

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOMPAKT PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERDE GRAFEN ESASLI
NANOAKIŞKANLARIN AKIŞ VE ISI TRANSFERİNİN HESAPLAMALI
AKIŞKANLAR DİNAMİĞİYLE İNCELENMESİ**

Eren Gürkan EROL

**Danışman
Doç. Dr. Barış GÜREL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2023**



© 2023 [Eren Gürkan EROL]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
3. PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİLER	10
3.1. Plakalı Isı Değiştirici Tipleri	11
3.2. Plakalı Isı Değiştiricilerin Kullanım Alanları	11
3.3. Nanoakışkanlar	12
3.3.1. Nanoakışkanların Özellikleri	13
3.3.2. Nanoakışkan Çeşitleri	13
3.3.3. Nanoakışkanların Plakalı Isı Değiştiricilerde Kullanımı	14
3.4. Yöntem	15
3.4.1. Sayısal Analizlerde Kullanılan Genel Metotlar	15
3.4.2. Klasik Plakalı Isı Değiştiricide Akışın Sayısal Olarak İncelenmesi	18
3.4.3. Özgün Kompakt Plakalı Isı Değiştiricilerde Akışın Sayısal Olarak İncelenmesi	21
3.4.4. Sayısal Ağ Yapısı (Mesh) Özelliklerinin Seçimi	26
3.4.5. Deneysel Doğrulama	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	35
4.1. 75° Kanat Açısına Sahip Klasik, Sinusoidal Akış Dağılımına ve Silindirik Kanatçık Yapısına Sahip Özgün Kompakt Isı Değiştiricilerinin Karşılaştırmalı Sonuçları	35
4.2. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	37
4.3. 75° Kanat Açısına Sahip KPİD’de $Re=900$ ($m=0,015\text{kg/s}$) ve 0,03 Hacimsel Oranda Grafen Nanoakışkanı Katkılı Elde Edilen Sonuçlar	42
4.4. Sinüsoidal Akış Dağılımına Sahip Özgün Kompakt Plakalı Isı Değiştiricide $Re=2888$ ($m=0,05\text{kg/s}$) ve 0,05 Hacimsel Oranda Grafen Nanoakışkanı Katkılı Elde Edilen Sonuçlar	45
4.5. Silindirik Kanatçık Yapısına Sahip Özgün Kompakt Plakalı Isı Değiştiricide $Re=900$ ($m=0,015\text{kg/s}$) ve 0,03 Hacimsel Oranda Grafen Nanoakışkanı Katkılı Elde Edilen Sonuçlar	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	66

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOMPAKT PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERDE GRAFEN ESASLI NANOAKIŞKANLARIN AKIŞ VE ISI TRANSFERİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİYLE İNCELENMESİ

Eren Gürkan EROL

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Barış GÜREL

Isı değiştiriciler, günümüzde, ısıtma, soğutma, iklimlendirme, gıda, havacılık ve uzay sektörlerinde bile kullanılmaktadır. Plakalı ısı değiştiriciler, ısı değiştiricilerin önemli ve en çok kullanılan çeşitlerinden bir tanesidir. Son yıllarda, eklemeli imalat yöntemiyle plakalı ısı değiştiricilerin kompakt ve özgün geometrilerde üretilmesine olanak sağlanmış ve böylece daha küçük hacimlerde yüksek ısı transferi sağlayan kompakt plakalı ısı değiştiriciler tasarlanmış ve üretilmektedir. Bu çalışmada kompakt plakalı ısı değiştiricilerde farklı hacimsel oranlarda grafen kullanılarak elde edilen su bazlı nanoakışkanların ısı transferi ve plaka içerisindeki basınç düşüşü değişimlerinin sayısal olarak incelenmesi amaçlandı. KPİD geometrisi üzerinde deneysel doğrulama ve dört farklı y^+ sayısına göre analizler yapıldı. Analizlerin sonucuna göre sayısal ağ eleman yapısı özellikleri seçildi. Isı transferi ve basınç düşüşü açısından optimum y^+ değeri belirlendi. Yapılan analiz sonuçlarına göre $y^+=10$ sayısına karşılık gelen mesh eleman büyüklüğü diğer özgün kompakt plakalı ısı değiştiriciler için analizlerde kullanıldı.

KPID ve iki özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide ısı transferi ve akış karakteristikleri üç farklı Re sayısı için su ve üç farklı nanopartikül hacimsel oranına sahip grafen bazlı nanoakışkan kullanılarak sayısal olarak hesaplandı ve sonuçlar tablolar halinde oluşturularak yorumlandı. Bu değerlendirme sonucunda; silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide en yüksek ısı transferi 2691 W, sinusoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide en düşük ısı transferi 328 W, silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide en yüksek basınç düşüşü 22437 Pa, sinusoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide en düşük basınç düşüşü 52 Pa gerçekleşmiştir.

Yapılan analizlerin sonuçları değerlendirildiğinde Reynold sayısı, geometri değişimi ve nanoakışkan hacimsel oranının ısı transferinde ve basınç düşüşü üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu faktörlerin etki sıralaması büyükten küçüğe: Reynold sayısı, geometri değişimi ve nano akışkan hacimsel oranı şeklindedir. Ayrıca yüksek ısı transferine sahip silindirik kanatçık yapısına sahip

özgün kompakt ısı değıştirici geometrisinde maksimum basınç düşüşü olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sebeple nanoakışkan kullanımı sırasında geometrinin uyumlu olup olmaması dikkat çekmektedir. Isı transferini arttırmak için nanoakışkan hacimsel oranını sürekli arttırmanın, sadece belirli bir sınıra kadar doğru olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Grafen, Nanoakışkan, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğı, Kompakt Plakalı Isı Değıştirici

2023, 66 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS INVESTIGATION OF FLOW AND HEAT TRANSFER OF GRAPHENE BASED NANO FLUIDS IN COMPACT PLATE HEAT EXCHANGERS

Eren Gurkan EROL

**Suleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy**

Supervisor: Assoc. Dr. Baris GÜREL

Heat exchangers are nowadays used in the heating, refrigeration, air conditioning, food, aerospace and even aeronautics sectors. Plate heat exchangers are one of the most important and widely used types of heat exchangers. In recent years, additive manufacturing has enabled the production of plate heat exchangers in compact and unique geometries, and thus compact plate heat exchangers that provide high heat transfer in smaller volumes are designed and manufactured. In this study, it was aimed to numerically investigate the heat transfer and pressure drop changes in the plate of water-based nanofluids obtained by using graphene at different volumetric ratios in compact plate heat exchangers. Experimental verification on the KPID geometry and analysis for four different y^+ numbers were performed. According to the results of the analyses, numerical mesh element structure properties were selected. The optimum value of y^+ was determined in terms of heat transfer and pressure drop. According to the results of the analysis, the mesh element size corresponding to the number $y^+=10$ was used in the analysis for other unique compact plate heat exchangers.

The heat transfer and flow characteristics of the KPID and the two original compact plate heat exchangers were numerically calculated for three different Re numbers using water and graphene-based nanofluid with three different nanoparticle volume fractions and the results were tabulated and interpreted. As a result of this evaluation; the highest heat transfer in the original compact heat exchanger with cylindrical fin structure was 2691 W, the lowest heat transfer in the original compact heat exchanger with sinusoidal flow distribution was 328 W, the highest pressure drop in the original compact heat exchanger with cylindrical fin structure was 22437 Pa, and the lowest pressure drop in the original compact heat exchanger with sinusoidal flow distribution was 52 Pa.

When the results of the analyzes are evaluated, it is seen that Reynolds number, geometry change and nanofluid volume fraction are effective on heat transfer and pressure drop. The order of influence of these factors is: Reynolds number, geometry variation and nanofluid volume fraction. It was also found that the

unique compact heat exchanger geometry with cylindrical fin structure with high heat transfer has maximum pressure drop. For this reason, the compatibility of the geometry during the use of nanofluid draws attention. It was found that continuously increasing the nanofluid volumetric ratio to increase heat transfer is correct only up to a certain limit.

Keywords: Graphene, Nanofluid, Computational Fluid Dynamics, Compact Plate Heat Exchanger

2023, 66 pages



TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Barış GÜREL'e teşekkürlerimi sunarım. Araştırmalarımnda yardımcı olan değerli hocam Dekan Yrd./ Doç. Dr. Sema YURDAKUL'a, ve çalışmalarımnda yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Makine Mühendisi Süleyman ALTINDAL'a teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Eren Gürkan EROL
ISPARTA, 2023



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. PID patlatılmış ve plakalı ısı değiştiricinin montajlanmış görüntüsü..	10
Şekil 3.1. KPID geometrisi.....	18
Şekil 3.2. KPID’de akışkan giriş-çıkış yönleri.....	19
Şekil 3.3. KPID’nin Akış Hacmi.....	19
Şekil 3.4. KPID sayısal ağ yapısı.....	20
Şekil 3.5. Sinüsoidal akış dağılımına sahip ÖKPID	22
Şekil 3.6. Silindirik kanatçık yapısına sahip ÖKPID	22
Şekil 3.7. KPID’de y^+ sayılarına göre sayısal ağ yapıları mesh görüntüleri sırasıyla a) $y^+=30$, b) $y^+=15$, c) $y^+=10$, d) $y^+=8$	27
Şekil 3.8. Plaka geometrilerinin $y^+=10$ değerinde sayısal ağ mesh görüntüleri.....	28
Şekil 3.9. a.b. Sayısal analizlerde referans alınan plakalı ısı değiştiricinin geometrik detayları.....	29
Şekil 3.10. a.b.c. Sayısal analizlerde referans alınan plakalı ısı değiştiricinin geometrik detayları.....	29
Şekil 3.11. Sayısal Ağ Eleman Yapısı.....	30
Şekil 3.12. Sıcak akış basınç dağılımı	30
Şekil 3.13. Soğuk akış basınç dağılımı.....	31
Şekil 3.14. Sıcak akış hız vektörleri.....	32
Şekil 3.15. Soğuk akış hız vektörleri.....	32
Şekil 3.16. Sıcak akış sıcaklık dağılımı	33
Şekil 3.17. Soğuk akış Sıcaklık Dağılımı	33
Şekil 4.1. Sıcak akışkan ve soğuk akışkan üzerinden sonuç alınmak için çizilmiş dört farklı çizgi	35
Şekil 4.2. a) Sıcak akışkan ve b) soğuk akışkan üzerinden sonuç alınmak için çizilmiş dört farklı çizgi.....	36
Şekil 4.3. a) Sıcak akışkan ve b) soğuk akışkan üzerinden sonuç alınmak için çizilmiş dört farklı çizgi.....	37
Şekil 4.4. KPID Analiz Sonuçları	39
Şekil 4.5. Sinüsoidal Akış Dağılımına Sahip ÖKPID Analiz Sonuçları	40
Şekil 4.6. Silindirik Kanatçık Yapısına Sahip ÖKPID Analiz Sonuçları	41
Şekil 4.7. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık değişimi.....	42
Şekil 4.8. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık dağılımı.....	43
Şekil 4.9. Sıcak ve soğuk akışkan nusselt sayısı dağılımı.....	43
Şekil 4.10. Sıcak ve soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı dağılımı.....	44
Şekil 4.11. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık değişimi	45
Şekil 4.12. Sıcak akışkan nusselt sayısı değişimi	46
Şekil 4.13. Soğuk akışkan nusselt sayısı değişimi.....	46
Şekil 4.14. Sıcak akışkan ısı taşınım katsayısı değişimi	47
Şekil 4.15. Soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı değişimi.....	47
Şekil 4.16. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık dağılımı	48
Şekil 4.17. Sıcak ve soğuk akışkan nusselt sayısı dağılımı	49
Şekil 4.18. Sıcak ve soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı dağılımı.....	50
Şekil 4.19. Sıcak ve soğuk akışkan hız vektörleri dağılımı.....	51
Şekil 4.20. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık değişimi	52
Şekil 4.21. Sıcak akışkan nusselt sayısı değişimi	53

Şekil 4.22. Soğuk akışkan nusselt sayısı değişimi.....	53
Şekil 4.23. Sıcak akışkan ısı taşınım katsayısı değişimi	54
Şekil 4.24. Soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı değişimi.....	54
Şekil 4.25. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık dağılımı	55
Şekil 4.26. Sıcak ve soğuk akışkan nusselt sayısı dağılımı	56
Şekil 4.27. Sıcak ve soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı dağılımı.....	57
Şekil 4.28. Sıcak ve soğuk akışkan hız vektörleri dağılımı.....	58



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Analizde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri	17
Çizelge 3.2. HAD analizlerinde kullanılan çözüm metotları	18
Çizelge 3.3. ÖKPİD'lerin geometrik özellikleri	23
Çizelge 3.4. Klasik plakalı ısı değıştiricinin geometrik özellikleri	23
Çizelge 3.5. Sayısal Analizlerde Kullanılan Sınır Koşulları ve Akışkan Özellikleri	24
Çizelge 3.6. Sayısal ağ yapısı seçimi	27
Çizelge 3.7. Deneysel Doğrulama Analizlerinde Kullanılan Plakalı Isı Değıştirici Geometrik Özellikleri	28
Çizelge 3.8. Sayısal ve Deneysel Sonuçlar	34



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C_p	Özgöl ısı kapasitesi
C_f	Yüzey sürtünme katsayısı
CG	Karboksil grafen
E	Enerji birimi
g	Yer çekimi ivmesi
GNP	Grafen nano
GO	Grafen oksit
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HPM	Homotopi pertürbasyon yöntemi
HTR	Isı aktarım hızı
ID	Isı değiştirici
KPID	Klasik plakalı ısı değiştirici
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüpler
NTU	Isı değiştiricisi yüzeyi ile akışkan arasındaki toplam ısı transfer katsayısının boyutsuz bir gösteriliş şeklidir.
Nu	Nusselt sayısı
ÖKPİD	Özgün kompakt plakalı ısı değiştirici
PID	Plakalı ısı değiştirici
Re	Reynold sayısı
u^*	Sürtünme hızı
U_∞	Serbest akış hızı
y^+	Y plus sayısı
ε	Epsilon
λ	Termal iletkenlik
μ	Viskozite
ρ	Yoğunluk
nf	Nanoakışkan
p	Parçacık
w	Su
$\bar{T}$	Gerilim tensörü
τ_ω	Duvar yırtılma gerilimi
$\emptyset$	Nanoakışkan hacim oranı

1. GİRİŞ

Plakalı ısı değıştirciler son yıllarda, eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılmasıyla özgün ve kompakt geometrilerde tasarlanıp üretilebilmektedir. Böylece, daha az hacim kaplayan ısı transferi yüksek plakalı ısı değıştirciler özel kullanım yerlerinde kullanılabilmektedir. Ayrıca, farklı nanopartikül katkıları vasıtasıyla ısı iletim katsayısı arttırılmış nanoakışkanlar kullanılarak ısı değıştircilerin ısı transferi arttırılabilmektedir.

Bu çalışmada, üç plakaya sahip klasik plakalı ısı değıştirici ve aynı hacimde yer kaplayan iki farklı geometrideki özgün kompakt plakalı ısı değıştiricinin üç boyutlu tasarımları yapıldı. Sayısal ağ yapısı oluşturdu ve Ansys-Fluent yazılımı yardımıyla Standart k-omega türbülans metodu kullanılarak 0,05 kg/s debisinde sıcak tarafta 70°C su ve soğuk tarafta ise 15°C su ve farklı hacimsel oranlarda (%1, %3 ve %5) grafen nanopartikül katkılı nanoakışkan kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunu yapmadan önce farklı sayısal ağ yapısı eleman büyüklüğü ve sayılarında klasik plakalı ısı değıştiricinin sıcak ve soğuk akışkanların ikisinde de su kullanılarak analizler gerçekleştirildi ve sonuçlar değerlendirilerek optimum sayısal ağ eleman büyüklüğü belirlenmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri sonucunda plakalı ısı değıştircilerdeki basınç, sıcaklık ve hız değışimi konturları ve hız vektörü elde edilerek sonuçlar değerlendirilip yorumlanmıştır. Ayrıca çıkış sıcaklık ve giriş basınç ortalama değeri, soğuk ve sıcak akışkanlar için elde edildi. Böylece plakalı ısı değıştirciler içerisindeki ısı transferi, basınç düşüşü ve pompada harcanan güç değışimleri hesaplanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürde plakalı ısı değıştirici ve nanoakışkan kullanılarak yapılan çalışmalar aşağıda bahsedilmiştir:

Tiwari vd. (2014), ANSYS FLUENT yazılımını kullanarak CeO_2 -su ve Al_2O_3 -su bazlı homojen nanoakışkanların ısı transfer özelliklerini sayısal olarak araştırmıştır. Bu çalışmayı yaparak, çeşitli nano sıvıların farklı optimum nanopartikül hacmi konsantrasyonuna sahip olduğunu ve ısı transfer özelliklerinin maksimum artış gösterdiğini bulmuşlardır. Çalışmada ayrıca, alternatif soğutma sıvısı olarak nano sıvıların kullanımının, soğutma sıvısı olarak su kullanılması durumuyla aynı basınç düşüşünde daha fazla ısı transferi sağlandığından pompalama maliyetlerinin düşürüldüğü sonucuna varıldığı belirtilmiştir.

Khoshvaght-Aliabadi vd. (2014), bakır bazlı saf su nanoakışkanının vorteks-jeneratörü plaka kanatçık kanalları içinde laminar ve kararlı durum akışı ile zorlanmış konvektif ısı transferi deneysel olarak ve ayrıca HAD yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelemiştir. Deneysel bölümde, sabit duvar sıcaklığı koşulunu sağlayabilen bir düzenek imal edilmiştir. Sayısal bölümde sıcaklığa bağlı termo-fiziksel özellikler için tek fazlı (homojen) ve iki fazlı (karışım ve Eulerian) modeller geliştirilmiştir. İki işletim faktörünün (yani Reynolds sayısı ve nanopartikül konsantrasyonu) ve yedi geometrik parametrenin (yani kanat yüksekliği, kanat genişliği, kanal uzunluğu, boyuna kanat eğimi, enine kanat eğimi, kanat bağlantı açısı ve kanat hücum açısı) vorteks oluşturu kanallara sahip bir plaka kanatlı ısı değıştiricinin performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Heidary ve Kermani (2010), bu makalede, nanoakışkan içeren dalgalı bir kanaldaki ısı transferi ve akışı sayısal olarak incelemiştir. Giriş akışkanı sıcaklığının (T_c), dalgalı yatay duvarların sıcaklığından (T_w) daha düşük alındığını belirtmişlerdir. Yönetici denklemler, SIMPLE tekniğine dayalı kontrol hacmi yaklaşımı ile sayısal olarak çözülmüştür. Simülasyon için bakır-su nanoakışkanı dikkate alınmıştır. Reynolds sayısı, Re_H , $5 \leq Re_H \leq 1500$, nano-akışkan

hacim oranı, ϕ , $0 \leq \phi \leq \%20$ ve dalga genliği, α , $0 \leq \alpha \leq 0.3$ aralığında geniş bir sayısal simülasyon yelpazesi yapılmıştır. Bu parametrelerin yerel ve ortalama Nusselt sayıları ve yüzey sürtünme katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Simülasyonlar literatür ile mükemmel bir uyum göstermektedir. Bu çalışmada, kanallardaki ısı transferinin nano parçacıkların eklenmesi ve dalgalı yatay duvarların kullanılmasıyla artırılabilceği sonucuna varılmıştır. Belirtilen koşullarda ısı transferinin %50 oranında artırılabilceği belirtilmiştir.

Ahmed vd. (2011), bu çalışmada izotermal olarak ısıtılmış oluklu kanal boyunca bakır-su nanoakışkan akışının ısı transferi ve basınç düşüşü özellikleri sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırma, sırasıyla 100-1000 ve 0-0,05 aralığındaki Reynolds sayısı ve nanoparçacık hacim oranını değişmesi ile gerçekleştirildi. Nanoakışkan kullanımının kanal içindeki ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri incelenilmiştir. Nanoparçacık hacim oranı ve Reynolds sayısı arttıkça ısı transferi artışının arttığı, basınç düşüşünde ise hafif bir artış olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, minyatür bir plakalı ısı değiştiricisinde (PID) nanoakışkan kullanımının etkisi hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. İlk olarak, tipik bir nanoakışkanın (su içinde CuO, hacimce %4) termofiziksel özellikleri (yani termal iletkenlik, ısı kapasitesi, viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimi) sistematik olarak ölçülmüştür. Pantzali vd. (2009), yüzey modülasyonunun ısı transferi artışı ve sürtünme kayıpları üzerindeki etkisini daha sonra bir CFD kodu kullanılarak mevcut minyatür PID'nin yanı sıra düz plakalı benzer bir PID'nin simülasyonu ile araştırmışlardır. Son olarak, nanoakışkanın PID performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve klasik soğutma sıvısı (yani su) ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, belirli bir ısı görevi için gereken nanoakışkan hacimsel debisinin suyunkinden daha düşük olduğunu ve daha düşük basınç düşüşüne neden olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, daha küçük ekipman ve daha az pompalama gücü gerekmektedir. Sonuçta, nanoakışkanların kullanımının, özellikle ekipmanın toplam hacmi ana konu olduğunda, verimli ısı değişim sistemleri tasarlamaya yönelik umut verici bir çözüm gibi görüldüğünü belirtmişlerdir.

Şimşek (2016), bu çalışmada nanoakışkanların bakır mikro kanallardaki termal ve hidrodinamik performansını incelemiştir. Deneyler, iyondan arındırılmış suyun içinde süspansiyon halinde bulunan küresel altın nanoparçacıklar ve gümüş nanoteller ile sabit ısı akısında gerçekleştirilmiştir. Yüzey aktif madde olarak da Polyvinylpyrrolidone (PVP) kullanmıştır. Altın nanoakışkan ile yapılan deneylerde, parçacık boyutunun (10, 50, 100 nm), hacim bazlı konsantrasyonun (%0,00064 - %0,0052) ve akış hızının (100-140 $\mu\text{L}/\text{dk}$) nanoakışkan performansındaki etkisi $70\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 'lik dikdörtgen mikro kanalda incelemiştir. Gümüş nanoakışkan deneylerinde, $200\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ ve $70\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ kesit alanına sahip kanallar kullanılmıştır. İncelenen durumlar arasında, gümüş nanoakışkanın en iyi termal performansı göstermiştir. Hem gümüş nanoakışkanların hem de altın nanoakışkanların PVP - deiyonize su çözeltisinden daha yüksek taşınımlı ısı aktarım katsayısına sahip olduğunu, fakat altın nanoakışkanın bazı durumlarda deiyonize sudan daha iyi termal performans gösterdiğini belirtmişlerdir. İlgili çalışmada, yüzey aktif maddenin nanoakışkanın stabilizasyonunda ve de termal ve hidrodinamik performansındaki etkisi incelenmiş ve bu sayede literatüre katkıda bulunmuştur.

Bu çalışmada, Khairul vd. (2014) nanoakışkanların, ısı eşanjörlerinde mükemmel termal performans sağlayabilen potansiyel soğutucular olduklarını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, su ve CuO/su nanoakışkanlarının (soğutucu olarak) oluklu plakalı ısı eşanjöründe ısı transfer katsayısı, ısı transfer hızı, sürtünme kaybı, basınç düşüşü, pompalama gücü ve ekserji kaybı üzerindeki etkileri incelenmiştir. CuO/su nanoakışkanlarının ısı transfer katsayısı, nanopartikül hacim konsantrasyonunun suya kıyasla %0,50'den %1,50'ye çıkarılmasıyla yaklaşık %18,50 ila %27,20 oranında arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, nanoakışkanlar için ısı transfer hızında iyileşme gözlenmiştir. Öte yandan, nanoakışkanlar ısı transfer akışkanı olarak kullanıldığında ekserji kaybı klasik akışkana kıyasla %24 oranında azalmıştır. Ayrıca, %1,5 hacim nanoparçacık için %34 daha yüksek ekserjetik ısı transferi etkinliği bulunmuştur.

Literatürde özgün kompakt plakalı ısı değiştiricilerinde nanoakışkan kullanılan çalışmalar aşağıda bahsedilmiştir.

