



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Isı alıcılarda elektrosprey ile mekanik sprey atomizasyon soğutma performanslarının karşılaştırılması

Comparison of electrospray and mechanical spray atomization cooling performances on heat sinks

Yazar(lar) (Author(s)): Abdüssamed KABAKUŞ¹, Kenan YAKUT², Ahmet Numan ÖZAKIN³

ORCID¹: 0000-0002-3049-9493

ORCID²: 0000-0001-7822-2445

ORCID³: 0000-0002-2083-8703

To cite to this article: Kabakuş A., Yakut K. ve Özakin A.N., “Isı alıcılarda elektrosprey ile mekanik sprey atomizasyon soğutma performanslarının karşılaştırılması”, *Journal of Polytechnic*, 26(2): 765-773, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Kabakuş A., Yakut K. ve Özakin A.N., “Isı alıcılarda elektrosprey ile mekanik sprey atomizasyon soğutma performanslarının karşılaştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 765-773, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1009218

Isı Alıcılarda Elektrosprey ile Mekanik Sprey Atomizasyon Soğutma Performanslarının Karşılaştırılması

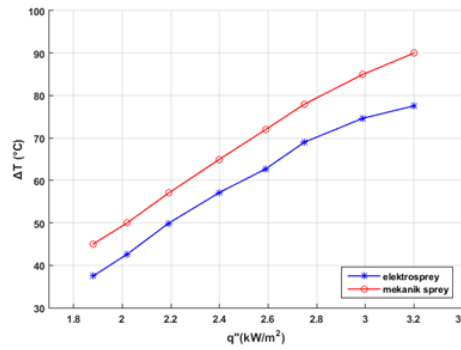
Comparison of Electrospray and Mechanical Spray Atomization Cooling Performances on Heat Sinks

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Elektrosprey ile mekanik spreyn soğutma performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. /The cooling performances of electrospray and mechanical spray were compared.
- ❖ Elektrosprey soğutmada mekanik spreye göre yaklaşık %15 daha iyi ısı transferi elde edilmiştir. /Approximately 15% better heat transfer was obtained in electrospray cooling compared to mechanical spray cooling.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada ısı alıcısındaki soğutma performansı elektrosprey ve mekanik sprey için incelenmiştir. /In this study, the cooling performance in the heat sink was investigated for electrospray and mechanical spray.



Şekil. Elektrosprey-mekanik spreye soğutma grafiği/Figure. Electrospray-mechanical spray cooling graphic

Amaç (Aim)

Elektrosprey ile mekanik spreyn aynı şartlarda ısı transfer performanslarını karşılaştırılmaktadır. /The aim of this study is to compare the heat transfer performances of electrospray and mechanical spray under the same conditions.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bu çalışmada ısı alıcısındaki soğutma performansı elektrosprey için deneysel, mekanik spreye için sayısal olarak incelenmiştir. /In this study, the cooling performance in the heat sink was investigated experimentally for electrospray and numerically for mechanical spray.

Özgünlük (Originality)

Soğutma alanında araştırmaların oldukça sınırlı olduğu elektrosprey ile soğutma endüstrisinde yaygın olarak kullanılan mekanik spreyn ısı transferine etkisinin karşılaştırılmasıdır. /The effects of electrospray, which is very limited in research in the field of cooling, and mechanical spray, which is widely used for cooling in the industry, on heat transfer were compared.

Bulgular (Findings)

Elektrosprey fiziksel oluşum şekline bağlı olarak, mekanik spreye göre daha üstün soğutma performansı gerçekleştirmiştir. /Electrospray performed better cooling performance than mechanical spray, depending on its physical formation.

Sonuç (Conclusion)

Elektrosprey soğutmada mekanik spreye göre %15 daha iyi soğutma performansı göstermiştir. /Electrospray cooling showed 15% better cooling performance than mechanical spray cooling.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. /The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Isı Alıcılarda Elektrosprey ile Mekanik Sprey Atomizasyon Soğutma Performanslarının Karşılaştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Abdüssamed KABAKUŞ^{1*}, Kenan YAKUT², Ahmet Numan ÖZAKIN²

¹ Artvin Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye

² Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 13.09.2021 ; Kabul/Accepted : 14.02.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 28.02.2022)

ÖZ

Endüstride birçok alanda kullanılmakta olan elektrosprey soğutma alanında son yıllarda keşfedilmeye başlanan bir konudur. Bu çalışmada literatürde hakkında oldukça kısıtlı çalışmalar bulunan elektrosprey soğutma ile mekanik sprej soğutmanın ısı alıcı üzerindeki soğutma performansı irdelenmiştir. Aynı şartlarda elektrosprey ile gerçekleşen ısı transferinin verileri deneyler yapılarak elde edilirken, mekanik sprej soğutma verileri Ansys Fluent CFD programı kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmanın sonucunda daha küçük partikül çapı ve yüklü damlacıkların elde edildiği elektrosprey soğutmada mekanik sprej soğutmaya göre yaklaşık %15 daha iyi bir ısı transfer performansı gösterdiği belirlenmiştir. Elektrosprey metodunda, mekanik spreye göre 3,2 kW/m² ısı akısında %13, 2,59 kW/m² ısı akısında %14, 1,88 kW/m² ısı akısında ise %17 daha iyi soğutma elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrosprey, mekanik sprej, CFD, ısı transferi.

Comparison of Electrospray And Mechanical Spray Atomization Cooling Performances on Heat Sinks

ABSTRACT

In recent years, it is a topic that has been discovered in the field of electrospray cooling, which is used in many areas in industry. In this study, the cooling performance of electrospray cooling and mechanical spray cooling on the heat sink, about which there are very limited studies in the literature, were examined. In the same conditions, the data of heat transfer with electrospray were obtained by conducting experiments, while the data of mechanical spray cooling were obtained by using Ansys Fluent CFD program. As a result of the experimental and numerical study, it was determined that electrospray cooling, in which smaller particle diameter and charged droplets were obtained, showed a heat transfer performance approximately 15% better than mechanical spray cooling. In the electrospray method, it was observed that 13% better cooling was obtained at 3,2 kW/m² heat flux, at 2,59 kW/m² heat flux %14 and better at 1,88 kW/m² heat flux %17 compared to mechanical spray.

