



**ISI ALICILARDA ELEKTROSPREY SOĞUTMA
ANALİZİ**

Abdüssamed KABAKUŞ

Danışman: Prof. Dr. Kenan YAKUT

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2021

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ISI ALICILARDA ELEKTROSPREY SOĞUTMA ANALİZİ
(Electrospray Cooling Analysis of Heat Sinks)

DOKTORA TEZİ

Abdüssamed KABAKUŞ

Danışman: Prof. Dr. Kenan YAKUT

Erzurum
Ağustos, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Abdüssamed KABAKUŞ tarafından hazırlanan “Isı Alıcılarda Elektrosprey Soğutma Analizi” başlıklı çalışması 20/08/2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Enerji Bilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. M. Akif CEVİZ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Kenan YAKUT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Kadir BAKIRCI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Taner TEKİN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Bayram ŞAHİN <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından FBA-2018-6965 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Kenan YAKUT* danışmanlığında sunulan “Isı Alıcılarda Elektrosprey Soğutma Analizi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	8	30
Kuramsal Temeller	16	30
Materyal ve Yöntem	3	35
Bulgular	0	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Abdüssamed KABAKUŞ	Prof. Dr. Kenan YAKUT
16.9.2021	16.9.2021
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

Not: Bu form, Tezin son şekline uygun olarak bilgisayar ortamında doldurulmalı, çıktısı imzalanıp Tezin sonuna eklenmelidir.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalıőması sűresince gűrűő ve dűőőnceleriyle desteklerini esirgemeyen saygıdeęer danıőman hocam Sayın Prof. Dr. Kenan YAKUT'a teőekkűr ve saygılarımı sunarım.

Tez izleme jűrimin deęerli űyeleri Sayın Prof. Dr. Kadir BAKIRCI ve Sayın Prof. Dr. Taner TEKİN'e de tez çalıőmama deęerli gűrűőleriyle sundukları katkılardan dolayı teőekkűr ederim.

Doktora tez çalıőmamda FBA-2018-6965 numaralı proje ile saęladıkları ekonomik desteklerden dolayı Atatűrk Ŭniversitesi Bilimsel Araőtırma Projeleri Koordinasyon Birimi' ne teőekkűrlerimi sunarım.

Tez yazım aőamasında destek ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Őęr. Ŭyesi Ahmet Numan ŐZAKIN'a, Őęr. Gűr. Dr. Rıdvan YAKUT'a ve Arő. Gűr. Burak HŬLAGŬ'ye teőekkűrű bir borç bilirim.

Sadece tezimin hazırlanma aőamasında deęil hayatımın her dűneminde hep yanımda olup desteklerini esirgemeyen eőim Yasemin' e, oęlum Őmer' e, aileme ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan deęerli dostlarıma sevgi ve űűkranlarımı sunarım.

Abdűssamed KABAKUŐ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ISI ALICILARDA ELEKTROSPREY SOĞUTMA ANALİZİ

Abdüssamed KABAKUŞ

Danışman: Prof. Dr. Kenan YAKUT

Amaç: Mikro işlemciler, elektromekanik sistemler ve devre elemanlarının soğutulması, ekonomik ömürlerini uzatmak ve performanslarını artırmak için hayati öneme sahiptir. Elektrosprey soğutma metodu, kolay kullanıma sahip oluşu, sprej damlacıklarının yönetilebilir oluşu, düşük debilerde etkin soğutma sağlaması sebebiyle kullanışlı bir yöntemdir. Bu çalışmada işlemcilerin optimum çalışma sıcaklık aralığında (45-100°C) termal yönetiminin sağlanabilmesi için elektrosprey soğutma deney düzeneği kurulmuştur. Deney şartları tam buharlaşma meydana gelecek şekilde belirlenmiştir. Elektrosprey soğutmada kanatçık etkisinin ve optimum ısı alıcı geometrisinin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmıştır. Ayrıca farklı akışkanların, nozul çapının ve nozul sayısının elektrosprey soğutma performansına etkileri araştırılmıştır. Geleneksel sprej soğutma ANSYS Fluent ile modellenerek elektrosprey soğutma ile karşılaştırılmıştır.

Yöntem: Bu amaçlar doğrultusunda kurulan elektrosprey deney düzeneği ile farklı debilerde (0,1-0,2-0,3-0,7 ml/dk), nozul çaplarında (20-25-30 G), nozul sayısında (tekli ve çiftli nozul), gerilimlerde (3,4-4,4-5,4-8 kV), akışkanlarla (aseton-etanol-su) elektrosprey oluşumu sağlanarak tasarımı yapılan 27 adet ısı alıcı ile deneyler yapılmıştır. Sprej karakteristiklerinin belirlenebilmesi için sprej görüntüleri alınarak elektrosprey modları belirlenmiştir.

Bulgular: Optimum çalışma sıcaklığını sağlayan ısı akılarında, tasarlanan 27 adet ısı alıcı ile yapılan deneyler sonucu en etkin soğutmanın 3 mm kanat yüksekliği, 3 mm kanat genişliği ve 3 mm kanatlar arası mesafeye sahip olan Kare-18 ısı alıcıda gerçekleştiği belirlenmiştir. Kare-18 ısı alıcı üzerinde yapılan deneylerde tekli nozulla oluşturulan sprejin, çiftli nozulla oluşturulan spreje göre daha etkin soğutma sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca nozul çapı azaldıkça soğutma performansının iyileştiği görülmüştür. 0,2 ml/dk debi, 4,4 kV gerilim, 20 G nozul çapı ve 20 mm nozul- ısı alıcı mesafenin optimum çalışma sıcaklığını yakalamada yeterli olduğu belirlenmiştir. Gerilimin ve akışkan debisinin artışının soğutma üzerine olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç: Aynı şartlarda düzlem plakaya göre optimum kanatçıklı ısı alıcıda (Kare-18) kanatçık iyileştirme oranı %15 artmıştır. Tekli ve çiftli nozullarda en etkili soğutma 30 G nozul çapında elde edilmiştir. Soğutucu akışkanın buharlaşma sıcaklığı, yüzey gerilimi, dielektrik sabitinin yanı sıra buharlaşma entalpisininde oldukça etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Etanol ve asetonun tam buharlaşma gerçekleşen düşük ısı akılarında etkili olduğu, suyun tam buharlaşma gerçekleşen yüksek ısı akılarında aseton ve etanolden daha iyi soğutma performansı gösterdiği belirlenmiştir. Aynı şartlarda elektrosprey soğutma, geleneksel sprej soğutmaya göre yaklaşık %15 daha iyi performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sprej soğutma, elektrosprey, ısı transferi, kanatçık iyileştirme oranı, ısı alıcı

Ağustos 2021, 114 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

ELECTROSPRAY COOLING ANALYSIS OF HEAT SINKS

Abdüssamed KABAKUŞ

Supervisor: Prof. Dr. Kenan YAKUT

Purpose: Cooling of microprocessors, electromechanical systems and circuit components is of vital importance to extend their economic life and increase their performance. The electro spray cooling method is a useful method because it is easy to use, spray droplets are manageable, and it provides effective cooling at low flow rates. In this study, an electro spray cooling experimental system was established to ensure the thermal management of the processors in the optimum operating temperature range (45-100°C). The experimental conditions were determined in such a way that full evaporation occurs. In electro spray cooling, experiments were carried out to determine the fin effect and optimum heat sink geometry. In addition, the effects of different fluids, nozzle diameter and number of nozzles on electro spray cooling performance were investigated. Traditional spray cooling was modeled with ANSYS Fluent and compared with electro spray cooling.

Method: With the electro spray experiment setup established for these purposes, electro spray was created at different flow rates (0,1-0,2-0,3 ml/min), nozzle diameters (20-25-30 G), number of nozzles (single and double nozzles), fluids (ethanol, acetone, water), voltages (4,4 kV and 8 kV) and experiments were carried out with 27 designed heat sinks. In order to see the effect of spray formation on cooling, spray images were taken and electro spray modes were determined.

Findings: As a result of the experiments carried out with 27 heat sinks designed for the heat fluxes that provide the optimum working temperature, it was determined that the most effective cooling took place in the Square-18 heat sink, which has a 3 mm fin height, 3 mm fin width and 3 mm fin distance. As a result of the experiments carried out on the Square-18 heat sink, it was determined that the spray created with a single nozzle provided more effective cooling than the spray created with a double nozzle. It was also seen that as the nozzle diameter decreased, the cooling performance improved. It was determined that 0,2 ml/min flow rate, 4,4 kV voltage, 20 G nozzle diameter and 20 mm nozzle-heat sink distance were sufficient to achieve the optimum operating temperature. It has been observed that the increase in voltage and fluid flow rate has positive effects on cooling.

Results: Under the same conditions, the fin enhancement ratio increased by 15% in the optimum finned heat sink (Square-18) compared to the plane plate. The most effective cooling in single and double nozzles was achieved with a nozzle diameter of 30 G. It was seen that the evaporation enthalpy of the refrigerant, together with the refrigerant temperature, surface tension, and dielectric constant, is a highly effective parameter. It was determined that ethanol and acetone were effective in low heat fluxes where full evaporation occurred, and water showed better cooling performance than acetone and ethanol at high heat fluxes where complete evaporation occurred. Under the same conditions, electro spray cooling performed about 10% better than conventional spray cooling.

Keywords: Spray cooling, electro spray, heat transfer, fin enhancement ratio, heat sink

August 2021, 114 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Elektrosprey Nedir?	4
Elektrosprey Modları	5
Damlama modu	6
Mikro damlama modu	6
İğ modu	7
Çoklu iğ modu.....	7
Salınımlı jet modu	8
Yalpalama modu	9
Koni jet modu.....	9
Multi jet modu.....	10
Dallanmış jet modu	11
Sprey Soğutma	11
Sprey soğutmada ısı transfer mekanizmaları	12
Tek fazlı rejimde ısı transfer mekanizmaları	13
İki fazlı rejimde ısı transfer mekanizmaları	14
Kritik ısı akısı.....	15
Isı transfer mekanizmaları.....	15
Isı iletimi	15
Isı taşınımı.....	16
Isı ışıması.....	17
Elektrosprey literatür özetleri.....	17
Sprey Soğutma Literatür Özetleri	24

MATERYAL VE METOT	28
Deney Düzenegi	28
Vakum Pompası	29
Sprey odası	30
Şırınga pompası.....	30
Statik elektrik yükleyici	31
Silikon Isıtıcılar	32
DC güç kaynağı.....	32
Veri kaydedici	33
Nozullar.....	34
Soğutucu Akışkanlar	35
Kamera	36
Isı Transfer Deneylein Yapılış Aşamaları	36
Sprey Görüntüleme Aşamaları	37
Isı Transfer Analizi	38
Belirsizlik Analizi	40
Isı Alıcıların Tasarımı	41
Tam Faktoriyel Metodu.....	42
Sayısal Analiz.....	43
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	46
Optimum Isı Alıcı Geometrisinin Belirlenmesi	46
Optimum Isı Alıcı İçin Elektrosprey Soğutma Parametrelerinin Analizi	68
Elektrosprey Soğutma İle Geleneksel Sprey Soğutma Performansının Karşılaştırılması	83
SONUÇ.....	89
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ.....	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Elektrosprey oluşumu	4
Şekil 2. Nozula uygulanan elektrik alan kuvvetinin değişimiyle elde edilen çeşitli elektrosprey modları.....	5
Şekil 3. Damlama modu	6
Şekil 4. Mikro damlama modu	6
Şekil 5. Elektrosprey modları: (a) Damlama modu; (b) Mikro damlama modu; (c) İğ modu ...	7
Şekil 6. Çoklu iğ modu.....	8
Şekil 7. Salınlımlı jet modu.....	8
Şekil 8. Yalpalama modu	9
Şekil 9. Koni jet modu.....	10
Şekil 10. (a) Koni jet modu; (b) Multi jet modu	11
Şekil 11. (a) Kesikli koni jet ; (b) Yalpalama modu; (c) Koni jet modu; (d) Dallanmış jet modu.....	11
Şekil 12. Farklı soğutma yöntemleri için ısı transfer katsayısının karşılaştırılması.....	12
Şekil 13. Sprey soğutma eğrisi	13
Şekil 14. Yüzey çekirdeklenme kabarcıklarının büyümesi ve ayrılması	15
Şekil 15. İkincil çekirdeklenme kabarcıklarının oluşumu.....	15
Şekil 16. Deney düzeneği.....	28
Şekil 17. Deney düzeneği şematik görünümü	29
Şekil 18. Vakum Pompası	29
Şekil 19. Sprey odası.....	30
Şekil 20. Şırınga pompası.....	31
Şekil 21. Statik elektrik yükleyici	31
Şekil 22. Silikon ısıtıcı	32
Şekil 23. DC güç kaynağı.....	33
Şekil 24. Veri kaydedici	34
Şekil 25. Tekli ve çiftli nozullar	35
Şekil 26. Görüntüleme kullanılan kamera ve lens	36
Şekil 27. Elektrosprey görüntüleme	38
Şekil 28. Isı alıcıda gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları	38
Şekil 29. Tasarımı yapılan ısı alıcılar	41
Şekil 30. Tasarımı yapılan ısı alıcı geometrileri.....	41
Şekil 31. Ansys Workbench arayüzü	44

