

Mikro İşlemciler için Sıvı Metal Soğutmalı Mini Kanallı Soğutucularda Kanatçık Kullanımının Termohidrolik Etkilerinin İncelenmesi

Orhan KALKAN^{1*}

¹ Makine Mühendisliği, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Erzincan Binalı Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye

*¹orhan.kalkan@erzincan.edu.tr

(Geliş/Received: 04/08/2023;

Kabul/Accepted: 22/03/2024)

Öz: İşlem hızı giderek artan mikro işlemcilerin etkin soğutmaya olan ihtiyaçları da aynı ölçüde artış göstermektedir. Bu ise daha etkili soğutma yöntemleri üzerinde çalışmaları artırmaktadır. Sıvı metaller ile soğutulan mini/mikro kanallı soğutucular, yüksek ısı iletim katsayıları nedeni ile etkin soğutma sağlayabilmektedirler. Bu çalışmada, Galinstan ile soğutulan bir mini kanallı soğutucuda, kanatçık kullanımının ısı direnç katsayısına ve oluşan basınç kaybına etkileri incelenmiştir. Kanatçıkların farklı konfigürasyonlarda kanal içinde yerleşimi ile oluşturulan ve toplamda 70 farklı modelden oluşan sayısal analiz sonucunda; kanatçıklar arası mesafenin 1,5 mm altında olması durumunda kayda değer bir ısı performans iyileşmesi gözlemlenmemekle birlikte aşırı basınç kaybı oluşturduğu belirlenmiştir. Kanatçık boyunun 0,3 mm ve kanatçıklar arası mesafenin 1,5 mm olduğu durumda, kanatçiksiz duruma göre minimum akışkan giriş hızı koşulunda %15,9 oranında ısı performans iyileşmesi elde edilmiştir. Diğer yandan ise bu durumda 95 kPa değerinde basınç kaybı artışı yaşanmıştır.

Anahtar kelimeler: Galinstan, sıvı metal, mini kanallı soğutucu, mikro işlemciler.

Investigation of the Thermohydraulic Effects of Using Fin in Liquid Metal Cooled Mini-channel Heat Sinks for Microprocessors

Abstract: The need for effective cooling of microprocessors, whose processing speed is increasing, is also increasing at the same rate. This increases the work on more effective cooling methods. Mini/micro-channel heat sinks cooled with liquid metals can provide effective cooling due to their high heat conductivity. In this study, the impact of using fins on the thermal resistance coefficient and the resulting pressure drop in a mini-channel heat sink cooled with Galinstan is investigated. As a result of the numerical analysis created by the arrangement of the fins in the channel in different configurations and consisting of a total of 70 different models, no significant thermal performance improvement is observed when the distance between the fins is less than 1.5 mm, but it has been determined that excessive pressure drop occurs. When the fin length is 0.3 mm and the distance between the fins is 1.5 mm, a thermal performance improvement of 15.9% was obtained in the minimum fluid inlet velocity condition compared to the case without fins. On the other hand, there was an increase in pressure loss of 95 kPa in this case.

Key words: Galinstan, liquid metal, mini-channel heat sink, microprocessors.

1. Giriş

1949'da Werner Jacobi entegre devre kavramını ilk kez ortaya koyduktan sonra, günümüze kadar geçen süreçte bu devrelerdeki mikro işlemcilerin hızla geliştiğini görmekteyiz [1]. Süregelen bu teknolojik gelişme, mikro işlemcilerdeki işlem hızını artırmakla birlikte ısınma problemini de beraberinde getirmektedir. Mikroelektronik cihazların ısı yayma kapasiteleri 106 W/m² ve üzerindedir [2]. Mikroişlemcilerin güç tüketimlerinin hızla artması ile konvansiyonel soğutma teknikleri yetersiz kalmaya başlamıştır. Diğer yandan, elektronik cihazların çalışma sıcaklığının 70 °C'nin altında olması tavsiye edilmekte ve bu noktadan sonra 2 °C'yi aşan her sıcaklık artışı için sistem güvenilirliğinin 10% azalacağı bilinmektedir. Buna bağlı olarak, cihazların verimliliği ve hizmet ömrü azalacaktır [3,4]. Bu nedenle işlemci sıcaklığını bu değer altında tutabilmek için etkili bir ısı yönetim sistemine ihtiyaç duyulur. Bu işlem için ise mini/mikro kanallı soğutucular (MKS) etkili bir soğutma sağlamaktadır. MKS'lerin işlemcilerde kullanılmasına yönelik literatürde yapılan çalışmalar şöyle özetlenmiştir:

Feng ve arkadaşları mikro kanallı bir soğutucunun her bir bölmesine yerleştirilen dairesel kesitli kanatçıkların soğutmaya etkisinin araştırmışlardır [5]. Reynolds sayısının 133 ile 530 arasında değiştiği şartlarda yapılan sayısal simülasyonlarda, MKS'nin ısı transfer karakteristikleri incelenmiştir. Kanal içinde, kanal boyunca uzanan bir kanatçık kullanmak yerine çift dairesel kanatçık kullanımının türbülans oluşumunu artırarak daha iyi ısı transferi sağladığı, akış alanını artırdığı ve buna bağlı basınç düşümünü azalttığı gözlemlenmiştir. Kanatların geometrik konfigürasyonları incelenen çalışmanın sonucu olarak, kanat çapı arttıkça ısı transferi iyileşirken basınç düşümünün de arttığı saptanmıştır. Ayrıca kanatlar arası mesafenin sıcaklık homojenliğine etkisinin önemli

* Corresponding author: orhan.kalkan@erzincan.edu.tr. ORCID Number: 0000-0002-9664-1819

olduğu vurgulanmış, en homojen sıcaklık dağılımı, 0,55 mm boşluk mesafesinde elde edilmiştir. Zhang ve arkadaşları çalışmalarında, genişliği 1,25 mm, yüksekliği ise 0,5 mm olan ters akışlı mini kanallı soğutucu tasarlamıştır [6]. Kanal duvarında boşluklu yapılar kullanılmış ve bu boşluğun geometrisinin (zikkak, kare-dalgali ve dalgali), yüksekliğinin (0,1–0,9 mm) ve uzunluğunun (2–15 mm) duvar sıcaklığı karakteristiği üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucu olarak, zikkak boşluklara sahip karşı akışlı MKS, diğer boşluklara kıyasla en düşük duvar sıcaklığını ve en iyi duvar sıcaklığı homojenliğini sağladığı görülmüştür. Khoshvaght-Aliabadi ve arkadaşları kare kesitli sinüs dalgası şeklindeki bir kanal geometrisine sahip MKS tasarımının soğutma performansını deneysel olarak incelemişlerdir [7]. Tasarlanan MKS'ye ait belirli geometrik parametrelerinin, yani dalga boyu (10, 20 ve 40 mm) ve dalga genliğinin (0,5, 1,0 ve 2,0 mm) etkileri gözlemlenmiştir. Ayrıca su-etilen glikol karışımları (kütlece 100:0, 75:25 ve 50:50 oranlarında), soğutma sıvısının etkisini araştırmak için çalışma sıvısı olarak seçilmiştir. Taşınım ısıl direnci; dalga boyu 20 mm, dalga genliği 1,0 mm ve 0,024 kg/s kütlelel debideki su akışı şartlarında, düz kanallı MKS'ye göre %113,8 oranında azalmıştır. Mathew ve Hotta yaptıkları çalışmada, doğal taşınım şartları altında yedi adet yüksek ısı üreten işlemcinin performansını artırmak için Parafin mumu bazlı mini kanalları deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir [8]. İncelenen işlemcinin, $0,4 \times 10^7 - 1,0 \times 10^7$ W/m³ aralığında homojen dağılıma sahip olmayan sabit hacimsel ısı üretimi sağlanmıştır. Parafin mumu kullanılarak işlemcinin maksimum sıcaklığı %37,34–45,79 oranında azaltılmış ve böylece işlemci performansının 2,33–4,63 kat arttığı gözlemlenmiştir. Deneyle desteklemek için sayısal analiz yapılmış ve her iki sonucun da 4–5 °C işlemci sıcaklık değişimi içerisinde birbiriyle iyi bir şekilde örtüştüğü görülmüştür.