Keywords: Electrospray, mechanical spray, CFD, heat transfer.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin hızlı gelişimi sonucu kullanımları oldukça yaygınlaşan elektromekanik sistemlerin, işlemcilerin ve devre elemanlarının soğutulması büyük öneme sahiptir. Yüksek ısı akısına maruz kalan bu elemanların soğutulması için literatürde farklı yöntemler kullanılmıştır. Çarpan hava jeti [1,2,3,4], sıvı jeti [5], mikro kanallar [6], mikro pompalar [7] ve sprej soğutma [8] yüksek ısı akısını uzaklaştırmakta kullanılan yöntemlerden bazılarıdır.

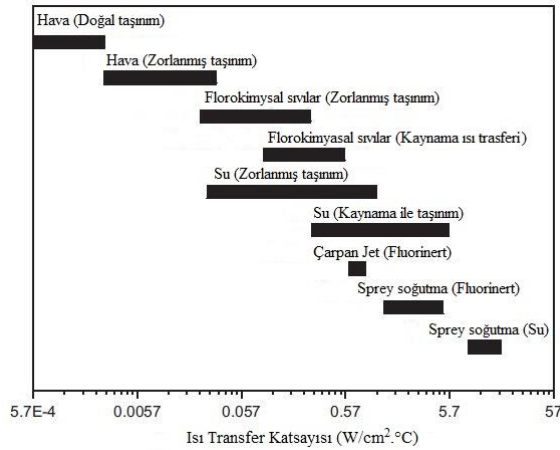
Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde yüksek ısı akısının uzaklaştırılmasında kullanılan yöntemler arasında sprej soğutmanın oldukça etkili bir yöntem olduğu görülmektedir (Şekil 1). Sprej soğutma, yüksek ısı taşınımı ve homojenliği sağlayan, düşük damlacık çapı sebebiyle yüzey alanı artışına sebep olan ve düşük

soğutucu sıvı debisine ihtiyaç duyan verimli bir yöntemdir [9]. Sprej soğutma diğer soğutma metodlarıyla karşılaştırıldığında oldukça verimli bir yöntem olmasına rağmen sprej oluşumu için yüksek performanslı pompaya ihtiyaç duyuşu ve damlacık boyutunun ayarlanmasındaki zorluklar gibi bazı dezavantajlara sahiptir [10]. Bunların haricinde ısıtılan yüzeye gönderilen sprej partiküllerinin geri sekmeleri de mekanik sprejin bir diğer dezavantajı olarak sayılabilir [11].

Elektrosprey ise üretilen sprej partiküllerinin çapları mekanik atomizelere göre daha küçük oluşu, daha homojen damlacıkların üretilmesi, sprej partikülleri yüklü olduğundan sprejin yönlendirilmesi ve odaklama yapılabilmesi ve mekanik atomizer sistemlerine göre daha kolay uygulanabilir bir metod oluşu nedeniyle oldukça avantajlı bir yöntemdir [12].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : akabakus@artvin.edu.tr



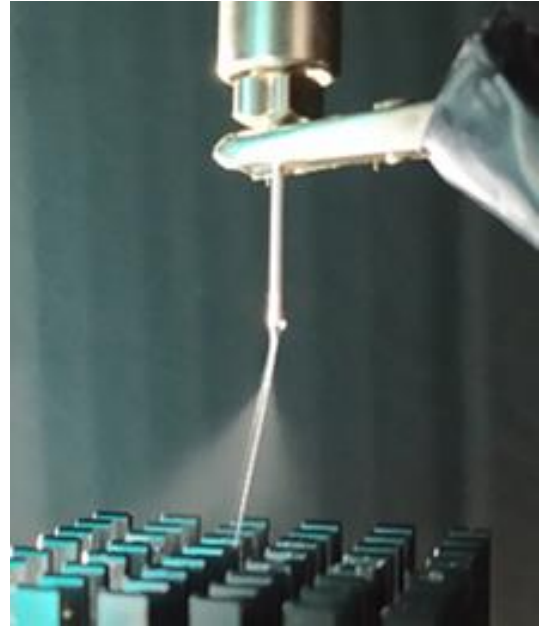
Şekil 1. Farklı soğutma metodları ile ısı taşınım katsayısının değişimi [8] (Variation of heat convection coefficient with different cooling methods)

Elektrosprey sistemi, topraklaması yapılmış metal bir yüzeyin karşısına konumlandırılmış yüksek voltaj bağlantısı yapılan metal bir nozuldan oluşur. Nozulun içerisinden gönderilen düşük yüzey gerilimi ve yüksek dielektrik sabitine sahip soğutma sıvısı, nozul ile topraklanmış metal plaka arasında oluşturulan yüksek gerilim alanı vasıtasıyla elektrik kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerini yenmesi sonucu partiküllere ayrılarak atomize olmaya başlar. Bu olaya elektrosprey atomizasyon adı verilir [13].

Elektrosprey oluşum modları, damlama modu, iğ modu, koni jet modu ve multi jet modu olmak üzere dört ana başlık altında incelenebilir [14]. Damlama modu, nozul ile topraklanmış yüzey arasında gerilim olmadan, damlacıkların yerçekimi etkisiyle hareketlendiği durumdur. İğ modu, nozula belirli bir gerilim uygulandığı durumda nozul çıkışında soğutucu sıvının bir iplik şeklinde uzaması olayıdır. Koni jet modu, nozul ile topraklanan yüzey arasındaki gerilimin daha da artırılması sonucu nozul ucunda Taylor Konisi adı verilen bir yapının oluşumunun ardından soğutucu sıvının atomize olması olayıdır. Koni jet modunda oluşan sprej daha karalı bir tutum sergiler (Şekil 2). Multi jet modu ise gerilimin daha da artırılması sonucu nozul ucunda Taylor Konisi' nin kaybolması en az iki jet halinde soğutucu sıvının atomize olması olayıdır [15].

Elektrosprey; kütle spektrometrisinde [17], yüzey kaplama işlemlerinde [18], ilaç sanayinde [19], mikro itici olarak [20] vb. alanlarda literatürde araştırmalara konu olmuştur. Fakat soğutma alanında yapılan araştırmalar oldukça kısıtlıdır ve yeni araştırmalara açık bir konudur.

