

Farklı Desenli Bakır Plakaların Birleşik Jet Akışı ile Soğutulmasında Grafen Oksit (GO)-Su Nanoakışkanının Etkisi

Koray KARABULUT^{1*}, Doğan Engin ALNAK²

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 58140, Sivas

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

¹<https://orcid.org/0000-0001-5680-0988>

²<https://orcid.org/0000-0003-0126-1483>

*Sorumlu yazar: kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 06.03.2022

Kabul tarihi: 23.09.2022

Online Yayınlanma: 10.03.2023

Anahtar Kelimeler:

Çarpan jet-çapraz akışlı birleşik jet

Nanoakışkan

Mikroçip

Soğutma

Sayısal ısı transferi

ÖZ

Bu çalışmada, kanallarda bulunan sabit 1000 W/m^2 ısı akılı küp ve oyuklu desenlerin su ve %0,02 hacimsel nanoparçacık konsantrasyonlu GO (Grafen Oksit)-Su nanoakışkanı kullanılarak birleşik jet akışı ile soğutulması sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal çalışma, sürekli ve üç boyutlu olarak k-ε türbülans modeli Ansys-Fluent programının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanın termofiziksel özellikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Kanallara ayrıca jet girişinden itibaren D jet giriş çapı ölçüsünde sabit bir uzaklıkta (N) 90° açılı kanatçık eklenmiştir. Kanal yükseklikleri 3D ve 6D iken akışkanların Re sayısı aralığı 5000-9000' dir. Çalışmadan elde edilen sonuçların doğruluğu ve kabul edilebilirliği deneysel araştırmalar sonucu elde edilen eşitlik kullanılarak kanıtlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, kanallardaki her bir desen için ortalama Nu sayısı ve yüzey sıcaklığının değişimleri olarak su ve nanoakışkan için kanatçiksiz ve kanatçıklı durumlarda karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca, birleşik jet nanoakışkan akışının hız ve sıcaklık konturu dağılımları jet-desen arası etkileşimler de göz önüne alınarak farklı kanal yükseklikleri için sunulmuştur. Bununla birlikte, kanallardaki her üç desenli yüzeyin tümü için farklı Reynolds sayılarında performans değerlendirme sayıları (PEC) ve ortalama Nu sayısı (Nu_m) ve yüzey sıcaklık değerleri (T_m) Re = 9000 için değerlendirilmiştir. Re = 9000 ve H = 3D için GO-Su nanoakışkanlı kanatçıklı birleşik jet akışlı kanalda su akışkanlı ve kanatçiksiz kanala göre küp ve oyuklu desen yüzeyleri için Nu_m değerinde sırasıyla %45,04 ve %37,11' lik artışlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, Re = 5000 değerinde ve H = 3D yükseklikli kanallarda su akışkanı için PEC sayısı değerlerinin sırasıyla küp ve oyuklu desenli yüzeylerde nanoakışkana göre %1,69 ve %1,74 daha fazla oldukları tespit edilmiştir.

Effect of Graphene Oxide (GO)-Water Nanofluid on Cooling Different Patterned Copper Plates with Combined Jet Flow

Research Article

Article History:

Received: 06.03.2022

Accepted: 23.09.2022

Published online: 10.03.2023

Keywords:

Combined jet with impinging jet-

cross flow

Nanofluid

ABSTRACT

In this study, the cooling of cube and cavity patterns with constant 1000 W/m^2 heat flux in the channels by combined jet flow using water and GO (Graphene Oxide)-Water nanofluid with 0.02% volumetric nanoparticle concentration was numerically analyzed. The numerical study was carried out steady and in three dimensions by using the Ansys-Fluent program with k-ε turbulence model. The thermophysical properties of the nanofluid were obtained experimentally. In addition, 90° angled fins have been added to the channels at a fixed distance (N) in the size of the D jet inlet diameter from the jet inlet. While the channel

heights are 3D and 6D, the Re number range of the fluids is 5000-9000. The accuracy and acceptability of the results obtained from the study has been proven by using the equation obtained as a result of experimental research. The results of the study were examined comparatively for water and nanofluid in the without fin and with fin conditions as the mean Nu number and surface temperature variations for each pattern in the channels. In addition, velocity and temperature contour distributions of the combined jet nanofluid flow were presented for different channel heights, taking into account the jet-pattern interactions. However, performance evaluation numbers (PEC) at different Reynolds numbers and average Nu number (Nu_m) and surface temperature values (T_m) were evaluated for Re = 9000 for all three patterned surfaces in the channels. For Re = 9000 and H = 3D, 45.04% and 37.11% increases in Nu_m value were obtained for cube and cavity pattern surfaces in the combined jet flow channel with GO-Water nanofluid and fin compared to the water flow and the without fin channel, respectively. However, PEC number values for water fluid in channels with Re = 5000 and H = 3D heights were found to be 1.69% and 1.74% higher than according to nanofluid on cubed and cavity patterned surfaces, respectively.

To Cite: Karabulut K, Alnak DE. Farklı Desenli Bakır Plakaların Birleşik Jet Akışı ile Soğutulmasında Grafen Oksit (GO)-Su Nanoakışkanının Etkisi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2023; 6(1): 655-681.

1. Giriş

Minyatürleşme, ısı sistemlerinin teknolojisi üzerinde büyük bir etkiye sahip olup ısı enerjisi sistemlerini son derece kompakt ve verimli hale getirmektedir. Modern ve yüksek güçlü kompakt elektronik bileşenlerin kullanım ömrü, onların ısı yayma kapasitesinden etkilenmektedir (Lakshminarayanan ve Sriraam, 2014).

Akıllı televizyonlardan, bilgisayarlara, buzdolaplarından, insansız hava araçları ve motorlu taşıtlara kadar günlük hayatın her aşamasında kullanım alanı olan ve gelişen teknolojiyle birlikte minyatürleşerek ısınma problemi ortaya çıkan mikroçiplerin soğutulmaları oldukça önemli hale gelmiştir. Bu elemanların soğutulmasında çeşitli soğutma teknikleri uygulanmaktadır. Çapraz akış ile soğutma yöntemi, bu tekniklerden en yaygın olarak bilinenidir. Bu yöntem, soğuk akışkanın bir fanla tüm bileşenler üzerine gönderilmesi ve bu sayede elektronik bileşenlerin bütünüünün soğutulması esasına dayanmaktadır. Ancak, bu metot bütün devre elemanlarının soğutulması esasında olduğundan çok yüksek sıcaklıklardaki bileşenlerin soğutulmasında başarısız olabilir. Bir diğer soğutma yöntemi de çarpan jetle soğutmadır. Bu yöntemde, soğuk akışkan lüleyle sıcaklığı yüksek bir elemana yersel şekilde püskürtülür. Çarpan jet ile sıcaklığı yüksek bir devre bileşeninin soğutulması sağlanabilirken, devrenin bütünüünün soğutulmasında yetersiz kalabilmektedir. Bir elektronik devrede sıcaklıkları birbirlerinden oldukça farklı birden çok eleman bulunabilir. Bu sebeple, tek çeşit soğutma yöntemi ile bütün devreyi güvenli şekilde tutabilecek şartlara erişilmekte sıkıntı olabilir. Bu nedenle; çarpan jet ve çapraz akış soğutma yönteminin bir arada işleme alınarak birleşik jet akışı şeklinde uygulanması soğutma kapasitesi yüksek faydalı bir durum oluşturabilir. Çapraz akışla devre elemanları bir bütün olarak belirli bir aşamaya kadar soğutulabilirken, devrede sadece çok yüksek sıcaklıktaki elemanlar ise çarpan jet akışıyla noktasal olarak soğutulabilmektedir (Teamah ve ark., 2015; Kılıç, 2018).

Literatürde, yalnızca çapraz akış veya yalnızca jet akışın değerlendirildiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma için incelenen model daha ziyade jet akışa benzediğinden, literatür

incelemesinde daha çok jet akış üzerine odaklanılmıştır. Bununla birlikte, literatürde çarpan jetler hakkında birçok sayısal ve deneysel araştırma mevcuttur. Bu çalışmalarda ise temel olarak çarpan jetler için kullanılan akışkanın türü, akış alanına ait geometri, türbülanslı model, Reynolds sayısı, jet mesafesi ve ısı akışı gibi değişkenlerin devre bileşenlerinden olan ısı transferine etkileri üzerinde incelemelerde bulunulmuştur. Bunun yanı sıra, çapraz akış ve çarpan jet akışın birlikte kullanıldığı soğutma yöntemleriyle ilgili yapılan çalışmalar sınırlı olup, akışkanın kanal içerisindeki ısınmış yüzeylere yönlendirilmesiyle ilgili olarak bu çalışmada araştırıldığı gibi ayrıntılı kanal ve ısınmış yüzey tasarımlarının olduğu ve son yıllarda önemi ve kullanımı giderek artan karbon kökenli GO-Su nanoakışkanının kullanıldığı bir çalışmaya elde edilen literatürde rastlanmamıştır.

Kilic ve ark. (2017) bir tarafı açık ve üç tarafı kapalı kenarlardan oluşan dikdörtgen bir kanaldaki sabit ısı akılı ve bakır plakalı elektronik bileşenlerin tek bir hava jeti ile soğutulmaları üzerinde vorteks üreticinin etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Türbülanslı akış için kullandıkları Re sayısı 8000 iken; elemanlara uygulanan sabit ısı akışı değeri 1000 W/m^2 'dir. Isı transferinin girdap üreticinin yerleşimine, uzunluğuna ve açıl konumuna duyarlı olduğunu gözlemlemiştir. Kılıç ve Ullah (2021) farklı Re sayılarında ($Re = 6000-12000$) Realizable $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanarak sayısal olarak farklı akışkanların ($\text{Cu-H}_2\text{O}$, $\text{CuO-H}_2\text{O}$, $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, H_2O) çapraz akışlı ısı değiştiricilerinde soğutma performanslarını araştırmışlardır. Suyu göre en iyi performans gösteren akışkan olan $\text{Cu-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının ortalama Nu sayısını %6,63 artırdığını belirlemiştir. Bir diğer çalışmada; Kılıç ve Abdulvahitoğlu (2019) bir araç radyatöründe nanoakışkanlar ve dönen jetler ile sayısal olarak ısı transferini çalışmışlardır. Çalışmada, baz soğutucu olarak tüm parametreler için $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanı seçilmiştir. Re sayısının 12.000'den 21.000'e artışı ile ortalama Nusselt sayısında (Nu) %51,3'lük bir artış elde edilmiştir. Dal ve ark. (2020) hidrostatik yataklarda nanoparçacık ilaveli yağlayıcı akışkan kullanımının yük taşıma kapasitesine etkisi teorik olarak araştırılmışlardır. Yapılan çalışma ile nanoparçacık takviyeli yağlayıcı kullanımının hidrostatik yatakların yük taşıma kapasitesini artırdığını ve yüksek hacimsel oranlar için nanoparçacık boyutunun performans etkisinin daha baskın olduğunu belirlemiştir. Hadipour ve Zargarabadi (2018) çarpan dairesel bir jet akışının sabit ısı akılı iç bükey bir yüzey üzerindeki akış ve ısı transferi özelliklerini, değişik jet-plaka arası oranlarında sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Farklı H/D (kanal yükseklik/jet giriş çapı) oranları, Re sayıları ve jet çapı değerlerinde araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Sabit Re sayısında jet çapı artışıyla ısı transferinin arttığını görmüşlerdir. Karabulut ve Alnak (2021) dikdörtgen kesitli kanallardaki çatı ve ters yamuk şeklinde iki farklı desene sahip bakır plakalı yüzeylerin farklı jet giriş genişliklerinde tek bir hava jeti akışı ile soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarında kullandıkları jet giriş genişlikleri $0,5 D_h$ ve D_h iken jet-plaka arası uzaklıkları (H/D_h) 3 ve 6 olarak almışlardır. Sonuç olarak, $0,5 D_h$ jet genişliğinde, $H/D_h = 6$ iken $Re = 5000$ değerinde ortalama Nu sayısının çatı desenli yüzeyde ters yamuk desenli yüzeyden %25,92 daha fazla olduğunu belirlemiştir. Karabulut ve Alnak (2020), yaptıkları bir diğer çalışmada ise üç tarafı kapalı ve bir tarafı açık, jet-plaka arası uzaklığı (H/D_h) 4-10 arasında olan dikdörtgen kesitli kanallar

içerisindeki sur ve dikdörtgen şeklinde olmak üzere iki farklı desene sahip sabit ısı akılı bakır plakalı yüzeylerden olan ısı transferini tek bir hava jeti akışı kullanarak incelemişlerdir. Yaptıkları araştırma sonucunda Reynolds sayısının 4000 ve jet-plaka arası uzaklığın 4 olduğu değer için sur desenli yüzeylere göre dikdörtgen desenli yüzeylerde %31,45 daha yüksek ortalama Nu sayısı değeri tespit etmişlerdir. Demircan (2019) elektronik devre elemanından olan ısı transferini çapraz akış-çarpan jetle sayısal olarak incelemiştir. Re sayısı, jet-kanal hız oranlarının farklı değerlerinde araştırmalar yapmıştır. Çalışmasında, Re sayısı ve hız oranlarının iyileşmesiyle ısı transferinin kayda değer oranda arttığı sonucuna ulaşmıştır. Mergen (2014), 3500 W/m^2 'lik sabit ısı akısında elektronik bir elemandan çarpan jet-çapraz akışla olan ısı transferini incelemiştir. Sonuç olarak, jet Re sayısı/kanal Re sayısı (Re_j/Re_k) oranı azaldıkça ısı transferinin düştüğünü saptamıştır. Sabit ısı akısına sahip elektronik bir elemanın çarpan hava jeti ve çapraz akış kombinasyonu ile soğutulması sayısal olarak Öztürk ve Demircan (2022) tarafından araştırılmıştır. Çalışmalarında farklı jet giriş hızının kanal giriş hızına göre oranları (0, 1, 2 ve 3) ve 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ ve 90° olmak üzere kanala yerleştirilen kanatçıkların farklı açıları için kanaldaki tek bir elemandan olan ısı transferi incelenmiştir. Kanal yüksekliğinin jet çapına oranı sabit ve 3 olarak alınırken, kanalda akışkan olarak hava kullanılmıştır. Elemandan olan en yüksek ısı transferinin, giriş hızının kanal giriş hızına oranının 3 ve kanatçık açısının 90° olduğu durumda erişildiği belirlenmiştir. Maghrabie ve ark. (2017) kanal boyunca sıralı yedi adet devre elemanından meydana gelen bir sistemin çarpan jet-çapraz akış kombinasyonu ile ısı transferini sayısal olarak değerlendirmişler ve ısı transferi üzerinde jet konumu değişikliğinin etkisini belirlemişlerdir.

