

## Yüksek Sıcaklığa Ulaşan Elektronik Elemanların Etkin Bir Şekilde Soğutulması

Muhammed Serdar ÖZTÜRK<sup>1</sup>, Tolga DEMİRCAN<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Yahşihan, Kırıkkale

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5177-1372>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-4805-6428>

\*Sorumlu yazar: [tolgademircan@gmail.com](mailto:tolgademircan@gmail.com)

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 30.07.2021

Kabul tarihi: 17.01.2022

Online Yayınlanma: 18.07.2022

#### Anahtar Kelimeler:

Kanal içi akış

Çarpan jet

Hibrit akış

Elektronik soğutma

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

HAD

### ÖZ

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığa ulaşan elektronik elemanların etkin bir şekilde soğutulması incelenmiştir. Elektronik elemanları etkin bir şekilde soğutulabilmek için kanal içi akış, jet akış ve hibrit akış yöntemleri kullanılmış ve bu yöntemlerin ısı transferi üzerinde yarattığı etkilere odaklanılmıştır. Bu kapsamda, sabit giriş hızı ve üç farklı H/D oranı (jet ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafenin jet çapına oranı) için, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerin sonucunda, H/D oranının artması ile genel olarak ısı transferinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak jet akışının diğer akış yöntemlerine kıyasla H/D oranının değişiminden daha çok etkilendiği görülmüştür. Elektronik elemanın yüzeylerinde gerçekleşen ısı transferine bakıldığında ise, jet akışın elektronik elemanın üst yüzeyinde gerçekleşen ısı transferini diğer akış yöntemlerine kıyasla daha çok artırdığı görülmüştür. Ancak bu yöntemin, elektronik elemanın sol ve sağ yüzeylerinde ise en düşük ısı transferini sağlayan akış yöntemi olduğu belirlenmiştir. Kanal içi akış ile yapılan soğutmanın, elektronik elemanın sol ve sağ yüzeylerini soğutmada, jet akışa kıyasla başarılı olsa da elektronik elemanın üst yüzeyini yeterince soğutamadığı gözlemlenmiştir. Bu iki akışın birlikte kullanılması ile oluşan hibrit akış ile yapılan soğutma ise, genel olarak en düşük ortalama sıcaklık değerlerini veren akış yöntemi olmuştur. Çalışılan parametre aralığında optimum soğutmanın, H/D=2 oranında hibrit akış yönteminin kullanılması ile yapılabildiği belirlenmiştir.

## Effective Cooling of Electronic Components Reaching to High Temperature

### Research Article

#### Article History:

Received: 30.07.2021

Accepted: 17.01.2022

Published online: 18.07.2022

#### Keywords:

Channel flow

Jet flow

Hybrid flow

Electronic cooling

Computational fluid dynamic

CFD

### ABSTRACT

In this study, the effective cooling of electronic components reaching a high temperature is investigated. Channel flow, jet flow and hybrid flow methods are used to effectively cool the electronic components. The main focus of this study is the effects of these methods on heat transfer. Accordingly, simulations are applied with the help of Computational Fluid Dynamics (CFD) for a constant inlet velocity and three different H/D ratios (the ratio of the distance between the jet and impinging surface to the jet diameter). As a result of the obtained data, it is observed that the heat transfer decreased with increasing the H/D ratio in general. However, it is seen that jet flow is influenced by the H/D ratio more than the other flow methods. When the heat transfer on the electronic component surfaces is considered, it is seen that the heat transfer on the upper surfaces of the electronic component is higher for jet flow compared to other flow methods. However, this method is identified as the lowest heat transfer method for the other surfaces of the electronic component. Cooling with channel flow has been successful in cooling the side surfaces of the electronic element. However, it has been observed that this method cannot sufficiently cool the upper surface of the electronic element. A hybrid flow created by combining these two flows is the flow

method with the lowest temperature values in general. In the working parameter range, it has been determined that optimum cooling can be achieved by using the hybrid flow method at the ratio of  $H/D=2$ .

**To Cite:** Öztürk MS., Demircan T. Yüksek Sıcaklığa Ulaşan Elektronik Elemanların Etkin Bir Şekilde Soğutulması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(2): 612-631.

## 1. Giriş

Elektronik teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte elektronik elemanlara duyulan ihtiyaç da doğal olarak artmaktadır. Birçok endüstriyel uygulamada kullanılan elektronik elemanların harcadığı ısı yük de her geçen yıl artmaya devam etmektedir. Yüksek ısı yüküne sahip elektronik elemanların yarattığı ısı dağılımı sorunu sebebiyle, sistemlerin güvenli bir şekilde çalışabilmeleri için güvenli çalışma sıcaklıklarına indirgenmeleri gerekmektedir. Aksi halde sistemin performansının düşmesine ya da arıza yapmasına neden olabilmekte ve gelecekteki sistemlerin çalışmasında bir engel olarak görülmektedir. Bu nedenlerden ötürü elektronik elemanların etkin bir şekilde soğutulması büyük bir önem arz etmektedir.

Yüksek ısı yüküne sahip elektronik elemanların soğutulabilmesi için birçok soğutma yöntemi kullanılabilir. Bu soğutma yöntemlerinden biri olan kanal içi akış (çapraz akış) ile soğutma yöntemi, bir fan yardımı ile soğuk akışkanın bir kanal vasıtasıyla bir dizi elektronik elemandan oluşan bir sisteme göndererek elektronik elemanların soğutulması prensibine dayanır. Bu yöntem ile genel bir soğutma yapmak mümkündür. Ancak, sistemler birçok farklı tip elektronik elemanlardan oluştuğu için sistemdeki elektronik elemanların ulaştığı sıcaklık değerleri birbirlerinden oldukça farklı olabilmektedir. Sadece çapraz akış ile soğutma, bu yüksek sıcaklıktaki elektronik elemanların hepsini birden güvenli çalışma sıcaklıklarına indirmeye yetemeye bilmektedir. Diğer bir soğutma yöntemi ise, soğutulması istenilen lokal bölgelerin çarpan jet kullanılarak soğutulmasıdır. Çarpan jetler, dairesel veya dikdörtgen kesitli bir lüleden püskürtülen soğuk akışkanın bir yüzeye çarpması sonucu oluşur. Çarpma bölgesinde sınır tabaka kalınlığını azalttığı için ısı taşınım katsayısında bir artış görülür ve bunun sonucunda ise ısı transferinde kayda değer bir miktarda artış sağlamaktadır. Çarpan jetler, yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmış elektronik elemanlarını soğutmada başarılı olmasına rağmen sistemdeki tüm elektronik elemanların soğutulmasında yetersiz kalabilmektedir.

Elektronik elemanlardan oluşan bir sistem farklı tip elektronik elemanlardan oluşabilmektedir. Her eleman farklı ısı üretimine sahip olabileceği için birbirlerine kıyasla daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmektedir. Dolayısıyla sadece çapraz akış ile soğutma ya da çarpan jet ile soğutma, sistemdeki bütün elektronik elemanların soğutulmasında yetersiz kalabilmektedir. Bu iki soğutma yönteminin birlikte kullanılması sonucunda ise hibrit akış yöntemi meydana gelmektedir. Bu yöntemde ise, çapraz akış ile sistemdeki elektronik elemanlar genel olarak soğutulurken, fazla ısınan elektronik elemanlar ise çarpan jet ile lokal olarak soğutulurken diğer iki yöntemle kıyasla daha verimli bir soğutma sağlanabilmektedir.

Literatürde, sadece çapraz akış ile soğutmanın incelendiği veya sadece çarpan jet ile soğutmanın incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada incelenen geometrinin daha çok çarpan jet

akışını hatırlatmasından dolayı, literatür araştırmasında çarpan jet akışı üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürde çarpan jetler ile ilgili çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda genel olarak çarpan jetlerin akışkan seçimi, akış alanın geometrisi, seçilen türbülans modeli, Reynolds sayısı, lüle ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafe ve elektronik elemanın ısı akısı gibi parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkilerine yoğunlaşıldığı görülmüştür. Bu çalışmalardan bir kısmına aşağıda değinilmiştir.