Şekil 32. Kontrol hacmi mesh görüntüsü	44
Şekil 33. Kontrol hacmi mesh kesiti	44
Şekil 34. Farklı geometrilerdeki ısı alıcılardaki sıcaklık farkı-ısı akısı grafiği.....	46
Şekil 35. KİO-sıcaklık farkı değişim grafiği	47
Şekil 36. Kare-1/2/3 ısı alıcıların geometrik özellikleri	48
Şekil 37. Kare-4/5/6 ısı alıcıların geometrik özellikleri	48
Şekil 38. Kare-7/8/9 ısı alıcıların geometrik özellikleri	48
Şekil 39. Kare-10/11/12 ısı alıcıların geometrik özellikleri	49
Şekil 40. Kare-13/14/15 ısı alıcıların geometrik özellikleri	49
Şekil 41. Kare-16/17/18 ısı alıcıların geometrik özellikleri	49
Şekil 42. Kare-19/20/21 ısı alıcıların geometrik özellikleri	50
Şekil 43. Kare-22/23/24 ısı alıcıların geometrik özellikleri	50
Şekil 44. Kare-25/26/27 ısı alıcıların geometrik özellikleri	50
Şekil 45. Üretimi yapılan 5 mm kanat genişliğindeki ısı alıcılar	51
Şekil 46. Üretimi yapılan 4 mm kanat genişliğindeki ısı alıcılar	51
Şekil 47. Üretimi yapılan 3 mm kanat genişliğindeki ısı alıcılar	52
Şekil 48. Kare-1/2/3 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği	53
Şekil 49. Kare-1/2/3 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği.....	53
Şekil 50. Kare-4/5/6 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği	54
Şekil 51. Kare-4/5/6 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği.....	55
Şekil 52. Kare-7/8/9 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği	55
Şekil 53. Kare-7/8/9 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği.....	56
Şekil 54. Kare-10/11/12 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği	56
Şekil 55. Kare-10/11/12 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği.....	57
Şekil 56. Kare-13/14/15 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği	58
Şekil 57. Kare-13/14/15 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği.....	58
Şekil 58. Kare-16/17/18 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği	59
Şekil 59. Kare-16/17/18 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği.....	59
Şekil 60. Kare-19/20/21 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği	60
Şekil 61. Kare-19/20/21 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği.....	61
Şekil 62. Kare-22/23/24 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği	61
Şekil 63. Kare-22/23/24 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği.....	62
Şekil 64. Kare-25/26/27 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği	63
Şekil 65. Kare-25/26/27 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği.....	63
Şekil 66. Parametre etkilerinin pareto grafiği	65

Şekil 67. KİO için kalıntı grafikleri.....	66
Şekil 68. (a) Kare-16, (b) Kare-17, (c) Kare-18 ısı alıcılarda elektrosprey oluşumu.....	67
Şekil 69. Kare-18 ısı alıcıda farklı gerilimler için soğutma grafiği	68
Şekil 70. Kare-18 ısı alıcı için gerilim- W_{eE} değişim grafiği.....	69
Şekil 71. Kare-18 ısı alıcıda (a) 3.4 kV, (b-c) 4.4 kV, (d) 5.4 kV gerilimleri için elektrosprey oluşumu	69
Şekil 72. Kare-18 ısı alıcıda farklı debiler için soğutma grafiği	70
Şekil 73. Kare-18 ısı alıcı için debi- W_e değişim grafiği.....	70
Şekil 74. Kare-18 ısı alıcıda (a-b) 0.1 ml/dk, (c-d) 0.2 ml/dk, (e-f) 0.3 ml/dk debileri için elektrosprey oluşumu	71
Şekil 75. Kare-18 ısı alıcıda etanol için tekli nozul ile farklı nozul çaplarında soğutma grafiği	72
Şekil 76. Kare-18 ısı alıcıda etanol için tekli nozul ile (a) 20 G, (b) 25G, (c-d) 30 G nozul çapları için elektrosprey oluşumu	73
Şekil 77. Kare-18 ısı alıcıda etanol için çiftli nozul ile farklı nozul çaplarında soğutma grafiği.....	73
Şekil 78. Kare-18 ısı alıcıda etanol için çiftli nozul ile (a) 20 G, (b) 25G, (c) 30 G nozul çapları için elektrosprey oluşumu	74
Şekil 79. Kare-18 ısı alıcıda etanol için tekli ve çiftli nozul Weber Sayısı-nozul çapı değişim grafiği	75
Şekil 80. Kare-18 ısı alıcıda aseton için tekli nozul ile farklı nozul çaplarında soğutma grafiği.....	75
Şekil 81. Kare-18 ısı alıcıda aseton için tekli nozul ile (a) 20 G, (b-c) 25G, (d) 30 G nozul çapları için elektrosprey oluşumu	76
Şekil 82. Kare-18 ısı alıcıda aseton için tekli ve çiftli nozul Weber Sayısı-nozul çapı değişim grafiği	77
Şekil 83. Kare-18 ısı alıcıda aseton için çiftli nozul ile farklı nozul çaplarında soğutma grafiği.....	77
Şekil 84. Kare-18 ısı alıcıda aseton için çiftli nozul ile (a) 20 G, (b) 25G, (c) 30 G nozul çapları için elektrosprey oluşumu	78
Şekil 85. Kare-18 ısı alıcıda 0.1 ml/dk debide soğutucu akışkanların sıcaklık farkı ısı akısı grafiği	79
Şekil 86. Kare-18 ısı alıcıda 0,1 ml/dk debide (a) su, (b) aseton, (c) etanol için elektrosprey oluşumu.....	80
Şekil 87. Kare-18 ısı alıcıda doğal taşınım ve elektrosprey soğutma ile soğutma grafiği	81

Şekil 88. Kare-18 ısı alıcıda farklı tip akışkanlarda aynı soğutmayı elde etmek için kullanılan debiler.....	82
Şekil 89. Kare-18 ısı alıcıda aynı soğutma için kullanılan (a) 0,1 ml/dk su, (b) 0,3 ml/dk etanol, (c) 0,7 ml/dk aseton için elektrosprey oluşumu	82
Şekil 90. Geleneksel sprejde hava ve etanolün oluşturduğu akım çizgileri	84
Şekil 91. Nozul çıkışında geleneksel sprej oluşumu	84
Şekil 92. Geleneksel sprej hız konturleri.....	85
Şekil 93. 3,2 kW/m ² ısı akısında ısı alıcı yüzeyinde oluşan sıcaklık konturleri.....	86
Şekil 94. 2,59 kW/m ² ısı akısında ısı alıcı yüzeyinde oluşan sıcaklık konturleri.....	86
Şekil 95. 1,88 kW/m ² ısı akısında ısı alıcı yüzeyinde oluşan sıcaklık konturleri.....	87
Şekil 96. Düzlem plaka için elektrosprej ve geleneksel sprej soğutma grafiği	87
Şekil 97. Düzlem plaka için elektrosprej ve geleneksel sprej ısı taşınım katsayısı değişim grafiği	88

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Çeşitli Maddelerin Isı İletim Katsayıları	16
Tablo 2. Çeşitli Maddelerin Isı Taşınım Katsayıları.....	16
Tablo 3. Elektrosprey Soğutma Genel Literatür Tablosu	23
Tablo 4. Soğutma Yöntemleriyle Elde Edilen Isı Transfer Katsayıları ve En Yüksek Isı Akıları	25
Tablo 5. Soğutma Yöntemlerinin Akış Debilerinin Karşılaştırılması	27
Tablo 6. Statik Elektrik Yükleyici Teknik Özellikleri.....	32
Tablo 7. DC Güç Kaynağı Teknik Özellikleri	33
Tablo 8. Veri Kaydedici Teknik Özellikleri	34
Tablo 9. Tekli ve Çiftli Nozulların Ölçüleri	35
Tablo 10. Soğutucu Akışkanların Fiziksel Özellikleri.....	36
Tablo 11. Kullanılan Cihazların Hassasiyeti ve Belirsizliği.....	41
Tablo 12. Tasarlanan Isı Alıcı Ölçüleri	42
Tablo 13. Kanatçık İyileştirme Oranı İçin Varyans Analizi Tablosu	64
Tablo 14. Kanatçık İyileştirme Oranı İçin Model Özeti	65
Tablo 15. Soğutucu Akışkanların Buharlaşma Entalpileri	80

GİRİŞ

Günümüzde teknolojik gelişmeler sonucu yaygın olarak kullanılan yüksek ısı akısı üreten mikro işlemcilerin, elektromekanik sistemlerin ve devre elemanlarının yüksek ısı akılarında çalışması sonucu oluşan sıcaklık artışının giderilmesi büyük önem arz etmektedir. Yüksek ısı akısına maruz kalan bu sistemlerin eklem sıcaklıkları artmakta, kullanıldığı cihazın performansını düşürmekte, ömrünü kısaltmaktadır. Yüksek ısı akısına sahip sistemlerin sıcaklıklarını optimum seviyede kontrol altında tutabilmek için farklı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Çarpan hava jeti ile soğutma (Kabakuş 2012), sıvı jeti ile soğutma (Baghel *et al.* 2020), mikro kanallarla soğutma (Manay vd 2012), mikro pompalarla soğutma (Singhal and Garimella 2007) ve sprej soğutma (Bostancı *et al.* 2009) yüksek ısı akısı gidermede kullanılan yöntemlerden bazılarıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda sprej soğutmanın yüksek ısı akılı sistemlerde ısıyı uzaklaştırabilmek için oldukça etkin bir yöntem olduğu görülmektedir (Glassman 2005).

Sprej soğutma diğer soğutma yöntemleriyle kıyaslandığında yüksek ısı akısı üreten sistemlerde daha avantajlı olmasına rağmen kendi içerisinde bir takım dezavantajlara sahiptir. Wang and Mamishev (2012b) çalışmalarında yüksek ısı akılı sistemlerde spreyle soğutmanın diğer yöntemlere göre üstün yönleri bulunduğunu, ancak geleneksel sprej soğutma teknolojisinde sıvı atomizasyonu için yüksek performanslı mekanik pompaya ihtiyaç duyulmasının, sınırlı damlacık taşıma yeteneği ve damlacık boyutunu ayarlamadaki eksikliklerin bu yöntemin dezavantajları olarak ifade etmişlerdir.