Nanoakışkanların kullanıldığı jet çarpmalı çalışmalar incelendiğinde; Chang ve Yang (2014) Al_2O_3 -su nanoakışkanını kullanarak jet çarpmalı akış kaynamasının ısı transfer performansını incelemişlerdir. Al_2O_3 -su nanoakışkanının jet çarpma akışının ısı transferi performansının, çalışma sıvısı olarak kullanılan sudan daha kötü olduğu bulunmuştur. Isı transfer performansındaki azalmanın ısıl direncin artmasıyla sonuçlanan ısıtılmış yüzey üzerindeki bir nano-soğurma tabakasının oluşmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, ısıtılan yüzeye akustik titreşim uygulanarak nano-soğurma tabakasının oluşumu önlenirken, bu durumda Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılarak elde edilen ısı transfer performansı su kullanılarak elde edilenden daha iyi olmaktadır. Datta ve ark. (2018) dış bükey bir yüzey üzerine sınırlı bir yarıktan jet çarpmasında Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanarak ısı transfer performansının araştırılması için sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Sistemin akış davranışını ve taşınım ısı transfer performansını araştırmak için çeşitli Reynolds sayıları, jet-plaka arasındaki mesafe gibi farklı parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Ortalama Nusselt sayısı ve ısı transfer katsayısının jet giriş Reynolds sayısındaki artışla önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir. Kumar ve ark. (2021) ısı transfer oranını artırmak için jet çarpmalı durumda kanat profili sütunlarıyla birleştirilmiş bir ısı emici kullanmışlardır. Bunu gerçekleştirirken araştırmalarında su ve %1 konsantrasyonlu CuO -su nanoakışkanından yararlanmışlardır. Sonuçlarında, ısı emici sıcaklığında jet akışkanı olarak su akışkanı kullandıklarında %10'luk bir azalma elde ederlerken; nanoakışkan

kullandıklarında ise sıcaklık düşüşünün %14' ü bulunduğunu saptamışlardır. Mikrokanalın üst duvarında tırtıklı enjeksiyon jeti bulunan ve 0-40 Hartman yoğunluğunda manyetik alan kullanan bir mikrokanal içindeki %0-6 Al₂O₃-Su nanoakışkanın akışı Jalali ve ark. (2022) tarafından incelenmiştir. Jet çarpma bölmeli alt mikro kanal duvarı sabit bir sıcaklığa sahipken üst mikro kanal duvarı çarpan jetler arasında yalıtılmıştır. Isı transferini artırmak amacıyla çarpan jetler için girintili mod uygulanmıştır. Sonuçlar, tırtık çentik yüksekliğinin fazla olmasının ısı transferini o ölçüde artırdığını göstermiştir. Selimefendigil ve Chamka (2020) CuO-su nano jeti kullanılarak oyuk benzeri bir kısmı olan izotermal bir yüzeyin soğutulmasında taşınım ısı transfer özelliklerini sayısal olarak analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarını, Reynolds sayısının farklı değerlerinde (100-400), farklı oyuk uzunlukları (5w-40w) ve yüksekliklerinde (w-5w) nanoparçacığın hacimsel konsantrasyonunu (%0-4) değiştirerek gerçekleştirmişlerdir. Oyuk uzunluğu düşük olduğunda, oyuğun eğimli duvarının ortalama Nusselt sayısına katkısının önemli olduğunu ve en yüksek hacimsel konsantrasyonda su yerine nanoakışkan kullanıldığında ortalama ısı transferinin %35-46 oranında arttığını belirlemişlerdir. Abdullah ve ark., (2019) çalışmalarında alüminyum bir plaka yüzeyine çift jet çarpmasının ısı transferi üzerinde TiO₂ nano çözeltisi konsantrasyonunun etkisini deneysel analiz yoluyla incelemişlerdir. Bunun haricinde değişkenler olarak çift jetin lüle mesafesini ve lüle-plaka mesafesini göz önüne almışlardır. Bu verilere bağlı olarak çift jetin akış yapısının ısı transferi artışını etkileyen önemli bir durum olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, mesafelerin ve akış yapısını etkileyen nanoparçacık konsantrasyonunun da Re sayısı ile birlikte Nu sayısını etkilediğini belirlemişlerdir. Shi ve ark. (2021) nano-alüminyum katkı maddelerinin yuvarlak su jetlerinin kararsızlığı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. İki şeffaf lülenin içinde ve çıkışının yakınında akış görselleştirmesi, yüksek hızlı gölge görüntüleme tekniği ile elde edilmiş ve nanoparçacık katkı maddelerinin jet kararsızlığı üzerindeki etkilerine esas olarak, viskozite artışı ve kavitasyon teşvikinin neden olduğu belirlenmiştir. Ulaşılan literatür incelemelerinden de anlaşıldığı üzere çarpan jetlerle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak, nanoakışkanın kullanıldığı ve çarpan jet-çapraz akışın birlikte uygulandığı birleşik jet akışlı çalışma sayısı oldukça azdır. Bu çalışmada, küp ve oyuklu desenli bakır plakalı yüzeylerin çarpan jet-çapraz akış birleşik su ve %0,02 GO-Su nanoakışkan jet akışıyla kanatçiksız ve 90° açılı kanatçıklı farklı kanal yükseklikli (H = 3D ve 6D) ve sabit kanatçık mesafeli (N = D) kanallarda soğutulmaları sayısal olarak araştırılmıştır. Kanal içerisinde bulunan elemanların farklı desenli yüzeyler olarak seçilmesinin nedeni, birleşik kombine jet akışının soğutulacak desenli yüzeyler üzerindeki temasının artırılmasını sağlamanın yanında; jet akışın bir desenli yüzeye çarptıktan sonra tekrar kanal içerisindeki diğer desene doğru yönelmesini sağlayarak ısı transferi etkisini artırmaktır. Kanatçık, literatürde bulunan Öztürk ve Demircan (2022) tarafından yapılan çalışma da göz önünde bulundurularak; kanaldan gelen çapraz akışın ilk sırada bulunan desenler üzerine daha iyi yönlendirilebilmesi ve desenler arası boşlukta bulunan akışkanın hızının artırılabilmesi etkileri dikkate alınarak; akışı engellemeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Sayısal incelemede, sürekli ve üç boyutlu enerji ve Navier-Stokes denklemleri k-ε türbülans modeli Ansys-Fluent programı kullanılarak

çözölmüştür. Kanatçık ve kanalın alt ve üst yüzeyleri adyabatik iken; desenli yüzeyler literatürde de uygulanan 1000 W/m^2 lik sabit ısı akısına sahiptir (Kilic ve ark., 2016; Kilic ve ark., 2017; Karabulut 2019; Alnak ve ark., 2021). Bilindiği gibi aşırı ısınma elektronik elemanların yoğun çalışma yükü altında oluşmaktadır. Bu ısı yükü ile birlikte, elemanların sıcaklıkları 308 ila 353 K arasında değişen sıcaklıklara kadar ulaşabilmektedir. Bu çalışmada da sırasıyla küp ve oyuklu desenler için elde edilen yüzey sıcaklıkları aralığı 307-310 K ve 308-311 K olmaktadır. Bu nedenle, yüzeylere uygulanan sabit ısı akısı yaklaşımının doğru olduğu görölmektedir.

Akışkanların çalışma Reynolds sayısı aralığı 5000-9000' dir. Seçilen bu Re sayısı değerleri literatürde yapılan çalışmalar temel alınarak seçilmiş olup; hem jet Re sayısını (Re_j) hem de kanal Re sayısını (Re_k) temsil etmektedir. Buna bağlı olarak, örnek verecek olursak; çalışmada $H = 3D$ kanal yüksekliğinde; jet ve kanalda nanoakışkan akışı için Reynolds sayısının 5000 olduğu değerlerde akış hızları sırasıyla $V_j = 0,355 \text{ m/s}$ ve $V_k = 0,103 \text{ m/s}$ olmaktadır. Aynı kanal yüksekliğinde $Re=9000$ için bu değerler sırasıyla $V_j = 0,638 \text{ m/s}$ ve $V_k = 0,186 \text{ m/s}$ 'dir. Dolayısıyla, literatürde ulaşılan çalışmalar da göz önüne alındığında hem jet hem de kanal akışı için çalışılan Re sayısı aralığı ($Re = 5000-9000$) türbölanslı olarak kabul edilmektedir. Çalışmada kullanılan %0,02 hacimsel konsantrasyonlu GO-Su nanoakışkanının ısıl iletkenliği, yoğunluğu ve viskozitesi deneysel olarak elde edilmiş olup; yalnızca özgül ısı Pak and Cho (1998) tarafından türetilen eşitlik yardımıyla bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları, literatürdeki deneysel çalışma sonucu elde edilen denklemin sonuçlarıyla kıyaslanmış ve birbirleriyle uyumlu oldukları saptanmıştır. Sonuçlar, her bir küp ve oyuklu desenli yüzeyde ortalama Nu sayısı ve yüzey sıcaklıklarının değişimleri şeklinde sunulmuştur. Ayrıca, kanatçıkların ve nanoakışkanın birleşik jet akışlı kanallarda kanatçiksız ve su kullanılan durumlara göre Nu sayısı artışına karşı basınç düşüşleri, performans değerlendirme sayısı (PEC) göz önüne alınarak yorumlanmıştır.

1.1. Nanoakışkanın Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan grafen oksit (GO) nanoparçacığı grafitten sentezlenmiştir. GO nanoparçacığı sentezlenirken grafit bazı kimyasal işlemlerden geçirilmiştir. Bu işlemlerden sonra grafit asit ve kimyasallardan ayrıştırılması için saf sudan geçirilmiş ve daha sonrasında GO nanoparçacığı elde edilmesi için fırında kurutma işlemine tabi tutulmuştur (Hajjar ve ark., 2014; Hummers ve Offeman, 1958). GO-Su nanoakışkanı, sentezlenen GO nanoparçacığı kullanılarak iki aşamalı nanoakışkan hazırlama yöntemiyle elde edilmiştir. İki aşamalı prosedür, doğrudan nanoparçacıklarla suyu karıştırma ve elde edilen nanoakışkandaki nanoparçacıkların kümeleşmesini önlemek için ultrasonik ses dalgaları üreten ultrasonifikatör cihazından geçirmekten oluşmaktadır. Bu amaçla istenilen hacimsel konsantrasyona bağlı olarak 0,1 mg hassasiyetli hassas terazi ile ölçülerek GO nanoparçacıkları hazırlanmıştır. %0,02 hacimsel konsantrasyonlu GO-Su nanoakışkanı elde etmek için 0,8 g GO nanoparçacığı kullanılmıştır. Elde edilen nanoakışkan kararlılığını sağlamak için ultrasonikatör cihazı ile ses dalgalarına maruz bırakılmıştır.

Nanoakışkandaki hacimsel nanoparçacık konsantrasyonu Eşitlik (1) (Karabulut ve ark., 2020) ile hesaplanır.

$$\frac{v_p}{v_{nf}} = \frac{v_p}{v_{bf} + v_p} = \frac{\frac{m_p}{\rho_p}}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_{bf}}{\rho_{bf}}} = \frac{m_p \rho_{bf}}{m_p \rho_{bf} + m_{bf} \rho_p} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de m_p ve m_{bf} sırasıyla nanoparçacık ve suyun kütlelerini, ρ_{bf} ve ρ_p ise sırasıyla suyun ve nanoparçacığın kütlelerini göstermektedir.