Bu çalışma, son teknoloji ürünü kompakt lehimli plakalı ısı değıştircinin (PID) termo-hidrolik performansı değerdendirilmiştir (Gürel vd., 2020). PID'nin ısı transferini ve basınç düşüşünü iyileştirmek için, ilk kez biyomimetik yaklaşım kullanılarak plaka yüzeyinde belirli yüksekliklerde bir akciğer modeli tasarlanmıştır. Bu çalışmada plaka yüzeyleri ısı transfer alanını arttırmak için üç boyutlu akciğer benzeri bir yapı olarak tasarlanmıştır. Daha sonra, sıcak ve soğuk akışkanlar için sırasıyla 0,05 kg/s kütle akış hızıyla 90°C ve 40°C besleme sıcaklıkları altındaki çalışma koşullarında Ansys-Fluent programı ile hesaplamalı akışkanlar dinamiğı (HAD) simölasyonları gerçekleştirilmiştir. Simölasyon, mevcut “v” şeklindeki kompakt lehimli PID'nin sayısal ve deneysel sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Sonuçların, referans PID'ye kıyasla ısı transferinde %71,30 artış ve %6,66 daha az hacim için basınç düşüşünde %67,8 azalma olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, birçok alanda kullanılan sızdırmaz ve lehimli bir ısı eşanjörü yerine doğrudan metal lazer sinterleme tekniğı ile üretilen kompakt bir ısı eşanjörünün farklı kanal açıları ve kütle akış hızları için ısı işlemleri incelenmiştir (Kan vd., 2014). Mevcut ısı eşanjörünün sınır koşulları laboratuvarında deneysel olarak test edilmiştir. Bu çalışmada, 30 ° , 45 ° ve 60 ° kanal açısına sahip kompakt bir ısı değıştircisi tasarlanmış ve üç farklı kütleli debi (0.2, 0.3 ve 0.43 kg/s) kullanılmıştır. Farklı kanal açıları için ısı kanalları ve ısı değıştircilerin duvarları arasında meydana gelen ısı transferleri ve ısı değıştircilerin verimleri hesaplanmıştır. Analizler sonucunda, kompakt bir ısı eşanjörünün maksimum ısı transferi yapabilmesi için eşanjör, aşğıdaki çalışma koşullarını yerine getirmesi gerektiğini belirtmişlerdir: kanal açısı 30 ° , sıcak su giriş sıcaklığı 60 ° C, soğuk su giriş sıcaklığı 15 ° C ve kütle akış hızı 0,43 kg/s.

Soğutucu olarak Al₂O₃/su nanoakışkan uygulayarak ε-NTU yöntemini kullanarak düz borulu düz kanatlı kompakt ısı değıştircinin termal tasarımını araştırmışlardır (Vasu vd., 2008). Nanoakışkanın %4 konsantrasyonlu basınç düşüşünün, baz akışkanın neredeyse iki katı olduğunu belirtmişlerdir.

Suda dağılmış TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerini deneysel olarak kullanarak araba radyatörünün ısı transferinin iyileştirilmesi incelenmiştir (Hussein vd., 2014). Test donanımı, tüpler ve konteyner ile bir araba radyatörü olarak kurulmuştur. Reynolds sayısı ve hacim konsantrasyonunun aralığı sırasıyla (250-1750) ve (%1,0-2.5) olarak kullanılmıştır. Sonuçlarda, ısı transferinin nano akışkan hacim oranının artmasıyla arttığını belirtmişlerdir.

Özel bir araba radyatöründe farklı konsantrasyonlarda nanoakışkanın basınç düşüşü ve sürtünme faktörü üzerindeki etkisi Samira vd., tarafından araştırılmıştır (Samira vd., 2015). Baz sıvı olarak 60/40 oranında etilen glikol ve saf sudan oluşan bir karışım kullanılmıştır. Radyatördeki basınç düşüşünün tahmini için ampirik bir denklem geliştirilmiştir. Sonuçlarda, akış hızının artmasıyla performans endeksinin arttığını ve daha yüksek akış hızında nanoakışkan uygulamasının uygun maliyetli olduğunu belirtmişlerdir. Giriş sıcaklığının 19°C arttığında, basınç düşüşünün neredeyse %13,17 azaldığını belirtmişlerdir.

Bir otomobil radyatöründe yassı tüplerinde dolaşan bir etilen glikol ve su karışımında iki farklı nanoakışkan, Al_2O_3 ve CuO ile akış ve ısı transferini değerlendirilmiştir (Vajjha vd., 2010). Yerel ve ortalama sürtünme faktörü ve konvektif ısı transfer katsayısı sonuçlarının, nanoakışkanların artan parçacık hacimsel konsantrasyonu ile bir artış göstermekte olduğunu belirtmişlerdir. Basınç kaybının, nanoakışkanların artan parçacık hacimsel konsantrasyonları ile artmakta olduğunu; ancak, aynı miktarda ısı transferi için gereken hacimsel akışın azalması nedeniyle, gerekli pompalama gücünün azaldığını belirtmişlerdir.

Elsebay vd. (2016) su yerine nanoakışkanların kullanılması nedeniyle bir radyatör için yeniden boyutlandırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Hem termal hem de akış performanslarını değerlendirmek ve yeniden boyutlandırma işlemini gerçekleştirmek için düz bir radyatör tüpünde akan iki nanoakışkan (yani $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$) sayısal olarak incelenmiştir. Düzleştirilmiş tüp modeli, literatürdeki mevcut verilerle oluşturulmuş, ayrılaştırılmış, test edilmiş ve doğrulanmıştır. Isı transfer performansındaki belirgin iyileşme nedeniyle

radyatör hacminde önemli bir azalma elde edildiği belirtilmiştir. Aksine, radyatör hacmi azalmasından sonra gereken pompalama gücünün, baz sıvı için ihtiyaç duyulandan daha fazla arttığını belirtmişlerdir. 1000 Reynolds sayısında Al_2O_3 için, %1, 3, 5 ve 7'lik konsantrasyonlar için ısı transferinin artırılması değerlerinin sırasıyla saf suya göre yaklaşık %5, 16, 30 ve 47 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, ısı transferi artma değerleri CuO nanopartiküller için %3, 13, 24 ve 38 olarak hesaplanmıştır.

Bir otomotiv radyatörünün içinde akan saf suya dağılmış MWCNT'lerin termal performansının deneysel bir değerlendirilmesi Oliveira vd., tarafından gerçekleştirilmiştir (Oliveira vd., 2017). MWCNT'leri suda dağıtmak için yüksek basınçlı homojenizasyon adı verilen iki aşamalı bir yöntem kullanılmıştır. Deneyler, bir araba radyatöründen hava akışını simüle eden bir rüzgâr tüneli ve radyatör içinde nano sıvıyı dolaştıran bir sıcak akışkan devresinden oluşan deneysel bir düzende gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, konsantrasyon artışıyla ısı transfer hızının azaldığını belirtmişlerdir.

Singh vd. (2022) bu çalışmada, plakalı ısı değiştiricilerin (PID) ısı transferi özelliklerini iyileştirmek için nanoakışkanları soğutucu olarak kullanmayı amaçlamışlardır. Saf su bazlı Al_2O_3 , grafen nano plaka (GNP) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) nanoakışkanları kullanılarak deneysel ve sayısal incelemeler kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Soğuk taraf akışkanı $30^{\circ}C$ 'de nanoakışkanların konsantrasyonu hacimsel olarak %0,1-1 ve akış hızı ise 1-5 lt/dk arasında değişmektedir. Sıcak taraf akışkan özellikleri 2 lt/dk ve $80^{\circ}C$ 'de saf sudur. Bu PID'de nanoakışkanlar kullanılarak soğuk çıkış sıcaklığı, ısı transfer hızı, ısı transfer katsayısı, Nusselt sayısı (Nu), basınç düşüşü, pompalama gücü, etkinlik ve ekserji kaybı gibi ısı transfer özellikleri deneysel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlarda, nanoakışkan hacimsel oranı %1 iken, Al_2O_3 , GNP ve MWCNT nanoakışkanları kullanılarak ortalama ısı transfer hızlarında sırasıyla %9,86, 14,86 ve 17,27 oranında artış olduğu belirtmişlerdir.

Ponangi vd. (2021) mevcut çalışmada, kompakt ısı değiştiricinin (sıvı-hava, otomotiv radyatörü) performansını incelemek için geleneksel sıcak akışkana

karboksil grafen (CG), grafen oksit (GO) ve yeni hibrit nanoparçacıklar (ultra düşük hacimli konsantrasyonlarda 50/50 etilen-glikol ve su) ekleyerek bu etkiyi incelemişlerdir. Sıcak akışkanın Reynolds sayısı, havanın Reynolds sayısı ve nanopartiküllerin hacim konsantrasyonunun Nusselt sayısı, etkinlik, basınç düşüşü ve sürtünme faktörü gibi performans parametreleri üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sırasıyla hacimsel olarak %0,02 CG'nin ve %0,04 GO'nun oranında Nusselt sayısında maksimum 3,59 ve 4,92 kat artış gözlenmekte olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçlarda hem verimlilik hem de basınç düşüşü açısından kompakt ısı değiştiricisinin performansında önemli bir artış olduğunu göstermişlerdir. Çalışmada, %0,005 hacimsel oranında ve %0,005 CG oranında hacim konsantrasyonunda basınç düşüşünde %66 azalma ile verimlilikte maksimum %232 iyileşme olduğunu göstermişlerdir.

Yeni teknolojilerin ortaya çıkışı ile, birim alan başına ısı transferini artıran küçük entegre sistemler ihtiyaç olmuştur. Bu nedenle Bal ve Bandyopadhyay (2022), soğutucu olarak nanoakışkan içeren mikrokanallı ısı emiciyi bu makalede kullanmışlardır. Saf suda (temel akışkan) askıya alınan grafen nanoparçacıkların (GNP) termal performansı ve akış özellikleri, dikdörtgen bir mikrokanaldaki konsantrasyonlar ve kütle akış hızı için incelenmiştir. Modelin geometrisi ve simülasyon analizi sırasıyla CATIAV5R20 ve Ansys R19.2'de yapılmıştır. Simülasyonda, akışkanın basınç düşüşünün hem kütle akış hızındaki hem de temel akışkandaki nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyonundaki artışla arttığı görülmekte olduğunu belirtmişlerdir. Nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyonundaki artışın, taban plakasından ve iletken kanatçıklardan aktarılan toplam ısıyı artırarak daha yüksek çıkış sıvısı sıcaklığına neden olduğu belirtmişlerdir.

Singh S. ve Ghosh SK. (2022) bu çalışmada, soğutucu olarak çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT)/saf su nanoakışkanı kullanan 30° ve 60° “V” tipi kanat açısına sahip plaka geometrilerinin termo-hidrolik performansını değerlendirmek için kapsamlı deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Soğuk tarafta saf su ve MWCNT nanoakışkan kullanılarak yapılan deneyler, sıcak tarafı sabit akışta tutarak akış hızı ve konsantrasyonu değiştirilerek

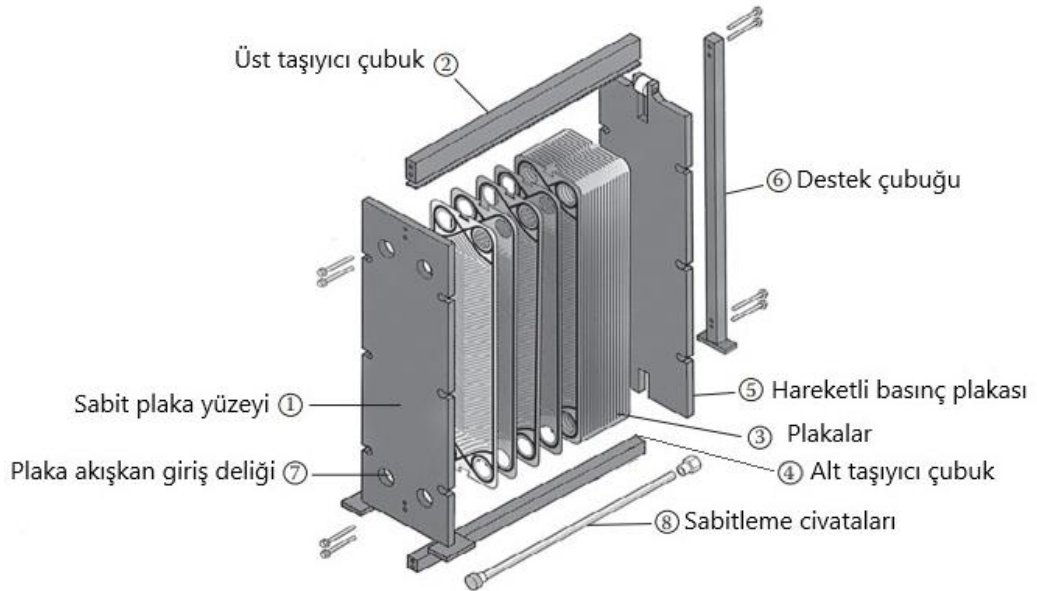
gerçekleştirilmiştir. Termo-hidrolik performans parametreleri sayısal olarak değerlendirilmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. Isı transferinin, saf su kullanılarak 30°'açılı plakaların 60°'lik açılı plakaya göre için %9,25 oranında arttığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, %1 hacim konsantrasyonuna sahip nanoakışkan kullanılarak 30° ve 60° açılı plakalar için sırasıyla %13,64 ve %17,27 maksimum ısı transferi artışı olduğu belirtmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı kompakt plakalı ısı değiştiricilerinde farklı hacimsel debilerde Grafen/su nanoakışkanları kullanılarak ısı transferini arttırmaktır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak Grafen/su nanoakışkanını kullanılarak 3 farklı kompakt plakalı ısı değiştiricisinde ve 3 farklı nano partikül hacimsel oranında ısı ve akış incelemesi ile optimum ısı transferi araştırılması yapılmıştır.

3. PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİLER

Farklı sıcaklıktaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı transferi sağlayan ekipmanlar, ısı değıştircinin (ID) temel tanımıdır. Gıda endüstrileri, enerji santralleri, atık ısı geri kazanım yönetimi, imalat endüstrileri, HVAC (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme) uygulamaları ve çok çeşitli farklı uygulamalarda kullanılırlar.

Plakalı ısı değıştirciler, günümüzde kullanılan en yaygın ısı değıştirci türlerinden biridir; diğer yaygın ısı değıştirci türü, kabuk ve borulu ısı değıştircidir. Spiral ısı değıştirci endüstriyel uygulamalar için de kullanılır, ancak kullanımı diğer iki tip ısı değıştirciye kıyasla daha azdır. Plakalı ısı değıştircileri (PID), verimli, sağlam ve bakımı nispeten kolay oldukları için mühendislik dünyasında yaygın bir uygulama alanına sahiptir. Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi günümüzde kullanılan klasik plakalı ısı değıştirciler, sabit plaka yüzeyi, üst taşıyıcı çubuk, plakalar, alt taşıyıcı çubuk, hareketli basınç plakası, destek çubuğu, plaka akışkan giriş delikleri ve sabitleme civatalarından oluşmaktadır.



Şekil 3.1. PID patlatılmış ve plakalı ısı değıştircinin montajlanmış görüntüsü (Alfa Laval, 2022)

3.1. Plakalı Isı Değiştirici Tipleri

Plakalı ısı değiştirici, ısıyı iki akışkan arasında aktarmak için bir dizi ince plaka kullanan kompakt tipte bir ısı eşanjörüdür. Dört ana PID türü vardır; contalı, lehimli, kaynaklı ve yarı kaynaklı. Plaka ve çerçeve veya contalı plakalı ısı eşanjörü kenarları contalarla kapatılmış ve bir çerçeve içinde bir arada tutulan bir dizi ince dikdörtgen plakadan oluşur. Plakalı ısı eşanjörleri ilk olarak 1923'te süt pastörizasyonu için tanıtıldı. Ancak şu anda kimya, petrol, HVAC, soğutma, süt ürünleri, ilaç, içecek, sıvı gıda ve sağlık sektörlerinde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu, PID'lerin esnek termal tasarım gibi benzersiz avantajlarından kaynaklanmaktadır. Plakalar kolayca eklenebilir, farklı ısı görevleri ya da proses gereksinimlerini karşılamak için çıkartılabilir olması en büyük avantajlarından. (Fábio A.S. Mota, 2015)

3.2. Plakalı Isı Değiştiricilerin Kullanım Alanları

Plakalı ısı değiştiriciler, kimya ve merkezi ısıtma gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Plakalı ısı değiştiricilerin çeşitli endüstrilerdeki uygulamaları aşağıda detaylı bir şekilde bahsedilmiştir.

1. Soğutma sistemi: Kondenser ve evaporatör olarak kullanılır. Günümüzde plakalı ısı değiştiricileri genellikle kuyu suyu soğutmasında kullanılmaktadır.
2. HVAC: Kazan, yüksek bina ara ısı eşanjörü vb. ile kullanılan ara ısı eşanjörü.
3. Kimya endüstrisi: soda endüstrisi, sentetik amonyak, alkol fermantasyonu, reçine sentezi, soğutma vb.
4. Metalurji Endüstrisi: alüminat ana likör ısıtma veya soğutma, çelik üretim prosesi soğutma vb.
5. Makine endüstrisi: her türlü su verme sıvısı soğutması, redüktör yağlama yağı soğutması vb.
6. Güç endüstrisi: yüksek gerilim trafosu yağ soğutması, jeneratör rulman yatağı yağ soğutması vb.
7. Kağıt endüstrisi: ağartma(beyazlatma) işlemi, ısı geri kazanımı, ısıtma yıkama bulamacı vb.

8. Tekstil endüstrisi: Viskon alkali çözelti soğutması, kaynar nitroselüloz soğutması vb.
9. Gıda endüstrisi: meyve suyunun sterilizasyonu ve soğutulması; hayvansal ve bitkisel yağların ısıtılması ve soğutulması vb.
10. Yağ teknolojisi: sabun bazlı atmosferik basınçta kurutma, çeşitli proses sıvılarını ısıtma veya soğutma.
11. Merkezi ısıtma: atık ısı ile bölgesel merkezi ısıtma, banyo ısıtma suyu.
12. Atık ısı kullanımı: Banyo endüstrisinin atık suları, temiz suyu ısıtmak için yeniden kullanılır.
13. Elektrikli kazan ısıtma: elektrikli kazan doğrudan ısıtma, elektrikli kazan ısı depolamalı ısıtma.
14. Diğerleri: petrol, ilaç, nakliye, deniz suyunun tuzdan arındırılması, jeotermal kullanım. (JiangSu Shijie Technology Co,2022)

3.3. Nanoakışkanlar

Bilimin ilerlemesi ile nanoparçacıkların üretimi mümkün hale gelmiştir. Nano ölçekte malzemelerin özelliklerinden biri, onlara özel yetenekler kazandıran geniş yüzey/hacim oranıdır. Nanoakışkanlar, nanoteknoloji tabanlı ısı transfer akışkanlarının heyecan verici yeni bir sınıfı olarak ortaya çıkmış ve son birkaç yılda muazzam bir şekilde büyümüştür. Literatürdeki araştırmalar, bu akışkanların termofiziksel özelliklerini ve kullanıldıkları mekanizmaları açıklıyor. Nanoakışkanlar, Choi ve Eastman(Choi ve Eastman, 1995) tarafından küçük miktarlarda metalik veya metalik olmayan nanopartiküller içeren yeni bir tür ısı transfer akışkanı olarak önerilen bir terimdir. Nanoakışkan teknolojisinin araştırma ve geliştirmesi, ısı transferi uygulamaları için nanoakışkanların yüksek potansiyelini gösterdi. Bu, tüm dünyada hem endüstride hem de akademide bu alanda araştırmalara yol açtı. Nanoakışkanlarda kullanılan ortalama parçacık boyutu 1 ila 100 nm arasında değişebilir. Bununla birlikte, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi alanında nanoakışkanların tanıtılmasıyla, faydaları ve zorlukları ile yeni bir yol oluşturulmuştur. Nanoakışkanların toplu ve reolojik davranışlarının tam olarak anlaşılması, nanoakışkan araştırmacıları için çok

önemlidir. Bu nedenle bir sonraki bölümde nanoakışkanların termofiziksel özellikleri incelenmiştir.

3.3.1. Nanoakışkanların Özellikleri

Baz akışkana nanoparçacık eklenmesiyle değişen nanoakışkanlar için dört termofiziksel özellik vardır. Bu özellikler yoğunluk, viskozite, termal iletkenlik ve özgül ısıyı içerir. Bu özelliklere nanoparçacık eklenmesinin etkisi hakkında farklı araştırmacılar farklı görüşler ifade etmişlerdir, ancak genel olarak nanoparçacık eklemek bu termofiziksel özellikleri değiştirmektedir. Araştırmacıların çoğu, nanopartiküllerin eklenmesiyle termal iletkenliğin arttığını bildirmiştir (Munish Gupta vd., 2017). Ancak, diğer üç özellik için sonuçların farklı olduğu görülmüştür. Bu özelliklerde hem artış hem de azalma bildirilmiştir. Bu değişikliklerin yüzdesi nanopartiküllerin hacim yüzdesi, nanopartiküllerin özellikleri, sıcaklık ve özellikle baz akışkan gibi bir dizi faktöre bağlıdır.

Literatürde Mohammad vd. (2015), nanoparçacıkların eklenmesinin baz akışkanın özgül ısı kapasitesinde bir artışa yol açtığını belirten ifadeler bildirmiştir. Baz akışkana nanoparçacıkların eklenmesinin, nanoakışkanın ısı kapasitesinde bir gelişme ile sonuçlandığını belirtmişlerdir. Bu özellikleri ölçmek için ya deneysel yöntemler ya da teorik yöntemler kullanılır. Farklı nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini incelemek için birçok deneysel araştırma ve teorik çalışma yapılmış olmasına rağmen, hala tahmin etmek için uygun teoriler yoktur.

3.3.2. Nanoakışkan Çeşitleri

Nanoakışkanın farklı türleri vardır; temel olarak

- Al_2O_3 + su,
- CuO + su,
- TiO + su,
- $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ + su,
- Grafen + su, en çok kullanılan türleridir.

Son on yılda, grafen nanoakışkanları, çok çeşitli mühendislik uygulamaları için en çok araştırılan nanoparçacıklardan biri olmuştur. Grafen bazlı nanopartiküllerin diğer nanopartiküllere göre birçok avantajı vardır: yüksek stabilite, yüksek termal iletkenlik, düşük erozyon ve korozyon ile daha yüksek taşıyıcı hareketliliği. Grafen bazlı nanoakışkanlar, ısı transferi, kusur algılayıcı anti-enfeksiyon tedavisi, enerji depolama sistemleri, biyomedikal ve kozmetik gibi uygulamalar bulmuştur. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, mühendislik sistemlerinin ve cihazlarının verimliliğini ve güvenilirliğini sağlamak için daha kompakt ve verimli soğutma ortamlarına ihtiyaç duyulmaktadır (A Arshad vd., 2019). Bu tezde çalışmada verimli bir kompakt tasarım yapıldı.

3.3.3. Nanoakışkanların Plakalı Isı Değiştiricilerde Kullanımı

PID'de nanoakışkan uygulamasının amacı, geleneksel akışkan içerisinde mümkün olan en küçük konsantrasyonda düzgün, kararlı ve homojen nanoparçacık dağılımıyla (tercihen 10 ila 50 nm) temel akışkanın zayıf termofiziksel özelliklerini değiştirerek en yüksek ısı transfer oranını elde etmektir.

Bu teknolojinin sonuçları, endüstriyel bir proseste ısıtma veya soğutmayı iyileştirebilir. Bu enerji tasarrufu sağlayabilir, ısı değerini yükseltebilir ve işlem sürelerini azaltabilir. Isı transferi verimliliğini artırmak için çeşitli yöntemler vardır, ancak nanoakışkanların kullanımı son on yılda araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Çok sayıda araştırmacı nanoakışkanlar kullanarak plakalı ısı değiştiricilerinin ısı transfer performansını (deneysel ve sayısal olarak) araştırmıştır (Pandya vd., 2020).

