

Metanol–Su Karışımlarının Elektrosprey Soğutma ile Optimum Çalışma Koşullarının Taguchi Metoduyla Belirlenmesi

Fatin SÖNMEZ^{1*}, Ahmet ÖZTÜRK¹

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

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: fatinsonmez@artvin.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received: 21.11.2025
Kabul Tarihi/Accepted: 27.11.2025

Öz

Bu çalışmada, düz plaka bir ısı alıcı üzerinde elektrosprey soğutma sisteminin ısııl performansı, Taguchi deney tasarımı kullanılarak optimize edilmiştir. Deneyler, 4 kW/m² sabit ısı akısı altında, 50×50×4 mm boyutlarında alüminyum ısı alıcı, 25G paslanmaz çelik nozul ve 30 mm sabit nozul–ısı alıcı mesafesi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada soğutucu akışkan olarak %100 metanol, %90 metanol–%10 su ve %80 metanol–%20 su karışımları; debi olarak 20, 30 ve 40 ml/h; gerilim olarak ise 7, 10 ve 13 kV seviyeleri kullanılmıştır. L9(3³) ortogonal dizisine göre oluşturulan Taguchi planı kapsamında elde edilen ΔT değerleri üzerinden regresyon ve varyans analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, toplam varyansın %95,03’ünün model tarafından açıklandığını ve en etkili parametrelerin sırasıyla debi (%53,45 katkı) ve akışkan türü (%33,21 katkı) olduğunu göstermiştir; gerilimin katkısı ise %8,38 ile daha sınırlı kalmıştır. Sinyal/gürültü oranı analizine göre optimum çalışma koşulları %80 metanol–%20 su karışımı, 40 ml/h debi ve 13 kV gerilim olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda elde edilen $\Delta T=12,54$ °C ve $h=318,98$ W/m²K değerleri, elektrosprey soğutmanın yüksek ısııl performans sağladığını ortaya koymaktadır. Bulgular, debi ve akışkan bileşiminin elektrosprey soğutma tasarımında kritik rol oynadığını, gerilimin ise bu parametrelerle etkileşimli ikincil bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrosprey soğutma, Isı alıcı, Taguchi yöntemi, Metanol–su karışımı, Isı taşınım katsayısı.

Determination of the Optimum Operating Conditions of Methanol–Water Mixtures for Electrospray Cooling Using the Taguchi Method

Abstract

In this study, the thermal performance of an electrospray cooling system on a flat plate heat sink was optimized using the Taguchi experimental design. The experiments were conducted under a constant heat flux of 4 kW/m² using an aluminium heat sink with dimensions of 50×50×4 mm, a 25G stainless steel nozzle, and a fixed nozzle–heat sink distance of 30 mm. As coolant, 100% methanol, 90% methanol–10% water, and 80% methanol–20% water mixtures were used; the flow rates were set to 20, 30, and 40 ml/h, and the applied voltages were 7, 10, and 13 kV. Based on the L9(3³) orthogonal array Taguchi design, regression and analysis of variance analyses were performed using the ΔT values obtained from the experiments. The results showed that 95.03% of the total variance was explained by the model, and that the most influential parameters were the flow rate (53.45% contribution) and the type of fluid (33.21% contribution), whereas the contribution of voltage remained more limited at 8.38%. According to the signal-to-noise ratio analysis, the optimum operating conditions were determined as an 80% methanol–20% water mixture, a flow rate of 40 ml/h, and an applied voltage of 13 kV. Under these conditions, a temperature difference of $\Delta T=12.54$ °C and a heat transfer coefficient of $h=318.98$ W/m²K were obtained, demonstrating the high thermal performance of electrospray cooling. The findings indicate that flow rate and fluid composition play a critical role in the design of electrospray cooling systems, while voltage has a secondary effect that is strongly coupled with these parameters.

Keywords: Electrospray cooling, Heat sink, Taguchi method, Methanol–water mixture, Heat transfer coefficient.

Cite as;

Sönmez, F., Öztürk, A. (2025). Metanol–Su Karışımlarının Elektrosprey Soğutma ile Optimum Çalışma Koşullarının Taguchi Metoduyla Belirlenmesi, *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(3), 916-924. Doi: 10.53501/rteufemud.1827788

1. Giriş

Son yıllarda elektrosprey, yüksek verimli sprej soğutma teknolojilerinin geliştirilmesinde öne çıkan umut verici bir yöntem haline gelmiştir (Deng ve Gomez, 2011). Geleneksel sprej tekniklerinin aksine mekanik güce ihtiyaç duymayan bu yöntem, bir sıvıyı yüksek voltajlı bir elektrik alan etkisiyle ultraviyole boyutta damlacıklara ayırmaktadır (Aamir vd., 2017; Benter vd., 2021; Gaskell, 1997). Bu yaklaşım; daha kompakt sistem tasarımı, daha düşük enerji tüketimi, gelişmiş atomizasyon ve artırılmış ısı transferi gibi önemli üstünlükler sunmaktadır. Elektrosprey soğutma sisteminde uygulanan yüksek gerilim, hacimli ve yüksek basınç gerektiren bir pompa kullanımını gereksiz kılarak soğutma sisteminin toplam hacmini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, sıvı yüzeyinde indüklenen elektrik yükleri sayesinde soğutucu akışkanın çok daha ince damlacıklara ayrılması kolaylaşmakta ve atomizasyon kalitesi iyileşmektedir. Bununla birlikte, elektrosprey morfolojisi, uygulanan elektrik alanına ait parametrelerin ayarlanmasıyla hassas biçimde kontrol edilebilmektedir (Gan vd., 2022; Jaworek ve Krupa, 1999). Harici elektrik alan, yüklü damlacıkları ısı kaynağına doğru ivmelendirerek ve yüzeyde oluşan sıvı film içerisindeki karışım ve dalgalanmaları artırarak ısı transfer performansını geliştirmektedir. Bu avantajlar dikkate alındığında, elektrosprey soğutmanın yüksek güçlü elektronik bileşenlerin ısı giderim problemlerinin çözümünde kayda değer bir potansiyel sunduğu söylenebilir.

