

## Bilgisayarların Sıvı Soğutma Sistemlerinde Kanatçıklar Arası Mesafenin (KAM) Ortalama Mikro Kanatçık Sıcaklığına (OMKS) Etkisinin Sonlu Hacimler Analizi ile Optimizasyonu

Furkan ÖZSARI<sup>1</sup> , Burak ÖZCAN<sup>1</sup> , Ulvi ŞEKER<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Simunes İleri Teknoloji A.Ş., 100. Yıl Blv. No:99, 06374 Ostim OSB, Ankara

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği ABD, 06500-Teknikokullar, Ankara

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 17.11.2022

**Kabul:** 05.03.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Bilgisayar

Sıvı soğutma

Mikro kanatçık

Sonlu hacimler analizi

Simülasyon

### ÖZET

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte hemen her alanda kullanılan bilgisayarların yüksek performansta uzun süre çalışması oldukça önem arz etmektedir. Bilgisayar sistemlerinde performansı en çok etkileyen birimlerden biri olan merkezi işlem biriminin çalışma sıcaklığı performansına doğrudan etki etmektedir. Artan soğutma ihtiyaçlarına geleneksel hava soğutma sistemlerinin cevap verememesinden dolayı sıvı soğutma tabanlı sistemler endüstride yaygınlaşmaktadır. Gelişen simülasyon yazılımları, tasarlanan ürünün prototipini üretmeden sanal ortamda testlerini zamandan ve prototip maliyetlerinden tasarruf ederek gerçekleştirme olanağı sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında merkezi işlem birimlerinin soğutulması için kullanılan sıvı soğutma sistemlerinin bir bileşeni olan mikro kanatçığın sanal ortamda sonlu hacimler yöntemi kullanılarak akış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar gerçekleştirilirken mikro kanatçığın soğutma performansını doğrudan etkileyen kanatçıklar arası mesafe (KAM: 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm) parametresi referans alınmıştır. Gerçekleştirilen sonlu hacimler analizi sonucunda ortalama mikro kanatçık sıcaklığı (OMKS) incelenmiştir. Akış simülasyonları sonucunda KAM'ın artmasıyla birlikte OMKs'nin de arttığı görülmüştür. Bu kapsamda, KAM 0.1mm, 0.2mm ve 0.3mm olduğunda OMKs'nin sırasıyla 28.93°C, 29.39°C, 30.24°C olduğu gözlemlenmiştir.

## Optimization of the Effect of Distance Between Fins (DBF) on Average Heatsink Temperature (AHT) in Liquid Cooling Systems of Computers by Finite Volume Analysis

### ARTICLE INFO

**Received:** 17.11.2022

**Accepted:** 05.03.2023

#### Keywords:

Computer

Liquid cooling

Heatsink

Finite volume analysis

Simulation

### ABSTRACT

With the advancement of technology, it is very important for computers used in almost every field to work at high performance for a long time. The operating temperature of the central processing unit (CPU), which is one of the units that most affect performance in computer systems, directly affects its performance. Liquid cooling-based systems are becoming widespread in the industry due to the inability of traditional air-cooling systems do not respond to increasing cooling needs. Developing simulation software offers the opportunity to perform tests in a virtual environment without producing a prototype of the designed product, saving time and prototype costs. In the scope of this study, flow simulations were carried out using finite volume analysis method in virtual environment of heatsink which is a component of liquid cooling systems used for cooling processors. While performing these simulations, the distance between the fins (DBF: 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm) parameter, which directly affects the cooling performance of the heatsink, was taken as reference. As a result of the finite volume analysis performed, the average heatsink temperature (AHT) was investigated. As a result of flow simulations, it was seen that AHT increased with the increase of DBF. It was observed that when the DBF was 0.1mm, 0.2mm and 0.3mm, the AHT were 28.93°C, 29.39°C, 30.24°C, respectively.