Elektrosprey soğutma ile ilgili farklı nozul sayısında [21], çaplarında, debilerde, gerilimlerde [22], nozul-ısı alıcı arası mesafelerde [23] çalışmalar yapılmıştır. Fakat elektrosprey ile mekanik sprej soğutmanın karşılaştırıldığı, bu iki farklı sprej oluşturma metodunun ısı transferine etkilerini içeren bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmada aynı deneysel parametreler



Şekil 2. Koni jet modu [16] (Cone jet mode)

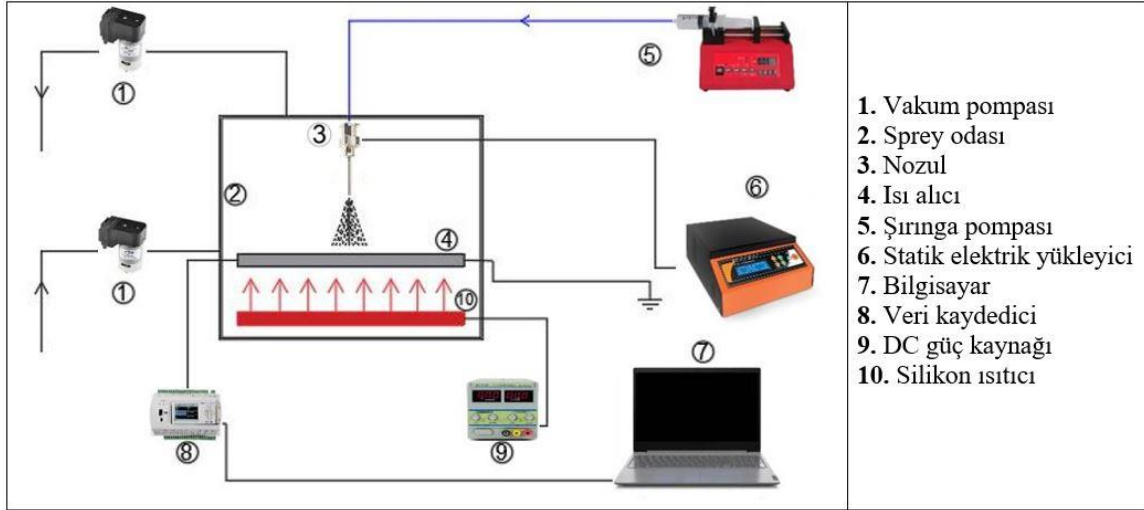
kullanılarak akışkanın yüksek gerilime maruz bırakılmasıyla oluşturulan elektrosprey ile akışkanın basınçlandırılmasıyla oluşturulan mekanik sprejin ısı alıcı üzerindeki soğutma performansı incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

Deneyler 4,4 kV gerilim, 0,2 ml/dk debi, 20 G ($d_i=0,61$ mm) nozul çapı ve 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafede gerçekleştirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği şartlar, uniform damlacık çapı ve dağılımının elde edildiği koni-jet elektrosprey modu oluşacak şekilde belirlenmiştir [24,25]. Isı alıcıya 3,2-2,99-2,75-2,59-2,4-2,19-2,02-1,88 kW/m² olmak üzere sekiz farklı ısı akısı uygulanmıştır. Isı akıları bir mikro işlemcinin çalışması gereken optimum sıcaklık değeri [24] olan 45 °C ve maksimum çıkabileceği sıcaklık değeri [26] olan 100 °C aralığında sıcaklık değerlerini karşılayacak şekilde belirlenmiştir. Deney düzeneğinin şematik görseli Şekil 3' deki gibidir.

Deneylerde ısı alıcı olarak 40x40x5 mm ölçülerinde 5000 serisi alüminyum malzemeden üretilen ısı alıcı kullanılmıştır. Isı alıcı üzerine soğutma sıvısı olarak yüksek dielektrik sabiti, düşük yüzey gerilimi ve buharlaşma sıcaklığına sahip etanol atomize edilerek gönderilmiştir. Etanolün fiziksel özellikleri Çizelge 1' de verilmiştir. Deneyler sabit ortam şartları ve güvenli çalışma ortamını oluşturmak adına 60x60x70 cm ölçülerinde sprej odası içerisinde gerçekleştirilmiştir. Sprej odası içerisinde nem dengesini sağlamak amacıyla elektrosprey akışını etkilemeyecek şekilde vakum pompası ile ortama sürekli taze hava sarjı yapılırken, başka bir vakum pompası ile sprej odası içerisindeki etanol buharının deşarj işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği şematik görüntüsü (Schematic view of the experimental setup)

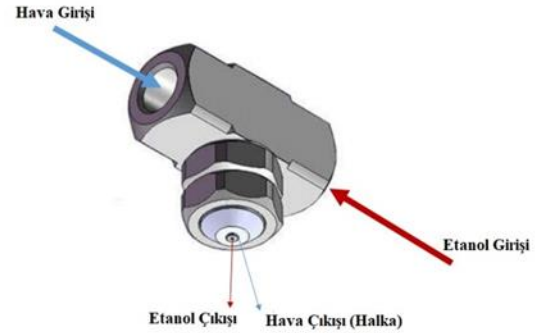
İç ortam ve dış ortam nem dengesi, nemölçerlerde takip edilmiştir. Sprey oluşumu için iç çapı 0,61 mm, uzunluğu 13 mm olan paslanmaz çelik nozul kullanılmıştır. Etanol New Era NE-300 marka şırınga pompası ile sabit debide nozula iletilmiştir. Nozula iletilen soğutma sıvısının atomizasyonunu gerçekleştirmek için nozula, Puls Electronic HVDC-20 marka statik elektrik yükleyici ile yüksek voltaj uygulanmıştır. Isı alıcıya sabit ısı akışı sağlamak amacıyla Instek GPS-3030DD marka DC güç kaynağıyla beslenen silikon ısıtıcı kullanılmıştır. Sıcaklık değerleri ısı alıcının yan yüzeylerinde 5-10-15-20 mm derinlikte açılan deliklere yerleştirilmiş K tipi ısı ölçerlerle okunarak veri kaydedici ile işlenip bilgisayar ile analizler yapılmıştır.