Bir yandan ısı transfer sistemlerini minimize etmek, diğer yandan ekipmanlarda yüksek ısı akı gerekliliği ile astronomik bir artış sağlamak, ısı transferinin kısa sürede ve yüksek yoğunlukta olmasını gerektirmektedir. Nanoteknoloji, bilim ve teknolojinin tüm alanlarında benzersiz özelliklere ve uygulamalara sahip dünyanın en modern teknolojisidir. Nanoteknoloji, bilim ve teknolojinin tüm alanlarında yeni bir yaklaşımdır. Farklı malzemelerde geliştirme, yöntem ve tekniklere ulaşma arayışı, malzeme ve araçlar gerektirir. Isı değiştiricileri gibi

ekipmanlarda ısı veriminin iyileştirilmesi probleminde, enerji taşıyıcı akışkanın ısı iletkenliğinin ve ısı taşınım katsayısının arttırılması ana amaçtır. Endüstride ısı transferi ve enerji taşıyıcısında yaygın olarak kullanılan akışkanlar su, yağ ve etilen glikol gibi akışkanlardır. Küresel endüstri, rekabet gücünü ve enerjinin üretim maliyetlerindeki rolünü arttırmaktadır. Bu sebeple endüstriler, yüksek termal kapasitelere sahip gelişmiş, yeni akışkanların geliştirilmesine ve kullanılmasına büyük ölçüde sebep olmuştur. Isı değiştiricilerinde nanoakışkanların kullanılması ile çalışma akışkanı akış hızını önemli ölçüde azaltır ve son olarak, ısı değiştiricileri daha küçük boyut ve ağırlıkla tasarlanır (K. Somasekhar vd., 2018). Ayrıca, akış hızının sirkülasyonu azaltılarak, pompaların çalışma sıvısının akması için tükettiği enerji miktarı önemli ölçüde azaltılır. Isı değiştiricilerindeki nanoakışkanlar radyatörlerde, otomotiv endüstrisinde, endüstriyel uygulamalarda ve elektrik üretim jeneratörlerinde vb. kullanılabilir. Örneğin otomobil radyatörlerinde bulunan bu ürün radyatör içindeki suyun (motor soğutma sıvısı) kaynamasını önleyebilir ve verimliliği arttırır, yakıt tüketimini azaltır. Kısaca bu ürünün farklı endüstrilerde kullanılması ısı değiştiricilerin verimini arttırmaktadır (K. Somasekhar vd., 2018).

Nanoakışkanların ısı iletkenliğini arttırmak, akışkanın çeşitli özelliklerine neden olan çok sayıda değişkene bağlıdır. Bunlar, nanopartiküllerin boyutu, şekli, konsantrasyonu, viskozitesi, partikül birikimi, sıcaklık etkisi ve stablitedir.

3.4. Yöntem

3.4.1. Sayısal Analizlerde Kullanılan Genel Metotlar

Bu çalışmada, sayısal analizlerin gerçekleştirilmesi için sonlu hacim yöntemi ve aşağıdaki denklemlere dayalı ANSYS-FLUENT 19 yazılımı kullanılmıştır.

Süreklilik Denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Momentum Korunum Denklemi

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla \cdot ((pV)V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{T}}) + \rho g + F \quad (3.2)$$

ρ (g/cm³) yoğunluk,

$\bar{\bar{T}}$ gerilim tensörü,

g (m/s²) yerçekimi ivmesi,

F (N) kuvvet ifade etmektedir.

Enerji Denklemi

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (V(\rho E + p)) = \nabla [k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (k_{eff} \nabla T)] + S_h \quad (3.3)$$

Bu denklemde

E - enerji birimi,

$k_{eff} \nabla T$ - iletim,

$\sum_j h_j J_j$ - difüzyon

$k_{eff} \nabla T$ - viskoz enerji kaybını temsil etmektedir.

Nusselt sayısı denklem 3.4' te verilmiştir.

$$Nu = \frac{h L_c}{k} \quad (3.4)$$

Burada

k -akışkanın iletim katsayısını,

L_c -karakteristik boyunu,

h -ısı taşınım katsayısını,

Nu -Nusselt sayısını temsil etmektedir.

Analizlerde kullanılacak nanopartiküllerin yoğunluk, ısı iletim katsayısı, özgül ısı kapasitesi ve dinamik viskozite özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan formüller Aşağıda Denklem 3.5-8 arasında verilmiştir. Bu çalışmada, aşağıdaki

denklemler yardımıyla, farklı sıcaklık ve hacimsel konsantrasyonlara bağlı olarak nanoakışkanın yoğunluğu, özgül ısı, viskozitesi ve ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır (Pak ve Cho, 1998).

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1-\phi) \rho_w \quad (3.5)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_p + (1-\phi) \rho_w \quad (3.6)$$

$$\mu_{nf} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \mu_w \quad (3.7)$$

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_w + 2(k_p - k_w)\phi}{k_p + 2k_w - 2(k_p - k_w)\phi} k_w \quad (3.8)$$

ϕ nanoakışkanın hacim oranını,

k_w suyun ısı iletim katsayısını,

k_p nano parçacığın ısı iletim katsayısını temsil etmektedir.

Bu denklemler sonucunda nanoakışkanların hesaplanan fiziksel özellikleri ve suyun fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Analizde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri

Malzemeler	Yoğunluk (ρ) [kg/m ³]	Özgül Isı Kapasitesi (C_p) [J/kg K]	Isıl İletkenlik (λ) [W/m K]
Sıvı özellikleri (su)	998.2	4182	0.6
Plaka malzemesi (AISI 316L)	8030	502.48	381

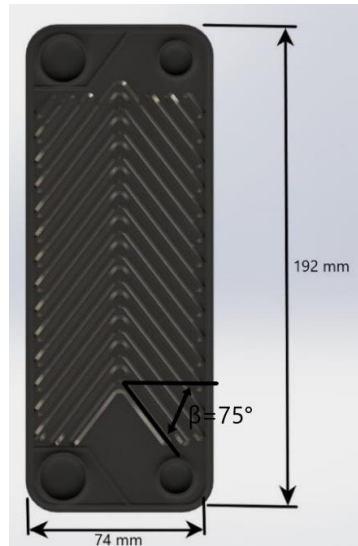
HAD analizlerinde kullanılan çözüm metotları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. HAD analizlerinde kullanılan çözüm metotları

Simülasyon koşulları	Sürekli hal
Çözüm tipi	Basınca dayalı
Viskozite modeli	SST k-w türbülans modeli (Khail ve Erişen, 2021)
Duvar-Türbülans etkileşimi	Standart duvar fonksiyonu
Hız-Basınç etkileşimi	SIMPLE algoritması
Çözüm metodu	İkinci dereceden merkezi farklar yöntemi
Türbülans kinetik enerjisi ve türbülans dağılım oranı	İkinci dereceden merkezi farklar yöntemi

3.4.2. Klasik Plakalı Isı Değiştiricide Akışın Sayısal Olarak İncelenmesi

Klasik plakalı ısı değiştirici (KPID) tasarımı 3 boyutlu olarak SOLIDWORKS yazılımında yapıldı. Tasarımda 194 x 72 mm boyutlarında, plakalar arası mesafe 2,5 mm olan KPID kullanılmıştır. Kullanılacak plakalı ısı değiştirici üç plakadan oluşacaktır. KPID geometrisi Şekil 3.1’de verilmiştir.



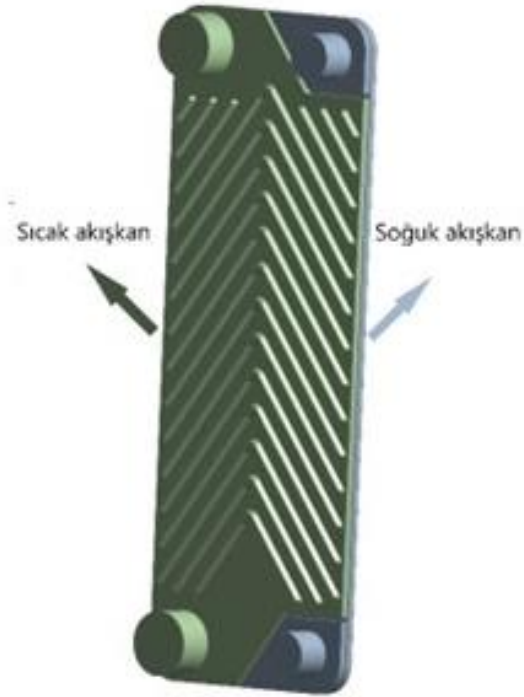
Şekil 3.2. KPID geometrisi

KPID’de akışkanların giriş ve çıkışları Şekil 3.2’de verilmiştir.



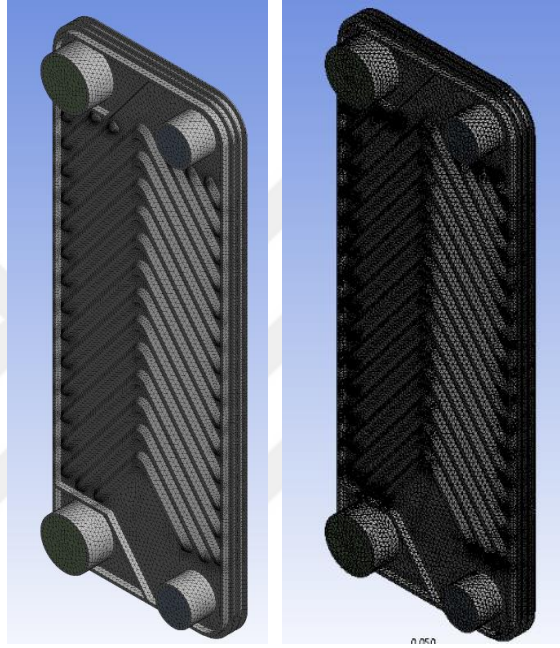
Şekil 3.3. KPID’de akışkan giriş-çıkış yönleri

ANSYS-Design Modeler’da KPID’nin akış hacmi oluşturulmuştur. Şekil 3.3’te KPID’nin akış hacmi verilmiştir.



Şekil 3.4. KPID’nin Akış Hacmi

ANSYS-MESHING yazılımında farklı sayısal ağ yapısı eleman büyüklükleri için KPID ve akış hacminin sayısal ağ yapısı oluşturulmuştur. Sayısal ağ yapısının oluşturulmasında tetrahedral şeklindeki sayısal ağ elemanları kullanılmıştır. Ayrıca, sayısal ağ yapılarının sivrilik oranları incelenerek, sayısal ağ yapısındaki elemanların en büyük sivrilik oranı 0,8-0,98 aralığında olacak şekilde eleman büyüklüğü seçilmiştir. KPID’de 0,00074 m sayısal ağ eleman büyüklüğü için oluşturulmuş sayısal ağ yapısı Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.5. KPID sayısal ağ yapısı

ANSYS-FLUENT yazılımında farklı sayısal ağ eleman büyüklüklerinde oluşturulmuş KPID sayısal ağ eleman yapılarına akışkan malzemelerin özellikleri, analizde kullanılacak fiziksel özellikler, kullanılacak türbülans modeli (standart k-epsilon türbülans modeli), sınır koşullarındaki su ve nanoakışkan kütleli debileri ve sıcaklıkları tanımlanarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirildi. Analizlerde SIMPLE çözüm algoritması ve çözümlerin daha doğru yapılabilmesi için basınç, sıcaklık ve hız değerlerinin belirlenmesinde ikinci °den merkezi farklar çözüm metodu yöntemi kullanıldı. Sıcaklık değerinin yakınsaması için 10^{-6} hata oranı ve diğer değerlerin yakınsaması için 10^{-3} hata oranı kullanıldı.

Yapılan sayısal analizler sonucunda plakalı ısı değıştiricideki ısı transferi ve basınç düşüşü değerleri farklı sayısal ağ eleman büyüklükleri için sıcak ve soğuk akışkan tarafında karşılaştırıldı ve optimum sayısal ağ eleman büyüklüğüne karar verildi.

Optimum sayısal ağ eleman büyüklüğüne karar verildikten sonra, optimum sayısal ağ eleman yapısındaki sayısal ağ yapısı kullanılarak, Ansys-Fluent yazılımı yardımıyla Standart k-omega türbülans metodu (Lazarevikj vd., 2019) kullanılarak 0,05 kg/s debisinde sıcak tarafta 70°C su ve soğuk tarafta ise 15°C farklı hacimsel oranlarda (%1, %3 ve %5) grafen nanopartikül katkılı nanoakışkan kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirildi. Ayrıca plakalı ısı değıştirici içerisindeki ortalama Reynolds sayısı hesaplanarak akışın laminar, geçiş veya türbülanslı olup olmadığı belirlendi ve üç durum içinde farklı akış debileri belirlenerek analizler KPİD için yapıldı.

3.4.3. Özgün Kompakt Plakalı Isı Değıştiricilerde Akışın Sayısal Olarak İncelenmesi

Literatür çalışmaları ve biyo-benzetim metodu yardımıyla iki adet özgün kompakt plakalı ısı değıştirici tasarlanmıştır (Şekil 3.5-3.6). Karar verilmiş optimum sayısal ağ eleman sayısı kullanılarak sayısal ağ yapıları oluşturuldu ve analizler özgün kompakt plakalı ısı değıştirici geometrileri içinde laminar, türbülans ve geçiş akış debilerinde sıcak tarafta 70°C su ve soğuk tarafta ise 15°C su ve farklı hacimsel oranlarda (%1, %3 ve %5) grafen nanopartikül katkılı nanoakışkan kullanılarak gerçekleştirildi.

Analizler sonucunda klasik ve iki farklı özgün kompakt plakalı ısı değıştirici tasarımı için üç farklı akış debisinde, sıcak tarafta 70°C su ve soğuk tarafta ise 15°C su ve üç farklı hacimsel oranda (%1, %3 ve %5) grafen nanopartikül katkılı nanoakışkan için ısı transferi ve basınç düşüşü değerleri elde edilerek yorumlanmıştır ve geometri, farklı hacimsel oranlardaki grafen nanopartikül katkısı ve akış rejimi için optimum koşullar belirtilmiştir.



Şekil 3.6. Sinüsoidal akış dağılımına sahip ÖKPİD



Şekil 3.7. Silindirik kanatçık yapısına sahip ÖKPİD

KPID'nin dış ölçülerinden referans alınarak tasarlanan ÖKPİD'lerin geometrik detayları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. ÖKPİD'lerin geometrik özellikleri

	Sinüsoidal akış dağılımına sahip ÖKPİD	Silindirik kanatçık yapısına sahip ÖKPİD
Plakalı Isı Değiştiricinin Uzunluğu (mm)	192	192
Plakalı Isı Değiştiricinin Genişliği (mm)	74	74
Plaka sayısı	3	3
Plakalar arası mesafe (mm)	2,3	2,3
Tek plaka yüksekliği	1	1
Eşanjör yüksekliği (mm)	8,1	8,1
a (mm)	15,25	—
b (mm)	13	—
c (mm)	13,8	—
d (mm)	—	2
e (mm)	—	3
f (mm)	—	2,3

Çizelge 3.3'te tasarlanan özgün kompakt plakalı ısı değiştiricilerin geometrik özellikleri ve ortam koşulları verilirken Çizelge 3.4'te tüm sayısal analizlerde kullanılan sınır koşulları verilmiştir.

Çizelge 3.4. Klasik plakalı ısı değiştiricinin geometrik özellikleri

Parametreler	Değerler
Plakalı Isı Değiştiricinin Uzunluğu (mm)	192
Plakalı Isı Değiştiricinin Genişliği (mm)	74
Plaka sayısı	3
Plaka malzemesi	AISI 316L
Çevre sıcaklığı (°C)	25

3.4.4 Sayısal ağ yapısı (Mesh) özelliklerinin seçimi bölümünde Şekil 3.5 - 6'da sinüsoidal akış dağılımına ve silindirik kanatçık yapısına sahip plaka geometrileri ve en optimum mesh eleman büyüklüğündeki yani $y^+=10$ değerindeki sayısal ağ mesh görüntüleri verilmiştir.

Çizelge 3.4'te verilen 36 örnekleme sahip sınır koşulları kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler İ7 işlemciye, 64 GB ram ve 8 GB ekran kartına sahip iş istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir analizin kurulması ve çözülmesi 12 gün sürmüştür. 36 tane analiz ile kompakt ve klasik plakalı ısı değiştiricilerde grafen esaslı nanoakışkanların akış ve ısı transferi hesaplamalı akışkanlar dinamiğiyle incelenmiştir.

Çizelge 3.5. Sayısal Analizlerde Kullanılan Sınır Koşulları ve Akışkan Özellikleri

Ana liz No	Geomet ri	Hacimsel Oran (ϕ Gnp)	Sıcak Su Giriş Sıcaklığı (°C)	Soğuk Su Giriş Sıcaklığı ₁ (°C)	Akışkan Debileri (kg/s)	Reynold Sayısı (Re)	Isı İletim Katsayısı(W/ m ² K)	Özgül Isı Kapasitesi Hesabı (Cp)	Yoğun luk(ρ)	Dinamik Viskozite(μ)
1	KPID	0	70	15	0.05	2888	0.607	4183	995	0.000855
2	KPID	0	70	15	0.015	900				
3	KPID	0	70	15	0.005	300				
4	KPID	0.01	70	15	0.05	2888	0.625382	4141.17643	1007.0 5	0.0008769
5	KPID	0.01	70	15	0.015	900				
6	KPID	0.01	70	15	0.005	300				
7	KPID	0.03	70	15	0.05	2888	0.663284	4057.52929	1031.1 5	0.0009239
8	KPID	0.03	70	15	0.015	900				
9	KPID	0.03	70	15	0.005	300				
10	KPID	0.05	70	15	0.05	2888	0.702780	3973.88215	1055.2 5	0.0009752
11	KPID	0.05	70	15	0.015	900				
12	KPID	0.05	70	15	0.005	300				
13	SİNUS	0	70	15	0.05	2888	0.607	4183	995	0.000855
14	SİNUS	0	70	15	0.015	900				
15	SİNUS	0	70	15	0.005	300				
16	SİNUS	0.01	70	15	0.05	2888	0.625382	4141.17643	1007.0 5	0.0008769
17	SİNUS	0.01	70	15	0.015	900				
18	SİNUS	0.01	70	15	0.005	300				
19	SİNUS	0.03	70	15	0.05	2888	0.663284	4057.52929	1031.1 5	0.0009239
20	SİNUS	0.03	70	15	0.015	900				
21	SİNUS	0.03	70	15	0.005	300				

Ana liz No	Geometri	Hacimsel Oran ($\frac{V}{Gnp}$)	Sıcak Su Giriş Sıcaklığı(° C)	Soğuk Su Giriş Sıcaklığı ı(°C)	Akışkan Debileri (kg/s)	Reynold Sayısı (Re)	Isı İletim Katsayısı(W/ m²K)	Özgül Isı Kapasitesi Hesabı (Cp)	Yoğun luk (ρ)	Dinamik Viskozite(μ)
22	SİNUS	0.05	70	15	0.05	2888	0.702780	3973.88215	1055.2 5	0.0009752
23	SİNUS	0.05	70	15	0.015	900				
24	SİNUS	0.05	70	15	0.005	300				
25	SİLİNDİR	0	70	15	0.05	2888	0.607	4183	995	0.000855
26	SİLİNDİR	0	70	15	0.015	900				
27	SİLİNDİR	0	70	15	0.005	300				
28	SİLİNDİR	0.01	70	15	0.05	2888	0.625382	4141.17643	1007.0 5	0.0008769
29	SİLİNDİR	0.01	70	15	0.015	900				
30	SİLİNDİR	0.01	70	15	0.005	300				
31	SİLİNDİR	0.03	70	15	0.05	2888	0.663284	4057.52929	1031.1 5	0.0009239
32	SİLİNDİR	0.03	70	15	0.015	900				
33	SİLİNDİR	0.03	70	15	0.005	300				
34	SİLİNDİR	0.05	70	15	0.05	2888	0.702780	3973.88215	1055.2 5	0.0009752
35	SİLİNDİR	0.05	70	15	0.015	900				
36	SİLİNDİR	0.05	70	15	0.005	300				

3.4.4. Sayısal Ağ Yapısı (Mesh) Özelliklerinin Seçimi

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri için mesh özelliklerinin seçilmesi gerekmektedir. Belirli bir y^+ elde etmek için duvar mesafesinin tahmin edilmesi genellikle yararlıdır. Aşağıdaki formüller ile bu duvar mesafesini hesaplayabiliriz (Cadence Design Systems Limited, 2022).

Duvar mesafesini y^+ 'dan hesaplamak için kullanılan formüller 3.9–13 verilmiştir.

Belirli bir serbest akış hızı U_∞ için Reynolds sayısı:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_\infty \cdot L_{\text{sınır tabakası}}}{\mu} \quad (3.9)$$

Yüzey sürtünme katsayısı C_f elde etmek için Schlichting formülü kullanılır ve $Re < 10^9$ için geçerlidir:

$$C_f = [2. \log_{10}(Re) - 0.65]^{-2.3} \quad Re < 10^9 \quad (3.10)$$

τ_ω Duvar yırtılma gerilimi, C_f yüzey sürtünme katsayısına göre hesaplanır:

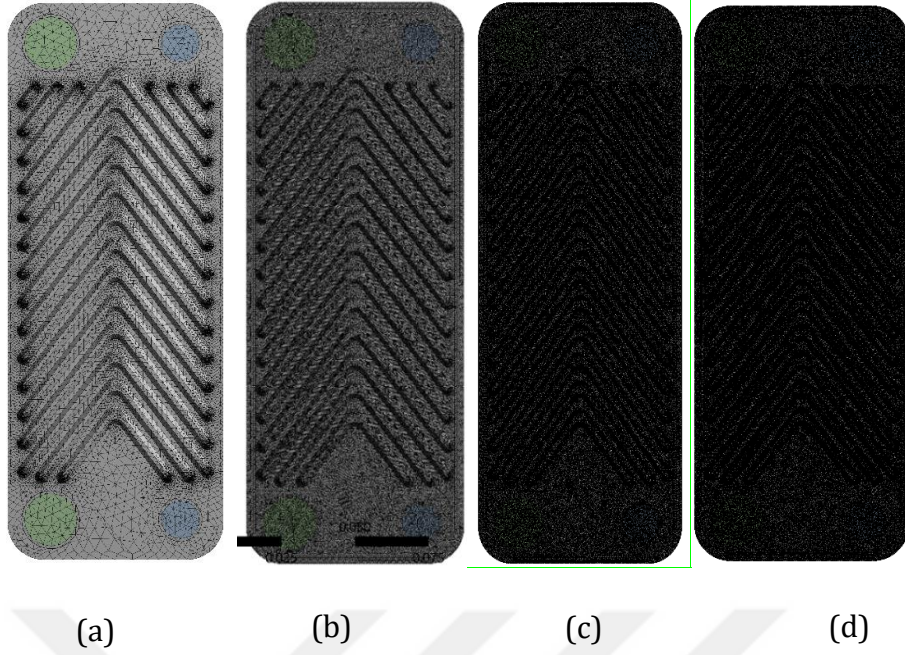
$$\tau_\omega = C_f \cdot \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \quad (3.11)$$

Sürtünme hızı u^* , sıvı yoğunluğunun ve duvar yırtılma geriliminin bir fonksiyonudur:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (3.12)$$

ve sonuç olarak, istenen y^+ için duvar mesafesi:

$$y = \frac{\gamma^+ \mu}{\rho u^*} \quad (3.13)$$

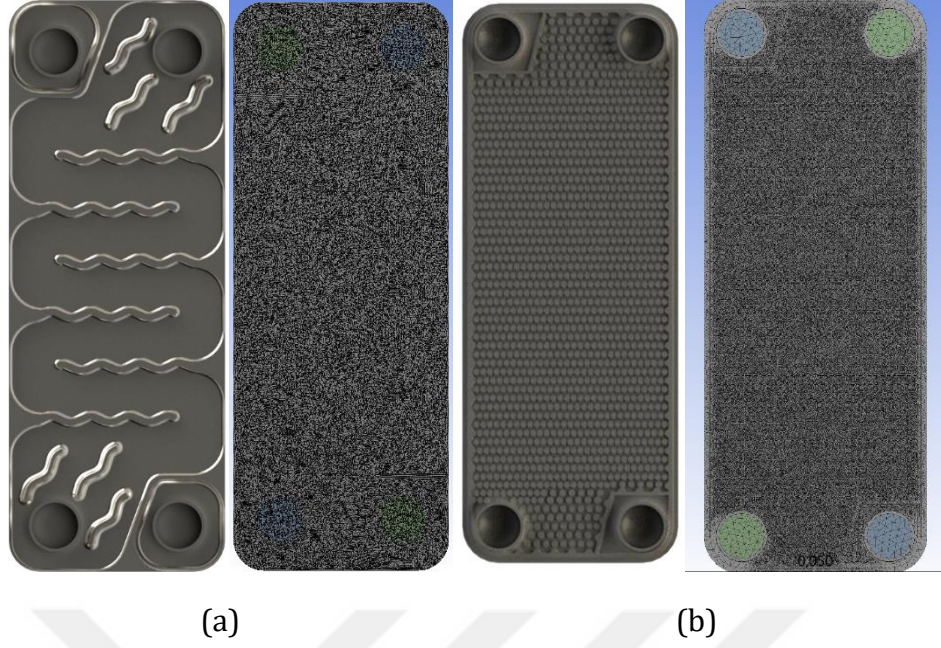


Şekil 3.8. KPİD’de y^+ sayılarına göre sayısal ağ yapıları mesh görüntüleri sırasıyla a) $y^+=30$, b) $y^+=15$, c) $y^+=10$, d) $y^+=8$

Şekil 3.8’de KPİD’de y^+ sayılarına göre sayısal ağ yapıları mesh görüntüleri verilmiştir. Çizelge 3.5’te ki sonuçlarda görüldüğü gibi $y^+=10$ ve $y^+=8$ iken elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, soğuk ve sıcak taraf ısı transferleri arasında çok az bir fark bulunmaktadır. Bu yüzden $y^+=10$ ’a karşılık gelen mesh eleman büyüklüğü bundan sonraki tüm analizler için kullanılmıştır.