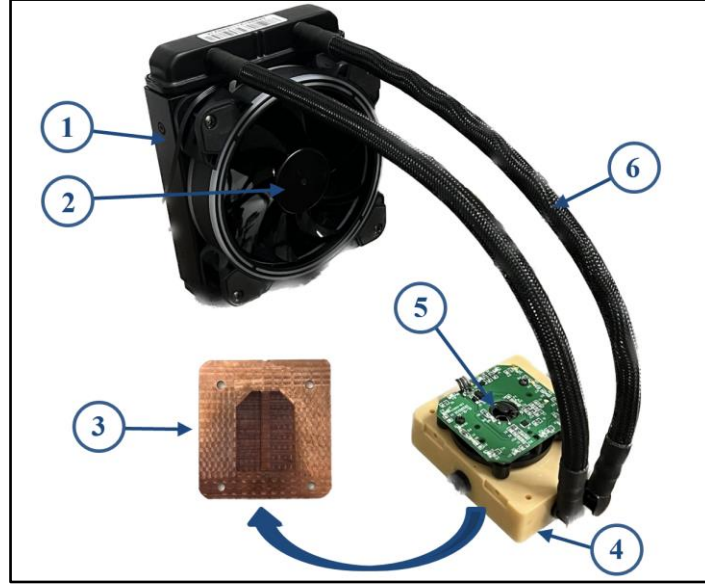
\* Sorumlu yazar, e-posta: furkanozsari97@gmail.com

To cite this article: F. Özşarı, B. Özcan, U. Şeker, Optimization of the Effect of Distance Between Fins (DBF) on Average Heatsink Temperature (AHT) in Liquid Cooling Systems of Computers by Finite Volume Analysis, Manufacturing Technologies and Applications, 4(1),1-10, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1206042>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

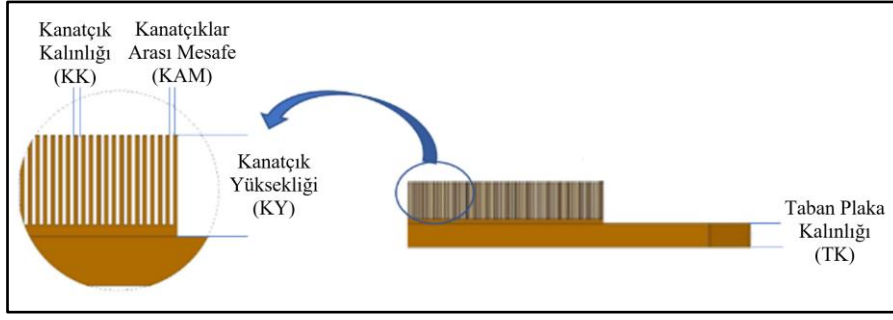
Elektronik teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, elektronik cihazlar günlük hayatımızda önemli bir yer almıştır. Bu cihazlardan maksimum verimi alabilmek için bileşenlerinde oluşan sıcaklık değerlerini optimum düzeyde tutmak gerekir. Elektronik bileşenlerin çalışma sıcaklığı istenen sıcaklık seviyesini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



Şekil 1. Sıvı soğutma sistem bileşenleri (Liquid cooling system components)

Elektronik sistemleri soğutmada çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler geleneksel hava soğutma sistemi ve sıvı soğutma sistemidir. Sıvı soğutma sistemleri Şekil 1’de 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 (all-in-one) oluşmaktadır [1].

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 [2]. 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 ( $2700\text{kg/m}^3$ ) bakıra ( $8900\text{kg/m}^3$ ) göre düşük olduğu için hafiftir. Alüminyumun termal iletkenliği ( $90\text{W/mK}$ ) diğer metallere göre (demir:  $55\text{W/mK}$ , çelik:  $36\text{W/mK}$ , kalay:  $50\text{W/mK}$ ) daha yüksektir. Alüminyum mikro kanatçıklar, fotovoltaik endüstrisinde, elektrikli araçlarda, invertörlerde, led ışıklarda, iletişim ürünlerinde ve benzeri alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Bakır ( $385\text{W/mK}$ ), alüminyumdan ( $90\text{W/mK}$ ) 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 [4].