Hoang ve arkadaşları, su soğutuculu ticari jet soğutmalı MKS'nin termohidrolik performansını analiz etmişlerdir [9]. Ticari yazılım 6sigmaET kullanılarak üç boyutlu bir sayısal simülasyon gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Sayısal simülasyon 29 °C, 36 °C, 50 °C ve 60 °C giriş sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Soğutucunun hacimsel debisi, 0,7 l/dk ile 3 l/dk arasında değişmektedir. Mikro kanallarda pin kanatları oluşturulması işlemi dikkate alınarak geometri optimizasyonu yapılmıştır. Çalışma sonucunda, basınç düşümünde önemli bir değişiklik olmaksızın pin kanatlı MKS'nin ısıl direncinin, kanatsız MKS'ye göre %29,4 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Jet soğutuculu MKS'lerin, termal performansı iyileştirmede etkin olduğu vurgulanmıştır. Kim ve Mudawar, iki fazlı akışkan ile soğutulan MKS'lerin termal tasarımı ve çalışma limitleri üzerine bir çalışma yürütmüştür [10]. Soğutma sıvısı olarak HFE-7100, R134a ve suyun kullanıldığı çalışmada, farklı geometrik yapılar ve farklı ısı akışı şartlarından oluşan kombinasyonlar için soğutma performans kıyaslamaları yapılmıştır. Mikro kanalların derinleşmesi ile birlikte maksimum ısı akısının arttığı, buna karşın basınç kaybının azaldığı tespit edilmiştir. Zhang ve arkadaşları çalışmalarında, MKS kanalları içerisinde düz ve burulmuş kanatlara sahip konfigürasyonların soğutma performanslarını sayısal olarak incelemişlerdir [11]. Kanatlara ait üst burulma açısı (0°–45°), alt burulma açısı (0°–45°) ve yüksekliğin (0,5–1,0 mm) soğutma etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, mini kanaldaki bükümlü kanatların ısı transferini iyileştirdiğini ancak aynı zamanda düz kanat ile karşılaştırıldığında akış direncini de artırdığını göstermektedir. Alt burulma açısı 45°, üst burulma açısı 0° ve yüksekliği 0,5 mm olan burulmuş kanatlı MKS, incelenen Reynolds sayısı aralığında (239–954) en yüksek soğutma performansını sağlamıştır.

Son yıllarda, düşük erime sıcaklığına sahip sıvı metallerin, soğutma teknolojilerinde kullanılmasına yönelik çalışmalar artmaktadır [12,13]. Sıvı metallerin suya göre oldukça yüksek ısıl iletkenlik katsayılarına sahip olmaları, yüksek ısı akısına sahip uygulamalarda kullanılması açısından en önemli avantajlarından [14]. Daha önce sıvı metal soğutma teknolojilerinin uygulamaları, sıvı metallerin daha yüksek erime noktaları nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamalarıyla sınırlıydı. Günümüze kadar Galyum sıvı metalinin erime noktasını düşürmek için çeşitli ötektik galyum alaşımları hazırlanmıştır. Bunların iki önemli örneği; İndiyum ile Galyum alaşımı olan EGaln ve Galyum, İndiyum, Kalay alaşımları olan EGalnSn (Galinstan) olup sırasıyla erime noktaları oda sıcaklığında 15 °C ve -19 °C civarındadır [15,16]. Bu soğutma akışkanlarının her ikisi de çeşitli soğutma teknolojilerinde, özellikle mikro elektronikte kullanılmaktadır. Deng ve arkadaşları, mini ve mikro kanallarda Galyum alaşımı ile suyun ısı ve akış performanslarını karşılaştırmak için deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir [17]. Çalışma sonuçları, soğutma akışkanları yüksek hızlarda çalıştırıldığında, sıvı metal ile soğutulan MKS, sudan daha yüksek ısı transfer katsayısı ürettiğini göstermektedir. Luo ve Liu, farklı kanal genişliklerine sahip sıvı metal ile soğutulan MKS'lerin termal performansını deneysel olarak araştırmışlardır [18]. Sonuç olarak ise, ısı transfer katsayısının, soğutucunun kütlelel debisindeki artışla birlikte arttığını ve daha küçük kanal genişliğine sahip soğutucunun daha iyi termal performans gösterdiğini vurgulamışlardır. Tawk ve arkadaşları, güç elektroniği cihazlarının sıvı metal ile soğutulmasını, sayısal ve deneysel olarak inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [19]. Çalışmada sıvı metal alaşımı olarak Galn kullanılmış ve su ile soğutmaya göre performans kıyaslaması yapılmıştır. Çalışma sonucunda, sıvı metal ile soğutmanın su ile soğutmaya göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki maksimum sıcaklık farkının %7'den az olduğunu göstermişlerdir. Yang ve arkadaşları çalışmalarında hem su hem de sıvı metal ile soğutulan MKS için bir analiz yapmışlardır [20]. Sonuç olarak sıvı metalin mini kanal ölçeğinde çok daha iyi bir termal ve akış performansı