Çizelge 1. Etanol Fiziksel Özellikleri (Ethanol Physical Properties) [27]

Fiziksel Özellik	Etanol
Kaynama noktası (°C)	78,3
Yoğunluk (kg/m ³)	790
Yüzey gerilimi (N/m)	0,0245
Dielektrik sabiti (ε)	25,3

Sayısal çalışmada kullanılan hava destekli nozulun görünüşü Şekil 4' de verilmiştir. Endüstride farklı mekanik atomizer uygulamaları olmasına rağmen sayısal çözümde hava destekli nozul kullanılmasının sebebi olarak yaygın kullanımı ve basınçlı nozullara göre daha küçük sprej damlacığı üretmesi gösterilebilir [29]. Söz konusu avantajlarından dolayı elektrosprey soğutma ile mekanik atomizer soğutma mukayesesi için hava destekli nozul kullanılmıştır. Mekanik atomizasyon elde etmek için kullanılan hava destekli nozulda, etanol nozulun ortasındaki kanaldan gönderilirken etrafında halka şeklinde bulunan kanaldan hava gönderilir ve böylece sprej oluşumu sağlanır. Etanolün deşarj edildiği kanalın iç çapı $d_i=0,61$ mm' dir. termal kamera yardımı ile test

edilmiş ve gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. Kurulan deney düzeneği Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Hava destekli nozul görüntüsü (View of the air assisted nozzle)

2.2 Sayısal Çalışma (Numerical Study)

Nümerik çalışma ANSYS-Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Elektrosprey soğutma sonuçları deneysel olarak elde edilirken, mekanik sprej modellenerek ısı transfer sonuçları sayısal yöntemle elde edilmiştir. Mekanik sprej modellenirken sınır şartları ve yapılan kabuller aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

- Isı alıcı-nozul arası mesafe 20 mm' dir.
- Soğutma sıvısı olarak sıvı fazda ve sıkıştırılmaz etanol kullanılmıştır.
- Mekanik sprej olarak hava destekli nozul modellenmiştir.
- Soğutucu sıvı 0,2 ml/dk debide kullanılmıştır.
- Sayısal çalışma 3,2-2,99-2,75-2,59-2,4-2,19-2,02-1,88 kW/m² ısı akıları için gerçekleştirilmiştir.

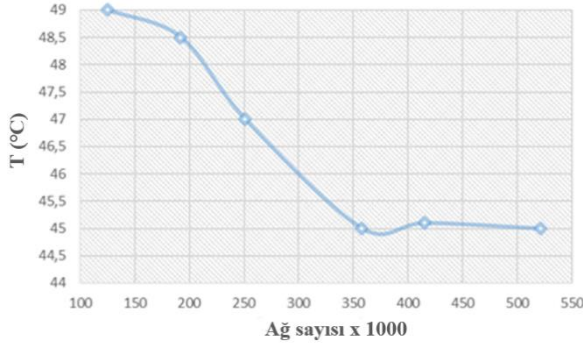
- Nozul içerisindeki soğutucu sıvı ve hava akışı süreklidir.
- Nozul kararlı olarak kabul edilmiştir.

ANSYS-Fluent yazılımı ısı transfer analizlerinde korunum denklemlerini kullanmaktadır. Kütle (Eş. 1), momentum (Eş. 2) ve enerjinin (Eş. 3) korunum denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

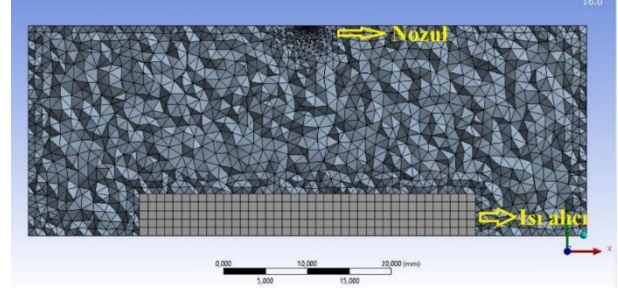
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \rho + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (3)$$



Şekil 5. Belirlenen geometri için çözümün ağ sayısından bağımsızlığı (The independence of the solution from the number of meshes for the specified geometry)

Oluşturulan ağ yapısında 358,000 adet hücre (cell) kullanılarak ortogonal kalite (Orthogonal Quality) %93-%96 arasında oluşturulmuştur. Hücre sayısının daha fazla artırılmasının ortogonal kalite ve sonuçlarda değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. Farklı geometrik şekillere (tetrahedral, piramit vb.) sahip hücre geometrilerinin kullanılmasının sonuçlarda ihmal edilebilecek seviyede (maksimum %2) değişikliğe sebep olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada belirtilen geometrilerin kombinasyonlarını kapsayacak şekilde mesh yapıları kullanılmıştır. Ayrıca çözüm yapılmadan önce mesh hassasiyeti için bir takım yöntemler kullanılmalıdır. Şekil 5'te bu çalışma için elde edilen mesh sayısından bağımsızlık analizi görülmektedir. Bununla birlikte çözümün belirli parametrelerinin iterasyonlar sonucunda belirli değerlere yakınsaması gerekmektedir.



Şekil 6. Kontrol hacmi ve ağ yapısının kesit görüntüsü (Section plane view of control volume and mesh structure)

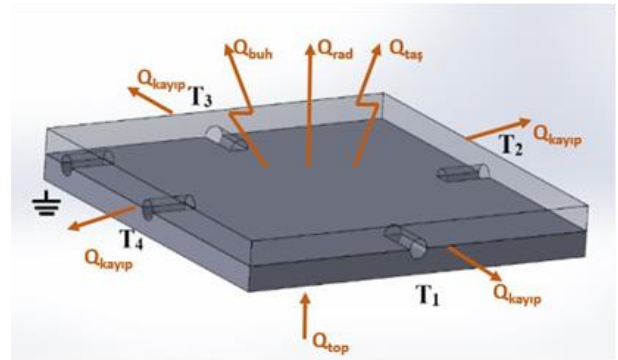
Sınır şartlarının belirlenmesinin ardından ısı alıcı ve nozul programa tanıtarak kontrol hacmi ve ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan kontrol hacmi ve ağ yapısının kesit görüntüsü Şekil 6' teki gibidir.