Söz konusu dezavantajları ortadan kaldırmak için elektrosprej soğutma oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Badıllı ve Tarımcı (2009) çalışmalarında, elektrospreyin, damlacık boyutunun mekanik atomizerler ile elde edilenden daha küçük olması, damlacıkların boyut dağılımının genellikle küçük olması ve standart sapmasının düşük olması, üniform damlacık partiküllerinin üretiminin mümkün olması, yüklü damlacıkların birbirlerini ittikleri için boşlukta kendi kendilerine dağılmaları, yüklü damlacıkların hareketinin elektrik alanlar vasıtasıyla kolaylıkla kontrol edilebilmesi, yön değiştirme veya odaklama yapılabilmesi, yüklü damlacıkların bir nesne üzerine birikme etkinliğinin yüklü olmayan damlacıklardan daha büyük olması, kolay uygulanabilir bir yöntem olması bakımından birçok avantajı olduğunu ifade etmişlerdir (Jaworek 2007; Jaworek and Sobczyk 2008; Chakraborty *et al.* 2009).

Belirtilen avantajları göz önüne alındığında ve elektrosprey soğutmanın, yüksek sıcaklıklara sebep olan ısı akısını uzaklaştırmada etkili bir yöntem olabileceği açıktır.

Literatürde elektrosprey soğutma ile ilgili oldukça az çalışma vardır. Araştırmacılar farklı akışkanlarla, debilerle, gerilimlerde, nozul çaplarında, nozul sayılarında, nozul-ısı alıcı arasındaki mesafelerde elektrosprey soğutma karakteristiklerini belirleyebilmek için çalışmalar yapmışlardır. Deng and Gomez (2011) mikro nozul sayısını artırılması durumunda elektrospreyin pratik uygulamalar için oldukça uygun bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Wang and Mamishev (2012a) elektrosprey soğutmada nozullar arası mesafenin artışıyla, soğutma miktarının arttığından bahsetmişlerdir. Jowkar *et al.* (2019) elektrosprey soğutmada, akış hızının ve voltajın artırılması ve nozul ısı alıcı arasındaki mesafenin azaltılmasıyla maksimum ısı akısında iyileşme olduğunu belirtmişlerdir. Robinson and Gibbons (2014) elektrosprey soğutmanın, soğutucu akışkan debisi ve nozul-ısı alıcı arası mesafeye bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Xu *et al.* (2021), sprej soğutmanın ısı değişim kapasitesi, düşük debi ve homojen sıcaklık dağılımı ile ısıyı verimli şekilde uzaklaştırabilen etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Elektrosprey soğutma ile ilgili yapılan çalışmalarda ısı transferini artırmanın yolları araştırılırken akışkan, gerilim ve nozul ile alakalı parametreler incelenmiş, hangi özelliğin ısı transferini nasıl etkilediği irdelenmiştir. Çalışmalarda çoğunlukla düzlem plaka kullanılırken, nadir olarak da pürüzlü yüzey kullanılmıştır. Bu çalışmada elektrosprey soğutmada şimdiye kadar çalışılmamış bir parametre olan kanatçıklı ısı alıcı geometrisinin, ısı transferine etkisi incelenmiştir. Ayrıca kanatçık optimizasyonu için debi, voltaj, nozul-ısı alıcı arası mesafe elektrospreyde koni jet modu oluşacak şekilde tasarlanarak, ısı alıcıya gönderilen sprej taneciklerinin tamamen buharlaşması sağlanıp, ısı transferinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Isı alıcı optimizasyonu ardından, nozul çapının, sayısının, uygulanan gerilimin, debinin ve akışkan türünün optimum kanatçık geometrisinde soğutmaya etkileri araştırılmıştır. Bunun yanı sıra çalışmalarda soğutucu akışkan olarak yaygın şekilde kullanılan etanolün yanı sıra, etanole göre daha düşük buharlaşma sıcaklığına sahip asetonla ve aseton ve etanole göre daha yüksek buharlaşma entalpisine sahip olan su ile farklı parametreler kullanılarak ısı transferi deneyleri yapılmıştır. Isı alıcının soğutulmasında etkili parametrelerden olan soğutucu akışkanın atomizasyonunun gerçekleştiği modlar elektrosprey görüntüleri alınarak belirlenmiştir. Damlacık ayrışmasını (atomizasyonu) ifade eden Weber ve Elektrik Weber sayıları hesaplanarak alınan görüntüler desteklenmiştir. Ayrıca geleneksel sprej soğutma ANSYS Fluent CFD programı ile modellenerek soğutma performansı elektrosprey soğutma ile karşılaştırılmıştır.

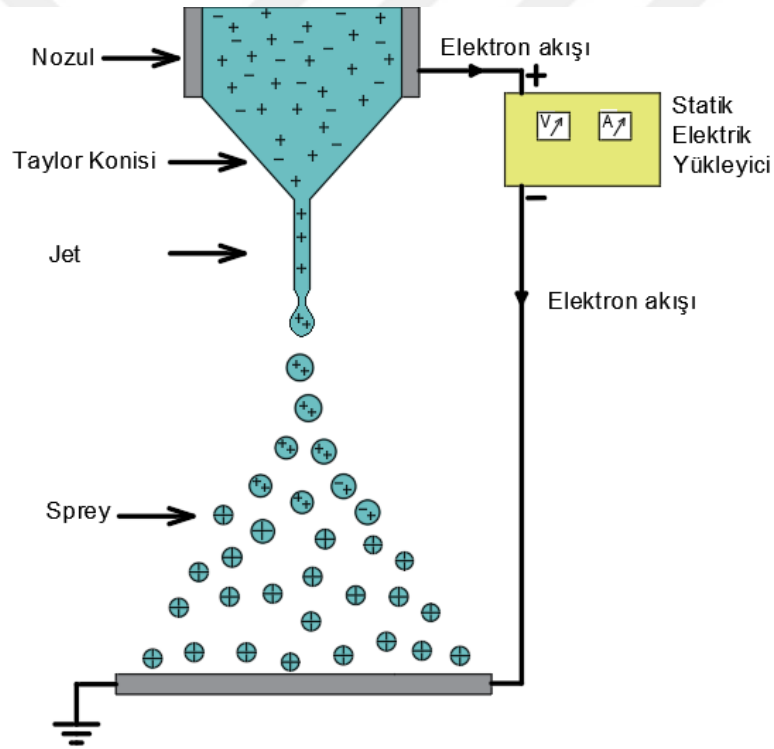
Bu alışma ile mikro işlemcilerde kullanılan düzlem ısı alıcılar yerine optimum geometriye sahip kanatçıklı ısı alıcılar kullanılarak ısı transferinin artırılması ve endüstride yaygın kullanımı amaçlanmıştır. Elektrosprey soğutmada yaygın olarak kullanılan etanole alternatif olarak aseton ve su test edilmiştir. Ayrıca tamamen buharlaştırmalı soğutma sistemi ile ısı transferinin artışı hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda yüksek ısı akısı üreten sistemlerin çalışma şartlarının iyileştirilmesi ve ekonomik ömürlerinin uzun olması amaçlanmıştır.



KURAMSAL TEMELLER

Elektrosprey Nedir?

Nozulun uç kısmındaki sıvı ile karşısına konumlandırılan elektrot arasında gerilim farkı oluşturulması sonucu sıvıda kabarcıklar meydana gelir. Sıvının yüzey gerilimi elektrik gerilimine karşı koymaya çalışır. Fakat yeterli elektrik gerilimi uygulanması sonucu, düşük gerilimlerde az miktarda kabarcıklanma oluşurken yüksek gerilimlerde elektrik geriliminin sıvının yüzey gerilimine göre daha baskın olması sonucu kılcal borunun ucunda koni yapısı oluşur. Sistemin yeterli gerilime maruz bırakılması sonucu sıvı koni yapısından sonra atomize olmaya başlar. Oluşan bu atomizasyon olayına elektrosprey adı verilir (Karakaya 2012). Elektrosprey oluşumu **Şekil 1**'de gösterilmiştir.



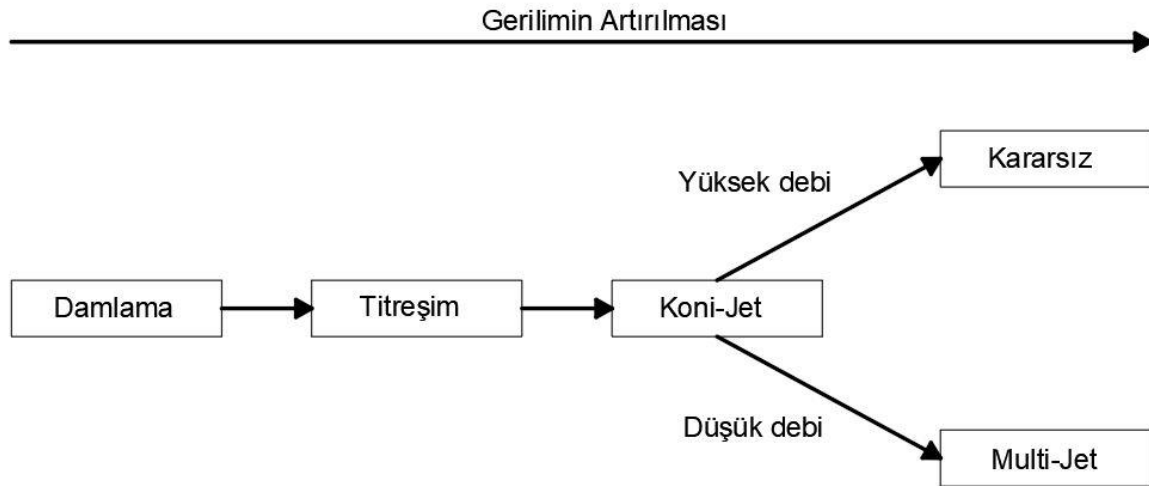
Şekil 1. Elektrosprey oluşumu (Ashgriz 2011)

Tipik bir elektrosprey sistemi, bir plaka elektroduna (substrate) bakan metal kılcal borudan yapılmış bir nozuldan oluşur. Substrate topraklanırken, nozul yüksek voltajlı bir kaynağa bağlanır. Nozulda ki yüksek elektrik potansiyeli, akışkanı deforme ederek nozul ucunda taylor konisi oluşturur ve koni tepesinden ince bir sıvı jeti çeken güçlü bir elektrik alanı üretir. Bu jet, elektrohidrokinamik dengesizlikten dolayı damlacıklara ayrılır (Jaworek *et al.* 2018).

Elektrosprey hakkında; kütle spektrometrisi (Shi *et al.* 2020), mikropartikül üretimi, yüzey kaplama, mikrokapsülleme, 2D ve 3D baskı, elektrospinning (Jaworek *et al.* 2018), mikro itici (Si *et al.* 2007, Lenguito *et al.* 2014), yanma sistemleri (Jiang *et al.* 2019) ve ilaç üretimi (Yang *et al.* 2015) gibi birçok alanda çalışmalar yapılmıştır. Fakat elektrosprey soğutma hakkında oldukça az çalışma mevcuttur ve yeni çalışmalara açık bir konudur.

Elektrosprey Modları

Akışkan özelliklerine ve diğer deneysel koşullara bağlı olarak birçok farklı damlacık ve püskürtme modu gözlemlenir (Cloupeau and Prunet-Foch 1994). Çeşitli püskürtme modları; sıvı özelliklerinin (elektrik iletkenliği, yüzey gerilimi, viskozite, dielektrik sabiti), gerilimin (kılcal uca uygulanan elektrik alan kuvveti ve elektrosprey alanındaki alan özellikleri), nozul geometrisinin ve debinin birer fonksiyonudur. Bu parametrelerin tamamı değiştirilerek farklı elektrosprey püskürtme modları elde edilebilir. Nozula uygulanan gerilimi değiştirip, diğer bütün özellikleri sabit tutulursa elektrosprey oluşumu **Şekil 2'** deki gibi olur (Ashgriz 2011).