Jing ve ark. (2018) üç farklı hedef şekli (düz, içbükey, V-şekli) ve çeşitli yüzey düzenlemeleri (seyrek çukur/çukıntı, yoğun çukur/çukıntı ve üçgen kaburga çukur/çukıntı) için çarpan jetin soğutma performansını incelemiştir. Nusselt sayısının seyrek ve yoğun düzenlemelerden pek etkilenmediğini gözlemlemiştir. Az sürtünmeli düz olmayan kanallarda çukur/çukıntı düzenlemesi ile ısı transfer performansının artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Bilen (1994) dairesel bir lüleden gönderilen hava jetinin düz bir levha üzerine dik ve eğik açılar ile çarpıtılması sonucu oluşan ısı transferini, farklı Reynolds sayıları ve H/D oranları için deneysel olarak incelemiştir. Reynolds sayısı 10000-40000, H/D oranı 6-14 ve jet eğim açısının 45°-90° değerlerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmaların sonucunda ısı transferinin H/D oranı ile ters orantılı olduğunu görmüştür. Jet eğim açısı 45° iken durgunluk noktasındaki ısı transferinin, H/D=7, 10, 14 değerleri için 90°'lik jet eğim açısına kıyasla sırasıyla %6, %18 ve %22 oranında azalmış olduğunu gözlemlemiştir. Zhang ve ark. (2018) farklı dalga formlarına sahip jetleri ısıtılmış bir plakaya çarptırarak soğutma etkinliklerini sayısal olarak incelemiştir. Elde ettikleri bulguları sabit hava jetleriyle karşılaştırmışlardır. 5000 W/m<sup>2</sup>'lik ısıtmalı bir plakaya, sinüs eğrisi biçiminde, dikdörtgen biçimde ve üçgen biçimde çarpan jetler uygulamışlardır. Çalışmalarında Reynolds sayısı 1553-7766, Jet frekansı 10-400, St sayısı 0,012-2,4 ve H/W oranı 2-8 arasındaki değerleri ele almışlardır. Frekansın düşük bir değerden kademeli olarak artırılmasının ısı transferini arttırdığını, ancak kritik bir değerin üzerine çıktığında ısı transferinin azalmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Yaptıkları çalışmaların sonucunda sentetik jetlerin frekansa, Reynolds sayısına ve H/W oranına büyük ölçüde bağlı olduğunu ve uygun şekilde ayarlanması durumunda daha yüksek ısı transferi sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Kabakuş (2012) dikdörtgen ve altıgen kanatçıklı ısı alıcılarında çarpan jet kullanımında, ısı ve akış karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Ayrıca, kanatçıklı yüzeyleri kanatçıksız yüzeylerle kıyaslayabilmek için, h/d oranını 3-5 arasında değiştirerek düzlem plakalar ile deneyler yapmıştır. Yaptığı çalışmaların sonucunda, kanatçık boyunun artması ile ısı transferinin olumsuz yönde etkilendiği belirtmiştir. Taghinia ve ark. (2016) kavisli bir yüzeye çarpan hava jetinin akış ve ısı transferi özelliklerini incelemiştir. Bu kapsamda, çarpma yüzeyine 5000 W/m<sup>2</sup>'lik sabit bir ısı akısı uygulamışlardır. h/B oranı 4-10, Reynolds sayısı 2960-4740 değerleri için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. h/B oranı arttıkça sonuçların deneysel verilere yaklaştığını gözlemlemiştir. Ravanji ve Zargarabadi (2020) sabit ısı akısına sahip içbükey bir yüzeye uygulanan çarpan dairesel hava jetin akış ve ısı transferi karakteristiklerini sayısal ve deneysel olarak ele almışlardır. Jet Reynolds sayısının ve bağıl eğrilik oranının (C<sub>r</sub>) etkilerini incelemiştir. Bağıl eğrilik oranı 0,067-

0,13 ve jet Reynolds sayısının 23000-55000 arasındaki değerleri için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonucunda, eliptik pim kanatçıkların iç bükely yüzeylerdeki ısı transferini arttırabileceğini gözlemlemişlerdir. Sabit eğriliğe ( $C_r=0,13$ ) pim kanatçıklarının, kanatçıksız iç bükely yüzeylere kıyasla ortalama Nusselt sayısının değerini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Kılıç ve Ali (2019) yapmış oldukları çalışmada ısıtılmış bir yüzeye üç adet çarpan jet uygulandığı durumda gerçekleşen ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Akışkan olarak CuO-su,  $Al_2O_3$ -su, Cu-su, TiO-su nanoakışkanlarını ve saf suyu kullanmışlardır. Sonuç olarak, CuO-su nanoakışkanının ortalama Nusselt sayısının, diğer incelenen akışkanlara göre daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir.

Çalışkan (2012) altı farklı jet geometrisi ve iki farklı kanat dizilimi kullanarak, jetlerin ısı transferi özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısı 2000-10000, H/d oranı 2-12 ve e/D oranı 0,6-1,2 arasındaki değerler için çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmaların sonucunda en boy oranı iki olan dikdörtgen kesitli jetin diğer jetlere kıyasla daha iyi ısı transferi sağladığını belirtmiştir. H/d oranı arttıkça ısı transferinin azaldığını gözlemlemiştir. En yüksek ısı transferine e/D=1,2 ve H/d=2 iken ulaştığını belirtmiştir. Kanatçıklı yüzeylerin düz plaka ile karşılaştırılması sonucunda, V biçimi kanatçıkların düz plakaya kıyasla %4-26,6 oranında bir artış sağladığını gözlemlemiştir. Hatamia ve ark. (2018) arpan jetlerin soğutma sürecini iyileştirmede, jet geometrisinin, H/D oranının, Reynolds sayısının ve boyutsuz strok uzunluğunun etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Reynolds sayısını 1000-2100, H/D oranı 3-6 ve strok uzunluğunu ( $L_0/D$ ) 3-19 arasında değiştirerek çalışmalar yapmışlardır. Optimum strok uzunluğunu 3,5 olarak belirlemişlerdir. Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısının arttığını belirtmişlerdir. Sınırsız jetteki ısı transferi oranının, sınırlı jete göre yaklaşık olarak %30 daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. alışır ve ark. (2017) üçgen ve kare kanatçıklara sahip yüzeylere çarpıtılan dizi şeklindeki çarpan jetlerin akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Bu kapsamla Reynolds sayısını, H/d oranını ve kanatçık geometrisini değiştirerek sayısal analizler yapmışlardır. alışmalarının sonucunda, üçgen kanatçıklara sahip yüzeylerde duvar jet bölgesinde akışkan hızının daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Telışık (2007) yaptığı çalışmada birbirlerine paralel duran iki yatay levhadan üstte bulunan levhanın tam ortasındaki bir yarıktan hava püskürtüldüğünü varsaymıştır. Bu havanın altta bulunan sabit sıcaklıktaki levhaya çarpması sonucu oluşan akış ve ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. H/W oranının 0,5-5 ve Reynolds sayısının 250-650 arasındaki değerleri için çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmaların sonucunda, bütün Reynolds sayılarında ısı transferinin H/W oranı ile ters orantılı olduğunu gözlemlemiştir. En yüksek ısı transferini H/W=0,5 ve Re=650 olduğu durumda elde ettiğini belirtmiştir.

Türker (2006) bir disk yüzeyine çarpan jet akışını sayısal olarak incelemiştir. Bu kapsamda, jet uygulanmamış akış, hareketsiz bir diske jet uygulanmış bir akış ve dönen bir diske jet uygulanmış bir akış olmak üzere üç farklı durumu ele almışlardır. Standart k-ε, RNG k-ε, Reynolds Stress Modeli ve SST k-ω türbülans modellerini literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırmıştır. SST k-ω türbülans modelini tercih etmiştir. Sonuç olarak, çözüme tesir eden en büyük unsurların duvar fonksiyonları ve

çözüm için tercih edilen türbülans modeli olduğunu belirtmiştir. Lak (2016) yapmış olduğu çalışmada, dairesel eğik bir jetin sabit ısı akısına sahip düz bir yüzeye çarpması sonucu oluşan, ısı ve akış karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısı 1500-30000, H/D oranı 2-8 ve jet açısı 45°-90° aralığındaki değerler için çalışmalar gerçekleştirmiştir. Reynolds sayısının artması ile ısı transferinin arttığını tespit etmiştir. Fakat H/D oranı arttıkça ısı transferinin olumsuz yönde etkilendiğini gözlemiştir. Jet açısının artması ile ısı transferinde artış sağladığını belirtmiştir. En yüksek ısı transferinin Reynolds sayısı 30000, H/D=2 ve  $\alpha=90^\circ$ 'de iken elde edildiğini gözlemiştir. Markal ve Aydın (2018) çarpan hava jetlerinin hidrodinamik ve termal özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. H/D oranının 0,5-2,5 ve  $Q^*$  (boyutsuz akış hızı) oranının 0,25-0,75 arasındaki değerleri için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, eş eksenli jet kullanımı ile tek dairesel jet kullanımı kıyaslandığında, ısı transferinde ciddi farklar sağlandığını görmüşlerdir. Durma noktası Nusselt sayısının değerinin, H/D oranının ve akış hızı oranının artması ile sırasıyla yaklaşık %10,2'ye ve %8,4'e kadar azaldığını gözlemiştir. Ortalama yerel Nusselt sayısının değerinin ise, H/D oranı arttıkça %10,5'e kadar azaldığını, akış hızı oranının artması ile ise %20'ye kadar arttığını belirtmişlerdir.

