

Kare Kanatçıklı Isı Alıcıda Elektrosprey Soğutma ile Isı Transfer Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Abdüssamed KABAKUŞ^{1*}, Kenan YAKUT²

Öz

Bu çalışmada literatüründe hakkında oldukça sınırlı çalışma olan elektrosprey soğutmada, elektrik geriliminin, soğutucu akışkan debisinin ve nozul çapının ısı alıcı üzerindeki ısı transfer performansına etkileri araştırılmıştır. Deneyler 20 mm ısı alıcı-nozul arası mesafede ve 1,88-2,02-2,19-2,4-2,59-2,75-2,99-3,2 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilmiştir. Soğutucu akışkan olarak etanol kullanılmıştır. 3,4-4,4-5,4 kV gerilimlerde, 0,1-0,2-0,3 ml/dk akışkan debilerinde ve 20-25-30 G nozul çaplarında deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak nozul çapının azalması, soğutucu akışkan debisinin ve elektrik geriliminin artmasıyla ısı alıcı üzerinden gerçekleşen ısı transferinin arttığı belirlenmiştir. Herbir değişken parametre için farklı elektrosprey modu gözlemlenmiş, multi jet modunda etkili soğutma elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrosprey soğutma, ısı transferi, Weber Sayısı, Elektrik Weber Sayısı, Isı Alıcı

Determination of Heat Transfer Characteristics with Electrospray Cooling in a Square Fin Heat Sink

Abstract

In this study, the effects of electrical voltage, coolant fluid flow rate and nozzle diameter on the heat transfer performance on the heat sink were investigated in electrospray cooling, which has a very limited study in the literature. The experiments were carried out at a distance of 20 mm between the heat sink and the nozzle and heat fluxes of 1.88-2.02-2.19-2.4-2.59-2.75-2.99-3.2 kW/m². The experiments were carried out at a distance of 20 mm between the heat sink and the nozzle and heat fluxes of 1.88-2.02-2.19-2.4-2.59-2.75-2.99-3.2 kW/m². Ethanol was used as the coolant fluid. Experiments were carried out at voltages of 3.4-4.4-5.4 kV, flow rates of 0.1-0.2-0.3 ml/min and nozzle diameters of 20-25-30 G. As a result, it was determined that the heat transfer over the heat sink increased with the decrease in the nozzle diameter, the increase in the coolant fluid flow rate and the electrical voltage. Different electrospray mode was observed for each variable parameter, and effective cooling was obtained in multi-jet mode.

Keywords: Electrospray cooling, heat transfer, Weber Number, Electric Weber Number, Heat Sink

¹Artvin Çoruh Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Artvin, Türkiye, akabakus@artvin.edu.tr

²Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye, kyakut@atauni.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-3049-9493>

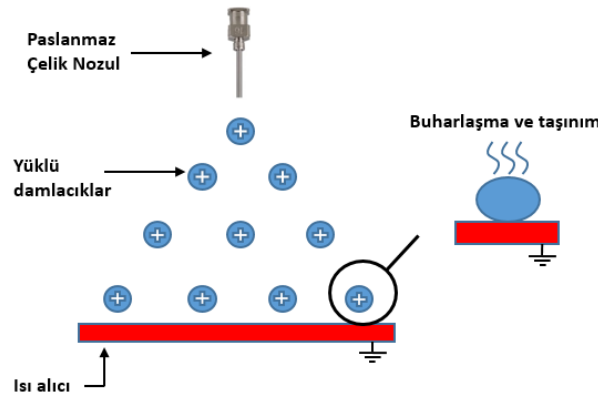
²<https://orcid.org/0000-0001-7822-2445>

1. Giriş

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesine bağlı olarak kullanılan elektronik ve elektromekanik sistemlerin sayısı gittikçe artmaktadır. Bu sistemlerin ekonomik ömürlerinin uzun olması ve verimli çalışmaları için işletme sıcaklıklarının belirli bir sıcaklık seviyesinde tutulması gerekmektedir. Sistemlerin optimum sıcaklık değerinde tutulabilmesi için literatürde birçok soğutma metodu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çarpan hava jeti (Özakın ve Kabakuş, 2022) ve su jeti (Zhao ve ark., 2013) ile soğutma, mikro kanallar ile soğutma (Manay, 2018), ısı alıcılar ile soğutma (Yakut ve ark, 2015) ve sprej soğutma (Yeşildal ve ark, 2022) yaygın olarak kullanılan ve çalışılan soğutma yöntemleri arasında gösterilebilir.

Literatürde yer alan bu metodların yanında soğutma alanında özellikle son yıllarda hakkında çalışmaların yer aldığı elektrosprej soğutma, yüksek ısı akısı üreten sistemlerde ısı akısını uzaklaştırabilmek için kullanılacak etkin bir metottur (Yakut ve ark., 2021; Kabakuş ve ark., 2021).

Elektrosprej soğutma mekanizması şu şekilde açıklanabilir. Paslanmaz çelik nozul ile nozulun karşısına yerleştirilmiş elektrot (substrate) arasında oluşturulan elektrik gerilim farkı sonucunda nozul içerisindeki soğutucu akışkan yüzeyinde kabarcıklar meydana gelir. Elektrik geriliminin yeteri kadar artırılması sonucu elektriksel kuvvet, akışkanın yüzey gerilim kuvvetini yener ve soğutucu akışkan nozuldan atomize olmuş şekilde ayrılmaya başlar. Atomizasyonu gerçekleştirilen elektrik yüklü damlacıklar ısıtılmış yüzeye (substrate) çarptırılarak yüzeyde gerçekleşen buharlaşma ve taşınım ile ısıtıcı yüzey sıcaklığının düşmesine sebep olur (Karakaya, 2012). Bu olaya elektrosprej soğutma adı verilir (**Şekil 1**). Elektrosprej soğutmada kullanılan soğutucu akışkanlar elektriksel gerilimin etkisiyle atomizasyonu gerçekleşmesi için yüksek dielektrik sabiti, düşük yüzey gerilimine sahip olan akışkanlar arasından seçilir. Yüzeyden daha fazla ısının atılabilmesi için de soğutucu akışkanın düşük buharlaşma sıcaklığına sahip olması gerekir (Kabakuş, 2021).