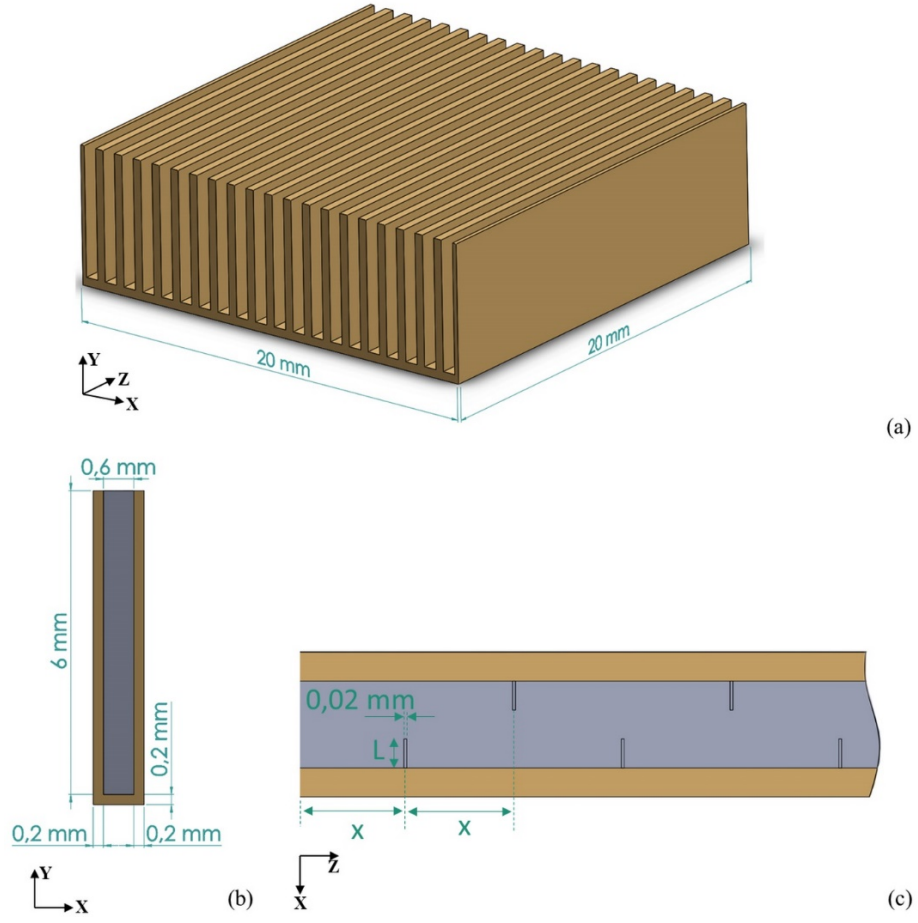
sergilediğini gözlemlemişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçlar, farklı korelasyonlarla da karşılaştırılmış ve sıvı metal için bir boyutlu model ile doğrudan sayısal teknik kullanılarak hesaplanan termal dirençlerin, suya göre önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Zhang ve arkadaşları, pompalama gücü ve ısıtma yüklerini değiştirerek Galinstan ile soğutulan bir MKS'nin soğutma performansını deneysel olarak incelemişlerdir [21]. Çalışma sonucunda, sistemin 300 W/cm^2 ısı akışı ile 1500 W gücündeki ısıtıcıyı istenen seviyede soğutabildiklerini göstermişlerdir. Ayrıca Galinstan ile mini kanallı soğutma için basınç kaybının, su ile mikro kanallı soğutmaya göre çok daha düşük olduğu da kanıtlanmıştır. Muhammed ve arkadaşlarının yaptıkları sayısal çalışmada, farklı alaşımlardan oluşan Galyum bazlı sıvı metal ile soğutan bir MKS üzerinde parametrik incelemeler gerçekleştirmişlerdir [22]. MKS'ye ait kanal genişliği, taban kalınlığı, kanat yüksekliği ve akışkan hızı gibi farklı parametrelerin soğutma performansı ve basınç kaybı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Belirlenen optimum MKS geometrisinin $0,21 \text{ m/s}$ akışkan hızı ile $158,3 \text{ W/cm}^2$ değerinde ısı soğurma performansı gösterirken, basınç kaybının ise $467,7 \text{ Pa}$ olduğu hesaplanmıştır. Sarowar yaptığı sayısal bir çalışmada, beş farklı seramik malzemeden (alüminyum nitrit, berilyum oksit, hafnyum diborür, titanyum diborür ve zirkonyum diborür) yapılan sıvı metal soğutmalı MKS'lerin ısı performanslarını karşılaştırmıştır [23]. Ayrıca EGalnSn, EGaln, Galn ve GaSn olmak üzere dört farklı sıvı metal alaşımının ısı ve hidrolik performansları test edilmiştir. Çalışma sonucunda ise alüminyum nitrit malzemeden yapılan MKS en iyi performansı gösterirken, Galn optimum soğutucu akışkan olarak belirtilmiştir. Chen ve arkadaşları, üstten yarıklı, alttan uzatmalı ve kompozit mikro kanal olmak üzere üç yeni tip MKS önermiş ve Galinstanın akış ve ısı transfer özellikleri incelenmiştir [24]. En düşük akış direnci kompozit mikro kanalda elde edilmiştir. Pompalama gücü geleneksel kanal tipine göre %54,9 daha düşük olacağı hesaplanmıştır. Toplam ısı dirençte ise yalnızca %0,7 artış gözlemlenmiştir. Kalkan çalışmasında MKS geometrik parametreleri, MKS malzemesi, Galyum bazlı sıvı metal soğutucu tipi ve soğutucu giriş hızı için optimum bir tasarım sunmuştur [25]. Toplam termal direnç, ilk yatırım maliyeti, basınç düşümü ve maksimum çalışma sıcaklığı performans parametreleri olarak seçilmiştir. Sonuç olarak kanal genişliği, kanal yüksekliği, kanat genişliğinin yarısı, kanat eğim açısı ve giriş hızının belirlenen optimum değerleri sırasıyla $1,16 \text{ mm}$, $3,00 \text{ mm}$, $0,24 \text{ mm}$, $5,96^\circ$ ve $0,4 \text{ m/s}$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca tasarlanan MKS için alüminyum-bakır hibrit yapısı ve soğutucu için Galn bileşiği optimum seçenek olarak hesaplanmıştır. Xiang ve arkadaşları sıvı metal ile elektronik devre soğutma yöntemini üç farklı mikro jet çarpma sistemine uygulamışlardır [26]. Soğutucu olarak su ve sıvı galyum kullanan bu sistemlerin ısı dirençlerinin karşılaştırılıp analiz edildiği analitik ve sayısal modeller oluşturulmuştur. Sonuçlar, sıvı galyum kullanan sistemlerin suya kıyasla her zaman daha düşük termal dirence sahip olduğunu, termal dirençte maksimum %29,8'lik bir düşüş ve çip sıcaklığında en fazla $12,6 \text{ K}$ düşüş elde edildiğini göstermiştir. Sıvı metal kullanımı ile minimum termal direncin $0,033 \text{ K/W}$ değerine kadar düşebileceği vurgulanmıştır.

Literatürde MKS için sıvı metal bazlı soğutma çalışmalarına bakıldığında, sınırlı sayıda çalışma olduğu ve sıvı metal soğutmalı MKS'ler için ısı-hidrolik performans iyileştirme çalışmalarının artırılmasına yönelik gerektiği kadar çalışma yapılmadığı görülmektedir. Bu çalışmada, galyum bazlı sıvı metal soğutmalı bir MKS kanalında farklı konfigürasyonlarda kanatçık yapısına sahip tasarımların termohidrolik etkileri, toplamda 70 farklı durum için sayısal analiz yöntemi ile araştırılmıştır. Isıl performans parametresi olarak MKS'nin toplam ısı direnci, hidrolik performans parametresi olarak ise kanaldaki basınç kaybı göz önüne alınmıştır. Ayrıca kanaldaki hız dağılımlarının kanatçık yapılarına göre değişimi, simülasyon sonuçlarından elde edilen akım çizgisi konturları oluşturularak irdelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Sayısal Hesaplama Modeli

Mikro işlemcilerin yaklaşık ebatları $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ olması dolayısıyla, bu taban ölçülerine sahip bir MKS sayısal olarak incelenmek üzere seçilmiştir. Şekil 1a'da üç boyutlu model görünümü verilen MKS'nin sayısal olarak hesaplama alanı ve ölçüleri Şekil 1b'de verilmiştir. Şekil 1c'de ise kanal içerisine farklı ölçülerde yerleştirilen kanatçıkların görünümü verilmiştir. Z ekseni doğrultusunda akışa sahip olan soğutucu akışkan olarak Galinstan sıvı metali seçilmiştir. MKS malzemesi ise bakır olarak tercih edilmiştir. Galinstan ve bakıra ait termofiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Üç boyutlu eşlenik ısı transfer ve akış çözümlemesi ile analizi gerçekleştirilen bu problem için bazı kabuller ve sınır şartları belirlenmiştir. Akışın sıkıştırılmaz ve sürekli olması, akışkan ve katı çözüm alanlarının fiziksel özelliklerinin sabit olması, radyasyonla ısı transferinin ihmal edilmesi ve enerji denkleminde viskoz difüzyon etkisinin ihmal edilmesi, belirlenen kabullerdir. Sınır şartları olarak ise akışkan giriş hızı (v_g), akışkan giriş sıcaklığı (T_g), akışkan çıkış basıncı ($p_c = 0 \text{ Pa}$) ve ısı akışı (q) belirlenmiştir. v_g düzgün giriş hızı dağılımına sahip ve T_g ise 300 K olarak kabul edilmiştir. MKS'nin çözüm alanının taban alanına 100 W/cm^2 değerinde düzgün dağılımlı q tanımlanmıştır. Ayrıca duvarlarda kaymama koşulu tanımlıdır. ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Tüm çözümlerin yakınsama kriteri olarak ise 10^{-6} seçilmiştir.



Şekil 1. MKS'ye ait a) üç boyutlu model görünümü, b) hesaplama alanı ve c) kanatçık geometrisi

Tablo 1. MKS malzemelerine ait termofiziksel özellikler

Malzeme	Özgül ısı (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Yoğunluk, ρ (kg m ⁻³)	Isıl iletkenlik, k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Dinamik viskozite, μ (Pa s × 10 ⁻³)	Prandtl sayısı
Bakır	400	8960	370	-	-
Galinstan	295	6440	16,5	2,4	0,043

Akış alanı için kullanılacak olan temel korunum denklemleri (1) – (3) ile gösterilmiştir.

- Momentum korunum denklemi:

$$\rho_a (\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) \quad (1)$$

- Süreklilik denklemi:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

- Enerjinin korunumu denklemi:

$$\rho_a c_{p,a} (\vec{V} \cdot \nabla T_a) = k_a \nabla^2 T_a \quad (3)$$

Burada, \vec{V} akışkan hızı, T_a akışkan sıcaklığı, p akışkanın basıncıdır. $\rho_a, c_{p,a}, k_a, \mu$ değerleri ise sırasıyla akışkana ait yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve dinamik viskozite değerleridir.