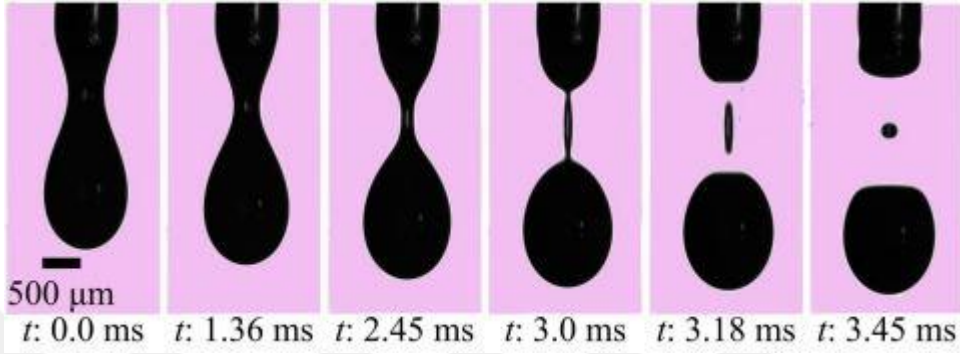


Şekil 2. Nozula uygulanan elektrik alan kuvvetinin değişimiyle elde edilen çeşitli elektrosprey modları (Ashgriz 2011)

Elektrosprey modları damlatma ve püskürtme biçimleri olarak iki ana grupta sınıflandırılabilir. İlk grupta görülen modlar; damlama modu, mikro damlama modu, iğ modu ve çoklu iğ modundan oluşur. İkinci grupta görülen modlar ise; yalpalama modu, salınımlı jet modu, koni jet modu, multi jet modu ve dallanmış jet modundan oluşur (Jaworek and Krupa 1999).

Damlama modu

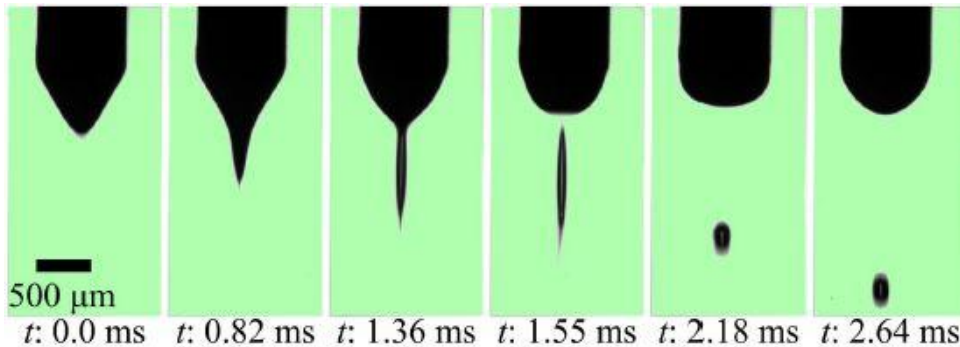
Damlama modu, elektriksel olarak nötr koşullar için damlamadan önemli ölçüde farklı değildir. Damllar, yerçekimi kuvveti ve elektrik kuvveti yüzey gerilim kuvvetlerinin üstesinden geldiğinde nozuldan ayrılan düzenli küreler halini alırlar. Damla ayrılmasından sonra menisküs, yarım küre benzeri bir menisküs oluşturarak geri çekilir (Jaworek and Krupa 1999).



Şekil 3. Damlama modu (Castillo-Orozco *et al.* 2017)

Mikro damlama modu

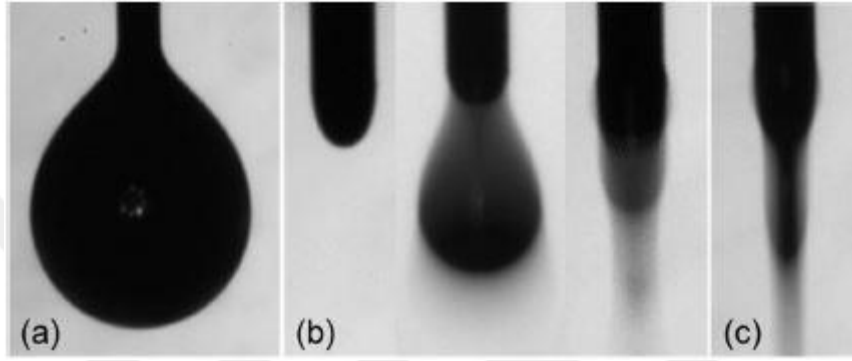
Mikro damlama modunda, nozul çıkışındaki elektrik kuvveti, kararlı bir yarım küreyi veya eliptik bir menisküsü tutmak için yeterince yüksektir. Menisküsün damlacık ayrılmasından sonra daralmaması sebebiyle mikro damlama modu, damlama modundan farklıdır. Nozul çapından çok daha küçük olan bir damlacık, elektrik alanının çok daha güçlü olduğu menisküsün ucunda oluşur. Damlacık menisküsten ayrılır ve daha fazla bozulmaya uğramaz. Mikro damlama modu düşük debilerde çalışır. Akışkanın nozul çıkışına sağladığı karakteristik süre, elektriksel kuvvet nedeniyle damla oluşum süresinden çok daha uzundur ve büyük bir damlacık oluşmasına yetmez (Jaworek and Krupa 1999).



Şekil 4. Mikro damlama modu (Castillo-Orozco *et al.* 2017)

İğ modu

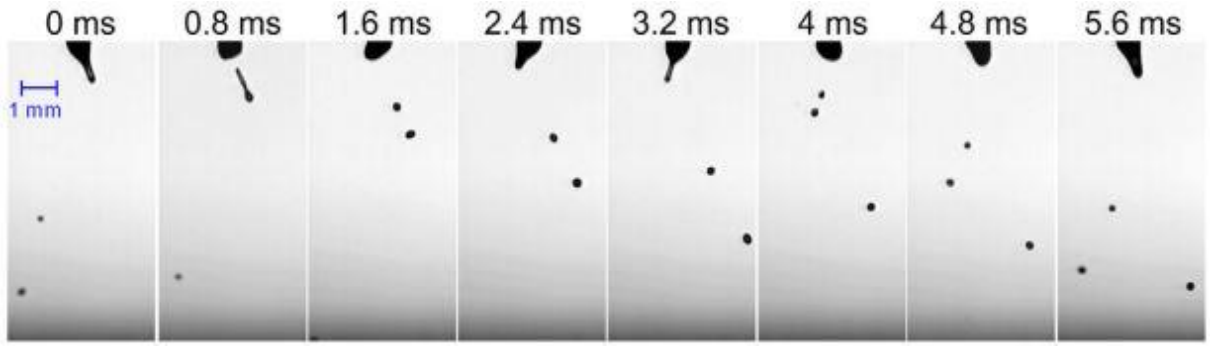
İğ modunda, debi ve elektrik alanı yeterince yüksek tutulursa sıvı elektrik alanı yönünde uzayabilir ve geniş iğ benzeri kalın bir jet şeklini alabilir. Sıvının akışkana verdiği karakteristik süre, jet oluşumunun karakteristik süresiyle neredeyse eşit veya daha kısadır. Yüksek elektrik alanı, sürekli bir jet ayırmadan önce damlacığı ayırır. İğ modu, damlama modundan daha yüksek voltajlarda oluşur ve menisküsten düzenli bir damlacıkların oluşmaması ve sıvı parçacıklarının uzaması sebebiyle damlama modundan ayrılır. İğ, elektrostatik kuvvetler nedeniyle farklı boyutlarda birkaç küçük damlacık halinde bozulur, menisküs başlangıç şeklini alır ve yeni bir jet oluşmaya başlar (Jaworek and Krupa 1999).



Şekil 5. Elektrosprey modları: (a) Damlama modu; (b) Mikro damlama modu; (c) İğ modu (Le *et al.* 2018)

Çoklu iğ modu

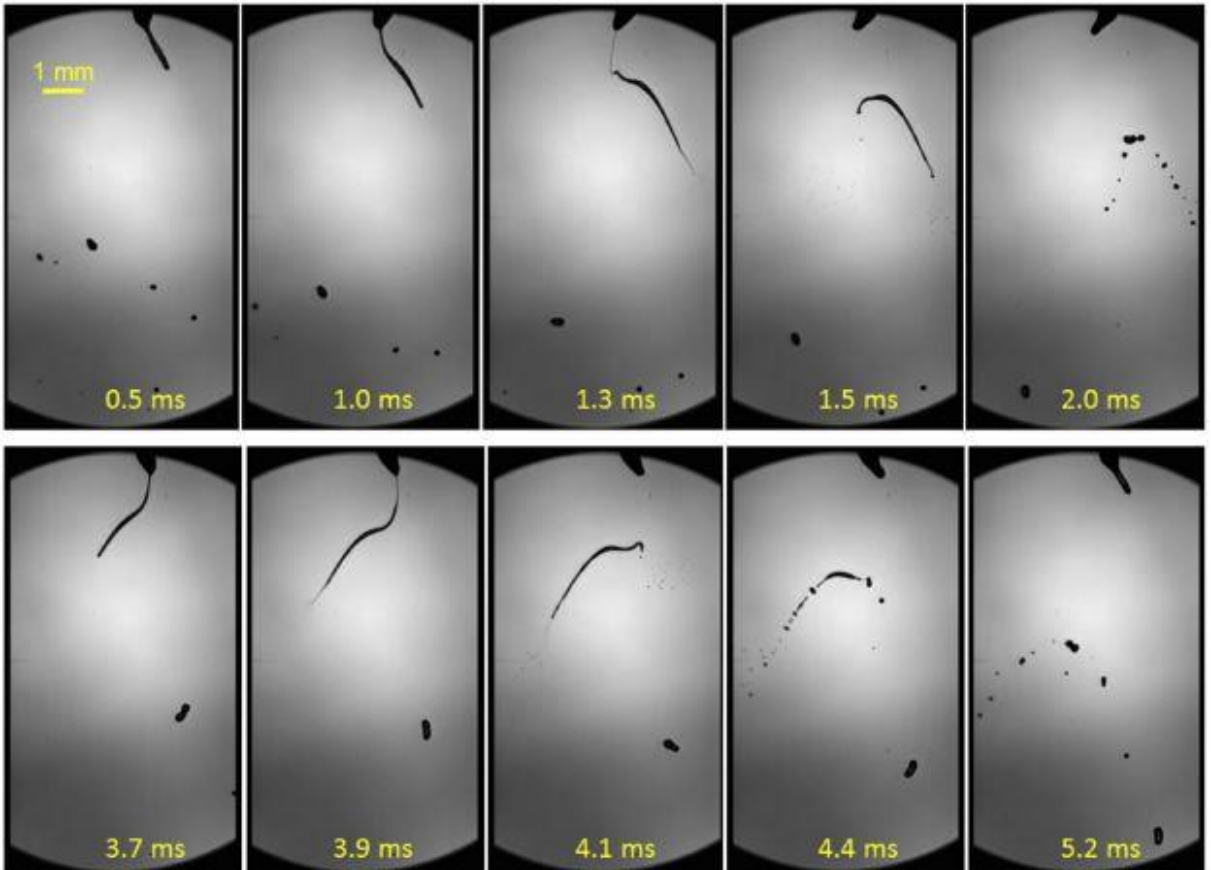
Çoklu iğ modunda damlacık oluşumu iğ moduyla benzerdir. Fakat damlacıklar genelde kısa iğ benzeri jetler halinde, anlık sıvı parçaları olarak nozulun çevresinden periyodik aralıklarla yayılır. Damlacık üretimi elektrotlar arası elektrik alanından meydana gelir ve alan yükünden de etkilenir. Nozul çıkışındaki akışkanın hızı jet oluşumunun karakteristik hızından yüksekse, yeteri kadar yüksek elektrik alanı, iğ moduna benzer şekilde nozuldaki hızlı bir uzama meydana getirir ve sıvıdan damlacığı koparır. Daha önce üretilen damlacıklar hala nozul çıkışına yakın olduğu için oluşturdukları alan, nozul ekseninin bir sonraki jetini saptırır. Sıvıdan parça ayrıldıktan sonra birkaç küçük damlacık halinde parçalanabilir. Jet dağılım alanları nozul ağzında eşit olarak dağılmış görünür. Voltaj arttıkça jet dağılım noktaları da artar. Bu modda üretilen damlacıkların boyutları iğ modundan daha küçüktür (Jaworek and Krupa 1999).