Elektrosprey soğutmanın performansı, uygulanan gerilime son derece duyarlıdır. Bu konuda yapılan ilk sistematik çalışmada Feng ve Bryan (2008), gerilime bağlı olarak ortaya çıkan birkaç farklı soğutma rejimi belirlemiştir. Düşük gerilimlerde (5 kV'un altında) ısı transferinin, yüksüz bir spreje göre yalnızca hafifçe daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ancak gerilim 5 kV'tan 6 kV'a çıkarıldığında, ısı transfer katsayısında önemli bir artış gözlenmiştir. Bu iyileşme, püskürtmenin basit damlama modundan daha enerjik bir sprej moduna geçmesiyle birlikte damlacıkların

momentumunun artmasına bağlanmıştır. En yüksek noktada, ısı transfer katsayısı, gerilim uygulanmayan duruma göre yaklaşık 1,7 kat daha büyük bulunmuştur.

Chapman vd. (2019) yaptıkları çalışmada elektrosprey esaslı faz değişimli soğutmayı, yerel sıcak noktalardan ısı uzaklaştırılması için ince film buharlaşmasına dayanan yeni bir yöntem olarak incelemiştir. Çalışmada, 0,12-0,48 ml/h debi, 1-4,8 kV voltaj değerlerinde ve akışkan olarak metanol kullanarak, elektrosprey ile ısıtılmış yüzeye çarpan damlacıkların oluşturduğu sıvı filmler deneysel olarak görüntülenmiş ve bu filmlerin kalınlığı ile buharlaşma davranışını açıklayan basitleştirilmiş bir ısı-kütle transfer modeli geliştirmişlerdir.

Xu vd. (2022) çalışmalarında, dielektrik akışkan HFE-7100 ile elektrosprey soğutma deneysel olarak incelenmiş, yüksek DC gerilim altında sprej morfolojisi ve ısı transferi performansı değerlendirilmiştir. Az miktarda etanol eklenmesinin akışkanın iletkenliğini artırarak yüklenmeyi iyileştirdiği, böylece jetin ince filme ve ultra ince damlacıklara dönüştüğü ve elektrosprey soğutma ile nötr duruma göre yaklaşık 2,2 kat daha yüksek ısı akısı elde edildiği gösterilmiştir.

Wan vd. (2023) yaptıkları çalışmada elektrosprey soğutmanın dört farklı sprej modu ve iki farklı soğutucu (etanol, etilen glikol) için soğutma performansı deneysel olarak incelemiştir. Konik jet ve çoklu jet modlarında damlacık boyutunun küçülmesi, hızın artması ve koni açısının genişlemesi sayesinde, mikro-damlacık moduna kıyasla ısı akısında sırasıyla %32 ve %74 artış ve en geniş kaynama bölgesi elde edilmiştir. Artan hacimsel debi daha yüksek hız ve daha küçük damlacıklarla elektrosprey performansını iyileştirirken, etilen glikol çoğu durumda etanolden daha iyi soğutma sağlamış; ayrıca mikro-damlacık modunda gaz filmi nedeniyle oluşan sıçrama ve belirli voltaj/sıcaklık aralıklarında koni-jet ile çoklu-jet modları arasında rastgele geçişlerin yüzey sıcaklığında dalgalanmalara yol açtığı gösterilmiştir.

Kabakuş vd. (2024a) yaptıkları çalışmada, fotovoltaiik (PV) panellerin soğutulmasında elektrosprey soğutma yöntemini incelenmiştir. Soğutucu akışkan olarak su kullanılarak, farklı debi ve ısıtım değerleri için PV panellerde elektrosprey soğutma performansı araştırılmıştır. Sonuçlar, optimum debinin 80 ml/h su debisi olduğunu ve 1200 W/m² ısıtım altında panel sıcaklığının bu debide yaklaşık 77 °C'den 32,2 °C'ye düşürülebildiğini göstermiştir. Optimum debi ve ısıtım koşullarında elde edilen çıkış gücü %56,6 oranında artmıştır. Ayrıca, literatürde spreyle soğutulan PV panellerle karşılaştırıldığında, elektrosprey yönteminin yaklaşık 1,5–137 kat daha az su gerektirdiği belirlenmiştir.