Şekil 1. Elektrosprej soğutma fenomeni (Kabakuş, 2021)

Elektrosprey ile atomize edilen damlacıkların boyutlarının küçük olması, genelde aynı çapta damlacık oluşumu ve homojen damlacık dağılımının sağlanması, damlacıkların elektrik yüklü olmaları sebebiyle birbirleriyle temas etmeyişi, oluşturulan elektrik alanına göre damlacık hareketi ve yönünün kontrol edilebilir olması ve kolay uygulanabilir bir yöntem olması sebebiyle elektrospreyin oldukça avantajlı bir yöntem olduğu söylenebilir. (Badıllı ve Tarımcı, 2009; Deng ve Gomez, 2011).

Elektrosprey uygulanan gerilim, nozul çapı ve akışkan debisine bağlı olarak; damlama modu, iğ modu, koni jet modu ve multi jet modu olmak üzere farklı elektrosprey oluşum modlarında meydana gelmektedir (Cloupeau ve Prunet-Foch, 1994). Damlama modu, nozula gerilim uygulanmadığı durumda benzer şekilde yerçekimi kuvveti ve elektriksel kuvvetler, sıvının yüzey gerilim kuvvetini yenmesi sonucu akışkanın nozul çıkışında düzenli küreler halini almasıyla oluşur. İğ modu, nozula daha yüksek gerilim uygulanması sonucu nozul çıkışında oluşan damlacığın bir iğ şeklinde uzaması olayıdır. Koni jet modu, gerilimin daha da arttığı durumda nozulun ucunda Taylor konisi adı verilen bir koninin oluşup, sıvının bir miktar jet olarak ilerleyip atomize olma durumudur. Koni jet modunda oluşan damlacıklar diğer modlara göre daha karardır. Multi jet modunda, gerilimin yeteri kadar artırılması sonucu nozul ucunda oluşan koni kaybolup, nozul çıkışında birden çok spreyn oluşumu gözlemlenir (Jaworek ve Krupa, 1999).

Elektrosprey soğutma ile ilgili yapılan çalışmalar son yıllarda artış göstermesine rağmen oldukça kısıtlıdır.

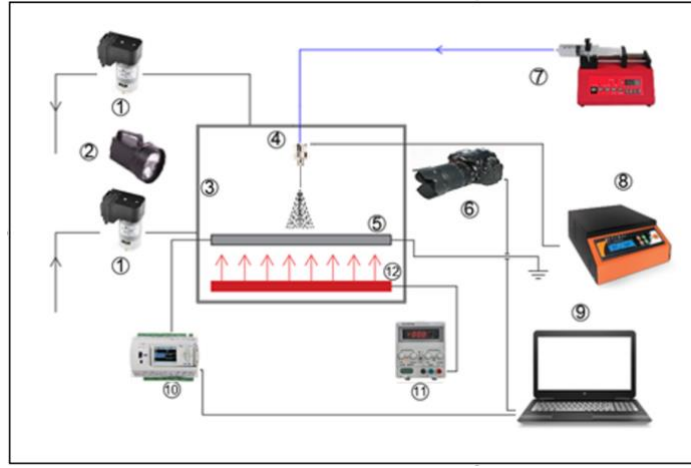
Gibbons ve Robinson (2017) tekli nozul ile koni jet modunda yaptıkları deneyler sonucunda, düşük debilerde elektrosprey soğutmanın konvansiyonel sistemlere göre %18,7 kat daha iyi ısı transferi elde edildiğini belirtmişlerdir. Xu ve ark. (2021) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, farklı elektrosprey modlarının soğutmaya etkisini incelemişlerdir. Nozul ile ısı alıcı arasındaki gerilimin artırılmasıyla oluşan damlacıkların çaplarının küçüldüğünü ve hızlarının arttığını belirlemişlerdir. Elektrosprey soğutma ile gerilimin uygulanmadığı duruma göre yaklaşık 2,8 kat daha iyi ısı transferi gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Kim ve ark. (2020), spreyn soğutmaya göre daha düşük pompa gücü gerektiren ve daha homojen damlacık dağılımı sağlayan elektrosprey soğutmanın ısı transfer performansını artırdığını ifade etmişlerdir. Elektrospreye uygulanan elektrik gerilim artışıyla ısı transferinin tek fazlı bölgede yaklaşık %12, geçiş bölgesinde ise yaklaşık %7 arttığı belirlemişlerdir. Yakut ve ark. (2021) Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada soğutucu akışkan olarak izopropil alkol kullanmışlardır. İzopropil alkolün ısı akışı uzaklaştırmada oldukça etkin olduğunu ve elektrospreyle gerçekleşen ısı transferinin gerilimsiz oranda gerçekleşen ısı transferine oranını ifade eden iyileştirme oranını 1,75 olarak elde etmişlerdir. Yakut ve ark. (2021) bir diğer çalışmalarında, nozul ile ısı alıcı arasında oluşan gerilimin artışıyla partiküllerin hızının arttığını ve çaplarının küçüldüğünü ifade etmişlerdir. Sonuç olarak en yüksek iyileştirme oranını 1,9 olarak elde etmişlerdir.