1.2. GO-Su Nanoakışkanının Termofiziksel Özellikleri

Çalışmada kullanılan nanoakışkanın viskozite, ısıl iletkenlik katsayısı ve yoğunluk gibi termofiziksel özellikleri literatürde kullanılan herhangi bir eşitlik ile belirlenmemiş olup, viskozite değeri Malvern Kinexus Pro koni ve plaka gerilimi kontrollü reometre ile (Karabulut ve ark., 2020), ısıl iletkenlik katsayısının ölçümü günümüzde literatürde yaygın olarak kullanılan sıcak tel yöntemi ile KD2 Pro ısıl iletkenlik ölçerle (Karabulut ve ark., 2020) ve yoğunluk ölçümü ise Anton-Paar DMA 4200 Yoğunluk Ölçer (Karabulut ve ark., 2020) kullanılarak deneysel olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, nanoakışkanın özgül ısı değerine Eşitlik (2)'deki Pak ve Cho (1998) tarafından önerilen analitik model sonucunda ulaşılmıştır.

$$c_{p,nf} = (1 - \phi)c_{p,bf} + \phi c_{p,p} \quad (2)$$

Eşitlik (2)'deki p, nf ve bf sırasıyla parçacık, nanoakışkan ve su akışkanını ifade etmektedir. Ayrıca, konsantrasyonun düşük olması (%0,02) nedeniyle nanoakışkanın hesaplanması sonucunda elde edilen özgül ısı değeri suya yakın olduğu için suyla birbirine eşit alınmıştır.

Nanoakışkanın ve suyun özgül ısısı dışında diğer termofiziksel özellikleri deneysel olarak elde edilmiş ve Tablo 1'de gösterilmiştir (Karabulut ve Alnak, 2021).

Tablo 1. 30°C sıcaklıkta akışkanların termofiziksel özellikleri

Akışkan	k (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	μ (Ns/m ²)
Su	0,6172	995,8	4178,4	803,4x10 ⁻⁶
GO-Su nanoakışkanı	0,678	996,1	4178,4	1060x10 ⁻⁶

Ölçülen değerlerin belirsizlik analizleri, Taylor (1997)'in belirsizlik analizi yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 2'de verilmiştir. Gösterilen değerler, tüm deneysel durumlar dikkate alınarak verilen parametreler için maksimum değerlerdir.

Tablo 2. Deneysel değerler için belirsizlik analizinin sonuçları

Değişken	Mutlak belirsizlik aralığı	Birim
k	±0,006	W/mK
ρ	±9,9	kg/m ³
μ	±1,2x10 ⁻⁶	Ns/m ²
c _p	±41,78	J/kgK

2. Sayısal Metot

Desenli yüzeylerdeki birleşik jet akışın zorlanmış taşınım ısı transferinin çözümünde Ansys-Fluent programı kullanılmıştır.

Akış ve ısı transferi, aşağıdaki gibi gövde kuvvetinin bulunmadığı sürekli, kanaldaki birleşik jet akış nedeniyle gerçekleşen türbülanslı akış için kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinden zaman ortalamalı olarak türetilen diferansiyel denklemlerin çözümleriyle yapılmıştır (Wang ve Mujumdar, 2015; Alnak ve ark., 2021; Karabulut ve Alnak, 2021).

Isı transferi süreçlerinde türbülansın doğru modellenmesi esastır. Bununla birlikte, türbülanslı akışkanların doğrudan sayısal simülasyonları çok zor olup aynı zamanda zaman alıcı bir süreçtir. Sayısal modellemelerde kullanılan çeşitli türbülans modelleri (Genç ve ark., 2009; Genç 2010; Genç ve ark., 2011) bulunmakla birlikte, bu modeller arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukla sonuç vermesi bakımından yarı ampirik bir model olan k-ε türbülans modeli yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang ve Mujumdar, 2005). Çarpan jetlerle ilgili olarak yapılan çalışmaların birinde, Wang ve Mujumdar (2005) türbülanslı jetler için düşük Re sayılı birkaç k-ε türbülans modelini test etmişlerdir. Modellerin, Nu sayısı dağılımının genel şeklini belirleyebildiğini ve büyük jet-plaka arası uzaklıklar için durma noktasında modellerin daha iyi uygulandığını saptamışlardır. Çalışmalarında, standart yüksek Re sayılı modellerle kıyaslandığında, k-ε türbülans modelinin çarpan jetlerin ısı transferi özelliklerini belirlemede iyi bir performans sergilediğini belirlemişlerdir. Ayrıca, çalışmada diğer türbülans modelleriyle karşılaştırıldığında kinetik enerji üretimini azaltmaya ve durma bölgesinde olması gereken sonuca yaklaşıldığından k-ε türbülans modelinin uygun olduğunu belirlemişlerdir. Buna göre, literatürdeki çalışmalardan elde edilen sonuçlar da göz önüne alınarak bu çalışmada sayısal hesaplamalarda desenli yüzeyler için standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

Momentum denklemi

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

Enerji denklemi

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho c_p \bar{T}' u_i' \right] \quad (5)$$

Türbülans kinetik enerji denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

Türbülans kinetik enerji yutulma terimi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

Bu denklemlerde, ρ akışkanın yoğunluğunu, k türbülanslı akışın kinetik enerjisini belirtilirken, u_i x, y ve z yönlerindeki hız bileşenlerini, μ akışkanın viskozitesini, σ_k ($\sigma_k = 1$) türbülanslı kinetik enerji Pr sayısını göstermektedir. Türbülanslı kinetik enerji üretimi (G_k) ve türbülanslı akışın viskozitesini (μ_t) gösteren eşitlikler aşağıdaki gibidir (Wang ve Mujumdar, 2015; Karabulut ve Alnak, 2021).

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

Türbülans yutulma Pr sayısı σ_ε ile belirtilirken, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ ve $\sigma_\varepsilon = 1.3$ değerlerine sahip olan eşitliklerdeki katsayılarıdır (Saleha, 2015).

Ortalama ısı taşınım katsayısı h , Eş. 10 ve Nusselt sayısı (Nu) ise Eş. 11 ile hesaplanmaktadır (Incropera, 2007).

$$h = \frac{q''}{T_y - T_a} \quad (10)$$

Nu sayısı

$$-k_a \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_y = h (T_a - T_y) \text{ ve } Nu = \frac{h(3m)}{k_a} \quad (11)$$

Bu eşitliklerde, T_a ve T_y sırasıyla akışkanının ve elemanın ortalama olarak yüzey sıcaklıklarını (K), k_a akışkanın ısı iletim katsayısını (W/m.K), $3m$ akışkanın temas ettiği elemanın toplam yüzey uzunluğunu (m), h ve h_m ise sırasıyla desenli yüzey boyunca noktasal ve ortalama ısı taşınım katsayısını (W/m².K), n ise yüzeye dik yön olup desenli yüzey ortalama Nu sayısı (Nu_m) aşağıda belirtilen eşitliklerden bulunmaktadır.

Desenli yüzey ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_m = \frac{1}{3m} \int_0^{3m} h dx \quad (12)$$

Desenli yüzey ortalama Nu sayısı

$$Nu_m = \frac{h_m(3m)}{k_a} \quad (13)$$

Kanalın hidrolik çapı

$$D_{ih} = \frac{4A_k}{P_k} = \frac{4(HW)}{2(H+W)} \quad (14)$$

Bu eşitlikte, A_k ve P_k sırasıyla kanalın kesit alanı ve ıslak çevresini gösterirken, kanalın yükseklik ve genişliği ise H ve W ile temsil edilmektedir. Jet giriş çapı D , dairesel girişli jet hidrolik çapına D_{hjet} eşittir.

Kanalın ve jetin Re sayıları ise sırasıyla Eş. (15) ve (16) kullanılarak belirlenmektedir.

$$Re_k = \frac{\rho_a V_k D_{ih}}{\mu_a} \quad (15)$$

$$Re_j = \frac{\rho_a V_j D}{\mu_a} \quad (16)$$

Bu eşitliklerde, akışkanın kanal ve jet akış hızları sırasıyla V_k ve V_j (m/s) ile gösterilmektedir.

Basınç düşüşü (ΔP) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta P = \frac{f \rho L}{2D_{ih}} V_k^2 \quad (17)$$

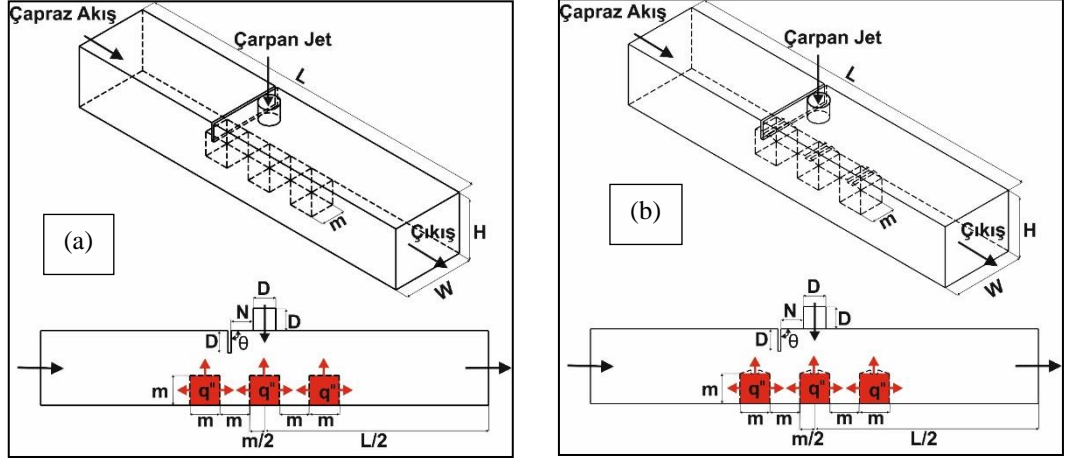
Bu eşitlikte, ΔP kanatçıksız ve kanatçıklı kanalların giriş ve çıkışları arasındaki basınç düşüşünü (Pa), f sürtünme faktörünü ve L kanalın uzunluğunu (m) temsil etmektedir. Performans değerlendirme sayısı (PEC) ise aşağıda belirtilen Eşitlik (18) ile bulunmaktadır (Alnak, 2020).

Performans değerlendirme sayısı (PEC)

$$PEC = \frac{(Nu_{m-kanatçıklı} / Nu_{m-kanatçıksız})}{(\Delta P_{kanatçıklı} / \Delta P_{kanatçıksız})} \quad (18)$$

3. Desen Geometrileri

Çalışmadaki çarpan jet-çapraz akış birleşik jet akışlı kanatçıklı kanallar ve kanallardaki küp ve oyuklu desen yüzeylerine sahip elemanların ölçüleri Şekil 1 (a) ve (b)'de verilirken; kanalların boyutsal ölçüleri ise Tablo 3'te verilmiştir. Bunun yanı sıra, bu çalışmada yapılan kabuller ve sınır şartları Tablo 4' de sunulmaktadır. Ayrıca, birleşik jet akışlı kanalların sayısal hesaplamalarında kullanılan düzgün dörtyüzlü ağ yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir.



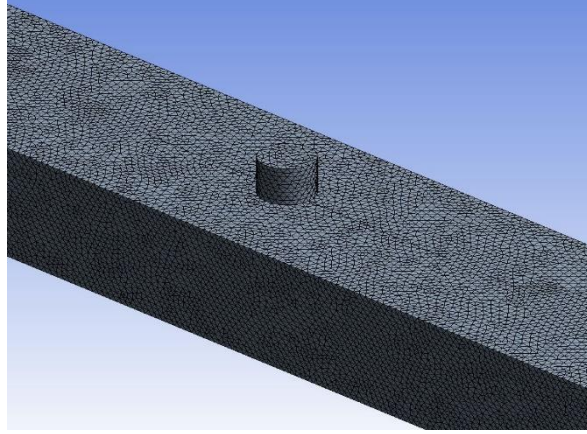
Şekil 1. (a) Küp (b) Oyuklu desen yüzeyli kanalların görünüşleri

Tablo 3. Kanalların boyutsal ölçüleri (Öztürk ve Demircan, 2022)

Değişken	Ölçü
D	15 mm
L	66D
W	4D
H	3D, 6D
M	20 mm
θ	90°
N	D

Tablo 4. Çalışmada uygulanan sınır şartları

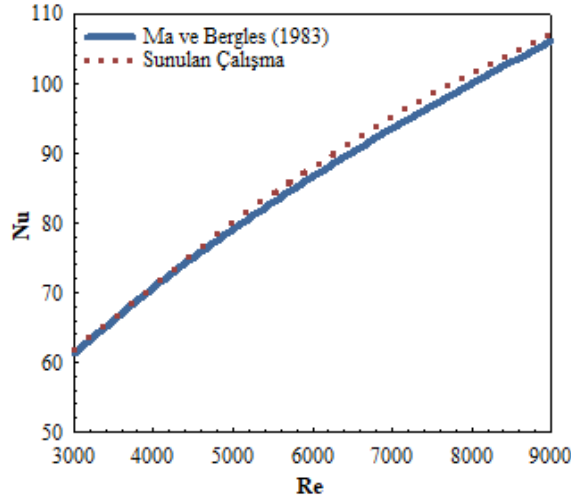
a) Sürekli, üç boyutlu ve türbülanslı akış hacmi kullanılmıştır
b) Sıkıştırılmaz akışkan olarak su ve %0,02 GO-Su nanoakışkanı, hem jet hem de çarpın akış akışkanı olarak kullanılmışlardır
c) Akışkanların ısı özellikleri sabit olup, sıcaklıktan bağımsızdır
d) Kanalın ve kanatçığın yüzeyleri adyabatiktir
e) Akışkan olarak kullanılan su, nanoakışkan ve desenli yüzeylerde ısı kaynağı bulunmamaktadır
f) Kanalın çıkış basıncı, atmosfer basıncına eşit alınmıştır ($P_c = P_{atm}$)
g) Kanalın çıkışındaki sıcaklık farkının ihmal edilebilecek kadar az miktarda olduğu kabul edilerek $\partial T / \partial x = 0$ olarak belirlenmiştir
h) Kanal, kanatçık ve desen yüzeylerinde kaymazlık sınır şartı olduğu ve bu nedenle bahsedilen yüzeylerde tüm hız bileşeni değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2. Kanalda kullanılan düzgün dörtyüzlü ağ yapısının gösterimi