Sayısal analiz ANSYS-Fluent çok fazlı (Multiphase) çözüm ile zamana bağlı (Transient) analiz tanımlaması yapılarak, elektrosprey deneylerinde sistemin kararlı hale geldiği zaman göz önüne alınarak çözüm yapılmıştır.

2.3. Hesaplamalar (Calculations)

Isı alıcıda gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları taşınım ($Q_{taş}$), ışıma (Q_{rad}) ve kayıplar ($Q_{kayıp}$) olarak ifade edilebilir (Şekil 7). Taşınım ile gerçekleşen ısı transferi ise yüzeyden buharlaşma (Q_{buh}) ve konvektif taşınım ile gerçekleşir. Isı alıcıya verilen toplam ısı miktarı Eş. 4' teki gibi oluşur.

$$Q_{top} = Q_{taş} + Q_{buh} + Q_{rad} + Q_{kayıp} \quad (4)$$



Şekil 7. Isı alıcıda gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları (Heat transfer mechanisms on the heat sink)

Isı transferinin sadece ısı alıcının üst yüzeyinden meydana gelmesi için yan yüzeyler camyünü yalıtım malzemesiyle izole edilmiştir. Isı alıcı yüzey alanının düşük oluşu, düşük yüzey sıcaklıklarında çalışılması ve ısı alıcı yüzeyinin temizlenerek parlatılması göz önüne alınarak ışıma ile gerçekleşen ısı transfer miktarı hesaplanmış ve toplam ısı miktarının %1' inden düşük olması sebebiyle ihmal edilmiştir. Ayrıca test bölgesinde gerçekleşen ısı kayıpları hesaplandığında toplam ısı miktarının %3' ünde düşük olduğundan ihmal edilmiştir. Böylece sistemden gerçekleşen ısı transferi Eş. 5' teki gibi ifade edilebilir.

$$Q_{top} = Q_{taş} + Q_{buh} \quad (5)$$

Isı taşınım katsayısı;

$$h = \frac{Q_{top}}{A_y(T_y - T_{\infty})} \quad (6)$$

eşitliğiyle ifade edilebilir.

Isı alıcı yüzeyinde ki sıcaklık ortalaması ile ortam sıcaklığının farkı ΔT ile ifade edilmiştir.

2.4. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Deneysel çalışmanın belirsizlik analizi;

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

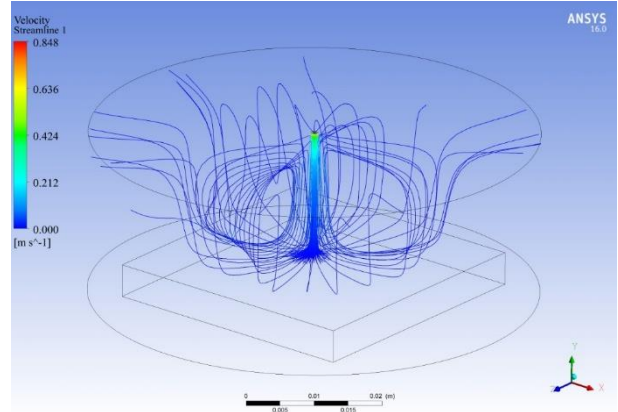
eşitliği ile yapılmıştır [28]. Belirsizlik analizi eşitliğinde kullanılan w_R sistem belirsizliğini, R bağımsız değişken fonksiyonunu, (x_1, x_2, \dots, x_n) bağımsız değişkenleri, (w_1, w_2, \dots, w_n) bağımsız değişken belirsizliğini ifade etmektedir. Belirsizlik analizi her bir deneyin yapıldığı sekiz ısı akısı için hesaplanmıştır. Isı taşınım katsayısı için deneysel belirsizlik %0,95 olarak belirlenmiştir. Deney sisteminde kullanılan cihazların belirsizlikleri **Çizelge 2**' de verilmiştir.

Tablo 2. Deney düzeneğinde kullanılan cihazların belirsizlikleri

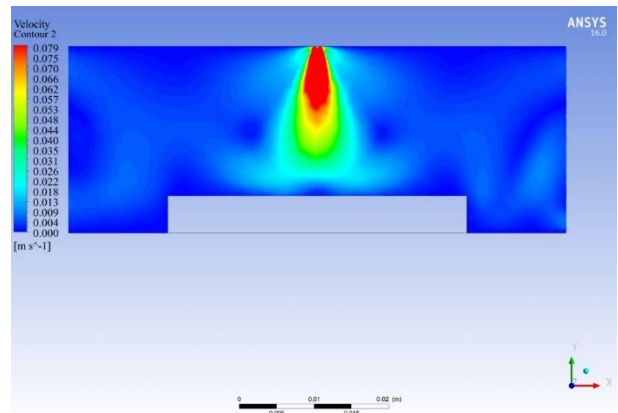
Cihaz	Doğruluk (%)	Belirsizlik
Veri kaydedici (°C)	±0,2	±1 °C
Şırınga pompası (ml)	±1	±0,5 ml
Statik elektrik yükleyici (kV)	±0,5	±0,1 kV
DC güç kaynağı (V)	±0,01	±5 mV
	±0,2	±3 mA

3. BULGULAR (RESULTS)

Elektrosprey ile mekanik spreylere soğutma performansının karşılaştırılması için deneysel ve sayısal bir çalışma yapılmıştır. 3,2-2,99-2,75-2,59-2,4-2,19-2,02-1,88 kW/m² olmak üzere sekiz farklı ısı akısında, ısı alıcının soğutulması için elektrosprey soğutma deneylerinde 4,4 kV gerilim, 20 G ($d_i=0,61$ mm) nozul çapı, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe ve 0,2 ml/dk soğutucu sıvı debisi kullanılmıştır. Mekanik spreylere sayısal ısı transferi analizi ise 0,61 mm nozul çapı, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe, 0,2 ml/dk etanol debisi ve 25 ml/dk hava debisi kullanılarak elektrosprey deneylerinde çalışılan ısı akılarında gerçekleştirilmiştir. Mekanik spreylere sayısal modellenmesinde hava destekli nozul kullanılmasının sebebi olarak yaygın kullanımı ve basınçlı nozullara göre daha küçük spreylere damlacığı üretmesi gösterilebilir [29]. Hava destekli nozulda 0,2 ml/dk soğutma sıvısı debisine karşılık kullanılması gereken optimum hava debisi ALR (Air Liquid Ratio) değerine göre 25 ml/dk olarak hesaplanmıştır [30]. Belirtilen deney parametrelerine göre elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar aşağıdaki gibidir.