Şekil 6. Çoklu iğ modu (Pongrac *et al.* 2014)

Salınımlı jet modu

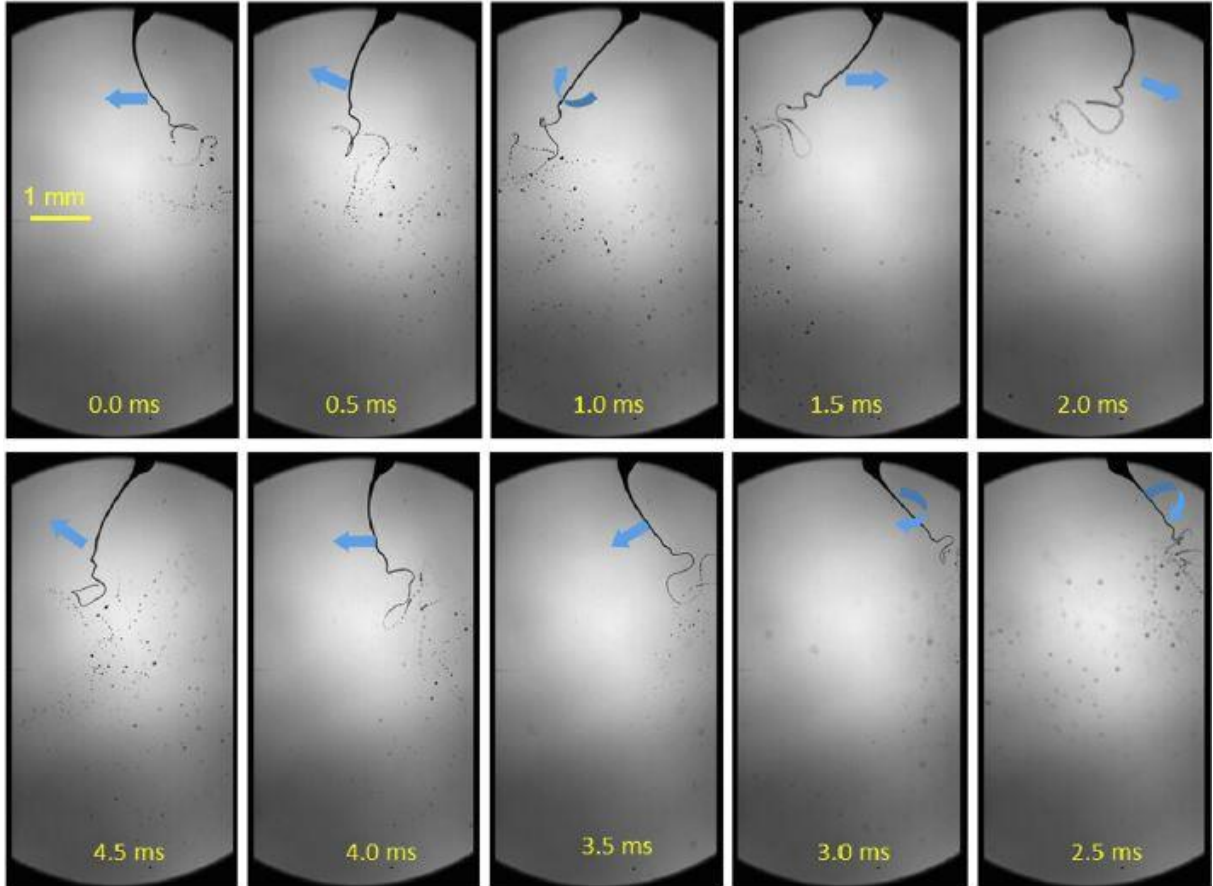
Debideki artış, jetin sürekli olmasına ve nozula sabit şekilde bağlanmasını sağlar. Aralıklı damlacık üretiminin yerini salınan sürekli bir jet alır. Bu modda, jet nozul ucundaki menisküsten sorunsuzca çıkar ve nozul eksenli bir düzlemde sürekli salınır. Jet genelde düzgün değildir fakat birkaç yerde daha ince bir hal alır. Jet, bükülme kararsızlıklarından dolayı eşit olmayan küçük damlacıklara ayrılır (Jaworek and Krupa 1999).



Şekil 7. Salınımlı jet modu (Kim *et al.* 2011)

Yalpalama modu

Yalpalama modu, sıvının nozuldan ince düzgün bir jete dönüşen eğik bir koni şeklinde çıkmasıdır. Bu mod da hem koni hem jet spiral şekli olarak kılcal eksende düzenli olarak döner. Çok küçük çapa sahip jet, uç kısmında daha da incelik ve jetin uç kısmı ana spiralin etrafına sarılır. Daha sonra küçük damlacıklar halinde parçalanır. Sıvı, eksenine nozulun eksenine ile doğrusal olan normal bir koni şeklini alır ve boşluğa neredeyse eşit bir şekilde dağılır. Artan voltaj ile jet uzar ve daha hızlı döner (Jaworek and Krupa 1999).

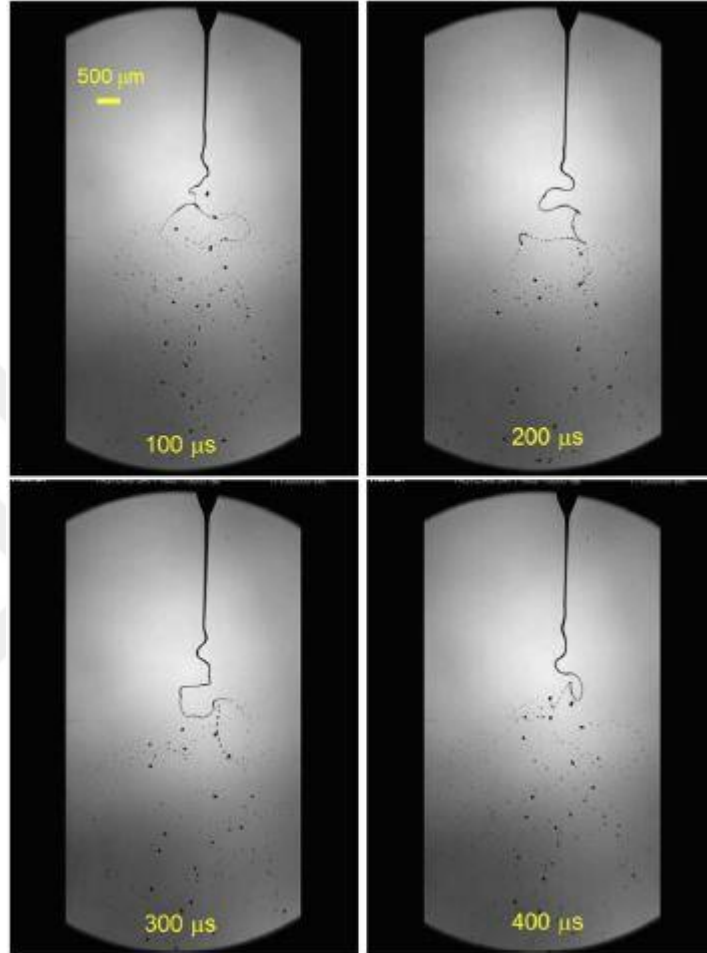


Şekil 8. Yalpalama modu (Kim *et al.* 2011)

Koni jet modu

Koni jet modunda, sıvı ucunda ince bir jet bulunan, nozul eksenine boyunca düzenli, aksiyel simetrik bir koni halinde çıkar. Koni doğrusal, içbükey ve dışbükey olmak üzere üç farklı biçim alabilir. Jetin uç kısmı varis ve bükülme olmak üzere iki tür kararsızlığa uğrar. Varis kararsızlığı durumunda, dalgalar jetin üzerinde üretilir ancak jet doğrusal konumunu değiştirmez. Dalgalar düğüm noktalarında daralır ve jet kılcal eksene yakın akan eşit damlacıklara ayrılır. Bükülme dengesizlikleri durumunda, jet nozul ekseninden düzensiz hareket eder ve elektriksel ve eylemsizlik kuvvetleri nedeniyle ince damlacıklara ayrılır. Jet zayıf yanal elektrik alanı nedeniyle birkaç mm uzunluğunda sabit kalır. Püskürtülen

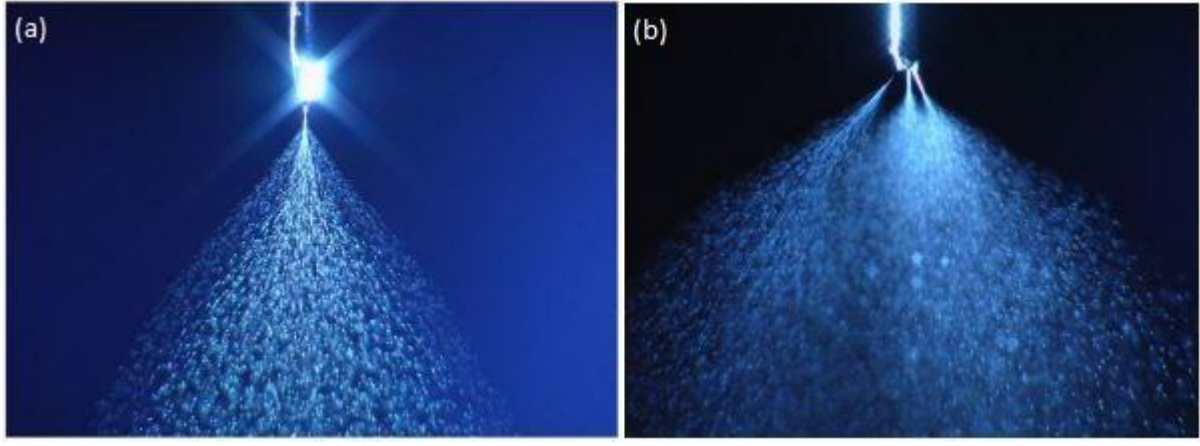
damlacıkların etki alanı neredeyse simetriktir ve jet üzerindeki yanal kuvvetler dengede kalır. Koni jet modundaki boşluk yükü, diğer püskürtme modlarından çok daha kararlıdır. Çünkü damlacıklar daha küçüktür ve daha küçük hareket kabiliyetine sahiptir. Boşluk yükü jetin uç kısmına yakın elektrik alanını azaltır. Jet çapı, artan voltaj ile azalır ve jet uzunluğu kısalır (Jaworek and Krupa 1999).