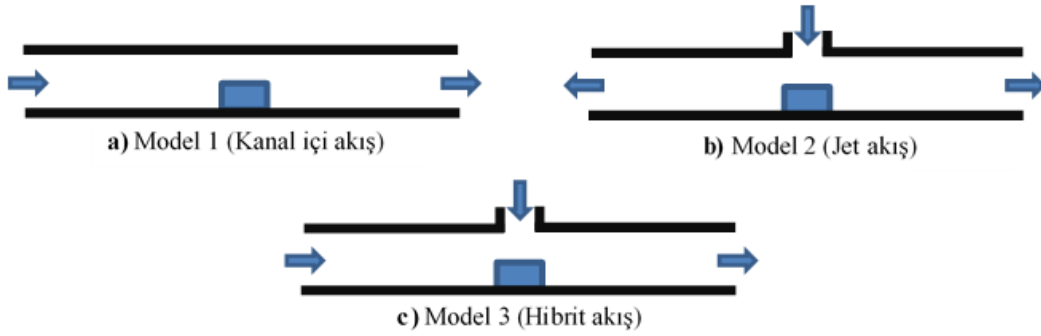
Tang ve ark. (2017) bir koni ısı alıcısına çarpan jetlerin akış ve ısı transferi özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. A (koni açısı) açısının 0°-70°,  $d_1/d$  (koni taban çapının jet çapına oranı) oranının 1-3, H/d oranının 3-7, ısı akısı yoğunluğunun ( $q$ ) 60-100 W/cm<sup>2</sup> ve Reynolds sayısının 16000-32000 arasındaki değerleri için çalışmalar yürütmüşlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonucunda koni açısının artması ile ısı transferinde artış gözlemiştir. Fakat açı 50°'yi geçtikten sonra ısı transferinde azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Reynolds sayısı arttıkça,  $d_1/d=1$  ve  $d_1/d=2$  için hesaplanan ortalama Nusselt sayılarının birbirlerine yaklaşmaya başladığını belirlemişlerdir. H/d oranının artması ile ısı transferinin arttığını, fakat bu oran H/d=5 değerini geçtikten sonra ısı transferinin azaldığını gözlemiştir. Mallor ve ark. (2018) bir rüzgâr tünelineki duvara monte edilmiş bir küpün üzerine düz delikler açmışlar ve gerçekleşen ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Deneylerinde Reynolds sayısını (4600) ve deliklerin çaplarını (2,5 mm) sabit almışlardır. Küpün üzerindeki delikleri 9 farklı lokasyona tabi tutmuşlar ve elde ettikleri sonuçları, katı küpler ile kıyaslamışlardır. Yaptıkları çalışmaların sonucunda deliklerin çıkış yüksekliğinin giriş yüksekliğinden daha küçük olduğu durumlarda, yerel Nusselt sayısının katı küplere kıyasla %20 oranında daha yüksek olduğunu gözlemiştir. Kılıç ve ark. (2017) elektronik elemanların çarpan jet ile soğutulmasında girdap oluşturucuların akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda, girdap oluşturucunun konumu jet girişine yaklaştığında gerçekleşen ısı transferinin arttığını belirtmişlerdir. Girdap oluşturucunun konumunun, uzunluğunun ve açısal pozisyonunun ısı transferi üzerinde önemli etkilerinin olduğunu gözlemiştir. Zhu ve ark. (2018) küçük jet plaka mesafelerinde, yüksek sıcaklıktaki düz bir plaka üzerine dikey olarak yerleştirilmiş bir dizi hava jetin, geçici ısı transferi özelliklerini ve soğutma hızlarını sayısal olarak incelemiştir. H/D oranı 0,2-1, S/D oranı 5-10 ve Reynolds sayısı 7499-3000

arasındaki değerler için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, ters akışlı jetlerin ısı transfer oranını önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemiştir.

Literatür araştırmalarından da anlaşıldığı üzere çapraz akış ve çarpan jetlerle ilgili birçok sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. Ancak jet akışı ile çapraz akışın birlikte hibrit bir şekilde kullanıldığı çalışmaların yetersiz olduğu kanaatine varılmıştır. Bu çalışmada literatürde bulunan diğer araştırmalardan farklı olarak, sabit giriş hızı ve üç farklı H/D oranı için elektronik elemandan gerçekleşen ısı transferi ve akış yapısı üzerindeki etkiler, bu üç akış yöntemi için birlikte incelenmiş ve bu akış yöntemleri karşılaştırılmıştır.

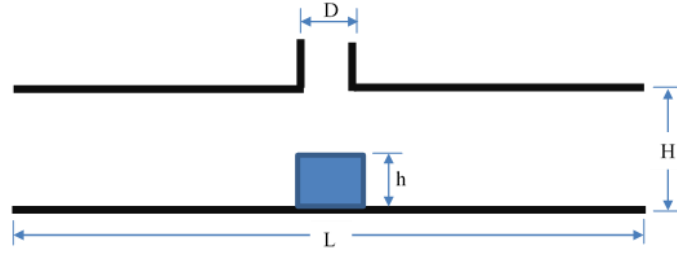
## 2. Problemin Tanıtımı ve Matematiksel Formülasyon

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli bir kanalın taban yüzeyine yerleştirilmiş olan sabit ısı akısına sahip bir elektronik elemanın soğutulması ele alınmıştır. Bu amaçla, kanal girişinden üniform olarak sabit  $U_k$  hızı ile gönderilen hava ile eş zamanlı olarak elektronik elemanın hemen üstünde bulunan dairesel kesitli bir lüleden  $V_j$  hızı ile gönderilen havanın oluşturduğu bir akış düşünülmüştür. Bu iki akışın elektronik elemana çarpması sonucu, elektronik eleman etrafında karmaşık bir akış yapısı oluşturması ve ısı transferini gerçekleştirmesi planlanmıştır. Bu çalışmada incelenen problemin geometrisinin şematik gösterimi Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Modellerin şematik gösterimi a) Kanal içi akış, b) Jet akış, c) Hibrit akış

Bu çalışmada incelenen problemin geometrik ölçülerini belirleyebilmek için literatürde bulunan benzer çalışmalar incelenmiş ve Saleha ve ark. (2015) tarafından yapılan bir çalışmadan yararlanılmıştır. Bu kapsamda, model geometriler oluşturulurken, jet akışın püskürtüldüğü lülenin çapı  $D=15$  mm olacak şekilde sabit olarak ayarlanmış ve diğer bütün büyüklükler bu lüle çapı kullanılarak hesaplanmıştır. Kanalın uzunluğu  $L=66D$  olarak belirlenmiştir. Yüksekliği ise incelenen farklı durumlar için, H/D değeri 2, 3 ve 4 olacak şekilde 3 farklı büyüklükte alınmıştır. Kanalın genişliği ise  $W=4D$  büyüklüğündedir. Elektronik eleman küp şeklindedir ve bir kenarının uzunluğu  $h=4D/3$  olarak belirlenmiştir. Ana geometrinin şematik görünümü ve ilgili büyüklüklerin yeri Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Ana geometrinin şematik gösterimi

Bu çalışmada ele alınan akışın, zamandan bağımsız, sıkıştırılmaz, üç boyutlu ve türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca, doğal taşınım etkileri ihmal edilmiştir. Türbülans modeli olarak k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Literatürde bulunan benzer çalışmalara uygun olarak belirlenen problemin temel diferansiyel denklemlerinin genel hali aşağıda verilmiştir (Zuckerman ve Lior, 2006; Mergen, 2014; Saleha ve ark., 2015; Örs, 2017):

*Süreklilik denklemi:*

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

*Momentum denklemi:*

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

*Enerji denklemi:*

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho C_p \overline{T' u'_i} \right] \quad (3)$$

*Türbülanslı kinetik enerji denklemi:*

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \varepsilon \quad (4)$$

*Türbülanslı kinetik enerji yutulma denklemi:*

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan yerel Nusselt sayısı ve ortalama Nusselt sayısı değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir (Demircan, 2019). Bu kapsamda Nusselt sayısının genel formülü Eşitlik (7)'de, ısı akısı Eşitlik (8)'de ve yerel ısı taşınım katsayısı ise Eşitlik (9)'da verilmektedir.