Kabakuş ve ark. (2021) deneysel çalışmalarında elektrosprey soğutma performansının kanatçıklı ve kanatçiksız ısı alıcılardaki değişimini incelemişlerdir. Kanatçıklı ısı alıcıda kanatçiksız ısı alıcıya göre yaklaşık 1,3-1,6 kat daha iyi ısı transferi elde etmişlerdir. Boston ve ark. (2022) çalışmalarında, nozul açısının elektrosprey soğutmaya etkisini incelemişlerdir. 90° den 30° ye kadarki açı değişimlerinde ısı transferi performanslarının benzer olduğunu 30° den daha az açılarda ısı transferinde keskin bir düşüş olduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak elektrosprey soğutmanın ulaşılabildiği zor yerlerde kullanımının ideal olduğunu belirlemişlerdir. Xu ve ark. (2022), HFE-7100 akışkanını etanol katı maddeleriyle iyileştirerek elektrospreyle soğutma performansını irdelenmiştir. Nötr duruma göre elektrosprey ile yaklaşık 2,2 kat daha iyi soğutma elde etmişlerdir.

Literatürde henüz kendine yeni yer bulmaya başlayan elektrosprey soğutma ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda, nozul çapı, nozul sayısı, nozul açısı, soğutucu akışkan cinsi, elektrik gerilimi, soğutucu akışkan debisi gibi parametrelerin ısı transferine etkileri üzerinde durulmuştur. Bu çalışmaların çok büyük bölümünde ısı alıcı olarak düzlem plaka kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada, elektrosprey soğutma ile kare kanatçıklı ısı alıcı üzerinde gerçekleşen ısı transferini etkileyen parametrelerin (Gerilim, soğutucu akışkan debisi, nozul çapı) soğutucu akışkanın tam buharlaştığı durumda kare kanatçıklı ısı alıcı üzerindeki soğutma performansı araştırılmıştır. Ayrıca belirlenen deney parametrelerinde oluşan sprej modları görüntülenerek, farklı sprej modlarının ısı transferine etkisi irdelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, sabit şartlarda gerilimin, soğutucu akışkan debisinin ve nozul çapının elektrosprey soğutma ile kare kanatçıklı ısı alıcı üzerindeki ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Deneyler 20 mm ısı alıcı-nozul arası mesafe ve 1,88-2,02-2,19-2,4-2,59-2,75-2,99-3,2 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 30 G çapında paslanmaz çelik nozul kullanılmıştır. Isı alıcıya, mikro işlemciler ve elektronik devre elemanlarının soğutulması durumunda optimum çalışma sıcaklığı aralığı olan 45-100 °C sıcaklık değer aralığını sağlayacak şekilde ısı akıları uygulanmıştır. Ayrıca belirlenen deney parametreleri ile ısı alıcı üzerinde soğutucu akışkan birikmesi önlenerek tam buharlaşma gerçekleşmesi sağlanmıştır. Deney düzeneğinin şematik görünümü **Şekil 2'** de verilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneği şematik görünümü

(1) Vakum pompası, (2) Stroboskop, (3) Sprey odası, (4) Nozul, (5) Isı alıcı, (6) Kamera, (7) Şırınga pompası, (8) Statik elektrik yükleyici, (9) Bilgisayar, (10) Data logger, (11) DC güç kaynağı, (12) Silikon ısıtıcı.

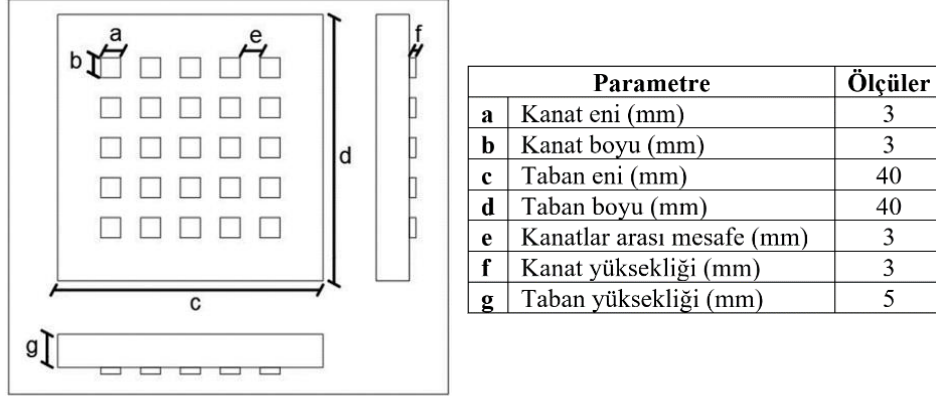
Deneylerde atomize edilecek soğutucu akışkan olarak yüksek dielektrik sabitine, düşük yüzey gerilimine ve düşük buharlaşma sıcaklığına sahip olan etanol kullanılmıştır. Etanolün fiziksel özellikleri **Tablo 1**' de verilmiştir.

Tablo 1. Etanolün fiziksel özellikleri (URL-1)

Fiziksel Özellik	Etanol
Kaynama noktası (C°)	78,3
Yoğunluk (kg/m ³)	790
Yüzey gerilimi (N/m)	0,0245
İletkenlik (pS/m)	130000

Etanol paslanmaz çelik nozula şırınga pompası (New Era, NE-300) ile sabit debide gönderilmiştir. Deneylerde 30 G ($d_i=0,15$ mm) çapında, 13 mm uzunluğunda paslanmaz çelik nozul kullanılmıştır. Nozul ile ısı alıcı (substrate) arasında sabit elektrik gerilimi oluşturmak için statik elektrik yükleyici olarak (Puls Electronic, HVDC-20) kullanılmıştır. DC güç kaynağı (Instek, GPS-3030DD) ile voltaj ve akım ayarı yapılarak silikon ısıtıcı ile ısı alıcıya 1,88-2,02-2,19-2,4-2,59-2,75-2,99-3,2 kW/m² ısı akıları uygulanmıştır. Isı akıları (q'') silikon ısıtıcı ile ısı alıcıya uygulanan güç değerinin birim alandaki değerini ifade etmektedir. Deneylerin dış ortam şartlarından etkilenmemesi ve statik elektrik yükleyicinin ürettiği yüksek gerilimden zarar görmemek için deneyler spray odasında gerçekleştirilmiştir. Spray odasına taze hava sağlanması için yan yüzeyinden iki adet, buharlaşan etanolün deşarjı için üst yüzeyinden 2 adet delik açılarak spray odası içerisindeki nem dengesi korunmuştur. Açılan delikler spray akışını etkilemeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Airpo D2028B marka vakum pompaları ile ortama taze hava takviyesi yapıp, buharlaşan akışkan deşarj edilmiştir. Deneylerde alüminyum 5000 serisinden imal edilmiş 40x40x5 mm taban ölçülerine sahip

kare kanatçıklı ısı alıcı kullanılmıştır. Kullanılan ısı alıcının geometrik özellikleri Şekil 3' de verilmiştir.