Şekil 9. Koni jet modu (Kim *et al.* 2011)

Multi jet modu

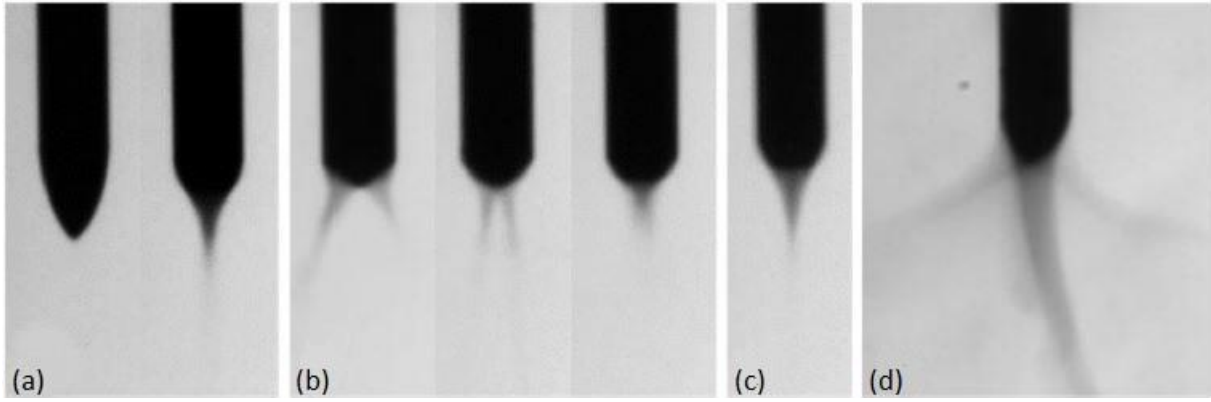
Multi jet modu, gerilimi ve debiyi arttırarak genellikle koni jet modundan gelişir. Genellikle ilk önce Taylor Konisi kaybolur ve nozulda tek bir jet oluşur. Bununla birlikte, bu durum dengesizdir ve eksene göre zıt taraflarda iki jet veya nozul kenarına simetrik olarak dağıtılmış üç jet oluşur. Menisküs, dağılım noktalarında sadece kısa konilerle mükemmel şekilde düzleşir. Jetler bükülme kararsızlıkları sebebiyle küçük tanecikler halinde parçalanır ve kılcak eksen etrafında ince bir sis oluşur. Jetlerin sayısı artan voltaj ve debiyle artar. Her bir jet hızlıca oluşur ve kayma gerilmelerinin artışından dolayı inceliyor (Jaworek and Krupa 1999).



Şekil 10. (a) Koni jet modu; (b) Multi jet modu (Jaworek *et al.* 2008)

Dallanmış jet modu

Düşük viskoziteli akışkanlar için (etanol, metanol vb.) nozuldan sadece dallanmış menisküs modu olarak yorumlanabilen düzensiz sıvı parçacıkları çıkar. Bu modda debinin artışıyla, jetlerin sayısı ve jetlerin çapı artacaktır. Jetlerin sayısı sadece bir kritik değere kadar artacaktır. Elektriksel kuvvetlerle giderilemeyen fazla miktarda akışkan nozul çıkışında birikir. Multi jet kaybolduktan sonra dallanmış jet moduna geçer. Sıvı menisküsten büyük parçalar halinde ayrılır (Jaworek and Krupa 1999).

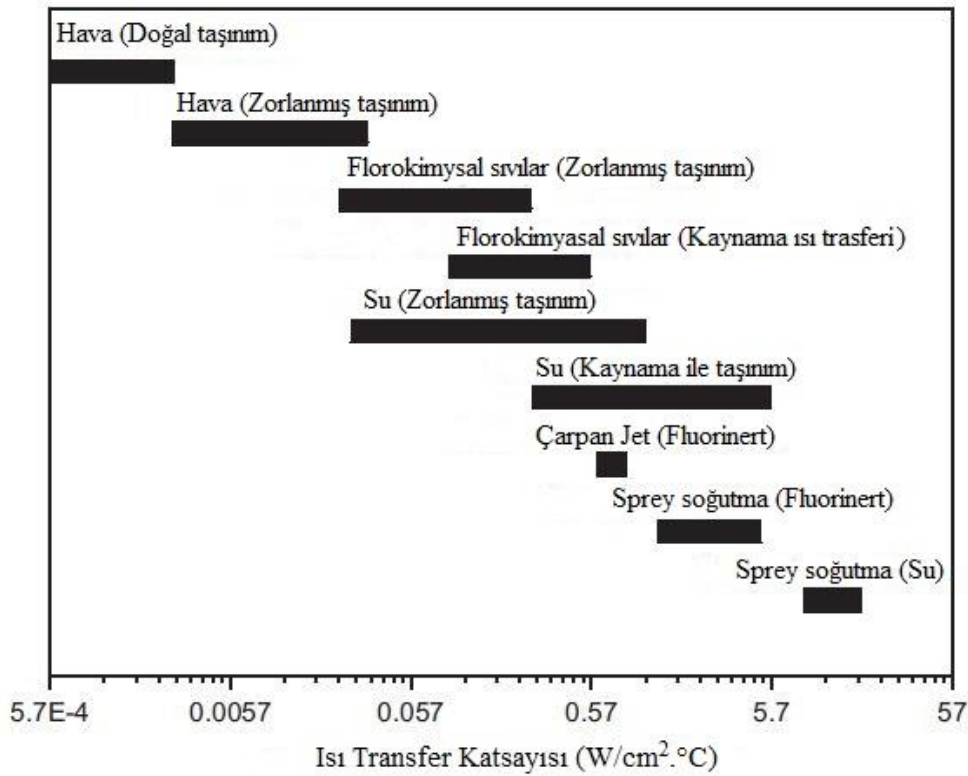


Şekil 11. (a) Kesikli koni jet ; (b) Yalpalama modu; (c) Koni jet modu; (d) Dallanmış jet modu (Le *et al.* 2018)

Sprey Soğutma

Elektronik bileşenlerin hızlı küçülmesi ve entegrasyonu ve bunu takiben güç yoğunluğundaki artışın sonucu olarak, zorlanmış taşınım, havuz kaynatma, ısı borusu, çarpan jet gibi geleneksel ısı yayma yöntemlerinin istenen termal kontrol gereksinimlerini karşılaması zordur. Yüksek ısı akıları ekipmanların ömrü ve stabilitesi üzerinde olumsuz etkisi olan daha yüksek çalışma sıcaklığına yol açar. Yüksek ısı akısı giderme yöntemi olan sprej soğutma, araştırmacıların oldukça dikkatini çekmiştir (Cheng *et al.* 2016). Zorlanmış taşınım, ısı borusu, çarpan jet ve diğer geleneksel ısı atma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, sprej soğutma daha

az debi, yüksek ısı uzaklaştırma kapasitesi, düşük aşırı ısınma gibi birçok avantaja sahiptir (Estes and Mudawar 1995; Sienski *et al.* 1996; Oliphant *et al.* 1998; Mudawar 2001; Kandlikar and Bapat 2007; Karwa *et al.* 2007; Kim 2007). Elektronik cihazlar, sprej soğutma teknolojisini kullandıktan sonra düşük sıcaklıkta daha yüksek çalışma güvenilirliği göstermiştir. Hava soğutma ile karşılaştırıldığında, sprej soğutma eklem sıcaklıklarını 33 °C, güç tüketimini %33 azaltabilir (Cader *et al.* 2004). Çeşitli tip ısı transfer metodları ve ısı transfer katsayıları **Şekil 12**'de gösterilmiştir.



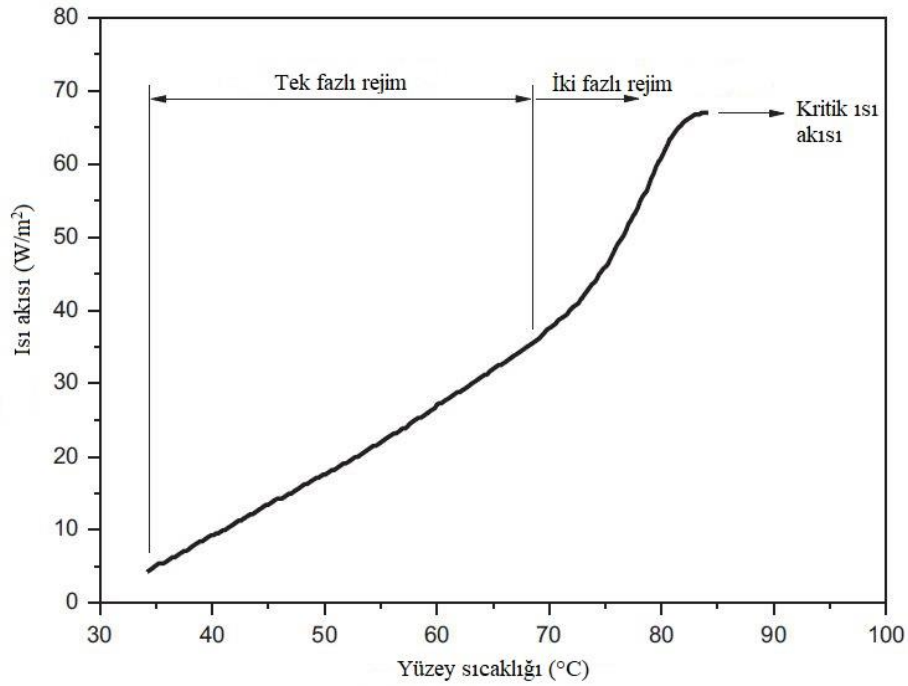
Şekil 12. Farklı soğutma yöntemleri için ısı transfer katsayısının karşılaştırılması (Sienski *et al.* 1996; Cheng *et al.* 2016)

Sprej soğutma; süper bilgisayarlar (Cader *et al.* 2004), uzay araçları (Silk *et al.* 2008), hibrit taşıtlar (Mudawar *et al.* 2009), reaktör basınçlı kaplar (Anglart *et al.* 2010) ve diğer termal kontrol sistemlerinde kullanılmıştır. Ayrıca, ısıtılan yüzeyden seken sprej damlacıkları (Deng and Gomez 2011), damlacık dağılımının incelenmesi (Hou *et al.* 2012), nozul oryantasyonu (Lin and Ponnappan 2005) ve sprej yöntemleri (Panao *et al.* 2011) gibi konularında incelenmiştir (Cheng *et al.* 2016).

Sprej soğutmada ısı transfer mekanizmaları

Tipik sprej soğutma eğrisi üç aşama içerir. Tek fazlı rejim, iki fazlı rejim, kritik ısı akısı (Şekil 13) (Kim 2007). Isıtma yüzeyi aşırı soğuduğunda, ısı akısı düşüktür ve yüzey sıcaklığı yavaşça artar. Isı transfer performansı zayıftır ve sprej soğutma iki fazlı rejime girene kadar

faz değişikliği neredeyse gerçekleşmez. İki fazlı rejimde spray soğutma eğrisinin eğimindeki artış, ısı transfer performansının önemli ölçüde iyileştirildiğini gösterir. Yüzey sıcaklığı artmaya devam ettikçe, ısı akısı zirveye ulaşıp artık artmadığında kritik ısı akısı elde edilecektir. Tek fazlı rejimdeki ısı transfer performansı açıkça iki fazlı rejimdekinden daha kötüdür, ancak tek fazlı rejimdeki spray soğutma, çalışma sıvısının faz değişiminden kaynaklanan yoğun hacim ve basınç değişimi nedeniyle daha yüksek bir kararlılık gösterir. Bu nedenle kendi özelliklerine göre, tek fazlı rejimde ve iki fazlı rejimde spray soğutma farklı durumlarda kullanılabilir (Cheng *et al.* 2016).



Şekil 13. Spray soğutma eğrisi (Kim 2007; Cheng *et al.* 2016)

Karmaşık ısı transfer mekanizmaları nedeniyle spray soğutma karakteristiklerinin belirlenmesinde deneysel yöntemler kullanılır. Çeşitli ısı transfer mekanizmalarının süperpozisyonu ve çeşitli ilgili parametreler arasındaki etkileşim araştırmacılara büyük zorluklar getirmiştir fakat ilgili çalışmalar hala artarak devam etmektedir (Cheng *et al.* 2016).

Tek fazlı rejimde ısı transfer mekanizmaları

Spray soğutmada ısı transferine, düşük ısıtma yüzeyi sıcaklığında veya aşırı soğutmada tek faz hakimdir. Bu aşamada, sistem sınırlı ısı yayma kapasitesi, yüksek çalışma kararlılığı ve ısı transferinin düzgün dağılımı ile gerçekleşir. Bu ısı transfer modu hassas elektronik bileşenler ve değişken yapılarda tercih edilir. Önemli parametreleri tanımlayabilmek için, araştırmacılar ısı transferi modeli oluştırmaya ve bunu deneysel olarak doğrulamaya çalışmaktadır (Cheng *et al.* 2016).