Kabakuş vd. (2024b) yaptıkları çalışmada, PV panelin soğutma performansı elektrosprey yöntemiyle incelenmiş; su, etanol ve %50 su–etanol karışımı 50–80–110 ml/h debilerde 1000 W/m², 20 kV koşullarında püskürtülmüştür. Sonuçlar, panel yüzey sıcaklığı arttıkça güç çıkışının azaldığını, özellikle 80 ve 110 ml/h debilerde etanol ve su–etanol karışımının suya göre daha etkili soğutma sağladığını göstermiştir. En yüksek debide etanol, panel sıcaklığını %59 düşürerek soğutmasız duruma göre %6,8 daha yüksek güç üretimi sağlamış ve elektrosprey soğutmanın PV verimini artırmada etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Taheri vd. (2024) çalışmada, yüksek güç yoğunluklu cihazların soğutulması için elektrosprey yöntemi kullanılarak yüksek debili su–etanol karışımlarının soğutma performansı incelenmiştir. Konik-jet modunun kararlı bölgesi belirlenerek, debi (20–100 ml/h), gerilim (5,30–12,15 kV) ve akışkan bileşiminin (etanol, %35 su, %70 su) kritik ısı akısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Su hacim oranı %70'e çıkarıldığında, kararlı bölgede kritik ısı akısının debiye bağlı olarak yaklaşık %80–170 aralığında arttığı, ayrıca debinin 40'tan 80 ml/h'ye yükseltilmesinin her iki karışım için de kritik ısı akısının yaklaşık %70 oranında iyileştirdiği gösterilmiştir. Su oranının %35'ten %70'e çıkarılması, daha yüksek gizli ısı nedeniyle kritik

ısı akısında ilave %29 artış sağlamış; geçiş rejiminde ise %70 su içeren karışım, damlacık geri sıçramasını baskılayarak üstün soğutma performans ortaya koyduğunu bildirmiştir.

Tian vd. (2024), etanol elektrosprey soğutma altında farklı makro yapıları yüzeyleri düz yüzeyle karşılaştırılarak elektrik alan-yüzey yapısının birleşik ısı transfer etkisi incelemiştir. Hem elektrik alan hem de yüzey yapılandırması kritik ısı akısını ve ısı transfer katsayısını artırmış; özellikle kübik pin-fin yüzeyde 4,5 kV ve 145 °C'de 7,93 W/cm² ile düz yüzeye göre %63 daha yüksek kritik ısı akısı elde edilmiştir. Alan oranı f arttıkça kritik ısı akısı önce artıp sonra azalmış, en iyi performans $f=0,79$ 'da sağlanmıştır; düşük sıcaklıklarda elektrik alanın, orta sıcaklıklarda ise makro-yapılandırılmış yüzeyin baskın olduğu, yüksek sıcaklıklarda bu etkinin azaldığı gösterilmiştir.

Yakut (2025), önceki çalışmalarda RSM ile optimize edilen nozul ve kafes kanatçıklı ısı alıcı kullanılarak elektrosprey soğutmanın performansı deneysel olarak incelenmiş; elektrik Bond sayısı, debi ve sabit yüzey sıcaklığının etkileri araştırılmıştır. Kafes kanatçıklı ısı alıcının düşük sıcaklık ve düşük elektrik Bond sayısında plaka tipine göre en fazla %20 daha yüksek soğutma sağladığını, ayrıca koni-jet modunun damlama moduna göre soğutma performansını %83'e kadar artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, kafes yapının daha yüksek ısı transferine karşın daha fazla enerji gerektirdiği, düz plakanın ise daha dengeli enerji tüketimi sunduğu vurgulanarak yapı seçiminin uygulamaya göre yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Çok sayıda parametre içeren deneysel sistemlerin en uygun koşullara getirilmesi, mühendislik ve imalat süreçlerinde hem verimliliğin hem de ürün kalitesinin artırılması açısından temel bir gerekliliktir. Bu çerçevede, istatistiksel deney tasarımı teknikleri, sınırlı sayıda deney yaparak güvenilir sonuçlara ulaşmaya olanak tanır. Genichi Taguchi tarafından ortaya konan Taguchi yöntemi, bu amaçla en sık başvurulan yöntemlerden biri olup, ortogonal diziler ve sinyal/gürültü (S/N) oranı kavramlarını

kullanarak, kontrol edilemeyen çevresel değişkenlerin sistem performansı üzerindeki etkisini en aza indirmeyi hedefler. Böylece hem süreç hem de ürün kalitesinde iyileşme sağlanırken, deney maliyeti ve süre açısından önemli kazanımlar elde edilir. Taguchi yaklaşımı, deneysel optimizasyonda istatistiksel deney tasarımının sağladığı verimlilik ve kaynak tasarrufu avantajlarını açık biçimde ortaya koymaktadır (Ebikabowei vd., 2025; Hisam vd., 2024).