Çizelge 3.6. Sayısal ağ yapısı seçimi

Klasik Plakalı Isı Değiştirici Ters Akış 75°				
y^+ değerleri	30	15	10	8
Sıcak su çıkış sıcaklığı (°C)	62	61.71	60.5	60.4
Soğuk su çıkış sıcaklığı (°C)	22.92	22.95	23.93	23.98
Sıcak giriş basıncı (Pa)	4533	3933	3803	3805
Soğuk giriş basıncı (Pa)	6538	5948	5945	5947
Soğuk taraf ısı transferi (W)	1610	1716	1970	1972
Sıcak taraf ısı transferi (W)	1611	1716	1954	1960
Mesh eleman sayısı	3265444	13743314	41246231	12343314



Şekil 3.9. Plaka geometrilerinin $y^+=10$ değerinde sayısal ağ mesh görüntüleri

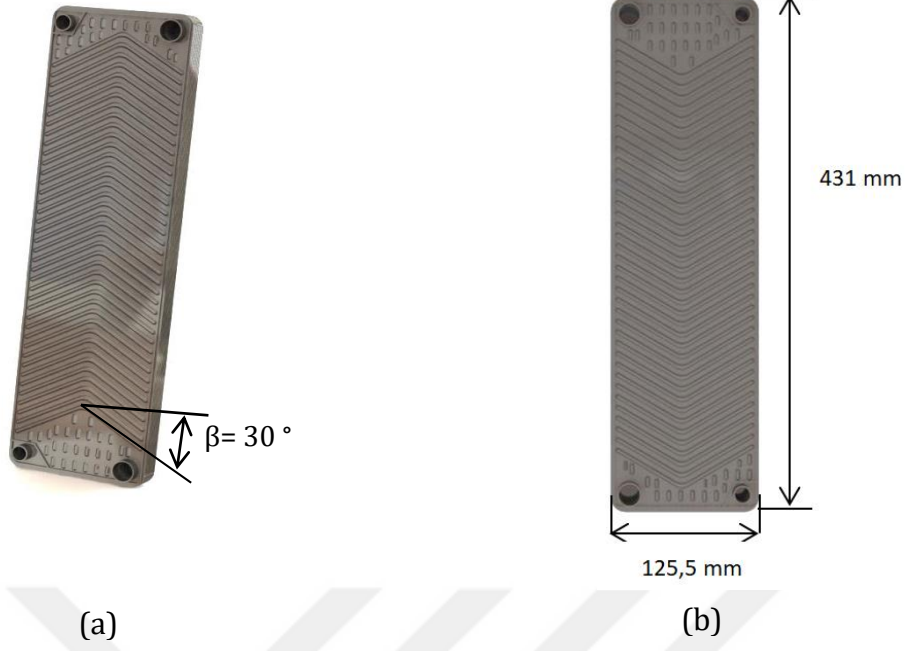
Şekil 3.9 (a)'da özgün kompakt sinüs çıkıntı plaka geometrisi ve $y^+=10$ değerinde sayısal ağ görüntüsü, Şekil 3.9 (b)'de ise özgün kompakt silindir çıkıntı plaka geometrisi ve $y^+=10$ değerinde sayısal ağ görüntüsü verilmiştir.

3.4.5. Deneysel Doğrulama

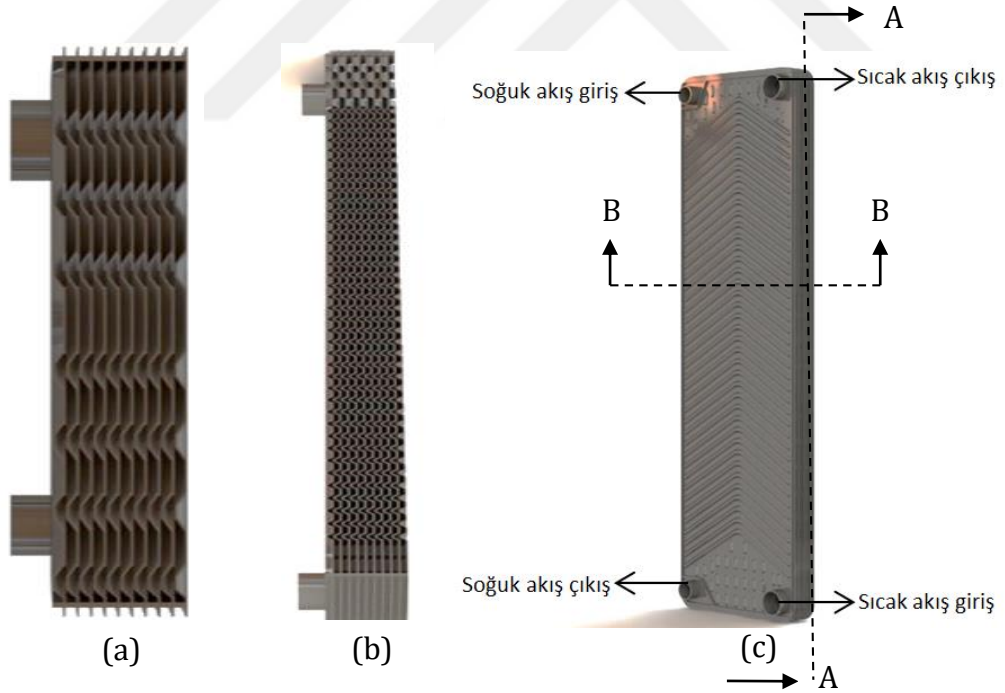
Deneysel doğrulama için kullanılmış plaka ısı değiştirici geometrisi ve sınır koşulları referans çalışmadan (Kılıç, 2013) alınmıştır. Çizelge 3.6'da geometrik özellikleri verilmiş plakalı ısı değiştirici 3 boyutlu olarak çizilerek Şekil 3.11'deki gibi montaj edilmiştir.

Çizelge 3.7. Deneysel Doğrulama Analizlerinde Kullanılan Plakalı Isı Değiştirici Geometrik Özellikleri

Parametreler	Değerler
Plaka Uzunluğu	431 mm
Plaka Genişliği	125.5 mm
Toplam plaka sayısı	10
Isı transferi alanı	0.032 m ²
Plaka malzemesi	2 mm SS AISI 316
Conta Malzemesi	EPDM
Tasarım Sıcaklığı	145 °C
Tasarım Basıncı	10 bar



Şekil 3.10. a.b. Sayısal analizlerde referans alınan plakalı ısı değıştiricinin geometrik detayları

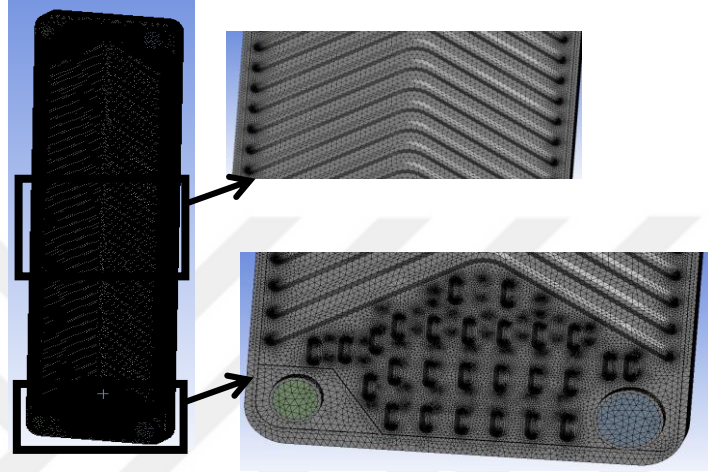


Şekil 3.11. a.b.c. Sayısal analizlerde referans alınan plakalı ısı değıştiricinin geometrik detayları

Şekil 3.10'da referans alınan plakalı ısı değıştiricinin geometrik detayları ve çalışma prensibi Şekil 3.11'de açıklanmıştır. Doğrulama analizlerindeki sıcak ve

soğuk akışkan debileri 0,167 kg/s, sıcak akışkan giriş sıcaklığı 32,8 °C, soğuk akışkan giriş sıcaklığı 25 °C ve plaka yüzey açısı Şekil 3.10’da gösterildiği gibi 30°’dir.

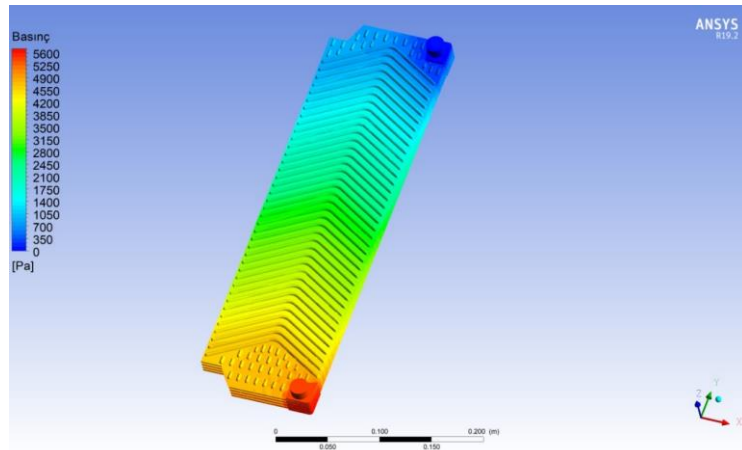
Üç boyutlu olarak tasarlanan plakalı ısı değiştiricinin ANSYS Design Modeler’da akış hacmi oluşturulmuş ve sınır koşulları belirlenmiştir.



Şekil 3.12. Sayısal Ağ Eleman Yapısı

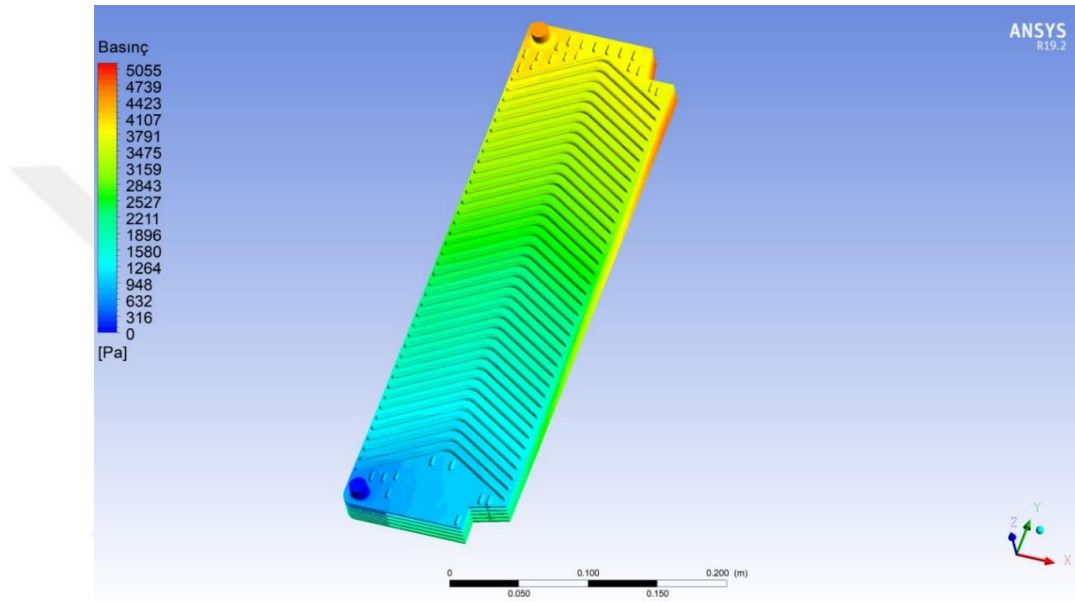
3.12’de gösterildiği ANSYS-MESHING yazılımında 24.281.619 tetrahedral sayısal ağ elmanı kullanılarak sayısal ağ yapısı oluşturulmuştur.

Şekil 3.12-3.17’de referans alınan ısı değiştiricinin sayısal analizleri sonucunda ulaşılan basınç, sıcaklık konturları ve hız vektörleri verilmiştir.



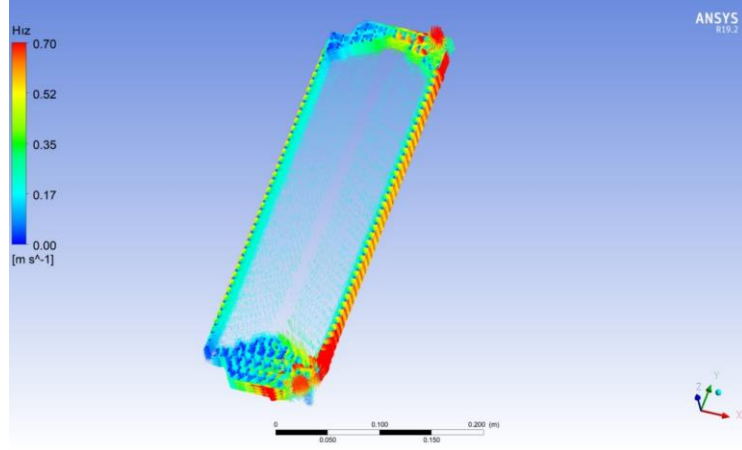
Şekil 3.13. Sıcak akış basınç dağılımı

Şekil 3.13'te görüldüğü gibi basınç girişte 5800 Pa'da girmekte ve kapsül şeklindeki giriş kanallarında, ok şeklindeki ısı değiştirici kanallara kadar basınç 4500 Pa'a kadar düşmüştür ve ok şeklindeki ısı değiştirici kanallarında basınç kademe kademe doğrusal bir şekilde azalarak kapsül şeklindeki akış çıkış kanallarına kadar 1050 Pa'a kadar azalmıştır. Bundan sonra kapsül şeklindeki kanallar ve çıkış borusunda basınç 1050 Pa daha düşerek ısı değiştiricideki toplam basınç düşüşü yaklaşık 5800 Pa olmuştur.



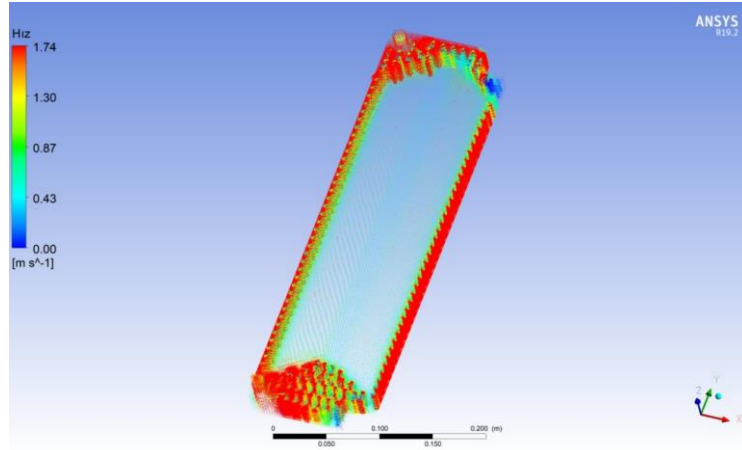
Şekil 3.14. Soğuk akış basınç dağılımı

Şekil 3.14'te görüldüğü gibi soğuk akış basıncı girişte 5250 Pa'da girmekte ve kapsül şeklindeki giriş kanallarında, ok şeklindeki ısı değiştirici kanallara kadar basınç 3800 Pa'a kadar düşmüştür ve ok şeklindeki ısı değiştirici kanallarında basınç kademe kademe doğrusal bir şekilde azalarak kapsül şeklindeki akış çıkış kanallarına kadar 950 Pa'a kadar azalmıştır. Bundan sonra kapsül şeklindeki kanallar ve çıkış borusunda basınç 950 Pa daha düşerek ısı değiştiricideki toplam basınç düşüşü yaklaşık 5250 Pa olmuştur.



Şekil 3.15. Sıcak akış hız vektörleri

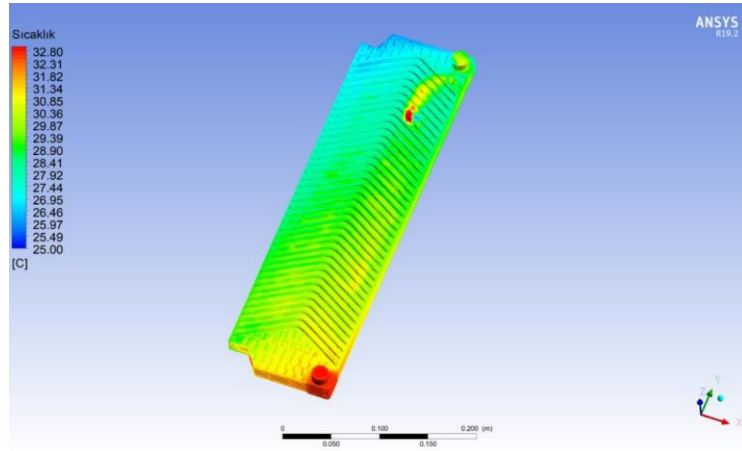
Şekil 3.15'te görüldüğü gibi sıcak akış hızı girişte 1 m/s'de girmekte ve kapsül şeklindeki giriş kanallarında, ok şeklindeki ısı değiştirici kanallara kadar hız 0.35 m/s'ye kadar düşmüştür ve ok şeklindeki ısı değiştirici kanallarında hız kenar kısımlarda 0.5 m/s olup ok şeklindeki ısı değiştirici kanal yüzeyleri arasında hız 0.15 m/s ile kapsül şeklindeki akış çıkış kanallarına kadar sabit hızla akmaktadır. Bundan sonra kapsül şeklindeki kanallar ve çıkış borusunda hızın 0.15 m/s ile çıktığı görülmüştür.



Şekil 3.16. Soğuk akış hız vektörleri

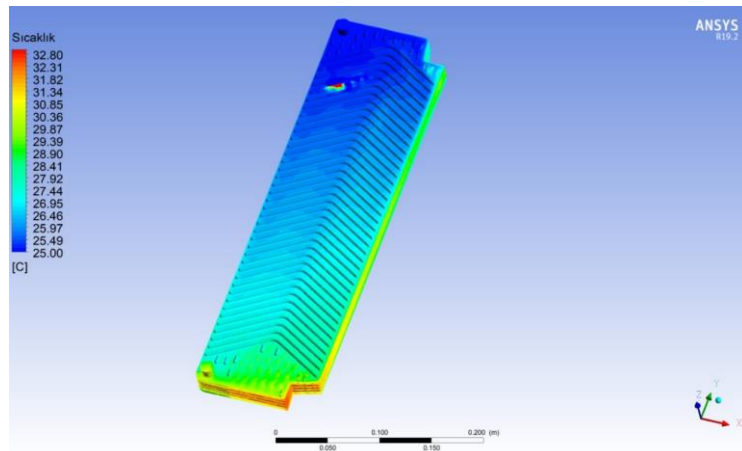
Şekil 3.16'da görüldüğü gibi soğuk akış hızı girişte 2 m/s'de girmekte ve kapsül şeklindeki giriş kanallarında, ok şeklindeki ısı değiştirici kanallara kadar hız 1.3 m/s'ye kadar düşmüştür ve ok şeklindeki ısı değiştirici kanallarında hız kenar kısımlarda 1.7 m/s olup ok şeklindeki ısı değiştirici kanal yüzeyleri arasında hız 0.4 m/s ile kapsül şeklindeki akış çıkış kanallarına kadar sabit hızla akmaktadır.

Bundan sonra kapsül şeklindeki kanallar ve çıkış borusunda akışkan 1.3 m/s hız ile çıktığı görülmüştür.



Şekil 3.17. Sıcak akış sıcaklık dağılımı

Şekil 3.17’de görüldüğü gibi sıcak akış sıcaklığı girişte 32,8 °C’de girmekte ve kapsül şeklindeki giriş kanallarında, ok şeklindeki ısı değiştirici kanallara kadar sıcaklık 31,5 °C’ye kadar düşmüştür ve ok şeklindeki ısı değiştirici kanallarında sıcak akışkanın giriş ve çıkışının bulunduğu tarafta sıcaklık kapsül şeklindeki kanallara kadar 30,5 °C’ kadar düşerken diğer tarafta kapsül şeklindeki kanallara kadar sıcaklık 29 °C’e kadar düşmüştür. Bundan sonra akışkan kapsül şeklindeki kanallar ve çıkış borusundan geçerek 29,676 °C ile ısı değiştiriciden çıkmaktadır. Isı değiştiricideki toplam sıcaklık düşüşü yaklaşık 3,124 °C olmuştur.



Şekil 3.18. Soğuk akış Sıcaklık Dağılımı

Şekil 3.18’de görüldüğü gibi soğuk akış sıcaklığı girişte 25 °C’de girmekte ve kapsül şeklindeki giriş kanallarında, ok şeklindeki ısı değiştirici kanallara kadar sıcaklık 25,5 °C’ye kadar artmıştır ve ok şeklindeki ısı değiştirici kanallarında soğuk akışkanın giriş ve çıkışının bulunduğu tarafta sıcaklık kapsül şeklindeki kanallara kadar 28 °C’ kadar artarken diğer tarafta kapsül şeklindeki kanallara kadar sıcaklık 30,5 °C’e kadar artmıştır. Bundan sonra akışkan kapsül şeklindeki kanallar ve çıkış borusundan geçerek, 29,680 °C ile ısı değiştiriciden çıkmaktadır. Isı değiştiricideki toplam sıcaklık artışı yaklaşık 4,680 °C olmuştur.

Çizelge 3.8. Sayısal ve Deneysel Sonuçlar

Isı Transferi (W)	
Sayısal Analiz Sonucu	Deneysel Analiz Sonucu
2143	2167
Sayısal analizlerin deneysel sonuçlardan sapma oranı	
% 1.107	

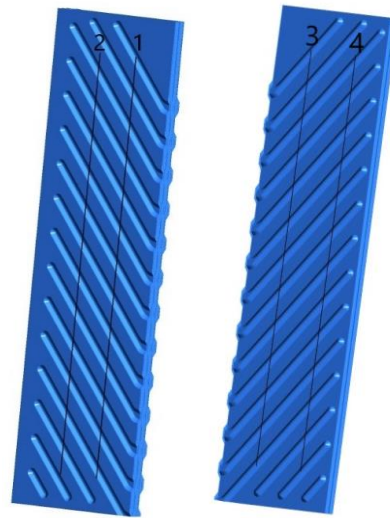
Sayısal analizlerde referans alınan plakalı ısı değiştiricinin sayısal ve deneysel gerçek ısı transferi sonucu Çizelge 3.7’de verilmiştir. Deneysel sonuçlara göre referans alınan plakalı ısı değiştiricideki gerçek ısı transferi miktarı 2167 W iken sayısal analizler sonucunda 2143 W çıkmıştır. Sayısal analizlerin deneysel sonuçlardan sapma oranı %1.107’dir. Bu sonuçla, sayısal analizlerin deneysel sonuçlarla gayet uyum içinde olduğu görülmektedir. Aynı sayısal analiz metotları kullanılarak tasarlanacak özgün geometrideki plakalı ısı değiştirici sayısal analizleri gerçekleştirilebilecektir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez kapsamında yapılan 36 analizde klasik ve geliştirilen kompakt plakalı ısı değiştiricilerde su ve nanoakışkanların akışı ve ısı transferi incelenmiştir. Bu incelemelerde akışkanların hızı, ısı transferi, basınç düşüşü, sıcaklık, Nusselt sayısı ve ısı taşınım katsayısı değişimi sonuçları değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler iki boyutlu ve üç boyutlu olarak yorumlanmıştır.