4. Bulgular ve Tartışma

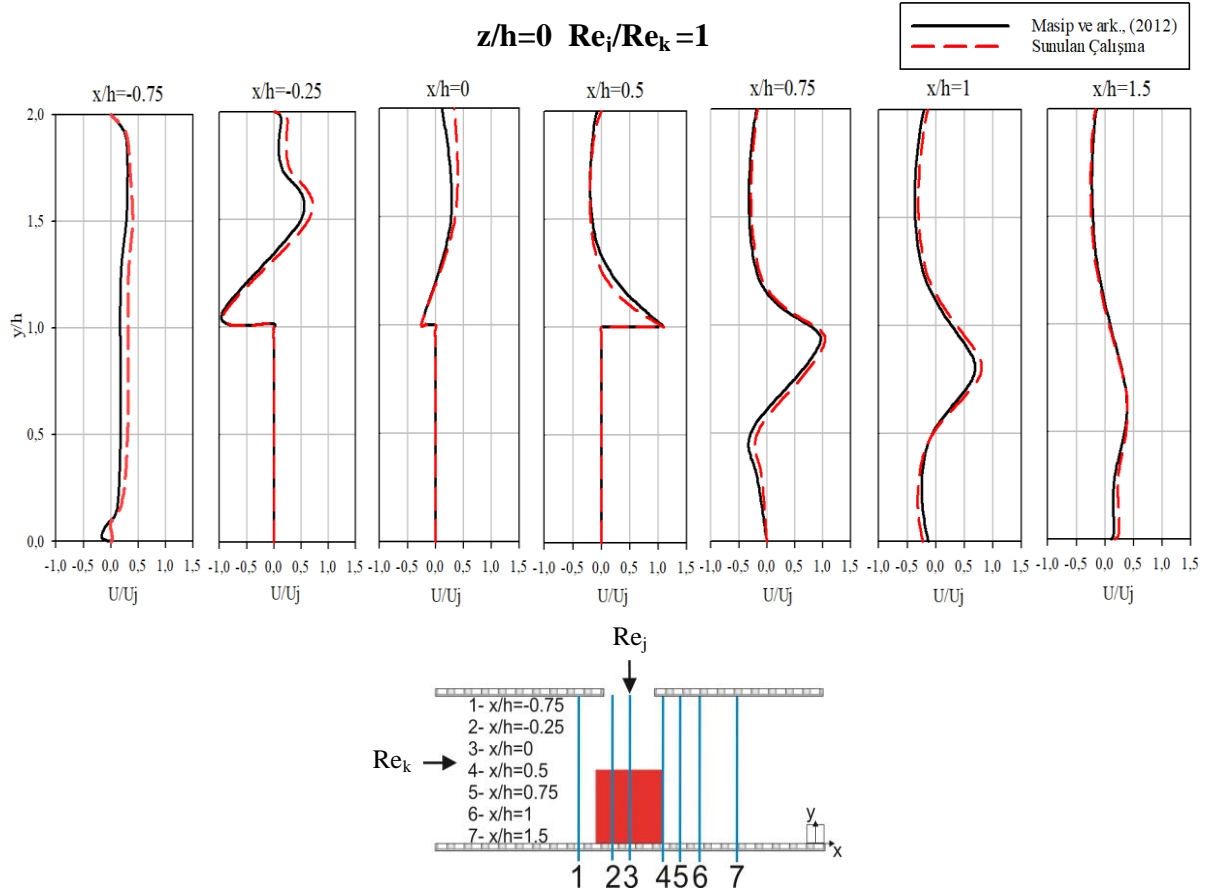
Çalışmada, Şekil 3'te gösterildiği gibi sadece jet akışın olduğu durumda farklı Reynolds sayılarında incelemelerde bulunularak ulaşılan sonuçlar ile Ma ve Bergles (1983)'in deneysel incelemeleri sonucunda ulaştıkları eşitlik kullanılarak ($\overline{Nu} = 1,29 Re^{0.5} Pr^{0.4}$) edinilen sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılmış ve Ma ve Bergles (1983)'in deneysel sonuçları ile sunulan çalışmanın sonuçlarının uyumlu ve tutarlı oldukları belirlenmiştir.



Şekil 3. Sunulan çalışma ve Ma ve Bergles (1983)'in sonuçlarının kıyaslanması

Ayrıca, literatürde Masip ve ark. (2012)'nin çapraz akış ve çarpan jet kombine akışına maruz kalan bir küp etrafındaki türbülanslı akışın deneysel olarak incelendiği çalışma ile bu çalışmanın sayısal sonuçları karşılaştırılmış ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Masip ve ark. (2012), çalışmalarında 2000x300x30mm boyutlarında bir kanal içerisine küp şeklinde bir eleman yerleştirmişlerdir. Kanalın bütün yüzeylerinin adyabatik olarak alındığı varsayılarak; jet Re sayısının (Re_j), kanal Re sayısına (Re_k) oranı eşit alınarak ($Re_j/Re_k=1$) elektronik elemanın etrafındaki akış yapıları farklı konumlarda (x/h) incelenmiştir. Şekil 4' den de görülebildiği gibi sunulan çalışma ile Masip ve ark. (2012)'nin

yapmış olduğu deneysel çalışma sonucu ulaşılan hız profillerinin birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları saptanmıştır.



Şekil 4. Sunulan çalışma ve Masip ve ark., (2012)' nin sonuçlarının karşılaştırılması

Ağ sayısına bağlı Nu sayısının değişimini belirlemek kaydıyla kanaldaki en uygun sayıdaki ağ elemanı belirlenerek kanatçiksız birleşik jet akışlı kanaldaki ağ sayısının ortalama Nu sayısı (Nu_m) üzerindeki etkisi farklı Reynolds sayılarında Tablo 5'te sunulmuştur. Buna göre kanatçiksız kanal için 2.022.840 adet ağ elemanının güvenilir ve doğru sonucu vereceği bulunmuştur.

Tablo 5. Ağ elemanı sayısına bağlı olarak Nu_m ' nin Reynolds sayısı ile değişimi

Ağ elemanı sayısı	Re = 5000 Nu_m	Re = 7000 Nu_m	Re = 9000 Nu_m
1.758.412	86,48	108,84	127,40
2.022.840	86,52	108,88	127,43
2.245.786	86,52	108,87	127,42

Bununla birlikte, ilk düğüm noktasının viskoz sınır tabaka altında kalabilmesi amacıyla y^+ değerinin yaklaşık olarak 1 olabileceği ilk ağ yüksekliği hesaplanarak elektronik eleman yüzeylerine en yakın olarak atılan ağ elemanının yüksekliği 0,07 mm olarak seçilmiştir.

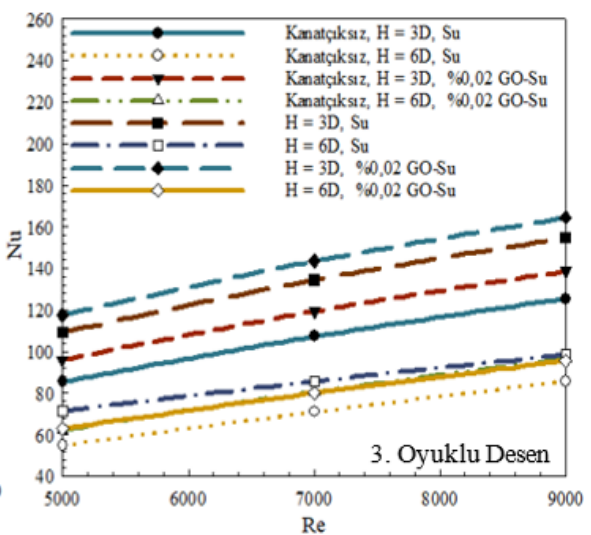
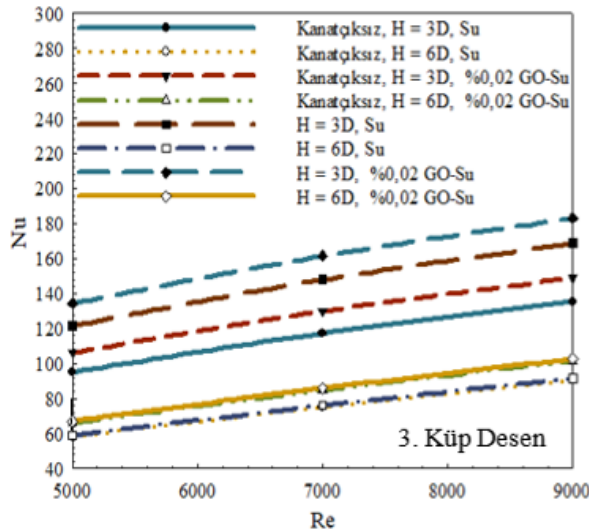
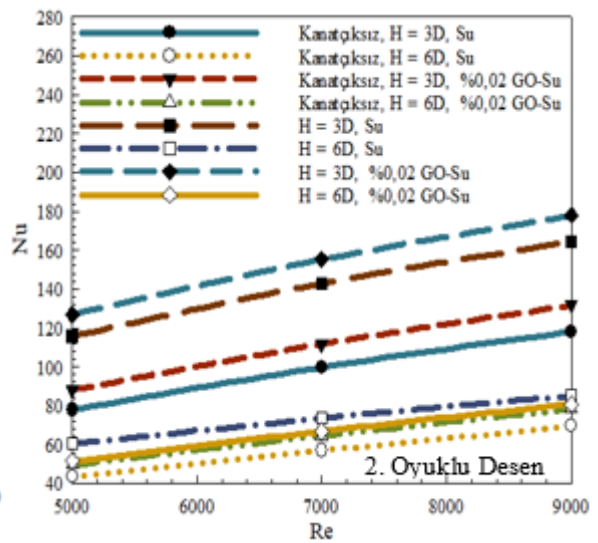
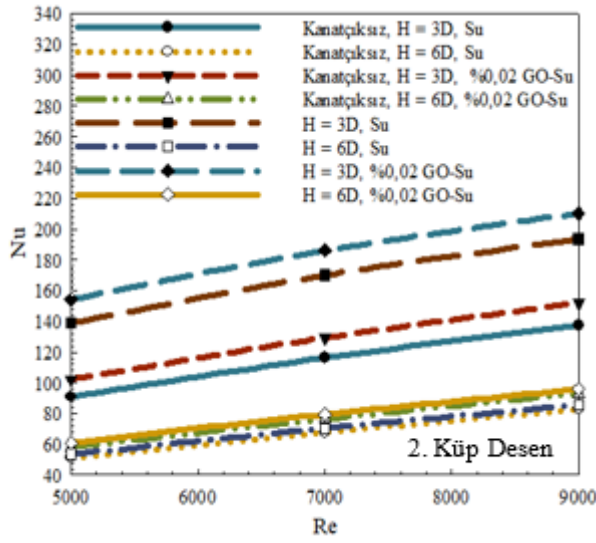
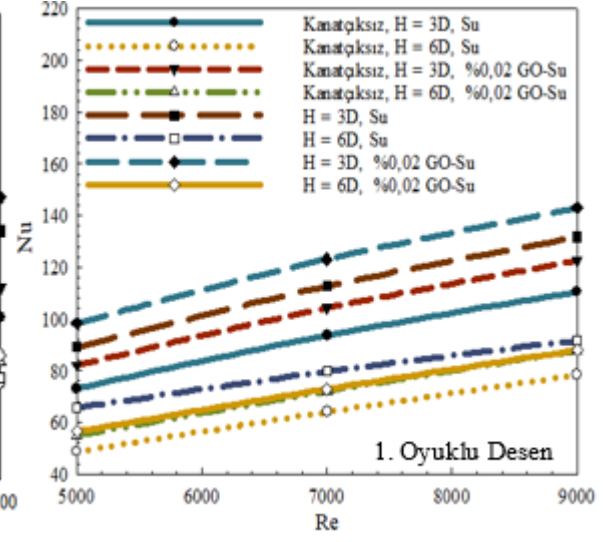
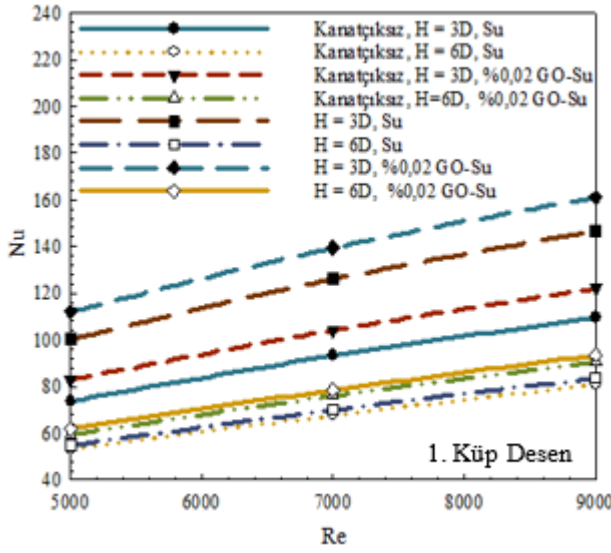
Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla küp ve oyuklu desenli yüzeylerdeki ortalama Nu sayısının Reynolds sayısı ile değişimi çapraz akış-çarpan jetli birleşik jet akışlı kanallarda su ve %0,02 konsantrasyonlu GO-Su nanoakışkanı kullanılarak kanatçiksız ve kanalın jet akış giriş yüzeyiyle yatayda 90° kanatçık