Şekil 2. Mikro kanatçık tasarım parametreleri (Heatsink design parameters)

Mikro kanatçık tasarımında termal iletkenlik önemli bir faktördür. Şekil 2’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 [5]. Aşağıda mikro kanatçık parametreleri üzerine yapılmış çalışmaların genel bir özeti verilmiştir.

R.Mohan ve arkadaşları [6], kanatçık yüksekliği (15mm, 30mm, 50mm) kanatçıklar arası mesafe (1.5mm, 2.5mm, 4.5mm) 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 [7], taban plaka kalınlığı (2.5mm, 5mm), 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 [8], kanatçıklar arasına radyus vererek ve kanatçık yüzeylerine radyuslu ek parça ekleyerek ısı transfer yüzeyini artırmayı amaçlamışlardır. Öztürk ve arkadaşları [9], 3 farklı kanatçık tasarımı yaparak ve farklı ısı kaynakları tanımlayarak (50W, 100W) mikro kanatçıklar üzerindeki sıcaklık dağılımını incelemiştir.

Daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda boyutsal olarak büyük kanatçık yapıları üzerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, bilgisayarlarda kullanılan sıvı soğutma sistemlerinin bir bileşeni olan mikro kanatçık yapısı özelinde mikro analiz çalışmaları yapılarak KAM – OMKS ilişkisi incelenmiştir.

## 2. TEORİK TEMELLER (THEORETICAL FOUNDATION)

### 2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkan fizikini 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 [10].

İlk olarak 1930’larda A.Thom [11], bir silindir etrafındaki akış üzerine çalışmalar yapmıştır. 1950’li yıllarda M. Kawaguti [12], 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.

#### 2.1.1. Süreklilik denklemi (Continuity equation)

Giren akışkanın kütleli debisi ile çıkan akışkanın kütleli debisi aynıdır [13].

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad (1)$$

Eş. (1)'de yoğunluk ( $\rho$ ), kesit alanı ( $A_1, A_2$ ), akışkan hızı ( $V_1, V_2$ ) ile ifade edilmiştir.

### 2.1.2. Momentum denklemleri (Momentum equations)

Newton'un ikinci yasasına göre uzaydaki hızlanmış bir cismin üzerine herhangi bir etki olmadığı takdirde hızını korumaya devam edecektir [13].

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

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} + \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} + \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (4)$$

Eş. (2), Eş. (3) ve Eş. (4)'te yoğunluk ( $\rho$ ), x eksenindeki hız ( $u$ ), y eksenindeki hız ( $v$ ), z eksenindeki hız ( $w$ ), kinematik viskozite ( $\mu$ ), zaman ( $t$ ) ve Reynolds sayısı ( $Re$ ) ile ifade edilmiştir.

### 2.1.3. Enerji denklemi (Energy equation)

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 [13].

$$W = \Delta U + \Delta K = \Delta E \quad (5)$$

Eş. (5)'te iç enerji ( $\Delta U$ ), kinetik enerji ( $\Delta K$ ), toplam enerji ( $\Delta E$ ) ve yapılan iş ( $W$ ) ile ifade edilmiştir.

## 3. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışma kapsamında KAM'ın OMKS'ye etkisini incelemek için ticari bir yazılım kullanılarak sonlu hacimler analizi gerçekleştirilmiştir. Mikro kanatçık tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer parametreler sabit tutulmuştur.

### 3.1. Mikro Kanatçık Parametreleri (Heatsink Parameters)

Çalışma kapsamında incelenen mikro kanatçık parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Mikro kanatçık parametreleri (Heatsink parameters)

KAM (mm)	0.1, 0.2, 0.3
Mikro kanatçık malzemesi	Bakır

### 3.2. Parametrik Tasarım (Parametric Design)

Tablo 1'de belirtilen parametreler dikkate alınarak parametrik tasarım yapılmıştır. Yapılan tasarım konfigürasyonları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Tasarım konfigürasyonları (Design configurations)

Konfigürasyon	TK (mm)	KK (mm)	KAM (mm)	KY (mm)
1	1.5	0.15	0.1	2.5
2	1.5	0.15	0.2	2.5
3	1.5	0.15	0.3	2.5

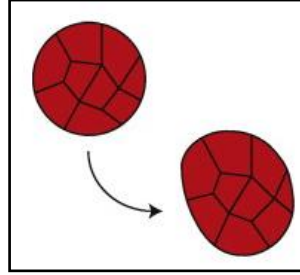
### 3.3. Sonlu Hacim Yöntemi (Finite Volume Method)

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 [14].