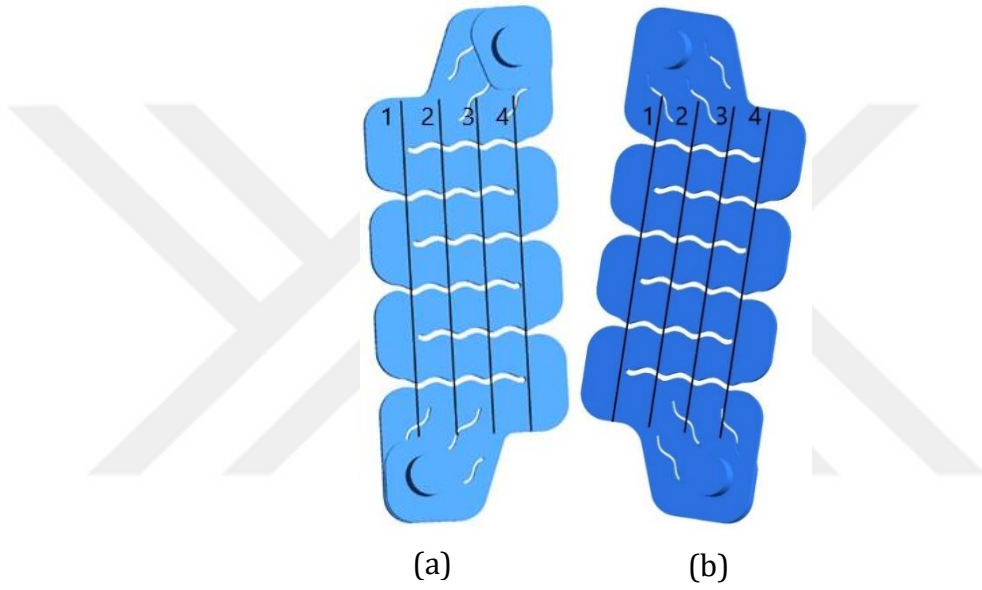
4.1. 75° Kanat Açısına Sahip Klasik, Sinusoidal Akış Dağılımına ve Silindirik Kanatçık Yapısına Sahip Özgün Kompakt Isı Değiştiricilerinin Karşılaştırmalı Sonuçları

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi KPİD şeklinde 75° kanat yapısına sahip olan klasik plakalı ısı değiştiricide sıcak ve soğuk akışkanlar üzerinden dört farklı çizgi boyunca sonuçlar alınmıştır. Birinci çizginin konumu sıcak ve soğuk akışkanların sağ kenarından 0,011 m uzaklıkta plaka kenarına paralel belirlenmiş ve diğer çizgilerin konumları ise birinci çizgiye 0,011 m eşit uzaklıkta paralel olarak belirlenmiştir. 75° kanat yapısına sahip olan klasik plakalı ısı değiştiricide dört farklı çizgi boyunca sıcak ve soğuk akışkanlar için sıcaklık, Nusselt sayısı ve ısı taşınım katsayısı dağılımı sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Sıcak akışkan ve soğuk akışkan üzerinden sonuç alınmak için çizilmiş dört farklı çizgi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi sinusoidal şeklinde akış dağılımı olan kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve soğuk akışkanlar üzerinden dört farklı çizgi boyunca sonuçlar alınmıştır. Birinci çizginin konumu sıcak ve soğuk akışkanların sol kenarından 0.01376 m uzaklıkta plaka kenarına paralel belirlenmiş ve diğer çizgilerin konumları ise birinci çizgiye 0.014 m eşit uzaklıkta paralel olarak belirlenmiştir. Böylece sinusoidal şeklinde akış dağılımı olan kompakt plakalı ısı değiştiricide dört farklı çizgi boyunca sıcak ve soğuk akışkanlar için sıcaklık, Nusselt sayısı ve ısı taşınım katsayısı dağılımı sonuçları elde edilmiştir.

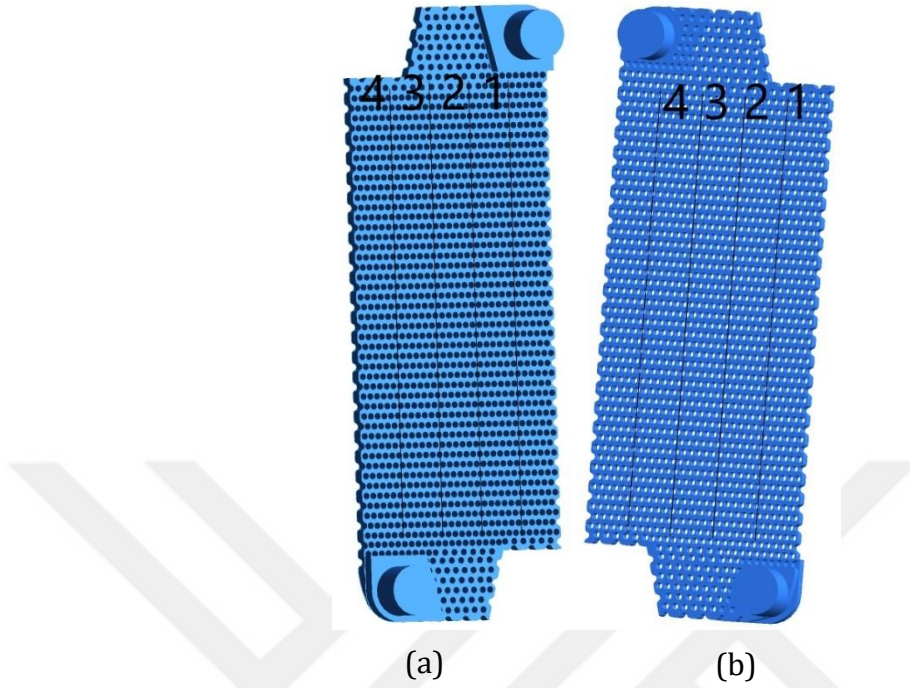


Şekil 4.2. a) Sıcak akışkan ve b) soğuk akışkan üzerinden sonuç alınmak için çizilmiş dört farklı çizgi

Sinusoidal özgün kompakt ısı değiştiricisinde Şekil 4.2’de görüldüğü gibi plaka kıvrımları arasında oluşan boşluklar sebebiyle basınç ve hız değişimi sonuçları iki boyutlu olarak alınamamıştır.

Şekil 4.3’te görüldüğü gibi Silindirik kanat formuna sahip kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve soğuk akışkanlar üzerinden dört farklı çizgi boyunca sonuçlar alınmıştır. Birinci çizginin konumu sıcak ve soğuk akışkanların sol kenarından 0.01345 m uzaklıkta plaka kenarına paralel belirlenmiş ve diğer çizgilerin konumları ise birinci çizgiye 0.01349 m eşit uzaklıkta paralel olarak belirlenmiştir. Böylece silindirik şeklinde akış dağılımı olan kompakt plakalı ısı

değiştiricide dört farklı çizgi boyunca sıcak ve soğuk akışkanlar için sıcaklık, Nusselt sayısı ve ısı taşınım katsayısı dağılımı sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 4.3. a) Sıcak akışkan ve b) soğuk akışkan üzerinden sonuç alınmak için çizilmiş dört farklı çizgi

Silindirik kanat formuna sahip özgün kompakt ısı değiştiricisinde Şekil 4.3'te görüldüğü gibi akışkanlarda oluşan silindirik boşluklar sebebiyle basınç ve hız değişimi sonuçları iki boyutlu olarak alınamamıştır.

4.2. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

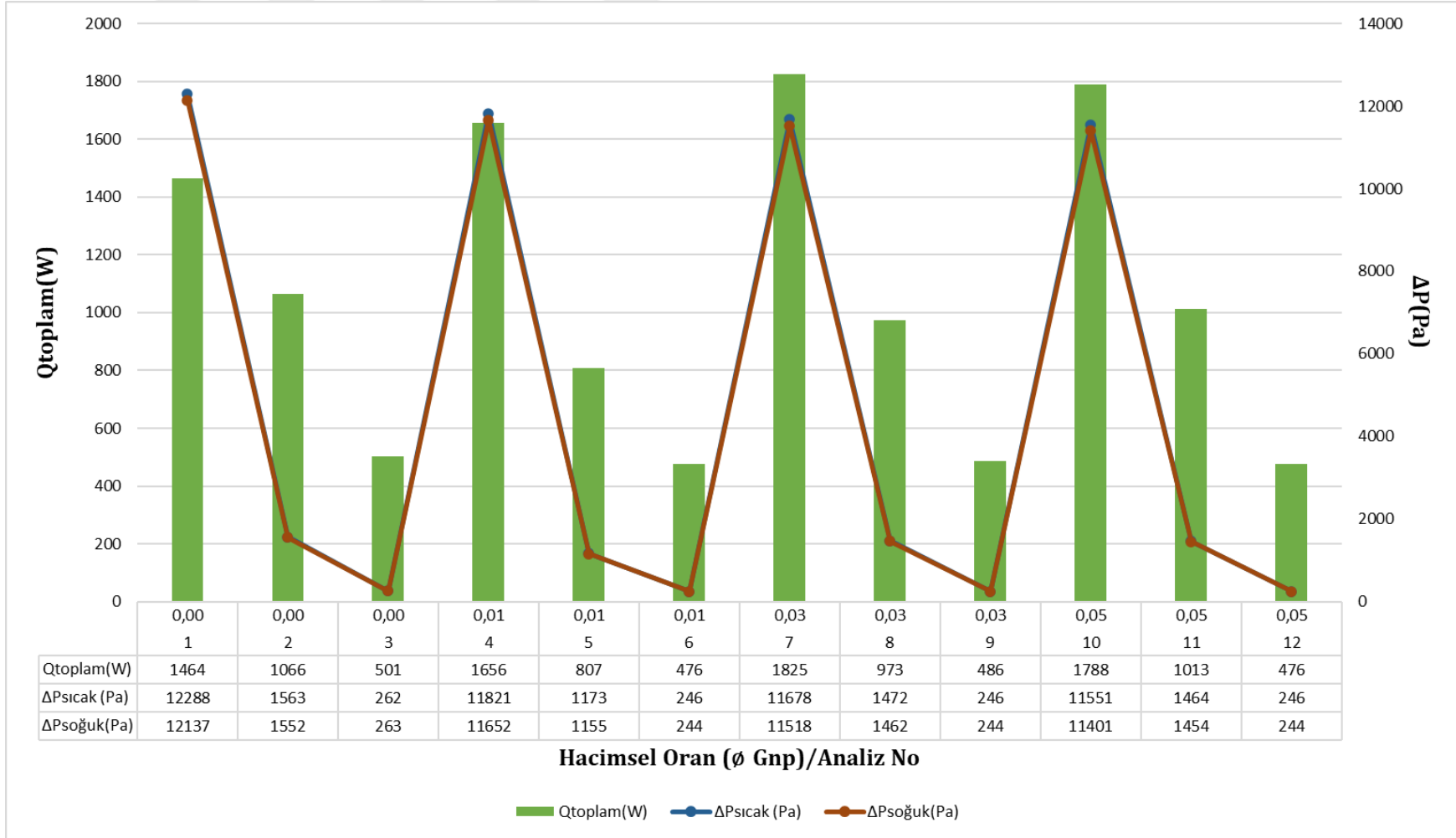
Şekil 4.4'te KPİD'de üç farklı Re sayısı ve üç farklı nanoakışkan hacimsel oranı için analiz sonuçları görülmektedir. KPİD'de 12 analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları ısı transferi ve basınç düşüşü açısından değerlendirildiğinde; yüksek ısı transferine göre en uygun basınç düşüşü analiz 11'de olmaktadır. Analiz 11'in sonuçları değerlendirilmiş 4.3 kısmında detaylandırılmıştır.

Şekil 4.5'te sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide üç farklı Re sayısı ve üç farklı nanoakışkan hacimsel oranı için analiz sonuçları görülmektedir. Sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide 12 analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları ısı transferi ve basınç

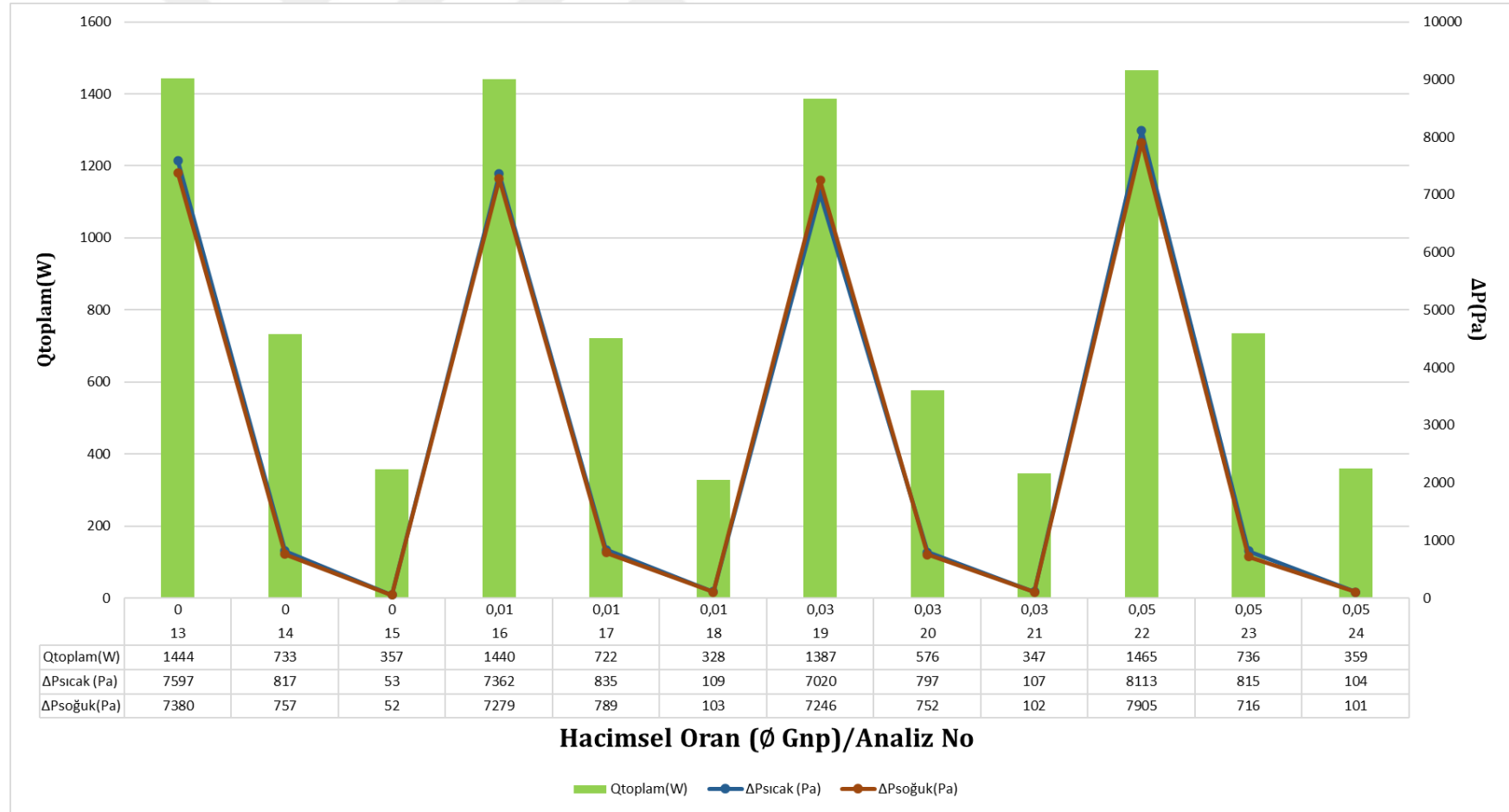
düşüşü açısından değerlendirildiğinde; yüksek ısı transferine göre en uygun basınç düşüşü analiz 22'de olmaktadır. Analiz 22'nin sonuçları değerlendirilmiş 4.4 kısmında detaylandırılmıştır.

Şekil 4.6'da silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide üç farklı Re sayısı ve üç farklı nanoakışkan hacimsel oranı için analiz sonuçları görülmektedir. Silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide 12 analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları ısı transferi ve basınç düşüşü açısından değerlendirildiğinde; yüksek ısı transferine göre en uygun basınç düşüşü analiz 32'de olmaktadır. Analiz 32'nin sonuçları değerlendirilmiş 4.5 kısmında detaylandırılmıştır.





Şekil 4.4. KPİD Analiz Sonuçları



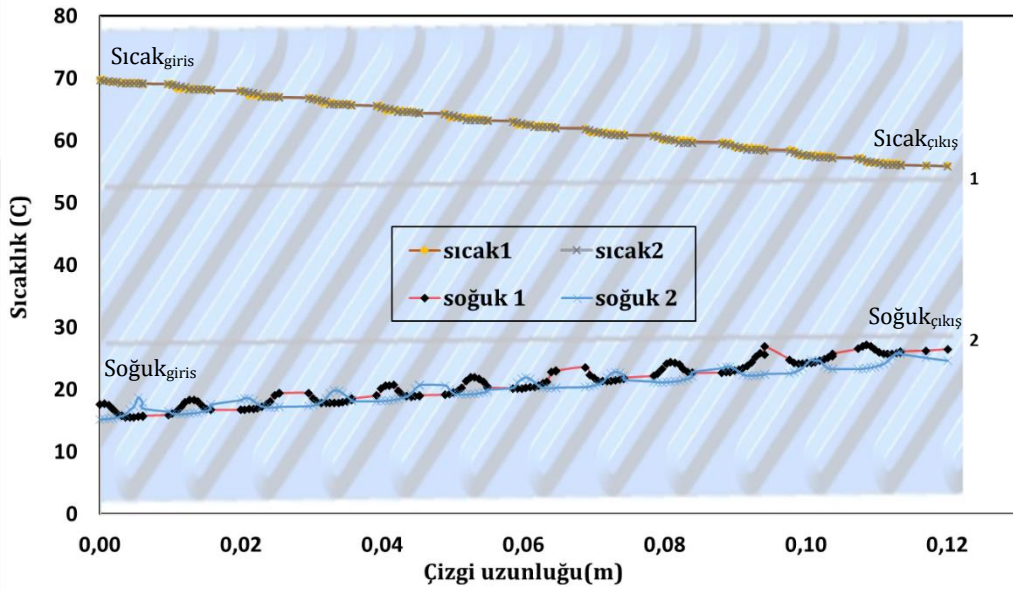
Şekil 4.5. Sinusoidal Akış Dağılımına Sahip ÖKPID Analiz Sonuçları



Şekil 4.6. Silindirik Kanatçık Yapısına Sahip ÖKPİD Analiz Sonuçları

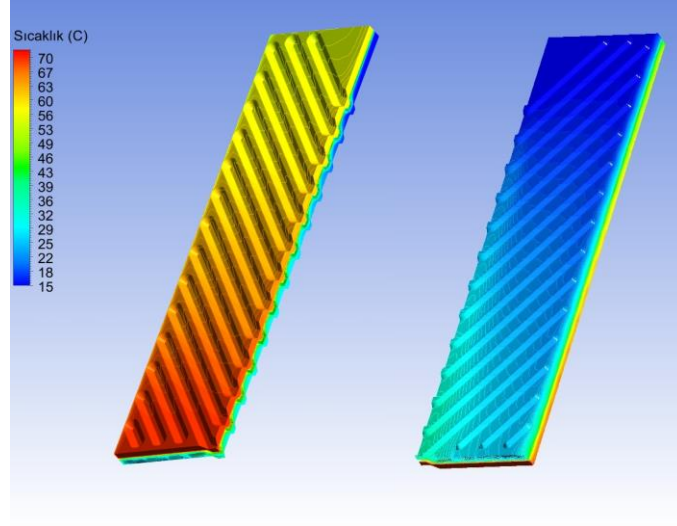
4.3. 75° Kanat Açısına Sahip KPID’de $Re=900(m=0,015\text{kg/s})$ ve 0,03 Hacimsel Oranda Grafen Nanoakışkanı Katkılı Elde Edilen Sonuçlar

75° kanat açısına sahip klasik plakalı ısı değıştiricide $Re=900(m=0,015\text{ kg/s})$ iken ve 0,03 hacimsel oranda grafen nanoakışkanı katkıli akış ve ısı transferi incelendiğinde; sıcaklık, Nusselt ve ısı taşınım katsayısı dağılımı sıcak ve soğuk akışkanlar için aşağıda verilmiştir.



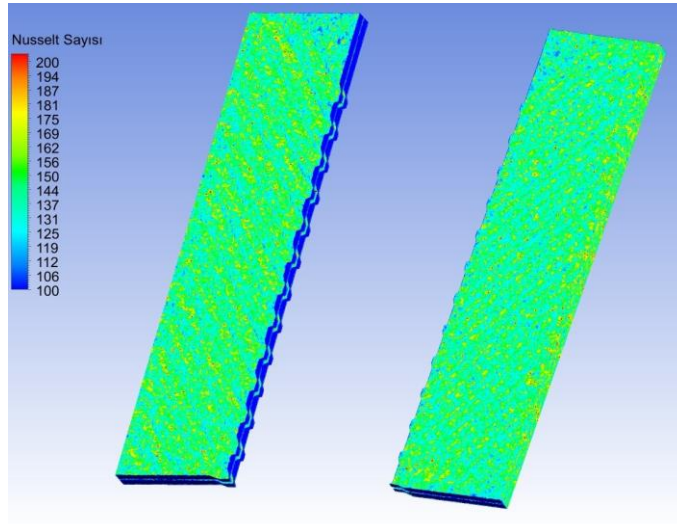
Şekil 4.7. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık değışimi

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için 75° kanat açısına sahip KPID’de sıcak akışkan tarafında iki çizgi boyunca sıcaklık değışimi birbirine paralel olmaktadır. Plaka girişinden çıkışına doğru sıcaklık 70 °C’den 60 °C’ye azalmaktadır. Belirlenen iki kesitte de çizgi boyunca sıcaklık dağılımları neredeyse eşit olmaktadır. Soğuk akışkan tarafında iki çizgi boyunca sıcaklık değışimi birbirine paralel olmaktadır. Plaka girişinden çıkışına doğru sıcaklık 15 °C’den 20 °C’ye artmaktadır. Belirlenen iki kesitte de çizgi boyunca sıcaklık dağılımları neredeyse eşit olmaktadır.



Şekil 4.8. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık dağılımı

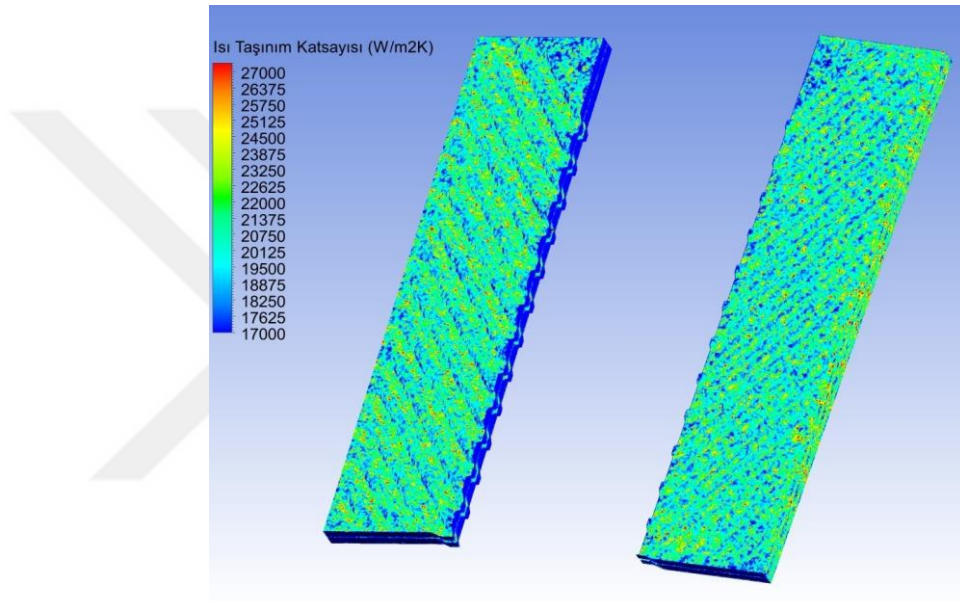
Şekil 4.8’de görüldüğü gibi $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için 75° kanat açısına sahip KPID’de sıcak ve soğuk akışkan tarafındaki sıcaklık dağılım konturları verilmiştir. Şekilde sol taraftaki resim sıcak akışkandaki, sağ taraftaki soğuk akışkandaki sıcaklık dağılımını temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sıcak akışkandaki sıcaklığı plaka girişinden çıkışına doğru 70°C ’den $55\text{-}60^\circ\text{C}$ ’ye kadar azalırken, soğuk akışkandaki sıcaklık dağılımı 15°C ’den $30\text{-}35^\circ\text{C}$ ’ye kadar artmıştır.