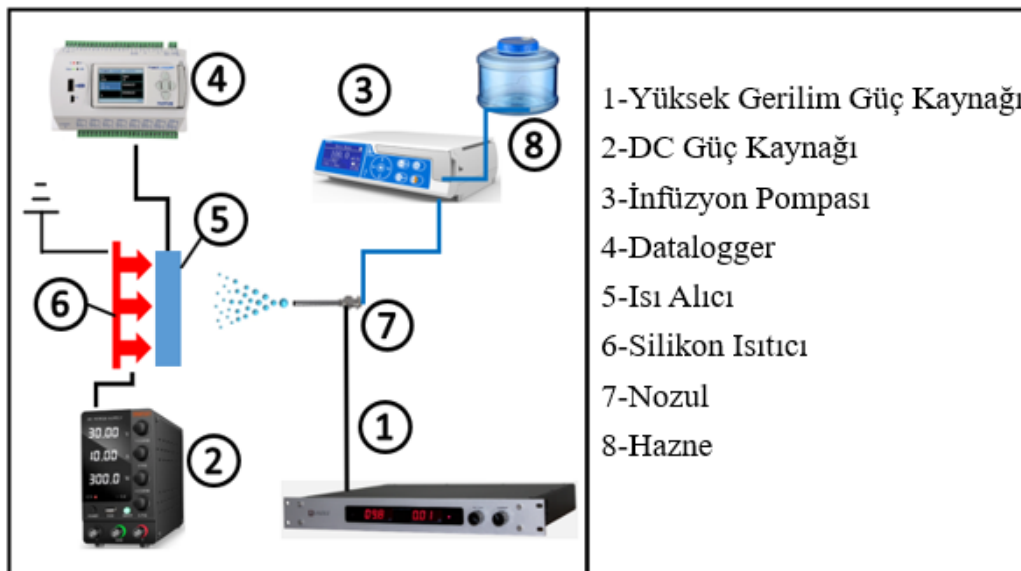
Bu çalışma, sabit ısı akısı, sabit nozul çapı ve sabit ısı alıcı-nozul mesafesi koşulları altında, 5×5 cm boyutlu bir ısı alıcı yüzey üzerinde elektrosprey ile soğutmanın optimize edilmesini hedeflemektedir. Deney tasarımı, Taguchi yaklaşımı temel alınarak; üç farklı debi, üç farklı voltaj düzeyi ve %100 metanol, %90 metanol-%10 su, %80 metanol-%20 su olmak üzere üç farklı akışkan bileşimi üzerinden sistematik şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, çalışma; ısı performans göstergeleri (ΔT ve ısı taşınım katsayısı) açısından parametrelerin etkisini istatistiksel olarak analiz etmiş, optimum çalışma koşullarını tanımlamış ve ikili akışkan sistemleriyle elektrosprey soğutmanın uygulanabilirliğine ilişkin sonuçlar sunmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, ısı alıcı üzerindeki elektrosprey soğutma performansını etkileyen değişken parametrelerin belirlenmesi amacıyla Taguchi tabanlı bir optimizasyon uygulanmıştır. Deney düzeneğine ait şematik gösterim ise Şekil 1’de sunulmaktadır.

Deneyler, 4 kW/m² sabit ısı akısı, 25 G sabit nozul çapında ve 30 mm sabit nozul-ısı alıcı mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 50×50×4 mm boyutlarında alüminyum bir ısı alıcı kullanılmıştır. Sabit ısı akısı, DC güç kaynağına bağlı silikon ısıtıcı ile sağlanmış ve ısı akısı, yüzey sıcaklığı 104,5 °C’ye çıkan bir ısı alıcısının soğutma performansını değerlendirebilecek şekilde seçilmiştir.

Deneylerde, iç çapı 0,26 mm olan 25G paslanmaz çelik nozul kullanılmıştır. Soğutucu akışkan olarak, düşük buharlaşma sıcaklığı ve yüzey gerilimine sahip olması nedeniyle metanol tercih edilmiş; katkı maddesi olarak ise yüksek buharlaşma entalpisine sahip su kullanılmıştır. Soğutucu akışkanlar, Hedy 15 marka infüzyon pompası ile paslanmaz çelik nozula beslenmiştir. Elektrosprey oluşumu için nozul ile ısı alıcı arasındaki potansiyel fark, Nanoliz NL-K25 marka yüksek gerilim güç kaynağı ile sağlanmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Figure 1. Schematic representation of the experimental setup

Isı alıcının spray ile temas eden yüzeyi dışında kalan tüm yüzeyleri camyünü ile yalıtılmıştır. Sıcaklık ölçümleri, ısı alıcı üzerinde 4 adet ve ortamda 1 adet olmak üzere toplam 5 adet T tipi termokupl ile yapılmıştır. Termokupllar, ısı alıcının dört kenarının orta noktalarından 5, 10, 15 ve 20 mm derinliklere delikler açılarak

yerleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri kararlı duruma ulaştıktan sonra Novus FieldLogger veri kaydedici ile okunarak bilgisayara aktarılmıştır.

Deney sisteminde kullanılacak soğutucu akışkanlar olan metanol ve suyun termofiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Akışkanların termofiziksel özellikleri
Table 1. Thermophysical properties of the fluids

Termofiziksel Özellikler	Metanol	Su
Yoğunluk (kg/m ³)	791	1000
Isıl iletkenlik (W/mK)	0,202	0,606
Özgül ısı kapasitesi (kJ/kgK)	2,51	4,18
Yüzey gerilimi (mN/m)	22,1	71,9
Gizli ısı (kJ/kg)	1100	2442
Viskozite (mPas)	0,59	0,89
Kaynama noktası (°C)	64,7	100

Isı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları Denklem 1’ de gösterilmiştir.

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

$Q_{taş}$ ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen taşınım miktarını, Q_{buh} buharlaşmayla meydana gelen ısı transfer miktarı, Q_{rad} radyasyonla meydana gelen ısı transfer miktarını ve $Q_{kayıp}$ kaybedilen ısı miktarını ifade etmektedir. Yüzeyden radyasyonla gerçekleşen ısı transferi toplam ısı transferinin yaklaşık %1’ini oluşturmaktadır. Bunun sebebi ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyin oldukça düşük olmasıdır. Ayrıca ısı alıcının spray teması olmayan bütün yüzeyleri izole edildiğinden gerçekleşen kayıp miktarı toplam ısı transferi miktarının yaklaşık %3’ünü oluşturmaktadır. Bu nedenle Q_{rad} ve $Q_{kayıp}$ ihmal edilebilir. Ayrıca kayıpların oldukça düşük olduğu göz önüne alındığında silikon ısıtıcıda üretilen enerji miktarının tamamı ısı alıcıya geçtiği söylenebilir. Böylece Isı transfer denklemi Denklem 2’ye dönüşür.