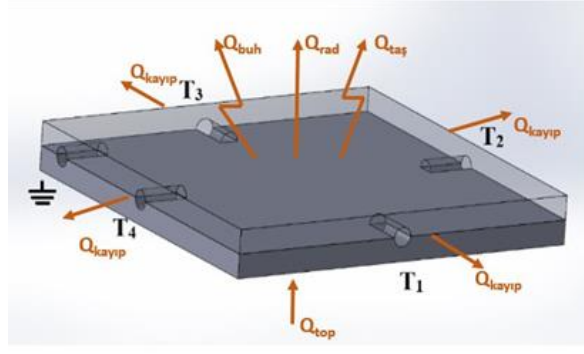
Şekil 3. Isı alıcı geometrik özellikleri

Isı alıcının üst yüzey dışındaki bütün yüzeyleri cam yünü izolasyonla yalıtılarak, ısı transferinin sadece üst yüzeyden gerçekleşmesi sağlanmıştır. Isı alıcının yan yüzeylerinin ortalarından açılan 5-10-15-20 mm derinliğindeki deliklere 4 adet ısı çift yerleştirilerek ısı alıcının sıcaklık ölçümleri homojen bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı ölçümü için spray odası içerisine 1 adet ısı çift yerleştirilmiştir. Kararlı hal sıcaklıkları Novus, Fieldlogger marka veri kaydedici ile okunarak bilgisayara aktarılmıştır. Oluşturulan spray modlarını görüntülemek için Nikon D90 kamera ve Nikon 18-105 lens kullanılmıştır. Spray görüntüleri karanlık ortamda Lutron DT-2199 stroboskop ile spray görüntüsü netleştirilerek gerçekleştirilmiştir.

2.1. Hesaplamalar

Isı alıcı üzerinden konvektif taşınım ($Q_{taş}$), ışıınım (Q_{rad}), buharlaşma (Q_{buh}) ve kayıplar ($Q_{kayıp}$) yolu ile ısı transferi gerçekleşmektedir (Şekil 4). Isı alıcı üzerinde gerçekleşen ısı transferi mekanizmalarının denklemleri Eş. 1' deki gibidir.

$$Q_{top} = Q_{taş} + Q_{buh} + Q_{rad} + Q_{kayıp} \quad (1)$$



Şekil 4. Isı alıcıda gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları

Isı alıcı yüzey alanının çok küçük oluşu ve düşük sıcaklık değerlerinde deneylerin yapılmış olması dikkate alınarak, sistemden ışınlam ile gerçekleşen ısı transferi hesabı yapılmış ve ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transfer miktarının %1' inden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sistemden gerçekleşen ısı kayıpları hesaplandığında ısı alıcıdan gerçekleşen toplam ısı transfer miktarının %3 ünden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sistemden ışınlam ve kayıplardan dolayı gerçekleşen ısı transfer miktarının ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Radyasyon ve kayıplar ile gerçekleşen ısı transfer miktarı ihmal edildiğinde, ısı transfer denklemi Eş. 2' de gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$Q_{top} = Q_{taş} + Q_{buh} \quad (2)$$

Isı alıcıya verilen toplam ısı miktarı (Q_{top}) DC güç kaynağından sağlanan akım (I) ve voltaj (V) değerinin çarpımına eşittir. Bu durumda ısı transfer denkleminin son hali Eş. 3' deki gibi olur.

$$Q_{top} = Q_{taş} + Q_{buh} = VI \quad (3)$$

Weber Sayısı, atalet kuvvetlerin yüzey gerilme kuvvetlerine oranıdır. Weber sayısının artışı daha küçük damlacık dağılımı oluşumunu ifade etmektedir (Yeşildal, 2014). Modifiye edilmiş Weber sayısı Eş.4' teki gibi ifade edilebilir. Modifiye edilmiş Weber Sayısının kullanılmasının sebebi, nozul çapı, soğutucu akışkan debisi ve nozul sayısı değişiminin atomizasyonu gerçekleşen partiküllerin çaplarına etkisini belirlemektir. (Wang ve Mamishev 2012). ρ akışkan yoğunluğunu, D_0 nozul dış çapı, σ akışkanın yüzey gerilimini, Q toplam hacimsel debiyi, D_i nozul iç çapını ve N ise nozul sayısını göstermektedir.

$$We = \frac{16 \rho D_0}{\sigma} \times \frac{Q^2}{(N \pi D_i^2)^2} \quad (4)$$

Elektrik Weber Sayısı, elektrik kuvvetlerinin yüzey gerilimine oranını ifade eder. Elektrik alanının akışı nasıl etkilendiğini belirlemek için kullanılır. Elektrik Weber Sayısı' nın artışıyla spray damlacıklarının ayrılmaları da artmaktadır (Eow ve ark., 2001). Elektrik Weber Sayısının belirlenmesi için Eş.5' daki eşitlik kullanılır (Wang ve Mamishev, 2012). D_0 nozul dış çapı, E_0 ortalama elektrik alan şiddeti, ε akışkan elektrik geçirgenliği ve σ akışkanın yüzey gerilimini ifade etmektedir.

$$We_E = \frac{\varepsilon E_0^2 D_0}{2\sigma} \quad (5)$$

Elektrik Weber Sayısı' nın hesap edilmesinde kullanılan elektrik alan eşitliği Eş.6' deki gibidir. r_0 nozul dış yarıçapını, H nozul – ısı alıcı arası mesafeyi, E_0 ortalama elektrik alan şiddeti, V ise uygulanan gerilimi ifade etmektedir (Zhong ve ark., 2009; Wang ve Mamishev 2012).

$$E_0 = \frac{\sqrt{2} V}{r_0 \ln\left(\frac{4H}{r_0}\right)} \quad (6)$$

Belirsizlik analizi Eş.7 kullanılarak yapılmıştır. Eşitlikteki (x_1, x_2, \dots, x_n) bağımsız değişkenleri, R bağımsız değişkenlerin fonksiyonunu, (w_1, w_2, \dots, w_n) bağımsız değişkenlerin belirsizliğini, w_R ise sistem belirsizliğini ifade etmektedir (Kline ve McClintock, 1953).