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (7)$$

$$q'' = h(T_y - T_g) = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} \quad (8)$$

$$h = \frac{q''}{(T_y - T_g)} = - \frac{k}{(T_y - T_g)} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} \quad (9)$$

Eğer Eşitlik (9), Eşitlik (7)'de yerine yazılırsa yerel Nusselt sayısını veren eşitlik elde edilebilir.

$$Nu_x = - \frac{D_h}{(T_y - T_g)} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} \quad (10)$$

Eğer Eşitlik (10)'un blok yüzey alanı boyunca integrali alınırsa, ortalama Nusselt sayısını veren eşitlik elde edilir.

$$\overline{Nu_A} = \frac{1}{A} \int_A Nu_x dA \quad (11)$$

Bu denklemlerde  $h$ ,  $k$ ,  $D_h$ ,  $T_y$  ve  $T_g$  sembolleri sırasıyla, ısı taşınım katsayısı, ısı iletim katsayısını, hidrolik çapı, yüzey sıcaklığını ve giriş sıcaklığını temsil etmektedir.

Problemin diferansiyel denklemlerinin sayısal olarak çözülebilmesi için sınır şartları belirlenmiştir. Bu kapsamda, jet girişi ve kanal girişinde hava hızları için sırasıyla sabit  $V_k=2,9474\text{m/s}$  ve  $U_k=2,9474\text{m/s}$  değerleri kullanılmıştır. Akışkanın giriş sıcaklığı ise sabit  $T_g=20^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Kanal çıkışlarında ise, akışkanın atmosfer basıncı ve  $T_a=20^\circ\text{C}$  atmosfer sıcaklığına sahip bir dış ortama gönderildiği kabul edilmiştir. Tüm kanal duvarlarının dış yüzeylerinin yalıtıldığı ve bu yüzeylerde kaymasızlık sınır şartının sağlandığı düşünülmüştür. Elektronik elemanları temsil eden küpün tüm yüzeylerinden ise sabit  $q''= 3000 \text{ W/m}^2$  değerinde ısı akısı gerçekleştiği kabul edilmiştir. Bütün analizlerde, havanın  $20^\circ\text{C}$  deki fiziksel özellikleri alınmıştır. Bu kapsamda, havanın yoğunluğu  $\rho_h=1,204 \text{ kg/m}^3$ , viskozitesi  $\mu=1,825 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$  ve ısı iletim katsayısı  $k_h=0,02514 \text{ W/m.K}$  olarak belirlenmiştir (Çengel ve Ghajar, 2015). Bu çalışmada kullanılan sınır şartları Tablo 1'de verilmektedir.

**Tablo 1.** Sınır şartları

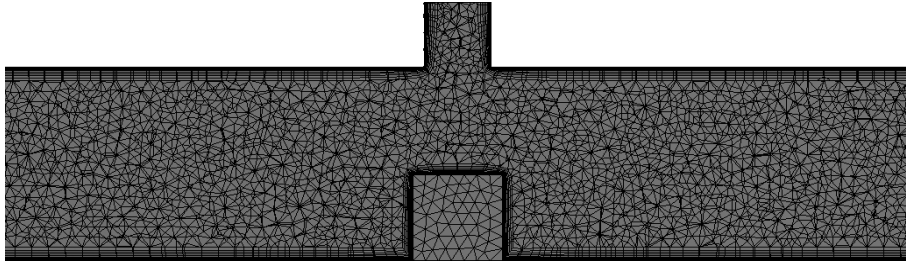
Sınır Şartları		Model 1	Model 2	Model 3
Giriş	$T_g$ ( $^\circ\text{C}$ )	20	20	20
	$V_k$ (m/s)	2,9474	0	2,9474
	$U_k$ (m/s)	0	2,9474	2,9474
Çıkış	$T_\varphi$ ( $^\circ\text{C}$ )	20	20	20
	$P_\varphi$	$P_{\text{atm}}$	$P_{\text{atm}}$	$P_{\text{atm}}$
Duvar Yüzeyleri	-	Yalıtım	Yalıtım	Yalıtım
Isı akısı	$q''$ ( $\text{W/m}^2$ )	3000	3000	3000



### 3. Sayısal Çözüm

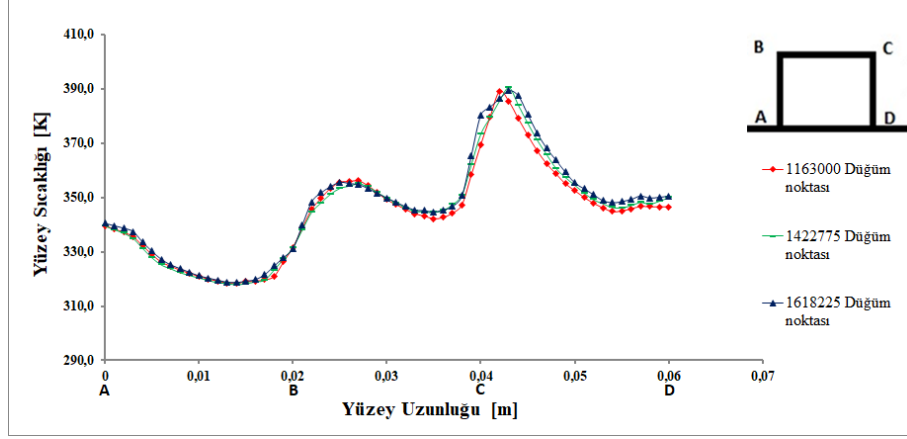
Bu çalışma kapsamında oluşturulan model geometriler belirlenen sınır şartları yardımıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Bu kapsamda, yapılan analizler için Fluent paket yazılımı kullanılmıştır. Sayısal çözüm aşamasında SIMPLE algoritması tercih edilmiştir. Süreklilik, enerji ve momentum denklemleri için “Second Order Upwind” yöntemi, türbülans denklemleri için ise “First Order Upwind” yöntemi kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak ise Realizable k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Yakınsama kriterinin değeri, enerji denkleminin çözümünde  $10^{-6}$ , diğer diferansiyel denklemlerin çözümünde ise  $10^{-3}$  olarak alınmıştır. Ayrıca çözüm alanına giren ve çıkan akışkanın kütleleri kontrol edilerek, bunların arasındaki farkın  $10^{-7}$  civarında olması sağlanmıştır.

Model 2 ve Model 3 geometrilerinde H/D oranı 3 için oluşturulan ağ yapısı örnek olarak Şekil 3’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, ısı ve hız sınır tabakalarının etkin olduğu kanal duvarlarına ve elektronik elemanın yüzeylerine yakın bölgelerde daha sık, diğer bölgelerde ise daha gevşek bir ağ yapısı oluşturulmuştur.



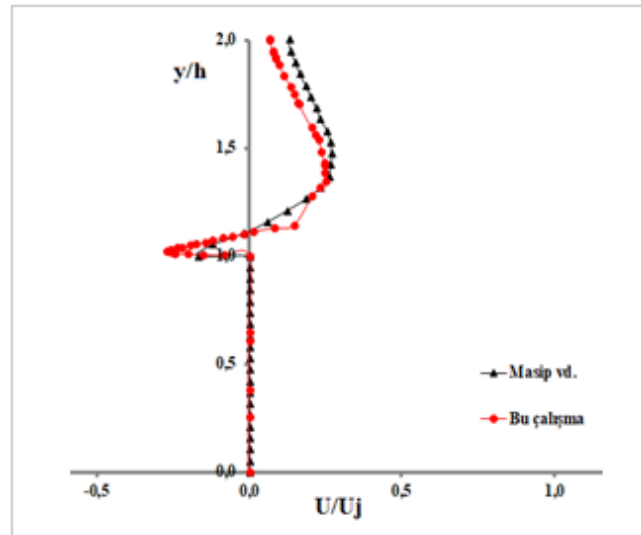
Şekil 3. Problemin ağ yapısı

Analizlerden elde edilen sonuçların ağ yapısından etkilenmesini minimuma indirmek için, farklı sayıda düğüm noktasına sahip farklı ağ yapıları için simülasyonlar tekrarlanmıştır. Örnek olması açısından Model 2 geometrisi ve H/D oranı 4 için yapılan simülasyonların sonucu Şekil 4’te birlikte verilmektedir. Şekil incelendiğinde artan düğüm sayısı ile, elektronik elemanın yüzey sıcaklıklarının pek etkilenmediği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda Model 2 ve H/D=4 olan geometri için 1163000 düğüm noktasına sahip olan ağ yapısı optimum ağ yapısı olarak belirlenmiştir. Benzer yaklaşım, diğer tüm model geometrileri ve H/D oranları için de yapılarak, her durum için optimum bir ağ yapısı belirlenmiştir. Ayrıca  $y^+=1$  değerini sağlayacak şekilde hesaplamalar yapılarak, ilk düğüm noktası ile yüzey arasındaki mesafe 0,075 mm olarak kabul edilmiş ve ağ yapısı oluşturulmuştur. Tüm model geometrileri için oluşturulan ağ yapılarında ortalama ortogonal kalite 0,97 ve ortalama eleman kalitesi ise 0,90 civarı gerçekleşmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan tüm simülasyonlarda, belirlenmiş olan optimum ağ yapıları kullanılmıştır.