eklenmesi durumlarında $H = 3D$ ve $H = 6D$ kanal yükseklikleri için araştırılmıştır. Nanoakışkanın su akışkanına göre ısı iletkenliği daha fazla olduğundan zorlanmış taşınım olan jet akışlarında suya göre daha fazla ısı taşınım katsayısına sahiptirler. Bu nedenle, nanoakışkan kullanılan birleşik jet akışlı kanallarda Nu sayısı değerleri daha fazladır. Bununla birlikte, kanal yüksekliğinin (H) artışı sabit Re sayısında jet akışın desenli yüzeyler üzerindeki çarpma etkisini azaltarak hız ve ısı sınır tabaka kalınlığının artmasına sebep olduğundan; Nu sayısında azalmaya neden olmaktadır. Bu duruma bağlı olarak her iki desen yüzeyli kanal için $H = 3D$ 'de ulaşılan ortalama Nu sayısı değerleri; $H = 6D$ 'den daha yüksektir. Ayrıca, kanallara kanatçık ($\theta = 90^\circ$) eklenmesi; kanatçıksız duruma göre birleşik jet akışını sabit ısı akılı desenli yüzeylere daha iyi yönlendirdiğinden ısı transferi iyileşmekte ve Nu sayısı değerleri artmaktadır. Her iki desenli yüzeye sahip kanalda, kanatçık kullanılması durumunda GO-Su nanoakışkanı için en yüksek Nu sayısı değerlerine ulaşılırken; en düşük Nu sayısı değerleri ise kanatçıksız ve $H = 6D$ kanal yüksekliği durumunda elde edilmektedir. Kanallarda bulunan birinci sıradaki desenler (Desen 1) doğrudan kanaldan gelen çapraz akışın etkisi altındadır. Su akışkanının kullanıldığı kanalda 1. sıradaki küp desenli yüzey için $Re = 7000$ ve $H = 3D$ kanal yüksekliğinde kanatçıksız duruma göre kanatçığın kullanıldığı kanalda ortalama Nu sayısı değerinde %35,45 artış elde edilirken; aynı şartlarda $H = 6D$ olan kanal için bu artış değeri %3,41'e düşmektedir. %0,02 GO-Su nanoakışkanının kullanıldığı kanatçıklı kanalda $Re = 9000$ ve $H = 3D$ için yine kanatçıklı fakat su akışkanı olan kanala göre Nu sayısında %9,85'lik artış değerine ulaşılırken; artıştaki bu değer kanatçıksız durum için %0,02 GO-Su nanoakışkanı ve su akışkanı için sırasıyla %32 ve %47,14 olmaktadır. Oyuklu desenli yüzeyi analiz edecek olursak; Şekil 6'dan da görülebildiği gibi küp desenli yüzeylere göre desen şekli sonucu birleşik jet akışının kanaldaki hareketiyle desenli yüzeylerle azalan teması nedeniyle daha düşük Nu sayısı değerlerine ulaşılmaktadır. $Re = 5000$ ve $H = 3D$ için nanoakışkanın kullanıldığı kanatçıklı kanalda su akışkanına göre Nu sayısında %10,34'lük artış değerine ulaşılırken; bu değer kanatçıksız su akışkanı ve nanoakışkan kullanılan kanallar için sırasıyla %34,5 ve %19,83 olmaktadır. Desen 2 için Nu sayısı değerleri incelendiğinde ise çapraz akışa ilave olarak doğrudan çarpan jet akışın da etkisi altında olduğundan birleşik jet etkisiyle Desen 1'e göre daha yüksek değerler elde edilmektedir. Bununla birlikte, $H = 6D$ yüksekliğinde özellikle oyuk desenli yüzeylerde; Desen 1 ile kıyaslandığında daha düşük Nu sayısı değerleri görülmektedir. Bu durum, desen yüzey şekline bağlı olarak birleşik jet akışın kanal içerisindeki akış hareketinden kaynaklanmaktadır. Reynolds sayısının 9000 olduğu durumda $H = 6D$ için GO-Su nanoakışkanı için Desen 1'e göre Desen 2'de küp desenli yüzeyde Nu sayısında %2,71 artış elde edilirken; oyuk desenli yüzeyde Nu sayısı %8,61 azalmaktadır. Desen 3, kanal sonunda bulunduğu genel itibarıyla birleşik jet akışı etkisinin azaldığı desen olmaktadır. Ancak, her iki desenli yüzey için de kanatçıksız durumlarda kanaldan gelen çapraz akışın çarpan jet akışını sürükleyerek; Desen 3'e doğru yönlendirmesiyle Desen 2'ye göre daha yüksek Nu sayısı değerleri elde edilmektedir. Bunun yanı sıra, her iki desenli yüzey durumunda kanatçıklı ve $H = 3D$ 'de Desen 3'e göre kanatçığın birleşik jet akışı Desen 1 ve Desen 2'ye yönlendirmesiyle, Nu sayıları bu durumlarda azalırken; $H = 6D$ kanal

yüksekliği için ise Desen 2'ye göre Nu sayıları artmakta yani ısı transferi iyileşmektedir. Çünkü belirtilen bu kanal yüksekliğinde kanatçığın etkisi azalmakta ve çapraz akış, çarpan jet akışını Desen 3'e doğru yönlendirmektedir. Bu nedenle, desenler üzerinde düzgün dağılımlı bir birleşik jet akışı etkisi elde edilememektedir.

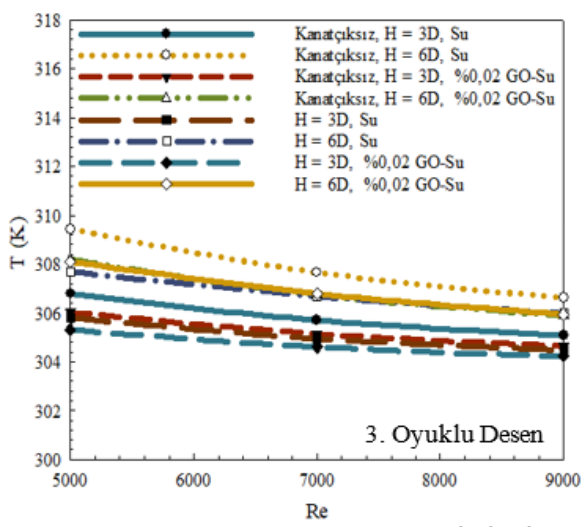
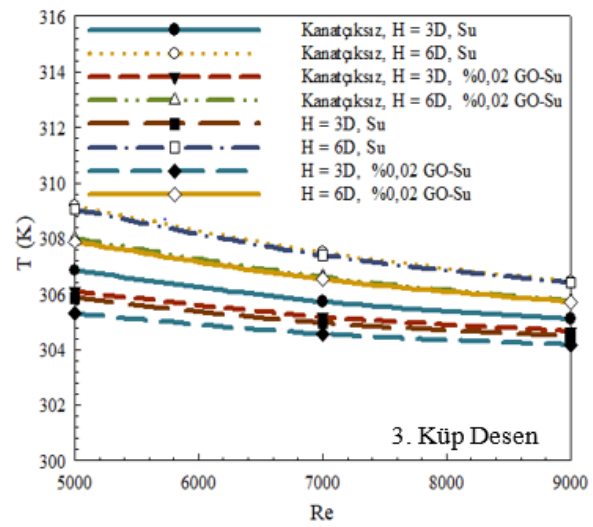
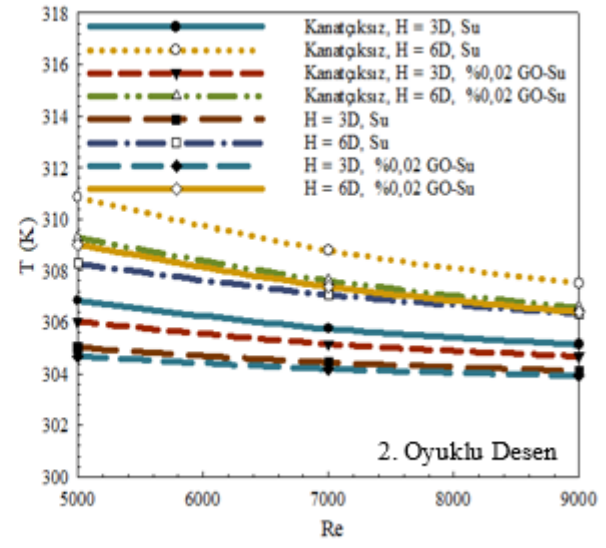
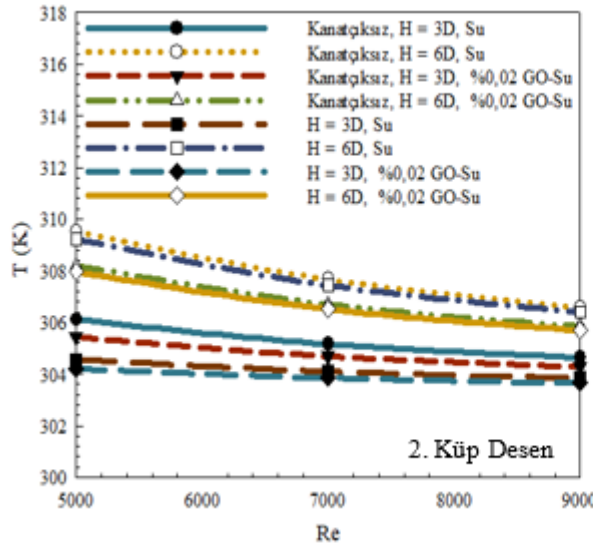
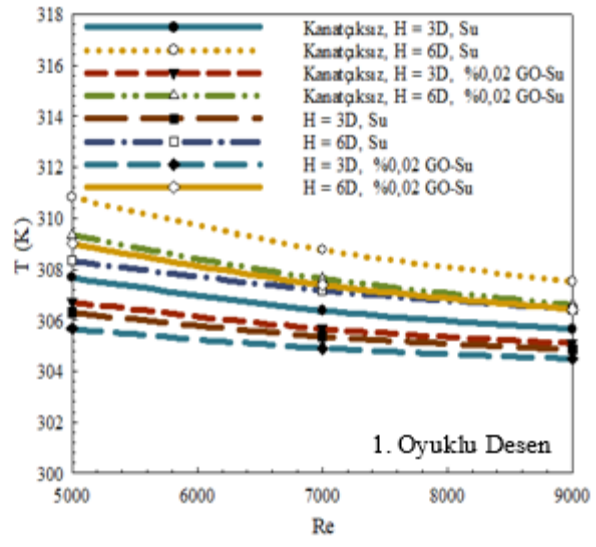
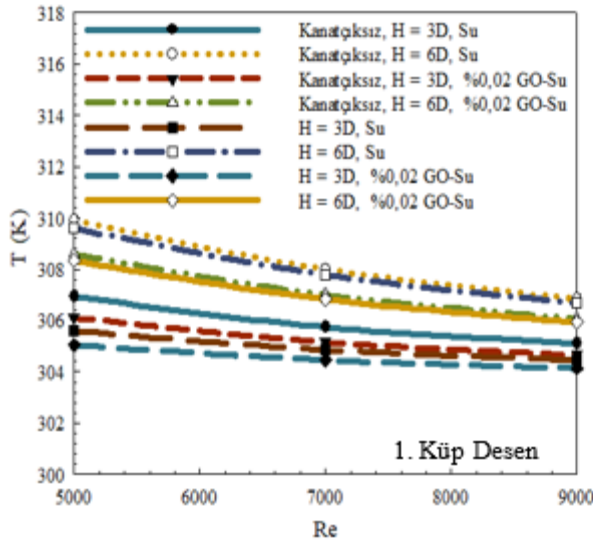
3D ve 6D (H) yükseklikli birleşik jet akışlı kanallarda bulunan sırasıyla küp ve oyuklu desen yüzeylerine ait ortalama yüzey sıcaklığı değişimleri %0,02 GO-Su nanoakışkanı ve su kullanılarak kanatçıksız ve 90° açılı kanatçık durumları için Şekil 7 ve 8'de gösterilmektedir. Desenli yüzeylerin Şekil 5 ve 6'daki ortalama Nu sayısı değişimlerine paralel olarak en düşük yüzey sıcaklıkları ısı transferinin daha fazla olduğu 3D yükseklikli ve GO-Su nanoakışkanının kullanıldığı birleşik jet akışlı kanallarda elde edilirken; en yüksek yüzey sıcaklıkları ise kanatçıksız ve 6D yükseklikli kanallarda görülmektedir. Ayrıca, Re sayısının artışı akışkanın kanal içerisinde ve desen aralıklarındaki boşluklarda hareketliliğini artırarak; ısı transferini iyileştirdiğinden yüzeylerin sıcaklıkları düşmektedir. Bununla birlikte, her iki desenli yüzey için en düşük yüzey sıcaklıklarına birleşik jet etkisinin en fazla olduğu Desen 2 için ulaşılırken; Desen 1 ve Desen 3'te nispeten daha yüksek sıcaklık değerleri görülmektedir. Şekil 7 ve 8'den de kolaylıkla görülebildiği gibi oyuklu desenli yüzeylerde küp desenli yüzeylere kıyasla sıcaklık değerleri daha fazladır. Bunun yanı sıra, nanoakışkanın kullanıldığı kanallarda nanoparçacıkların desenli yüzeylerle akışkan arasında ısı transferini artırıcı potansiyeli nedeniyle su akışkanına göre daha iyi ısı transferi ve dolayısıyla daha düşük yüzey sıcaklıklarına ulaşılmaktadır.