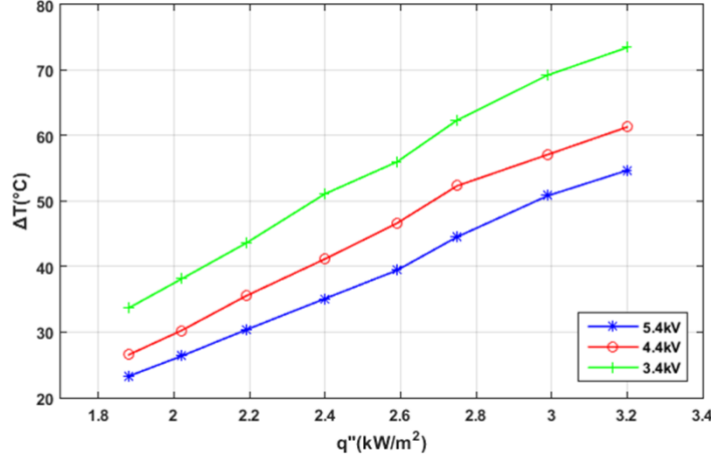
$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0,5} \quad (7)$$

Yukarıda belirtilen eşitlik kullanılarak, deneysel belirsizlik Elektrik Weber Sayısı için (We_E) %2,95, Weber Sayısı (We) içinse %3,47 olarak hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

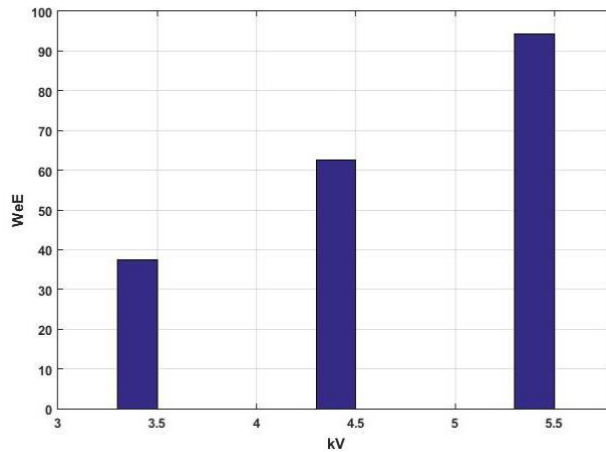
Kare kanatçıklı ısı alıcı üzerinde deneyler yapılarak, farklı değişken parametrelerin ısı transferine etkilerini araştırılmıştır. İlk olarak 0,2 ml/dk debi, 30 G nozul çapı, 20 mm nozul ısı alıcı arası mesafe ve sekiz farklı ısı akısında gerilimin ısı transferine etkisini görebilmek için üç farklı gerilimde (3,4-4,4-5,4 kV) deneyler yapılmıştır. Şekil 5' te de görüldüğü gibi üç farklı gerilim için en iyi soğutma 5,4 kV elektrik gerilimi için gerçekleşmiştir. Gerilimin artışıyla ısı transfer miktarı da artmıştır. Grafikte x eksenini ısı alıcıya uygulanan ısı akısını, y ekseninde yer alan sıcaklık farkı ifadesi (ΔT) ise ısı alıcı yüzeyinin ortalama sıcaklığı ile ortam sıcaklığının farkını ifade etmektedir.

En yüksek ısı akısında 3,4 kV gerilime göre, 4,4 kV gerilimde %17, 5,4 kV gerilimde ise %25 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 3,4 kV gerilime göre, 4,4 kV gerilimde %21, 5,4 kV gerilimde ise %31 daha iyi soğutma elde edilmiştir.



Şekil 5. Kare ısı alıcıda farklı gerilimler için ısı akısı-sıcaklık değişim grafiği

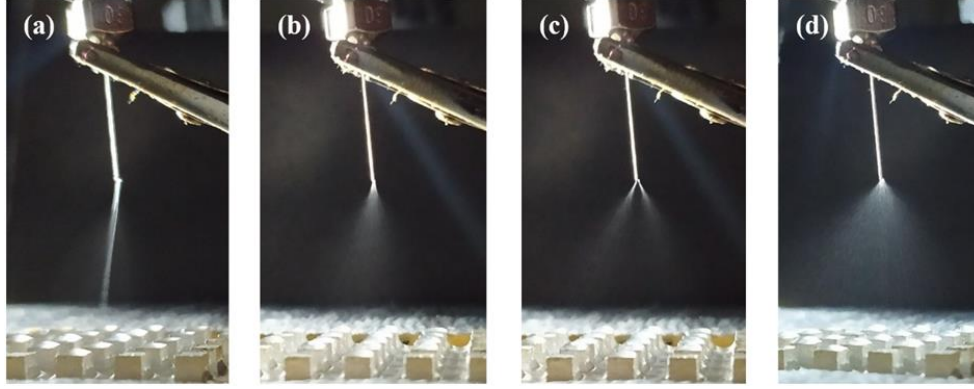
Elektrik geriliminin değişiminin partikül boyutuna etkisini karakterize eden Elektrik Weber Sayısı değişimi Şekil 6' da verilmiştir. Gerilim artışıyla We_E artış göstermiştir. We_E artışıyla nozuldan çıkış yapan soğutucu akışkanda damlacık ayrışması artarak daha küçük partiküller elde edilmiştir. Elektrik Weber Sayısı 3,4 kV gerilime göre, 4,4 kV gerilimde %40, 5,4 kV gerilimde %60 artış göstermiştir.