Şekil 4.9. Sıcak ve soğuk akışkan nusselt sayısı dağılımı

Şekil 4.9’da $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için 75° kanat açısına sahip KPID’de sıcak ve soğuk akışkan tarafında Nusselt sayısı

konturları verilmiştir. Şekilde sol taraftaki resim sıcak akışkandaki, sağ taraftaki soğuk akışkandaki Nusselt sayısı dağılımını temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sıcak akışkandaki Nusselt sayısı plaka girişinden çıkışına kadar homojen olmaktadır ve $130\text{-}200\text{W/m}^2\text{K}$ değişmekte iken sadece plaka kanal aralarında Nusselt sayısı $100\text{-}130\text{ W/m}^2\text{K}$ kadar düşmektedir. Soğuk akışkandaki Nusselt sayısı plaka girişinden çıkışına kadar homojen olmaktadır ve $100\text{-}180\text{W/m}^2\text{K}$ değişmekte iken kanal aralarında Nusselt sayısı $100\text{-}125\text{ W/m}^2\text{K}$ kadar düşmektedir.

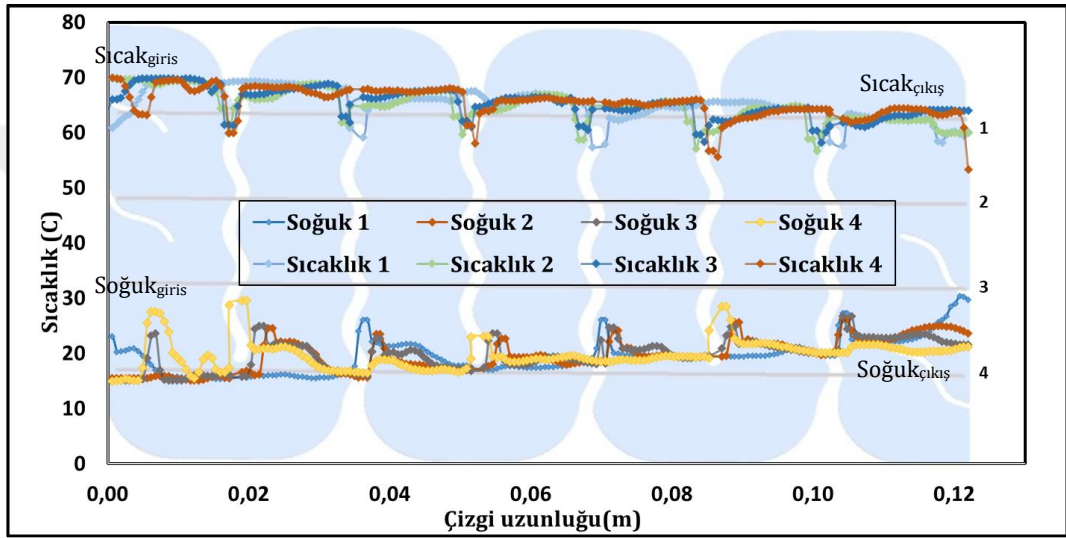


Şekil 4.10. Sıcak ve soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı dağılımı

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı $0,03$ olduğu durum için 75° kanat açısına sahip KPID'de sıcak ve soğuk akışkan tarafında ısı taşınım katsayısı konturları verilmiştir. Şekilde sol taraftaki resim sıcak akışkandaki, sağ taraftaki soğuk akışkandaki ısı taşınım katsayısı dağılımını temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sıcak akışkandaki ısı taşınım katsayısı plaka girişinden çıkışına kadar homojen olmaktadır ve $20000\text{-}30000\text{W/m}^2\text{K}$ değişmekte iken soğuk akışkanda ısı taşınım katsayısı $15000\text{-}25000\text{ W/m}^2\text{K}$ değişmektedir.

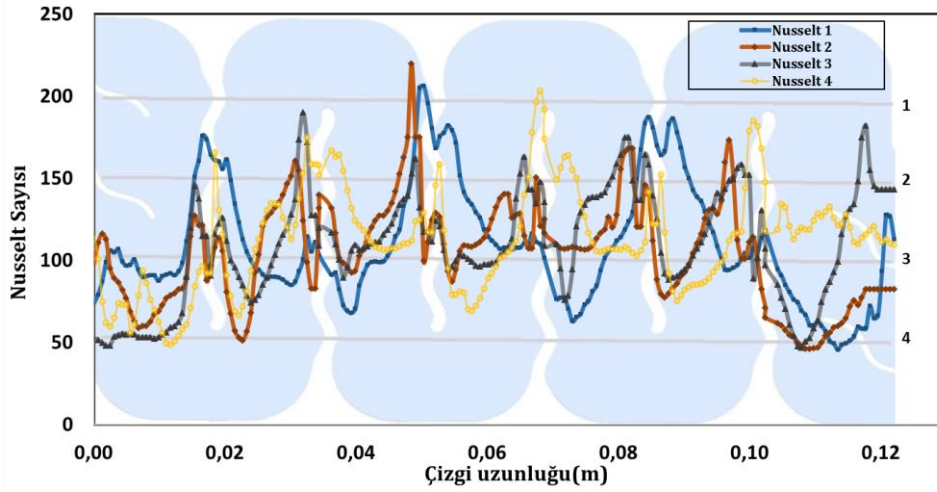
4.4. Sinüsoidal Akış Dağılımına Sahip Özgün Kompakt Plakalı Isı Değiştiricide $Re=2888(m=0,05kg/s)$ ve 0,05 Hacimsel Oranda Grafen Nanoakışkanı Katkılı Elde Edilen Sonuçlar

Sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide $Re=2888(m=0,05 kg/s)$ iken ve 0,05 hacimsel oranda grafen nanoakışkanı katkılı akış ve ısı transferi incelendiğinde; sıcaklık, Nusselt ve ısı taşınım katsayısı dağılımı sıcak ve soğuk akışkanlar için aşağıda verilmiştir.



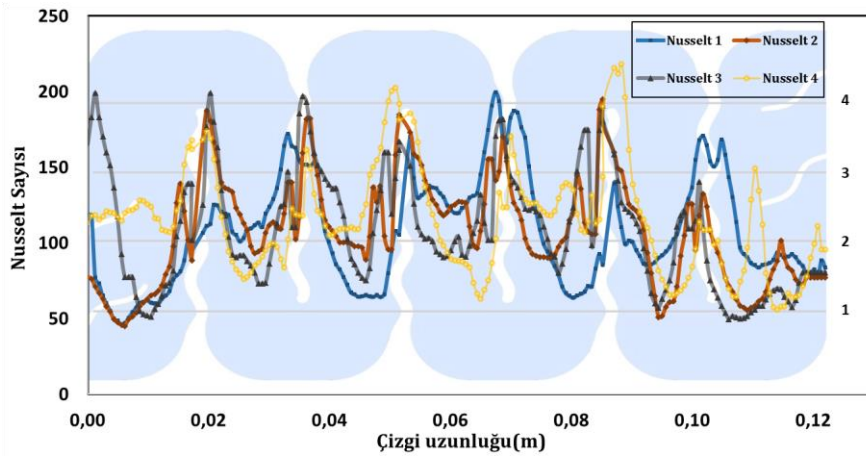
Şekil 4.11. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık değişimi

Şekil 4.11'de görüldüğü gibi $Re=2888$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,05 olduğu durum için sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak akışkan tarafında dört çizgi boyunca sıcaklık değişimi birbirine paralel olmaktadır. Plaka girişinden çıkışına doğru sıcaklık 70 °C'den 60-65 °C'ye azalmaktadır. Çizgilerden görüldüğü üzere sinusoidal akış dışında kalan kısımlarda sıcaklık 10°C ani düşmekte sonrasında tekrar yükselmektedir. Soğuk akışkan tarafında dört çizgi boyunca sıcaklık değişimi birbirine paralel olmaktadır. Plaka girişinden çıkışına doğru sıcaklık 15 °C'den 25-30 °C'ye artmaktadır. Sinusoidal akış dışında kalan kısımlarda sıcaklık 7-8°C ani yükselmekte sonrasında tekrar düşmektedir.



Şekil 4.12. Sıcak akışkan nusselt sayısı değişimi

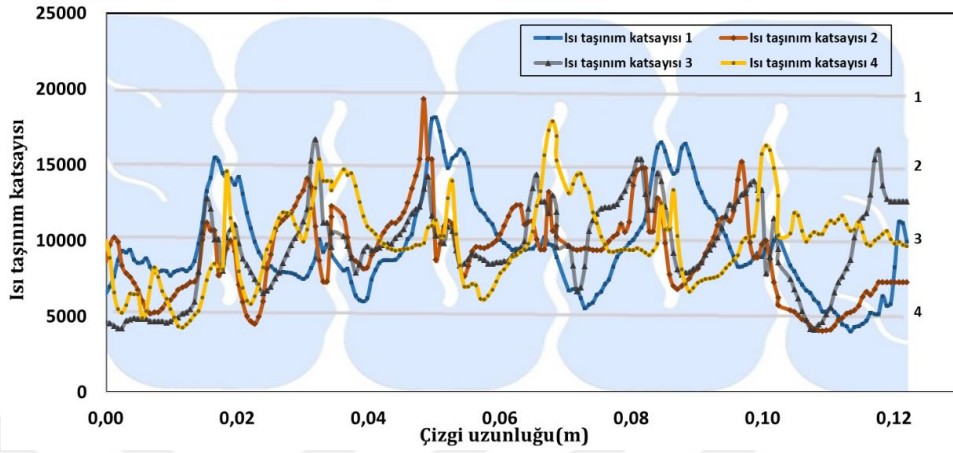
Şekil 4.12’de görüldüğü gibi $Re=2888$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,05 olduğu durum için sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak akışkan tarafında dört çizgi boyunca Nusselt sayısı değişimi verilmiştir. Plaka boyunca $70-200 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri arasında değişmektedir. Sinusoidal akış dışında kalan kısımlarda Nusselt sayısı yaklaşık $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ ani yükselmekte sonrasında tekrar düşmektedir. Plaka gövdesindeki Nusselt sayısı, plaka giriş ve çıkışındaki Nusselt sayısından daha yüksektir.



Şekil 4.13. Soğuk akışkan nusselt sayısı değişimi

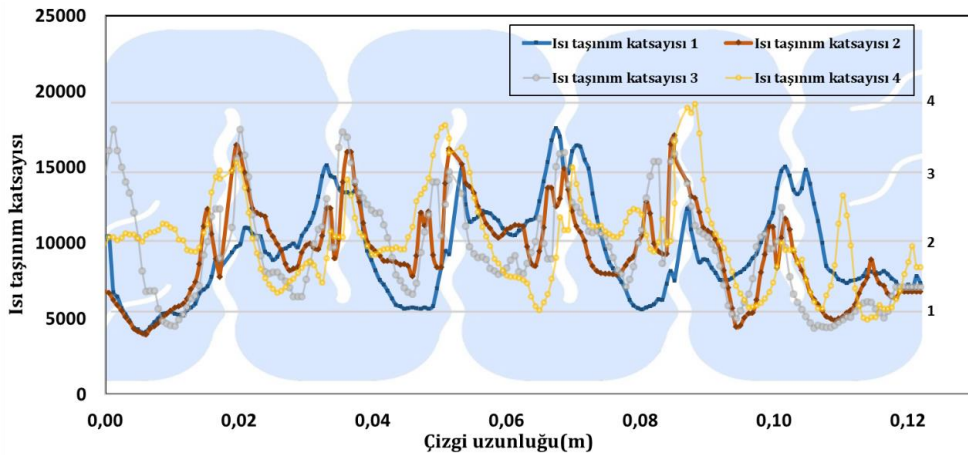
Şekil 4.13’te $Re=2888$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,05 olduğu durum için sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide soğuk akışkan tarafında dört çizgi boyunca Nusselt sayısı değişimi verilmiştir. Plaka boyunca $60-220 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri arasında değişmektedir. Sinusoidal akış

dışında kalan kısımlarda Nusselt sayısı yaklaşık $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ ani yükselmekte sonrasında tekrar düşmektedir. Plaka gövdesindeki Nusselt sayısı, plaka giriş ve çıkışındaki Nusselt sayısından daha yüksektir.



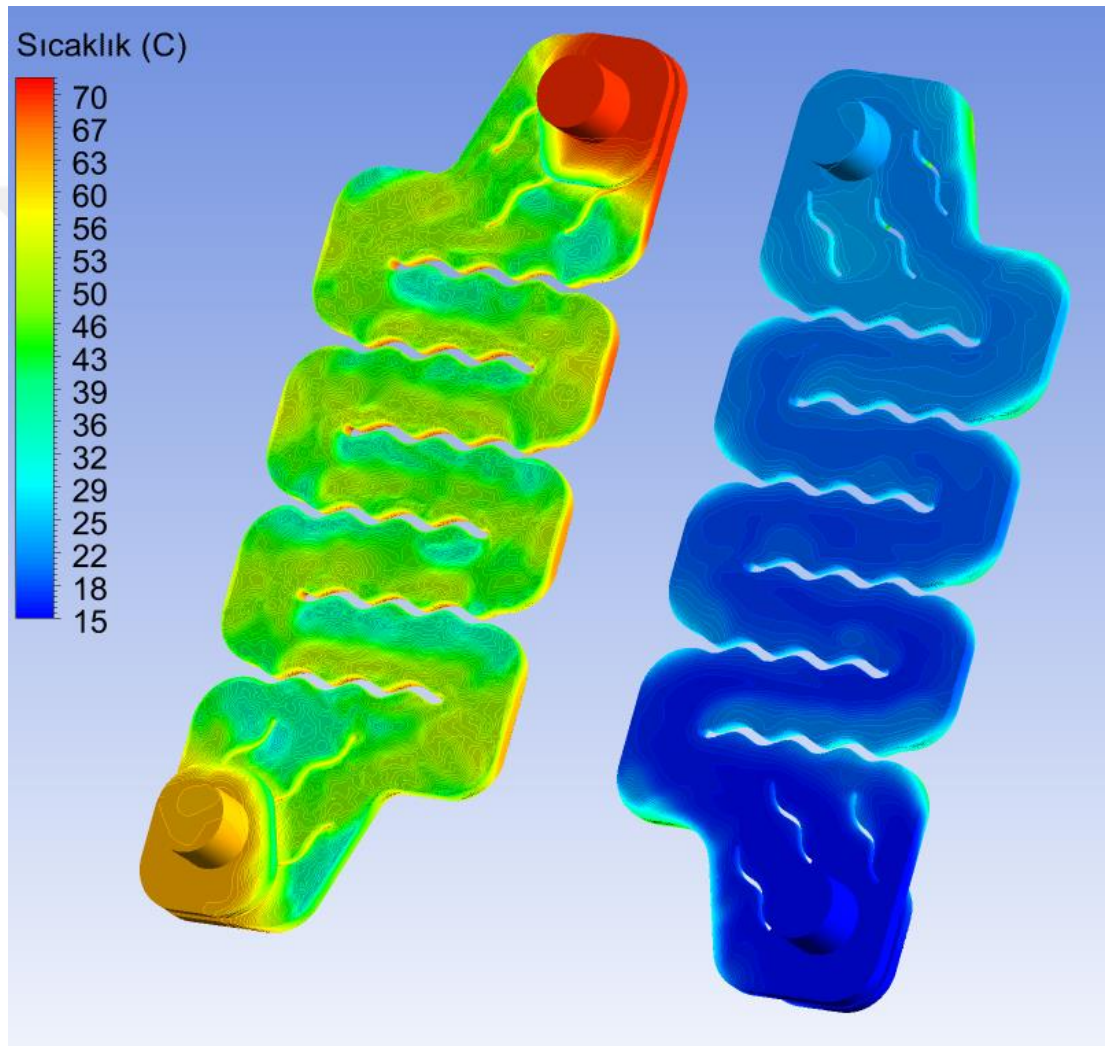
Şekil 4.14. Sıcak akışkan ısı taşınım katsayısı değişimi

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi $Re=2888$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,05 olduğu durum için sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak akışkan tarafında dört çizgi boyunca ısı taşınım katsayısı değişimi verilmiştir. Plaka boyunca $5000\text{-}20000 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri arasında değişmektedir. Sinusoidal akış dışında kalan kısımlarda ısı taşınım katsayısı yaklaşık $6000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ani yükselmekte sonrasında tekrar düşmektedir. Plaka gövdesindeki ısı taşınım katsayısı, plaka giriş ve çıkışındaki ısı taşınım katsayısından daha yüksektir.



Şekil 4.15. Soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı değişimi

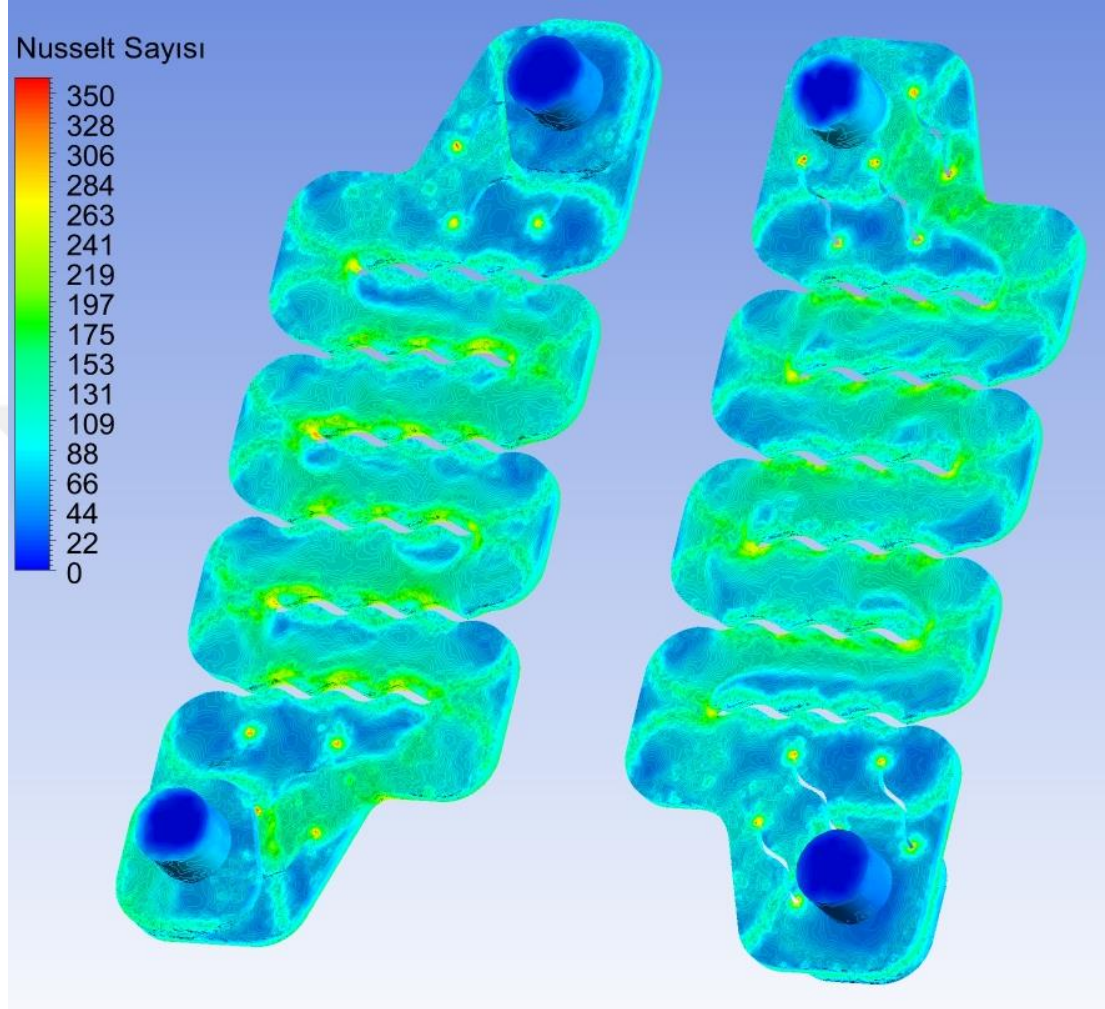
Şekil 4.15'te $Re=2888$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,05 olduğu durum için sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide soğuk akışkan tarafında dört çizgi boyunca ısı taşınım katsayısı değişimi verilmiştir. Plaka boyunca 5000-19000 W/m^2K değerleri arasında değişmektedir. Sinusoidal akış dışında kalan kısımlarda ısı taşınım katsayısı yaklaşık 6000 W/m^2K ani yükselmekte sonrasında tekrar düşmektedir. Plaka gövdesindeki ısı taşınım katsayısı, plaka giriş ve çıkışındaki ısı taşınım katsayısından daha yüksektir.



Şekil 4.16. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık dağılımı

Şekil 4.16'da görüldüğü gibi $Re=2888$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,05 olduğu durum için sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve soğuk akışkan tarafındaki sıcaklık dağılım konturları verilmiştir. Şekilde sol taraftaki resim sıcak akışkandaki, sağ taraftaki soğuk akışkandaki sıcaklık dağılımını temsil etmektedir. Sıcak akışkandaki sıcaklığı

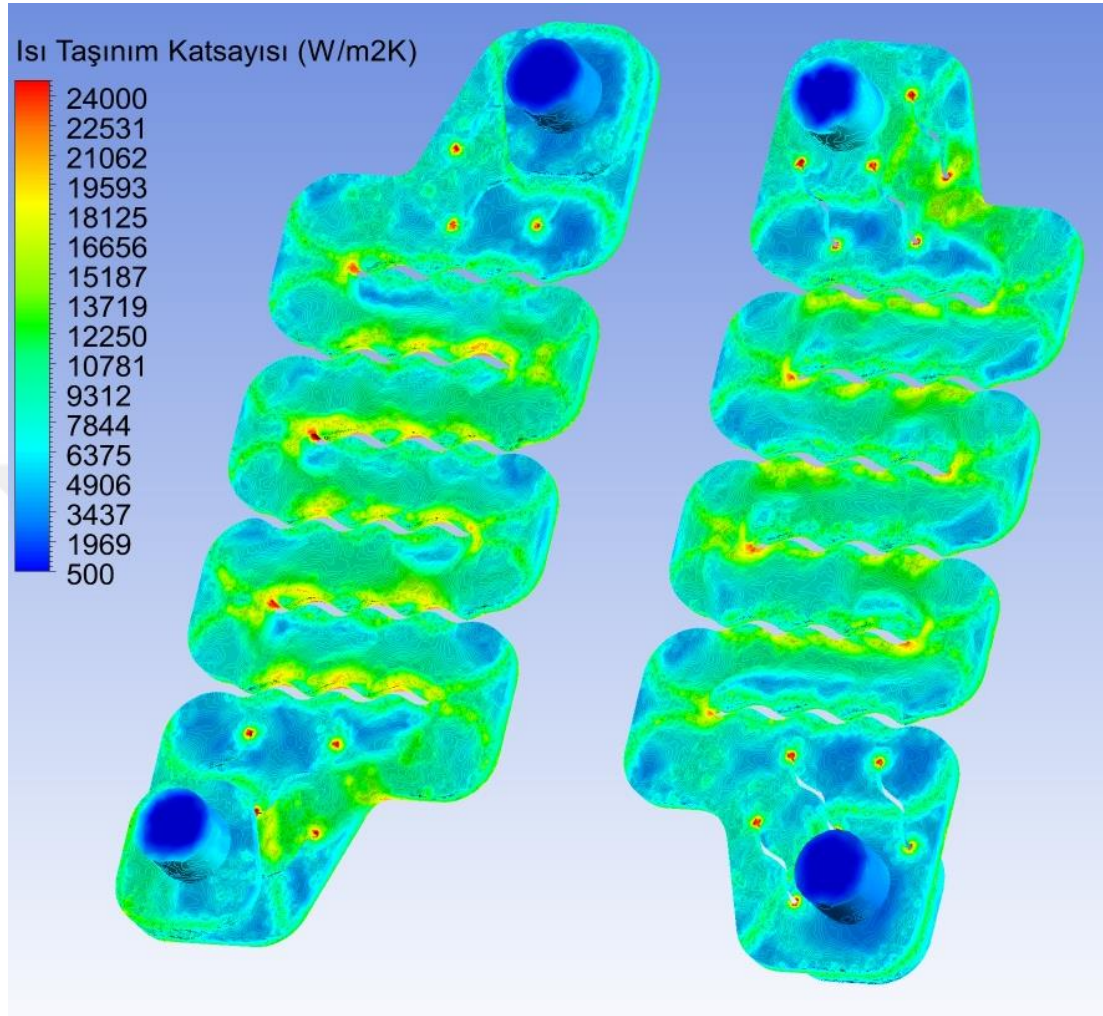
plaka girişinden çıkışına doğru 70 °C'den 40-50 °C'ye kadar azalırken plakadan 60-63 °C'de çıkmaktadır. Soğuk akışkandaki sıcaklık dağılımı 15 °C'den 25-30 °C'ye kadar artmıştır.