Şekil 4. Model 2 ve  $H/D=4$  olduğu durumda, farklı düğüm noktaları için elektronik elemanın yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemin ve analizlerden elde edilen sonuçların güvenilirliğini belirlemek amacıyla, literatürde bulunan Masip ve ark. (2012)'nin yapmış oldukları deneysel çalışma kullanılmıştır. Bu çalışmada, Masip ve arkadaşları dikdörtgen bir kanalın yüzeyine yerleştirilen elektronik bir elemanın, kanal içi cebri hava akışı ve çarpan jet akışı ile soğutulmasını deneysel olarak incelemiştir. Kanal Reynolds sayısının 3 farklı değeri (3410, 5752 ve 8880) ve jet Reynolds sayısının kanal Reynolds sayısına oranının 3 farklı değeri (0,5, 1 ve 1,5) için deneyler yapmışlardır. Bu kapsamda Masip ve arkadaşlarının kullanmış olduğu geometri ve çalışma parametreleri aynen kullanılarak, jet çapı 12 mm, kanalın uzunluğu 2000 mm, genişliği 300 mm ve yüksekliği 30 mm olarak belirlenmiştir. Bu analizlerden, kanal Reynolds sayısının 3410 ve jet Reynolds sayısının 3410 olduğu durum için, her iki çalışmadan elde edilen sonuçlar Şekil 5'de birlikte verilmektedir. Şekil incelendiğinde her iki çalışmadan elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu veriler ışığında, bu çalışma kapsamında kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen sonuçların güvenilir seviyede olduğu söylenilebilir.



Şekil 5. Masip ve arkadaşlarının (2012) ve bu çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması

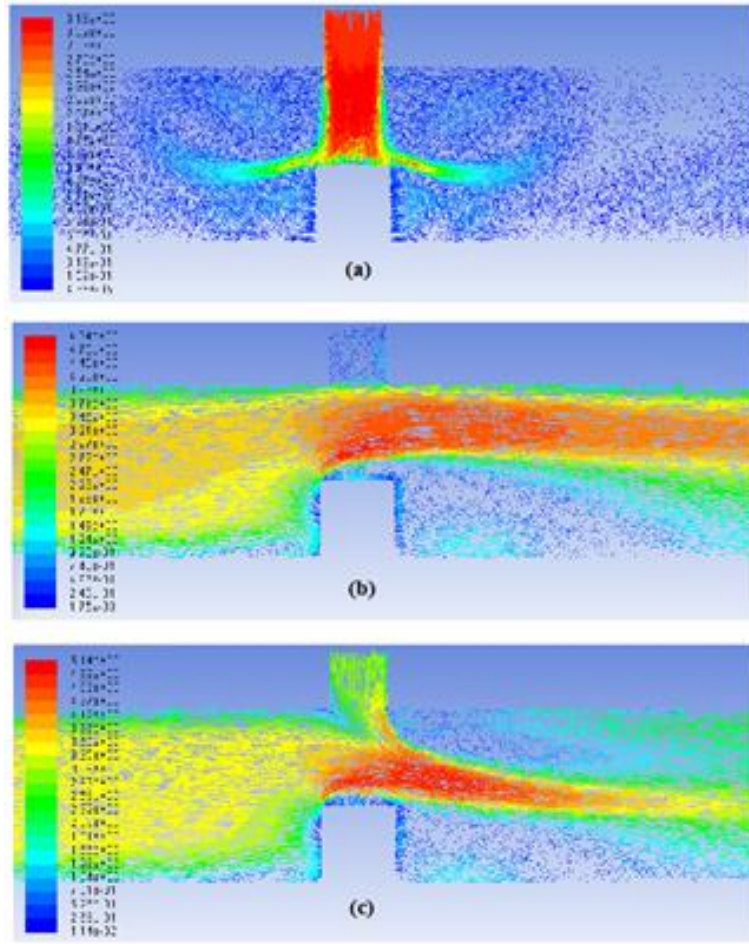
#### 4. Bulgular ve Tartışmalar

Bu çalışmada, sabit ısı akısına sahip elektronik bir elemanın 3 farklı akış yöntemi ile soğutulması sayısal olarak incelenmiş ve bu akış yöntemlerinin, H/D oranı ile değişiminin akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Sabit giriş hızı ve H/D (jet ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafesinin jet çapına oranı) oranının 2, 3 ve 4 değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler için kullanılan çalışma parametreleri Tablo 2’de görülmektedir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar yardımıyla çizilen grafiklerden bir kısmı aşağıda verilmiştir.

**Tablo 2.** Çalışma parametreleri

	$V_k$ (m/s)	$U_k$ (m/s)	H/D
Model 1	2,9474	0	2, 3 ve 4
Model 2	0	2,9474	2, 3 ve 4
Model 3	2,9474	2,9474	2, 3 ve 4

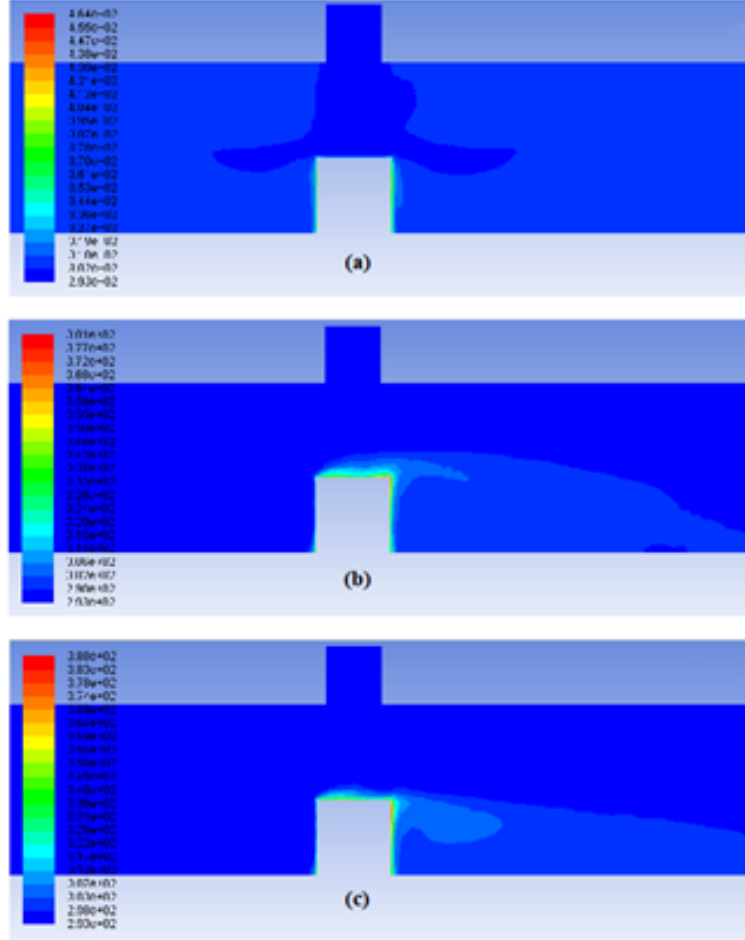
Sabit giriş hızları için elektronik elemanın etrafındaki hız vektör dağılımları, jet akış, kanal içi akış ve bu iki akışın kombine olarak uygulandığı hibrit akış için Şekil 6’da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, sadece jet akışın olduğu duruma bakıldığında jetten püskürtülen havanın direkt olarak elektronik elemanın üst yüzeyine çarptığı ve elektronik elemanın üst yüzeyindeki hız vektörlerinin diğer iki akışa kıyasla daha sık bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Jet akışın elektronik elemanın üst yüzeyine direkt olarak çarpması sonucunda, elektronik elemanın sol ve sağ yüzeylerinde döngüsel akış bölgeleri meydana gelmiş ve bu durumun yüzeylerdeki hız vektörlerinin bir miktar azalmasına neden olduğu görülmüştür. Sadece kanal akışın olduğu duruma bakıldığında ise, hız vektörlerinin ağırlıklı olarak elektronik elemanın sol yüzeyinde yoğunlaştığı görülmüştür. Ancak elektronik elemanın üst yüzeyindeki yoğunlaşmanın jet akışı kadar etkili olmadığı belirlenmiştir. Son olarak bu iki akışın kombine olarak kullanıldığı hibrit akış incelendiğinde ise, jet akış ve çapraz akışın elektronik elemanın üst tarafında kalan bir bölgede çarpışmaları sonucunda, jet akışın çapraz akışı bastırmaya çalıştığı ve elektronik elemanın üst yüzeyindeki vektörlerinin sıklaşmasına neden olduğu görülmektedir. Birbirine karışan jet ve kanal akışlar kanal çıkışına doğru yönelirken, elektronik elemanın sağ kısmında döngüsel akış bölgeleri oluşturmaktadır. Bu döngüsel akış bölgelerinin, elektronik elemanın sağ yüzeyindeki hız vektörlerinin diğer iki akışa kıyasla artmasına neden olduğu ve bu durumun elektronik elemanın yüzeylerinden gerçekleşen ısı transferinin artmasına sebep olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Hız vektör dağılımları a) Jet akış, b) Kanal içi akış ve c) Hibrit akış