Şekil 6. Weber elektrik sayısının gerilimle değişim grafiği

Elektrik gerilim artışının ısı alıcı üzerinde daha iyi bir soğutmaya gerçekleştirmesinin sebebi, akışkana uygulanan yüksek voltajın artışıyla sprey atomizasyonun iyileşmesi ve daha küçük partikül çapı elde edilebilmesidir. Partikül çapı küçüldükçe, ısı alıcı yüzeyine çarpan sıvı partikülleri daha kolay buharlaşıp daha hızlı ısı atımına sebep olmaktadır. Alınan sprey görüntülerinde, 3,4 kV

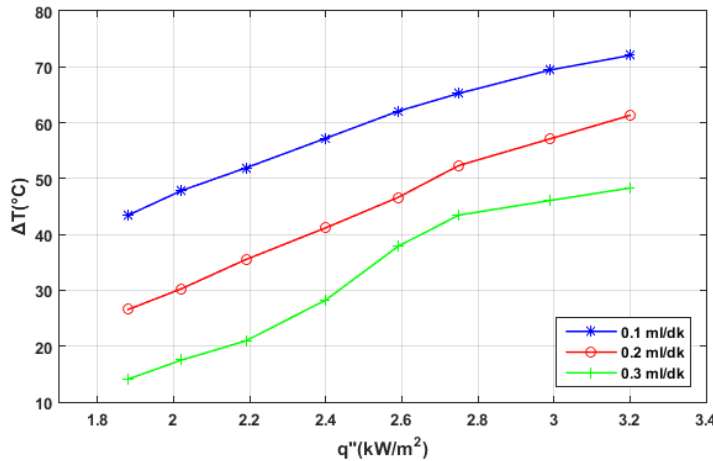
gerilimde koni jet modu, 4,4 kV gerilimde kararsız multi jet modu ve 5,4 kV gerilimde multijet modu oluşumu gözlenmiştir (Şekil 7). Koni jet modu kararlı partikül çapı ve stabil akış imkanı sunmasına rağmen, elektrik gerilim artışı ile oluşan multi jet modunda daha küçük partiküller oluşmuş ve daha iyi soğutmaya sebep olmuştur.



Şekil 7. Kare ısı alıcıda (a) 3.4 kV, (b-c) 4.4 kV, (d) 5.4 kV gerilimleri için elektrosprey oluşumu

4,4 kV gerilim, 30 G nozul çapı, 20 mm nozul ısı alıcı arası mesafe, sekiz farklı ısı akısı ile gerilimin ısı transferine etkisini görebilmek için 0,1-0,2-0,3 ml/dk olmak üzere üç farklı debide deneyler yapılmıştır. Soğutma performansının en iyi gerçekleştiği debi 0,3 ml/dk olarak belirlenmiştir. Şekil 8 incelendiğinde akışkan debisinin artışıyla soğutmanın iyileştiği görülmektedir.

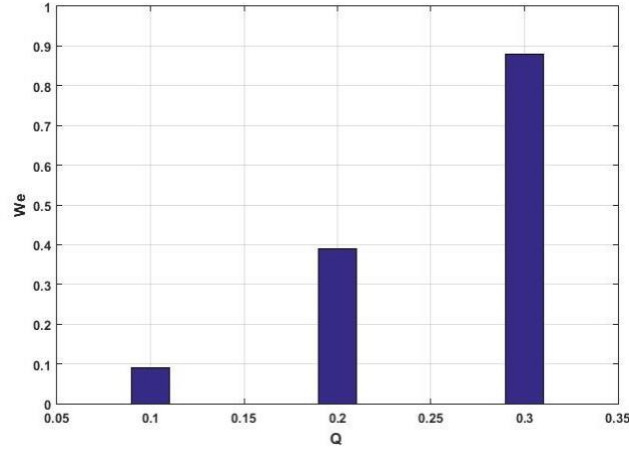
En yüksek ısı akısında 0,1 ml/dk debiye göre, 0,2 ml/dk debide %15, 0,3 ml/dk debide ise %33 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 0,1 ml/dk debiye göre, 0,2 ml/dk debide %40, 0,3 ml/dk debide ise %67 daha iyi soğutma elde edilmiştir.



Şekil 8. Kare ısı alıcıda farklı debiler için ısı akısı-sıcaklık değişim grafiği

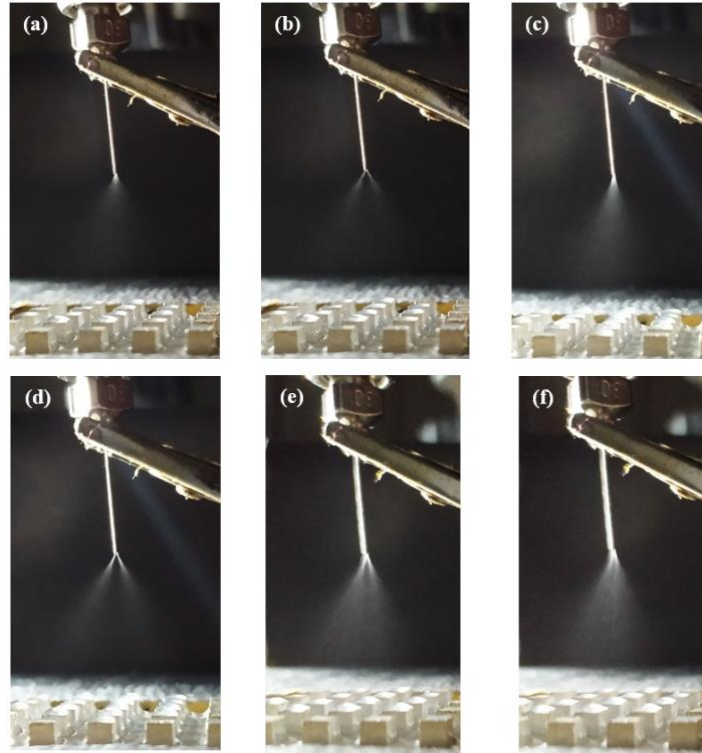
Debi değişiminin partikül boyutuna etkisini incelemek için Weber Sayısı hesaplanmıştır. Soğutucu akışkan debisinin artışıyla We sayısı artış göstermiştir. We sayısı artışıyla nozuldan çıkış yapan soğutucu akışkanın atomizasyonu iyileşmiştir ve bu sayede ısı alıcı yüzeyinden atılan ısı