Tablo 6'da $Re = 9000$ değerinde su ve %0,02 GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı kanallardaki her üç küp ve oyuklu desenli yüzeylerin tümü için ortalama Nu sayısı (Nu_m) ve ortalama yüzey sıcaklığı (T_m) değerlerinin analizleri sunulmaktadır. Her iki desenli yüzey için de en yüksek Nu_m değerine 90° kanatçıklı $H = 3D$ yükseklikli birleşik jet akışlı kanal için %0,02 GO-Su nanoakışkanı kullanılması durumunda ulaşılırken, en düşük Nu_m ve T_m değerleri ise kanatçıksız ve $H = 6D$ yükseklikli su akışkanlı kanal için elde edilmektedir. Kanatçıklı ve $H = 3D$ için GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı kanalda su akışkanlı ve kanatçıksız kanala göre küp ve oyuklu desen yüzeyleri için Nu_m değerinde sırasıyla %45,04 ve %37,11' lik artışlar bulunmaktadır. Aynı şartlarda $H = 6D$ yükseklikli kanallar için ulaşılan bu artış değerleri oldukça düşüktür. Bunun yanı sıra, beklenildiği gibi kanatçıklı ve nanoakışkan kullanılan kanallarda ($H = 3D$) kanatçıksız kanallara göre daha düşük yüzey sıcaklıkları elde edilmektedir.



Şekil 5. Su ve GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı küp desen yüzeyli kanallarda desenlerin ortalama Nu sayısının Re sayısına göre değişimi

Şekil 6. Su ve GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı oyuklu desen yüzeyli kanallarda desenlerin ortalama Nu sayısının Re sayısına göre değişimi



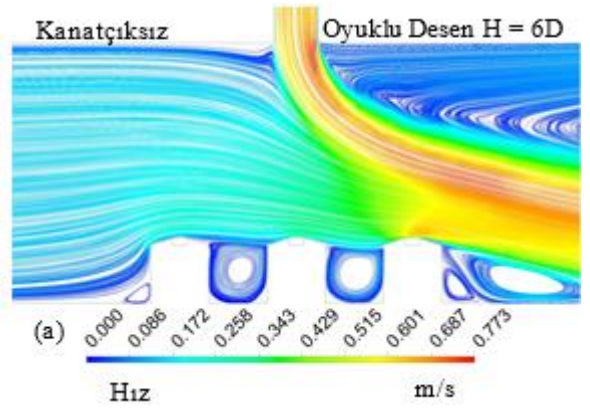
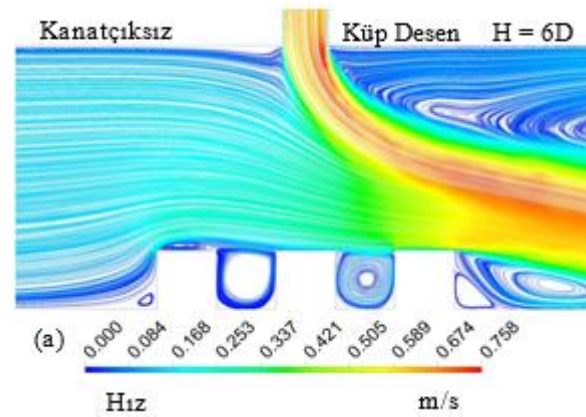
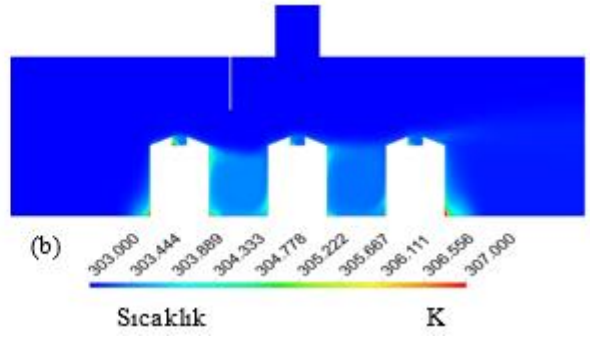
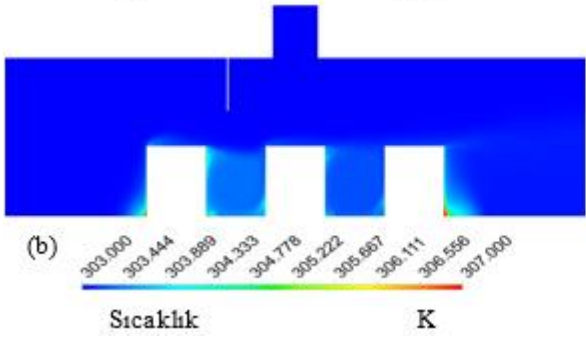
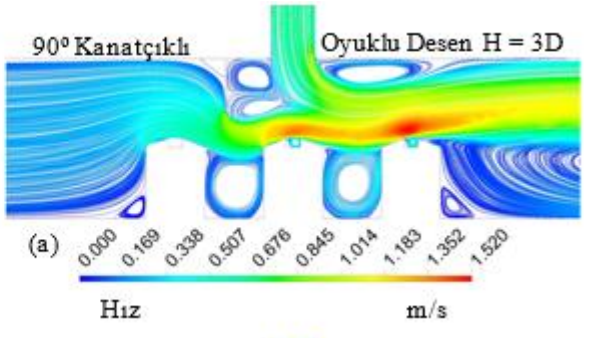
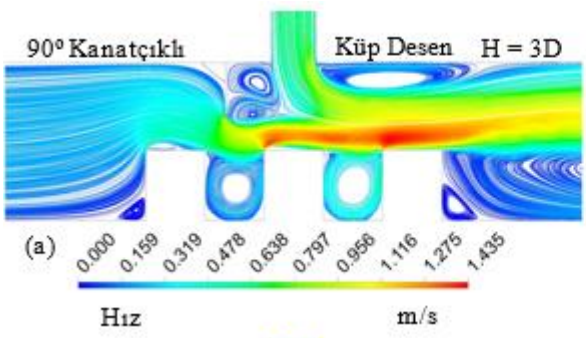
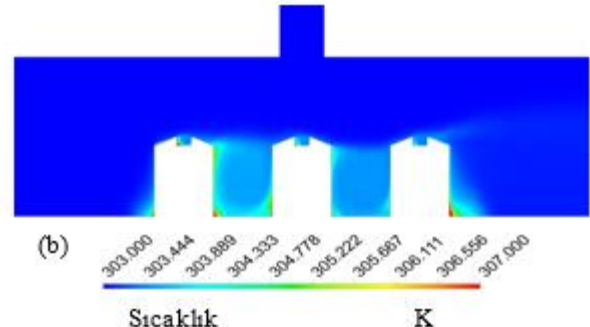
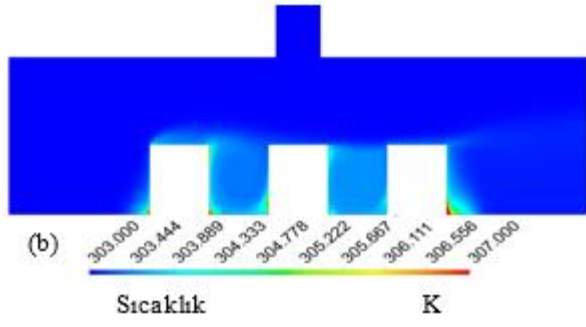
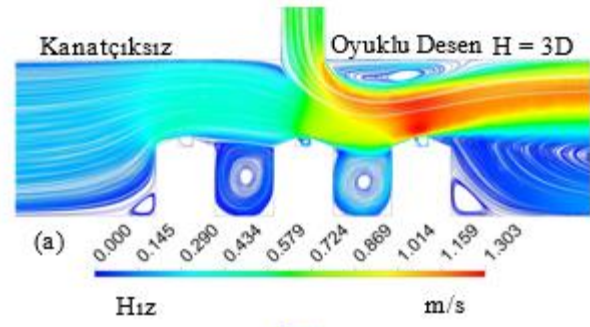
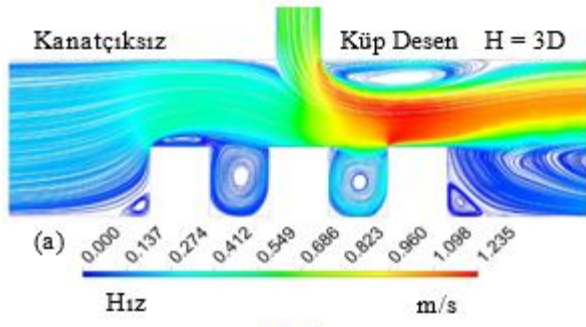
Şekil 7. Su ve GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı küp desen yüzeyli kanallarda desenlerin ortalama yüzey sıcaklığının Re sayısına göre değişimi

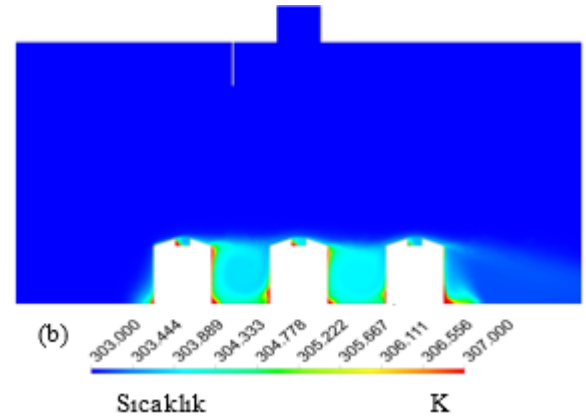
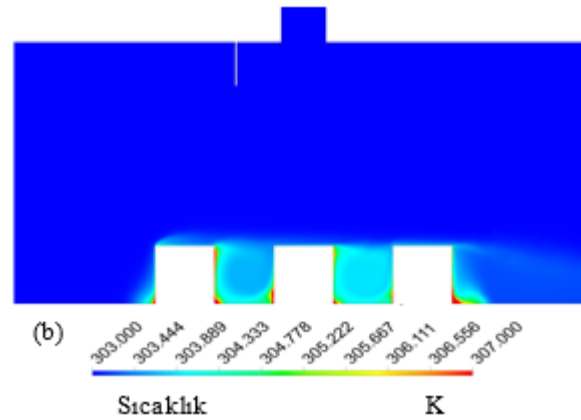
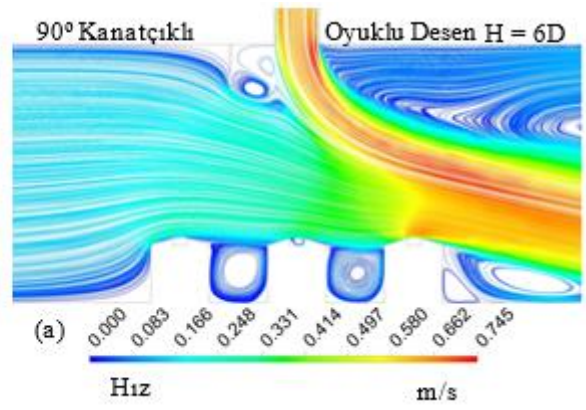
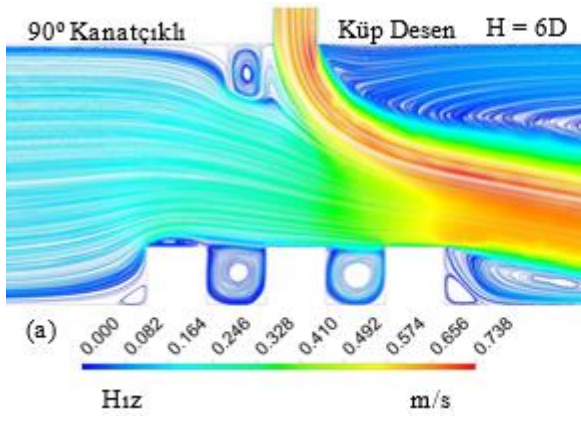
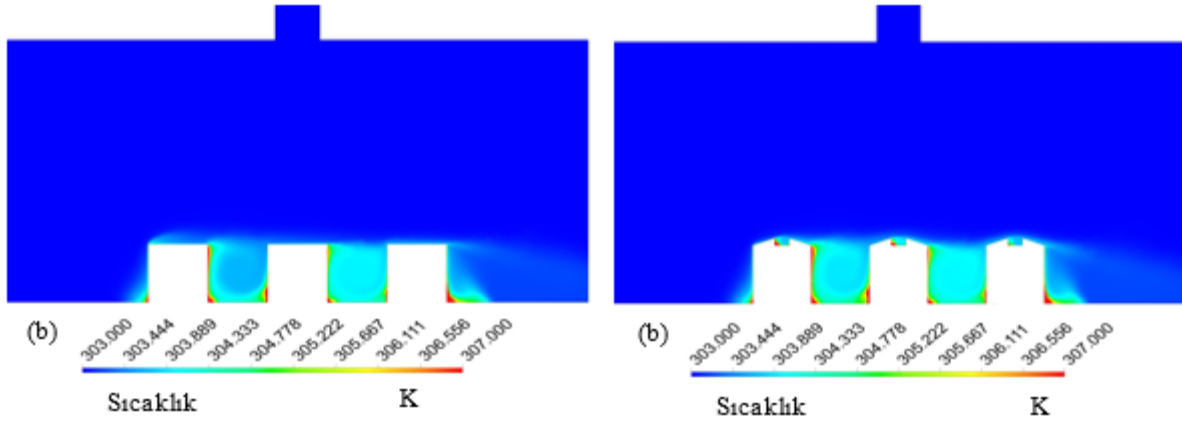
Şekil 8. Su ve GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı oyuk desen yüzeyli kanallarda desenlerin ortalama yüzey sıcaklığının Re sayısına göre değişimi