Şekil 4.17. Sıcak ve soğuk akışkan nusselt sayısı dağılımı

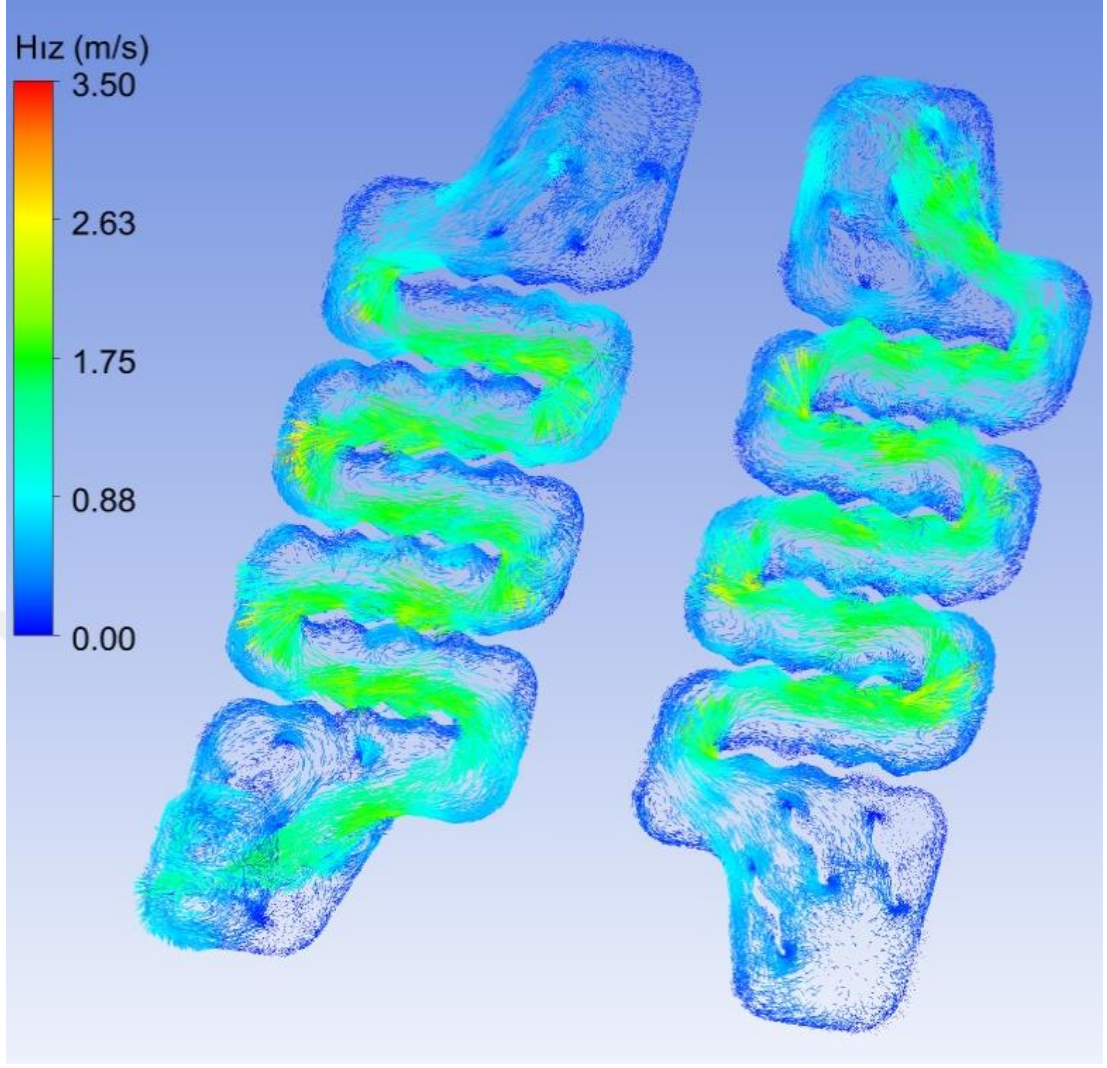
Şekil 4.17'de $Re=2888$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,05 olduğu durum için sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve akışkan tarafında Nusselt sayısı konturları verilmiştir. Şekilde sol taraftaki resim sıcak akışkandaki, sağ taraftaki soğuk akışkandaki Nusselt sayısı dağılımını temsil etmektedir. Sıcak akışkandaki Nusselt sayısı plaka girişinden çıkışına kadar homojen olmaktadır ve $100-200\text{W/m}^2\text{K}$ değişmekte iken sadece plaka kanal aralarında Nusselt sayısı $70\text{ W/m}^2\text{K}$ 'e kadar düşmektedir. Soğuk akışkandaki Nusselt sayısı plaka girişinden çıkışına kadar $70-250\text{W/m}^2\text{K}$

değişmekte iken kanal aralarında Nusselt sayısı 60-80 W/m^2K kadar düşmektedir.



Şekil 4.18. Sıcak ve soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı dağılımı

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi $Re=2888$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,05 olduğu durum için sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve akışkan tarafında ısı taşınım katsayısı konturları verilmiştir. Şekilde sol taraftaki resim sıcak akışkandaki, sağ taraftaki soğuk akışkandaki ısı taşınım katsayısı dağılımını temsil etmektedir. Sıcak akışkandaki ısı taşınım katsayısı plaka girişinden çıkışına 3000-25000 W/m^2K değişmekte iken soğuk akışkanda ısı taşınım katsayısı 3000-20000 W/m^2K değişmektedir.

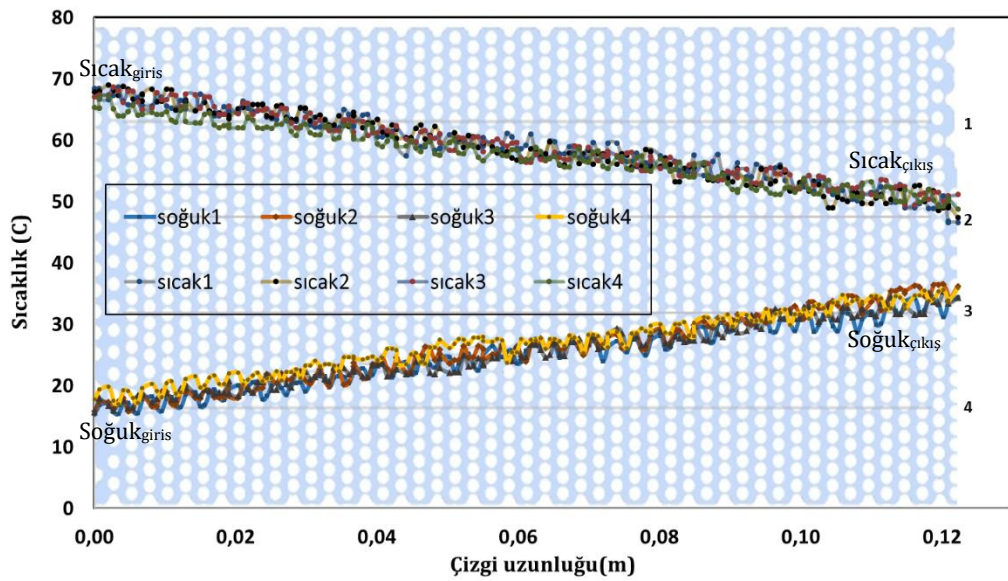


Şekil 4.19. Sıcak ve soğuk akışkan hız vektörleri dağılımı

Şekil 4.19’da $Re=2888$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,05 olduğu durum için sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve akışkan tarafında hız vektörleri verilmiştir. Sıcak ve soğuk akışkanda hız vektörleri birbirine paralel olmaktadır. Kıvrımlı kanatçıkların kenarlarında hız $0,88\text{ m/s}$ ’nin altına düşerken kanatçıklar arasındaki bölgelerde $2,63\text{ m/s}$ ’ye kadar artmaktadır. Plaka girişlerinde hız $1,75\text{--}2,63\text{ m/s}$ arasındayken plaka çıkışlarında $0\text{--}0,88\text{ m/s}$ ’ye arasında değişmektedir. Ayrıca akışın dönüş gösterdiği köşe bölgelerde girdap oluştuğu görülmüştür.

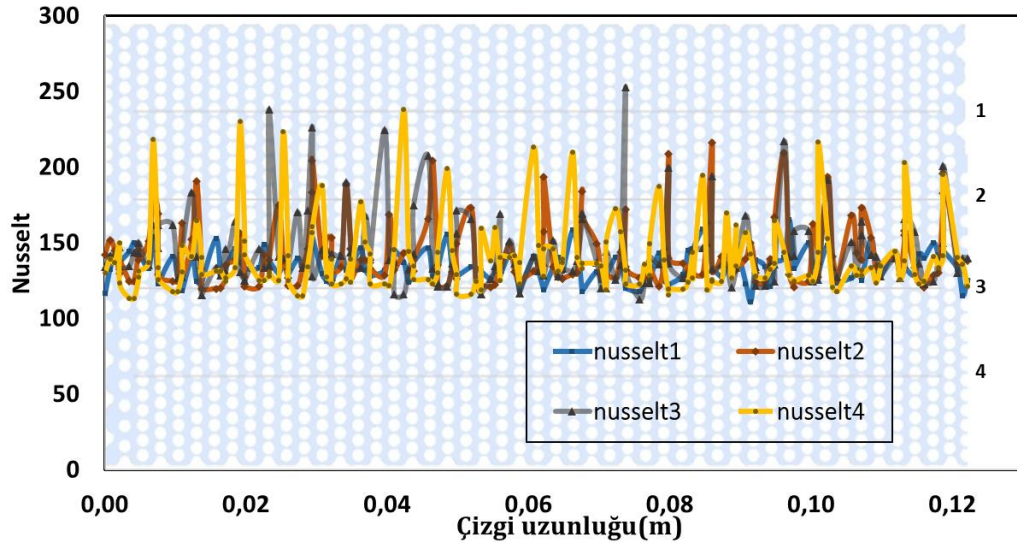
4.5. Silindirik Kanatçık Yapısına Sahip Özgün Kompakt Plakalı Isı Değiştiricide $Re=900(m=0,015\text{kg/s})$ ve 0,03 Hacimsel Oranda Grafen Nanoakışkanı Katkılı Elde Edilen Sonuçlar

Silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide $Re=900(m=0,015\text{ kg/s})$ ve 0,03 hacimsel oranda grafen nanoakışkanı katkılı iken akış ve ısı transferi incelendiğinde; sıcaklık, Nusselt ve ısı taşınım katsayısı dağılımı sıcak ve soğuk akışkanlar için aşağıda verilmiştir.



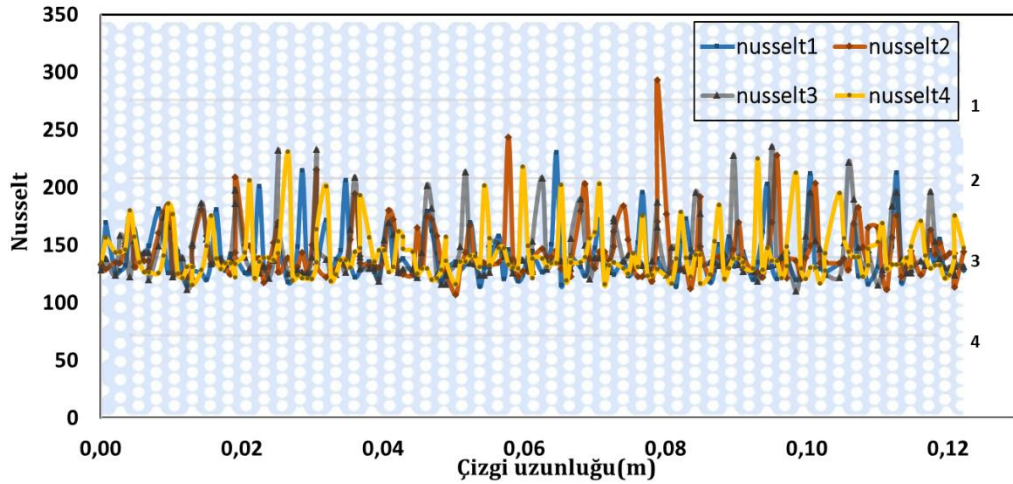
Şekil 4.20. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık değişimi

Şekil 4.20'de görüldüğü gibi $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak akışkan tarafında dört çizgi boyunca sıcaklık değişimi birbirine paralel olmaktadır. Plaka girişinden çıkışına doğru sıcaklık 70 °C'den 45-52 °C'ye azalmaktadır. Çizgilerden görüldüğü üzere sonuçlar birbirlerine çok yakın ve homojen bir sıcaklık düşüşü görülmektedir. Soğuk akışkan tarafında dört çizgi boyunca sıcaklık değişimi birbirine paralel olmaktadır. Plaka girişinden çıkışına doğru sıcaklık 15 °C'den 35 °C'ye artmaktadır. Çizgilerden görüldüğü üzere sonuçlar birbirlerine çok yakın ve homojen bir sıcaklık artışı görülmektedir.



Şekil 4.21. Sıcak akışkan nusselt sayısı değişimi

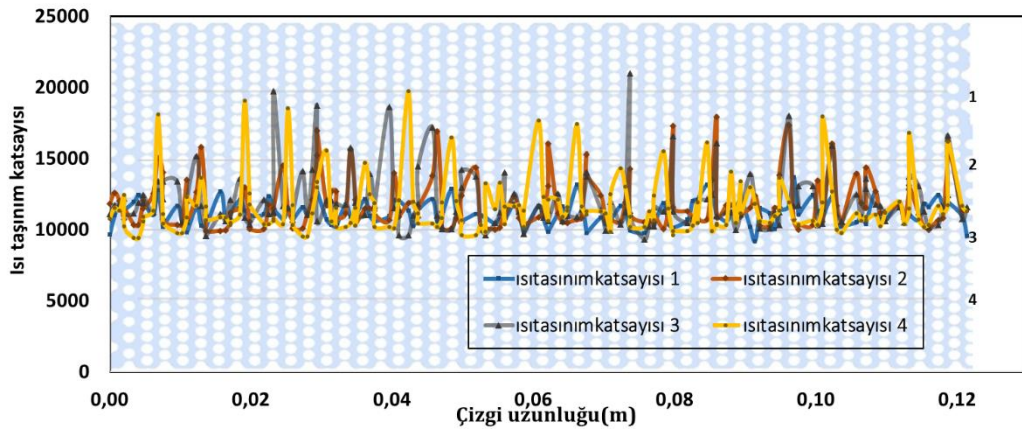
Şekil 4.21'de $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak akışkan tarafında dört çizgi boyunca Nusselt sayısı değişimi verilmiştir. Plaka boyunca $120-260 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri arasında değişmektedir. Plaka gövdesindeki Nusselt sayısı, plaka giriş ve çıkışındaki Nusselt sayısından daha yüksektir. Plaka giriş ve çıkışındaki Nusselt sayıları birbirlerine yakındır.



Şekil 4.22. Soğuk akışkan nusselt sayısı değişimi

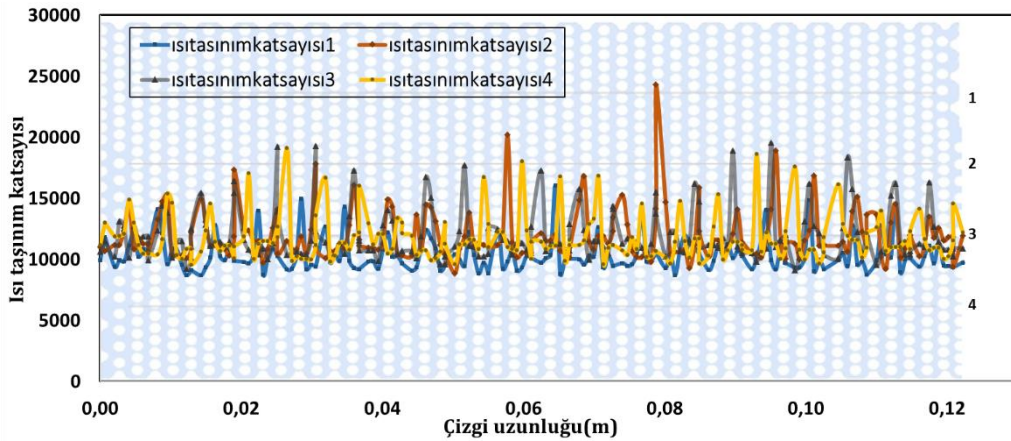
Şekil 4.22'de $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide soğuk akışkan tarafında dört çizgi boyunca Nusselt sayısı değişimi verilmiştir. Plaka boyunca $120-300 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri arasında değişmektedir. Plaka gövdesindeki

Nusselt sayısı, plaka giriş ve çıkışındaki Nusselt sayısından daha yüksektir. Plaka giriş ve çıkışındaki Nusselt sayıları birbirlerine yakındır.



Şekil 4.23. Sıcak akışkan ısı taşınım katsayısı değişimi

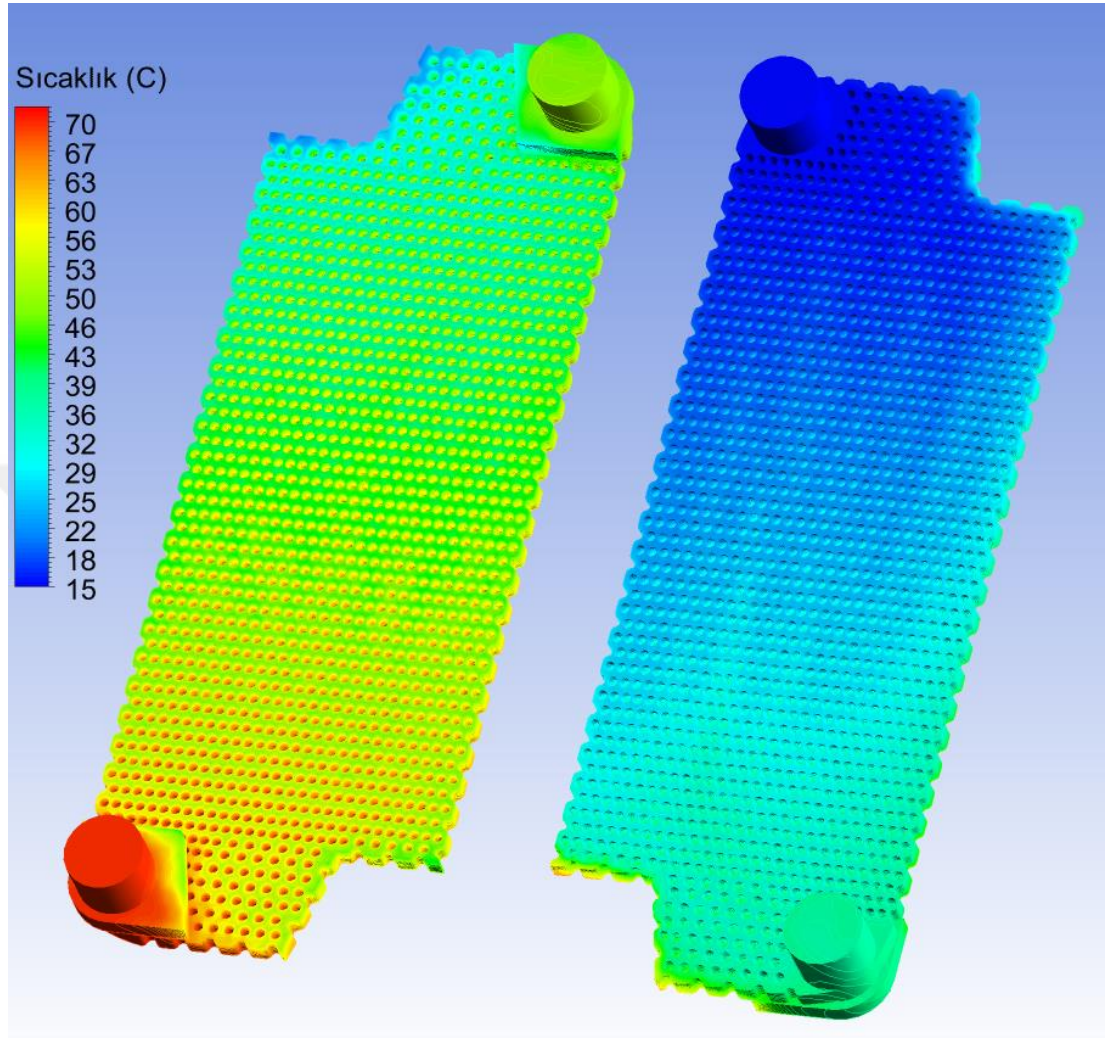
Şekil 4.23'te görüldüğü gibi $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak akışkan tarafında dört çizgi boyunca ısı taşınım katsayısı değişimi verilmiştir. Plaka boyunca 9000-20000 W/m^2K değerleri arasında değişmektedir. Plaka gövdesindeki ısı taşınım katsayısı, plaka giriş ve çıkışındaki ısı taşınım katsayısından daha yüksektir.



Şekil 4.24. Soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı değişimi

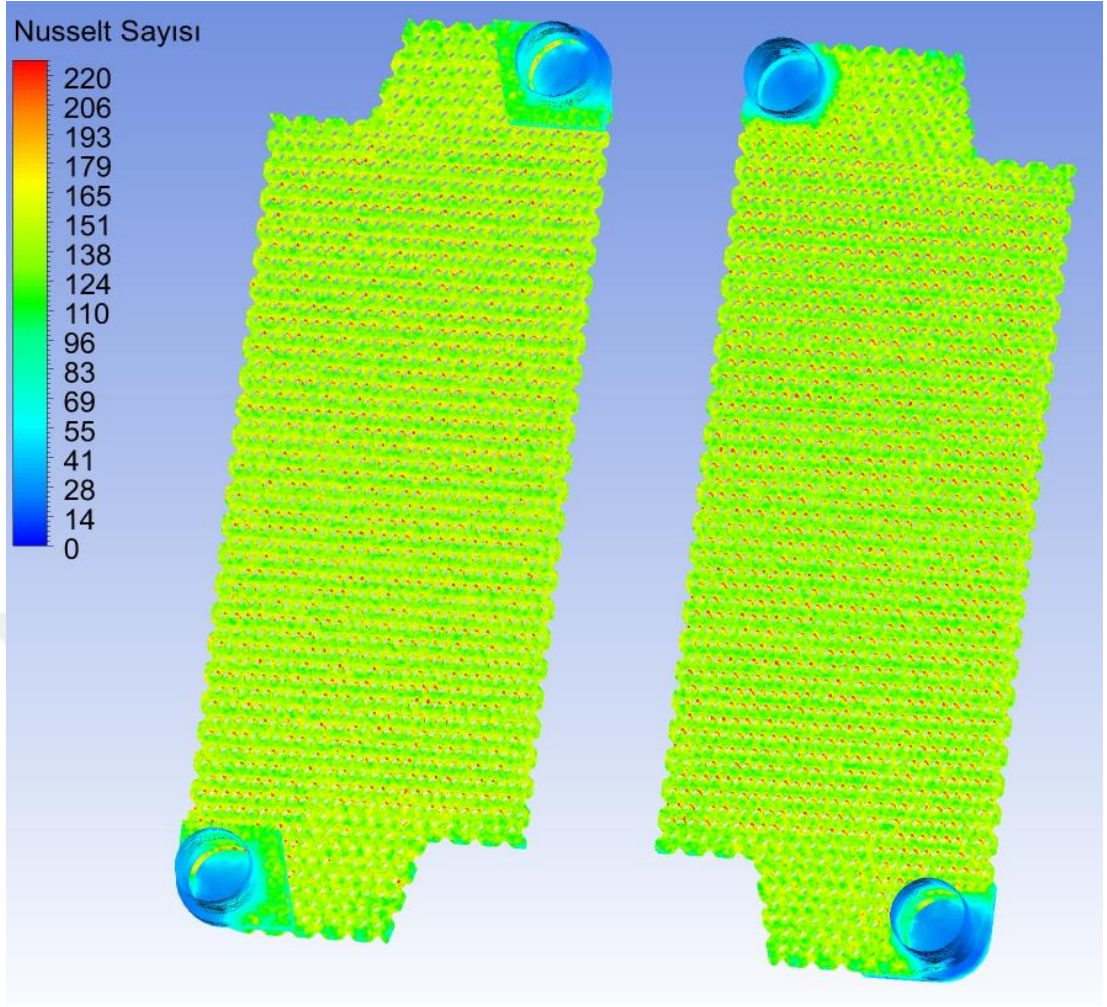
Şekil 4.24'te $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide soğuk akışkan tarafında dört çizgi boyunca ısı taşınım katsayısı değişimi verilmiştir. Plaka boyunca 8000-26000 W/m^2K değerleri arasında değişmektedir. Plaka

gövdesindeki ısı taşınım katsayısı, plaka giriş ve çıkışındaki ısı taşınım katsayısından daha yüksektir.



