılında yüksek lisans derecesini aldı. 2010 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlayan Fuat Tan halen görevine ve doktora çalışmalarına devam etmektedir.

### Ahmet Serhan CANBOLAT

1990 yılında İstanbul'da doğan Ahmet Serhan Canbolat, 2012 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2014 yılında Yüksek Lisans derecesini aldı ve doktora eğitimine başladı. 2013 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlayan Ahmet Serhan Canbolat görevine ve doktora çalışmalarına devam etmektedir.

### Burak TÜRKAN

1988 yılında Bursa'da doğdu. 2005-2009 yılları arasında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. 2010 yılında Bayburt Üniversitesi Enerji Anabilim Dalı'na ÖYP'li Arş. Gör. olarak atandı. Daha sonra 2011 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne yüksek lisans ve doktora programını yapmak üzere görevlendirildi. 2014 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayıp aynı yıl doktora programına kayıt oldu. Halen doktora eğitimine devam etmektedir.

### Bahadır Erman YÜCE

1990 yılında Erzurum'da doğdu. 2008-2012 yılları arasında Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. 2013 yılında Gazi Üniversitesinde başlayan yüksek lisans eğitimine Uludağ Üniversitesi Enerji Anabilim dalında devam etmektedir. 2013 yılında Bitlis Eren Üniversitesinde başladığı Araştırma görevliliği görevini şu an Uludağ Üniversitesinde sürdürmektedir.