Kanatçiksiz MKS analizlerinde, maksimum v_g hızında Reynolds sayısı 2300 kritik değerinden küçük olduğu için lineer akış modeli kullanılmıştır. Kanatçıklı modellerdeki MKS analizlerinde ise RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. k- ϵ modeli, güçlü hesaplama performansı, hesaplama maliyeti açısından ekonomik olması ve çeşitli çalkantılı koşulların makul derecede doğruluğu nedeniyle en popüler modellerden birisidir [27]. Yakhot ve Orszag tarafından geliştirilen RNG k- ϵ türbülans modeline ait transport denklemleri (4)-(8) ile şu şekilde verilir [28].

$$\frac{\partial(\rho_a k_a)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a k_a u_i)}{\partial x_i} = P_k - \rho_a \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_a}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_a \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{C_{1\epsilon} \epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon}^* \rho_a \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \quad (6)$$

$$\eta = S k_a / \epsilon \quad (7)$$

$$S = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2} \quad (8)$$

Burada, k akışkanın türbülans kinetik enerjisi, ϵ türbülanslı kinetik enerjinin dağılma oranı, P_k ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülanslı kinetik enerjisi, μ_t türbülans viskozitesidir. $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, \eta_0$ ve β model sabitleri olup sırasıyla 0,0845, 0,7194, 0,7194, 1,42, 1,68, 4,38 ve 0,012'dir.

MKS ye ait katı çözüm alanı için çözümlenecek tek denklem, enerjinin korunumu denklemi olup (9) ile verilmiştir.

$$k_{MKS} \nabla^2 T_{MKS} = 0 \quad (9)$$

Burada, k_{MKS} MKS katı malzemesinin yani bakırın ısı iletim katsayısı iken, T_{MKS} ise MKS sıcaklığıdır. Termohidrolik performansı incelenen MKS için ısı performans kriteri olarak toplam ısı direnç (R_t), hidrolik performans olarak ise basınç kaybı (ΔP) göz önüne alınmıştır. MKS için R_t (10) ile hesaplanmaktadır:

$$R_t = \frac{\Delta T_{maks}}{Q} = \frac{T_{maks} - T_g}{Q} \quad (10)$$

$$Q = q A_t \quad (11)$$

Burada, T_{maks} MKS üzerindeki maksimum sıcaklık, Q toplam ısı akısı, A_t ise MKS nin taban alanıdır. Hidrolik performans parametresi olarak belirlenen ΔP için, Muhammed ve arkadaşları tarafından sıvı metal soğutmalı MKS'ler için geliştirilen aşağıdaki korelasyon denklemleri kullanılmıştır ve denklem (12) – (14) ile verilir [22].

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2} \quad (12)$$

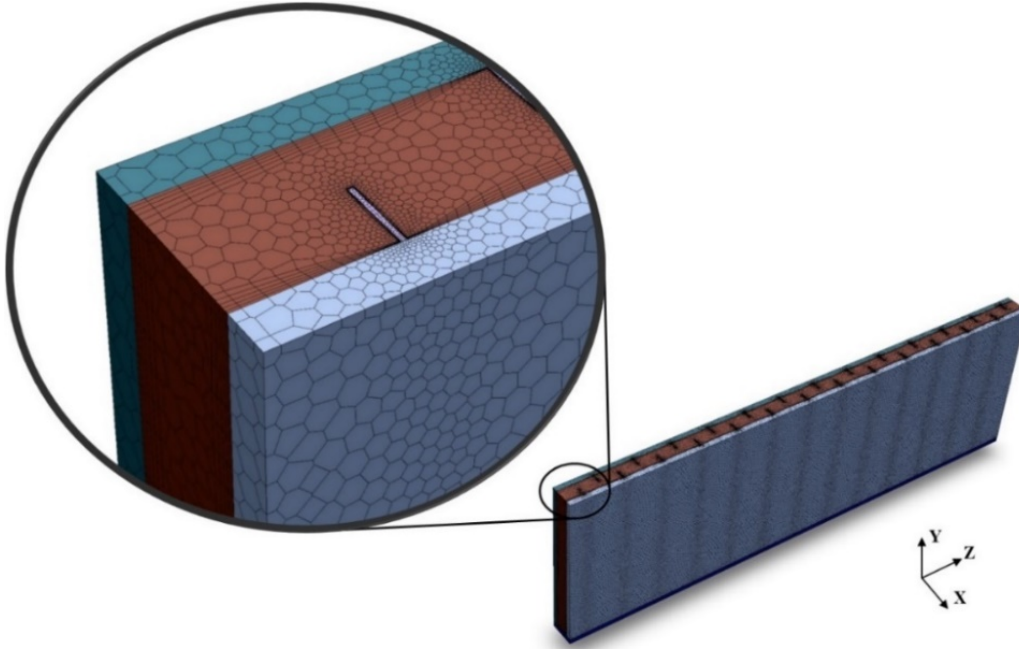
$$f = \frac{21,04 (x_h)^{-0,434} \epsilon^{-0,01}}{Re}, \quad 0,001 < \epsilon < 0,02 \quad (13)$$

$$f = \frac{45,2 (x_h)^{-0,202} \epsilon^{-0,094}}{Re}, \quad 0,001 < \epsilon < 0,02 \quad (14)$$

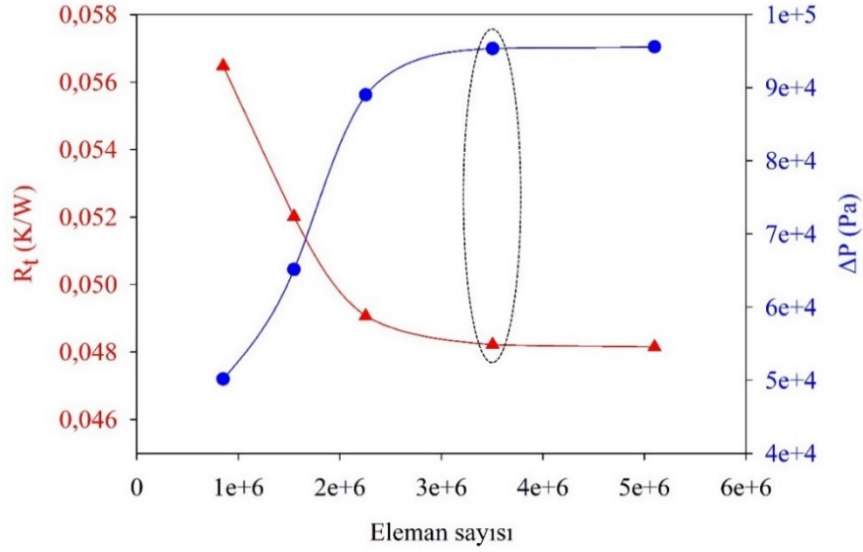
Burada, f sürtünme katsayısı, D_h hidrolik çap, L kanal uzunluğu, Re Reynolds sayısı, x_h hidrodinamik giriş uzunluğu, ε ise kanalın en-boy oranıdır.

2.2. Çözüm Ağının Oluşturulması ve Bağımsızlık Analizi

MKS hesaplama alanı için Şekil 2’de gösterildiği gibi poligonol yapıda çözüm ağı yapısı, ANSYS çözüm ağı modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Ağ yapısında minimum ve maksimum ortogonal kalite değerleri sırasıyla 0,2 ve 0,79’dur. Ayrıca ağ yapısı oluşturulurken doğruya en yakın sonuçları elde etmek ve hesaplama zamanını minimuma indirmek için ağ bağımsızlık analizi yapılması gerekmektedir. Yüksek yoğunluklu ağ yapısına sahip çözüm alanları çözüm süresini artırmakla birlikte yuvarlama ve kesme hatalarının da artışına sebep olmaktadır. Diğer yandan düşük sayıda elemana sahip ağ yapısı kullanımı ise doğru sonuca yakınsamama gibi hatalara sebebiyet verecektir. Dolayısıyla ağ yapısının optimum eleman sayısına sahip olması için, sonuçlardaki değişimin önemsiz kabul edildiği durumdaki eleman sayısına sahip ağ yapısını seçmek gerekecektir. Kanatçıklı yapıdaki MKS için, $L=0,3$ mm, $x=1,5$ mm olan model baz alınarak bağımsızlık analizi yapılmıştır. Bağımsızlık analizi parametreleri olarak ise R_t ve ΔP belirlenmiştir. Şekil 3’te eleman sayısına göre R_t ve ΔP ’nin değişimleri verilmiş olup bu sonuçlarına göre 3504989 eleman sayısına sahip ağ yapısını seçmek uygun olacaktır.