#### 3.3.1. Lagrange yaklaşımı (Lagrange approach)

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 [15, 16, 17].

Lagrange yaklaşımında Şekil 3'te görüldüğü üzere düğümlerin geçici olarak malzemeye sabitlendiği ve elemanların malzeme ile birlikte şekil değiştirdiği varsayılmaktadır [18].



Şekil 3. Lagrange yaklaşımı (Lagrange approach)

#### 3.3.2. Euler yaklaşımı (Euler approach)

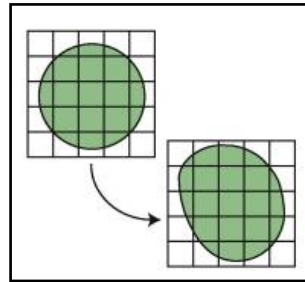
Euler yaklaşımı ile akışkanın hareket ettiği bir akış bölgesi veya kontrol hacmi belirlenir (Şekil 4). Böylece sabit kütleli akışkan parçacıklarının konum ve hızlarının takibine gerek duyulmaz. Bunun yerine kontrol hacmi içerisinde yer alan basınç alanı, hız alanı ve ivme alanı gibi alan değişkenleri tanımlanır [15, 16, 17].

Euler yaklaşımı ile gerçekleştirilen analizler büyük deformasyonlar içeren akış problemlerinde tercih edilir.

$$P = P(x, y, z, t) \quad (6)$$

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t) \quad (7)$$

$$\vec{a} = \vec{a}(x, y, z, t) \quad (8)$$



Şekil 4. Euler yaklaşımı (Euler approach)

Eş. (6), Eş. (7) ve Eş. (8)'de basınç alanı (P), hız alanı (V), ivme alanı (a) ile gösterilmiş olup (x,y,z) kartezyen koordinatı, (t) zamanı ifade etmektedir.

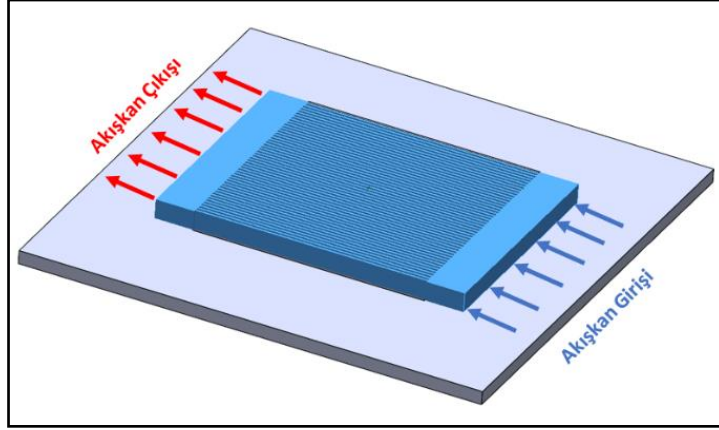
Bu yaklaşımda, lagrange yaklaşımındaki gibi her bir partikül tek tek incelenmediği için analiz süresi açısından bir kazanç sağlamaktadır [18].