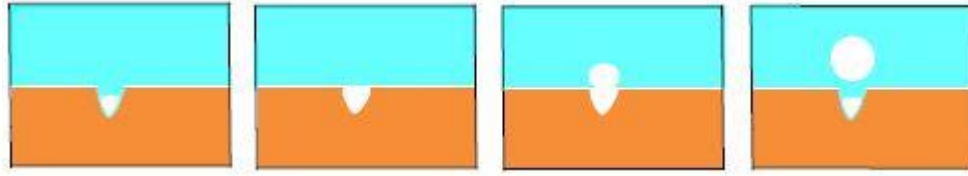
İki fazlı rejimde ısı transfer mekanizmaları

Sprey soğutma, ısıtılan yüzeyde sıvı filmde kabarcıklar oluşması ve yüzeydeki sıcaklığın aşırı artışıyla iki fazlı rejime girer. Isı transfer performansı, kaynama kabarcıkları ve sıvı film buharlaşması gibi faz değiştirme işlemi ile çok fazla ısı atıldığı için büyük ölçüde iyileşir. Sıvı film taşınımının ve damlacıkların çarpmasının iki fazlı rejimde zayıfladığına rastlanmamıştır fakat bu rejimde ısı transfer modelleri ısı akısı için geliştirilememiştir. Faz değişiminin yüksek gizli ısıyı araştırmacılar için ilgi çekicidir. Bu durum, sprej soğutmada çalışılan akışkanın buharlaşma oranıyla yakından ilgilidir. Bu nedenle kaynama kabarcıkları ve sıvı film buharlaşma mekanizmaları deneysel ve teorik olarak analiz edilmektedir (Cheng *et al.* 2016).

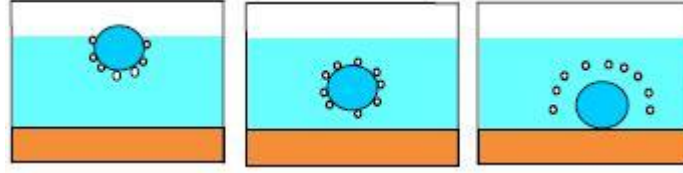
Isıtılan yüzey, aşırı ısıtıldığında sıvı filmin içerisinde kaynama kabarcıkları oluşur. Sıcaklığı absorbe etmesiyle birlikte kabarcıkların hacmi yavaş yavaş artar. Bu sırada, kabarcıklar sıvı film içerisinde hareket eder, kaldırma kuvveti ve sıvı film itme kuvvetiyle filmden dışarı çıkar. Çok sayıda kabarcık oluşur ve faz değişimiyle film tabakadan ayrılmaya zorlanır. Bu işlem, yüksek ısı yayma kapasitesine sahip sprej soğutma için ana sebeplerden biri olarak kabul edilen çekirdek kaynamayı tetikler (Rini 2000; Rini *et al.* 2001; Rini *et al.* 2002; Yang *et al.* 1996; Pais *et al.* 1992; Cheng *et al.* 2016).

Pozisyonlarına göre, ısıtılan yüzeyde ortaya çıkan kaynama kabarcıklarının çekirdeklenme merkezi olan yüzey çekirdeklenme kabarcıkları ve damlacık yüzeyinde ortaya çıkan çekirdeklenme merkezleri olan ikincil çekirdeklenme kabarcıkları olmak üzere iki çeşit kabarcık oluşumu gözlenir. (Cheng *et al.* 2016).

Genel olarak yüzey çekirdeklenme kabarcıkları sadece ısıtma yüzeyinde mikro gözenekler ve çatlaklar gibi, çekirdeklenme yerleri olarak adlandırılan özel noktalarda oluşur. Kabarcık kademeli olarak ısıyı emdikten sonra genişlemeye başlar, mikro gözenek ve çatlaklardaki artık gaz kabarcıklar haline gelir, kaldırma ve sıvı film itici kuvveti vasıtasıyla yüzeyi terk eder. Daha sonra kabarcıklar filmi hareket ettirir ve ayrışır (**Şekil 14**) (Mesler 1992; Tan 2001; Cheng *et al.* 2016). Damlacıklar sıvı yüzeyine çarptığında, damlacıklar tarafından taşınan buhar küçük kabarcıklar haline gelir ve daha sonra küçük kabarcıklar büyümek için çekirdek görevi görür. Isıtılan yüzeye çarpan damlacıklar gibi, bu küçük kabarcıklar damlacıkların yüzeyinden zorla kurtulur ve ikincil homojen çekirdeklenme yerleri olarak işlev gören küçük çekirdeklere dönüşür (**Şekil 15**) (Cheng *et al.* 2016).



Şekil 14. Yüzey çekirdeklenme kabarcıklarının büyümesi ve ayrılması (Cheng *et al.* 2016)



Şekil 15. İkincil çekirdeklenme kabarcıklarının oluşumu (Cheng *et al.* 2016)

Sıvı film buharlaşmayla ısı transferi, sprej soğutmada hızlı ve sürekli oluşuyla önemli avantajlar sağlar (Pais *et al.* 1992; Cheng *et al.* 2015; Martinez-Galvan *et al.* 2011; Cheng *et al.* 2016). Sıvı filmin ara yüzeyinde tipik bir ısı ve kütle transfer işlemi olan buharlaşma ısı transferi, diğer ısı transfer modlarına kıyasla durgunluğa ve engele sahip değildir. Buharlaşma yoğunluğu, film yüzey sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve ara yüzeyinde ki buhar basıncı ile ilişkilidir. Sıvı filmde ki sıcaklık gradyanı sebebiyle, film yüzey sıcaklığı iç sıcaklık ve ısıtılan yüzey sıcaklığından düşüktür. Bu nedenle, ince sıvı film, ısı transferine aynı ısıtılan yüzey sıcaklığında kalın sıvı filmde daha elverişlidir (Cheng *et al.* 2016).

Kritik ısı akısı

Sprej soğutma eğrisinin tepe noktası olan kritik ısı akısı, tek fazlı ve çift fazlı rejimden sonra ısıtılan yüzeyin aşırı ısınmasıyla elde edilir. Sprej soğutmada ısı transferinin önemli bir göstergesi olan kritik ısı akısı, belirli bir aralıkta soğutma kapasitesi sınırının karakterizasyonudur. Literatürde çok sayıda çalışma daha yüksek kritik ısı akısını elde etmeyi, sprej soğutmanın sınırlarını keşfetmeyi ve kritik ısı akısının mekanizmalarını analiz etmeyi amaçlamaktadır (Cheng *et al.* 2016).

Isı transfer mekanizmaları

Isı transfer mekanizmaları literatürde ısı iletimi, ısı taşınımı ve ısı ışınımı olmak üzere üç şekilde tanımlanır.

Isı iletimi

Aynı ortamda bulunan farklı katı, sıvı ve gaz yüzeylerinin veya ortamlarının, moleküllerin yer değişimi olmaksızın, birbirleriyle teması sonucu gerçekleşen ısı geçişi olayına ısı iletimi adı verilir. Kinetik teori, bir ortamda bulunan maddenin sıcaklığının, maddenin moleküllerinin kinetik enerjisiyle orantılı olduğunu ifade eder. Yani ortam içerisinde sıcaklık

yüksekse, moleküllerin kinetik enerjileri de yüksektir. Kinetik enerjileri yüksek olan ortamda ki moleküller, temas ettikleri kinetik enerjisi düşük olan molekül ortamına enerjilerinin bir kısmını transfer ederler. Bu iletim işlemi katılarda molekül yapısını oluşturan kafes yapıların titreşimiyle veya yüksek sıcaklıktan alçak sıcaklığa elektron sürüklenmesiyle gerçekleşir. Sıvılarda ve gazlarda ise moleküllerin birbirleriyle çarpışmalarıyla gerçekleşir (Yüncü ve Kakaç 1999).

Tablo 1. Çeşitli Maddelerin Isı İletim Katsayıları (Yüncü ve Kakaç 1999)

Malzeme	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
Gazlar	0,002-0,2
Yağlar	0,1-1
Su	0,5-0,7
Sıvı Metaller	10-100
Katılar (Metal olmayan)	0,03-3
Katılar (alaşımlar)	20-200
Saf Metaller	40-400

Isı iletimi Fourier Yasası'yla ifade edilir ve aşağıdaki şekilde formülize edilir.

$$Q = -k A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Isı taşınımı

Isı taşınımı, bir yüzey üzerinden veya boru içerisinden akışkanın hareketi ile sıcaklık farkından dolayı meydana gelen ısı geçişi olayıdır. Akışkanın hareketi pompa, fan vb. ekipmanlar kullanılarak yapılıyorsa bu olaya zorlanmış taşınım, yoğunluk farkından dolayı oluşuyorsa bu olaya doğal taşınım adı verilir. Isı taşınım olayı Newton'un Soğutma Kanunu ile ifade edilir (Yüncü ve Kakaç 1999).

$$Q = h A (T_y - T_\infty) \quad (2)$$

Tablo 2. Çeşitli Maddelerin Isı Taşınım Katsayıları (Yüncü ve Kakaç 1999)

Akışkan	Doğal Taşınım (W/m ² K)	Zorlanmış Taşınım (W/m ² K)
Gazlar	5-30	30-300
Yağlar	5-100	30-3000
Su (Tek faz)	30-300	300-10000
Sıvı Metaller	50-500	500-20000
Su kaynaması	2000-20000	3000-100000
Su buharı yoğunlaşması	3000-30000	3000-200000

Isı ışıınımı

Elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla, bir ortam olmaksızın enerjinin transfer edilme mekanizmasına ısı ışıınımı adı verilir. Yüksek sıcaklığa sahip katı, sıvı ve gaz maddeler buldukları ortama enerji yayarlar. Ayrıca bütün maddelere üzerine düşen ışıınının bir kısmını absorbe ederler, bir kısmını geçirirler, bir kısmını da yansıtırlar. Üzerine düşen bütün ışıınıı absorbe eden maddelere siyah cisim adı verilir. Isı ışıınıı Stefan-Boltzmann Kanunuyla ifade edilir (Yüncü ve Kakaç 1999).

$$Q = \varepsilon A \sigma (T_y^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

Elektrosprey literatür özetleri

Javorek *et al.* (2018), çalışmalarında toz zerreciklerinin üretimi, yüzey kaplaması, nanokompozit malzeme üretimi ve 2D veya 3D baskı için elektrosprey uygulamalarını irdelemişlerdir. Elektrospreyin tek tip büyüklükte küçük damlacıklar üreten çok yönlü bir araç olduğunu, 10 µm' den küçük damlacıkların üretimine izin veren tek adımlı, düşük enerjili, düşük maliyetli, çoğu zaman ortam sıcaklığında ve atmosfer basıncında gerçekleştirilebilen ve esnek üretim sürecine sahip avantajlı bir sistem olduğunu belirtmişlerdir.

Wang *et al.* (2018), elektrohidrodinamik spreylemede damla oluşumu, gelişimi, deformasyonu, salınımı ve ayrılmayı içeren farklı sprej modlarını deneysel olarak görselleştirmişlerdir. Döngülerin tekrarlama frekanslarını zoom objektifli yüksek hızlı dijital kamera ile görüntülemişlerdir. Görüntüleme sonucunda, damlama modunda frekansın debiden oldukça etkilendiğini fakat atımlı jet modunda debiye bağımlılığın azaldığını gözlemlemişlerdir. Tek kılcaldaki sprej frekansının iki kılcaldaki frekansa göre daha yüksek olduğunu, ayrıca debi artışıyla frekanstaki keskin sıçramanın değerini azaldığını ifade etmişlerdir. Elektrohidrodinamik püskürtme sınıflandırmasını frekansta keskin sıçramanın meydana geldiği geçişi ölçmek için kritik bir parametre olan Elektrik Bond sayısını kullanarak geliştirmişlerdir.