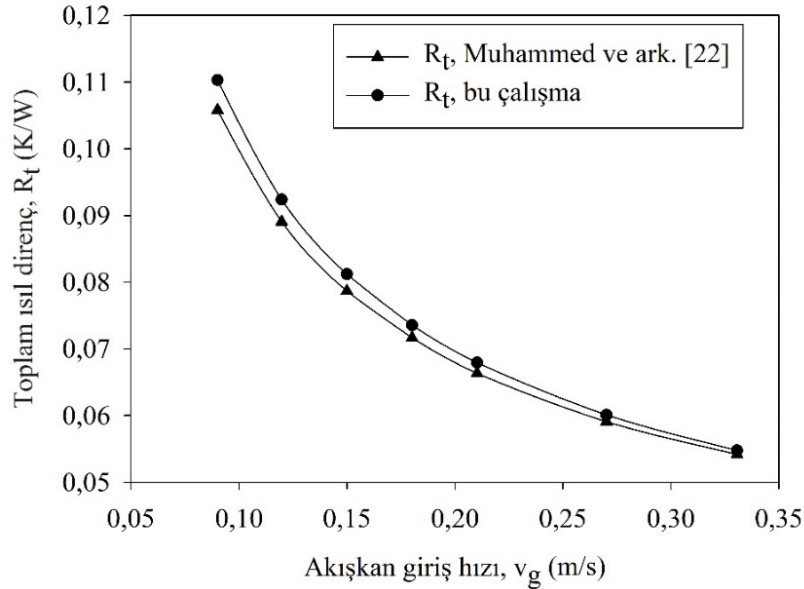
Şekil 2. MKS hesaplama alanına ait ağ yapısı



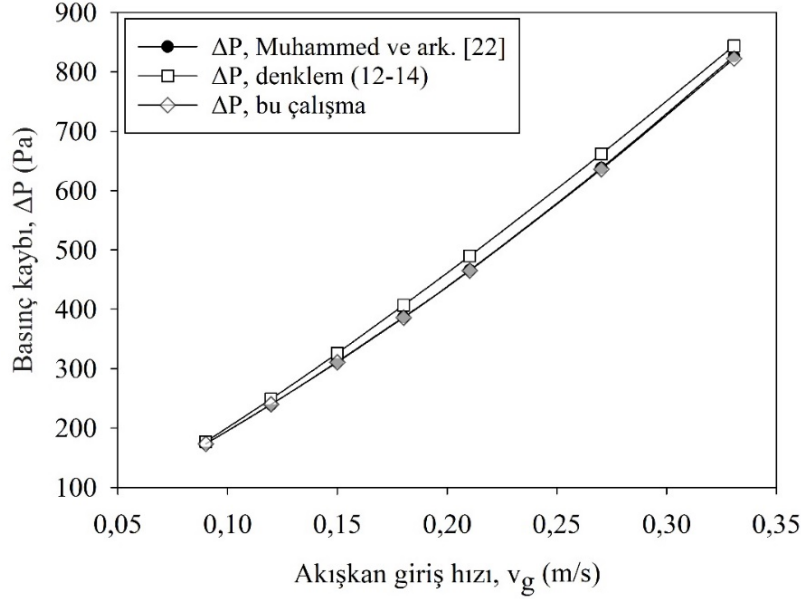
Şekil 3. Ağ yapısı bağımsızlık analizi

2.2. Sayısal Analiz Sonuçlarının Doğrulanması

Sıvı metal soğutmalı MKS için yapılan sayısal analizlerin doğruluğunu belirlemek için literatürde yer alan, Muhammed ve arkadaşları tarafından yapılan sayısal bir çalışma ve denklem (12-14)' te verilen korelasyon denklemleri kullanılmıştır [22]. Bu çalışmada kullanılan MKS için kanatsız yapıda elde edilen R_t ve ΔP değerlerinin akışkan giriş hızına (v_g) göre değişimleri Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla karşılaştırılmıştır. R_t için maksimum hata oranı akışkan giriş hızı 0,09 m/s iken %4,2 olarak hesaplanmıştır. ΔP için ise maksimum hata oranı, akışkan hızı 0,33 m/s iken %5,1 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu çalışma için yapılan sayısal analiz sonuçlarının kabul edilebilir seviyede hata oranlarına sahip olduğu söylenebilir.



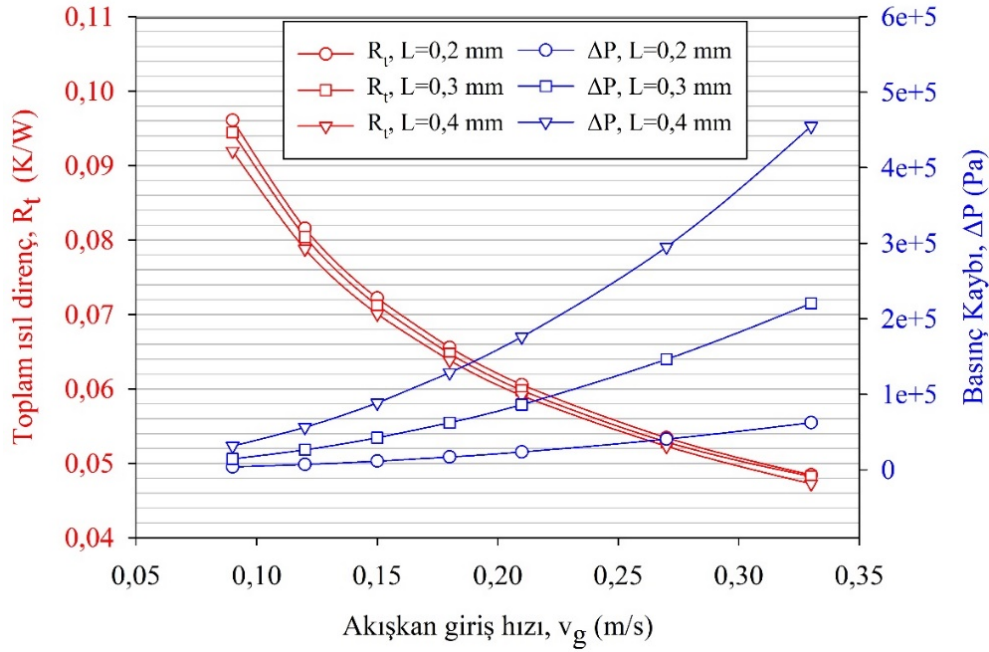
Şekil 4. Toplam ısıl direnç değerinin doğrulanması



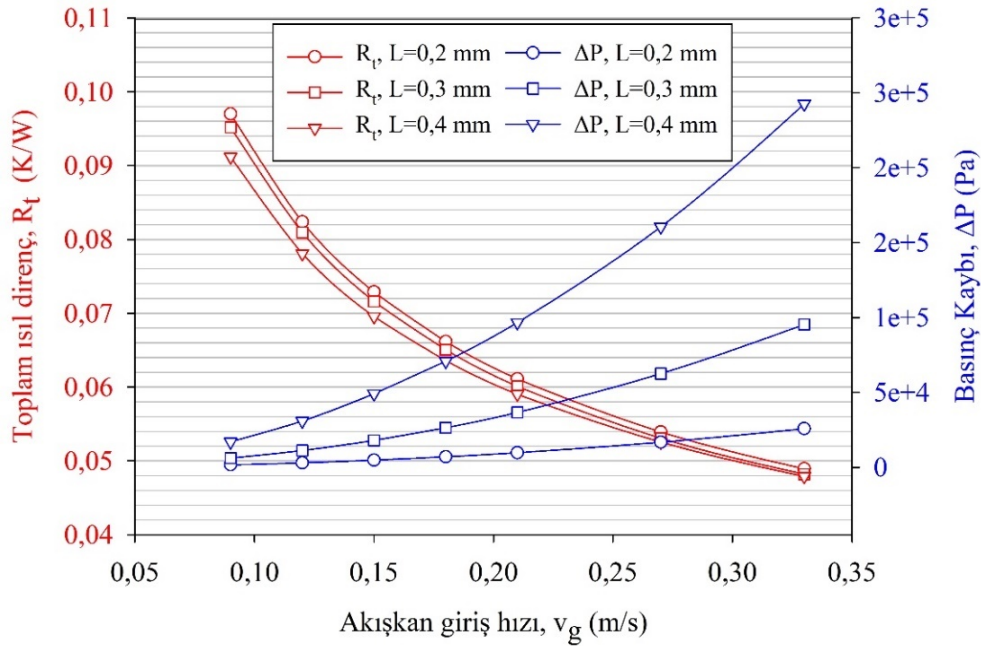
Şekil 5. Basınç kaybı değerinin doğrulanması