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

V ve I sırasıyla DC güç kaynağından ayarlanan voltaj ve akım değeridir.

Isı taşınım katsayısı (h);

$$h = \frac{Q_{top}}{A_y(T_y - T_{\infty})} \quad (3)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Burada T_y ısı alıcı yüzeyin ortalama sıcaklığını, T_{∞} ise ortam sıcaklığını ifade etmektedir.

Isı alıcı yüzeyinden elde edilen sıcaklık değerlerinin ortalaması ile ortam sıcaklığının farkı ΔT ile ifade edilmiştir.

Isı taşınım katsayısı için sistemin belirsizliği denklem 4 ile hesaplanmıştır (Holman, 2012).

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4)$$

Denklem 4’te 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. Isı taşınım katsayısı için deneysel belirsizlik %0,83 olarak belirlenmiştir.

2.1. Deney Tasarımı

Bu çalışmada, ısı alıcı üzerinde elektrosprey soğutma ile optimum çalışma koşullarının belirlenmesi amacıyla deneyler üç farklı akışkan, üç farklı debi ve üç farklı voltaj düzeyi için yürütülmüştür. Üç seviyeli ve üç parametrelili bu

deneyler için belirlenen parametre değerleri Tablo 2’de sunulmaktadır. Burada “akışkan”, elektrosprey soğutmada kullanılan soğutucu akışkanın türünü, “debi” soğutucu akışkanın debisini, “voltaj” ise atomizasyonun gerçekleşmesi için nozula uygulanan gerilim değerini ifade etmektedir.

Isı alıcısının soğutulmasında en düşük ΔT değerini sağlayan parametre kombinasyonlarını ortaya koymak amacıyla, Taguchi yöntemine göre $L9(3^3)$ ortogonal dizisi kullanılarak oluşturulan deney planı Tablo 3’te verilmiştir. Deney tasarımı ve verilerin istatistiksel analizi Minitab 18 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Deney tasarım parametreleri ve seviye değerleri

Table 2. Experimental design parameters and level values

Deney Parametreleri	Seviyeler		
	Düşük	Orta	Yüksek
Akışkan türü	%100 metanol	%90 metanol+%10 su	%80 metanol+%20 su
Debi (ml/h)	20	30	40
Voltaj (kV)	7	10	13

Tablo 3. $L9(3^3)$ ortogonal dizisine göre Taguchi yöntemi ile gerçekleştirilen deney tasarımı

Table 3. Experimental design conducted using the Taguchi method based on the $L9(3^3)$ orthogonal series

Deney No	Akışkan Türü	Debi (ml/h)	Voltaj (kV)	ΔT (°C)
1	%100 metanol	20	7	46,13
2	%100 metanol	30	10	41,20
3	%100 metanol	40	13	35,09
4	%90 metanol+%10 su	20	10	41,09
5	%90 metanol+%10 su	30	13	34,65
6	%90 metanol+%10 su	40	7	35,08
7	%80 metanol+%20 su	20	13	37,59
8	%80 metanol+%20 su	30	7	34,87
9	%80 metanol+%20 su	40	10	32,54

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, ısı alıcı üzerinde elektrosprey soğutma için optimum çalışma koşullarının belirlenmesinde, ΔT ve ısı taşınım katsayısının analizine yönelik olarak Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Taguchi yaklaşımı, deney sayısını azaltarak en uygun parametre ve seviye kombinasyonlarını belirlemeye imkân tanıyan sayısal bir optimizasyon tekniğidir.

Bu kapsamda, $L9(3^3)$ ortogonal dizisine göre oluşturulan deney planına göre gerçekleştirilen 9 deney sonucunda elde edilen ΔT değerleri Tablo 3’te sunulmuştur. Parametrelerin etkinliğini ortaya koymak amacıyla varyans analizi (ANOVA) yapılmış olup, analiz sonucunda elde

edilen modele ilişkin özet bilgiler Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Model özeti

Table 4. Model summary

R-Sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
%95,03	%92,05	%84,51

Tablo 4 incelendiğinde, yürütülen deneyler sonucunda elde edilen modelin istatistiksel açıdan oldukça iyi bir uyum sergilediği görülmektedir. Determinasyon katsayısının R^2 =%95,03 olması, ölçülen değerlerin büyük bir bölümünün kurulan regresyon modeliyle temsil edilebildiğine işaret etmektedir. Düzeltilmiş determinasyon katsayısı (R^2 adj=%92,05) ise modelde yer alan faktör sayısını da hesaba katarak, ifadenin gereğinden

fazla karmaşıklıktan veriye başarılı şekilde açıkladığını göstermektedir. Bununla birlikte, tahminsel determinasyon katsayısının ($R^2_{\text{pred}}=0,8451$) yüksek çıkması, modelin yalnızca analizde kullanılan veri kümesi için değil, ileride elde edilebilecek yeni veriler üzerinde de güvenilir tahminler yapabileceğini ortaya koymaktadır.

