



**BİLGİSAYARLARDA KULLANILAN SIVI SOĞUTMA SİSTEMLERİNİN
TASARIMI, ANALİZİ VE DENEYSEL OPTİMİZASYONU**

Furkan ÖZSARI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Furkan ÖZSARI

16/06/2023

BİLGİSAYARLARDA KULLANILAN SIVI SOĞUTMA SİSTEMLERİNİN TASARIMI, ANALİZİ VE DENEYSEL OPTİMİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Furkan ÖZSARI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, bilgisayarlarda kullanılan sıvı soğutma sistemlerinin bileşenleri olan mikro kanatçık ve akış odasının sonlu hacimler analiz yöntemi ile akış analizleri yapılarak optimum parametrelere uygun tasarımın prototip üretiminin yapılması ve testler ile doğrulanması hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşabilmek için mikro kanatçık ve akış odasının ticari bir yazılım ile üç boyutlu tasarımları yapılmış ve analiz ortamına aktarılmıştır. Mikro kanatçık bileşeni tasarımı için dört farklı parametre belirlenmiştir. Bu parametreler; kanatçıklar arası mesafe (KAM: 0,1-0,2-0,3 mm), kanatçık yüksekliği (KY: 2,3-2,5-2,7 mm), kanatçık kalınlığı (KK: 0,15-0,3-0,45 mm) ve taban plaka kalınlığıdır (TK: 1,25-1,5-1,75 mm). Gerçekleştirilen akış analizleri sonucunda ortalama mikro kanatçık sıcaklığı (OMKS) incelenmiştir. Konsept tasarımları tamamlanmış olan akış odaları ile analizler sonucu belirlenen mikro kanatçık yapısı sanal ortamda montajlanarak analiz ortamına aktarılmıştır. Bu analizler kapsamında akış odası içerisindeki girdap oluşumları ve sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir. Girdap oluşumlarını minimuma indirmek ve mikro kanatçık üzerinde akış dağılımını dengelemek için belirlenen nihai tasarım üzerinden iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Gerçekleştirilen tasarım, analiz ve tasarım iyileştirme çalışmaları sonrasında mikro kanatçık CNC router benzeri bir tezgâhta işlenerek, akış odası dijital ışık işleme (DLP) teknoloji 3B yazıcı ile üretilmiştir. Daha sonra üretilen bileşenlerle beraber tüm sistem toplanıp Intel işlemcili bir bilgisayara montajlanmış ve performansı test edilmiştir. Akış analizleri sonucunda OMKs için optimum parametreler; KAM 0,1 mm, KY 2,3 mm, KK 0,15 mm ve TK 1,25 mm olarak belirlenmiştir. Üretilebilirlik durumu göz önüne alınarak modelin üretiminde KAM parametresi 0,15 mm olarak uygulanabilmektedir. Akış odası içerisindeki girdap oluşumları ve sıcaklık değerleri için yapılan analizlerde 31,64 °C ile en düşük OMKs değerini veren ve diğer konsept tasarımlara göre daha az girdap oluşumu gözlenen tasarım nihai tasarım olarak belirlenmiştir. Üretimi bu tasarıma göre yapılan sıvı soğutma sisteminin, işlemci %60-%70 performansta çalışırken gerçekleştirilen, performans testlerinde maksimum sıcaklığın 44,7 °C olduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilen modelin performans test sonuçlarının analiz sonuçlarına yaklaştığı ve elde edilen modelin başarılı olduğu ispatlanmıştır.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Bilgisayar, sıvı soğutma sistemleri, mikro kanatçık, akış odası, sonlu hacimler analizi

Sayfa Adedi : 62

Danışman : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

DESIGN, ANALYSIS AND EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF LIQUID COOLING SYSTEMS USED IN COMPUTERS

(M. Sc. Thesis)

Furkan ÖZSARI

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Within the scope of this study, it is aimed to make the prototype production of the design suitable for the optimum parameters and to verify with the tests by making flow analyses of the heatsink and water block, which are the components of the liquid cooling systems used in computers, with the finite volume analysis method. In order to achieve this goal, three-dimensional designs of the heatsink and water block were made with a commercial software and transferred to the analysis environment. Four different parameters were determined for the heatsink component design. These parameters are; distance between fins (DBT: 0,1-0,2-0,3 mm), fin height (FH: 2,3-2,5-2,7 mm), fin thickness (FT: 0,15-0,3-0,45 mm) and the base plate thickness (BPT: 1,25-1,5-1,75 mm). As a result of the flow analyses carried out, the average heatsink temperature (AHT) was examined. With the water blocks whose concept designs have been completed, the heatsink structure determined as a result of the analyses has been transferred to the analysis environment by mounting in the virtual environment. Within the scope of these analyses, vortex formations and temperature values in the water block were observed. Improvements were made on the final design determined to minimize vortex formations and balance the flow distribution on the heatsink. After the design, analysis and design improvement studies, the heatsink was processed on a CNC router-like workbench and the water block was produced with a 3D printer with DLP technology. Afterwards, the whole system, together with the manufactured components, was assembled on a computer with an Intel processor and its performance was tested. Optimum parameters for AHT as a result of flow analysis; DBT was determined as 0,1 mm, FH 2,3 mm, FT 0,15 mm and BPT 1,25 mm. Considering the manufacturability status, the DBT parameter was applied as 0,15 mm in the production of the model. In the analyses made for the vortex formations and temperature values in the water block, the design that gave the lowest AHT value with 31,64 °C and less vortex formation compared to other concept designs was determined as the final design. It has been observed that the maximum temperature of the liquid cooling system, which is produced according to this design, is 44,7 °C in the performance tests performed when the processor is running at 60%-70% performance. It has been proven that the performance test results of the developed model are close to the analysis results and the obtained model is successful.

Science Code : 91438

Key Words : Computer, liquid cooling systems, heatsink, water block, finite volume analysis

Page Number : 62

Supervisor : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

TEŞEKKÜR

Tanıştığımız günden bugüne her türlü maddi manevi desteğini esirgemeyen bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına yön veren çok kıymetli danışmanım Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e, çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen ve tezime sağladığı katkılarından dolayı işverenim Burak ÖZCAN'a, çalışmalarımda şirket altyapısını kullanmama olanak sağlayan Simunes İleri Teknoloji A.Ş.'ye ve teknik destek sağlayan çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Bu günlere gelmemde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, bana duydukları güven, verdikleri destek, gösterdikleri anlayış ve sevgi için kıymetli aileme teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu çalışma kapsamında vermiş olduğu desteklerden ötürü Prof. Dr. Erhan İlhan KONUKSEVEN ve KOSGEB'e teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	7
3.1. Soğutma Sistemleri.....	7
3.1.1. Hava soğutma sistemi	7
3.1.2. Özel döngü (custom-loop) soğutma sistemi	8
3.1.3. Hepsi bir arada (AIO) sıvı soğutma sistemleri	8
3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	10
3.3. Sonlu Hacimler Analizi	12
3.3.1. Sonlu hacim yöntemi	12
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	15
4.1. Parametrik Tasarımlar (Mikro Kanatçık)	15
4.2. Konsept Tasarımlar	17
4.2.1. I. Konsept tasarım.....	17
4.2.2. II. Konsept tasarım.....	17
4.2.3. III. Konsept tasarım	18

	Sayfa
4.2.4. IV. Konsept tasarım	19
4.3. Nihai Tasarım	19
4.4. Analiz Çalışmaları	20
4.4.1. Malzeme bilgisi	21
4.4.2. Sonlu hacimler analizi	22
4.5. Prototip Üretimi.....	24
4.5.1. Mikro kanatçık kesme parametreleri	25
4.5.2. Mikro kanatçık üretimi	25
4.5.3. Akış odası üretimi.....	28
4.5.4. Bileşenlerin montajı.....	29
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
5.1. Mikro Kanatçık Akış Analizleri ve Değerlendirmesi.....	31
5.1.1. OMKS'nin varyans analizi (ANOVA) ile modellenmesi.....	34
5.1.2. OMKS'nin regresyon analizi ile modellenmesi	37
5.2. Konsept Tasarımların Akış Analizleri.....	38
5.2.1. I. Konsept tasarımın analizi ve değerlendirilmesi.....	38
5.2.2. II. Konsept tasarımın analizi ve değerlendirilmesi	40
5.2.3. III. Konsept tasarımın analizi ve değerlendirilmesi	41
5.2.4. IV. Konsept tasarımın analizi ve değerlendirilmesi.....	43
5.3. En Verimli Tasarımın Belirlenmesi.....	44
5.4. Tasarım İyileştirme Çalışmaları	45
5.4.1. I. İyileştirme çalışması.....	45
5.4.2. II. İyileştirme çalışması	47
5.4.3. III. İyileştirme çalışması	49

Sayfa

5.5. Prototip Testlerinde Elde Edilen Bulgular	51
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	55
EKLER.....	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Mikro kanatçık tasarım konfigürasyonları.....	16
Çizelge 4.2. Bakırın sıcaklığa bağlı özgül ısı değerleri	21
Çizelge 4.3. Bakırın sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değerleri.....	21
Çizelge 4.4. Bakırın yoğunluk ve erime sıcaklık değerleri.....	22
Çizelge 4.5. Soğutucu akışkan (Su) termal özellikleri.....	22
Çizelge 4.6. Üretimde kullanılan mikro kanatçık işleme parametreleri	25
Çizelge 5.1. Mikro kanatçık parametrelerinin OMKS'ye etkisinin varyans analiz..... sonucu	35
Çizelge 5.2. Mikro kanatçık parametrelerinin OMKS'ye göre delta istatistiği tablosu..	36
Çizelge 5.3. OMKS için regresyon analizi değerleri	37
Çizelge 5.4. Konsept tasarımların analiz sonuçları.....	44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. a) Hava soğutma sistemi b) Hepsi bir arada (AIO) soğutma sistemi; c) Özel döngü (custom-loop) soğutma sistemi	1
Şekil 3.1. Hava soğutma sistemi çalışma prensibi	7
Şekil 3.2. Custom-loop sistemi çalışma prensibi	8
Şekil 3.3. AIO sıvı soğutma sistem bileşenleri	9
Şekil 3.4. AIO sistemin çalışma prensibi	9
Şekil 3.5. Lagrange yaklaşım modeli	12
Şekil 3.6. Euler yaklaşım modeli	13
Şekil 4.1. Mikro kanatçık tasarım parametreleri	15
Şekil 4.2. Akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli (I. konsept tasarım)	17
Şekil 4.3. Akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli (II. konsept tasarım)	18
Şekil 4.4. Akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli (III. konsept tasarım)	18
Şekil 4.5. Akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli (IV. konsept tasarım)	19
Şekil 4.6. Nihai akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli	20
Şekil 4.7. Nihai tasarımın patlatılmış ve montaj modeli	20
Şekil 4.8. Mikro kanatçık sıvı alan tanımlaması	23
Şekil 4.9. Isı tanımlaması	23
Şekil 4.10. Katı-akışkan mesh görünümü	23
Şekil 4.11. CNC router tezgâh	24
Şekil 4.12. Yüzey işleme prosesi	25
Şekil 4.13. Boşaltma prosesi	26
Şekil 4.14. Kesme Prosesi	26
Şekil 4.15. Kanatçık açma prosesi	27
Şekil 4.16. Prototip mikro kanatçık yapı	27

Şekil	Sayfa
Şekil 4.17. Baskı simülasyonu (örnek parça).....	28
Şekil 4.18. Ürünün baskıdan çıktığı ilk hali (örnek parça)	28
Şekil 4.19. Baskıdan sonra temizlenmiş akış odası prototipi.....	28
Şekil 4.20. Prototip sıvı soğutma sistemi.....	29
Şekil 4.21. Prototip ürünün işlemci üzerine montajlı hali	29
Şekil 5.1. OMKS yakınsama grafiği.....	31
Şekil 5.2. Optimum mikro kanatçık tasarımın sıcaklık dağılım konturu.....	32
Şekil 5.3. 1,25 mm TK'da KAM, KY ve KK parametrelerine bağlı olarak OMKS'nın değişimi	33
Şekil 5.4. 1,5 mm TK'da KAM, KY ve KK parametrelerine bağlı olarak OMKS'nın değişimi	33
Şekil 5.5. 1,75 mm TK'da KAM, KY ve KK parametrelerine bağlı olarak OMKS'nın değişimi	34
Şekil 5.6. OMKS ana etki grafikleri	36
Şekil 5.7. Analiz yakınsama grafiği (I. konsept tasarım).....	38
Şekil 5.8. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (I. konsept tasarım)	39
Şekil 5.9. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (I. konsept tasarım)	39
Şekil 5.10. Analiz yakınsama grafiği (II. konsept tasarım)	40
Şekil 5.11. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (II. konsept tasarım).....	40
Şekil 5.12. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (II. konsept tasarım).....	41
Şekil 5.13. Analiz yakınsama grafiği (III. konsept tasarım)	41
Şekil 5.14. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (III. konsept tasarım).....	42
Şekil 5.15. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (III. konsept tasarım)	42
Şekil 5.16. Analiz yakınsama grafiği (IV. konsept tasarım).....	43
Şekil 5.17. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (IV. konsept tasarım)	43
Şekil 5.18. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (IV. konsept tasarım)	44

Şekil	Sayfa
Şekil 5.19. I. iyileştirme çalışması.....	45
Şekil 5.20. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (I. iyileştirme çalışması)	46
Şekil 5.21. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (I. iyileştirme çalışması).....	46
Şekil 5.22. II. iyileştirme çalışması.....	47
Şekil 5.23. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (II. iyileştirme çalışması).....	48
Şekil 5.24. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (II. iyileştirme çalışması)	48
Şekil 5.25. III. iyileştirme çalışması	49
Şekil 5.26. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (III. iyileştirme çalışması).....	50
Şekil 5.27. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (III. iyileştirme çalışması).....	50
Şekil 5.28. Sıcaklık testi (1).....	51
Şekil 5.29. Sıcaklık testi (2).....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışma kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Alan (m^2)
$\vec{a}$	İvme Alanı (m/s^2)
DC	Doğru Akım (A)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
P	Basınç (Pa)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
Re	Reynold Sayısı
t	Zaman (s)
u	X Eksenindeki Hız (m/s)
v	Y Eksenindeki Hız (m/s)
V	Hız (m/s)
$\vec{V}$	Hız Alanı (m/s)
z	Yükseklik (mm)
w	Z Eksenindeki Hız (m/s)
μ	Dinamik Viskozite (Pa.s)
ΔU	İç Enerjideki Değişim (J)
ΔK	Kinetik Enerjideki Değişim (J)
ΔE	Toplam Enerjideki Değişim (J)

Kısaltmalar

Açıklamalar

3B	3 Boyutlu
AIO	Hepsi Bir Arada (All-In-One)
ANOVA	Varyans Analizi (Analysis of Variance)
CNC	Bilgisayar Destekli Sayısal Kontrol (Computer Numerical Control)

Kısaltmalar**Açıklamalar****CPU**

Merkezi İşlem Birimi (Central Process Unit)

DLP

Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing)

HAD

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

KAM

Kanatçıklar Arası Mesafe

KK

Kanatçık Kalınlığı

KOSGEBKüçük ve Orta Ölçekli İşletmeleri Geliştirme ve
Destekleme İdaresi Başkanlığı**KY**

Kanatçık Yüksekliği

OMKS

Ortalama Mikro Kanatçık Sıcaklığı

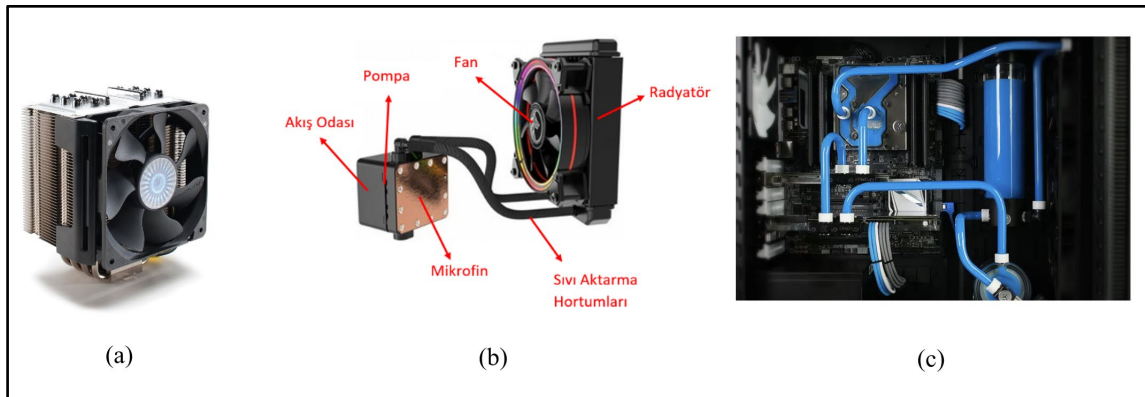
TK

Taban Plaka Kalınlığı

1. GİRİŞ

Elektronik teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, elektronik cihazlar günlük hayatımızda önemli bir yer almıştır. Bu cihazlardan maksimum verimi alabilmek için bileşenlerinde oluşan sıcaklık değerlerini optimum düzeyde tutmak gerekir. Elektronik bileşenlerin çalışma sıcaklığı istenen sıcaklık seviyesini aşabilir. Bu durum cihazda performans kayıplarına hatta elektronik bileşenin yanmasına sebep olabilir. Bu nedenle, ısı transfer hızını arttırmak ve bileşen sıcaklığını istenen çalışma seviyesinde tutmak, elektronik bileşenlerin güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamada önemli bir rol oynar.

Elektronik bileşenleri soğutmada çeşitli yöntemler vardır (Şekil 1.1). Bu yöntemler hava soğutma sistemi ve custom-loop, hepsi bir arada (AIO) sıvı soğutma sistemleridir [1-3]. Hava soğutma sistemi, taban plaka, ısı boruları ve fandan oluşan, maliyeti diğer soğutma sistemlerine göre düşük olan, uygulaması kolay olan sistemlerdir. Özel döngü (custom-loop) soğutma sistemi, esnek veya sert borulamaya sahip, kompleks (AIO'ya göre) ve kasa türüne göre farklı kurulumlar gerektiren sistemlerdir. Kurulumun yetkili bir kişi tarafından yapılması gerekmektedir. Görsel çekiciliği ve maliyeti yüksektir. Hepsi bir arada (AIO) sıvı soğutma sistemi ise pompa, akış odası ve mikro kanatçık bileşenlerinin bir arada bulunduğu, özel döngü (custom-loop) sistemlere göre daha az yer kaplayan, basit sistemlerdir. Kullanıcı, kurulumu kendisi yapabilir. Daha az bakım gerektirir ve maliyeti özel döngü (custom-loop) sistemlere göre azdır [4, 5].



Şekil 1.1. a) Hava soğutma sistemi b) Hepsi bir arada (AIO) soğutma sistemi; c) Özel döngü (custom-loop) soğutma sistemi [1-3]

Çalışmanın amacı, kolay üretilebilir bir sıvı soğutma sistemi tasarımının yapılması, tasarımların analizler ile doğrulanarak iyileştirme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve prototip ürünün gerçek çalışma ortamında test edilerek başarının ortaya konulmasıdır. Bu kapsamda hepsi bir arada (AIO) soğutma sistemini oluşturan bileşenlerden mikro kanatçık ve akış odası bileşenleri üzerinde durulmuştur. Bu bileşenler için 3B modeller oluşturulup sonlu hacimler yöntemi ile akış analizleri gerçekleştirilmiş olup analizler sonucunda akış odası içerisindeki girdap oluşumları ve sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir. Analizler ile tasarımı doğrulanan modelin prototip üretimi yapılmıştır. Üretilen bileşenlerle beraber tüm sistem toplanıp Intel işlemcili bir bilgisayara montajlanmıştır. İşlemci %60-%70 performans aralığında çalışırken sıcaklık testi gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde farklı sektörler için kullanılan sıvı soğutma sistemleri için mikro kanatçık yapı özelinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Topçu [6], kanatçık yüksekliği (5 mm, 5,5 mm, 5,7 mm), kanatçık kalınlığı (1,2 mm, 1,6 mm, 1,8 mm, 2 mm) parametreleri ve su, bakır oksit-su ($\text{CuO-H}_2\text{O}$), grafen oksit ($\text{GO-H}_2\text{O}$) nanoakışkanları kullanılarak CPU'da üretilen ısıyı ve soğutma performansını incelemiştir. Bu parametreler ışığında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. En iyi soğutma performansı; 5,7 mm kanatçı yüksekliği, 1,8 mm kanatçık kalınlığı ve $\text{CuO-H}_2\text{O}$ nanoakışkanı kullanılması sonucu elde edilmiştir. Güder [7], daire, kare ve üçgen kanatçıkların ısı transfer performanslarını incelemiştir. Mikro kanatçık yapıya 2000W/m^2 ısı akısı uygulanmıştır. Akışkanın giriş sıcaklığı 300K olarak belirlenmiş ve çıkış şartı atmosferik basınç seçilmiştir. Kare ve üçgen geometrilere sahip kanatçıklarda ısı transferinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Öztürk [8], mikro kanatçıların zorlanmış taşınım ile soğutulmasını hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımlarını kullanarak incelemiştir. Sayısal ağdan bağımsız ve yakınsayan modeller tutarlı sınır koşullarıyla analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları deneysel verilerle doğrulanmıştır. Koyuncuoğlu [9], yapmış olduğu çalışmada elektronik sistemlerde kullanılabilecek mikrokanal ısı alıcısı tasarlamış, üretmiş ve deneysel olarak test etmiştir. Malzeme olarak bakır ve polimer (parilen) malzemeleri kullanılmıştır. Parilenin ısı iletkenliğinin düşük olmasından dolayı daha zayıf bir ısı transferi performansı göstermiştir. Bu yüzden bakır malzeme seçilmiştir. Düzyer [10], çalışmada otomotiv LED aydınlatma ürünlerinin soğutulması kapsamında farklı boyutlarda (5 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm) kanatçık tasarımları gerçekleştirmiştir. Tasarımları gerçekleştirilen kanatçık yapıların sanal ortamda analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda istenilen soğutmayı sağlayan yapının (10 mm) prototip üretimi yapıp testleri gerçekleştirilmiştir. Köse [11], mikro kanallı ısı emicilerin HAD analizlerini gerçekleştirmiştir. Suyun sıcaklığa bağlı olarak vizkozite değişimi gözlemlenmiştir. Isı emiciler için geometrik şekil parametreleri (dikdörtgen, yamuk, üçgen) tespit edilmiştir. Parametrelere göre gerçekleştirilen analizler sonucunda regresyon analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kanatçık yapı için en uygun geometrinin dikdörtgen olduğu görülmüştür. R.Mohan ve arkadaşları [12], kanatçık yüksekliği (15 mm, 30 mm, 50 mm) kanatçıklar arası mesafe (1,5 mm, 2,5 mm, 4,5 mm) ve kanatçık sayısı parametrelerini dikkate alarak; hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları yardımıyla bu parametrelerin mikro kanatçık üzerindeki ısı dağılımını farklı

kombinasyonlarla incelemiştir. Aynı zamanda fan, mikro kanatçık, ısıtıcı ve termokupl ekipmanlarını kullanarak bir deney düzeneği hazırlamışlardır. R.Mohan ve arkadaşının bir diğer çalışmasında [13], taban plaka kalınlığı (2,5 mm, 5 mm), kanatçık geometrisi (silindirik ve ince levha) ve mikro kanatçık malzemesi (bakır, alüminyum) parametrelerini dikkate alarak; hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları sonucunda elde ettikleri çıktılar ile kurmuş oldukları deney düzeneğinde yaptıkları çalışmaların çıktılarını karşılaştırmışlardır. Freegah ve arkadaşları [14], kanatçıklar arasına radyus vererek ve kanatçık yüzeylerine radyuslu ek parça ekleyerek ısı transfer yüzeyini artırmayı amaçlamışlardır. Öztürk ve arkadaşı [15], 3 farklı kanatçık tasarımı yaparak ve farklı ısı kaynakları tanımlayarak (50 W, 100 W) mikro kanatçıklar üzerindeki sıcaklık dağılımını incelemiştir.