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu sayısal çalışma kapsamında sıvı metal soğutmalı MKS'ler için kanatçık kullanımının ısı ve hidrolik etkileri incelenmiştir. Kanatçıkların kanalda yerleşimi, üç farklı kanatçık boyu ($L=0,2, 0,3, 0,4$ mm) ve üç farklı değerde kanatçıklar arası mesafe ($x=1, 1,5, 2$ mm) seçilerek belirlenmiştir. Akışkan giriş hızları ise 0,09, 0,12, 0,15, 0,18, 0,21, 0,27, 0,33 m/s olmak üzere 7 farklı değerde sabit tutularak çözüm yapılmıştır. Böylelikle toplamda kanatçiksız model ile birlikte 70 farklı durum için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da $x=1$ mm olduğu durum için akışkan giriş hızına bağlı olarak her bir L değeri için R_t ve ΔP değişim eğrileri gösterilmektedir. Akışkan giriş hızı arttıkça toplam ısı direncin her bir L boyu için lineer olmayan bir azalma gösterdiği, dolayısıyla daha etkili bir soğutma elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, her v_g değerinde L değeri arttıkça toplam ısı direncin düştüğü görülmektedir. Fakat akışkan giriş hızı arttıkça, L değeri artışının toplam ısı direnci düşürmedeki etkisinin giderek azaldığı söylenebilir. Örneğin $v_g=0,09$ m/s iken, L değeri 0,2 mm'den 0,4 mm ye çıktığında toplam ısı direnci değerinde %4,3 iyileşme gerçekleştirmiştir. Fakat $v_g=0,33$ m/s iken bu oran %2,5'e düşmüştür. Kanal içerisindeki basınç kaybına bakıldığında hızın artışı ile birlikte her bir L değeri için parabolik bir artış göstermektedir. Diğer yandan L nin artışı ile birlikte hıza bağlı basınç kaybı artışının daha fazla olduğu görülmektedir. Minimum akışkan giriş hızı değerinde ($v_g=0,09$ m/s), $L=0,2$ mm ve $L=0,4$ mm olduğu durumlar arasındaki basınç kaybı farkı 27 kPa iken, hız maksimum olduğu şartta ($v_g=0,33$ m/s) basınç kaybı miktarının 393 kPa değerine çıktığı görülmektedir. Dolayısıyla kanal uzunluğunun yüksek hızlarda basınç kaybını aşırı derecede artırdığı ve buna bağlı pompalama gücünün de çok fazla artacağı söylenebilir.



Şekil 6. x=1 mm durumunda akışkan hızına göre termohidrolik değişim

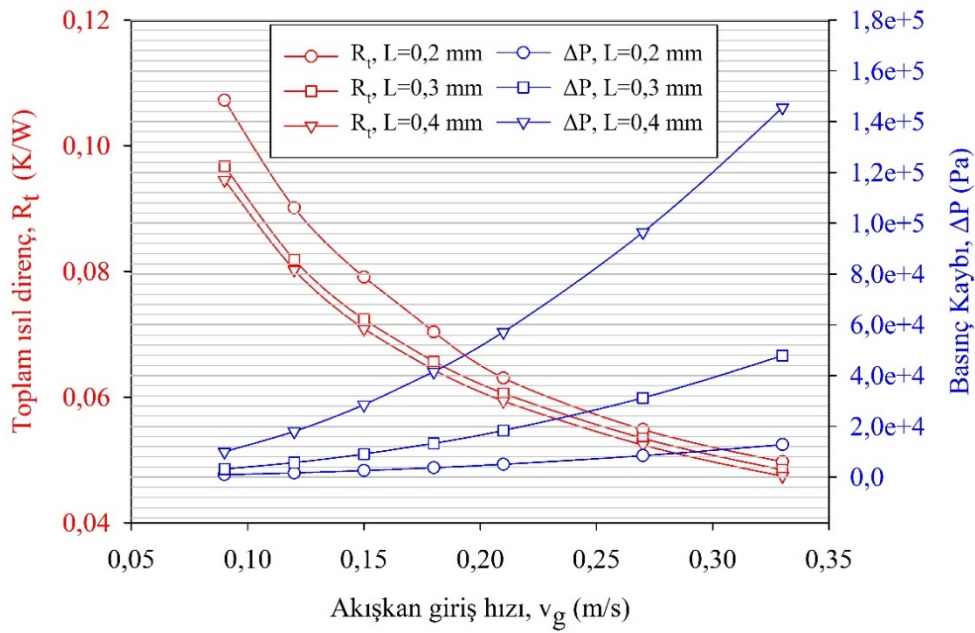


Şekil 7. x=1,5 mm durumunda akışkan hızına göre termohidrolik değişim

Şekil 7' de x=1,5 mm olduğu durum için toplam ısı direnci ve basınç kaybı değerlerinin akışkan giriş hızına bağlı olarak değişim eğrileri verilmiştir. Beklenen bir sonuç olarak R_t , akışkan giriş hızının artışıyla birlikte düşerken, kanat L uzunluğunun R_t üzerindeki etkisinin düşük hızlarda daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum hızlara çıktığında kanat L boyunun ısı direnci azaltma etkisi giderek düşmektedir. x=1 mm olan durum ile karşılaştırıldığında ise R_t tüm hız değerleri göz önüne alındığında, maksimum %1,4 artış göstermiştir. Bu artış ise MKS'de maksimum sıcaklık (T_{maks}) değeri olarak yaklaşık 0,3 °C'ye karşılık gelen bir değişimi doğurmaktadır. Dolayısıyla kanatlar arası mesafenin (x) 1,5 mm değerinin altına düşürülmesinin kayda değer bir ısı performans iyileşmesi getirmemesi ile birlikte basınç kaybını da daha fazla artırarak pompalama gücü

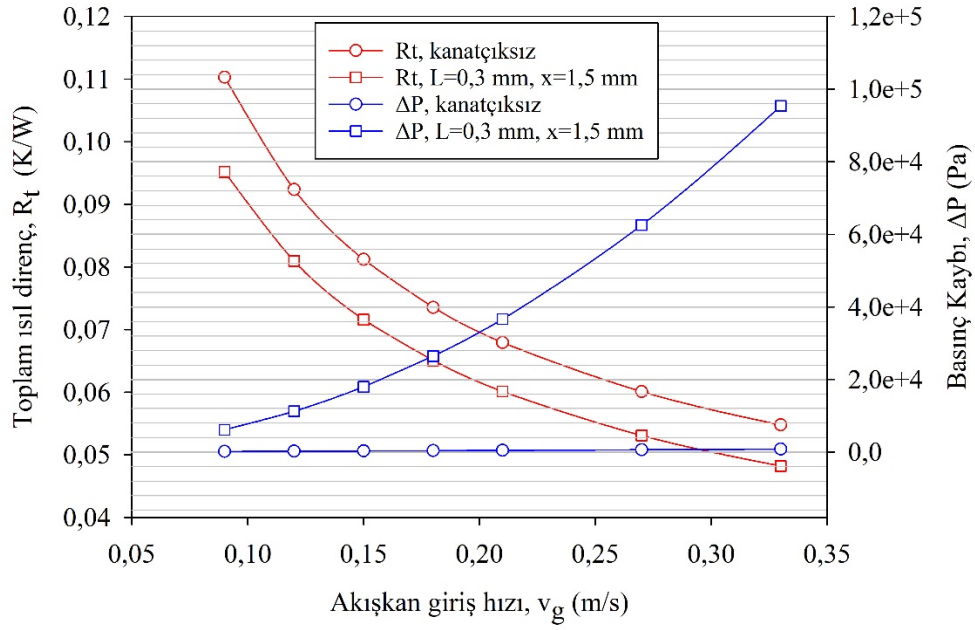
gereksinimini artıracacağı söylenebilir. Diğer yandan ΔP değeri $x=1,5$ mm durumunda da v_g artışı ile birlikte artmaktadır. $v_g=0,09$ m/s iken $L=0,2$ mm ve $L=0,4$ mm olduğu durumlar arasındaki basınç kaybı farkı 15 kPa iken, $v_g=0,33$ m/s değerine yükseldiğinde ΔP değeri 217 kPa'a çıkmaktadır.