Dolayısıyla, Taguchi deney tasarımıyla dayalı olarak oluşturulan modelin hem veri uyumu hem de öngörü yeteneği bakımından istatistiksel olarak

güçlü ve kullanılabilir olduğu söylenebilir. ΔT üzerinde etkili olduğu belirlenen parametreler ise ayrıntılı biçimde varyans analizi tablosunda verilmiştir (Tablo 5).

Yapılan varyans analizi sonuçları, kurulan modelin istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir. Toplam varyansın %95,03'lük kısmının regresyon modeliyle açıklanması ve yalnızca %4,97'sinin hata terimine karşılık gelmesi, modelin deneysel veriyi oldukça iyi temsil ettiğine işaret etmektedir.

Tablo 5. ΔT için varyans analiz tablosu

Table 5. Analysis of variance table for ΔT

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	3	144,738	%95,03	144,738	48,246	31,87	0,001
Akışkan	1	50,576	%33,21	50,576	50,576	33,41	0,002
Debi	1	81,402	%53,45	81,402	81,402	53,77	0,001
Voltaaj	1	12,760	%8,38	12,760	12,760	8,43	0,034
Hata	5	7,570	%4,97	7,570	1,514		
Toplam	8	152,308	%100,00				

Faktör bazında değerlendirildiğinde, akışkan türü (%33,21 katkı, $p<0,05$) ile debinin (%53,45 katkı, $p<0,05$) çıktığı etkileyen en güçlü parametreler olduğu görülmektedir. Bu iki faktöre ait F istatistiklerinin (33,41 ve 53,77) yüksek olması, ΔT üzerindeki belirgin etkilerini desteklemektedir. Buna karşın, voltaajın modele katkısı %8,38 düzeyinde kalmış ve $p=0,034$ değeriyle istatistiksel olarak anlamlı bir etki göstermemiştir. Sonuç olarak, Taguchi yaklaşımı ile elde edilen model sistem davranışını güvenilir biçimde yansıtmış; özellikle debi ve akışkan tipinin performans üzerinde belirleyici rol oynadığı ortaya çıkmıştır. Yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen bağıntı Denklem 5'te verilmiştir.

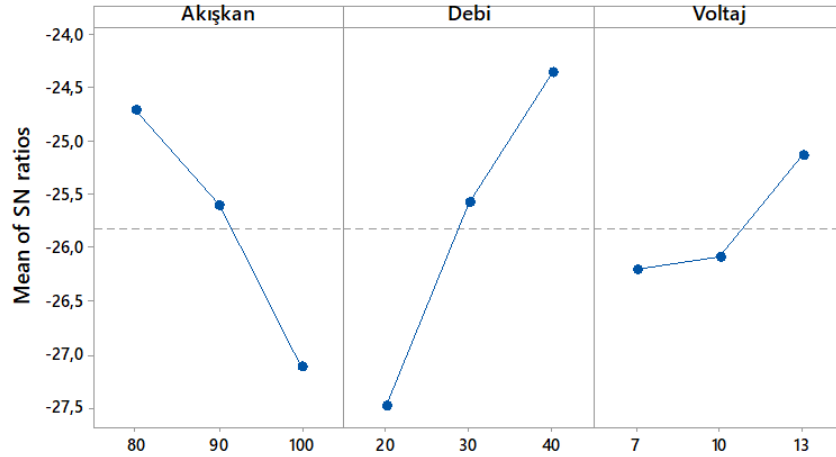
$$\Delta T = 9,70 + 0,2903 \times \text{Akışkan} - 0,3683 \times \text{Debi} - 0,486 \times \text{Voltaaj} \quad (5)$$

Şekil 2'de verilen S/N oranları için ana etki grafiği, Taguchi yaklaşımı kapsamında kullanılan "smaller-is-better" kriterine göre, ΔT 'nin en düşük ve aynı zamanda değişkenliğe en az duyarlı

olduğu parametre seviyelerini ortaya koymaktadır. Bu kriter altında, S/N oranının daha yüksek olması hem ortalama ΔT 'nin hem de optimizasyonun azaldığını, dolayısıyla daha kararlı ve üstün bir ısı performans elde edildiğini göstermektedir.

Akışkan sütunu incelendiğinde, S/N oranının %80 metanol içeriğinde en yüksek, %100 metanolde ise en düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, %80 metanol-%20 su karışımının hem ortalama sıcaklık farkını azaltma hem de gürültü faktörlerine karşı daha kararlı bir soğutma davranışı sergilemesi açısından en uygun akışkan bileşimi olduğunu ortaya koymaktadır.

Debi için ana etki eğrisi, faktörler arasında en belirgin eğime sahip olup, debinin 20 ml/h'den 40 ml/h'ye artırılmasıyla S/N oranının belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Bu sonuç, debinin ΔT üzerinde birincil derecede etkili parametre olduğunu ve 40 ml/h seviyesinin hem daha düşük sıcaklık farkı hem de daha yüksek kararlılık sağladığını göstermektedir.



Şekil 2. ΔT için ana etki grafiği
Figure 2. Main effect plot for ΔT

Voltaj için ise eğim diğer faktörlere göre daha sınırlı olmakla birlikte, S/N oranı 13 kV seviyesinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu bulgu, gerilimin etkisinin görece daha zayıf olduğunu, ancak 13 kV seviyesinin “smaller-is-better” kriteri açısından tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.