Şahin [16], farklı geometrilere sahip soğutma blokları oluşturup akış ve ısı transferi performans değişimini incelemiştir. Soğutucu sıvı olarak saf su ve Al_2O_3 /su nanoakışkanı kullanmıştır. Sıvı soğutma bloğu merkezi işlem birimi (GPU) için kullanılmış olup, maksimum performansta çalıştığı kabul edilmiştir. Termal tasarım gücü (TDP) 250W ve akışkan sıcaklığı 20 °C seçilmiştir. Gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucunda, GPU yüzeyinin ortalama ve maksimum sıcaklık değerleri, basınç düşüşleri ve ısı taşınım katsayı değerleri kıyaslanmıştır.

Geleneksel imalat yöntemlerinden birisi olan pres dökümün dezavantajlarından birisi üretimden sonra gözenekli bir yapının ortaya çıkmasıdır. Sce ve arkadaşı [17], yüksek yoğunluklu dökümün, geleneksel döküme göre avantajlarını, soğutma performansına etkilerini incelemiştir. Bu yöntem ile geleneksel pres döküm ile elde edilemeyen kanatçık geometrileri (eğik ve eliptik kanatçıklar, radyal kanatçık dizileri) sayesinde termal performansta artış görülmüştür.

Sıyırma (skiving) mikro kanatçık üretmek için kullanılan etkili bir yöntem olarak bilinir. Bu yöntem ile üretilen mikro kanatçıklar, tabanın üst kısmının hassas bir şekilde dilimlenmesi, tabana dik olduğu yere geri katlanması ve kanatçıklar oluşturmak için düzenli aralıklarla tekrarlanmasıyla üretilir. Sıyırma yöntemi ile üretilen mikro kanatçıklar, ekstrüzyon metodolojileri kullanılarak üretilebilir olanlardan daha yüksek kanat yoğunluklarına izin verdiği için yüksek düzeyde optimize edilmiş soğutma sunar. Yapıştırılmış veya lehimli kanatlı mikro kanatçıklar gibi ısı akışını kısıtlayan bir arayüz bağlantısına sahip değildir. Bu

yöntemle üretilen mikro kanatçıklar tek parça malzemeden yapılır ve taban ile kanatlar arasında bağlantı olmadığı için daha düşük termal direnç sunar. Bu nedenle, sıyırma ile üretilen mikro kanatçık verimliliği, geleneksel yöntemlerle üretilenden daha yüksektir. Ekstrüzyon alüminyum ile karşılaştırıldığında, sıyırma yöntemi ile mikro kanatçık imalatı, daha fazla tasarım esnekliği ve daha hızlı prototipleme sağlar. Her bir kanatçık aynı takım kullanılarak ayrı ayrı kesilir ve bu da daha düşük takım maliyeti sağlar [18, 19]. Yang [20], farklı imalat yöntemleriyle (ekstrüzyon ve sıyırma) ile üretilmiş ısı emicilerin hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerini yapmış, analiz sonuçlarını kurmuş olduğu deney düzeneğiyle test etmiştir. İki yöntemle elde edilen ısı emiciler karşılaştırıldığında neredeyse aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu yüzden kullanım amacına ve üretim maliyetine göre iki yöntemin de kullanılabileceği öngörülmüştür.

Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle beraber geleneksel imalat yöntemlerinin dışında eklemeli imalat popüler hale gelmiştir. Nafis ve arkadaşları [21], geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi zor olan geometrilerin eklemeli imalat ile üretilmesinin avantaj ve dezavantajlarını araştırmışlardır. Malzeme maliyeti, yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklilik dezavantajlar arasında yer alırken ısı transferi açısından yüksek performans göstermesi avantaj olarak görülmüştür.

Bu çalışmada; bilgisayarlarda kullanılan all-in-one tipinde bir sıvı soğutma sisteminin tasarlanması, analizlerinin gerçekleştirilmesi, nihai model üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılarak prototip bir ürünün ortaya çıkarılması ve bu prototipin test çalışmasının yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, kanatçıklar arası mesafe (KAM), kanatçık kalınlığı (KK), kanatçık yüksekliği (KY) ve taban plaka kalınlığı (TK) parametreleri referans alınarak parametrik mikro kanatçık tasarımları ve farklı akış odası konsept tasarımları yapılmıştır. Parametrik tasarımların sonlu hacimler analiz yöntemi ile mikro akış analizleri gerçekleştirilip KAM, KY, KK, TK – ortalama mikro kanatçık sıcaklığı (OMKS) ilişkisi incelenmiştir. Akış odası ve mikro kanatçık özelinde iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Sanal ortamda tasarımı, analizi ve iyileştirme çalışmaları tamamlanan modelin prototip üretimi gerçekleştirilip termal kamera ile sıcaklık testi gerçekleştirilmiştir.

Literatürde, R.Mohan ve arkadaşının çalışmasında kullanmış olduğu yöntem, parametreler ve simülasyon sonuçları bu çalışma ile benzerlik göstermektedir. Literatürden farklı olarak bu çalışmada, mikro kanatçık yapının kullanılacağı sistem göz önüne alınarak, kanatçık

parametreleri (KY, KK, KAM, TK) boyutsal olarak küçük seçilmiştir. Bu sebeple mikro akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda mikro kanatçık yapı bir akış odası ile birleştirilerek akış analizleri gerçekleştirilmiş, girdap oluşumları ve mikro kanatçık yapı üzerinde sıcaklık dağılımları gözlemlenmiştir. Kanatçık oluşturma işleminde dairesel testere kullanılarak farklı bir teknik kullanılmıştır. Bu sayede taban plaka (base plate) ve kanatçık yapı arasında herhangi bir yapıştırma işlemi yapılmadığı için verimliliğin yüksek olması amaçlanmıştır.

3. KURAMSAL TEMELLER

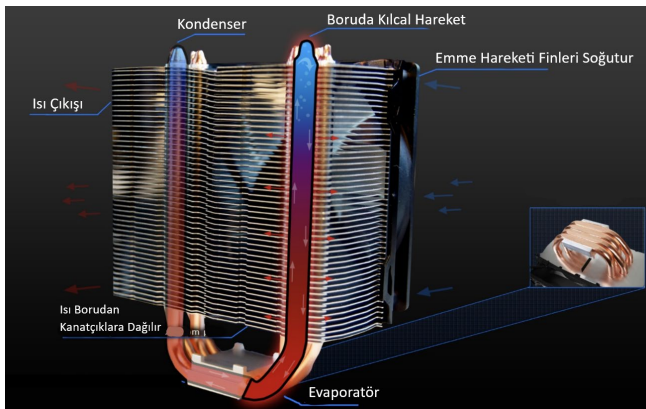
Bu bölümde AIO sıvı soğutma sistemi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) teorisi, korunum denklemleri ve sonlu hacimler yöntemi anlatılmıştır.

3.1. Soğutma Sistemleri

Bilgisayarların stabil performansta çalışabilmesi için işlemcide oluşan fazla ısıyı farklı yöntemler ile atması gerekir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Kullanıcı, ihtiyaçları doğrultusunda sistemine uygun olan yöntemi seçmelidir.

3.1.1. Hava soğutma sistemi

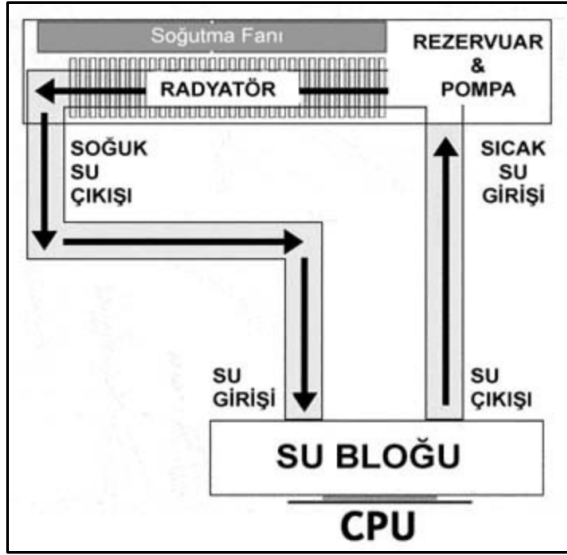
Yaygın olarak kullanılan, basit ve ucuz olan soğutma sistemidir. Genellikle günlük kullanım (ağır iş gerektirmeyen sistemler) için uygundur. Sistemde ısı yayıcı bakır borular, alüminyum plakalar ve fan bulunur. Termal iletkenliğinin yüksek olmasından dolayı işlemciyle temas halinde olan kısımda genellikle bakır malzeme tercih edilir. İşlemcide oluşan ısı, bakır borular yardımıyla geniş alüminyum plakalara iletilir ve fan yardımıyla hava dolaşımı sağlanarak soğutma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 3.1). Isı iletkenliği bakırdan yaklaşık 1,5 kat daha fazla olan karbon nano tüpler de bu sistemlerde kullanılabilir. Ancak bu durum maliyetin artmasına sebep olur [22].



Şekil 3.1. Hava soğutma sistemi çalışma prensibi [22]

3.1.2. Özel döngü (custom-loop) soğutma sistemi

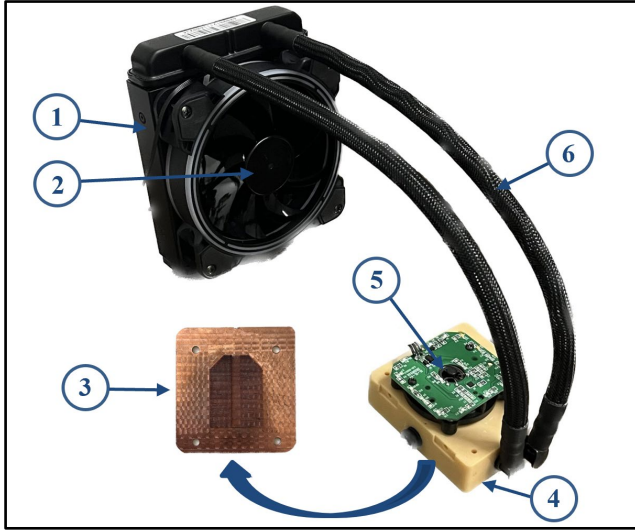
Hava soğutma sistemlerinin yetersiz kaldığı, yüksek performans gerektiren sistemlerde kullanılır. Hava soğutma sistemine göre daha kompleks ve maliyetlidir. Özel kurulum gerektirir. Sistem, su bloğu, pompa, radyatör ve fan bileşenlerinden oluşur (Şekil 3.2). Her bileşen kasa içerisinde farklı konumlara montajlanır. Bu yüzden sistem geniş yer kaplamaktadır. Bu sistemlerde su bazlı soğutucu sıvı sayesinde ısı sistemden uzaklaştırılır. Soğutucu sıvı su bloğundan geçerken işlemcideki fazla ısıyı alır radyatöre geri döner. Döngü devir daim pompa sayesinde gerçekleşir [23, 24].



Şekil 3.2. Custom-loop sistemi çalışma prensibi [23]

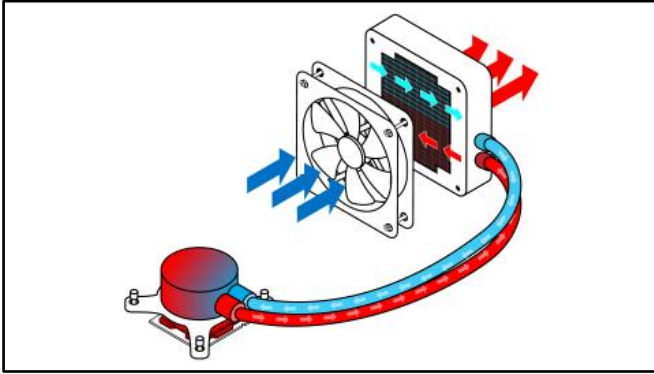
3.1.3. Hepsi bir arada (AIO) sıvı soğutma sistemleri

AIO sıvı soğutma sistemleri Şekil 3.3'te görüldüğü üzere radyatör (1), fan (2), mikro kanatçık (3), akış odası (4), pompa (5) ve sıvı aktarma hortumları (6) olmak üzere toplamda 6 temel bileşenden oluşmaktadır [25].



Şekil 3.3. AIO sıvı soğutma sistem bileşenleri

Şekil 3.4'te sistemin çalışma prensibi şematik bir şekilde gösterilmiştir. Pompanın devir daim ettiği soğutma sıvısı radyatör içerisinde dolaşarak radyatöre bağlı fan yardımı ile soğutulur. Radyatörün bir girişi pompa üzerindeki sıcak sıvı çıkışına diğeri de soğuk sıvı girişine bağlıdır. Akış odası ve mikro kanatçıktan oluşan yapı, ısı kaynağı üzerine montajlanarak soğutma işlemi gerçekleştirilir [4].



Şekil 3.4. AIO sistemin çalışma prensibi [4]

Mikro kanatçıklar soğutma sistemlerinde ısı kaynağı (CPU) ile temas halinde olan, oluşan ısıyı emen bakır veya alüminyum malzemeden üretilen yapılardır. Mikro kanatçıklar ısı kaynağında oluşan ısıyı iletim ve zorlanmış taşınım ısı transferi mekanizmalarıyla ekipmanlardan uzaklaştırır. Böylece ekipmanların çalışma ömrünün ve performansının artmasını sağlar [26].

Endüstride yaygın olarak bakır ve alüminyum malzemelerden üretilen mikro kanatçıklar kullanılmaktadır. Uygulama alanlarına göre bu malzemelerden üretilen mikro kanatçıklar birbirine göre farklı avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlar şunlardır; alüminyumun yoğunluğu (2700 kg/m^3) bakıra (8900 kg/m^3) göre düşük olduğu için hafiftir. Alüminyumun termal iletkenliği (90 W/mK) diğer metallere göre (demir: 55 W/mK , çelik: 36 W/mK , kalay: 50 W/mK) daha yüksektir. Alüminyum mikro kanatçıklar, fotovoltaik endüstrisinde, elektrikli araçlarda, invertörlerde, led ışıklarda, iletişim ürünlerinde ve benzeri alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [27]. Bakır (385 W/mK), alüminyumdan (90 W/mK) daha iyi ısı iletkenliğine sahiptir. Dezavantajı ise ağırlık ve maliyettir. Bakır ısı iletkenliğinin ve korozyon direncinin öneminin, ağırlık tasarrufundan daha ağır bastığı yerlerde, genellikle işlemcilerde, yüksek özellikli çiplerde ve sunucularda (server) kullanılır [28].

3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkan fiziğini bilgisayar tabanlı ticari bir yazılım kullanarak simüle eden ve ilgili olayları tahmin eden mühendislik yöntemidir. Bu tahminleri yapabilmek için çeşitli korunum denklemlerinden (süreklilik denklemi, momentum denklemleri, enerji denklemi) yararlanır [29].

İlk olarak 1930’larda A.Thom [30], bir silindir etrafındaki akış üzerine çalışmalar yapmıştır. 1950’li yıllarda M. Kawaguti [31], Reynold sayısını dikkate alarak bir silindir etrafındaki akış üzerine çalışmış, önemli sayısal yöntemler elde etmiştir. 1990’larda teknolojinin ilerlemesiyle beraber birçok ticari yazılım geliştirilmiştir.

Ölçülmesi veya gözlemlenmesi zor, ölçülme imkânı olup pahalı deney düzenekleri gerektiren uygulamalar HAD sayesinde incelenir. HAD, sonlu hacimler yöntemi, sonlu farklar yöntemi veya sonlu elemanlar yöntemlerinden birini kullanarak analitik çözümü sayısal çözüme çevirir. Bu çalışma kapsamında sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır.

Akışkanlar dinamiğinde basınç, hız ve yükseklik arasındaki bağıntı Bernoulli Yasası ile açıklanır. Eş. 3.1’de akışkan basıncı (P_1, P_2), akışkan hızını (V_1, V_2) ve yükseklik (Z_1, Z_2) ile gösterilmiştir [32]. Bernoulli Yasasında viskozitenin sıfır olduğu yani akışkanın hareketi sebebiyle bir enerji kaybı yaşamayacağı, özkütlenin her zaman aynı kaldığı ve kararlı hal (zamana bağlı olmayan) durumu varsayılır. Bu yüzden HAD yazılımlarında Bernoulli

Yasası yerine Navier – Stokes denklemleri kullanılır [33].

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (3.1)$$

Süreklilik denklemi

Giren akışkanın kütleli debisi ile çıkan akışkanın kütleli debisi aynıdır [34]. Eş. 3.2’de yoğunluk (ρ), kesit alanı (A_1, A_2), akışkan hızı (V_1, V_2) ile ifade edilmiştir.

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad (3.2)$$

Momentum denklemleri

Newton’un ikinci yasasına göre uzaydaki hızlanmış bir cismin üzerine herhangi bir etki olmadığı takdirde hızını korumaya devam edecektir [34]. Eş. 3.3-3.5’te yoğunluk (ρ), x eksenindeki hız (u), y eksenindeki hız (v), z eksenindeki hız (w), kinematik viskozite (μ), zaman (t) ve Reynolds sayısı (Re) ile ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} + \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} + \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} + \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (3.5)$$

Enerji denklemi

Termodinamiğin birinci kanununa göre bir sistemin iç enerjisindeki değişim miktarı, o sisteme ilave edilen ısı miktarı ile sistemin çevresine uyguladığı iş arasındaki farka eşittir.

Bir radyatör içerisindeki akışın ürettiği enerji ya da dışarıya aktarılmakta olan enerji havaya toplamda aynı miktarda aktarılmaktadır. Kısacası, iki taraftaki entalpiler birbirine eşittir [34]. Eş. 3.6’da iç enerji (ΔU), kinetik enerji (ΔK), toplam enerji (ΔE) ve yapılan iş (W) ile ifade edilmiştir.

$$W = \Delta U + \Delta K = \Delta E \quad (3.6)$$

3.3. Sonlu Hacimler Analizi

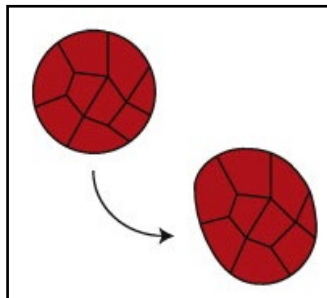
Bu çalışma kapsamında optimum değerleri veren mikro kanatçık ve akış odası yapılarını belirlemek için sonlu hacimler analiz çalışmaları yapılmıştır.

3.3.1. Sonlu hacim yöntemi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları sonlu elemanlar yöntemiyle veya sonlu hacimler yöntemi ile çalışırlar. Bu yöntem kısmi diferansiyel denklemlerin cebirsel denklemler ile çözülmesidir. Kısmi diferansiyel denklemlerde sapma terimi içeren hacim integralleri, sapma teoremi ile yüzey integrallerine dönüştürülmektedir [35].

Lagrange yaklaşımı

Her bir akışkan parçacığının hareketini ayrı ayrı izleme yöntemidir. Her bir partikülün uzaydaki hızının, ivmesinin ya da yer değiştirmesinin incelenmesini sağlar. Partiküller çok yol almıyorsa bu yöntem ile çalışmak avantaj sağlayabilir [36-38]. Lagrange yaklaşımında Şekil 3.5’de görüldüğü üzere düğümlerin geçici olarak malzemeye sabitlendiği ve elemanların malzeme ile birlikte şekil değiştirdiği varsayılmaktadır [39].