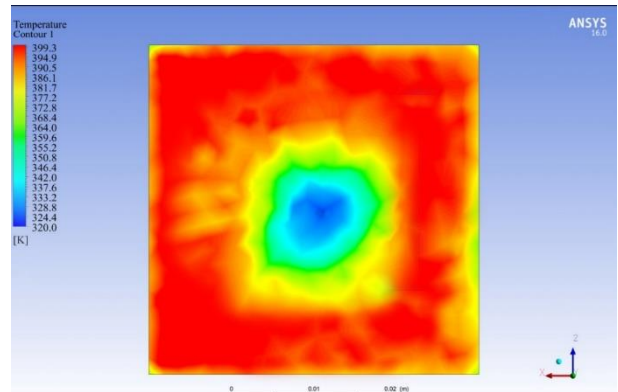


Şekil 8. Mekanik spreylere oluşturduğu akım çizgileri (Streamlines formed by mechanical spray)

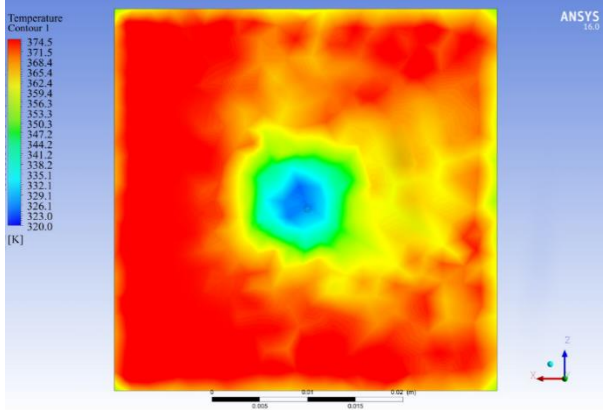


Şekil 9. Mekanik spreylere hız konturleri (Velocity contours of mechanical spray)

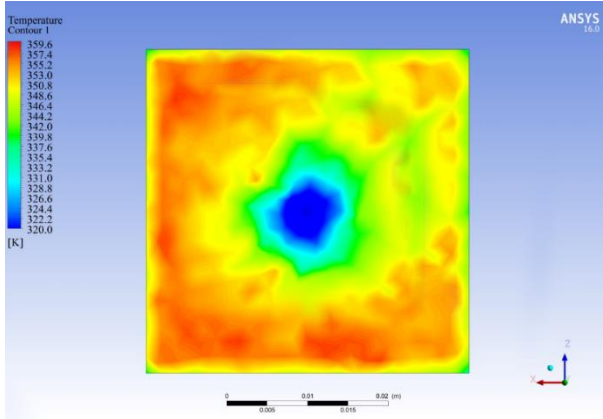
Şekil 8 ve **Şekil 9** incelendiğinde elde edilen mekanik spreylere, spreylere partiküllerinin yüzeye çarptıktan sonra da hareket etmesi spreylere oluşturmak için kullanılan kinetik enerjinin bir kısmının ısı transferini tamamlamadan hacimden ayrıldığı göstermektedir. Elektrosprey uygulamasında elde edilen spreylere tamamının ısı/kütle transferi sağladığı göz önüne alındığında bu yöntemin mekanik spreylere göre daha avantajlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. 3,2 kW/m² ısı akısında ısı alıcı yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı (Temperature contour on the heat sink surface at 2,59 kW/m² heat flux)

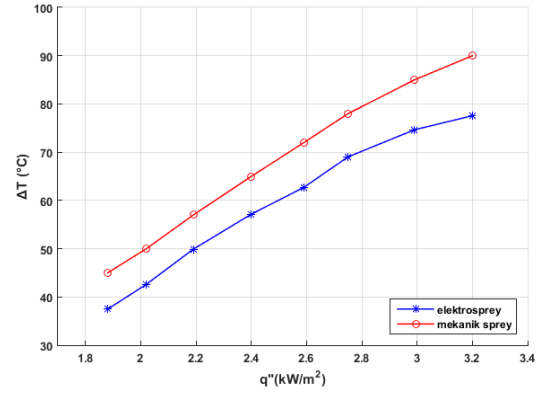


Şekil 11. 2,59 kW/m² ısı akısında ısı alıcı yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı (Temperature contour on the heat sink surface at 2,59 kW/m² heat flux)

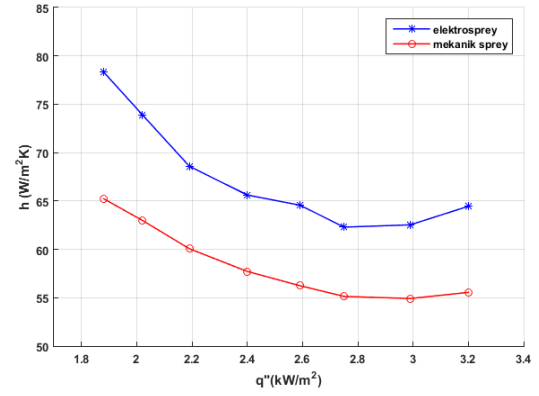


Şekil 12. 1,88 kW/m² ısı akısında ısı alıcı yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı (Temperature contour on the heat sink surface at 1,88 kW/m² heat flux)

Sayısal analiz sonucunda 3,2-2,59-1,88 kW/m² ısı akıları için elde edilen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, spreyn ataleti ve yer çekimi kuvvetleri etkisi altında kalması sebebiyle yüzeye yoğun olarak çarptığı ve etanol buharlaşmasının yüksek gerçekleştiği bölgede ısı transferinin daha etkin gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 10-11 ve 12' de elde edilen sıcaklık kontrollerinde görülen asimetrik sıcaklık dağılımı, çözümün zamana bağlı olarak yapılması sebebiyle oluşmaktadır. Bu çözümlerde yüzey ısı akısı kararlı hal şartlarına ulaşana kadar devam ettirildiğinde simetrik ve daha düşük bir sıcaklık gradyeni oluşacaktır. Zamana bağlı olarak çözüm yapılmasının sebebi elektrosprey ile aynı koşullarda kıyaslamalar yapılabilmektir.