Tablo 6. Su ve %0,02 GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı kanallardaki her üç küp ve oyuklu desenli yüzeylerin tümü için Nu_m ve T_m değerlerinin analizi

Re = 9000			Küp Desen	Oyuklu Desen
Kanatçıksız, H = 3D	Su	Nu_{ort}	127,420	118,032
Kanatçıksız, H = 6D	Su	Nu_{ort}	84,647	77,941
90° Kanatçıklı, H = 3D	Su	Nu_{ort}	169,666	150,344
90° Kanatçıklı, H = 6D	Su	Nu_{ort}	86,955	91,864
Kanatçıksız, H = 3D	%0,02 GO-Su	Nu_{ort}	141,015	131,024
Kanatçıksız, H = 6D	%0,02 GO-Su	Nu_{ort}	94,956	87,642
90° Kanatçıklı, H = 3D	%0,02 GO-Su	Nu_{ort}	184,813	161,835
90° Kanatçıklı, H = 6D	%0,02 GO-Su	Nu_{ort}	97,318	88,099
Kanatçıksız, H = 3D	Su	T_{ort} (K)	304,954	305,289
Kanatçıksız, H = 6D	Su	T_{ort} (K)	306,631	307,210
90° Kanatçıklı, H = 3D	Su	T_{ort} (K)	304,266	304,481
90° Kanatçıklı, H = 6D	Su	T_{ort} (K)	306,496	306,248
Kanatçıksız, H = 3D	%0,02 GO-Su	T_{ort} (K)	304,535	304,799
Kanatçıksız, H = 6D	%0,02 GO-Su	T_{ort} (K)	305,888	306,350
90° Kanatçıklı, H = 3D	%0,02 GO-Su	T_{ort} (K)	303,992	304,208
90° Kanatçıklı, H = 6D	%0,02 GO-Su	T_{ort} (K)	305,781	306,249

Şekil 9 ve 10'da GO-Su nanoakışkanı kullanılan birleşik jetli ve H = 3D ve 6D yükseklikli kanallarda sırasıyla küp ve oyuklu desenli yüzeylerin (a) hız ve (b) sıcaklık konturu dağılımları kanatçıksız ve 90° kanatçık kullanılması durumları için gösterilmektedir. Her iki desenli yüzey ve kanal yüksekliği (H = 3D, 6D) için kanatçıksız durumda kanal girişinden gelen çarpaz akışın Desen 2'nin üzerinden kanala giriş yapan çarpan jeti kanal çıkışına doğru sürüklemesiyle H = 3D için Desen 2'nin üst yüzeyinin bir kısmı da dâhil olmak üzere özellikle H = 6D'lik kanalda ise sadece Desen 3 üzerinde hız konturu dağılımlarından da görülebildiği gibi akışkan hızında artış olmaktadır. Bu durumda, ısı sınır tabaka kalınlığı azalarak desenli yüzey üzerinde ısı transferi artmaktadır. Bu nedenle, kanatçıksız durumlarda Desen 3 için Desen 2 ve Desen 1 ile kıyaslandığında sıcaklık konturunda desenli yüzeylerin soğumasının daha iyi olduğu görülebilmektedir. Ayrıca, her iki kanal yüksekliği için birleşik jet akışının Desen 3'ün üzerine doğru yönlendirilmesinde kanal içerisinde çarpan jet akışının sağ tarafında oluşan yeniden dolaşım bölgelerinin etkisi bulunmaktadır. Oluşan bu yeniden dolaşım bölgesinin kanal yüksekliğinin artmasıyla arttığı; hız konturu dağılımlarından görülebilmektedir. Kanallara kanatçık eklendiğinde özellikle kanatçık açısının 90°'lik bir dik açıya sahip olması nedeniyle akışkanın Desen 2 ve Desen 3 üzerine doğru geçeceği kanal kesit alanı oldukça daralmış olup kanalın sol taraf girişinden çarpaz akışın jet etkisi kazanmasını sağlamaktadır. Bu etki, çarpan jet akışıyla birleşerek özellikle Desen 2 ve Desen 3 üzerinde ısı transferini artırıcı birleşik jet akışı etkisinin artmasını sağlamaktadır. Ancak, H = 6D'lik kanal yüksekliği mesafesinde kanatçığın desenler üzerindeki etkisi oldukça azaldığından; H = 3D'ye göre desenler arası boşluklarda oluşan yeniden dolaşım bölgelerini yeterince hareketlendiremeyip bu bölgelerde akışkan kendi içerisinde sirkülasyon halinde olup desenlerin köşe noktalarında sıcaklıkta artışlar olmaktadır. Bu nedenle H = 6D'de H = 3D'ye göre desenli yüzeylerden olan ısı transferinde ve dolayısıyla desenlerin soğumasında beklenen iyileşme sağlanamamaktadır.



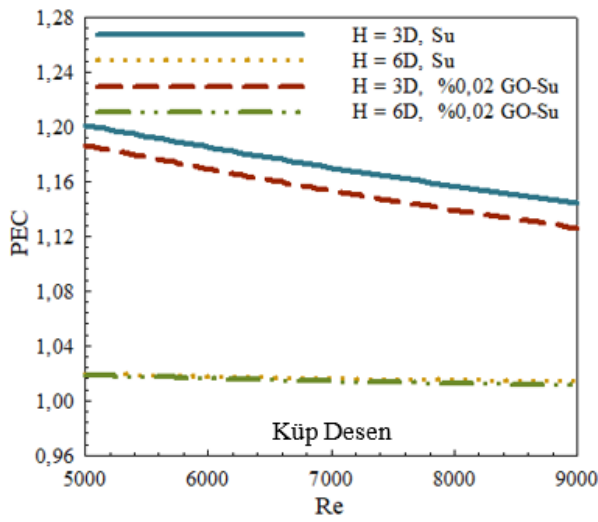


Şekil 9. GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı küp desen yüzeyli kanatçiksız ve 90° kanatçıklı kanallarda H = 3D ve H = 6D için Re = 9000' de (a) Hız (b) Sıcaklık konturu dağılımları

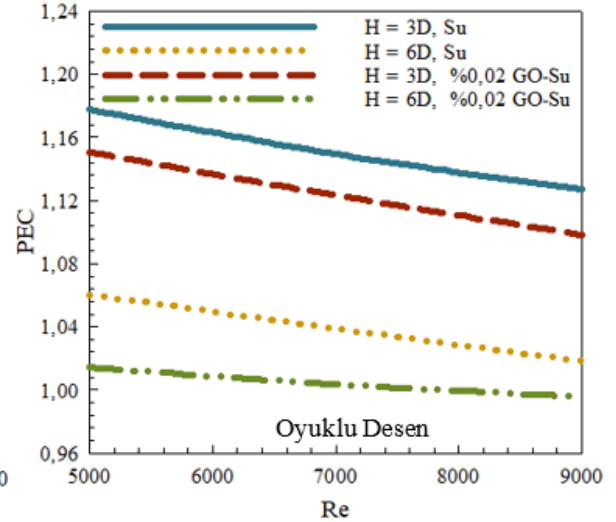
Şekil 10. GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı oyuklu desen yüzeyli kanatçiksız ve 90° kanatçıklı kanallarda H = 3D ve H = 6D için Re = 9000' de (a) Hız (b) Sıcaklık konturu dağılımları

Performans değerlendirme sayısı (PEC), birleşik jet akışlı kanallardaki küp ve oyuklu desenli yüzeylere ait H = 3D ve 6D kanal yükseklikleri ve su akışkanı ve GO-Su nanoakışkanı için sırasıyla Şekil 11 ve 12'de gösterilmektedir. PEC sayısı, birleşik jet akışlı kanallarda kanatçık kullanılması durumunda kanatçiksız duruma göre ortalama Nu sayısı artışının basınç düşüşü artışına karşı olan performansını göstermektedir. Bu nedenle, PEC sayısı fazla olan kanal ve akış şartlarının daha yüksek performanslı olduğu söylenebilir. Her iki şekil de incelendiğinde (Şekil 11 ve Şekil 12), en yüksek PEC sayısına H = 3D kanal yüksekliğinde su akışkanı için elde edildiği görülmektedir. Bununla

birlikte, nanoakışkan için sudan daha yüksek Nu sayısı değerleri elde edilirken, suya göre nanoakışkanın viskozitesinin daha yüksek olması sebebiyle sürtünme faktörü ve dolayısıyla kanaldaki basınç düşüşü daha fazla olduğundan PEC sayıları sudan daha düşüktür. Ayrıca, küp desen yüzeyli kanallarda oyuklu desen yüzeyli kanallara göre PEC sayılarının daha fazla olduğu grafiklerden kolaylıkla görülebilmektedir. Bunun yanı sıra, $Re = 5000$ değerinde ve $H = 3D$ yükseklikli kanallarda su akışkanı için PEC sayısı değerlerinin sırasıyla küp ve oyuklu desenli yüzeylerde nanoakışkana göre %1,69 ve %1,74 daha fazla oldukları tespit edilmiştir. Ayrıca, genel itibariyle küp desen yüzeyli kanallarda PEC sayısının oyuklu desen yüzeyli kanallardan daha fazla olması akışkanın küp desen yüzeyli kanalda pompalanmasında daha az basınç kaybı olduğunu ve dolayısıyla akışkanı pompalamada daha az enerji harcayacağını göstermektedir.



Şekil 11. Su ve GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı küp desen yüzeyli kanallarda $H = 3D$ ve $H = 6D$ için PEC sayısının Re sayısına göre değişimi



Şekil 12. Su ve GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı oyuklu desen yüzeyli kanallarda $H = 3D$ ve $H = 6D$ için PEC sayısının Re sayısına göre değişimi

5. Genel Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verildiği şekilde özetlenebilir:

-Nanoakışkan kullanılan birleşik jet akışlı kanallarda Nu sayısı değerleri daha fazla olmakla birlikte, her iki desen yüzeyli kanal için $H = 3D$ 'de ulaşılan ortalama Nu sayısı değerleri $H = 6D$ ' den daha yüksektir. Bununla birlikte, en düşük Nu sayısı değerleri, kanatçısız ve $H = 6D$ kanal yüksekliği durumunda elde edilmektedir.

-Su akışkanının kullanıldığı kanalda 1. sıradaki küp desenli yüzey için $Re = 7000$ ve $H = 3D$ kanal yüksekliğinde kanatçısız duruma göre kanatçığın kullanıldığı kanalda ortalama Nu sayısı değerinde %35,45 artış elde edilirken; aynı şartlarda $H = 6D$ olan kanal için bu artış değeri %3,41' e düşmektedir.

-Nanoakışkanının kullanıldığı kanatçıklı kanallarda küp desenli Desen 1' de $Re = 9000$ ve $H = 3D$ için yine kanatçıklı fakat su akışkanı olan kanala göre Nu sayısında %9,85 artış elde edilirken; bu artış

değeri kanatçiksız GO-Su nanoakışkanı ve kanatçiksız su akışkanları için sırasıyla %32 ve %47,14 olmaktadır.