Şekil 3.5. Lagrange yaklaşım modeli [38]

Euler yaklaşımı

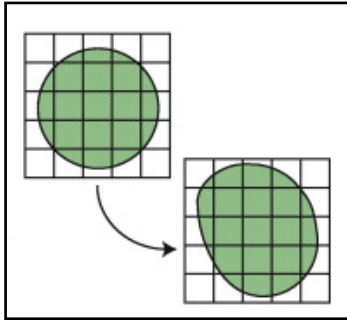
Euler yaklaşımı ile akışkanın hareket ettiği bir akış bölgesi veya kontrol hacmi belirlenir (Şekil 3.6). Böylece sabit kütleli akışkan parçacıklarının konum ve hızlarının takibine gerek duyulmaz. Bunun yerine kontrol hacmi içerisinde yer alan basınç alanı, hız alanı ve ivme alanı gibi alan değişkenleri tanımlanır [36-38]. Euler yaklaşımı ile gerçekleştirilen analizler büyük deformasyonlar içeren akış problemlerinde tercih edilir.

Eş. 3.7-3.9'da basınç alanı (P), hız alanı (V), ivme alanı (a) ile gösterilmiş olup (x, y, z) kartezyen koordinatı, (t) zamanı ifade etmektedir. Bu yaklaşımda, lagrange yaklaşımında olduğu gibi her bir partikül tek tek incelenmediği için analiz süresi açısından bir kazanç sağlanmaktadır [39].

$$P = P(x, y, z, t) \quad (3.7)$$

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t) \quad (3.8)$$

$$\vec{a} = \vec{a}(x, y, z, t) \quad (3.9)$$



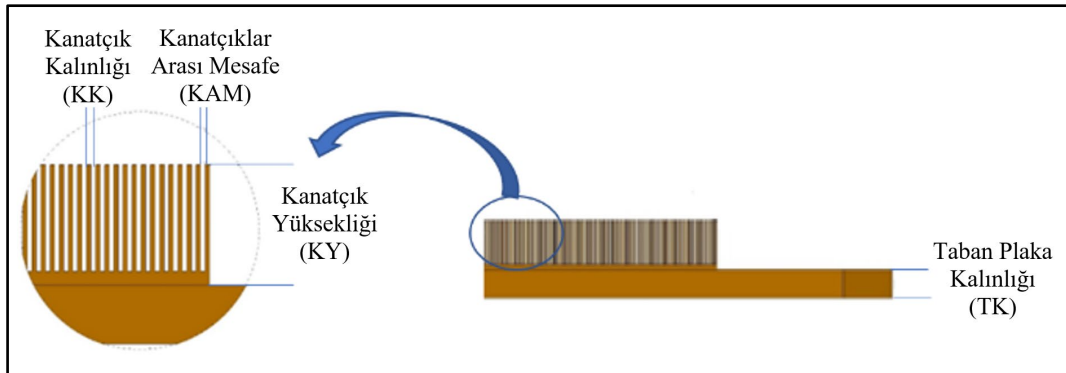
Şekil 3.6. Euler yaklaşım modeli [38]

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında akış odası ve mikro kanatçık yapılarının konsept tasarımları gerçekleştirilmiştir. Konsept tasarımlar akış analizlerine tabi tutularak mikro kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı ve akış odası içerisindeki girdap oluşumları incelenip nihai tasarım belirlenmiştir. Belirlenen nihai tasarım üzerinden tasarım iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Analizler ve tasarım iyileştirme çalışmaları sonucunda optimum modelin prototip üretimleri gerçekleştirilmiştir. Prototip ürün oluştuktan sonra test cihazları ile sıcaklık ve ölçü kontrolleri yapılmıştır.

4.1. Parametrik Tasarımlar (Mikro Kanatçık)

Mikro kanatçık tasarımında termal iletkenlik önemli bir faktördür. Şekil 4.1’de gösterilen kanatçıklar arası mesafe (KAM), kanatçık kalınlığı (KK), kanatçık yüksekliği (KY) ve taban plaka kalınlığı (TK) gibi parametreler mikro kanatçık tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlardır. Bu kapsamda KAM: 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, KY: 2,3 mm, 2,5 mm, 2,7 mm, KK: 0,15 mm, 0,3 mm, 0,45 mm ve TK: 1,25 mm, 1,5 mm, 1,75 mm olmak üzere tasarım için 4 farklı parametre belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Mikro kanatçık tasarım parametreleri

KAM, KY, KK ve TK parametrelerinin ortalama mikro kanatçık sıcaklığına (OMKS) etkisini incelemek için oluşturulan konfigürasyonlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Mikro kanatçık tasarım konfigürasyonları

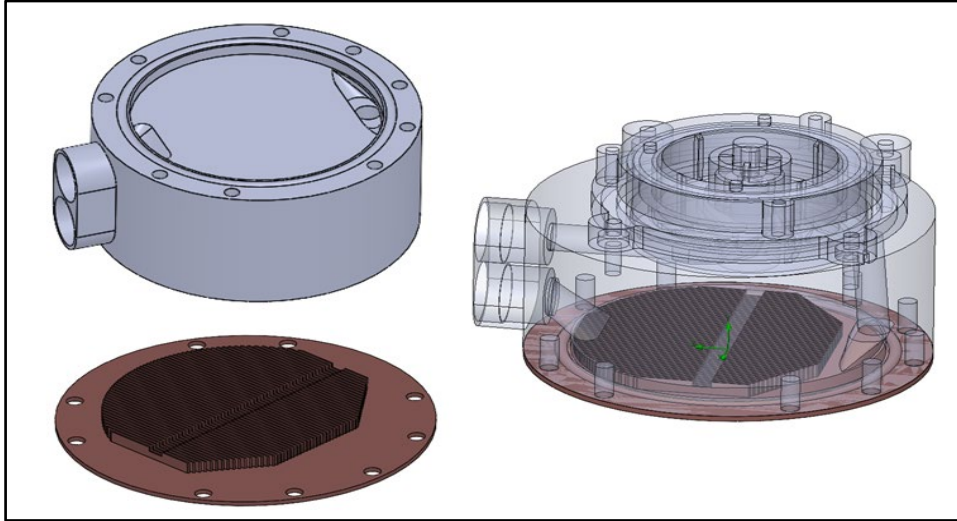
Konfigürasyon	TK (mm)	KK (mm)	KAM (mm)	KY (mm)	Konfigürasyon	TK (mm)	KK (mm)	KAM (mm)	KY (mm)
1	1,25	0,15	0,1	2,3	42	1,5	0,3	0,2	2,7
2	1,25	0,15	0,1	2,5	43	1,5	0,3	0,3	2,3
3	1,25	0,15	0,1	2,7	44	1,5	0,3	0,3	2,5
4	1,25	0,15	0,2	2,3	45	1,5	0,3	0,3	2,7
5	1,25	0,15	0,2	2,5	46	1,5	0,45	0,1	2,3
6	1,25	0,15	0,2	2,7	47	1,5	0,45	0,1	2,5
7	1,25	0,15	0,3	2,3	48	1,5	0,45	0,1	2,7
8	1,25	0,15	0,3	2,5	49	1,5	0,45	0,2	2,3
9	1,25	0,15	0,3	2,7	50	1,5	0,45	0,2	2,5
10	1,25	0,3	0,1	2,3	51	1,5	0,45	0,2	2,7
11	1,25	0,3	0,1	2,5	52	1,5	0,45	0,3	2,3
12	1,25	0,3	0,1	2,7	53	1,5	0,45	0,3	2,5
13	1,25	0,3	0,2	2,3	54	1,5	0,45	0,3	2,7
14	1,25	0,3	0,2	2,5	55	1,75	0,15	0,1	2,3
15	1,25	0,3	0,2	2,7	56	1,75	0,15	0,1	2,5
16	1,25	0,3	0,3	2,3	57	1,75	0,15	0,1	2,7
17	1,25	0,3	0,3	2,5	58	1,75	0,15	0,2	2,3
18	1,25	0,3	0,3	2,7	59	1,75	0,15	0,2	2,5
19	1,25	0,45	0,1	2,3	60	1,75	0,15	0,2	2,7
20	1,25	0,45	0,1	2,5	61	1,75	0,15	0,3	2,3
21	1,25	0,45	0,1	2,7	62	1,75	0,15	0,3	2,5
22	1,25	0,45	0,2	2,3	63	1,75	0,15	0,3	2,7
23	1,25	0,45	0,2	2,5	64	1,75	0,3	0,1	2,3
24	1,25	0,45	0,2	2,7	65	1,75	0,3	0,1	2,5
25	1,25	0,45	0,3	2,3	66	1,75	0,3	0,1	2,7
26	1,25	0,45	0,3	2,5	67	1,75	0,3	0,2	2,3
27	1,25	0,45	0,3	2,7	68	1,75	0,3	0,2	2,5
28	1,5	0,15	0,1	2,3	69	1,75	0,3	0,2	2,7
29	1,5	0,15	0,1	2,5	70	1,75	0,3	0,3	2,3
30	1,5	0,15	0,1	2,7	71	1,75	0,3	0,3	2,5
31	1,5	0,15	0,2	2,3	72	1,75	0,3	0,3	2,7
32	1,5	0,15	0,2	2,5	73	1,75	0,45	0,1	2,3
33	1,5	0,15	0,2	2,7	74	1,75	0,45	0,1	2,5
34	1,5	0,15	0,3	2,3	75	1,75	0,45	0,1	2,7
35	1,5	0,15	0,3	2,5	76	1,75	0,45	0,2	2,3
36	1,5	0,15	0,3	2,7	77	1,75	0,45	0,2	2,5
37	1,5	0,3	0,1	2,3	78	1,75	0,45	0,2	2,7
38	1,5	0,3	0,1	2,5	79	1,75	0,45	0,3	2,3
39	1,5	0,3	0,1	2,7	80	1,75	0,45	0,3	2,5
40	1,5	0,3	0,2	2,3	81	1,75	0,45	0,3	2,7
41	1,5	0,3	0,2	2,5					

4.2. Konsept Tasarımlar

Çalışma kapsamında 4 farklı akış odası ve mikro kanatçık konsept tasarımları gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. I. Konsept tasarım

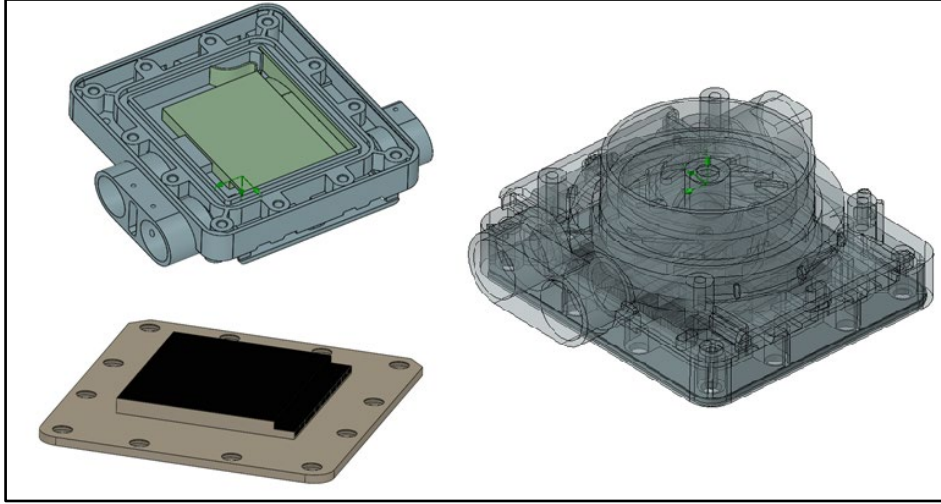
Giriş ve çıkış portları alt alta, soğutucu sıvı mikro kanatçığın arka yüzeyine eğimli gelecek şekilde bir konsept tasarım gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2). Mikro kanatçık üzerinden geçen soğutucu sıvı dağılımının düzenli olabilmesi için mikro kanatçık yapı üzerine kanal açılmıştır.



Şekil 4.2. Akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli (I. konsept tasarım)

4.2.2. II. Konsept tasarım

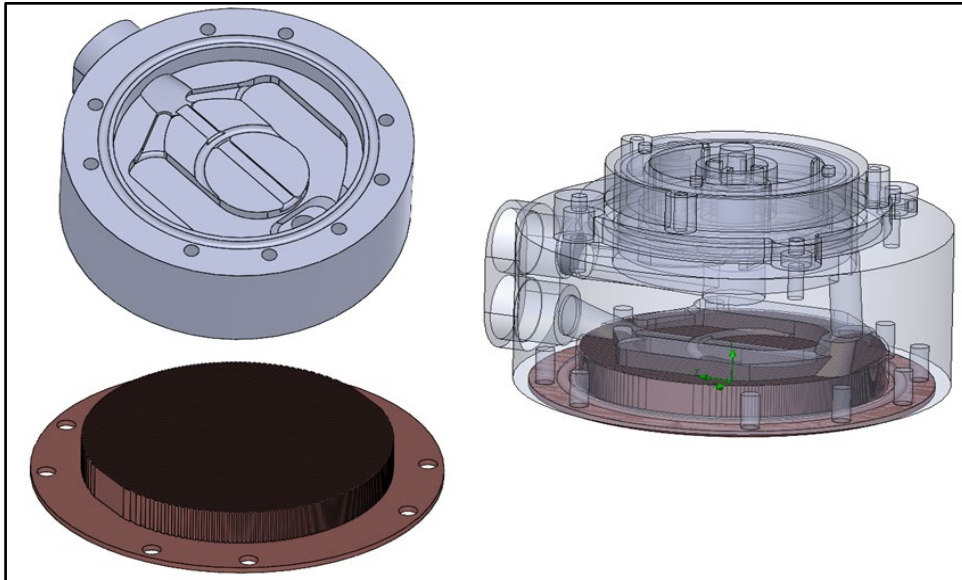
Basınç farkını minimize edebilmek için giriş ve çıkış portları yan yana olacak şekilde, mikro kanatçıkta oluşan sıcaklığı minimuma indirebilmek için akış odası içerisine sıvı yönlendirici bir parça tasarlanmıştır (Şekil 4.3). Sıvı yönlendiricinin mikro kanatçık üzerinde denk geldiği yere kanal açılıp soğutucu sıvının kanatçıklar arasından kolay geçebilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.3. Akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli (II. konsept tasarım)

4.2.3. III. Konsept tasarım

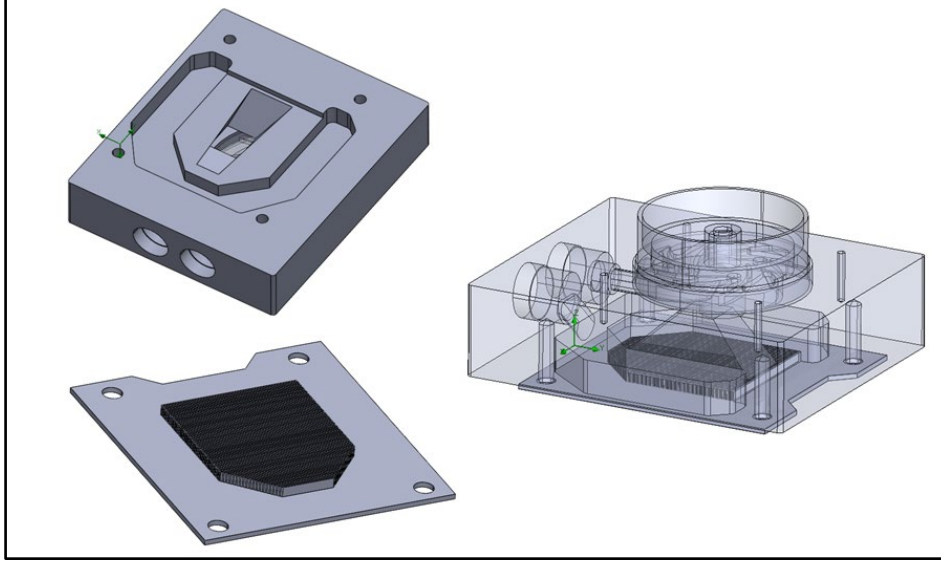
Akış odası içerisinde boşaltmalar yapılarak farklı yollar oluşturulmuş olup, soğutucu sıvı mikro kanatçığın arka yüzeyine eğimli gelecek şekilde bir konsept tasarım gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4). Böylece mikro kanatçık ve soğutucu sıvı arasındaki temas yüzeyini artırmak hedeflenmiştir.



Şekil 4.4. Akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli (III. konsept tasarım)

4.2.4. IV. Konsept tasarım

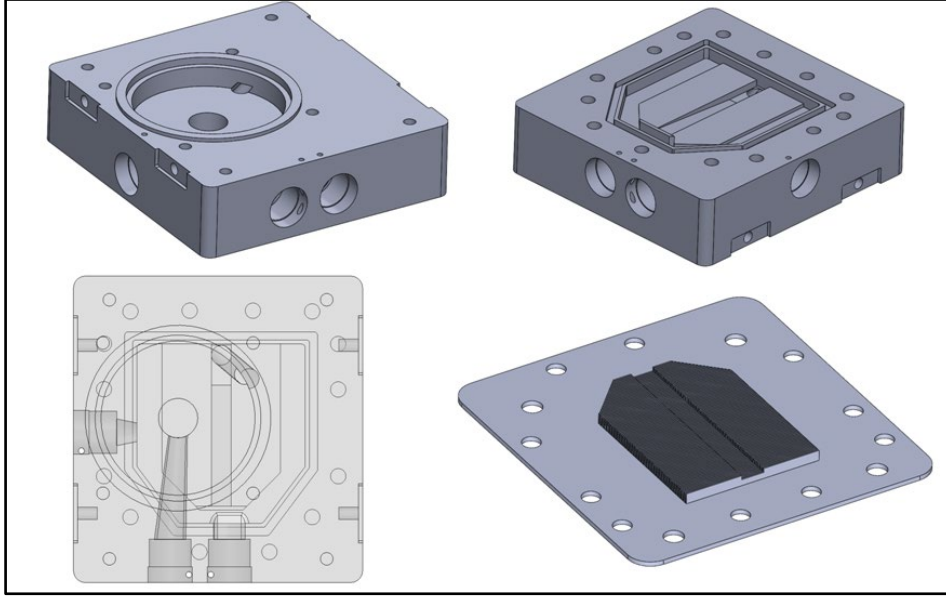
Basınç farkını minimize edebilmek için giriş ve çıkış portları yan yana ve soğutucu sıvı direkt olarak kanatçıklar üzerine gelecek şekilde bir konsept tasarım gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5).



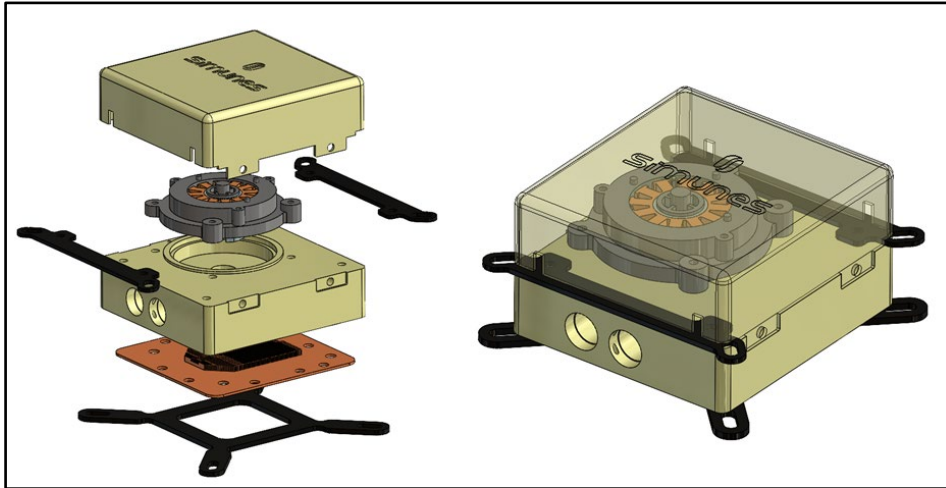
Şekil 4.5. Akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli (IV. konsept tasarım)

4.3. Nihai Tasarım

Gerçekleştirilmiş 4 farklı konsept tasarım içerisinde analiz sonuçları doğrultusunda optimum değerleri veren tasarım IV. konsept tasarım olmuştur. Bu konsept tasarım üzerinden tasarım iyileştirme çalışmaları yapılmış olup prototipi üretilecek akış odası ve mikro kanatçık yapısı Şekil 4.6'da verilmiştir. Sistemin tüm bileşenleri ve montaj ekipmanları ile birlikte patlatılmış görünümü Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Nihai akış odası ve mikro kanatçık 3B CAD modeli



Şekil 4.7. Nihai tasarımın patlatılmış ve montaj modeli

4.4. Analiz Çalışmaları

Mikro kanatçığın sanal ortamda sonlu hacimler yöntemi kullanılarak akış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda optimum kanatçık parametreleri belirlenmiştir. Konsept tasarımdaki mikro kanatçık yapılarında bu parametreler dikkate alınmıştır. Her bir konsept tasarımın akış analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.4.1. Malzeme bilgisi

Çalışmalarda mikro kanatçık malzemesi bakır, soğutucu sıvı olarak su kullanılmıştır. Bakırın sıcaklığa bağlı özgül ısı değerleri Çizelge 4.2’de, bakırın sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değerleri Çizelge 4.3’te, bakırın yoğunluk ve erime sıcaklık değerleri Çizelge 4.4’te ve soğutucu sıvının termal özellikleri Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Bakırın sıcaklığa bağlı özgül ısı değerleri

Sıcaklık (K)	Özgül Isı (J/(kg·K))	Sıcaklık (K)	Özgül Isı (J/(kg·K))
1	0,0116	40	58,76
2	0,0278	80	202,6
3	0,053	150	322,6
4	0,0916	250	373,3
5	0,1482	298,1	384
8	0,4729	400	397,5
10	0,8709	600	416,7
15	2,907	1000	451,1
20	7,29	1356,2	475