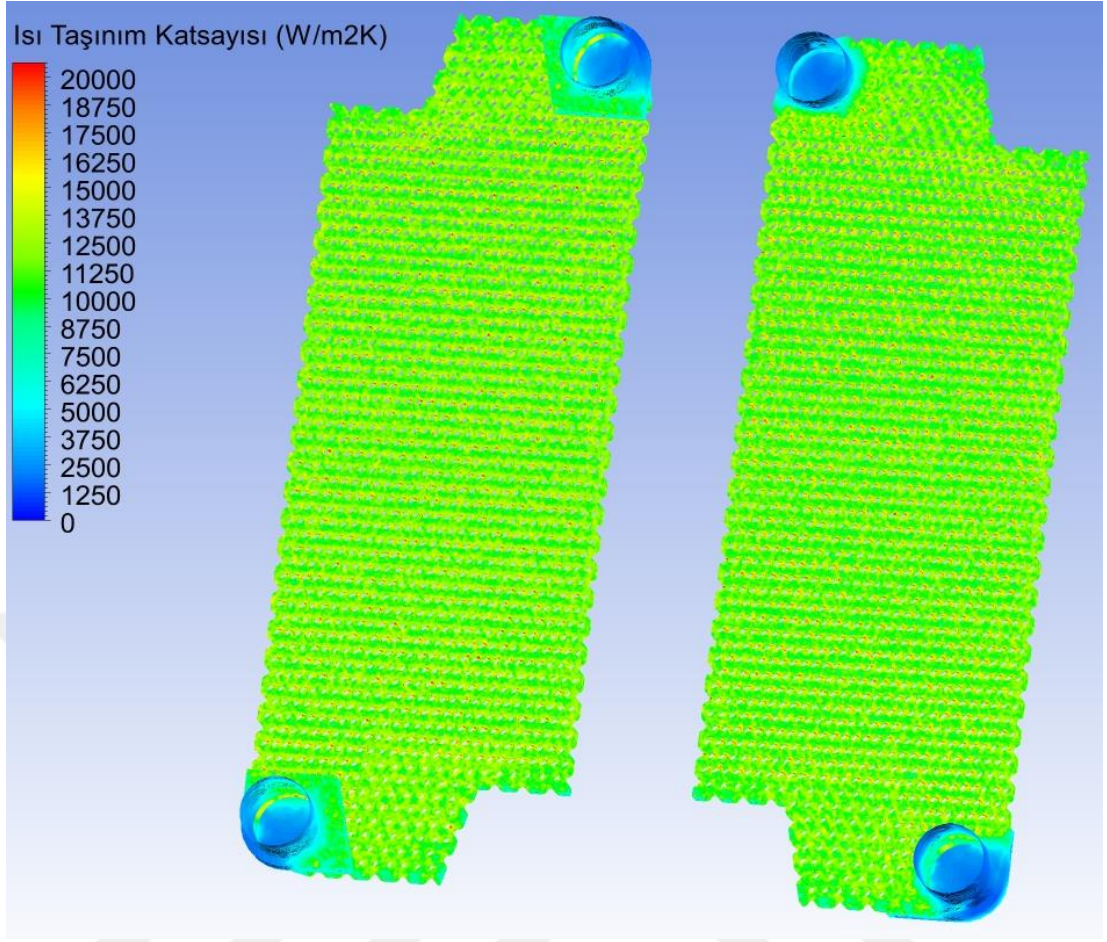
Şekil 4.25. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık dağılımı

Şekil 4.25'te görüldüğü gibi $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve soğuk akışkan tarafındaki sıcaklık dağılım konturları verilmiştir. Şekilde sol taraftaki resim sıcak akışkandaki, sağ taraftaki soğuk akışkandaki sıcaklık dağılımını temsil etmektedir. Sıcak akışkandaki sıcaklığı plaka girişinden çıkışına doğru 70 °C'den 50 °C'ye kadar azalırken plakadan 45-55 °C'de çıkmaktadır. Soğuk akışkandaki sıcaklık dağılımı 15 °C'den 30-40 °C'ye kadar artmıştır.



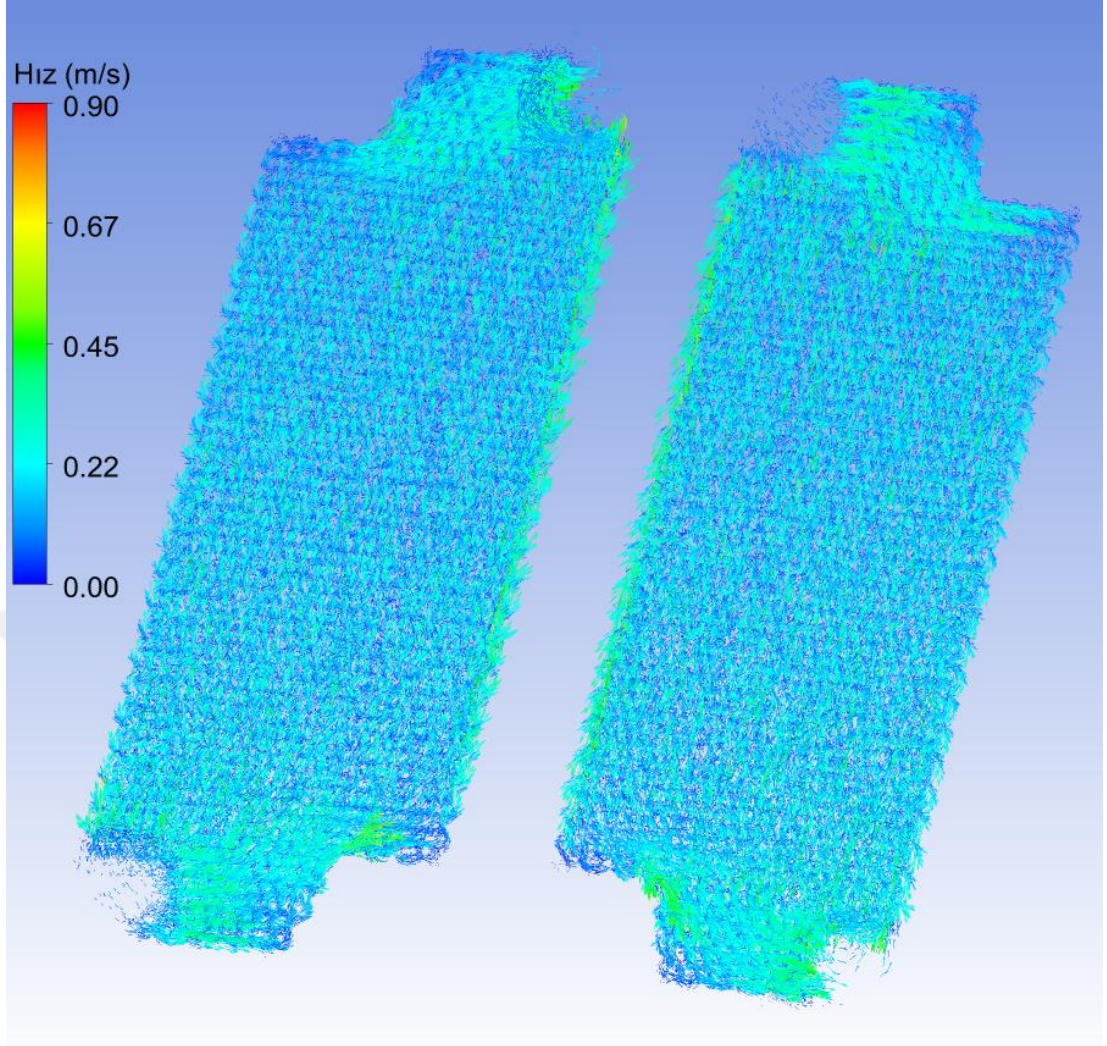
Şekil 4.26. Sıcak ve soğuk akışkan nusselt sayısı dağılımı

Şekil 4.26'da $Re=900$ nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve akışkan tarafında Nusselt sayısı konturları verilmiştir. Şekilde sol taraftaki resim sıcak akışkandaki, sağ taraftaki soğuk akışkandaki Nusselt sayısı dağılımını temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sıcak akışkandaki Nusselt sayısı plaka girişinden çıkışına kadar homojen olmaktadır ve $120-140 \text{ W/m}^2\text{K}$ değişmektedir. Soğuk akışkandaki Nusselt sayısı plaka girişinden çıkışına kadar $120-140 \text{ W/m}^2\text{K}$ değişmektedir.



Şekil 4.27. Sıcak ve soğuk akışkan ısı taşınım katsayısı dağılımı

Şekil 4.27’de görüldüğü gibi $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve akışkan tarafında ısı taşınım katsayısı konturları verilmiştir. Şekilde sol taraftaki resim sıcak akışkandaki, sağ taraftaki soğuk akışkandaki ısı taşınım katsayısı dağılımını temsil etmektedir. Sıcak akışkandaki ısı taşınım katsayısı plaka girişinden çıkışına $9000-15000 \text{ W/m}^2\text{K}$ değişmekte iken soğuk akışkanda ısı taşınım katsayısı $9000-15000 \text{ W/m}^2\text{K}$ değişmektedir.



Şekil 4.28. Sıcak ve soğuk akışkan hız vektörleri dağılımı

Şekil 4.28'de $Re=900$ ve nanoakışkan hacimsel oranı 0,03 olduğu durum için silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştiricide sıcak ve akışkan tarafında hız vektörleri verilmiştir. Sıcak ve soğuk akışkanda hız vektörleri birbirine paralel olmaktadır. Plaka giriş ve çıkışlarında hız 0,22-0,45 m/s arasındayken plaka boyunca 0,1-0,45 m/s'ye arasında değişmektedir. Ayrıca akışın dönüş gösterdiği silindirik kanatçıklar arasında girdap olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir maksimum 2 kW ısıl kapasiteye sahip üç plakalı KPİD ve aynı dış boyut ölçülerine ve plaka sayısına sahip iki özgün kompakt plakalı ısı değiştirici tasarlanmıştır. Bu ısı değiştiricilerdeki ısı transferi ve akış karakteristikleri üç farklı Re sayısı için su ve üç farklı nanopartikül hacimsel oranına sahip nanoakışkan kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Toplamda 36 adet sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerden önce deneysel doğrulama ve farklı sayısal ağ eleman büyüklükleri kullanılarak sayısal ağ eleman yapısı özelliklerinin seçimi yapılmıştır. Sayısal analizlerin sonuçları elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Yapılan yorumlara göre ortaya çıkan nihai sonuçlar aşağıda verilmiştir.

75 kanat açısına sahip ÖKPİD’de yapılan 12 analiz sonucunda;

- Re=300 iken 0,01, 0,03, 0,05 hacimsel oranına sahip nanoakışkanların akması durumları için basınç düşüşünün sıcak akışkan tarafında 246 Pa, soğuk akışkan tarafında 244 Pa ile en düşük olduğu görülmüştür.
- Re=2888 iken su akış durumu için basınç düşüşünün sıcak akışkan tarafında 12288 Pa, soğuk akışkan tarafında 12137 Pa ile en yüksek olduğu görülmüştür.
- Re=300 iken 0,01 ve 0,05 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumları için ısı transferinin 476 W ile en düşük olduğu görülmüştür.
- Re=2888 iken 0,03 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumları için ısı transferinin 1825 W ile en yüksek olduğu görülmüştür.

Sinüsoidal akış dağılımına sahip ÖKPİD’de yapılan 12 analiz sonucunda;

- Re=300 iken su akışkan durumu için basınç düşüşünün sıcak akışkan tarafında 53 Pa, soğuk akışkan tarafında 52 Pa ile en düşük olduğu görülmüştür.
- Re=2888 iken 0,05 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumu için basınç düşüşünün sıcak akışkan tarafında 8113 Pa, soğuk akışkan tarafında 7905 Pa ile en yüksek olduğu görülmüştür.

- Re=300 iken 0,01 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumu için ısı transferinin 328 W ile en düşük olduğu görülmüştür.
- Re=2888 iken 0,05 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumu için ısı transferinin 1465 W ile en yüksek olduğu görülmüştür.

Silindirik kanatçık yapısına sahip ÖKPİD’de yapılan 12 analiz sonucunda;

- Re=300 iken 0,01, 0,03, 0,05 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumları için basınç düşüşünün sıcak akışkan tarafında 246 Pa, soğuk akışkan tarafında 244 Pa ile en düşük olduğu görülmüştür.
- Re=2888 iken su akış durumu için basınç düşüşünün sıcak akışkan tarafında 12288 Pa, soğuk akışkan tarafında 12137 Pa ile en yüksek olduğu görülmüştür.
- Re=300 iken 0,01 ve 0,05 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumları için ısı transferinin 476 W ile en düşük olduğu görülmüştür.
- Re=2888 iken 0,03 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumları için ısı transferinin 1825 W ile en yüksek olduğu görülmüştür.

Yapılan analizler hep birlikte değerlendirildiğinde;

En yüksek ısı transferinin silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide 0,01 nano akışkan hacimsel oranı ve Re=2888 durumu için 2691 W olarak gerçekleşmiştir. Ancak basınç düşüşünün de en yüksek olduğu durumlardan biri olduğu görülmüştür.

En yüksek basınç düşüşü silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide su akışkanı ve Re=2888 durumu için 22638 Pa olarak gerçekleşmiştir.

En düşük ısı transferi sinusoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide 0,01 nano akışkan hacimsel oranı ve Re=300 durumu için 328 W olarak gerçekleşmiştir.

En düşük basınç düşüşü sinusoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide su akışkanı ve $Re=300$ durumu için sıcak akışkan tarafında 53 Pa, soğuk akışkan tarafında 52 Pa olarak gerçekleşmiştir.

Isı transferi ve basınç düşüşü için optimum durumlar incelendiğinde üç farklı geometri içinde en uygun kombinasyonlar belirlenmiştir. KPİD için $Re=900$ iken 0,05 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumu seçilmiştir. Bu durum için, ısı transferi 1013 W, basınç düşüşü sıcak akışkan tarafında 1464 Pa, soğuk akışkan tarafında 1454 Pa olmaktadır. Sinusoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştirici için $Re=2888$ iken 0,05 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumu seçilmiştir. Bu durum için, ısı transferi 1465 W, basınç düşüşü sıcak akışkan tarafında 8113 Pa, soğuk akışkan tarafında 7905 Pa olmaktadır. Silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt plakalı ısı değiştirici için $Re=900$ iken 0,03 hacimsel oranına sahip nanoakışkan akış durumu seçilmiştir. Bu durum için, ısı transferi 1346 W, basınç düşüşü sıcak akışkan tarafında 2932 Pa, soğuk akışkan tarafında 2933 Pa olmaktadır.

Tüm değerlendirmeler yorumlandığında ısı transferinin Re sayısı değişimi ile en fazla değiştiği, geometri değişiminin de ısı transferini değiştirebildiği ve bununla birlikte nanoakışkan hacimsel oranı değişiminin daha az etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide ısı transferinin en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Ancak bununla birlikte basınç düşüşünün de maksimum değerlere ulaştığı ortaya çıkmıştır. Yapılan yorumlar sonucunda ortaya çıkan öneriler aşağıda belirtilmiştir:

Re sayısı 900 ile 2888 arasında değiştirilerek basınç düşüşü ve ısı transferi açısından en uygun Re sayısı optimizasyonu üç geometride yapılabilir.

Silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt ısı değiştiricinin geometrisi modifiye edilerek (silindirik kanatçıkların çapı, kanatçıkların sıklığı, iki plaka arasındaki uzaklık, yönlendirici geometrileri değiştirilerek) ısı transferi ve basınç düşüşü en uygun hale getirilebilir.

Sinüsoidal akış dağılımına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide basınç düşüşünün diğer plakalı ısı değiştiricilerden daha düşük olduğu görülmüştür. Daha yüksek Re sayılarında akış analizleri yapılarak ısı transferi ve basınç düşüşü açısından en uygun duruma ulaşılabilir.

Silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt ısı değiştiricide kanatçıkların birbirlerine çok yakın olmasından dolayı nanoakışkan hacimsel oranı arttıkça beklenin aksine ısı transferi artmamakta, 0,01 nanopartikül hacimsel oranından daha yüksek hacimsel orana sahip nanoakışkanlarda ısı transferinde düşüş olmaktadır. Bu durum sonucunda bu geometrinin nanoakışkan akışına uygun olmadığı yorumu yapılmıştır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt ısı değiştirici geometrisi modifiye edilerek nanoakışkanların akışına uygun hale getirilecek ve ısı transferi ile basınç düşüşü açısından en uygun hale getirilecektir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, silindirik kanatçık yapısına sahip özgün kompakt ısı değiştirici geometrisi modifiye edilerek, geometrik açıdan en uygun hale getirilecek ve içerisinde nanoakışkanların akışı sırasındaki ısı transferi, basınç düşüşü sayısal ve deneysel olarak incelenecektir. Bununla birlikte en uygun hale getirilecek geometri içine gizli ısı faz değişimi termal enerji depolama malzemesi doldurularak faz değişimli malzemenin katılaşma ve ergimesi sayısal ve deneysel olarak incelenecektir.

KAYNAKLAR

- Ahmad Hajatzadeh Pordanjani, S. A. (2019). An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy. *198*(111886).
- Ahmed, M. A.-F. (2011). Numerical investigations of flow and heat transfer enhancement in a corrugated channel using nanofluid. *38*(10).
- Ahmed, M., Shuaib, N., Yusoff, M., & Al-Falahi, A. (2011). Numerical investigations of flow and heat transfer enhancement in a corrugated channel using nanofluid. *38*(10), 1368-1375.
- Bal, S. &. (2022). Numerical Heat Transfer Analysis of a Rectangular Microchannel Heat Sink with Graphene-based Nanofluids. In *Advancement in Materials. Manufacturing and Energy Engineering*.
- Bhattad, A., Sarkar, J., & Ghosh, P. (2018). Discrete phase numerical model and experimental study of hybrid nanofluid heat transfer and pressure drop in plate heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*.
- Choi, S. U. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States)*. United States.
- Elsebay, M., Elbadawy, I., Shedid, M., & Fatouh, M. (2016). Numerical resizing study of Al₂O₃ and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *Applied Mathematical Modelling*.
- Fábio A.S. Mota, E. C. (2015). Modeling and Design of Plate Heat Exchanger. s. N. Kazi içinde, *Heat Transfer Studies and Applications*. IntechOpen.
- Gürel, B., Akkaya, V. R., Göлтаş, M., Şen, Ç. N., Güler, O. V., Koşar, M. İ., & Keçebaş, A. (2020). Investigation on flow and heat transfer of compact brazed plate heat exchanger with lung pattern. *Applied Thermal Engineering*.
- Gürel, B., Akkaya, V., Göлтаş, M., Şen, Ç., Güler, O., Koşar, M., & Keçebaş, A. (2020). Investigation on flow and heat transfer of compact brazed plate heat exchanger with lung pattern. *Applied Thermal Engineering*.
- Heidary, H., & Kermani, M. (2010). Effect of nano-particles on forced convection in sinusoidal-wall channel.
- Huang, D., Wu, Z., & Sunden, B. (2016). Effects of hybrid nanofluid mixture in plate heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*.
- Hussein, A. M., Bakar, R., Kadirgama, K., & Sharma, K. (2014). Heat transfer augmentation of a car radiator using nanofluids. *Heat Mass Transfer*.

- K. Somasekhar, K. M. (2018). A CFD Investigation of Heat Transfer Enhancement of Shell and Tube Heat Exchanger Using Al₂O₃-Water Nanofluid. 5(1), 1057-1062.
- Kan, M., Ipek, O., & Gurel, B. (2014). Plate heat exchangers as a compact design and optimization of different channel angles. *Special issue of the International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering*.
- Khail, A. A., & Erişen, A. (2021). Improvement of Plate Heat Exchanger Performance Using a New Plate Geometry. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- Khairul, M., Alim, M., Mahbubul, I., Saidur, R., Hepbasli, A., & Hossain, A. (2014). Heat transfer performance and exergy analyses of a corrugated plate heat exchanger using metal oxide nanofluids.
- Khoshvaght-Aliabadi, M., Hormozi, F., & Zamzamian, A. (2014). Effects of geometrical parameters on performance of plate-fin heat exchanger: Vortex-generator as core surface and nanofluid as working media.
- Manigandan, N., NaveenPrabhu, V., & Suresh, M. (2015). Experimental investigation of a brazed chevron type plate heat exchanger. *International Journal of Science Technology & Engineering*.
- Munish Gupta, V. S. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Oliveira, G. A., Contreras, E. M., & Filho, E. P. (2017). Experimental study on the heat transfer of MWCNT/water nanofluid flowing in a car radiator. *Applied Thermal Engineering*.
- Pak, B. C., & Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles. *Experimental Heat Transfer*.
- Pandya, N. S. (2020). Heat transfer enhancement with nanofluids in plate heat exchangers: A comprehensive review. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*.
- Pantzali, M., Kanaris, A., Antoniadis, K., & A.A. Mouza, S. P. (2009). Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface.
- Ponangi, B. R. (2021). Performance of compact heat exchanger in the presence of novel hybrid graphene nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*.
- Ray, D. R., Das, D. K., & Vajjha, R. S. (2014). Experimental and numerical investigations of nanofluids performance in a compact minichannel plate heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.

- Samira, P., Saeed, Z. H., Motahare, S., & Mostafa, K. (2015). Pressure drop and thermal performance of CuO/ethylene glycol (60%)-water (40%) nanofluid in car radiator. *Korean Journal of Chemical Engineering*.
- Sheikholeslami, M., & Ganji, D. (2013). Heat transfer of Cu-water nanofluid flow between parallel plates.
- Singh, S., & Ghosh, S. (2022). Pressure drop and heat transfer characteristics in 60° Chevron plate heat exchanger using Al₂O₃, GNP and MWCNT nanofluids. 32(8), 2750-2777.
- Tiwari, A. K., Ghosh, P., Sarkar, J., Dahiya, H., & Parekh, J. (2014). Numerical investigation of heat transfer and fluid flow in plate heat exchanger using nanofluids.
- Vajjha, R. S., Das, D. K., & Namburu, P. K. (2010). Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al₂O₃ and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal of Heat and Fluid Flow*.
- Vasu, V., Krishna, K. R., & Kumar, A. (2008). Thermal design analysis of compact heat exchanger using nanofluids. *International Journal of Nanomanufacturing*.
- Wang, L., & Sundén, B. (2003). Optimal design of plate heat exchangers with and without pressure drop specifications. *Applied Thermal Engineering*.
- Yarmand, H., Gharehkhani, S., Shirazi, S. F., Amiri, A., Alehashem, M. S., Dahari, M., & Kazi, S. (2016). Experimental investigation of thermo-physical properties, convective heat transfer and pressure drop of functionalized graphene nanoplatelets aqueous nanofluid in a square heated pipe. *Energy Conversion and Management*.
- (2022, 10 14). (Cadence Design Systems Limited) Cadence: https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/computational-fluid-dynamics/y-plus.html adresinden alındı