Şekil 8, kanatlar arası x mesafesinin 2 mm olduğu durumdaki toplam ısı direnç ve basınç kaybı değerlerinin akışkan giriş hızına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Diğer kanatlar arası mesafe durumlarında olduğu gibi giriş hızının artışıyla birlikte R_t parabolik bir azalış gösterirken ΔP değeri ise artmaktadır. L kanat uzunluğu etkisinin diğer durumlardaki gibi düşük hızlarda daha fazla etkili olduğu görülmekle birlikte, x mesafesinin artması ile R_t üzerindeki bu etkinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin, $v_g=0,09$ m/s iken, L değeri 0,2 mm 'den 0,4 mm ye çıktığında toplam ısı direnç değerindeki değişim $x=1$ mm durumunda %4,3 iken, $x=2$ mm durumunda bu oran %13,4'e yükselmektedir. Diğer yandan akışkan giriş hızının yükselmesi ile birlikte L kanat uzunluğu etkisi giderek azalmaktadır. Fakat yüksek v_g hızlarında L kanat uzunluğunun basınç kaybına etkisinin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Örneğin, $v_g=0,33$ m/s iken $L=0,2$ mm ve $L=0,4$ mm durumlarındaki basınç kaybı farkı 133 kPa'dır. $v_g=0,09$ m/s iken ise bu fark yaklaşık 9 kPa değerine düşmektedir. Bununla birlikte kanatlar arası mesafenin artması ile birlikte genel olarak basınç kaybının düştüğü de söylenebilir.

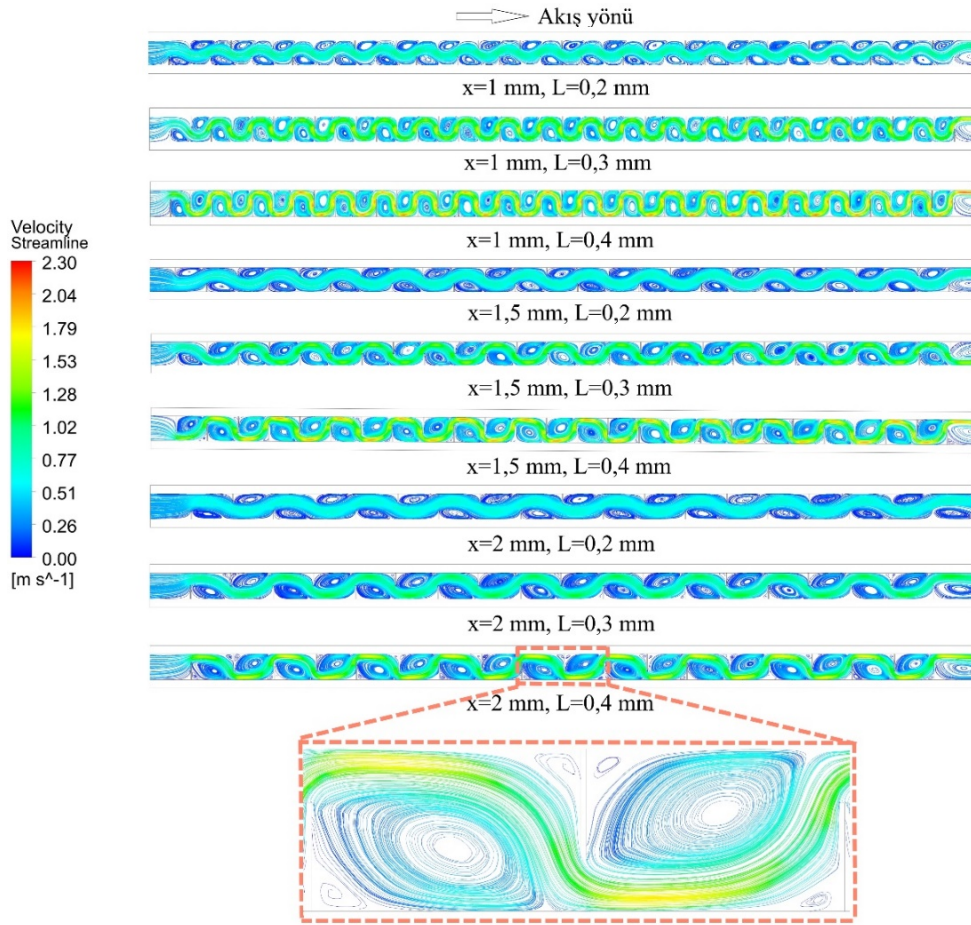


Şekil 8. $x=2$ mm durumunda akışkan hızına göre termohidrolik değişim

MKS için kanatçık kullanımı ile kanatçiksiz durumun ısı ve hidrolik performans açısından kıyaslanmasının yapıldığı Şekil 9, akışkan giriş hızına göre R_t ve ΔP değerlerinin değişim eğrilerini göstermektedir. Burada, kanatçık L boyu 0,3 mm ve kanatçıklar arası x mesafesi 1,5 mm olan durum ile kanatçiksiz MKS karşılaştırılmıştır. Kanatçık kullanımı ile birlikte minimum v_g hızında ısı performansında %15,9 oranında iyileşme elde edilirken, v_g hızı maksimum olduğu durumda ise %13,6 oranında R_t değerinde iyileşme görülmektedir. Kanatçık kullanımı durumunda basınç kaybındaki artışa bakıldığında, akışkan giriş hızının artması ile birlikte ciddi oranda bir fark ortaya çıkmaktadır. $v_g=0,09$ m/s iken kanatçıklı ve kanatçiksiz durumlardaki basınç kaybı farkı yaklaşık 6 kPa iken, v_g hızı 0,33 m/s değerine yükseldiğinde bu fark yaklaşık 95 kPa olmaktadır. Dolayısıyla sıvı metal soğutmalı MKS için kanatçık kullanımı ısı performansını iyileştirirken, yüksek akışkan hızlarında oldukça fazla pompalama gücü gereksinimine sebep olacağı söylenebilir.