Çizelge 4.3. Bakırın sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değerleri

Sıcaklık (K)	Isıl İletkenlik (W/(m·K))	Sıcaklık (K)	Isıl İletkenlik (W/(m·K))
4	16200	300	401
10	24000	400	393
20	10800	600	379
40	2170	800	366
80	560	1000	352
150	429	1356,2	327
200	413		

Çizelge 4.4. Bakırın yoğunluk ve erime sıcaklık değerleri

Yoğunluk (kg/m ³)	8960
Erime Sıcaklığı (K)	1356,2

Çizelge 4.5. Soğutucu akışkan (Su) termal özellikleri

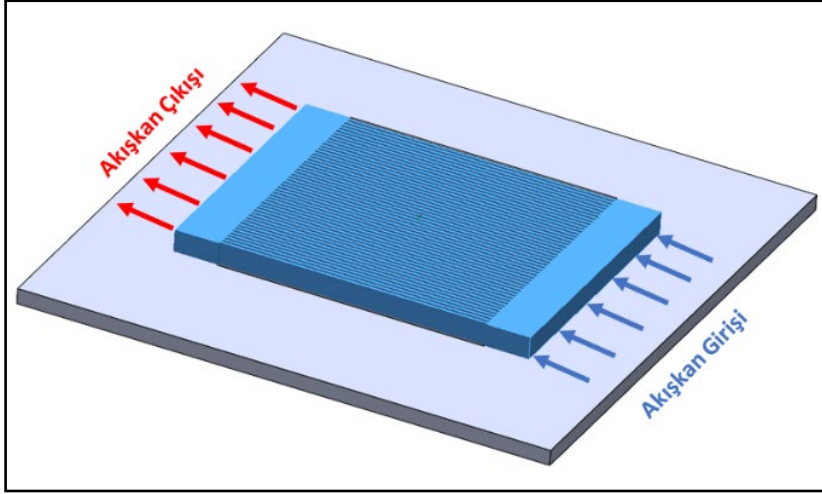
Sıcaklık (K)	Yoğunluk (kg/m ³)	Dinamik Viskozite (Pa·sn)	Isıl İletkenlik (W/(m·K))	Özgül Isı (J/(kg·K))
273,16	999,79	0,00179	0,56104	4219,9
303,16	995,6	0,000797	0,61547	4180,1
343,16	977,73	0,00044038	0,6631	4190,2
403,16	934,83	0,0002129	0,6837	4261,5
458,16	881,59	0,0001458	0,67114	4425,5
496,16	833,73	0,0001187	0,6456	4649,9
518,16	806,21	0,0001084	0,62667	4819,2

4.4.2. Sonlu hacimler analizi

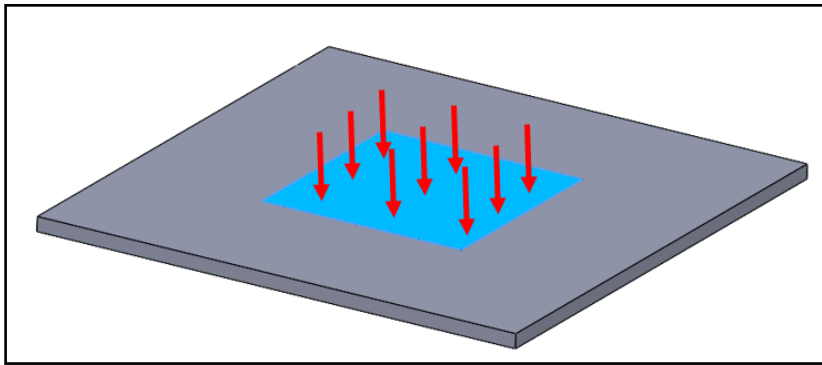
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerde sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır.

Sınır şartları ve yüklemeler (mikro kanatçık)

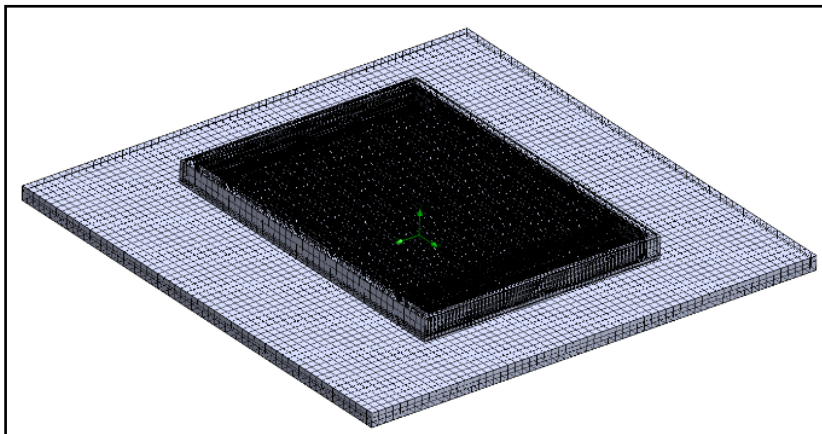
Basitleştirilmiş bir akış hacmi oluşturulmuş olup iç akış analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8). Akışkan sıvı olarak su seçilmiştir. Akış tipi türbülanslı olarak tanımlanmıştır. Akış alanı kanatçık duvarlarına yakın olduğu için türbülans modeli $k-\omega$ olarak seçilmiştir. Giriş debisi 0,005 kg/sn ve ilk sıcaklık 26°C olarak tanımlanmıştır. Mikro kanatçık işlemci ile temas alanına 105W'lık bir ısı tanımlaması yapılmıştır (Şekil 4.9). Mikro kanatçık malzemesi bakır olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapıda bulunan kanatçıklardan dolayı bir mikro akış analiz çalışması yapılmıştır. Bu yüzden gelişmiş kanal iyileştirme aktif hale getirilip minimum mesh boyutu 0,02 olarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda en doğru sonucu alabilmek için çözüm ağı bağımsızlığı (mesh independent) dikkate alınmıştır. Toplam element sayısı parametrik tasarımlardan (81 adet) dolayı 450.000-550.000 arasında değişmektedir (Şekil 4.10). Tüm tanımlamalar yapıldıktan sonra kanatçıklara sıcaklık sensörü atanmış olup sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 4.8. Mikro kanatçık sıvı alan tanımlaması



Şekil 4.9. Isı tanımlaması



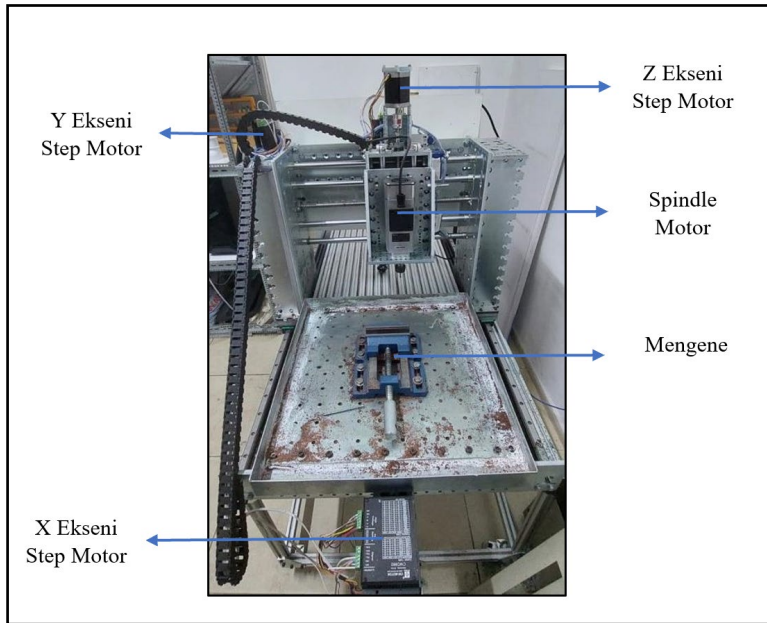
Şekil 4.10. Katı-akışkan mesh görünümü

Sınır şartları ve yüklemeler (konsept tasarımlar)

Gerçekleştirilmiş olan konsept tasarımların akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımların doğru bir şekilde kıyaslanabilmesi için tüm analizlerdeki sınır koşulları aynı tanımlanmıştır. Akış türbülanslı olarak tanımlanmış olup türbülans modeli $k-\epsilon$ olarak seçilmiştir. Pompanın olduğu bölgeye dönen bölge (moving wall) tanımlaması yapılarak santrifüj etkisiyle pompanın sıvıyı vakumlaması sağlanmıştır. Akışkan sıvı olarak su seçilmiştir. Soğutucu sıvının giriş ve çıkış alanlarına ‘inlet’, ‘outlet’ tanımlamaları yapılmıştır. Giriş portuna 0,0049kg/sn kütleli debi, çıkış portuna ise atmosferik basınç tanımlaması yapılmıştır. Mikro kanatçık alt tabanına 105W’lık bir ısı tanımlaması yapılmıştır. Tüm tanımlamalar yapıldıktan mikro kanatçık üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını inceleyebilmek için mikro kanatçık üzerine sıcaklık sensör ataması yapılmıştır.

4.5. Prototip Üretimi

Bu bölümde mikro kanatçık ve akış odası yapılarının prototip üretim aşamaları anlatılmıştır. Mikro kanatçık yapının prototip üretimi, tasarımı ve imalatı Simunes İleri Teknoloji A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilen bir CNC router tezgâhta gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. CNC router tezgâh

4.5.1. Mikro kanatçık kesme parametreleri

Mikro kanatçık prototipini üretebilmek için Çizelge 4.6’da verilen parametrelere uygun G kodları hazırlanmıştır. Ham malzeme; yüzey işleme, boşaltma, kesme ve kanatçık açma olmak üzere toplam 4 farklı proseste işlenmiştir.

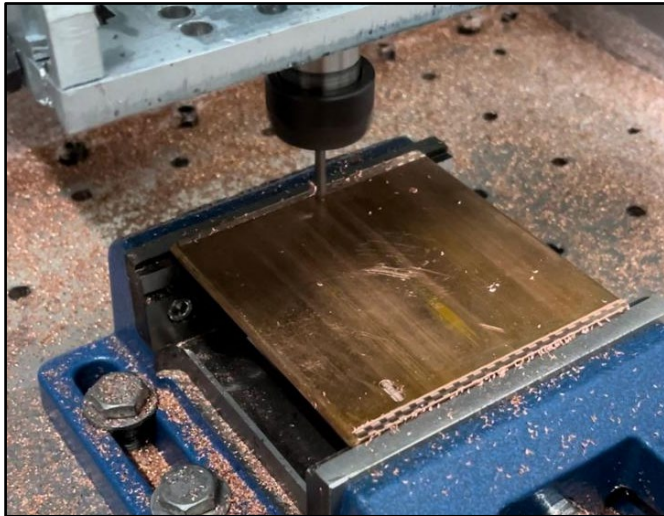
Çizelge 4.6. Üretimde kullanılan mikro kanatçık işleme parametreleri

		İşleme Prosesleri			
		Yüzey İşleme	Boşaltma	Kesme	Kanatçık Açma
Kesme Parametreleri	Spindle Hızı (dev/dk)	18000	18000	18000	15000
	İlerleme (mm/dk)	400	400	400	75
	Derinlik (mm)	0,4 / 0,2	0,4 / 0,15	0,5	0,1

4.5.2. Mikro kanatçık üretimi

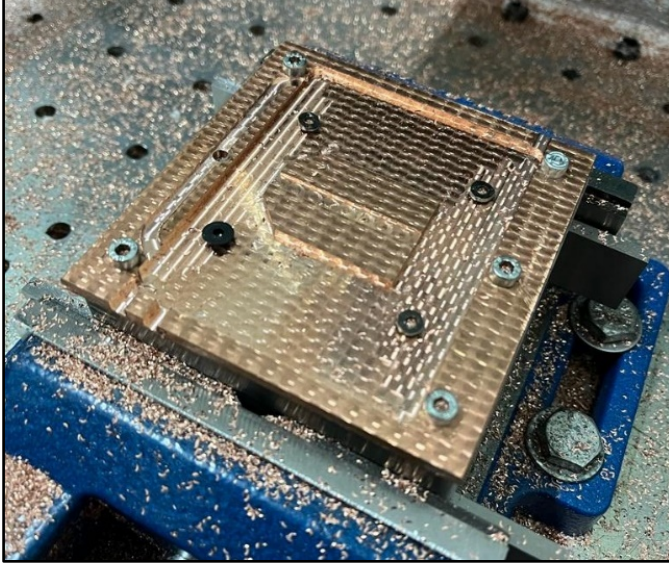
Mikro kanatçık imalatı toplam 4 prosesten oluşmakta olup aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir. Bu proseslerdeki optimum kesme parametrelerini belirleyebilmek ve deneme çalışmaları yapabilmek için alüminyum plakalar da kullanılmıştır. Bu sayede mikro kanatçık prototip imalat maliyetinin düşük tutulması hedeflenmiştir.

1) 5 mm et kalınlığına sahip ham malzemenin iki yüzeyinden de 0,5 mm talaş kaldırılmıştır (Şekil 4.12).



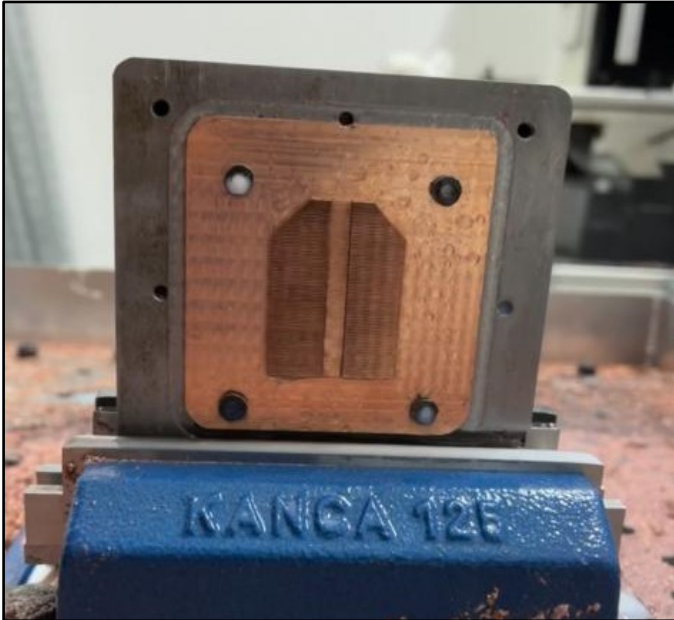
Şekil 4.12. Yüzey işleme prosesi

2) Yüzeyleri silinmiş plakaya mikro kanatçık geometrisine uygun boşaltma işlemi yapılmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Boşaltma prosesi

3) Boşaltma işleminden sonra fazlalık malzemeyi kesme işlemi yapılmıştır (Şekil 4.14).



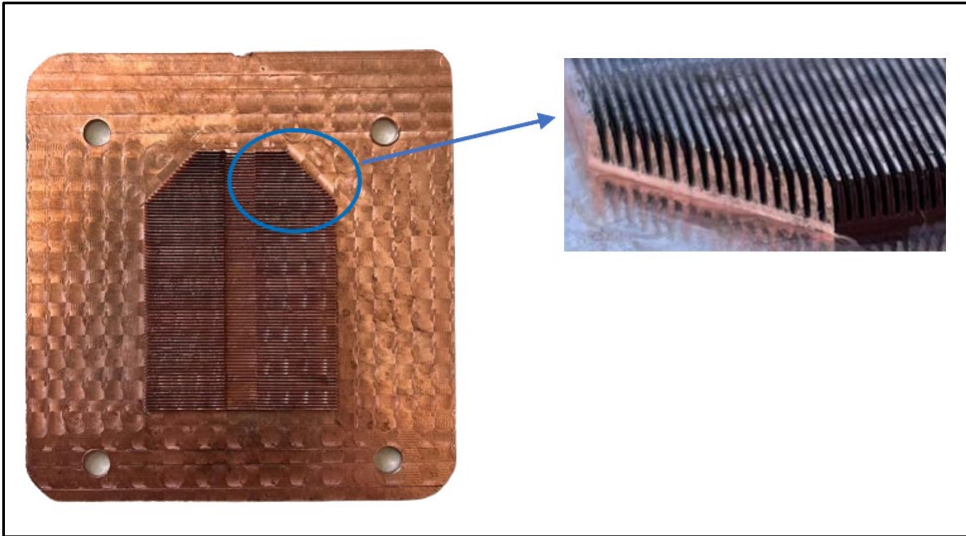
Şekil 4.14. Kesme Prosesi

4) Son olarak nihai ürüne kanatçık açma prosesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Kanatçık açma prosesi

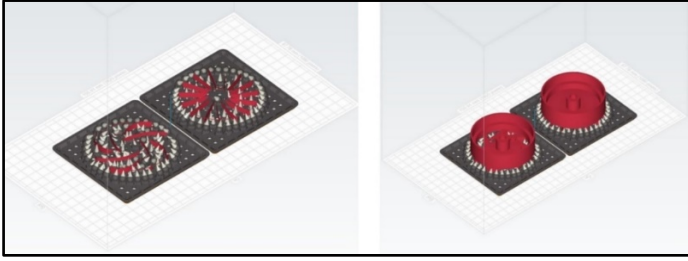
Gerçekleştirilen 4 farklı işleme prosesi sonrasında KY: 2,3 mm, KAM: 0,15 mm, KK: 0,15 mm ve TK: 1,25 mm olacak şekilde nihai prototip üretilmiştir (Şekil 4.16).



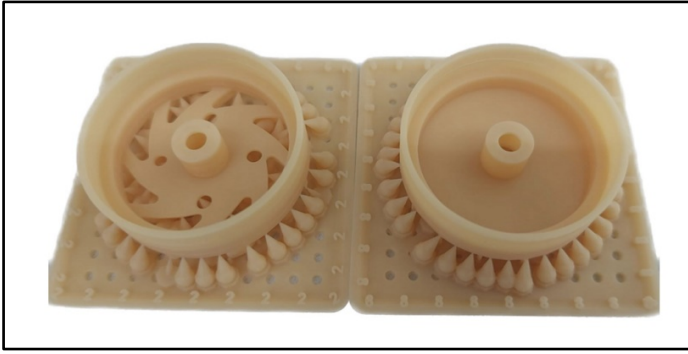
Şekil 4.16. Prototip mikro kanatçık yapı

4.5.3. Akış odası üretimi

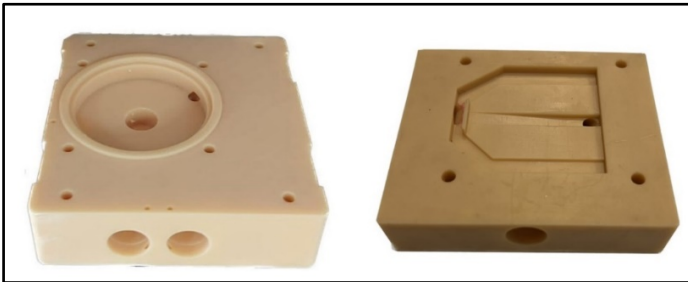
Akış odası DLP teknolojili 3B yazıcı ile üretilmiştir. Aşağıda örnek bir parçanın üretim aşamaları verilmiştir (Şekil 4.17). Parçanın CAD modelinin .stl formatı 3B yazıcının desteklediği ticari bir yazılıma aktarılmıştır. Yazıcı tablasının boyutuna göre parça yerleştirilmesi yapılmıştır ve model üzerine destek parçalar (support) atılmıştır. Tüm destek parçaları atıldıktan sonra baskı işlemi başlatılmıştır. Tamamlanan baskı işlemi sonrasında (Şekil 4.18) destek parçaları kesilip temizlenmiştir. Zımpara ile temizlenen prototip ürün montaj için hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.17. Baskı simülasyonu (örnek parça)



Şekil 4.18. Ürünün baskıdan çıktığı ilk hali (örnek parça)



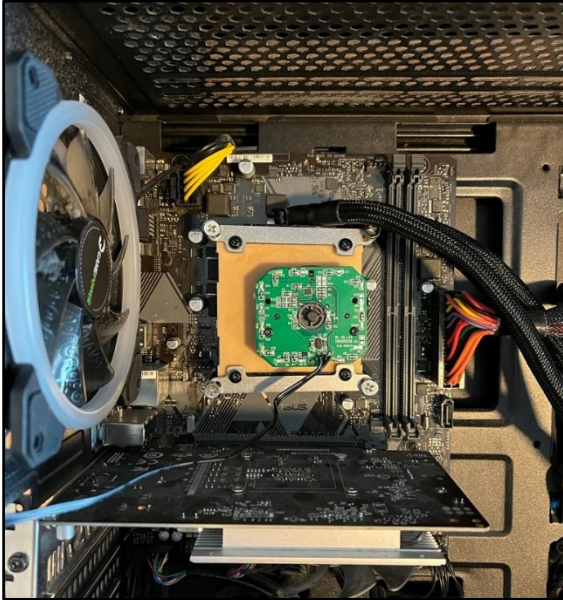
Şekil 4.19. Baskıdan sonra temizlenmiş akış odası prototipi

4.5.4. Bileşenlerin montajı

Prototip üretimi gerçekleştirilen akış odası ve mikro kanatçık yapı sistemin diğer bileşenleri (radyatör ve elektronik devre) ile birleştirilmiştir (Şekil 4.20). Prototip ürün Intel Core i3-9100F işlemcili bir bilgisayara montajlanmıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.20. Prototip sıvı soğutma sistemi