miktarı artmıştır. Weber Sayısı 0,1 ml/dk debiye göre, 0,2 ml/dk debide %75, 0,3 ml/dk debide %89 artış göstermiştir (**Şekil 9**).



Şekil 9. Weber sayısının debiyle değişim grafiği

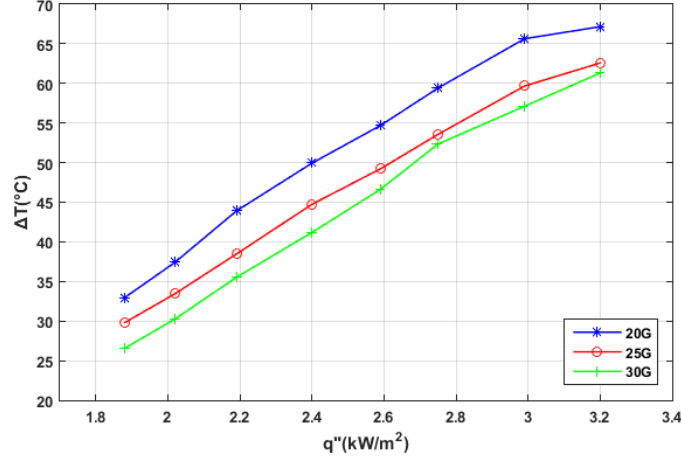
Farklı debilerde yapılan deneyler için alınan elektrosprey görüntüleri **Şekil 10**' da verilmiştir. Çalışılan üç debide de elektrosprey modunun kararsız multi jet modunda olduğu, 0,3 ml/dk debide diğer debilere kıyasla kararlı duruma daha yaklaştığı görülmektedir. Debinin artışı atomize olan partikül miktarını artırmış ve partiküllerin buharlaşması sonucu ısı alıcı üzerinden daha fazla ısı uzaklaştırılarak daha iyi bir soğutma gerçekleşmiştir.



Şekil 10. Kare kanatçıklı ısı alıcıda (a-b) 0,1 ml/dk, (c-d) 0,2 ml/dk, (e-f) 0,3 ml/dk debileri için elektrosprey oluşumu

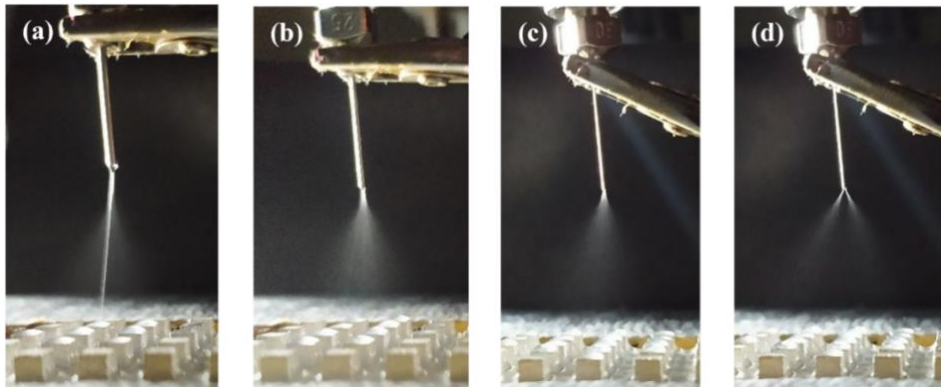
20-25-30 G nozul çaplarında, kare kanatçıklı ısı alıcıda yapılan deneylerde gerçekleşen soğutma grafiği Şekil 11' de verilmiştir. En iyi soğutmanın 30 G nozul çapında gerçekleştiği, nozul çapı azaldıkça ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transferi arttığı belirlenmiştir.

En yüksek ısı akısında 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %7, 30 G nozul çapında ise %9 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %10, 30 G nozul çapında ise %19 daha iyi soğutma elde edilmiştir. Düşük ısı akılarında yüksek ısı akılarına göre daha iyi ısı transferi gerçekleştiği belirlenmiştir.



Şekil 11. Kare kanatçıklı ısı alıcıda farklı nozul çapları için ısı akısı-sıcaklık değişim grafiği

Farklı nozul çapları için yapılan deneyler sonucu nozul çapının düşmesiyle koni jet modundan multi jet moduna geçiş evreleri Şekil 12' de görülmektedir. Nozul çapı düştükçe sprej atomizasyonun daha da iyileştiği belirlenmiştir. Atomizasyonun iyileşmesi neticesinde ısı alıcıdan gerçekleşen ısı transferinde artış meydana gelmiştir. 20 G nozul çapında belirgin bir koni jet modu oluşurken, 25 G nozul çapında taylor konisi daralmış fakat koni jet modu devam etmiş, 30 G nozul çapında ise elektrosprej multi jet moduna geçiş yapmıştır.