Şekil 13. Elektrosprey-mekanik sprej soğutma grafiği (Electrospray-mechanical spray cooling graphic)



Şekil 14. Elektrosprey-mekanik sprej ısı taşınım katsayısı değişim grafiği (Electrospray-mechanical spray heat transfer coefficient variation graph)

Grafikler incelendiğinde aynı şartlar altında elektrospreyin mekanik spreye göre daha iyi bir soğutma performansı gösterdiği ve daha yüksek ısı taşınım katsayısı elde ettiği belirlenmiştir. Mekanik sprej ısı transfer analizleri ANSYS-Fluent ile sistemde hiçbir kayıp olmadığı durumda yapılması ve ısı alıcı yüzeyinden ısı transferinin buharlaşmanın yanı sıra spreyn oluşumu sırasında kullanılan havanın taşınım olumlu etki yapmasına rağmen elektrosprey deneysel sonuçları mekanik sprej sayısal analiz sonuçlarından daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Isı akısı arttıkça ΔT sıcaklık farkının artmıştır. Mekanik spreye göre elektrospreyde 3,2 kW/m² ısı akısında %13, 2,59 kW/m² ısı akısında %14, 1,88 kW/m² ısı akısında ise %17 daha iyi soğutma elde edildiği görülmüştür (Şekil 13). Isı taşınım katsayısı ısı akısının artışıyla azalmış, 2,6 kW/m² ısı akısından sonra sabit bir eğilim göstermiştir. Bunun sebebi olarak her iki sprej soğutma metodunda da ısı alıcı yüzeyine gönderilen etanol debisinin ısı akısının artışıyla yüzeyden uzaklaştırabileceği ısı kapasitesinin üzerine çıkılması gösterilebilir (Şekil 14). Elektrosprej soğutma metodunun mekanik atomizerle gerçekleştirilen soğutmaya göre daha üstün olması, elektrosprej ile yüksek gerilimle oluşturulan partikül çaplarının mekanik

atomizere göre daha küçük olmasının bir sonucudur [12]. Oluşan sprey taneciklerinin çapları küçüldükçe temas yüzeyi artmakta, böylece ısı alıcı yüzeyinde buharlaşma daha hızlı gerçekleşerek, yüzeyden atılan ısı miktarını artırmaktadır. Ayrıca Elektrospreyin mekanik spreye göre diğer bir üstünlüğü olan ısı alıcı yüzeyine gönderilen sprey taneciklerinin yüzeyden sekmeden üzerindeki elektrik yükü vasıtasıyla direkt topraklanan ısı alıcı yüzeyiyle temas edip buharlaşmasıdır. Mekanik atomizerlerde sprey tanecikleri yüzeye çarptıktan sonra bir kısmı ortama saçılabilir [31].

4. SONUÇ ve TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bu çalışmada elektrosprey soğutma ile mekanik sprey soğutma sonuçları karşılaştırılmıştır. Elektrosprey ısı transferi analizi deneysel, mekanik sprey ısı transfer sonuçları ise sayısal olarak elde edilerek irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Elektrosprey soğutma mekanik sprey soğutmaya göre yaklaşık %15 daha iyi bir performans göstermiştir.
- Her iki sprey soğutma metodunda da ısı alıcı yüzeyine gönderilen etanol debisinin ısı akısının artışıyla yüzeyden uzaklaştırabileceği ısı kapasitesinin üzerine çıkılması sonucu ısı akısı arttıkça ısı taşınım katsayısında azalma gözlemlenmiştir.
- Elektrospreyde mekanik spreye göre $3,2 \text{ kW/m}^2$ ısı akısında %13, $2,59 \text{ kW/m}^2$ ısı akısında %14, $1,88 \text{ kW/m}^2$ ısı akısında ise %17 daha iyi soğutma elde edildiği görülmüştür.
- Isı taşınım katsayısı elektrospreyde mekanik spreye göre artış göstermiştir.
- Elektrosprey oluşumunda sprey partikülleri elektrik yüklü olduğundan kayıp yaşanmaksızın topraklanan yüzeye doğru hareket etmektedirler. Böylece soğutucu akışkanda herhangi bir kayıp yaşanmaz ve mekanik spreye göre daha fazla soğutucu sıvı yüzeye gönderilip, buharlaşması sağlandığından ısı transferine olumlu katkıda bulunur.
- Elektrosprey soğutmada, soğutucu akışkana uygulanan yüksek voltaj sebebiyle mekanik spreye göre daha düşük partikül çapları elde edilir. Böylece ısıtılan yüzeye gönderilen partiküllerin temas açısı arttığından yüzeyden daha hızlı buharlaşır ve soğutmaya olumlu etki gösterir.

SEMBOLLER (SYMBOL)

Latin harfleri (Latin letters)

A_y	Isı alıcı yüzey alanı (m^2)
c_v	Sabit hacimde özgül ısı (kJ/kg)
h	Isı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2\text{K}$)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)

R	Bağımsız değişkenlerin fonksiyonu
Q_{top}	Toplam ısı miktarı (W)
$Q_{\text{taş}}$	Taşınım ile geçen ısı miktarı (W)
Q_{rad}	Işınım ile geçen ısı miktarı (W)
Q_{buh}	Buharlaşımla geçen ısı miktarı (W)
$Q_{\text{kayıp}}$	Sistemde kaybedilen ısı miktarı (W)
t	Zaman (sn)
T_y	Ortalama yüzey sıcaklığı (K)
T_{∞}	Ortam sıcaklığı (K)
V	Hız (m/sn)
w_1, \dots, w_n	Bağımsız değişkenlerin belirsizliği
w_R	Sistem belirsizliği
x_1, \dots, x_n	Bağımsız değişkenler

Yunan Harfleri (Greek Letters)

ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
Φ	Disipasyon fonksiyonu

Kısaltmalar (Abbreviations)

G	Gauge (mm)
CFD	Computational fluid dynamics

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2018-6965 numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS CONTRIBUTIONS)

Abdüssamed KABAKUŞ: Deneysel ve sayısal çalışmalar, sonuçların analizi, taslak metin.