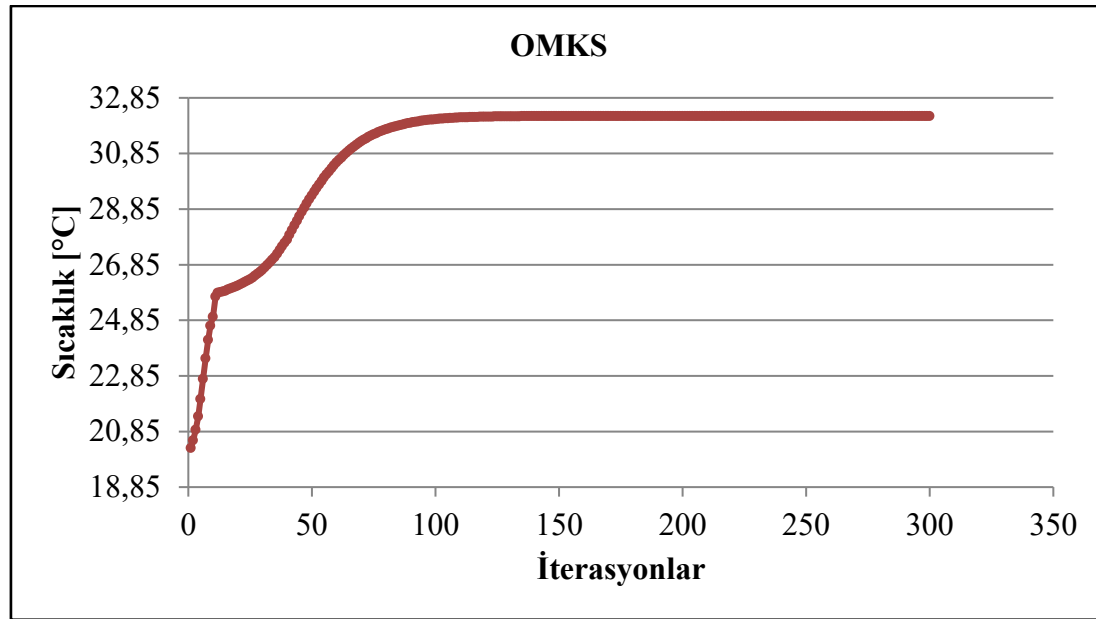
Şekil 4.21. Prototip ürünün işlemci üzerine montajlı halı

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

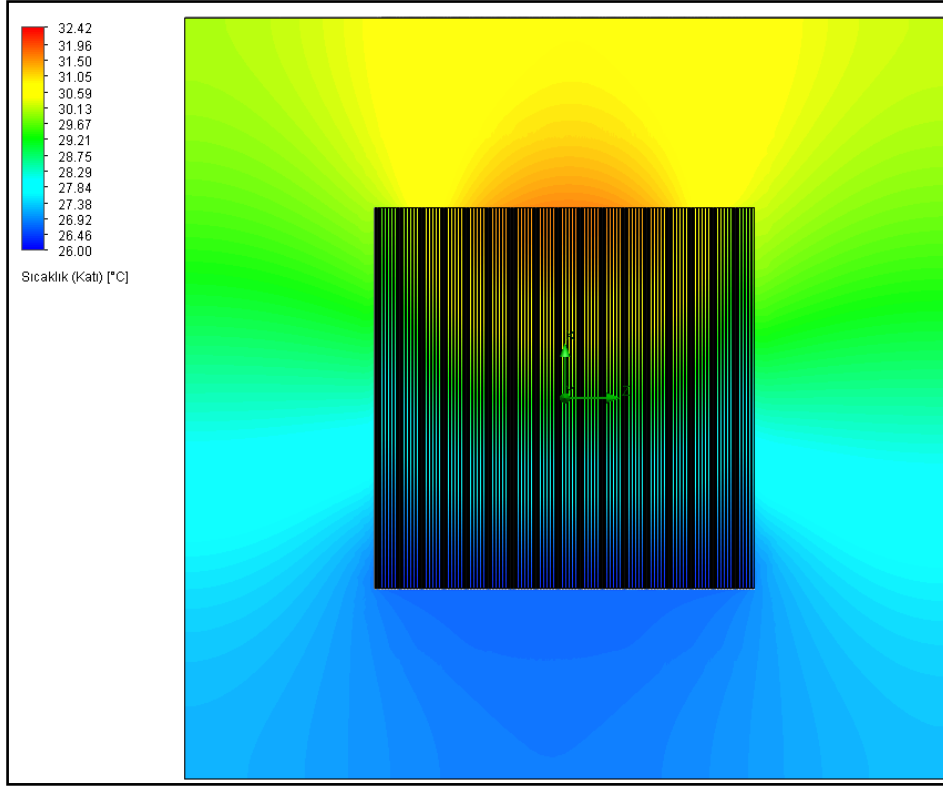
Mikro kanatçık akış analizleri, konsept tasarımların analizleri, iyileştirme çalışmaları ve test sonucunda elde edilen bulgular ve yorumlanması bu bölümde incelenmiştir.

5.1. Mikro Kanatçık Akış Analizleri ve Değerlendirmesi

Belirlenen parametrelere ve sınır şartlarına göre 81 adet analiz gerçekleştirilmiş olup ortalama mikro kanatçık sıcaklık değerleri incelenmiştir. Analizler 300 iterasyonda yakınsamıştır (Şekil 5.1). Soğutucu akışkanın mikro kanatçığa ilk temas ettiği bölgede minimum sıcaklık değerleri görülürken, mikro kanatçıktan çıkış bölgesinde maksimum sıcaklık değerleri görülmektedir. Optimum tasarımın sıcaklık kontur dağılımı incelendiğinde maksimum sıcaklığın 32,42°C olduğu görülmektedir (Şekil 5.2).



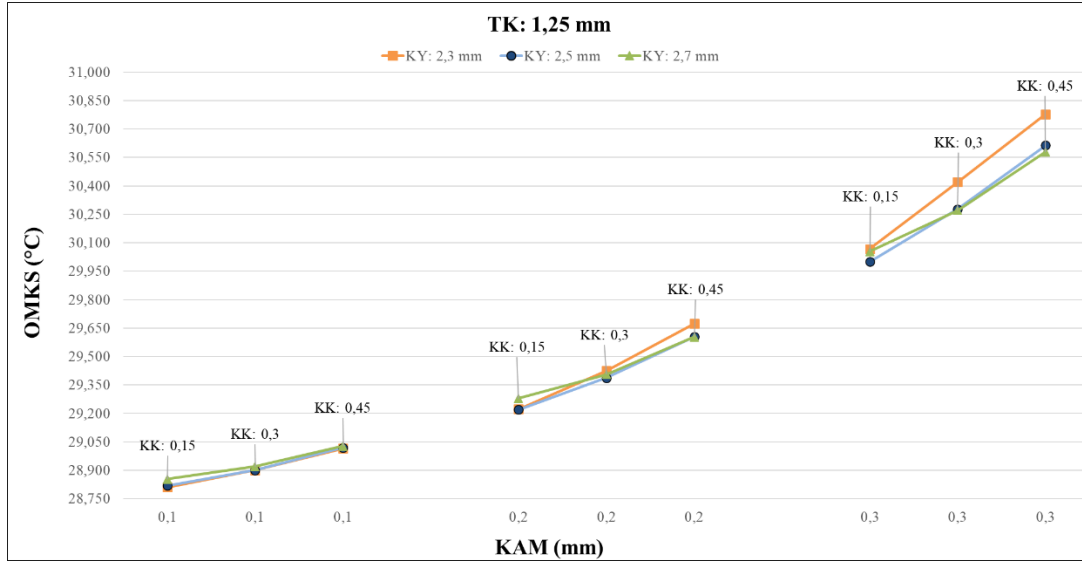
Şekil 5.1. OMKs yakınsama grafiği



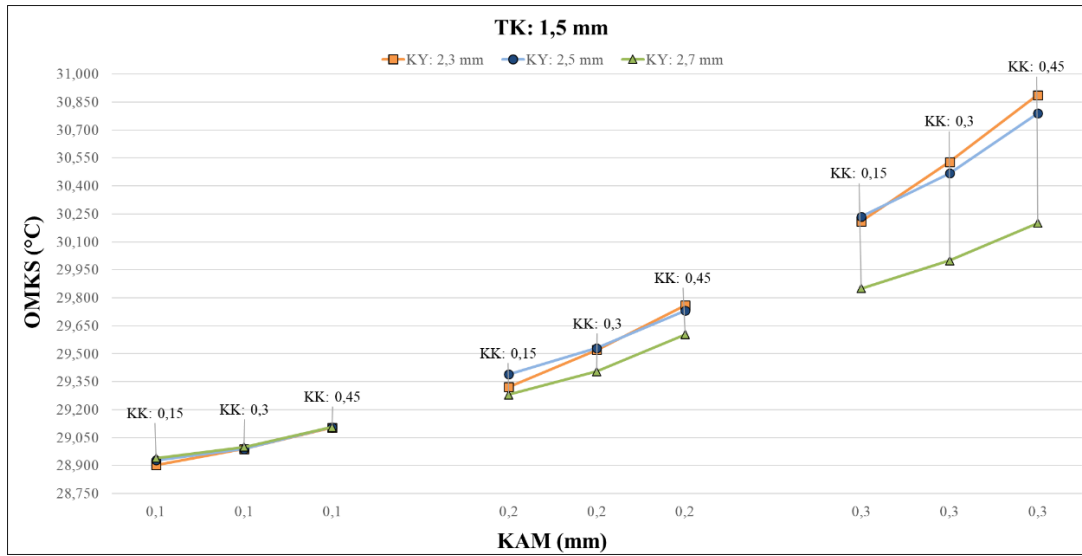
Şekil 5.2. Optimum mikro kanatçık tasarımının sıcaklık dağılım konturu

Yapılan analiz çalışmalarına göre ortalama mikro kanatçık sıcaklığına ait sonuçlar parametrelere bağlı olarak Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'teki grafiklerde verilmiştir. Bu grafiklere göre;

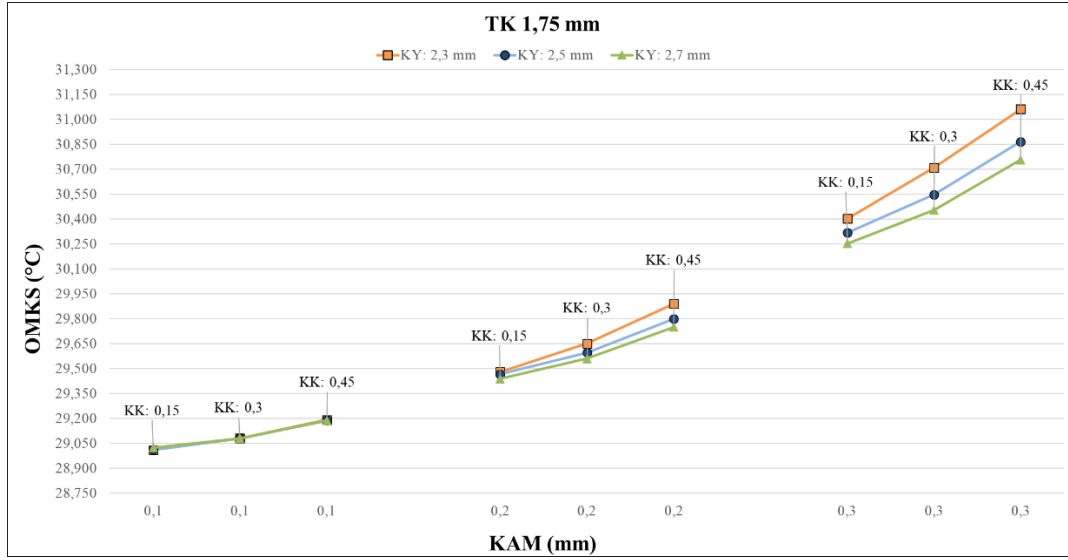
- 1.25 mm TK'da en yüksek OMKS'nin 30,78 °C (KAM: 0,3 mm, KY: 2,3 mm, KK: 0,45 mm), en düşük OMKS'nin ise 28,81 °C (KAM: 0,1 mm, KY: 2,3 mm, KK: 0,15 mm) olduğu,
- 1.5 mm TK'da en yüksek OMKS'nin 30,89 °C (KAM: 0,3 mm, KY: 2,3 mm, KK: 0,45 mm), en düşük OMKS'nin ise 28,9 °C (KAM: 0,1 mm, KY: 2,3 mm, KK: 0,15 mm) olduğu,
- 1.75 mm TK'da en yüksek OMKS'nin 31,06 °C (KAM: 0,3 mm, KY: 2,3 mm, KK: 0,45 mm), en düşük OMKS'nin 29 °C (KAM: 0,1 mm, KY: 2,3 mm, KK: 0,15 mm) olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3. 1,25 mm TK'da KAM, KY ve KK parametrelerine bağlı olarak OMKS'nın değişimi



Şekil 5.4. 1,5 mm TK'da KAM, KY ve KK parametrelerine bağlı olarak OMKS'nın değişimi



Şekil 5.5. 1,75 mm TK’da KAM, KY ve KK parametrelerine bağlı olarak OMKS’nın değişimi

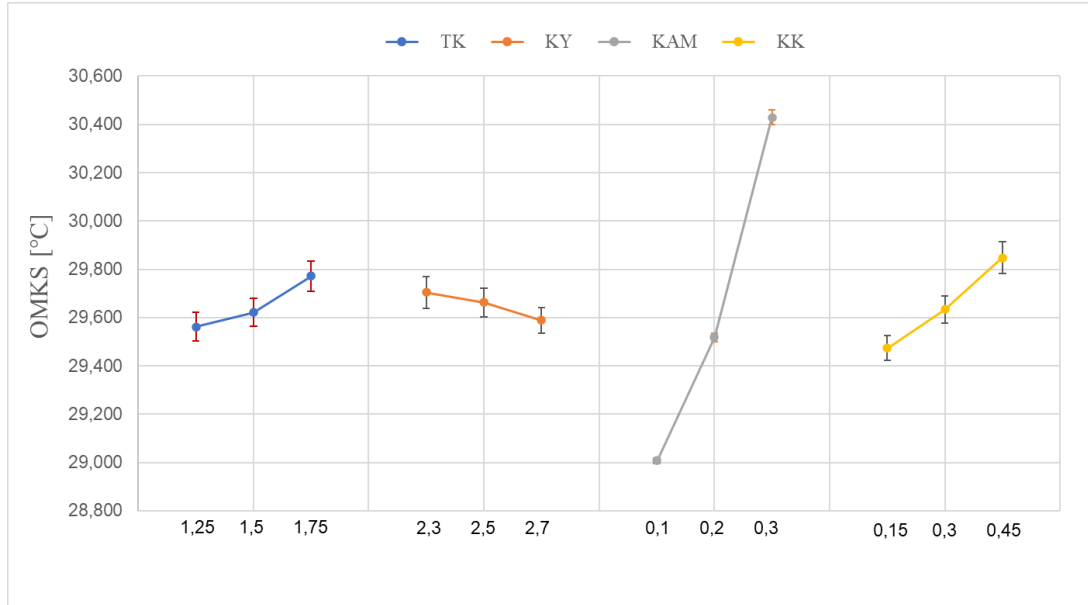
Sınırları belirli bir alanda KK’nın artmasıyla kanatçık sayısında azalma görülecektir. Böylece ısı transfer yüzey alanı azalacağından OMKS’de artış söz konusu olacaktır. TK’nın artması ısı transferini azaltacaktır. Dolayısıyla diğer parametrelerden bağımsız olarak TK’nın artmasıyla OMKS’nin de arttığı görülmüştür. Literatürde R.Mohan ve arkadaşının yapmış olduğu çalışma bu durumu destekler niteliktedir [3]. KAM 0,1 mm iken KY, TK ve KK parametrelerinin OMKS üzerindeki etkisinin düşük olduğu görülmektedir. Soğutucu sıvının kanatçıklar arasına yeterince temas edememesinin bu duruma neden olabileceği düşünülmektedir.

5.1.1. OMKS’nin varyans analizi (ANOVA) ile modellenmesi

Mikro kanatçık parametrelerinin (KY, KAM, KK ve TK) OMKS’ye etki sonuçları tam faktöriyel yöntemi kullanılarak 3 farklı model (lineer, 2 yönlü etkileşimler ve 3 yönlü etkileşimler) varyans analizi (ANOVA) ile çözümlenmiştir.

ANOVA tablolarında SD değeri; serbestlik derecesini, KT değeri; kareler toplamını, KO değeri kareler ortalamasını, P değeri; olasılığı, F değeri; F testini ve % değeri; parametrelerin sonuçlar üzerindeki yüzde etkilerini ifade etmektedir. Bu çalışmada, $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyi seçilmiştir.

OMKS'nin etki grafikleri (Şekil 5.6) mikro kanatçık parametrelerine bağlı etkilerinin yönünü göstermektedir. F testi değerlendirmesine göre, en etkili parametre KAM olup bunu sırasıyla, KK, TK ve KY takip etmektedir.



Şekil 5.6. OMKs ana etki grafikleri

Delta istatistiği, mikro kanatçık parametrelerinin her bir seviyesinde gerçekleşmiş olan OMKs değerleri arasındaki farkın (delta) büyüklüğüne göre sıralama yapmaktadır. Çizelge 5.2'deki tam faktöriyel analizi sonucunda elde edilmiş olan delta istatistiği tablosunda, parametrelerin etkililik derecelerine göre sıralama; KAM, KK, TK ve KY şeklindedir.

Çizelge 5.2. Mikro kanatçık parametrelerinin OMKs'ye göre delta istatistiği tablosu

Seviye	TK	KY	KAM	KK
1	29,561	29,704	29,007	29,474
2	29,621	29,662	29,518	29,633
3	29,772	29,588	30,429	29,848
Delta	0,211	0,116	1,423	0,374
Sıralama	3	4	1	2

5.1.2. OMKS'nin regresyon analizi ile modellenmesi

KY, KAM KK ve TK değişkenleri kullanılarak OMKS değişkenini incelemek amacıyla birçok değişkenli doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda anlamlı bir regresyon modeli, $F(4, 76) = 439.58$, $p < .001$, ve bağımlı değişkendeki varyansın %96'sının ($R^2_{\text{adjusted}} = .96$) bağımsız değişkenler tarafından açıkladığı bulunmuştur (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3. OMKS için regresyon analizi değerleri

Değişkenler	β	Standart Hata	Beta	t	p
Sabit	27,585	,259		106,64	,000
KY	-,158	,091	-,040	-1,73	,088
KAM	7,331	,182	,938	40,172	,000
KK	1,265	,122	,243	10,4	,000
TK	,422	,073	,135	5,775	,000

OMKS'yi; KY olumsuz ve anlamsız (Eş. 5.1), KAM olumlu ve anlamlı (Eş. 5.2), KK olumlu ve anlamlı (Eş. 5.3), TK olumlu ve anlamlı (Eş. 5.4) etkilemektedir.

$$\beta = -,04, t(76) = -1,73, p > 0,05, pr^2 = ,038 \quad (5.1)$$

$$\beta = ,938, t(76) = 40,17, p < 0,05, pr^2 = ,95 \quad (5.2)$$

$$\beta = ,243, t(76) = 10,4, p < 0,05, pr^2 = ,06 \quad (5.3)$$

$$\beta = ,135, t(76) = 5,775, p < 0,05, pr^2 = ,018 \quad (5.4)$$

Deneyler sonucunda elde edilen veriler OMKS regresyon analizinde kullanılmış olup regresyon analizi sonucunda Eş. (5.5) elde edilmiştir. OMKS eşitliği, KY, KAM, KK ve TK parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur.

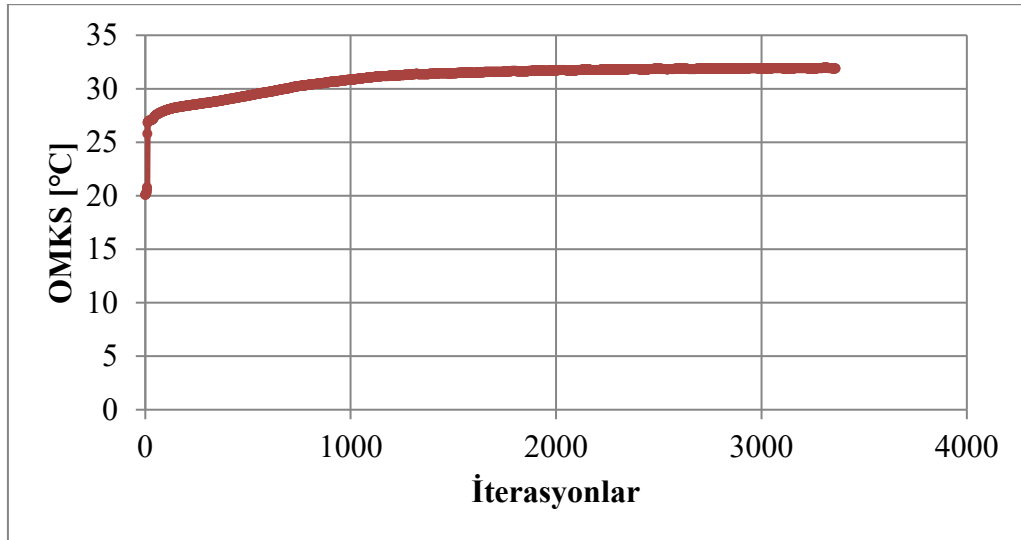
$$OMKS = 27,585 - ,158 * KY + 7,33 * KAM + 1,27 * KK + ,42 * TK \quad (5.5)$$

5.2. Konsept Tasarımların Akış Analizleri

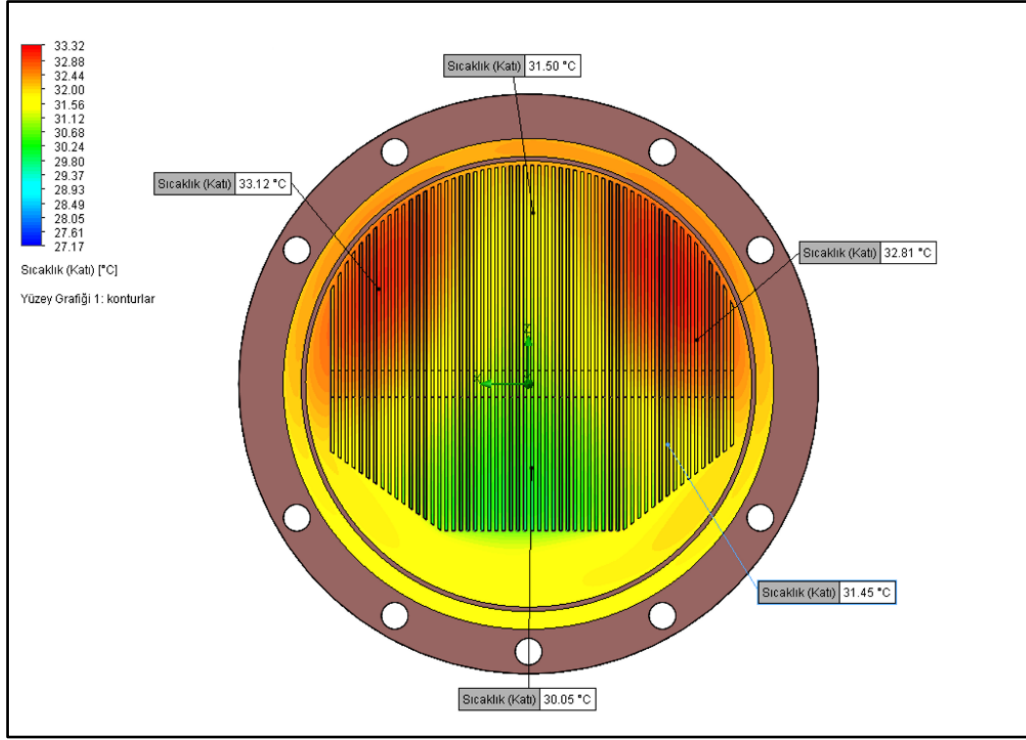
Gerçekleştirilen 4 farklı konsept tasarımlar için akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler farklı iterasyonlarda yakınsamıştır. Analizler sonucunda maksimum soğutucu sıvı sıcaklığı, maksimum mikro kanatçık sıcaklığı, ortalama mikro kanatçık sıcaklığı (OMKS) ve akış odası içerisindeki girdap oluşumları incelenmiştir.