Şekil 12. Kare kanatçıklı ısı alıcıda (a) 20 G, (b) 25 G, (c-d) 30 G nozul çapları için elektrosprej oluşumu

4. Sonuçlar ve neriler

Elektrosprey soğutma ile kare kanatçıklı ısı alıcıda soğutucu akışkan debisinin, elektrik geriliminin ve nozul çapının etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Sonuç olarak;

- Elektrik gerilimi arttıça spreyc partiklerinin boyutlarının küçüldüğü, buna bağlı olarakda ısı alıcıdan gerçekleşen ısı transfer miktarının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Gerilim artışı ile elektrospreyc modu koni jet modundan multijet moduna geçiş yapmıştır.
- Soğutucu akışkan debisinin artışı, ısı alıcı üzerine düşen partikül miktarını artırmış ve ısı alıcıda gerçekleşen soğutma performansını artırmıştır. Çalışılan her debide elektrospreyc modunun kararsız multijet modu olduğu belirlenmiştir.
- Nozul apı azaldıkça ısı alıcıdan uzaklaştırılan ısı miktarı artmıştır. Nozul apı azaldıkça elektrospreyc modunun koni jet modundan multijet moduna geçiş yaptığı belirlenmiştir.
- Gerçekleştirilen bu çalışmada değişken parametrelerin ısı transferi üzerine etkileri ayrı ayrı irdelenmiştir. Deneyc parametreleri farklı varyasyonlar için belirlenip deneyler yapılarak parametrelerin kendi aralarındaki birleşik etkileri belirlenebilir. Ayrıca deneylerde soğutucu akışkan olarak fiziksel özellikleri sebebiyle etanol kullanılmıştır. Elektrospreyc oluşumuna elverişli farklı akışkanlar ile deneyler yapılarak ısı transfer performansları incelenebilir.

Teşekkür

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

Yazarların Katkısı

Bu alışma Prof. Dr. Kenan YAKUT danışmanlığında 14.09.2021 tarihinde tamamladığımız “Isı alıcılarda elektrospreyc soğutma analizi” başlıklı doktora tezinin bir bölümü kullanılarak hazırlanmıştır.

ıkar atışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar atışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Badıllı, U., Tarımcı, N. (2009). Elektrosprey püskürtme yöntemi ve nanoteknolojideki uygulamaları. *Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 38, 117-135.
- Boston, L., Huang, P., Chiarot, P. (2022). Effect of nozzle orientation on electrospray cooling. *Applied Thermal Engineering*, (210), 118360. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118360>
- Cloupeau M., Prunet-Foch B. (1994). Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review. *Journal of Aerosol Science*, 25 (6), 1021–1036. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90199-6](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90199-6)
- Deng, W., Gomez, A. (2011). Electrospray Cooling for Microelectronics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 2270-2275. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.038>
- Eow, J. S., Ghadiri, M., Sharif, A. (2001). Deformation and break-up of aqueous drops in dielectric liquids in high electric fields. *Journal of Electrostatics*, (51-52), 463-469. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(01\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00035-3)
- Gibbons, M.J., Robinson, A.J. (2017). Heat transfer characteristics of single cone-jet electrosprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (113), 70-83.
- Jaworek, A., Krupa, A. (1999). Classification of the modes of EHD spraying, *Journal of Aerosol Science*. 30 (7), 873–893. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(98\)00787-3](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00787-3)
- Kabakuş, A. (2021). Isı alıcılarda elektrosprey soğutma analizi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Karakaya, M. C. (2012). Elektrosprey enjeksiyon sistemi tasarımı ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kim, Y., Jung, S., Kim, S., Choi, S.T., Kim, M., Lee, H. (2020). Heat transfer performance of water-based electrospray cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (118), 104861. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104861>
- Kline, S.J., McClintock, F.A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, (75), 3-8.
- Manay, E. (2018). Çoklu Mikrokanallarda Ferroakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(4), 247-258. DOI: 10.21597/jist.398234
- Özakın, A. N., Kabakuş, A. (2022). Düzlem yüzey ısı alıcılarda tekli ve çoklu hava jetinin ısı ve akış karakteristiklerine etkisinin sayısal analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12 (3) , 839-847 . DOI: 10.17714/gumusfenbil.1020711
- URL-1: <https://www.interlab.com.tr/assets/upload/services/document/920-026-ethanol-absolute64-17-5-en-r-2-pdf24062022094202.pdf>, (Erişim tarihi: 10.02.2023)
- Wang, H., Mamishev, A.V. (2012). Heat transfer correlation models for electrospray evaporative cooling chambers of different geometry types. *Applied Thermal Engineering*, (40), 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.061>
- Xu, H., Wang, J., Li, B., Yu, K., Wang, H., Tian, J., Li, B. (2022). Electrospray characteristics and cooling performance of dielectric fluid HFE-7100. *Energy*, (259), 125072. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125072>
- Xu, H., Wang, J., Li, B., Yu, K., Tian, J., Wang, D., Zhang, W. (2021). Effect of spray modes on electrospray cooling heat transfer of ethanol, *Applied Thermal Engineering*, (189), 116757. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116757>
- Yakut, R., Yakut, K., Sabolsky, E., Kuhlman, J. (2021). Experimental determination of cooling and spray characteristics of the water electrospray. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (120), 105046. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105046>

- Yakut, R., Yakut, K., Sabolsky, E., Kuhlman, J. (2021). Determination of heat transfer and spray performances of isopropyl alcohol electro-spray. *Sensors and Actuators A: Physical*, 332(1), 113135. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113135>
- Yakut, K., Kabakuş, A., Yeşildal, F., Karabey, A., Kanal akışında optimize edilmiş ısı alıcıların çarpan jetle ısı transferi ve akış karakteristikleri analizi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31(1), 43-55.
- Yeşildal, F. (2014). *Sprey soğutmada ısı ve akış karakteristiklerinin belirlenmesi*. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Yeşildal, F., Özakın, A. N., Yakut, K. (2022). Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 100983. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.04.002>
- Zhao, Z., Peles, Y., Jensen, M. K. (2013). Water jet impingement boiling from structured-porous surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 63, 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.085>
- Zhong, X., Yi, R., Holliday, A.E., Chen, D.D. (2009). Field distribution in an electro-spray ionization source determined by finite element method. *Rapid Communications In Mass Spectrometry*, (23), 689-697. DOI: 10.1002/rcm.3914