### 3.4. Sınır Şartları ve Yükler (Boundary Conditions and Loads)

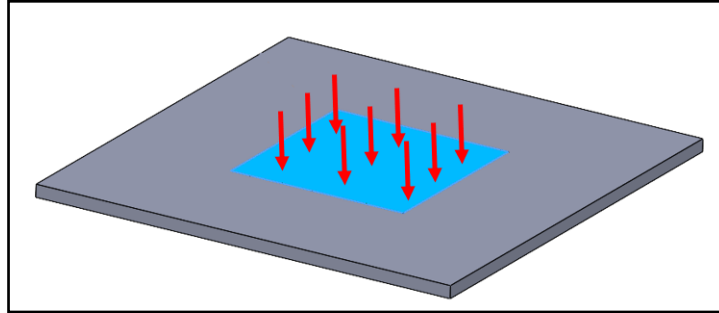
Çalışma kapsamında KAM-OMKS ilişkisi incelendiği için basitleştirilmiş bir akış hacmi oluşturulmuş olup iç akış analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Akışkan sıvı olarak su seçilmiştir

(Tablo 6). Akış tipi türbülanslı olarak tanımlanmıştır. Akış alanı kanatçık duvarlarına yakın olduğu için türbülans modeli  $k-\omega$  olarak seçilmiştir. Giriş debisi  $0.005\text{kg/sn}$  ve ilk sıcaklık  $26^\circ\text{C}$  olarak tanımlanmıştır. Mikro kanatçık işlemci ile temas alanına  $105\text{W}$ 'lık bir ısı tanımlaması yapılmıştır (Şekil 6). Mikro kanatçık malzemesi bakır olarak belirlenmiştir (Tablo 3, Tablo 4, Tablo 5).

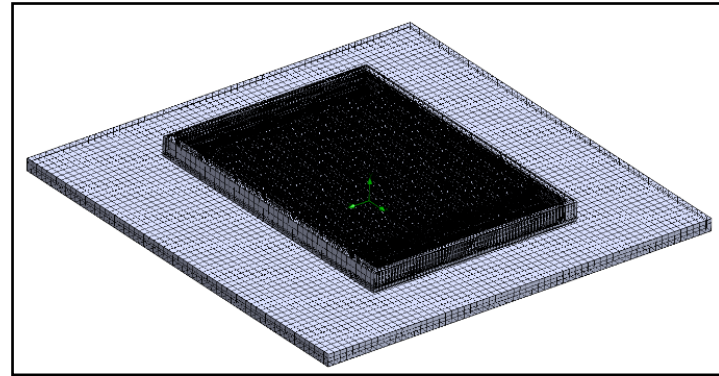
Yapıda bulunan kanatçıklardan dolayı bir mikro akış analiz çalışması yapılmıştır. Bu yüzden gelişmiş kanal iyileştirme aktif hale getirilip minimum mesh boyutu  $0.02$  olarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda en doğru sonucu alabilmek için çözüm ağı bağımsızlığı (mesh independent) dikkate alınmıştır. Toplam element sayısı parametrik tasarımlardan (3 adet) dolayı  $450.000-550.000$  arasında değişmektedir (Şekil 7). Tüm tanımlamalar yapıldıktan sonra mikro kanatçık yapıya sıcaklık sensörü atanmış olup sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 5. Sıvı alan tanımlaması (Fluid area identification)



Şekil 6. Isı tanımlaması (Heat identification)



Şekil 7. Katı-akışkan mesh görünümü (Solid-fluid mesh appearance)



Tablo 3. Bakırın sıcaklığa bağlı özgül ısı değerleri (Specific heat values of copper depending on temperature)

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

Tablo 4. Bakırın sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değerleri (Thermal conductivity values of copper depending on temperature)

Sıcaklık (K)	Isıl İletkenlik (W/(m·K))
4	16200
10	24000
20	10800
40	2170
80	560
150	429
200	413
300	401
400	393
600	379
800	366
1000	352
1356.2	327

Tablo 5. Bakırın yoğunluk ve erime sıcaklık değerleri (Density and melting temperature values of copper)