5.2.1. I. Konsept tasarımın analizi ve değerlendirilmesi

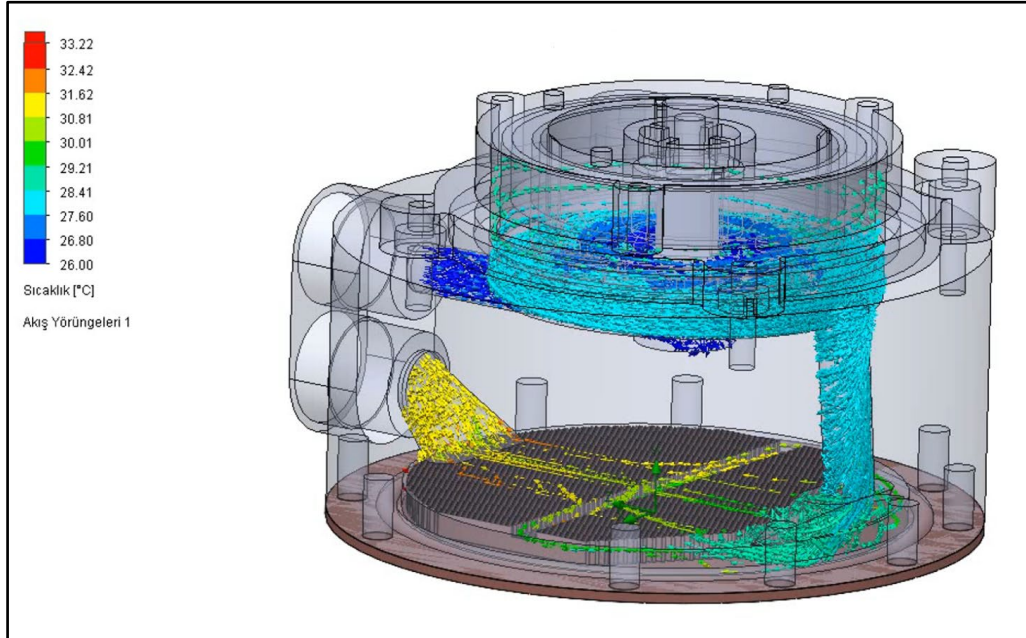
Analiz 3400 iterasyonda yakınsamıştır (Şekil 5.7). Maksimum soğutucu sıvı sıcaklık değeri 33,22 °C, maksimum mikro kanatçık sıcaklığı 33,32 °C ve ortalama mikro kanatçık sıcaklığının 31,9 °C olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.8). Analiz animasyonları incelendiğinde soğutucu akışkanın mikro kanatçık üzerine ilk temas ettiği bölgede girdap oluşumu görülmektedir (Şekil 5.9). Bu duruma, akış odasından mikro kanatçığa inen yolun dik olmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.7. Analiz yakınsama grafiği (I. konsept tasarım)



Şekil 5.8. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (I. konsept tasarım)

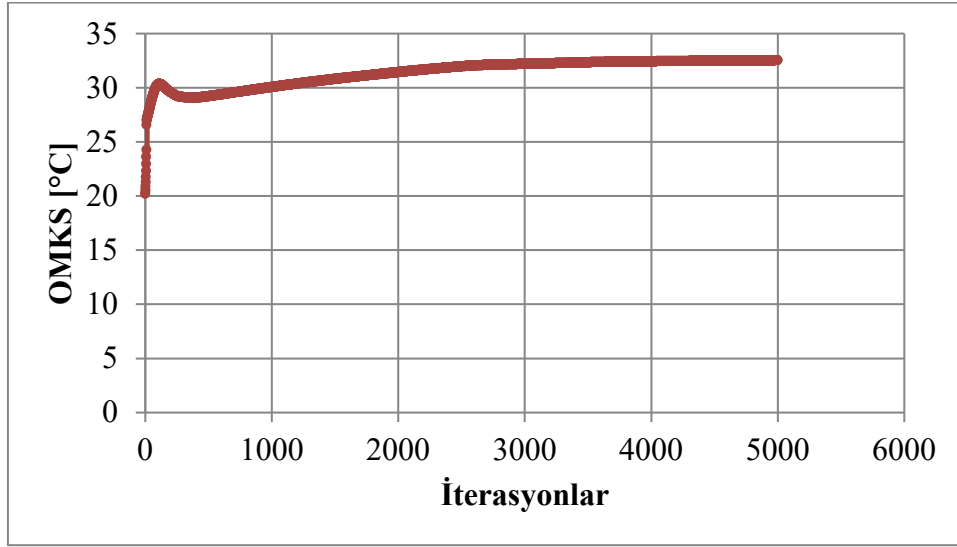


Şekil 5.9. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (I. konsept tasarım)

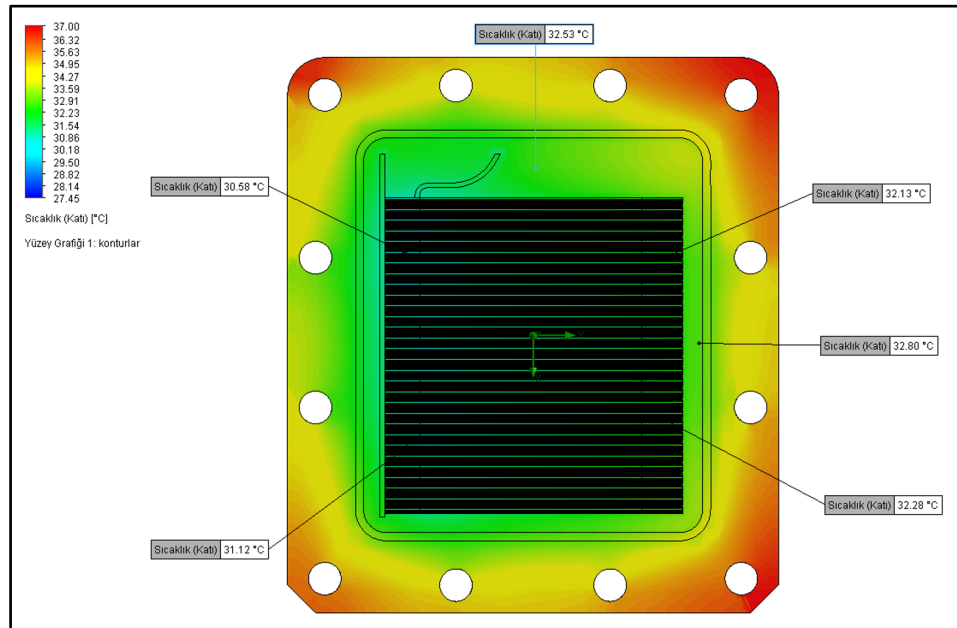
Yükseklik, giriş ve çıkış portlarının alt alta olduğu tasarımlarda yan yana olan tasarımlardan daha fazla olduğundan dolayı basınç farkları görülecektir. Bu durumun ise sistemde performans kayıplarına neden olabileceği öngörülmektedir.

5.2.2. II. Konsept tasarımın analizi ve değeri

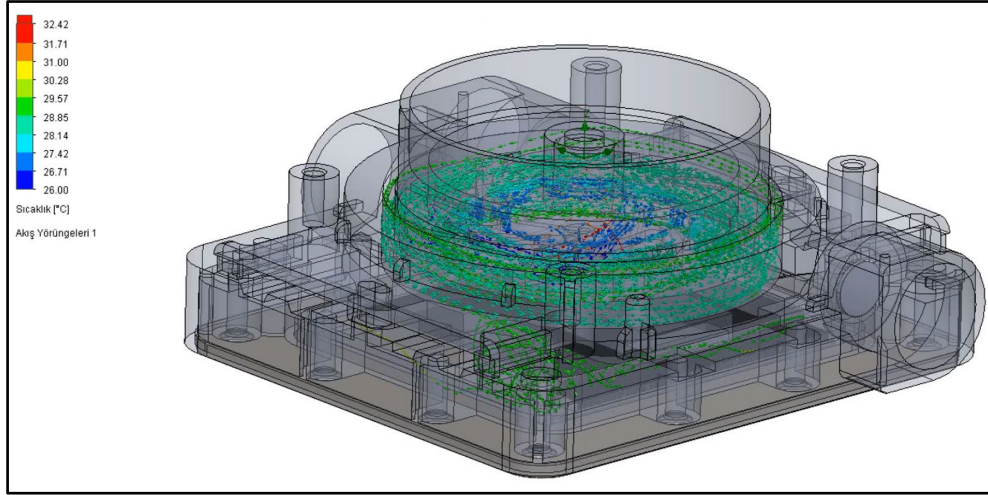
Analiz 5000 iterasyonda yakınsamıştır (Şekil 5.10). Maksimum soğutucu sıvı sıcaklık değeri 32,42 °C, maksimum mikro kanatçık sıcaklığı 37 °C ve ortalama mikro kanatçık sıcaklığının 32,52 °C olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.11). Analiz animasyonları incelendiğinde soğutucu akışkan dar bir kanaldan geçip kanatçıklar arasına geldiğinden dolayı sıvı sıkışması olabileceği öngörülmüştür (Şekil 5.12).



Şekil 5.10. Analiz yakınsama grafiği (II. konsept tasarım)



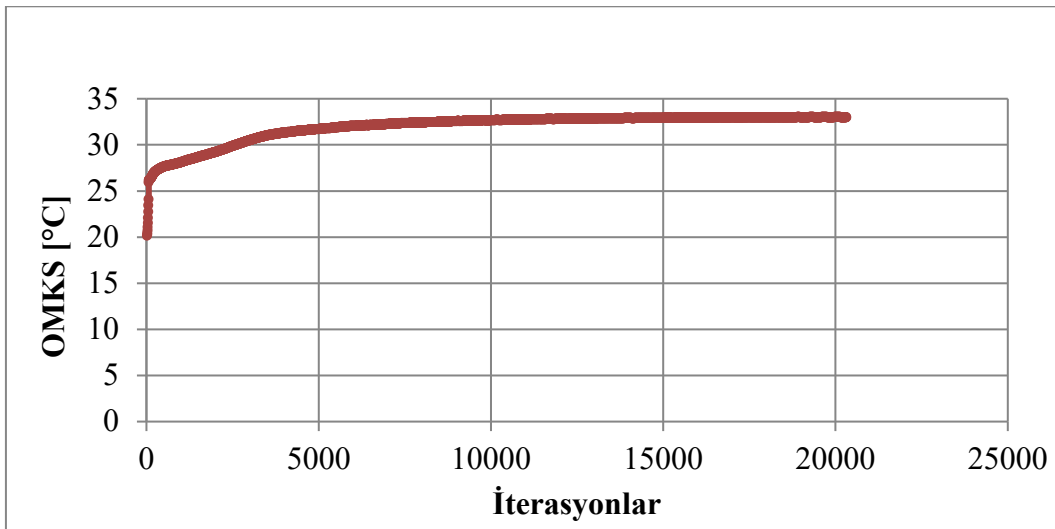
Şekil 5.11. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (II. konsept tasarım)



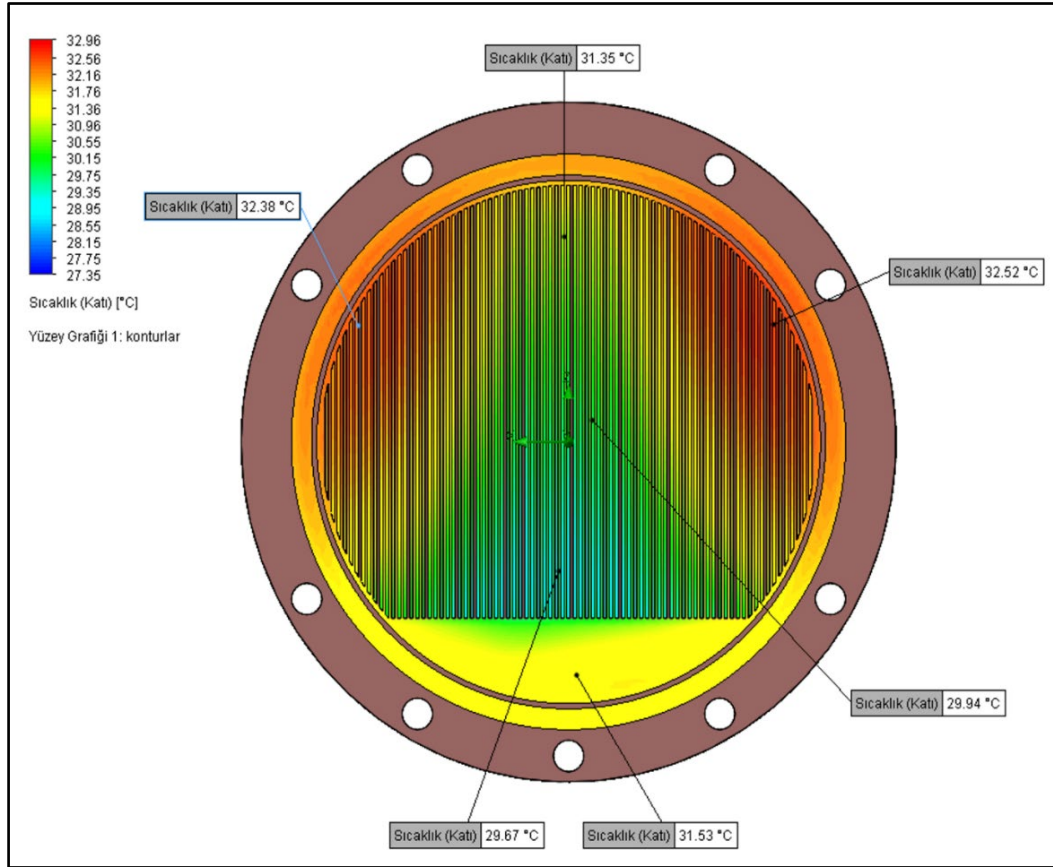
Şekil 5.12. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (II. konsept tasarım)

5.2.3. III. Konsept tasarımın analizi ve değerlendirmesi

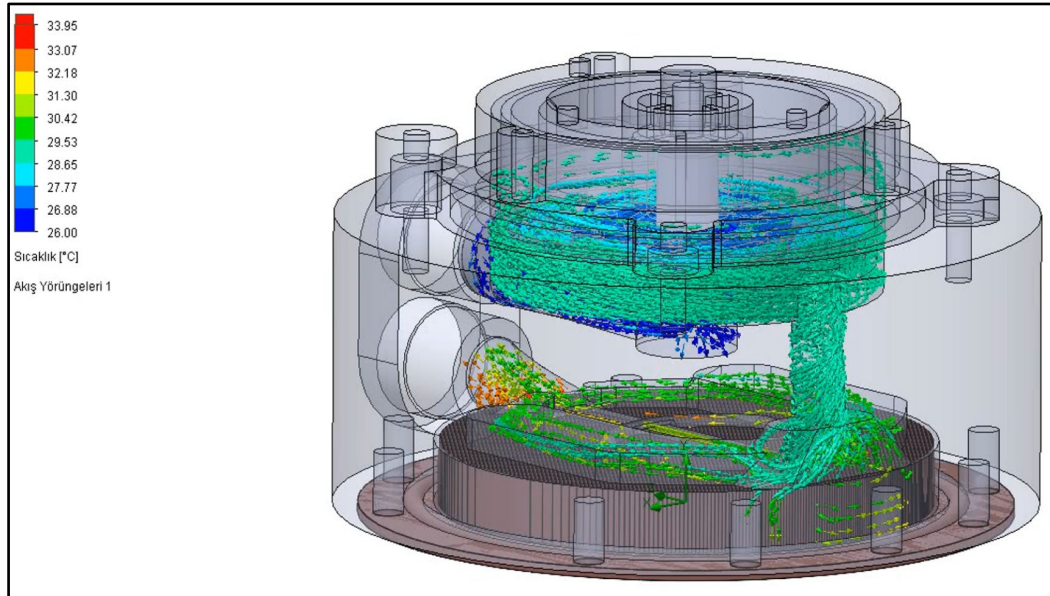
Analiz 20500 iterasyonda yakınsamıştır (Şekil 5.13). Maksimum soğutucu sıvı sıcaklık değeri 33,95 °C, maksimum mikro kanatçık sıcaklığı 34,38 °C ve ortalama mikro kanatçık sıcaklığının 32,98 °C olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.14). Analiz animasyonları incelendiğinde soğutucu akışkanın mikro kanatçık üzerine ilk temas ettiği bölgede girdap oluşumu görülmektedir. Aynı zamanda akış odası içerisine açılmış olan sıvı kanalları soğutucu akışkanın kanatçıklar arasına daha az girmesine sebep olmuştur (Şekil 5.15). Bu durumun soğutma verimini düşürebileceği ön görülmüştür.