Kenan YAKUT: Taslağın düzeltmeleri ve sonuçların yorumlanması.

Ahmet Numan ÖZAKIN: Taslağın düzeltmeleri ve sayısal çalışmalar.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karabulut K., "Heat transfer improvement study of electronic component surfaces using air jet

- impingement”, *Journal of Computational Electronics*, 18 (4): 1259-1271, (2019).
- [2] Karabulut K., Alnak D.E., “Study of cooling of the varied designed warmed surfaces with an air jet impingement”, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26 (1): 88-98, (2020).
- [3] Karabulut K., Alnak D.E., Koca F., “Investigation of heat transfer from heated square patterned surfaces in a rectangular channel with an air jet impingement”, *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3 (1): 78-86, (2019).
- [4] Alnak D.E., Karabulut K., “Jet giriş genişliğinin ısı transferi ve akış yapısına olan etkisinin araştırılması”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36 (2): 331-345, (2021).
- [5] Nawani S., Subhash M., “A review on multiple liquid jet impingement onto flat plate”, *Materials Today: Proceedings*, 46: 11190-11197, (2021).
- [6] Chen C., Hou F., Ma R., Su M., Li J., Cao L., “Design, integration and performance analysis of a lid-integral microchannel cooling module for high-power chip”, *Applied Thermal Engineering*, 117457, (2021).
- [7] Ma K.M., Chen B.R., Gao J.J., Lin C.Y., “Development of an OAPCP-micropump liquid cooling system in a laptop”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36: 225-232, (2009).
- [8] Zhao J., Du M., Zhang Z., Ling X., “Thermal management strategy for electronic chips based on combination of a flat-plate heat pipe and spray cooling”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 181: 121894, (2021).
- [9] Cheng W. L., Zhang W. W., Chen H., Hu, L., “Spray cooling and flash evaporation cooling: The current development and application”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55: 614-628, (2016).
- [10] Wang H., Mamishev A., “Design methodology for the micronozzle-based electro-spray evaporative cooling devices”, *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 2: 17-31, (2012).
- [11] Deng W., Gomez A., “Electrospray cooling for microelectronics”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54: 2270-2275, (2011).
- [12] Badıllı U., Tarımcı N., “Elektrosprey püskürtme yöntemi ve nanoteknolojideki uygulamaları”, *Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 38: 117-135, (2009).
- [13] Jaworek A., Sobczyk A., Krupa A., “Electrospray application to powder production and surface coating”, *Journal of Aerosol Science*, 125: 57-92, (2018).
- [14] Cloupeau M., Prunet-Foch B., “Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review”, *Journal of Aerosol Science*, 25 (6): 1021-1036, (1994).
- [15] Jaworek A., Krupa A., “Classification of the modes of EHD spraying”, *Journal of Aerosol Science*, 30 (7): 873-893, (1999).
- [16] Kabakuş A., Yakut K., Özakin A.N., Yakut R., “Experimental determination of cooling performance on heat sinks with cone-jet electro-spray mode”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24: 665-670, (2021).
- [17] Zhu, G., Shao, Y., Liu, Y., Pei, T., Li, L., Zhang, D., Guo, G., Wang, X., “Single-cell metabolite analysis by electro-spray ionization mass spectrometry”, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 143: 116351, (2021).
- [18] Jaworek, A., Sobczyk, A., Krupa, A., “Electrospray application to powder production and surface coating”, *Journal of Aerosol Science*, 125: 57-92, (2018).
- [19] Steipel, R., Gallovic, M., Batty, C., Bachelder, E., Ainslie, K., “Electrospray for generation of drug delivery and vaccine particles applied in vitro and in vivo”, *Materials Science and Engineering: C*, 105: 110070, (2019).
- [20] Si B. Q., Byun D., Lee S., “Experimental and theoretical study of a cone-jet for an electro-spray microthruster considering the interference effect in an array of nozzles”, *Journal of Aerosol Science*, 38: 924-934, (2007).
- [21] Gibbons M.J., Robinson A.J., “Electrospray array heat transfer”, *International Journal of Thermal Sciences*, 129: 451-461, (2018).
- [22] Yakut R., Yakut K., Sabolsky E., Kuhlman J., “Experimental determination of cooling and spray characteristics of the water electro-spray”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 120: 105046, (2021).
- [23] Gibbons M.J., Robinson A.J., “Heat transfer characteristics of single cone-jet electro-sprays”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113: 70-83, (2017).
- [24] Wang H., Mamishev A.V., “Heat transfer correlation models for electro-spray evaporative cooling chambers of different geometry types”, *Applied Thermal Engineering*, 40: 91-101, (2012).
- [25] Jaworek A., Krupa A., “Classification of the modes of EHD spraying”, *Journal of Aerosol Science*, 30: 873-893, (1999).

- [26] Tan F., Canbolat A.S., Türkan B., Yüce B.E., “Elektronik cihazların soğutulmasının farklı türbülans modelleri ve duvar yaklaşımları ile CFD simülasyonu” *12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, Türkiye. (2015).
- [27] <https://www.interlab.com.tr/assets/upload/services/document/920-026-ethanol-absolute64-17-5-en-r-1-pdf23112019075511.pdf>. (2021)
- [28] Kline S.J., McClintock F.A., “Describing uncertainties in single-sample experiments”, *Mechanical Engineering*, 75: 3-8, (1953).
- [29] Yeşildal, F., “Sprey soğutmada ısı ve akış karakteristiklerinin belirlenmesi”, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, (2014).
- [30] Yeşildal F., Yakut K., “Optimization of the spray cooling parameters for a heat sink by the Taguchi method”, *Atomization and Sprays*, 27: 1063-1075, (2017).
- [31] Deng W., Gomez A., “Electrospray cooling for microelectronics”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54: 2270-2275, (2011).