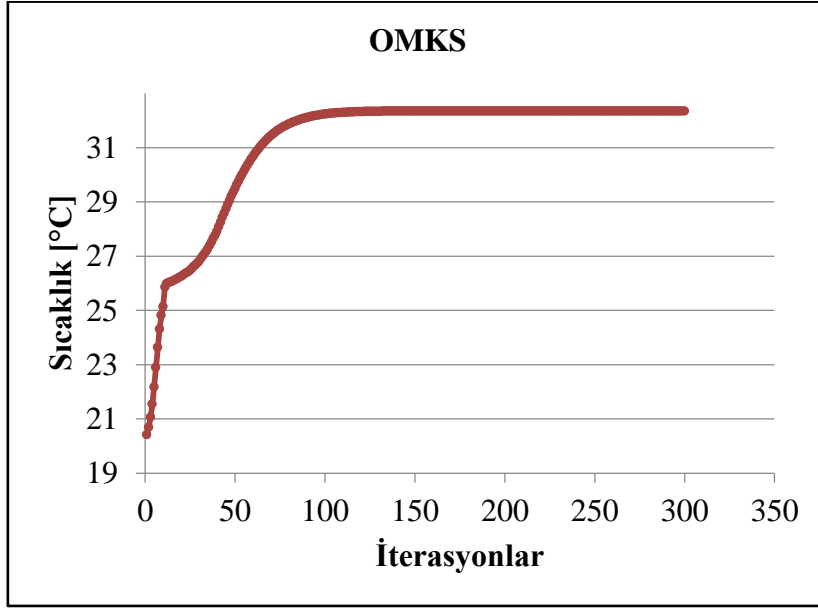
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	8960
Erime Sıcaklığı (K)	1356.2

Tablo 6. Soğutucu akışkan (su) termal özellikleri (Thermal properties of coolant (water))

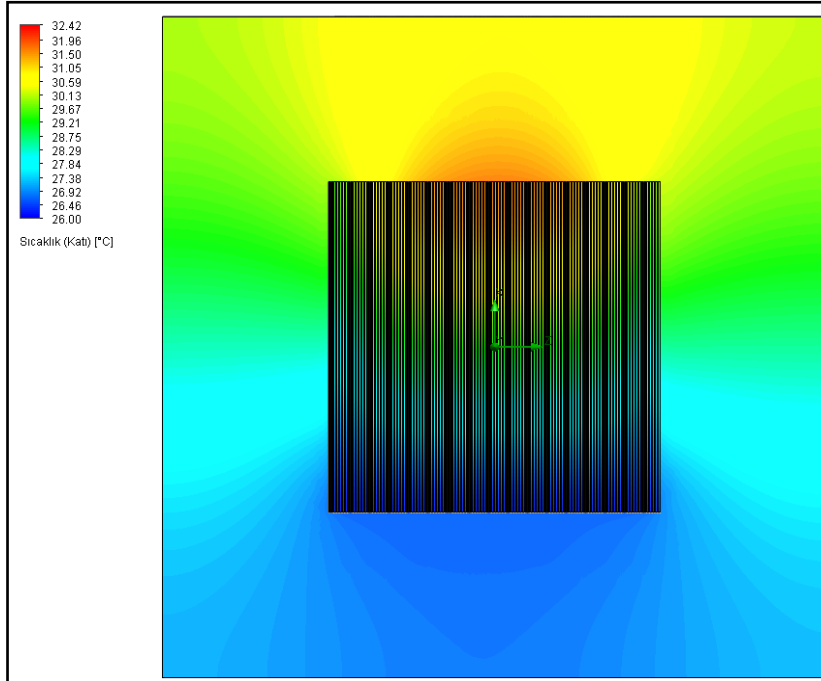
Sıcaklık (K)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik Viskozite (Pa·sn)	Isıl İletkenlik (W/(m·K))	Özgül Isı (J/(kg·K))
273.16	999.79	0.00179	0.56104	4219.9
303.16	995.6	0.000797	0.61547	4180.1
343.16	977.73	0.00044038	0.6631	4190.2
403.16	934.83	0.0002129	0.6837	4261.5
458.16	881.59	0.0001458	0.67114	4425.5
496.16	833.73	0.0001187	0.6456	4649.9
518.16	806.21	0.0001084	0.62667	4819.2