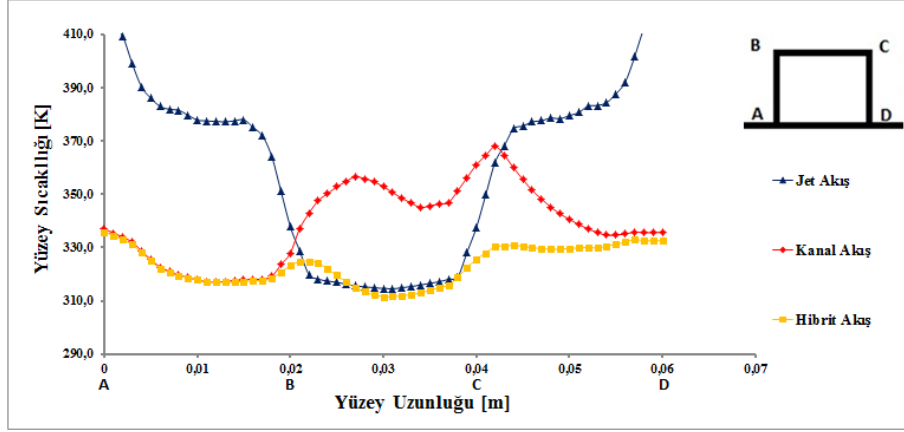
Sabit giriş hızları için elektronik elemanın etrafındaki sıcaklık dağılımları, jet akış, akış, kanal içi akış ve bu iki akışın kombine olarak uygulandığı hibrit akış için Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, sadece jet akışın olduğu duruma bakıldığında jetten püskürtülen akış direkt olarak elektronik elemanın üst yüzeyine çarptığı için, elektronik elemanın üst yüzeyindeki ısı sınır tabakanın incelmesi görülmektedir. Bu durum elektronik elemanın üst yüzeyindeki sıcaklığın azalmasını sağlamıştır. Ancak elektronik elemanın sol ve sağ yüzeylerine bakıldığında ise, bu yüzeylerde oluşan dögüsel akış bölgelerinin ısı sınır tabakaya yeterince etki edemediği gözlenmiştir. Bundan dolayı, sadece jet akış ile soğutma yapıldığında elektronik elemanın yan yüzeylerindeki sıcaklığın indirgenmesinde pek başarılı olunamadığı belirlenmiştir. Sadece kanal içi akışın olduğu duruma bakıldığında ise, elektronik elemanın üst yüzeyindeki ısı sınır tabakanın jet akışa kıyasla yeterince bozulmadığı görülmüş ve bu durumun bu yüzeydeki sıcaklığın artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Elektronik elemanın diğer yüzeylerinde ise ısı sınır tabakanın jet akışına göre kayda değer miktarda incelmesi fark edilmiş ve bu yüzeylerde daha düşük sıcaklık değerlerinin gözlemlendiği belirlenmiştir. Son olarak, bu iki akışın kombine olarak kullanıldığı hibrit akış tipi incelendiğinde, kanal girişinden giren akışkanın elektronik elemanın sol yüzeyine çarpması sonucu bu bölgede ısı sınır tabakanın bozulduğu ve bu yüzeydeki sıcaklığın azaldığı görülmüştür. Ayrıca üst lüleden

gönderilen akışkanın ise elektronik elemanın üst bölgesinden geçen kanal akışı baskılamaya çalışarak elektronik elemanın üst yüzeyinde ki sıcaklığının azalmasını sağladığı tespit edilmiştir. Birbirine karışan kanal ve jet akışların kanal çıkışına doğru ilerlerken döngüsel akış bölgeleri oluşturması sonucu, elektronik elemanın sağ yüzeyindeki ısıl sınır tabakanın da bir miktar bozulduğu ve sağ yüzeyde de sıcaklığın azaldığı görülmüştür.

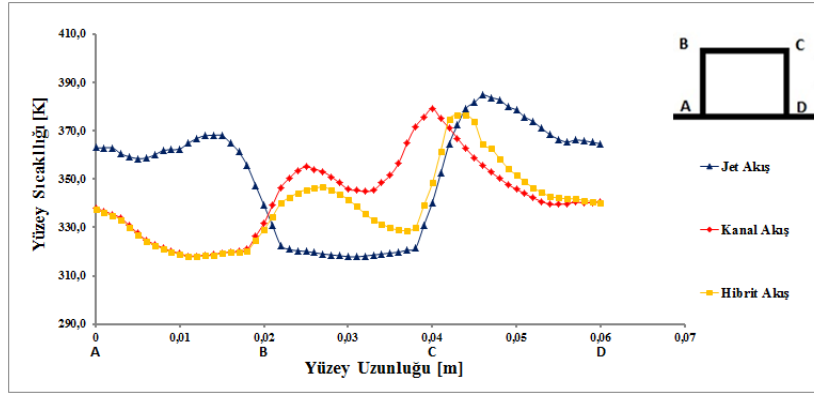


Şekil 7. Sıcaklık dağılımları a) Jet akış, b) Kanal akış ve c) Hibrit akış

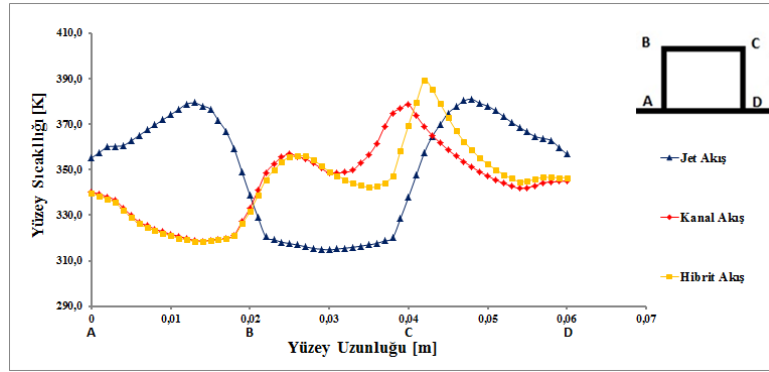
Sabit giriş hızlarında, jet akış, kanal içi akış ve bu iki akışın birlikte uygulandığı hibrit akış yapısı için elektronik elemanın yüzeylerindeki sıcaklığın yüzey uzunluğu ile değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Bu değişim şeklin şıklarında farklı H/D oranları için ele alınmıştır. Şekiller incelendiğinde, sadece jet akışın kullanıldığı durumunun bütün H/D oranlarında, elektronik elemanın üst yüzeyindeki sıcaklığın düşürülmesinde en etkili akış yöntemi olduğu görülmüştür. Elektronik elemanın diğer yüzeylerinde ise, jet akışın bu yüzeylere yeterince etki edemediği görülmektedir. Dolayısıyla yan yüzeylerde yüksek sıcaklık değerlerinin okunmasına neden olmuştur. Sadece jet akışın kullanılması durumu, diğer yöntemlere göre elektronik elemanın üst yüzeyindeki ısı transferini arttırsa da, elektronik elemanın bütünü düşünüldüğünde gerçekleşen ısı transferinin azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.



a)



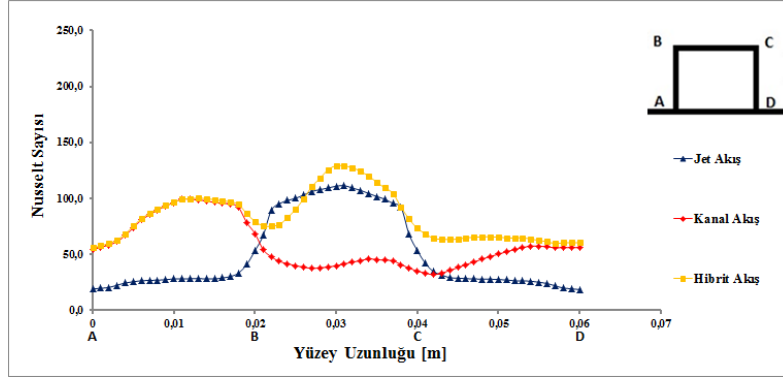
b)