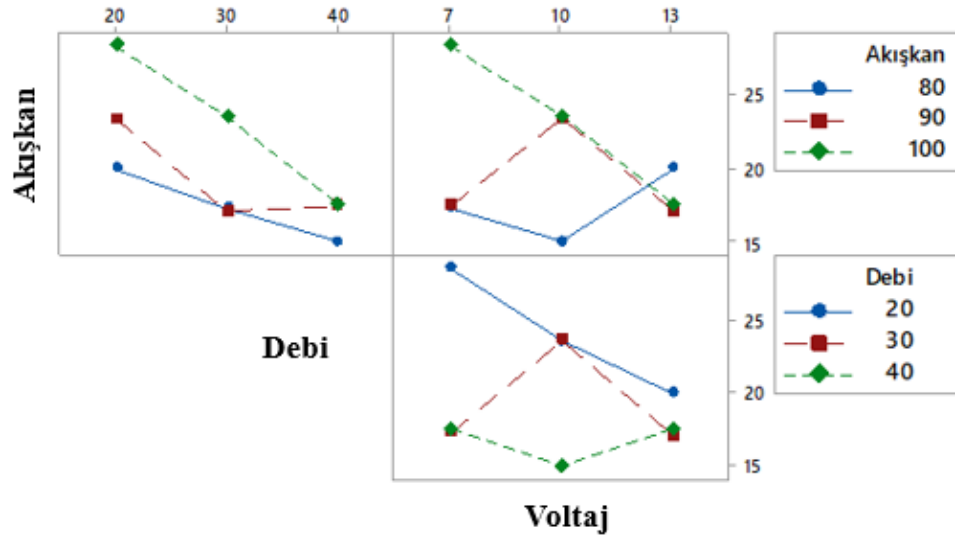
Genel olarak grafik, en uygun parametre kombinasyonunun %80 metanol–%20 su karışımı, 40 ml/h debi ve 13 kV gerilim olduğunu; ayrıca ana etki eğimlerinin büyüklüğüne göre faktör önem sırasının debi > akışkan türü > voltaj şeklinde olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, ANOVA ve regresyon analizinden elde edilen bulgularla da tutarlı olup, elektrosprey soğutma sisteminde debi ve akışkan bileşiminin ısı performansın optimizasyonunda kritik rol oynadığını göstermektedir.

Elde edilen bu bulgulara %80 metanol–%20 su karışımının en iyi performansı göstermesi, suyun yüksek buharlaşma entalpisinin soğutma kapasitesini artırması ile metanolün düşük yüzey geriliminin atomizasyonu kolaylaştırması arasındaki optimum dengenin bu oranda sağlanmasına bağlanabilir. Saf suya kıyasla metanol eklenmesi yüzey gerilimini düşürerek daha ince damlacıkların oluşmasını sağlarken, saf metanole kıyasla su eklenmesi taşınan ısı kapasitesini artırmıştır.

Şekil 3’te verilen ΔT için etkileşim grafiği, akışkan türü, debi ve voltaj arasında belirgin

etkileşimler bulunduğunu göstermektedir. Akışkan–debi etkileşimine bakıldığında, tüm akışkan seviyelerinde debinin 20 ml/h’den 40 ml/h’ye artırılmasıyla ΔT ’nin azaldığı, dolayısıyla soğutma performansının iyileştiği görülmektedir. Ancak bu azalma en belirgin şekilde %100 metanol içeren akışkanda ortaya çıkmakta, buna karşın %80 metanol–%20 su karışımı tüm debi seviyelerinde en düşük ΔT değerlerini vermektedir. Çizgilerin paralel olmaması, debi değişiminin etkisinin akışkan bileşimine güçlü biçimde bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Akışkan–voltaj panelinde, voltajın ΔT üzerindeki etkisinin akışkan türüne göre yön değiştirdiği izlenmektedir. Benzer biçimde, debi–voltaj paneli, optimum voltaj seviyesinin debiye göre değiştiğini göstermektedir: 20 ml/h debide voltaj arttıkça ΔT düzenli biçimde azalırken, 30 ml/h debide 10 kV civarında bir maksimum, 40 ml/h debide ise 10 kV civarında minimum ΔT değeri elde edilmektedir. Çizgilerin kesişmesi, voltajın tek başına değil, seçilen debi ve akışkan bileşimi ile değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Genel olarak, etkileşim grafiği; Taguchi analizinden elde edilen sonucu destekler biçimde, ΔT ’nin minimize edilmesinde akışkan tipi ve debinin birincil belirleyici faktörler olduğunu, voltajın ise bu iki parametre ile etkileşim içinde ikincil bir rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 3. ΔT için etkileşim grafiği

Figure 3. Interaction plot for ΔT

Sonuç olarak ana etki grafiği incelendiğinde ΔT 'yi etkileyen faktörler Tablo 6'daki gibidir. Optimum parametre değerlerinde yapılan deneyler sonucu $\Delta T=12,54$ °C olarak belirlenmiş, bu değer karşılığı olarak elde edilen ısı taşınım katsayısı değeri $h=318,98$ W/m²K olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6. Optimum değerler

Table 6. Optimum values

Parametreler	Optimum Değerler
Akışkan	%80 metanol+%20 su
Debi (ml/h)	40
Voltaj (kV)	13