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

KAM parametresi ve sınır şartlarına göre 3 adet analiz gerçekleştirilmiş olup OMKS değerleri incelenmiştir. Analizler 300 iterasyonda çözdürülmüş olup yakınsama grafiği Şekil 8’de verilmiştir. 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 sıcaklık 32.42°C’dir (Şekil 9). Mikro kanatçık yapının soğutma performansına birincil dereceden etki eden faktör ısı transfer yüzey alanıdır. Bu kapsamda, katılarla temas eden akışkan hücreler; KAM 0.1mm iken 235.000, KAM 0.2mm iken 200.000 ve KAM 0.3mm iken 160.000 olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Optimum tasarımın ortalama mikro kanatçık sıcaklığı yakınsama grafiği (Average heatsink temperature convergence graph of optimum design)

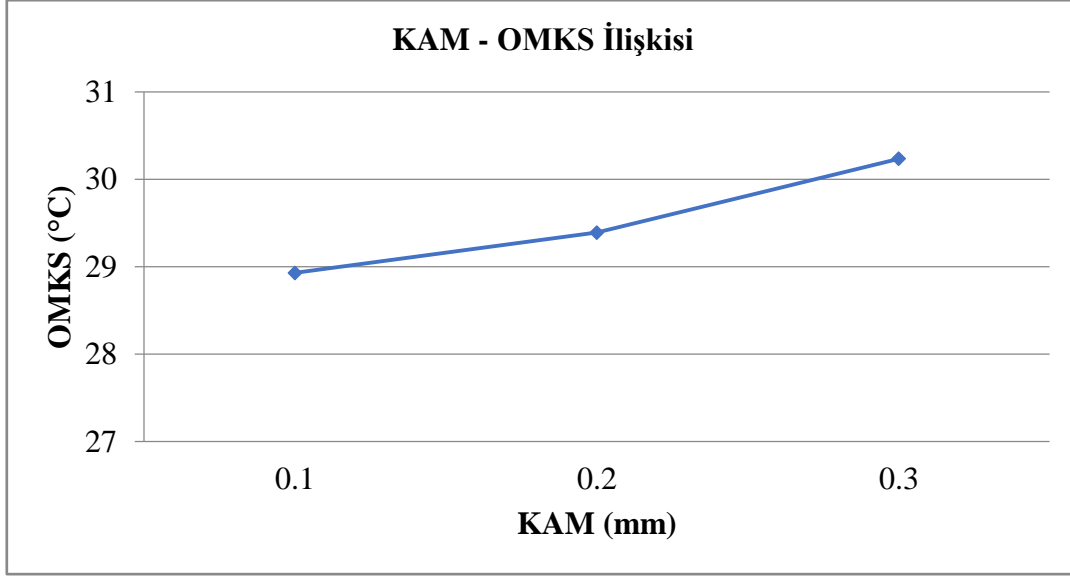


Şekil 9. Optimum tasarımın sıcaklık dağılım konturu (Temperature distribution contour of optimum design)



#### 4.1. Ortalama Mikro Kanatçık Sıcaklığı (OMKS) (Average Heatsink Temperature (AHT))

Yapılan analiz çalışmalarına göre KAM'ın OMKs'ye etkisi Şekil 10'da grafik halinde verilmiştir. Belirli bir alandaki kanatçık sayısı artırılınca ısı transfer yüzey alanı artar. Kanatçık sayısı ve KAM arasında ise ters bir ilişki bulunmaktadır. KAM düşük (kanatçık sayısı fazla) olduğu zaman ısı transfer yüzey alanı artmaktadır. Bu durum ısı transferini artırmaktadır. Gerçekleştirilen sonlu hacimler analizi sonuçları dikkate alındığında KAM'ın artmasıyla birlikte OMKs'nin de arttığı görülmüştür. KAM 0.1mm, 0.2mm ve 0.3mm olduğunda OMKs'nin sırasıyla 28.93°C, 29.39°C, 30,24°C olduğu gözlemlenmiştir. Bu kapsamda KAM değeri 0.1mm olduğunda mikro kanatçık yapının en yüksek soğutma performansına sahip olacağı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar R.Mohan ve arkadaşının yapmış olduğu çalışmayı destekler niteliktedir.