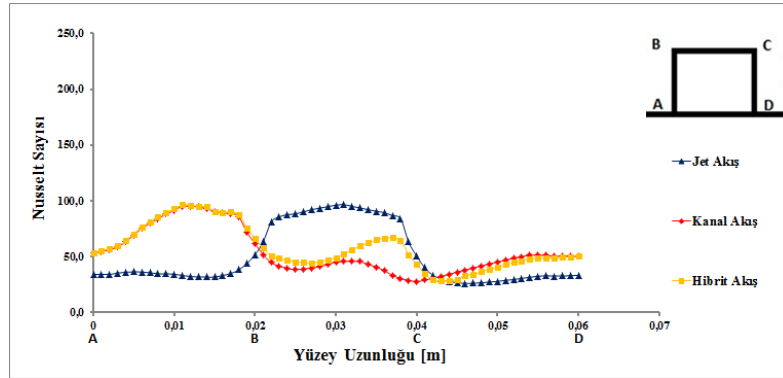
c)

**Şekil 8.** Elektronik elemanın yüzeylerindeki sıcaklığın yüzey uzunluğu ile değişimi a)  $H/D=2$ , b)  $H/D=3$ , c)  $H/D=4$

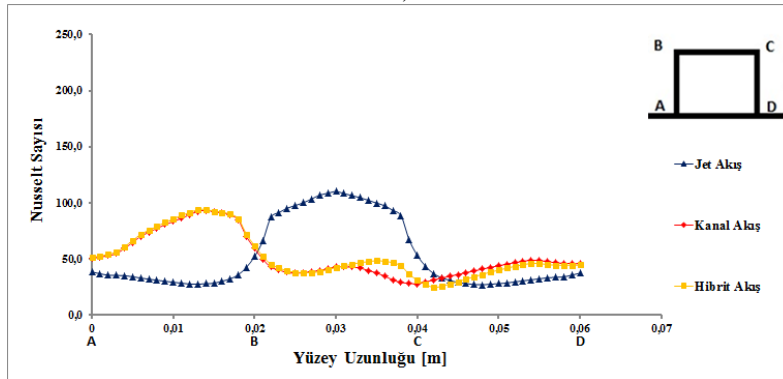
Sadece kanal içi akış kullanıldığında ise, elektronik elemanın sol ve sağ yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin sadece jet akış kullanıldığı duruma kıyasla kayda değer bir miktarda düştüğü görülmüştür. Ancak, kanal içi akışın, elektronik elemanın yan yüzeylerindeki sıcaklığın düşmesinde etkili bir yöntem olmasına rağmen üst yüzeyindeki sıcaklığı yeterli miktarda düşüremediği görülmüştür. Hibrit akışın kullanıldığı durumda ise elektronik elemanın üst yüzeyindeki sıcaklığı sadece jet akışın kullanıldığı durumdaki gibi düşüremese de diğer soğutma yöntemlerine oranla elektronik elemanın tüm yüzeylerinde kayda değer bir sıcaklık düşüşü sağlandığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada, ele alınan parametre aralığında, en yüksek ısı transferinin  $H/D=2$  oranında hibrit akış yönteminin kullanıldığı durumda gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



a)



b)



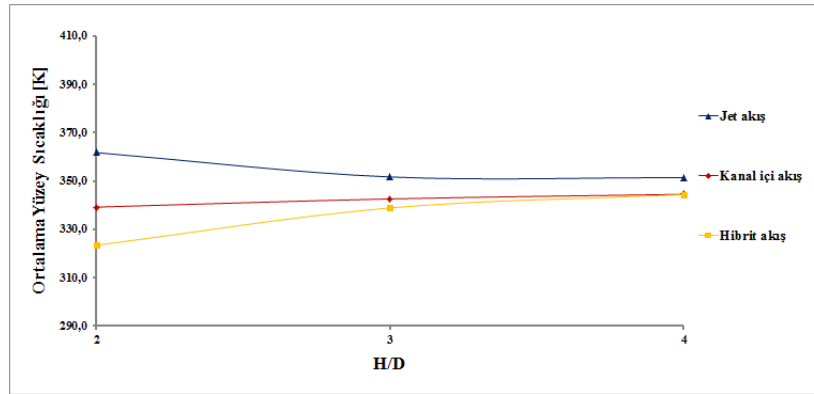
c)

Şekil 9. Elektronik elemanın yüzeylerindeki Nusselt sayısının yüzey uzunluğu ile değişimi a)  $H/D=2$ , b)  $H/D=3$ , c)  $H/D=4$

Jet akış, kanal içi akış ve hibrit akış için, elektronik elemanın yüzeylerindeki Nusselt sayısının, yüzey boyunca değişimi farklı  $H/D$  oranları için Şekil 9’da birlikte ele alınmıştır. Şekiller incelendiğinde, maksimum Nusselt sayısının genel olarak elektronik elemanın üst yüzeyinde sadece jet akış ve hibrit akış kullanılması durumunda gerçekleştiği görülmüştür. Sadece jet akış kullanıldığında elektronik elemanın üst yüzeyindeki Nusselt sayısında artış sağlansa da, elektronik elemanın diğer yan yüzeylerinde Nusselt sayısında ciddi bir azalma görülmüştür. Dolayısıyla, sadece jet akış ile yapılan bir soğutma, sadece elektronik elemanın üst yüzeyinde ki ısı transferini attırmak için etkili bir yöntem olarak görülmüştür. Sadece kanal akış kullanıldığında, elektronik elemanın yan yüzeyleri için hesaplanan Nusselt sayısında, sadece jet akışın kullanıldığı duruma kıyasla artış sağlanmıştır. Ancak

elektronik elemanın üst yüzeyinde yeterli miktarda ısı transferi gerçekleşemediği için, bu yüzeyde hesaplanan Nusselt sayısında bir miktar azalma gerçekleşmiştir. Son olarak hibrit akış incelendiğinde ise, bu soğutma yönteminin diğer iki yöntemin olumlu özelliklerini almasından dolayı, genel olarak bütün H/D oranlarında en yüksek ortalama Nusselt sayısı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla Hibrit akış ile yapılan soğutmanın, elektronik elemandan gerçekleşen ısı transferinde en yüksek değerleri sağlayan bir yöntem olduğu söylenebilir.

Şekil 10'da ortalama yüzey sıcaklığının H/D oranı ile değişimi farklı akış yöntemleri için birlikte verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, jet akış yapısı hariç diğer yöntemlerde H/D oranının azalması ile genel olarak ortalama yüzey sıcaklığının azalmaya başladığı görülmektedir. Bunun sebebi, kanal yüksekliğinin azalması sonucu, akım çizgilerinin elektronik elemana doğru sıkışması ve o bölgede sınır tabakayı bozması olarak söylenebilir. Ancak, H/D oranı 2 olduğunda sadece jet akışı olduğu duruma bakıldığında, ortalama yüzey sıcaklığının diğer H/D oranlarında belirlenen değerden fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun temel sebebinin, sadece jet akış yönteminin kullanımının elektronik elemanın üst yüzeyinde etkili bir soğutma gerçekleştirilmesine rağmen elektronik elemanın diğer yüzeylerini yeterince soğutamaması, dolayısıyla elektronik elemanın tamamının ortalama yüzey sıcaklığının artması olarak söylenebilir. Akış yöntemlerinin etkisi incelendiğinde ise, hibrit akış yönteminin bütün H/D oranlarında en düşük ortalama yüzey sıcaklığını vermesi sebebiyle en etkili soğutma yöntemi olduğu görülmektedir.

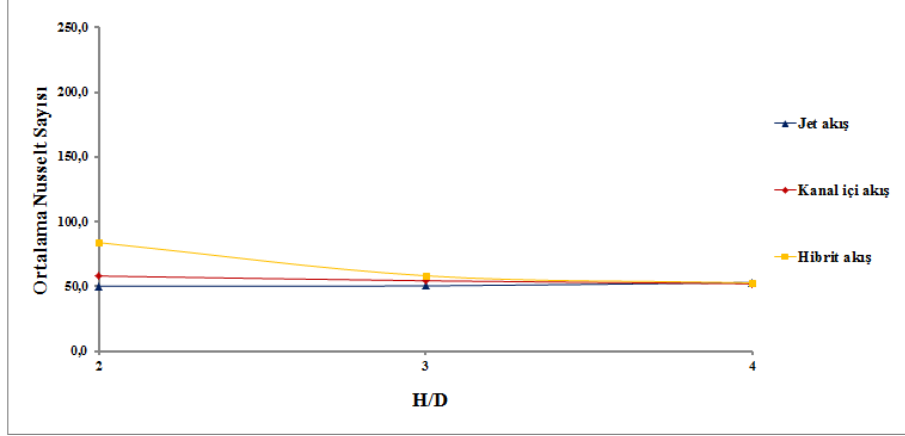


Şekil 10. Elektronik elemanın yüzeylerindeki ortalama yüzey sıcaklığının H/D oranı ile değişimi