Şekil 5.13. Analiz yakınsama grafiği (III. konsept tasarım)



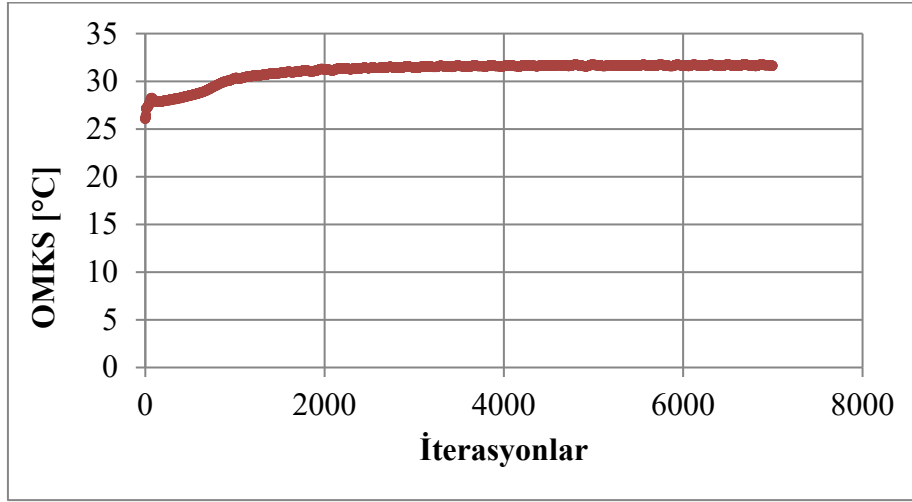
Şekil 5.14. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (III. konsept tasarım)



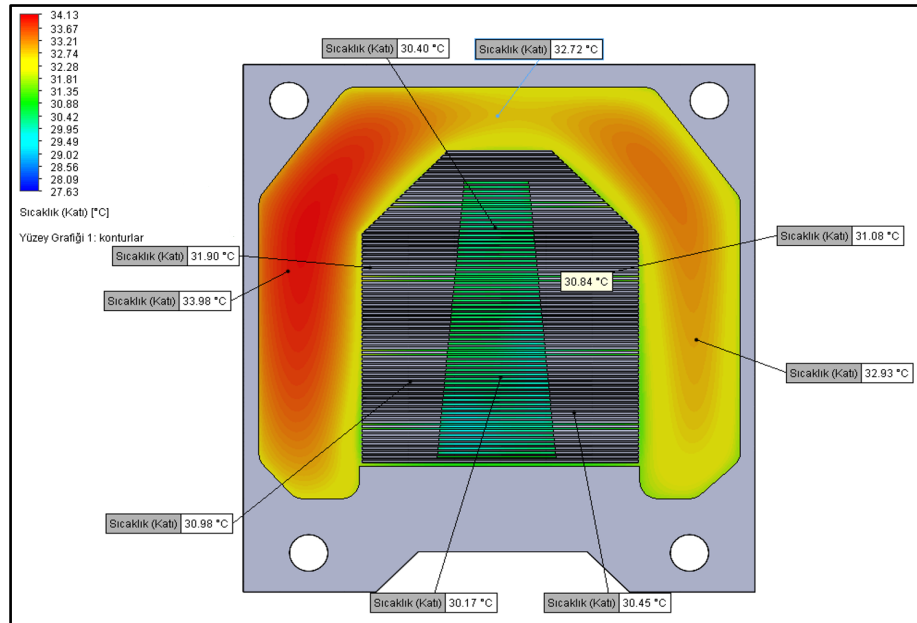
Şekil 5.15. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (III. konsept tasarım)

5.2.4. IV. Konsept tasarımın analizi ve değerlendirmesi

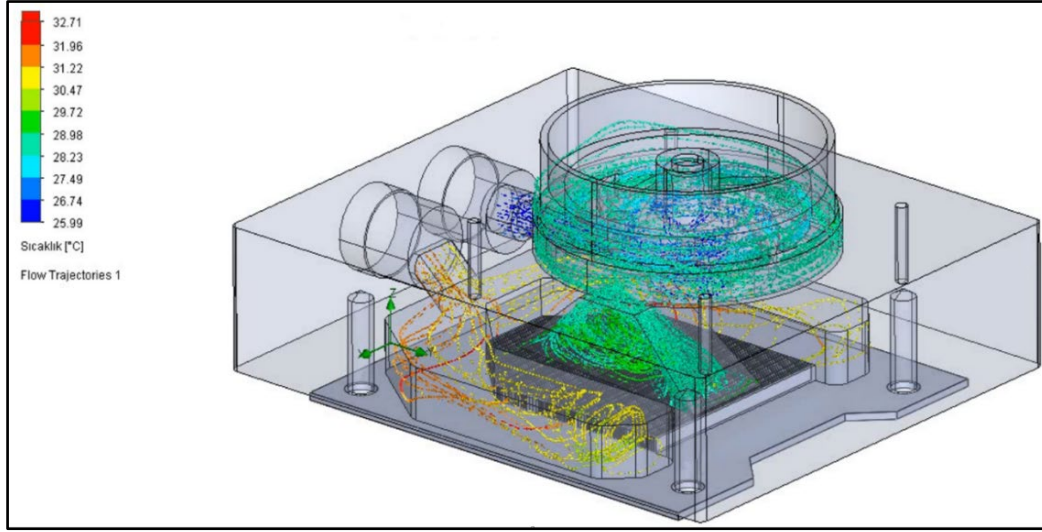
Analiz 7000 iterasyonda yakınsamıştır (şekil 5.16). Maksimum soğutucu sıvı sıcaklık değeri 32,71°C, maksimum mikro kanatçık sıcaklığı 34,13°C ve ortalama mikro kanatçık sıcaklığının 31,64 °C olduğu gözlemlenmiştir (şekil 5.17). Analiz animasyonları incelendiğinde akış odası ile mikro kanatçık arasındaki kanalın büyük ve geniş olmasından kaynaklı girdap oluşumu görölmektedir (şekil 5.18).



şekil 5.16. Analiz yakınsama grafiği (IV. konsept tasarım)



şekil 5.17. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (IV. konsept tasarım)



Şekil 5.18. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (IV. konsept tasarım)

5.3. En Verimli Tasarımın Belirlenmesi

Konsept tasarım akış analizleri kapsamında, ortalama ve maksimum mikro kanatçık sıcaklıkları Çizelge 5.4 verilmiştir. Bu veriler göz önüne alındığında en düşük ortalama mikro kanatçık sıcaklığını veren ve diğerlerine göre nispeten daha az girdap oluşumunun gözlemlendiği IV. konsept tasarım soğutma performansı en verimli tasarım olarak seçilmiştir. Bu tasarım üzerinde soğutma performansını artırma amacıyla iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Çizelge 5.4. Konsept tasarımların analiz sonuçları

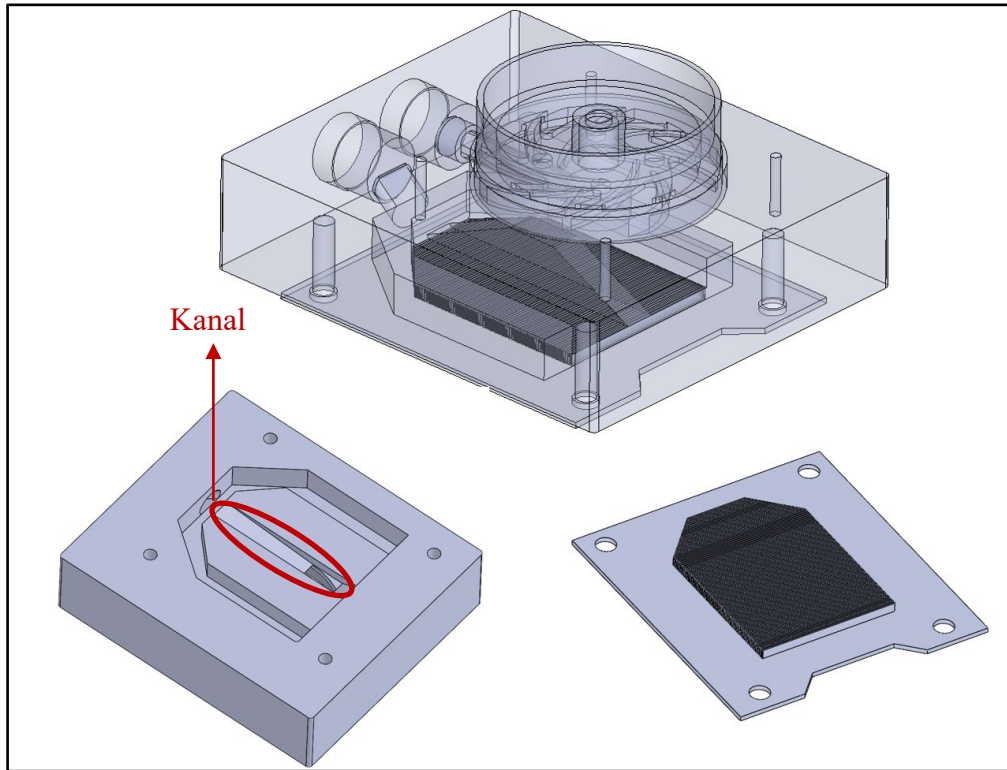
Konsept Tasarım	Ortalama Mikro Kanatçık Sıcaklığı (°C)	Maksimum Mikro Kanatçık Sıcaklığı (°C)
I	31,9	33,32
II	32,52	37
III	32,98	34,38
IV	31,64	34,13

5.4. Tasarım İyileştirme Çalışmaları

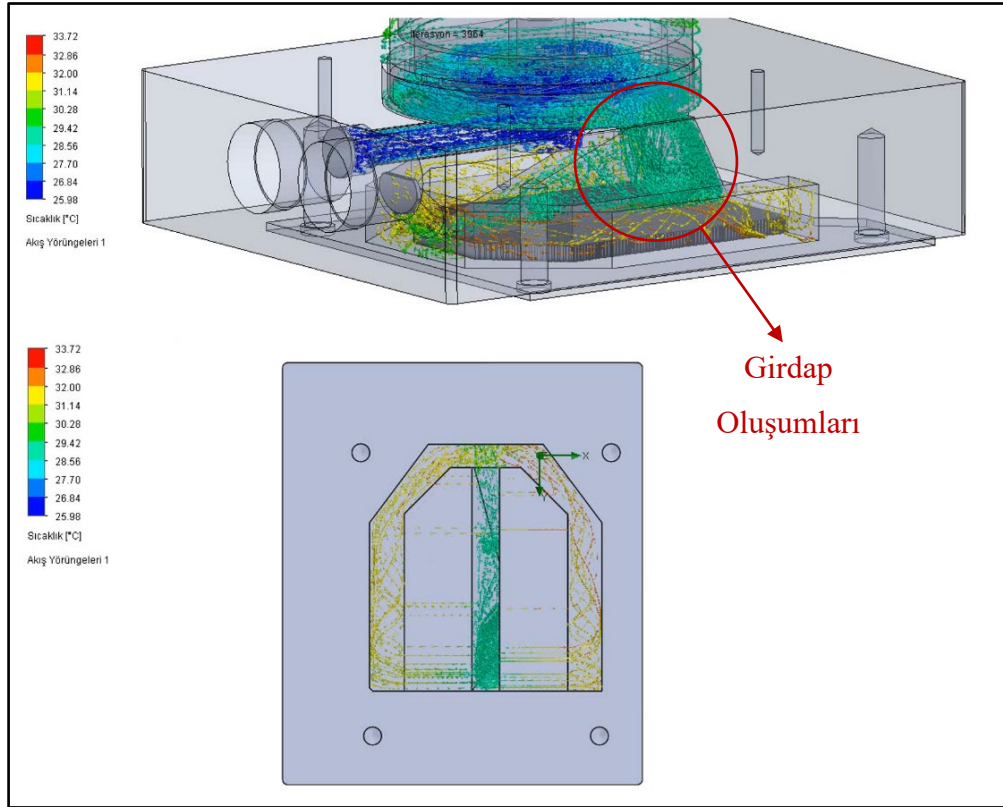
Maksimum soğutma verimi, minimum girdap oluşumu ve mikro kanatçık yapı üzerinde düzenli bir sıvı dağılımı elde edebilmek için belirlenen konsept tasarım üzerinden 3 farklı iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir.

5.4.1. I. İyileştirme çalışması

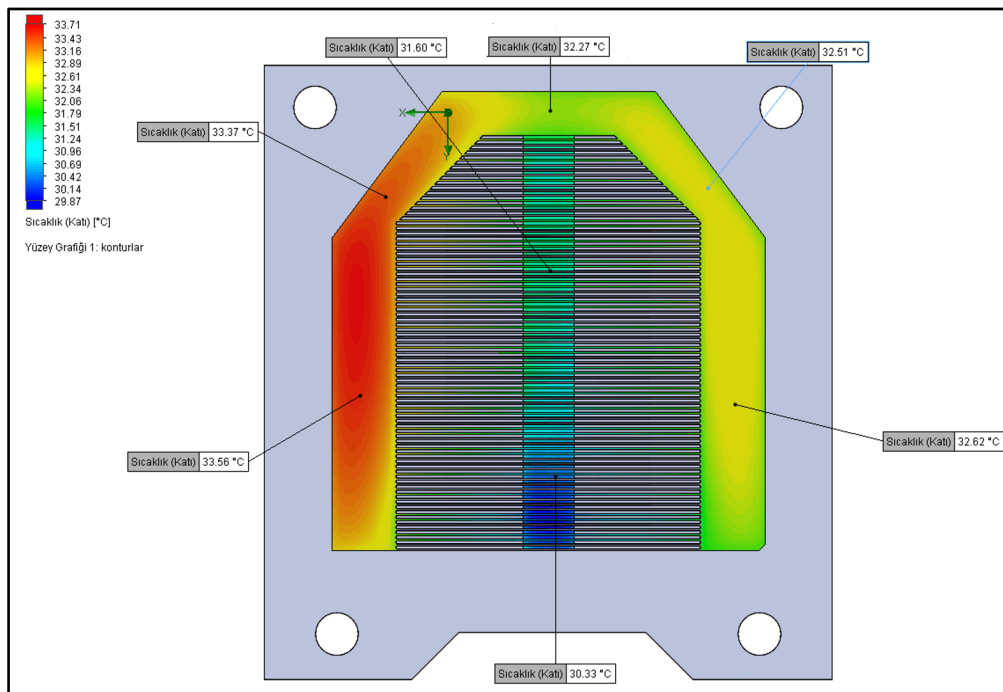
Seçilen konsept tasarımın ilk analiz sonuçları incelendiğinde, akış odası ile mikro kanatçık arasındaki kanalda girdap oluşumları gözlemlenmişti. Bu durumu minimize edebilmek için akış odasındaki yolun açısı ve uzunluğu artırılmış olup, soğutucu sıvı ve mikro kanatçık arasındaki kanalın girişi daraltılıp, mikro kanatçık yüzeyine çıkan kısmı geniş tutulmuştur (Şekil 5.19). Böylece soğutucu sıvının tüm mikro kanatçık yüzeyine dağılması hedeflenmiştir. Yapılan iyileştirme çalışması sonucunda girdap oluşumlarında azalma görülmüştür (Şekil 5.20).



Şekil 5.19. I. iyileştirme çalışması



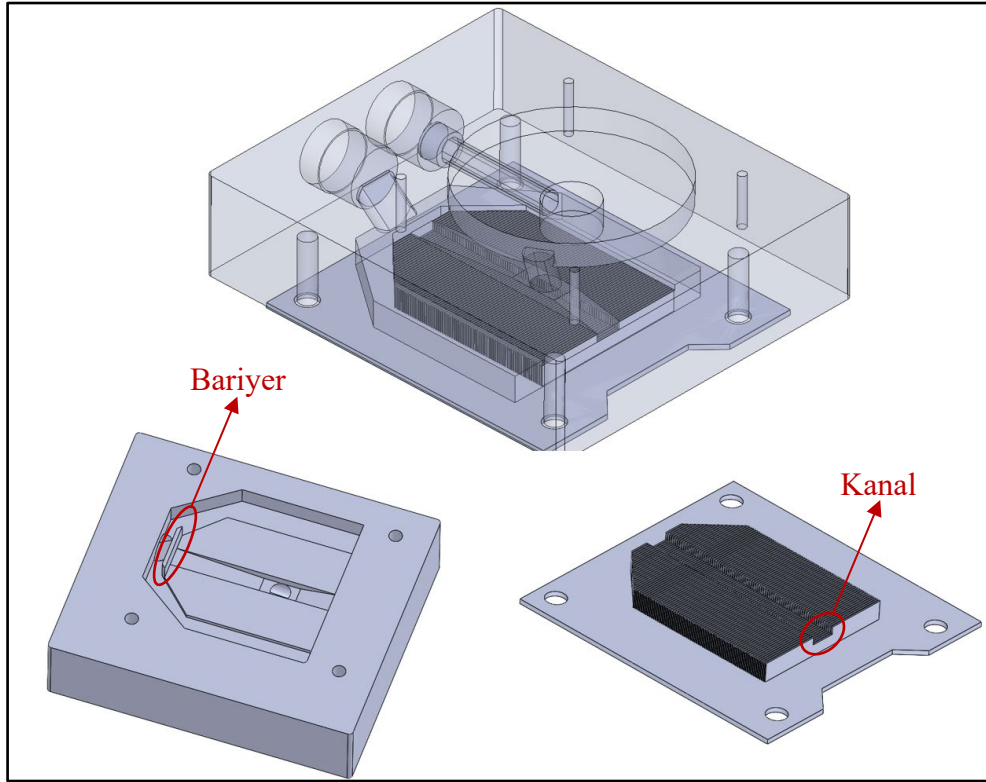
Şekil 5.20. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (I. iyileştirme çalışması)



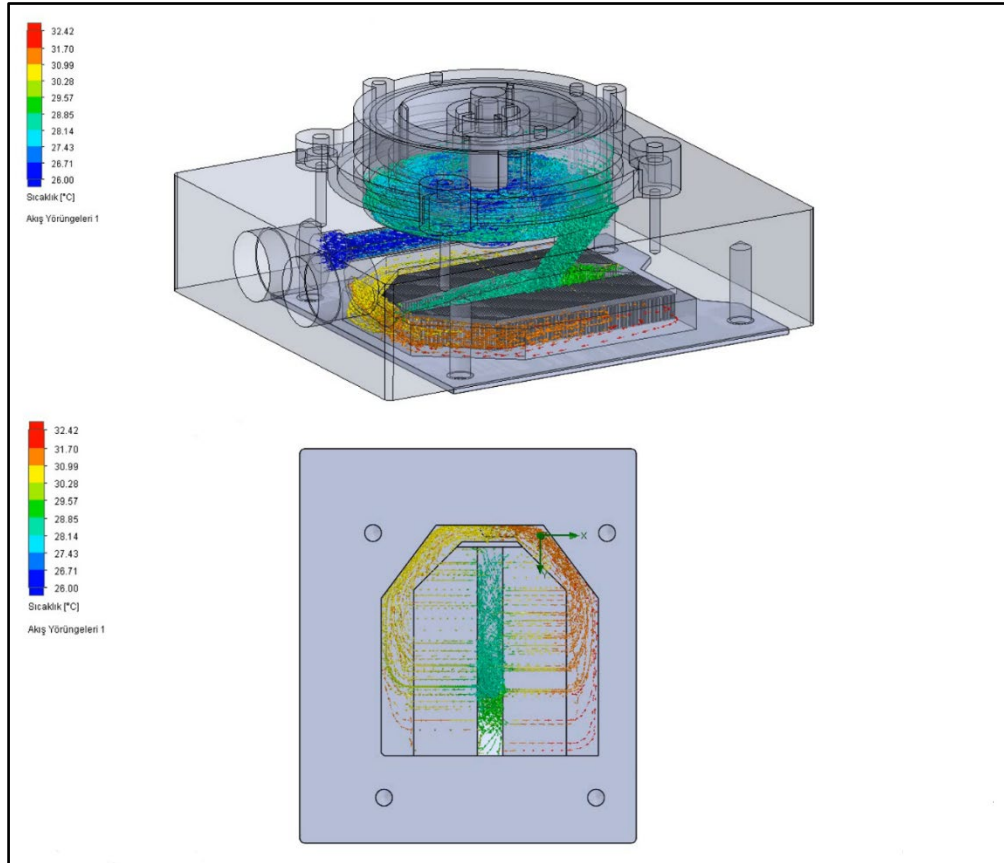
Şekil 5.21. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (I. iyileştirme çalışması)

5.4.2. II. İyileştirme çalışması

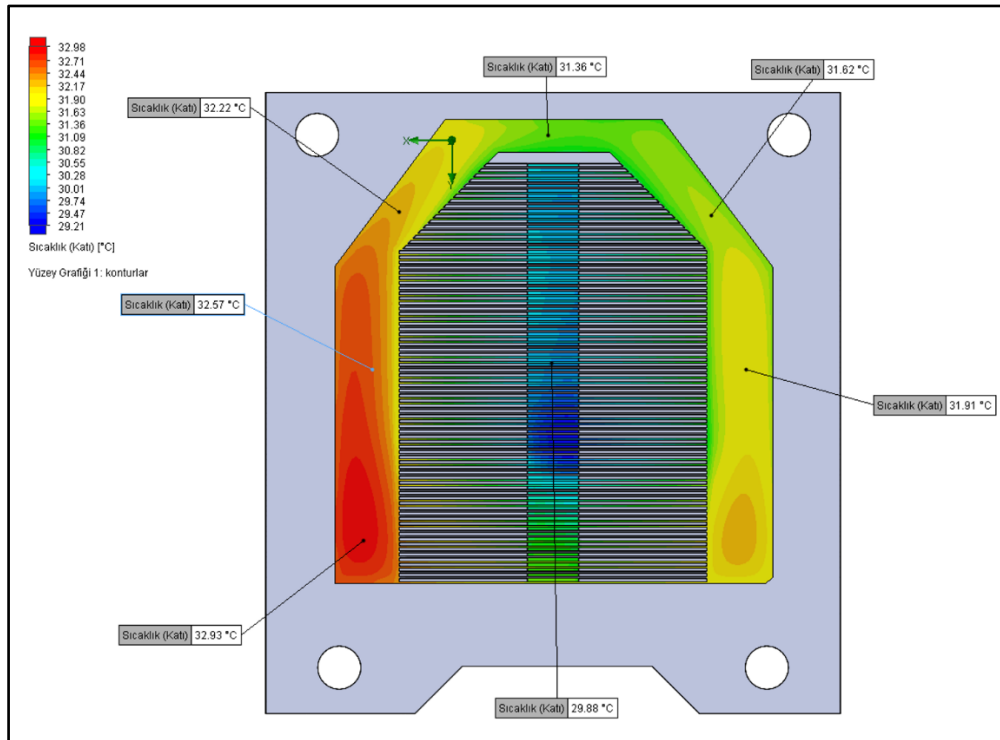
I. iyileştirme çalışması sonucunda soğutucu sıvının kanatçıklar üzerine daha rahat geçebilmesi için mikro kanatçık yapıda akış odasında bulunan kanaldaki geometriye uygun olacak şekilde bir kanal açılmıştır. Soğutucu sıvının kanatçıklar arasına daha fazla girmesini sağlayabilmek için kanalın sonuna bir bariyer yapılmıştır (Şekil 5.22). Analiz sonuçları incelendiğinde, soğutucu sıvı bariyer sayesinde çıkış portundan kolayca çıkamadığı için I. iyileştirme çalışmasına göre mikro kanatçık yapıda daha fazla yere yayıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.23). Ancak soğutucu sıvı mikro kanatçık en arka kısmından girmediği için soğutucu sıvının bu bölgede birikmeye başladığı görülmektedir (Şekil 5.24). Bu nedenle mikro kanatçık yapı üzerinde düzensiz bir sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.22. II. iyileştirme çalışması