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, elektrosprey soğutma düzeneklerinde ısı performansa etki eden temel değişkenler, Taguchi tabanlı deney tasarımı kullanılarak sistematik biçimde analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, ısı transferini en fazla etkileyen parametrenin debi, ikinci sırada ise akışkan türü olduğunu; gerilimin etkisinin ise görece sınırlı kaldığını göstermektedir. Özellikle metanol-su karışımlarının, saf metanole göre daha yüksek ısı taşınım katsayısı ve daha düşük sıcaklık farkı oluşturduğu saptanmıştır. Optimum koşullar %80 metanol-%20 su karışımı, 40 ml/h hacimsel debi ve 13 kV uygulanan gerilim olarak belirlenmiş; bu kombinasyon altında 318,98 W/m²K büyüklüğünde bir ısı taşınım katsayısına

ulaşmıştır. Bu değer, elektrosprey soğutmanın etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. Diğer yandan, gerilimin ΔT üzerindeki etkisinin akışkan bileşimi ve debiyle birlikte değişkenlik göstermesi, sistemde işleyen akışkan dinamiği süreçlerinin oldukça karmaşık olduğuna işaret etmektedir. Bu nedenle, ileride yapılacak çalışmalarda farklı akışkan formülasyonlarının denenmesi, debi ve gerilim aralıklarının genişletilmesi ve daha gelişmiş sayısal/analitik modelleme yaklaşımlarının kullanılması önerilmektedir.

Yazar Katkısı

Sönmez, F., Öztürk, A.: Metodoloji, Veri toplama, Veri işleme, Literatür taraması, Yazma-İnceleme ve Düzenleme.

Finansman Beyanı

Bu araştırma herhangi bir fon kuruluşundan, ticari veya kâr amacı gütmeyen sektörlerden özel bir hibe almamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Etik Standartlar

Bu çalışma için Etik Kurul Kararı gerekmemektedir.

Kaynaklar

- Aamir, M., Qiang, L., Hong, W., Xun, Z., Wang, J., Sajid, M. (2017). Transient heat transfer performance of stainless steel structured surfaces combined with air-water spray evaporative cooling at high temperature scenarios. *Applied Thermal Engineering*, 115, 418–434. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.126>
- Benther, J.D., Pelaez-Restrepo, J.D., Stanley, C., Rosengarten, G. (2021). Heat transfer during multiple droplet impingement and spray cooling: Review and prospects for enhanced surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 178, 121587. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121587>
- Chapman, J.D., Kottke, P.A., Fedorov, A.G. (2019). Enhanced thin film evaporation via impinging electrospray liquid jets with entrained air streaming. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.049>
- Deng, W., Gomez, A. (2011). Electrospray cooling for microelectronics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(11–12), 2270–2275. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.038>
- Ebikabowei, E., Sayuti, M., Ab, B., Nazri, N., Nik, B. (2025). Hybrid optimisation of mixed-axial flow pump impellers parameter using Taguchi, genetic algorithms, and artificial neural networks. *Next Research*, 2(4), 100928. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100928>
- Feng, X., Bryan, J.E. (2008). Application of Electrohydrodynamic Atomization to Two-Phase Impingement Heat Transfer. *Journal Heat Transfer*, 130(7), 750–755.
- Gan, Y., Chen, N., Zheng, X., Shi, D., Jiang, Z., Song, S., Shi, Y. (2022). Electric field and spraying characteristics of electrospray using concave ground electrode. *Journal of Electrostatics*, 115, 103662. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103662>
- Gaskell, S.J. (1997). Electrospray: Principles and practice. *Journal of Mass Spectrometry*, 32(7), 677–688.
- Hisam, M.W., Dar, A.A., Elrasheed, M.O., Khan, M.S., Gera, R., Azad, I. (2024). The versatility of the taguchi method: Optimizing experiments across diverse disciplines. *Journal of Statistical Theory and Applications*, 23(4), 365–389. <https://doi.org/10.1007/s44199-024-00093-9>
- Holman, J.P. (2012). *Experimental Methods for Engineers*. McGraw Hill (8 th). New York.
- Jaworek, A., Krupa, A. (1999). Classification of the modes of EHD spraying. *Journal of Aerosol Science*, 30(7), 873–893.
- Kabakuş, A., Öztürk, A., Sönmez, F. (2024a). A new approach to cooling photovoltaic panels: Electrospray cooling. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64, 105545. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105545>
- Kabakuş, A., Sönmez, F., Öztürk, A. (2024b). Thermal analysis of photovoltaic panel cooled by electrospray using different fluids. *Düzce University Journal of Science & Technology*, 12, 2271–2282. <https://doi.org/10.29130/dubited.1492678>
- Taheri, V., Ebrahimi Rahnama, H., Morad, M.R. (2024). High flow rate electrospray cooling performance of water–ethanol mixtures. *Applied Thermal Engineering*, 239, 122200. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122200>
- Tian, J., He, C., Chen, Y., Wang, Z., Zuo, Z., Wang, J., Xiong, J. (2024). Experimental study on combined heat transfer enhancement due to macro-structured surface and electric field during electrospray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 220, 125015. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125015>
- Wan, H., Liu, P.J., Qin, F., Wei, X.G., Li, W.Q. (2023). Electrospray cooling characteristics in cone-jet and multi-jet modes. *International Journal of Thermal Sciences*, 188, 108240. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108240>
- 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>
- Yakut, R. (2025). Determining the cooling performance of the optimized nozzle electrospray cooling system with uniquely designed lattice heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 215, 109972. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.109972>