Şekil 11'de ise, ortalama Nusselt sayısının H/D oranıyla değişimi farklı akış yöntemleri için birlikte görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, H/D oranı artmaya başlaması ile bütün akış yöntemlerimde ortalama Nusselt sayısının azalmaya başladığı ve birbirlerine çok yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir. H/D oranının azalması ile bu benzerlik bozulmaya başlamış ve H/D oranı 2 olduğunda akış yöntemlerinin etkisi net bir şekilde görülmeye başlamıştır. H/D oranı 2 iken, ortalama Nusselt sayısının en düşük değeri Jet akış yöntemi en yüksek değeri ise hibrit akış yöntemi kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Bu H/D oranı için ortalama Nusselt sayısının değeri, jet akış yöntemine göre kanal içi akış yönteminin kullanılması durumunda yaklaşık %20, hibrit akış yönteminin kullanılması



durumunda ise yaklaşık %67 seviyesinde bir artış göstermiştir. Ancak H/D oranı 4 olduğu durumda tüm akış yöntemleri için elde edilen ortalama Nusselt sayıları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Dolayısıyla, çalışılan parametre aralığında, düşük H/D oranlarında hibrit akış yönteminin genel olarak en yüksek ortalama Nusselt sayılarını vermesinden dolayı en etkili soğutma yöntemi olduğu söylenebilir.



Şekil 11. Elektronik elemanın yüzeylerindeki ortalama Nusselt sayısının H/D oranı ile değişimi

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığa ulaşan elektronik elemanların etkin bir şekilde soğutulması incelenmiştir. Elektronik elemanları etkin bir şekilde soğutulabilmek için kanal içi akış, jet akış ve hibrit akış yöntemleri kullanılmıştır. Bu kapsamda, bu yöntemler birbirleri ile kıyaslanarak, akış yapısı ve ısı transferi üzerinde gerçekleştirdiği etkilere yoğunlaşmıştır. Bu amaçla, sabit giriş hızı ve üç farklı H/D oranı (jet ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafenin jet çapına oranı) için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımı ile sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin sonucunda, H/D oranının azalması ile genel olarak ortalama Nusselt sayısının, dolayısıyla yüzeylerden gerçekleşen ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, jet akışın Nusselt sayısının, diğer akış yöntemlerine göre H/D oranından pek etkilenmediği görülmüştür. Elektronik elemanın yüzeylerinde gerçekleşen ısı transferine bakıldığında ise, jet akış elektronik elemanın üst yüzeyini soğutmada en etkili akış yöntemi olarak belirlenmiştir. Ancak, bu yöntemin elektronik elemanın üst yüzeyini diğer akış yöntemlerine kıyasla daha etkili soğutmasına rağmen, diğer yüzeylerinde bu etkiyi gösteremediği tespit edilmiştir. Kanal içi akış ile yapılan soğutmanın ise, elektronik elemanın sol ve sağ yüzeylerini soğutmada jet akışa kıyasla başarılı olsa da elektronik elemanın üst yüzeyini yeterince soğutamadığı gözlemlenmiştir. Bu iki akışın birleşik olarak kullanılması ile oluşan hibrit akış yöntemi ile yapılan soğutmanın, genel olarak en yüksek ortalama Nusselt sayısını veren akış yöntemi olduğu görülmüştür. Çalışılan parametre aralığında optimum soğutmanın, H/D=2 oranında hibrit akış yönteminin kullanılması ile yapılabildiği gözlemlenmiştir. Bu H/D oranında ortalama Nusselt sayısının değeri, jet akış yöntemi yerine kanal içi akış yönteminin kullanılması durumunda yaklaşık %20, hibrit akış

yöntemi kullanılması durumunda ise yaklaşık %67 artış göstermiştir. Dolayısıyla, düşük H/D oranlarında hibrit akış ile yapılan soğutmanın elektronik elemanın soğutulmasında diğer akış yöntemlerine kıyasla daha etkili olduğu söylenebilir. Gelecekte bu konu ile ilgilenen araştırmacılar, hibrit bir akışta kanal geometrisi, kanatçık eklentisi, Reynolds sayısı, akışkan tipi (nanoakışkan vb.), jet püskürtme açısı, ısı akısı, lüle sayısı vb. parametrelerin akış yapısı ve ısı transferine olan etkileri üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

### **Kaynakça**

- Bilen K. Isıtılan düzlem bir plakaya dik ve eğik hava jeti çarpmasında ısı transfer karakteristiklerinin deneysel incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Trabzon, Türkiye, 1994.
- Çalışkan S. Farklı jet ve çarpma plakası özelliklerinde çarpmalı akışkan jetlerinin ısı transferi ve akışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara, Türkiye, 2012.
- Çalışır T., Başkaya Ş., Çalışkan S., Kılıç M. Çarpan akışkan jetleri kullanarak kanatçıklı yüzeyler üzerindeki akış alanının sayısal olarak incelenmesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2017; 32(1): 119-130.
- Çengel YA., Ghajar AJ. Heat and mass transfer: fundamentals & applications. Fifth edition. McGraw-Hill Education. The United States of America; 2015.
- Demircan T. Numerical analysis of cooling an electronic circuit component with cross flow and jet combination. Journal of Mechanics 2019; 35(3): 395-404.
- Hatami M., Tehrani FB., Abouata A., Ahmar AM. Investigation of geometry and dimensionless parameters effects on the flow field and heat transfer of impingement synthetic jets. International Journal of Thermal Sciences 2018; 127: 41-52.
- Jing Q., Zhang D., Xie Y. Numerical investigations of impingement cooling performance on flat and non-flat targets with dimple/protrusion and triangular rib. International Journal of Heat and Mass Transfer 2018; 126: 169-190.
- Kabakuş A. Kanal akışında optimize edilmiş ısı alıcılarda çarpan jetle ısı ve akış karakteristiklerinin belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, Türkiye, 2012.

- Kılıç M., Çalışır T., Başkaya Ş., Experimental and numerical investigation of vortex promoter effects on heat transfer from heated electronic components in a rectangular channel with an impinging jet. *Heat Transfer Research* 2017; 48(5): 435-463.
- Kılıç M., Muhammad AH. Numerical investigation of combined effect of nanofluids and multiple impinging jets on heat transfer. *Thermal Science* 2019; 23(5): 3165-3173.
- Lak A. Çarpan eğik akışkan jet kullanarak düz plaka üzerindeki akış ve ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye, 2016.
- Mallor F., Vila CS., Ianiro A., Discetti S. Wall-mounted perforated cubes in a boundary layer: Local heat transfer enhancement and control. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 2018; 117: 498-507.
- Markal B., Aydın O. Experimental investigation of coaxial impinging air jets. *Applied Thermal Engineering* 2018; 141: 1120-1130.
- Masip Y., Rivas A., Larraona GS., Anton R., Ramos JC., Moshfegh B. Experimental study of the turbulent flow around a single wall-mounted cube exposed to a cross-flow and an impinging jet. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2012; 38: 50-71.
- Mergen S. Kanal içi akış ve çarpan jet ile birlikte elektronik eleman soğutulmasının sayısal olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye, 2014.
- Örs E. Kanal içi akış ve çarpan jet kullanımı ile elektronik elemanların soğutulmasının sayısal olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye, 2017.
- Ravanji A., Zargarabadi MR. Effects of elliptical pin-fins on heat transfer characteristics of a single impinging jet on a concave surface. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 2020; 152: 119532.
- Saleha N., Fadela N., Abbes A. Improving cooling effectiveness by use chamfers on the top of electronic components. *Microelectronics Reliability* 2015; 55: 1067-1076.
- Taghinia J., Rahman MM., Siikonen T. CFD study of turbulent jet impingement on curved surface. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 2016; 24: 588-596.
- Tang Z., Liu Q., Li H., Min X. Numerical simulation of heat transfer characteristics of jet impingement with a novel single cone heat sink. *Applied Thermal Engineering* 2017; 127: 906-914.
- Telişik ÇB. Lüle hedef yüzey arası uzaklığın çarpan jet akış ve ısı transferi karakteristiklerine etkisinin sayısal olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye, 2007.
- Türker E. Dönen bir disk yüzeyine çarpan jet akımının sayısal incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2006.

- Zhang Y., Li P., Xie Y. Numerical investigation of heat transfer characteristics of impinging synthetic jets with different waveforms. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2018; 125: 1017-1027.
- Zhu K., Yu P., Yuan N., Ding J. Transient heat transfer characteristics of array-jet impingement on high-temperature flat plate at low jet-to-plate distances. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2018; 127: 413-425.
- Zuckerman N., Lior N. Jet impingement heat transfer: Physics, correlations, and numerical modeling. *Advances in Heat Transfer* 2006; 39: 565-631.