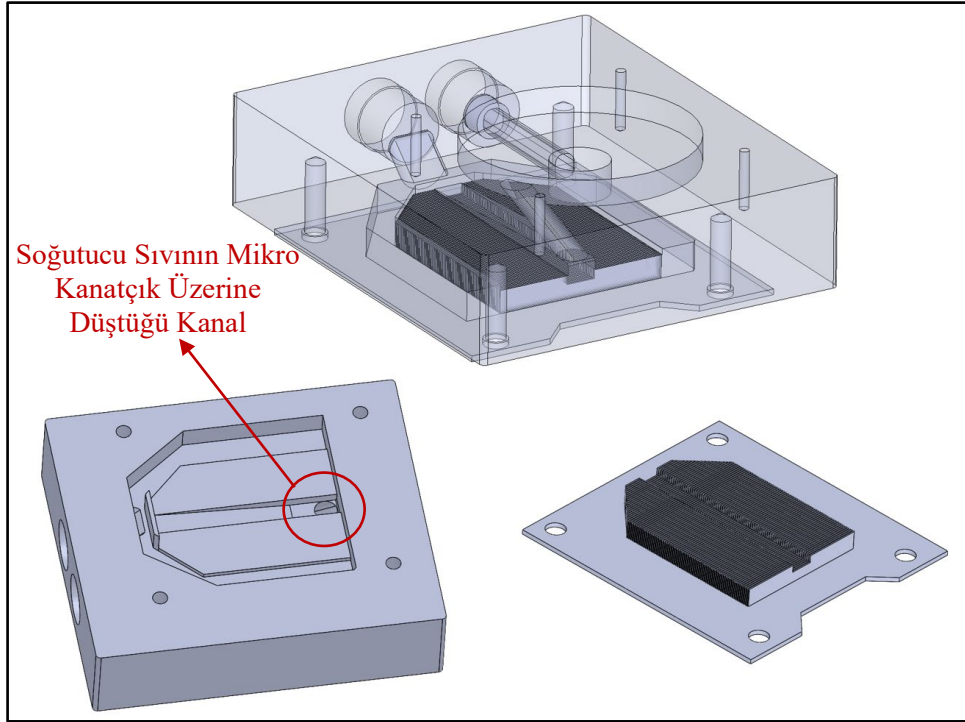
Şekil 5.23. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (II. iyileştirme çalışması)



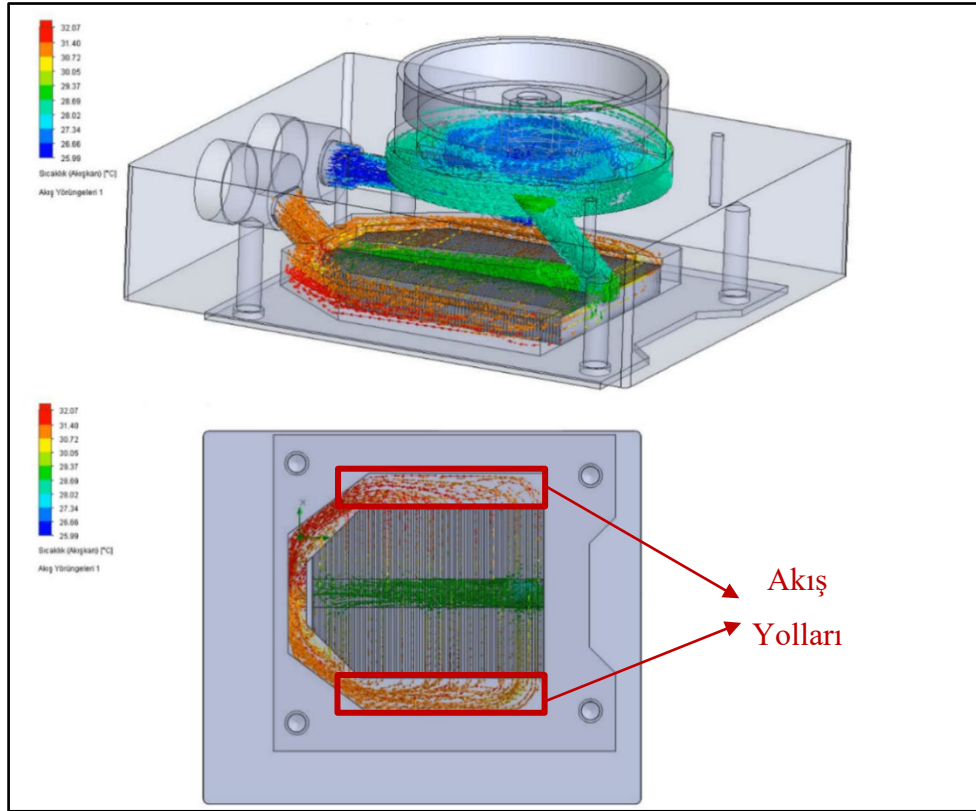
Şekil 5.24. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (II. iyileştirme çalışması)

5.4.3. III. İyileştirme çalışması

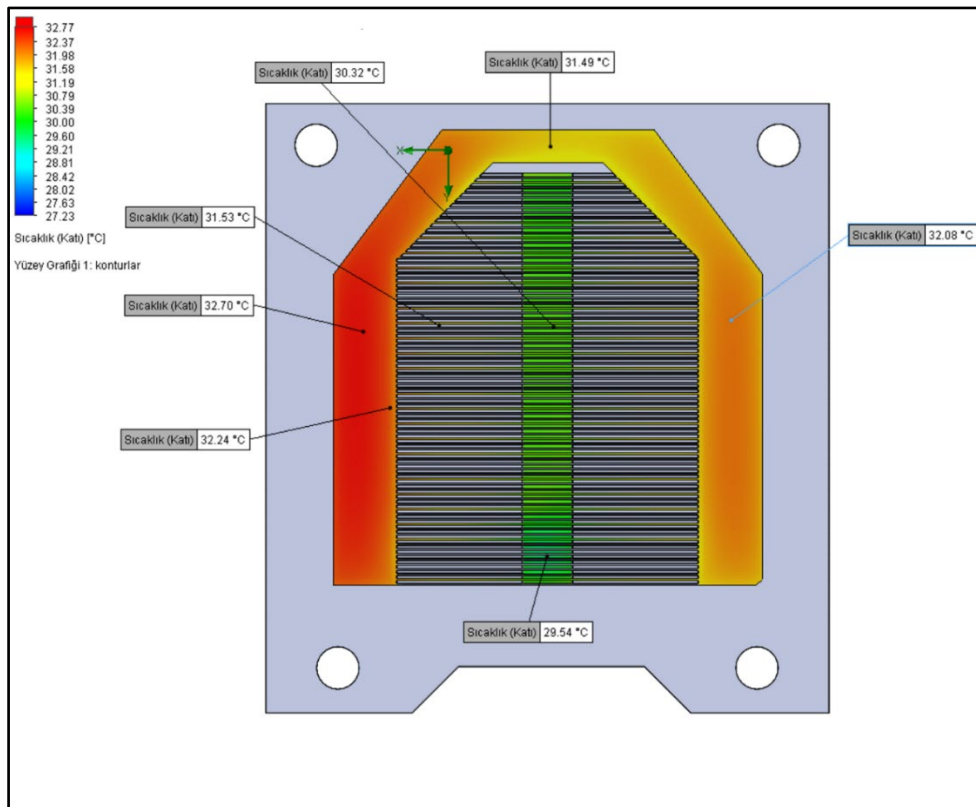
Isı transferi konusunda mikro kanatçık yapıdan maksimum verimi elde edebilmek için soğutucu sıvının mikro kanatçık üzerine düştüğü kanal yapının arka kısmına gelecek şekilde tasarımda bir revizyon gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.25). Analiz sonuçları incelendiğinde, soğutucu sıvı mikro kanatçık yapıdan düzenli bir şekilde geçerek iki akış yolunda eşit bir sıvı dağılımı gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.26). Mikro kanatçık yapı üzerindeki sıcaklık kontur dağılımı incelendiğinde sıvı birikmesi görülen bölgede düzenli bir sıcaklık dağılımı gözlemlenmiştir (Şekil 5.27).



Şekil 5.25. III. iyileştirme çalışması



Şekil 5.26. Soğutucu akışkan simülasyon görünümü (III. iyileştirme çalışması)



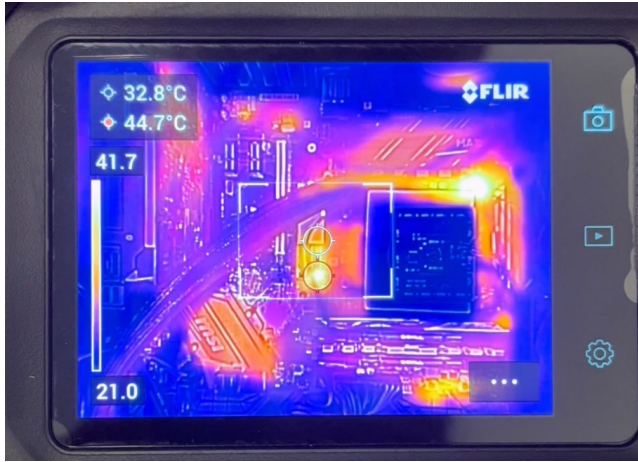
Şekil 5.27. Mikro kanatçık sıcaklık kontur dağılımı (III. iyileştirme çalışması)

5.5. Prototip Testlerinde Elde Edilen Bulgular

İşlemci %60 - %70 performans aralığında çalıştırılıp termal kamera ile sıcaklık testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.28, Şekil 5.29).



Şekil 5.28. Sıcaklık testi (1)



Şekil 5.29. Sıcaklık testi (2)

Farklı zaman aralıklarında yapılan sıcaklık ölçümleri sonucunda işlemci sıcaklık değerlerinin 38,9 °C - 44,7 °C olduğu görülmüştür. Test sonuçları piyasada bulunan farklı sıvı soğutma sistemleri ile kıyaslandığında, soğutma işleminin başarılı bir şekilde olduğu görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Analiz çalışmaları ve gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler aşağıda değerlendirilmiştir.

- Yapılan analiz çalışmaları ile elde edilen OMKS, bilgisayar ortamında sonlu hacimler paket programlarıyla yapılabileceği ortaya koyulmuştur.
- Deneylerde elde edilmesi zor ya da mümkün olmayan verilerin (katılarla temas eden akışkan hücreler gibi) elde edilmesi ve bu verilere bağlı olarak tasarım iyileştirmelerinin mümkün olabileceği görülmüştür.
- Katılarla temas eden akışkan hücreler KAM arttıkça azalmaktadır. Bu yüzden KAM arttıkça OMKS'nin da arttığı görülmüştür.
- KAM'ın artmasıyla beraber ısı transfer yüzey alanının azalacağı, bu durumun OMKS'yi artıracığı görülmüştür.
- Optimum mikro kanatçık parametrelerinin; KAM 0,1 mm, KY 2,3 mm, KK 0,15 mm, TK 1,25 mm olduğu görülmüştür. Ancak üretilebilirlik durumu değerlendirildiğinde modelin üretiminde KAM parametresi 0,15 mm olarak uygulanabilmektedir.
- Giriş ve çıkış portlarının yan yana olduğu tasarımlarda yüksekliğin daha az olmasından dolayı girdap oluşumunun nispeten daha az olduğu görülmüştür.
- Mikro kanatçık yapıdan maksimum soğutma verimini elde edebilmek için iyileştirme çalışmalarıyla soğutucu akışkanın yapı üzerindeki dengeli dağılımı sağlanmıştır.

Bundan sonraki çalışmalara ışık tutması açısından şu önerilerde bulunulabilir;

- Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda üretilebilirliği göz önüne alarak KAM parametresinin soğutma performansına etkisinin incelenmesi önerilmektedir.
- Mikro kanatçık yapının üretiminde kullanılan yöntem geliştirilip seri üretime uygun bir hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: EKWB Premium Liquid Cooling Solutions, URL: <https://www.ekwb.com/guides/>, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
2. İnternet: PCGAMER, URL: <https://www.pcgamer.com/pc-cooling-basics/>, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
3. İnternet: Gametech, URL: <https://gametechpc.net/>, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
4. İnternet: Intel Corporation, URL: <https://www.intel.ca/content/www/ca/en/homepage.html>, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
5. İnternet: Top Flight Computer, URL: <https://topflightpc.com/>, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
6. Topcu, G. (2019). *Bilgisayar işlemcileri için sıvı soğutmalı ısı değiştirici HAD analizleri*. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 1-90.
7. Güder, T.B., (2021). *Farklı Geometrilerdeki Mikro Kanatçık Isı Emicili Anakart İşlemci Modelinin Soğutulmasının Sayısal Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 1-76.
8. Öztürk E., (2004). *Fluent Yazılımı İle Isı Kuyularının HAD Analizleri*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-82.
9. Koyuncuoğlu, A., (2010). *İşlemci Soğutmada Mikrokanal Isı Alıcıların Tasarımı, Üretimi ve Deneysel İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-64.
10. Düzyer, E., (2016). *Otomotiv Led Aydınlatma Ürünlerinin Soğutma Sistemlerinin Tasarımı ve Isıl Analizlerinin Yapılması*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1-76.
11. Köse, H.A., (2020). *Mikro Kanallı Isı Emicilerin Sayısal Olarak İncelenmesi ve Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-94.
12. Mohan, R., and Govindarajan, P. (2011). Experimental and CFD analysis of heat sinks with base plate for CPU cooling. *Journal of mechanical science and technology*, 25(8), 1-10.
13. Mohan, R., and Govindarajan, P. (2011). Thermal analysis of CPU with variable heat sink base plate thickness using CFD. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*, 18(1), 27-36.
14. Freegah, B., Hussain, A. A., Falih, A. H., and Towsyfyhan, H. (2020). CFD analysis of heat transfer enhancement in plate-kanatçık heat sinks with fillet profile: Investigation of new designs. *Thermal Science and Engineering Progress*, 17, 100458.

15. Ozturk, E., and Tari, I. (2008). Forced air cooling of CPUs with heat sinks: A numerical study. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 31(3), 650-660.
16. Şahin, U.R., (2022). *Doğrudan Sıvı Soğutmalı Isı Emici Bloğunun Optimizasyonu ve Soğutma Performansının Sayısal Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, 1-96.
17. Sce, A., and Caporale, L. (2014). High density die casting (HDDC): new frontiers in the manufacturing of heat sinks. *Journal of Physics: Conference Series*, 525(1), 012020, 2-10.
18. İnternet: Profimach, URL: <https://www.profimach.com/it/>, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
19. İnternet: Fin Skiving Machine, URL: <https://www.finskiving.com/>, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
20. Yang, M. C. (2001). *Thermal comparison of plate, extrusion heat sink, and skive heat sink*. Seventeenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, (Cat. No. 01CH37189), California, 102-106.
21. Nafis, B. M., Whitt, R., Iradukunda, A. C., and Huitink, D. (2021). Additive manufacturing for enhancing thermal dissipation in heat sink implementation. *A review. Heat Transfer Engineering*, 42(12), 967-984.
22. İnternet: GamerNexus, URL: <https://www.gamersnexus.net/guides/981-how-cpu-coolers-work>, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
23. İnternet: WebTekno, URL: <https://www.webtekno.com/donanim/sivi-sogutma-sistemi-nedir-nasil-calisir-h6089.html>, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
24. İnternet: Chip, URL: https://www.chip.com.tr/haber/islemciler-nasil-sogutuluyor_50984.html, Son Erişim Tarihi 8.03.2023.
25. Wang, S. H., Lee, G. Y., Wang, W. Z., Wang, Z. Y., and Tsai, C. S. (2007). *An innovative active liquid heat sink technology for CPU cooling system*. 2007 8th International Conference on Electronic Packaging Technology, Dalian, 1-6.
26. Choi, J., Jeong, M., Yoo, J., and Seo, M. (2012). A new CPU cooler design based on an active cooling heatsink combined with heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 44, 50-56.
27. Khan, J., Momin, S. A., and Mariatti, M. (2020). A review on advanced carbon-based thermal interface materials for electronic devices. *Carbon*, 168, 65-112.
28. Lee, S. (1995). Optimum design and selection of heat sinks. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 18(4), 812-817.
29. Hu, H. H. (2012). *Computational fluid dynamics. Fluid mechanics*. Cambridge: Academic Press, 421-472.

30. Thom, A. (1933). The flow past circular cylinders at low speeds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 141(845), 651-669.
31. Kawaguti, M. (1953). Numerical solution of the Navier-Stokes equations for the flow around a circular cylinder at Reynolds number 40. *Journal of the Physical Society of Japan*, 8(6), 747-757.
32. Johnson, R. W. (2016). (ed.). *Handbook of fluid dynamics*. Florida: Crc Press, 6-1.
33. Constantin, P., and Foias, C. (2020). *Navier-stokes equations*. Chicago: University of Chicago Press, 45-47.
34. Kuzmin, D. (2004). *Introduction to computational fluid dynamics*. Lecture Notes, University of Dortmund Institute of Applied Mathematics, Dortmund.
35. Moukalled, F., Mangani, L., and Darwish, M. (2016). The finite volume method. The finite volume method in computational fluid dynamics. *Cham Springer*, 113(4), 103-135.
36. Çengel Y., Cimbala J.M., and Engin T. (2008). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, Ankara: Palme Yayınevi, 122-123.
37. Silver, W. M. (1982). On the equivalence of Lagrangian and Newton-Euler dynamics for manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 1(2), 60-70.
38. Qiu, G., Henke, S., and Grabe, J. (2011). Application of a Coupled Eulerian–Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations. *Computers and Geotechnics*, 38(1), 30-39.
39. Gücüyen, E., and Erdem, R. T. (2019). Kompozit deniz yapısının dalga kuvvetleri altında incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(3), 1125-113.

EKLER

EK- 1. Bakır plaka malzeme özellikleri

KALİTE KONTROL RAPORU QUALITY CONTROL REPORT						TARİH/DATE 23.01.2021	
FİRMA ADI COMPANY NAME					EBAT Dimensions	100X5	
ÜRÜN ADI PRODUCT NAME	ELEKTROLİTİK BAKIR LAMA				PARTİ MİKTARI Quantity		
	ELECTROLYTIC COPPER BARS						
ÜRÜN KODU PRODUCT CODE	TS 435	Cu ETP	R280	100X5	RD		
KİMYASAL BİLEŞİM Chemical Specification							
ELEMENTLER Elements	Cu	Pb	Ag	P	Bi	O	Kalan Remaining
STANDART % BİLEŞİM DEĞERİ Standart Results (%)	99,900	0,005	-	-	-	0,040	0,055
ÖLÇÜLEN DEĞER Final Test	99,981	-	-	-	-	-	0,019
ÖZELLİKLER SPECIFICATIONS	STANDART DEĞERLER Standard Values				ÖLÇÜLEN DEĞERLER Final Test Results		
	DEĞER Value		TOLERANS Tolerance				
GENİŞLİK (mm) Width	100		±0,15		100,15		
KALINLIK (mm) Thickness	5		±0,07		5,05		
ÇEKME MUKAVEMETİ (MPa) (min,max.) Tensile Strength	280		---		---		
KOPMA UZAMASI (%) (min.) Elongation	10		---		---		
SERTLİK (HB) (min,max.) Hardness	85-110		---		99,17		
SAFLIK (%) (min.) Purity	99,900		---		99,981		
ELEKTRİK İLETKENLİĞİ (nS/m) (min.) Electrical Conductivity	56		---		56		
HACİMSEL ÖZDİRENCİ (Ωmm ² /m) (max.) Volume Resistivity	0,01786		---		0,01786		
   							
Yukarıda belirtilen malzemelerin son kontrolünü yaptığımızı ve kalite kontrol raporunun doğru olduğunu bilgilerinize sunarız. We approve the above mentioned material subjected to final inspection and test and measured values given.							

EK- 2. $\alpha=0,05$ için standart F çizelgesi

d.f.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.448	199.500	215.707	224.583	230.162	233.986	236.768	238.883	240.543	241.882
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165
31	4.160	3.305	2.911	2.679	2.523	2.409	2.323	2.255	2.199	2.153
32	4.149	3.295	2.901	2.668	2.512	2.399	2.313	2.244	2.189	2.142
33	4.139	3.285	2.892	2.659	2.503	2.389	2.303	2.235	2.179	2.133
34	4.130	3.276	2.883	2.650	2.494	2.380	2.294	2.225	2.170	2.123
35	4.121	3.267	2.874	2.641	2.485	2.372	2.285	2.217	2.161	2.114
36	4.113	3.259	2.866	2.634	2.477	2.364	2.277	2.209	2.153	2.106
37	4.105	3.252	2.859	2.626	2.470	2.356	2.270	2.201	2.145	2.098
38	4.098	3.245	2.852	2.619	2.463	2.349	2.262	2.194	2.138	2.091
39	4.091	3.238	2.845	2.612	2.456	2.342	2.255	2.187	2.131	2.084
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077
41	4.079	3.226	2.833	2.600	2.443	2.330	2.243	2.174	2.118	2.071
42	4.073	3.220	2.827	2.594	2.438	2.324	2.237	2.168	2.112	2.065
43	4.067	3.214	2.822	2.589	2.432	2.318	2.232	2.163	2.106	2.059
44	4.062	3.209	2.816	2.584	2.427	2.313	2.226	2.157	2.101	2.054
45	4.057	3.204	2.812	2.579	2.422	2.308	2.221	2.152	2.096	2.049
46	4.052	3.200	2.807	2.574	2.417	2.304	2.216	2.147	2.091	2.044
47	4.047	3.195	2.802	2.570	2.413	2.299	2.212	2.143	2.086	2.039
48	4.043	3.191	2.798	2.565	2.409	2.295	2.207	2.138	2.082	2.035
49	4.038	3.187	2.794	2.561	2.404	2.290	2.203	2.134	2.077	2.030
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993
70	3.978	3.128	2.736	2.503	2.346	2.231	2.143	2.074	2.017	1.969
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951
90	3.947	3.098	2.706	2.473	2.316	2.201	2.113	2.043	1.986	1.938
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927
120	3.920	3.072	2.680	2.447	2.290	2.175	2.087	2.016	1.959	1.910
140	3.909	3.061	2.669	2.436	2.279	2.164	2.076	2.005	1.947	1.899
180	3.894	3.046	2.655	2.422	2.264	2.149	2.061	1.990	1.932	1.884
200	3.888	3.041	2.650	2.417	2.259	2.144	2.056	1.985	1.927	1.878
∞	3.841	2.996	2.605	2.372	2.214	2.099	2.010	1.938	1.880	1.831



Gazili olmak ayrıcalıktır