Şekil 10. KAM'ın OMKs'ye etkisi (Effect of KAM on OMKs)

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Analiz çalışmalarını sonucunda elde edilen veriler aşağıda özetlenmiştir;

- 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 de arttığı görülmüştür.
- KAM'ın artmasıyla beraber ısı transfer yüzey alanının azalacağı, bu durumun OMKs'yi artıracığı görülmüştür.

#### 6. ÖNERİLER (SUGGESSTIONS)

Bu çalışma kapsamında KAM 0.1mm olduğunda en iyi soğutma performansı görülmüştür. Ancak KAM'ın 0.1mm olması üretilebilirliği zor ve maliyetli bir hale getirmektedir. Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda üretilebilirliği göz önüne alarak KAM parametresinin soğutma performansına etkisinin incelenmesi önerilmektedir. Buna ek olarak, mikro kanatçık yapısının soğutma performansına etki eden KAM parametresi ile diğer tasarım parametreleri (kanatçık geometrisi, kanatçık yüksekliği ve kanatçık kalınlığı) beraber değerlendirilerek bir çalışma yapılması önerilmektedir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmamın gerçekleşmesinde, yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgilerini bizlerle paylaşan saygıdeğer danışman hocam; Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e ve şirket altyapısını kullanmama olanak sağlayan Simunes İleri Teknoloji A.Ş. ve çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. S. H., Wang, G. Y. Lee, W. Z. Wang, Z. Y. Wang, C. S. Tsai, An innovative active liquid heat sink technology for CPU cooling system, 8th International Conference on Electronic Packaging Technology, IEEE, 2007.
2. J. Choi, M. Jeong, J. Yoo, M. Seo, A new CPU cooler design based on an active cooling heatsink combined with heat pipes, Applied Thermal Engineering, 44: 50-56, 2012.
3. J.Khan, S.A. Momin, M. Mariatti, A review on advanced carbon-based thermal interface materials for electronic devices, Carbon, 168: 65-112, 2020.
4. S. Lee, Optimum design and selection of heat sinks, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 18: 812-817, 1995.
5. A. Bar-Cohen, M. Iyengar, A.D. Kraus, Design of optimum plate-fin natural convective heat sinks, Journal of Electronic Packaging, 125 (2): 208-216, 2003.
6. R. Mohan, P. Govindarajan, Experimental and CFD analysis of heat sinks with base plate for CPU cooling, Journal of Mechanical Science And Technology, 25(8): 2003-2012, 2011.
7. R. Mohan, P. Govindarajan, Thermal analysis of CPU with variable heat sink base plate thickness using CFD, International Journal of the Computer, The Internet and Management, 18: 27-36, 2010.
8. B. Freegah, A.A. Hussain, A.H Falih, H. Towsyfyfan, CFD analysis of heat transfer enhancement in plate-fin heat sinks with fillet profile: Investigation of new designs, Thermal Science and Engineering Progress, 17: 100458, 2020.
9. E.Ozturk, I. Tari, Forced air cooling of CPUs with heat sinks: A numerical study, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 31(3): 650-660, 2008.
10. H.H. Hu, Computational fluid Dynamics, Fluid Mechanics. Academic Press, 421-472, 2012.
11. A. Thom, 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, 1933.
12. M. Kawaguti, 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, 1953.
13. D. Kuzmin, Introduction to computational fluid Dynamics, University of Dortmund, Dortmund, 2004.
14. F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish, The finite volume method, The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, 103-135, 2016.
15. Y.A. Çengel, J.M. Cimbala, Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Palme Yayıncılık, 122-123, 2004.
16. W.M. Silver, On the equivalence of Lagrangian and Newton-Euler dynamics for manipulators, The International Journal of Robotics Research, 1(2): 60-70, 1982.
17. G. Qiu, S. Henke, J. Grabe, Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations, Computers and Geotechnics, 38(1): 30-39, 2011.
18. E. Gücüyen, R.T. Erdem, Kompozit deniz yapısının dalga kuvvetleri altında incelenmesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10(3): 1125-113, 2019.