-Oyuklu desenli yüzeyde Desen 1’de $Re = 5000$ ve $H = 3D$ için nanoakışkanın kullanıldığı kanatçıklı kanalda su akışkanına göre Nu sayısında %10,34’lük artış değerine ulaşılrken, bu değer kanatçiksız su akışkanı ve nanoakışkan kullanılan kanallar için sırasıyla %34,5 ve %19,83 olmaktadır.

-Desen 2 için Nu sayısı değerleri incelendiğinde çarpan jetin de etkisiyle Desen 1’e göre daha yüksek değerler elde edilmektedir. $Re = 9000$ olduğu durumda $H = 6D$ için GO-Su nanoakışkanı için Desen 1’e göre Desen 2’de küp desenli yüzeyde Nu sayısında %2,71 artış elde edilirken; oyuklu desenli yüzeyde Nu sayısı değeri %8,61 azalmıştır.

- Desen 3, kanal sonunda bulunduğundan genel itibariyle birleşik jet akışı etkisinin azaldığı desendir. Ancak, her iki desenli yüzey için de kanatçiksız durumlarda kanaldan gelen çapraz akışın çarpan jet akışını sürükleyerek Desen 3’e doğru yönlendirmesiyle Desen 2’ye göre daha yüksek Nu sayısı değerleri elde edilmektedir.

-Bunun yanı sıra, her iki desenli yüzey durumunda da kanatçıklı ve $H = 3D$ ’de Desen 3’e göre kanatçığın birleşik jet akışı Desen 1 ve Desen 2’ye yönlendirmesiyle Nu sayıları bu durumda azalırken; $H = 6D$ kanal yüksekliği için ise Desen 2’ye göre Nu sayıları artmaktadır.

-Desenli yüzeylerin sıcaklık değişimleri incelendiğinde, ortalama Nu sayısı değişimlerine paralel olarak ısı transferinin fazla olduğu $3D$ yükseklikli ve GO-Su nanoakışkanının kullanıldığı birleşik jetli kanallarda en düşük yüzey sıcaklıkları elde edilirken; en yüksek yüzey sıcaklıkları ise kanatçiksız ve $6D$ yükseklikli kanallarda görülmektedir.

- Her iki desenli yüzey için en düşük yüzey sıcaklıklarına birleşik jet etkisinin en fazla olduğu Desen 2’ de ulaşılrken; Desen 1 ve Desen 3’te nispeten daha yüksek sıcaklık değerleri görülmektedir. Ayrıca, oyuklu desenli yüzeylerde küp desenli yüzeylere kıyasla sıcaklık değerleri daha fazladır.

- Kanallardaki her üç desenli yüzey dikkate alındığında, kanatçıklı ve $H = 3D$ için GO-Su nanoakışkanlı birleşik jet akışlı kanalda su akışkanlı ve kanatçiksız kanala göre küp ve oyuklu desen yüzeyleri için Nu_m değerinde sırasıyla %45,04 ve %37,11’lik artışlar elde edilmiştir.

-Hız konturu dağılımlarına bakıldığında, her iki desenli yüzey ve kanal yüksekliği ($H = 3D, 6D$) için kanatçiksız durumda kanal girişinden gelen çapraz akışın Desen 2’nin üzerinden kanala giriş yapan çarpan jeti kanal çıkışına doğru sürüklemesiyle $H = 3D$ için Desen 2’nin üst yüzeyinin bir kısmı da dâhil olmak üzere özellikle $H = 6D$ ’lik kanalda ise sadece Desen 3 üzerinde akışkan hızında artış olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, kanatçiksız durumlarda Desen 3 için Desen 2 ve Desen 1 ile kıyaslandığında sıcaklık konturunda desenli yüzeylerin soğumasının daha iyi olduğu görülebilmektedir.

- Kanallara kanatçık eklendiğinde, özellikle Desen 2 ve Desen 3 yüzeyleri üzerinde ısı transferini artırıcı birleşik jet akışı etkisinin artması sağlanmaktadır.

- $H = 6D$ ’de $H = 3D$ ’ye göre desenli yüzeylerden olan ısı transferinde arzulanam iyileşme sağlanamamaktadır.

-Performans değerlendirme sayılarına (PEC) bakıldığında, nanoakışkan için ulaşılan değerlerin sudan daha az olduğu ve yine $H = 6D$ için PEC sayılarının $H = 3D$ 'den daha düşük olduğu görülmektedir. Kanal yüksekliğinin artışıyla basınç kaybının azalmasına rağmen; kanatçiksız kanaldakine göre kanatçıklı kanalda ortalama Nu sayısının (Nu_m), $H = 6D$ için oldukça az olması nedeniyle $H = 3D$ ile kıyaslandığında PEC değerleri her iki desenli yüzey için de daha düşüktür.

- $Re = 5000$ değerinde ve $H = 3D$ yükseklikli kanallarda su akışkanı için PEC sayısı değerlerinin sırasıyla küp ve oyuklu desenli yüzeylerde nanoakışkana göre %1,69 ve %1,74 daha fazla oldukları tespit edilmiştir.

Simgeler

A_k	Kanalın kesit alanı [m^2]
D	Jet giriş çapı [mm]
L	Kanalın boyu [mm]
W	Kanalın genişliği [mm]
H	Kanalın yüksekliği [mm]
m	Desenin bir kenar uzunluğu [mm]
P_k	Kanalın ıslak çevresi [m^2]
θ	Kanat açısı [$^\circ$]
f	Sürtünme faktörü [-]
h	Isı taşınım katsayısı [W/m^2K]
k_a	Akışkanın ısıl iletkenliği [W/mK]
V	Akışkanın kanal girişindeki hızı [m/s]
c_p	Akışkanın özgül ısısı [J/kgK]
p	Basınç [Pa]
q''	Desenli yüzeylerdeki ısı akısı [W/m^2]
N	Kanatçığın jet girişinden olan uzaklığı [mm]
T	Sıcaklık [K]
u_i	x, y ve z yönlerindeki hız bileşenleri [m/s]
Re	Reynolds sayısı [-]
Nu	Nusselt sayısı [-]
μ	Dinamik viskozite [kg/sm]
μ_t	Türbülans viskozitesi [kg/sm]
ν	Kinematik viskozite [m^2/s]
ρ	Akışkanın yoğunluğu [kg/m^3]
k	Türbülanslı akışın kinetik enerjisi [m^2/s^2]
ϵ	Türbülans dağılımı terimi [m^2/s^3]

Alt İndisler

- a Akışkan
- h Hidrolik
- j Jet
- k Kanal
- m Ortalama
- y Yüzey

Teşekkür

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Birimi tarafından TEKNO-2021-031 proje numarası ile desteklenmiştir.

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

- Abdullah MF., Zulkifli R., Harun Z., Abdullah S., Wan Ghopa WA., Najm AS., Sulaiman NH. Impact of the TiO₂ nanosolution concentration on heat transfer enhancement of the twin impingement jet of a heated aluminium plate. *Micromachines* 2019; 10: 176.
- Alnak DE. Thermohydraulic performance study of different square baffle angles in cross-corrugated channel. *Journal of Energy Storage* 2020; 28: 101295.
- Alnak DE., Koca F., Alnak YA. Numerical investigation of heat transfer from heated surfaces of different shapes. *Journal of Engineering Thermophysics* 2021; 30: 494-507.
- Chang TB., Yang YK. Heat transfer performance of jet impingement flow boiling using Al₂O₃-water nanofluid. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2014; 28(4): 1559-1566.
- Dal A., Kılıç M., Akyüz A.Ö., Tuncer A.D., Gungor A. Effects of lubricant fluid with nanoparticle additive on the load capacity of a hydrostatic journal bearing. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering* 2020; 7(2): 753-762.
- Datta A., Jaiswal A., Halder P. Heat transfer analysis of slot jet impingement using Nano fluid on convex surface. *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering* 2018; 402: 012098.
- Demircan T. Numerical analysis of cooling an electronic circuit component with cross flow and jet combination. *Journal of Mechanics* 2019; 35(3); 395-404.

- Genc MS., Kaynak U., Lock GD. Flow over an aerofoil without and with a leading- edge slat at a transitional Reynolds number. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering 2009; 223: 217-231.
- Genç MS. Numerical simulation of flow over a thin aerofoil at a high Reynolds number using a transition model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 2010; 24: 2155-2164.
- Genç M.S., Kaynak Ü., Yapıcı H. Performance of transition model for predicting low Re aerofoil flows without/with single and simultaneous blowing and suction. European Journal of Mechanics B/Fluids 2011; 30: 218-235.
- Hadipour A., Zargarabadi MR. Heat transfer and flow characteristics of impinging jet on a concave surface at small nozzle to surface distances. Applied Thermal Engineering 2018; 138: 534-541.
- Hajjar Z., Rashidi A., Ghosatloo A. Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer 2014; 57: 128-131.
- Hummers WS., Offeman RE. Preparation of graphitic oxide. Journal of American Chemical Society 1958; 80: 1339.
- Incropera FP., Dewit DP., Bergman TL., Lavine AS. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th Ed. In: John Wiley&Sons; 2007.
- Jalali E., Sajadi SM., Ghaemi F., Baleanu D. Numerical analysis of the effect of hot dent infusion jet on the fluid flow and heat transfer rate through the microchannel in the presence of external magnetic field. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2022; 147: 8397-8409.
- Karabulut K. Heat transfer improvement study of electronic component surfaces using air jet impingement. Journal of Computational Electronics 2019; 18: 1259-1271.
- Karabulut K., Alnak DE. Study of cooling of the varied designed warmed surfaces with an air jet impingement. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences 2020; 26(1): 88-98.
- Karabulut K., Buyruk E., Kilinc K. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a circular copper tube using graphene oxide nanofluid. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2020; 42: 230.
- Karabulut K., Alnak DE. Dikdörtgen bir kanaldaki farklı desenli yüzey geometrilerinin ısı transferine olan etkilerinin incelenmesi. Tesisat Mühendisliği Dergisi 2021; 183: 37-49.
- Karabulut K., Alnak DE. Investigation of graphene oxide-distilled water nanofluids with consideration of heat transfer and flow structure for backward-facing step flow. Journal of Engineering Thermophysics 2021; 30(2): 300-316.
- Karabulut K., Alnak DE. Investigation of the variation of cooling performance with the channel height in a channel having impinging jet-cross flow. ISPEC 12th International Conference on Engineering&Natural Sciences, 24-25 December 2021, sayfa no: 273-290, Bingöl.

- Kılıç M. Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2018; 33(3): 121-132.
- Kılıç M., Ullah A. Numerical investigation of effect of different parameter on heat transfer for a crossflow heat exchanger by using nanofluids. Journal of Thermal Engineering 2021; 7(14): 1980-1989.
- Kılıç M., Abdulvahitoglu A. Numerical investigation of heat transfer at a rectangular channel with combined effect of nanofluids and swirling jets in a vehicle radiator. Thermal Science 2019; 23(6A): 3627-3637.
- Kilic M., Calisir T., Baskaya S. Experimental and numerical study of heat transfer from a heated fat plate in a rectangular channel with an impinging air jet. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2016; 39(1): 329–344.
- Kilic M., Calisir T., Baskaya S. 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.
- Kumar D., Zunaid M., Gautam S. Heat sink analysis in jet impingement with air foil pillars and nanoparticles. MaterialsToday: Proceedings 2021; 46(20): 10752-10756.
- Lakshminarayanan V., Sriraam N. The effect of temperature on the reliability of electronic components. IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (CONECCT), 6-7 January 2014, sayfa no:1-6, India.
- Ma CF., Bergles AE. Boiling jet impingement cooling of simulated microelectronic chips. Heat Transfer In Electronic Equipment HTD 1983; 28: 5-12.
- Maghrabie HM., Attalla M., Fawaz HE., Khalil M. Numerical investigation of heat transfer and pressure drop of in-line array of heated obstacles cooled by jet impingement in cross-flow. Alexandria Engineering Journal 2017; 56: 285-296.
- Masip Y., Rivas A., Larraona GS., Anton R., Ramos JC., Moshfeqh 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, sayfa no: 48, Ankara, Türkiye, 2014.
- Pak BC., Cho YI. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer 1998; 11(2): 151-170.
- Saleha N., Fadela N., Abbes A. Improving cooling effectiveness by use chamfers on the top of electronic components. Microelectronics Reliability 2015; 55: 1067-1076.

- Selimefendigil F., Chamkha AJ. Cooling of an isothermal surface having a cavity component by using CuO-water nano-jet. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 2020; 30(4), 2169-2191.
- Shi W., Li F., Lin Q., Fang G. Experimental study on instability of round nanofluid jets at low velocity. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2021; 120, 110253.
- Öztürk SM., Demircan T. Numerical analysis of the effects of fin angle on flow and heat transfer characteristics for cooling an electronic component with impinging jet and cross-flow combination. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2022; 37(1): 57-74.
- Taylor JR. *An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements*, University Science Books, Sausalito; 1997.
- Teamah MA., Dawood MM., Shehata A. Numerical and experimental investigation of flow structure and behaviour of nanofluids flow impingement on horizontal flat plate. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2015; 74: 235-246.
- Wang SJ., Mujumdar AS. A comparative study of five low Reynolds number k- ϵ models for impingement heat transfer. *Applied Thermal Engineering* 2005; 25: 31-44.