Şekil 9. Kanatçıklı ve kanatçiksız MKS' nin termohidrolik performans kıyaslaması



Şekil 10. Kanal boyunca akışkan hız dağılımlarını veren akım çizgileri

Yapılan sayısal analiz sonucunda, kanatçık yapılı MKS kanalları içerisinde elde edilen, maksimum akışkan giriş hızı şartındaki ($v_g=0,33$ m/s) hız dağılımları, her bir L kanat boyu ve kanatlar arası x mesafesi için Şekil 10'da verilmiştir. Her bir durum için ana akım hattındaki akım çizgilerine bakıldığında, kanatlar arası mesafe azaldıkça ve kanat boyu arttıkça akış hızının da arttığı görülmektedir. Diğer yandan kanat boyu minimum iken ($L=0,2$ mm) hız dağılımı daha homojen olup, kanat boyu maksimum olduğu durumlarda ($L=0,4$ mm) daha düzensiz bir hız dağılımı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca L kanat boyunun 0,2 mm olduğu durumlarda ana akım hattı dışında kalan ölü bölgelerde düşük hızlı vorteksler görülürken, kanat boyu uzadıkça bu bölgelerde akışkan hızının arttığını gösteren vorteks akım çizgileri görülmektedir. Şekil 10' da, $x=2$ mm ve $L=0,4$ mm olan durum için ana akım hattındaki akım çizgilerinin ve ölü bölgede oluşan vortekslerin detaylı görünümü de verilmiştir. Tüm durumlar göz önüne alındığında, yaklaşık 2,3 m/s maksimum hızına, en dar kanatlar arası mesafe ($x=1$ mm) ve en uzun kanat boyu mesafesi ($L=0,4$ mm) şartında ulaşılmıştır. Akışkan hızı arttıkça taşınım ile ısı transferinin arttığı buna karşılık basınç düşümünün de artarak hidrolik performansın azaldığı bilinmektedir. Şekil 8' den de anlaşılacağı üzere maksimum akışkan giriş hızı ($v_g=0,33$ m/s) ve kanatlar arası mesafe ($x=2$ mm) şartlarında en düşük ısı direnç katsayısına ($0,0497$ K/W), $L=0,4$ mm kanat boyu mesafesinde ulaşılmıştır. Diğer yandan bu şartlarda en yüksek basınç kaybı değeri ($145559,2$ Pa) elde edilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada mikroçipler için kullanılan sıvı metal soğutmalı bir mini kanallı soğutucu tasarımında kanatçık kullanımının ısı ve hidrolik performansa etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Soğutucu kanalına yerleştirilen kanatçıklar, üç farklı boy uzunluğu ve üç farklı kanatçıklar arası mesafeye sahip olmak üzere toplamda dokuz farklı tasarım elde edilmiştir. Kanatçiksiz soğutucu tasarımı ile birlikte yedi farklı soğutucu akışkan debisi değerinde toplamda 70 sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda mini kanallı soğutucunun toplam ısı direnç değişimleri kıyaslanarak ısı performansı irdelenmiştir. Bununla birlikte kanallardaki basınç kayıpları karşılaştırılmış ve akışkan hızı dağılımları akım çizgileri konturları oluşturularak incelenmiştir. Sonuç olarak, kanatlar arası mesafenin 1,5 mm altında olması durumunda kayda değer bir ısı performans iyileşmesi gözlemlenmemekle birlikte aşırı basınç kaybı oluşturduğu saptanmıştır. Kanat boyunun 0,3 mm ve kanatlar arası mesafenin 1,5 mm olduğu durumda, kanatçiksiz duruma göre minimum akışkan giriş hızı koşulunda %15,9 oranında ısı performans iyileşmesi elde edilmiştir. Diğer yandan ise bu durumda 95 kPa değerinde basınç kaybı artışı yaşanmıştır. İleriki bir çalışma olarak, bu performans parametrelerinin optimizasyonunun yapılması ile daha etkin bir tasarım yapılabileceği söylenebilir.

Kaynaklar

- [1] Guarnieri M. The unreasonable accuracy of Moore's Law [Historical]. IEEE Industrial Electronics Magazine 2016; 10(1): 40-43.
- [2] Jing D, He L. Numerical studies on the hydraulic and thermal performances of microchannels with different cross-sectional shapes. Int. J. Heat Mass Tran 2019; 143: 118604.
- [3] Liu D, Zhao FY, Yang HX, Tang GF. Thermoelectric mini cooler coupled with micro thermosiphon for CPU cooling system. Energy 2015; 83: 29-36.
- [4] Dang T, Teng JT. Comparisons of the heat transfer and pressure drop of the microchannel and minichannel heat exchangers. Heat and Mass Transfer 2011; 47: 1311-1322.
- [5] Feng Z, Hu Z, Lan Y, Huang Z, Zhang J. Effects of geometric parameters of circular pin-fins on fluid flow and heat transfer in an interrupted microchannel heat sink. International Journal of Thermal Sciences 2021; 165: 106956.
- [6] Zhang Q, Feng Z, Zhang J, Guo F, Huang S, Li Z. Design of a mini-channel heat sink for high-heat-flux electronic devices. Applied Thermal Engineering 2022; 216: 119053.
- [7] Khoshvaght-Aliabadi M, Sahamiyan M, Hesampour M, Sartipzadeh O. Experimental study on cooling performance of sinusoidal-wavy minichannel heat sink. Applied Thermal Engineering 2016; 92: 50-61.
- [8] Mathew VK, Hotta TK. Performance enhancement of high heat generating IC chips using paraffin wax based minichannels-a combined experimental and numerical approach. International Journal of Thermal Sciences 2021; 164:106865.
- [9] Hoang CH, Tradat M, Manaserh Y, Ramakrisnan B, Rangarajan S, Hadad Y, Schiffres S, Sammakia B. Liquid cooling utilizing a hybrid microchannel/multi-jet heat sink: A component level study of commercial product. International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, American Society of Mechanical Engineers 2020; Vol. 84041, p. V001T08A008.
- [10] Kim SM, Mudawar I. Thermal design and operational limits of two-phase micro-channel heat sinks. International Journal of Heat and Mass Transfer 2017; 106: 861-876.
- [11] Zhang Q, Feng Z, Li Z, Chen Z, Huang S, Zhang J, Guo F. Numerical investigation on hydraulic and thermal performances of a mini-channel heat sink with twisted ribs. International Journal of Thermal Sciences 2022; 179: 107718.
- [12] Miner A, Ghoshal U. Cooling of high-power-density microdevices using liquid metal coolants. Applied Physics Letters 2004; 85: 506-508.

- [13] Prokhorenko VY, Roshchupkin VV, Pokrasin MA, Prokhorenko SV, Kotov VV. Liquid gallium: potential uses as a heat-transfer agent. *High Temperature* 2000; 38(6): 954-968.
- [14] Al-Neama AF, Kapur N, Summers J, Thompson HM. Thermal management of GaN HEMT devices using serpentine minichannel heat sinks. *Applied Thermal Engineering* 2018; 140: 622-636.
- [15] Bo G, Ren L, Xu X, Du Y, Dou S. Recent progress on liquid metals and their applications. *Advances in Physics: X* 2018; 3(1): 412-441.
- [16] Evans DS, Prince A. Thermal analysis of ga-in-sn system. *Metal Science* 1978; 12(9): 411-414.
- [17] Deng YG, Liu J, Zhou YX. Liquid metal based mini/micro channel cooling device. *International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*; 2009; Pohang, South Korea. 253-259.
- [18] Luo M, Liu J. Experimental investigation of liquid metal alloy based mini-channel heat exchanger for high power electronic devices. *Frontiers in Energy* 2013; 7: 479-486.
- [19] Tawk M, Avenas Y, Kedous-Lebouc A, Petit M. Numerical and experimental investigations of the thermal management of power electronics with liquid metal mini-channel coolers. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2013; 49(3): 1421-1429.
- [20] Yang XH, Tan SC, Ding YJ, Liu J. Flow and thermal modeling and optimization of micro/mini-channel heat sink. *Applied Thermal Engineering* 2017; 117: 289-296.
- [21] Zhang XD, Yang XH, Zhou YX, Rao W, Gao JY, Ding YJ, Shu QQ, Liu J. Experimental investigation of Galinstan based mini-channel cooling for high heat flux and large heat power thermal management. *Energy Convers. Manage.* 2019; 185: 248–258.
- [22] Muhammad A, Selvakumar D, Wu J. Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a liquid metal cooled mini-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2020; 150: 119265.
- [23] Sarowar MT. Numerical analysis of a liquid metal cooled mini channel heat sink with five different ceramic substrates. *Ceramics International* 2021; 47(1): 214-225.
- [24] Chen Z, Qian P, Huang Z, Zhang W, Liu M. Study on flow and heat transfer of liquid metal in the microchannel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences* 2023; 183: 107840.
- [25] Kalkan O. Multi-objective optimization of a liquid metal cooled heat sink for electronic cooling applications. *International Journal of Thermal Sciences* 2023; 190: 108325.
- [26] Xiang X, Liu W, Fan A. Comparison between the cooling performances of micro-jet impingement systems using liquid metal and water as coolants for high power electronics. *International Journal of Thermal Sciences* 2022; 173: 107375.
- [27] Rosettani J, Ahmed W, Geddis P, Wu L, Clements B. Experimental and numerical investigation of gas-liquid metal two-phase flow pumping. *International Journal of Thermofluids* 2021; 10: 100092.
- [28] Yakhot V, Orszag SA. Renormalized group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing* 1986; 1: 3-51.