Si *et al.* (2007), bir dizi elektrosprej yayıcının karışım etkisini deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Yayıcı dizisinde, yayıcı aralığına göre çalışma voltajının davranışını tahmin edebilmek için analitik bir model sunmuşlardır. Bu modellerin temel fikri tek tek ısı yayıcıların elektrik potansiyellerini bir dizi yayıcıda bir araya getirmektir. Yayıcılardan sadece biri çalışıyorsa ve komşu yayıcılardan akışkan sağlanmıyorsa, elektriksel itmeden dolayı yayıcılar birbirine yaklaştıkça sabit bir koni jet oluşturmak için gerekli potansiyelin genelde artacağını, çok düşük aralıklarda gerekli potansiyelin düşeceğini belirtmişlerdir. Tüm yayıcılar aynı anda çalışırsa yayıcı aralığının azalmasıyla koni jet püskürtme için gerekli çalışma

voltajının arttığını, aralık çok yakın olduğunda elektrik potansiyelinde azalma olmayacağını ifade etmişlerdir.

Tatemoto *et al.* (2007), kılcal nozul ile metal plakadan oluşan çoklu kılcal nozul yayıcı ve halka tipi karşı elektrottan oluşan multi elektrosprey atomizer olarak kullanmışlardır. Çalışmalarında nozul sayısını akışkan debisini ve kılcal nozullar arası mesafeyi değiştirip, kararlı koni jet modu için gerekli gerekli voltaj ve damlacık çapını ölçmüşlerdir. Çoklu kılcal nozul yayıcı için nozullar arası etkileşimin, üniform boyutlu damlacıklar elde etmek için önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Üniform boyutlu damlacıklar kılcal nozullar arasında sadece küçük bir etkileşim olduğunda elde edildiğini, tekli nozuldan elde edilen denklemlerin aynı zamanda çoklu kılcal yayıcı için de kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Kılcal nozulların sayısı azaltıldığında veya kılcal nozullar arasındaki mesafe arttırıldığında damlacıklar arasındaki etkileşim azaltılabileceğini, kılcal nozulların sayısının artmasıyla üniform damlacık elde edebilmek için yüksek voltaj kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Morad *et al.* (2016), bir elektrik alanı tarafından oluşturulan kararlı bir kılcal sıvı jetinin, kontrol edilebilir küçük damlacıkların oluşumu, güç üretimi ve kimyasal reaksiyonlar, baskı – desenleme ve kimyasal-biyolojik araştırmalar için önemli yöntem olduğunu ifade etmişlerdir. Elektrohüdrodinamikte, iyi bilinen Taylor koni jetinin belirli bir akışkan debi ve uygulanan voltaj aralığında bir stabilite marjı olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, Taylor koni jet stabilite marjını büyük ölçüde genişletmek ve çok yüksek bir verim üretmek için basit bir mekanizma sunmuşlardır. Basit bir nozuldan yayılan etanol koni jeti için 2 ml/h' a kadar debilerde akış bozulmaya uğradığını, nozulun üzerine yarım küre şeklinde bir parça yerleştirerek, stabilite marjının düşük debiler için 5 kV' a kadar yükseltilebileceğini ve stabilite marjının maksimum 65 ml/dk debi için sıfıra düşebileceğini göstermişlerdir. Stabilite marjının sınırlarını metanol, propanol ve butanol için irdemişlerdir. Yerçekimine doğru yönelmiş nozullarda üretilen koni jet bozulmalara karşı daha kararlı olduğunu ve geleneksel basit nozulların koni jetten farklı olarak, spreynin ekseni tüm stabilite marjında aynı yönde kaldığını belirtmişlerdir.

Cloupeau and Prunet-Foch (1994), elektrohüdrodinamik püskürtme fonksiyon modlarının çokluğu, yanlış anlaşılmanın bir nedeni olduğunu belirtmişlerdir. Havada gözlemlenen modları (vakumda da gözlemlenebilir) incelemişler ve daha önceki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Damlama dışındaki rejimler için bir terminoloji önermişler ve ana modları belirlenmişlerdir.

Deng and Gomez (2011), mikroelektronik çiplerden yüksek ısı akısının etkili biçimde giderilmesinin zorluğunun, gelecekte yarı iletken endüstrisindeki gelişmeleri

engelleyebileceğini belirtmişlerdir. Sprey soğutmanın yüksek ısı akısını uzaklaştırmakta etkili olduğunu fakat spreysel damlacıklarının geri sekmesinden dolayı geleneksel spreysel soğutmadan muzdarip olduğunu ifade etmişlerdir. Elektrospreyde ise, elektrik şarj edilmiş damlacıkların geri sekmeyi engelleyerek yüzeye tutunduklarını böylece klasik spreysel göre daha etkin soğutma sağlandığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında elektrikle şarj edilmiş mikro boyutlarda çoklu elektrospreyden oluşan soğutma sistemlerinde, koni-jet modunda 96 W/m^2 ısı akısını uzaklaştırmış ve yaklaşık %97 soğutma etkisi sağlamışlardır. Sonuç olarak, elektrosprey tasarımının mikro nozul kullanılarak ve nozul sayısını artırarak pratik uygulamalar için çok uygun bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır.

Gibbons and Robinson (2018), çoklu elektrosprey, tekli elektrosprey göre yüksek damlacık kütle akısı ve daha geniş soğutma alanı sunduğunu ifade etmişlerdir. Çoklu nozul elektrosprey yerel taşının ısı akısını incelemişlerdir. Artan elektrik voltajı ile ortalama ısı akısının %64, maksimum ısı akısının %89 arttığını tespit etmişlerdir. Bu artışın sebepleri olarak, artan damlacık kütle akısını, hedef yüzey üzerinde artan temas uzunluğunu, spreysel açısını daralmasını, hedef yüzeyde damlacık buharlaşması ve hedef yüzeyde damlacığın kalma süresinin azlığını göstermişlerdir. Benzer yüksek çalışma debilerinde havuz soğutmanın başlamasının geciktiğini, buharlaşma rejiminin başladığı ve yüksek ısı transferine olanak sağladığını ifade etmişlerdir.

Gibbons and Robinson (2017), spreysel soğutmanın birçok konvansiyonel hava sistemleriyle karşılaştırıldığında yüksek etki ve düşük güç ihtiyacı sebebiyle cazip bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Tek kaynaklı koni-jet elektrosprey ile folyo termografi yöntemiyle ortalama ısı akısını incelemişlerdir. Sonuç olarak, buharlaşma ve havuz soğutma olmak üzere iki çeşit elektrosprey soğutma olduğunu, soğutma performansının ayrılma mesafesi ve debiye bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca son derece düşük debilerde elektrosprey soğutma, doğal konveksiyon ile soğutmaya göre en yüksek 18,7 kat ısı transferini arttırdığını belirtmişlerdir.

Wang and Mamishev (2012), yüksek hızlı bilgi işlem için geleceğin elektroniklerinin geliştirilmesi ve elektroniklerin sıcaklıklarını $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de tutmak için uygulamaya özel entegre devrelerin oluşturduğu geniş bir ısı dağılımını sağlayan sessiz bir termal yönetim gerektiğini belirtmişlerdir. Bunun içinde elektrosprey buharlaşma soğutma odalarının, nispeten küçük bir boyutta geniş bir ısı aralığını yayma yeteneklerinden dolayı umut vadettiklerini ifade etmişlerdir. Fakat kısmen yeterli ampirik ısı transfer korelasyonlarının olmaması sebebiyle ESEC (elektrosprey buharlaştırmalı soğutma) odalarının geliştirilmesinin ve optimizasyonunun kısıtlı olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında üç farklı geometri türüne sahip ESEC odaları

için ampirik ısı transferi korelasyonlarını araştırmışlardır. Bir ESEC odasının kararsız çoklu jet davranışı, serbest yüzeyli geleneksel çarpan jete benzediğinden korelasyonları, çarpan jet korelasyonlarına dayandırmışlardır. Deneysel çalışmaları sonucu, ısı transferi artışının akışkanın debisine ve elektrik potansiyeline hassas olduğunu fakat aynı ESEC tipinin geometrik faktörüne duyarlı olmadığını kanıtlamışlardır.

Wang and Mamishev (2012a), buharlaşmalı elektrosprey soğutmanın gelecek elektronikleri için potansiyel sıcaklık kontrolünün çözümü olarak araştırıldığını fakat ESEC'lerin optimum ısı transferi performanslarının yeterince incelenmediğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, farklı geometrilerdeki ESEC haznelarının ısı transferi performansını incelemiş, geometri tiplerinin ısı transfer performansını farklı yollarla etkilediğini tespit etmişlerdir. Mikro nozul miktarındaki artış ve aralarındaki mesafe kararlı haldeki ısı transferi performansını geliştirmede, artan boşlukla gözle görülür şekilde geçici soğutma miktarının arttığını ifade etmişlerdir.

Wang *et al.* (2009), mikro elektroniklerin termal yönetimi birim alandaki entegre devrelerden üretilen ısı akısı yoğunluklarında hızlı bir artışa bağlı olarak yüksek ısı akısı giderme çözümleri gerektiğini belirtmişlerdir. İki fazlı soğutmayı ve bir elektrosprey tekniğini birleştiren elektrosprey buharlaşmalı soğutmayı (ESEC) geleneksel soğutma teknolojileri için ısı transfer soğutma limitlerinin üstesinden gelmek amacıyla gelecek nesil mikro elektronikler için termal yönetim çözümü olarak sunmuşlardır. Çalışmalarında ESEC sisteminin ısı giderme kabiliyetini ve taşınım katsayılarının artış oranını; ısıtılan yüzey-nozul arasındaki mesafe, DC potansiyeli, etil alkolün toplam debisi ve nozul sayıları açısından incelemişlerdir. Sonuç olarak nozul sayısının artması ve nozul başına debinin azalması ESEC'lerin ısı transfer performanslarının etkili bir yolu olduğunu belirtmişlerdir.

Feng and Bryan (2008), iki fazlı çarpmayla elde edilen ısı transferine, uygulanan elektrik alanının etkisini ilk kez araştırmışlardır. Çalışmalarında, çarpmayla ısı transferini ön soğutmalı etanol kullanılarak bir dizi geometrik parametre ve çalışma koşulunda incelemişlerdir. Çarpan kütleinin ısı transfer özelliklerinin debiye, uygulanan voltaja, nozulla ısıtılan yüzey arasındaki mesafeye, nozul geometrisine, ısı akısına, ısıtılan yüzey geometrisine ve nozul diziliş şekline bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Isı transferinin iyileşmesi damlacık momentumunun ısıtılmış yüzey üzerinde ince film oluşturduğu ve belli koşullar altında 1,7 kat artışla sonuçlandığı dallanmış sprej koşullarında meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca daha yüksek ısı akıları yüzeyden defa fazla buhar momentumuyla ve farklı çarpma modlarının minimize olmasıyla sonuçlanmıştır. Sıralı kılcal boru kullanımı çok yüksek akışkan debisi elektrodinamik atomizasyona izin vermesine rağmen elektrostatik itme kuvvetleri spreji ısıtıcı yüzeyinden uzaklaştırmıştır.

Chapman *et al.* (2019), elektrosprey faz değişim soğutmasını, lokal sıcak noktalardan ısı yayılımı için potansiyel bir yaklaşım olarak incelemişlerdir. Farklı koşullarda elektrosprey çarpması yoluyla ısıtılmış bir yüzey üzerinde oluşturulan sıvı filmlerin davranışını karakterize etmek için deneyler yapmışlardır. Sistemin termal performansını öngörmek ve ısı-kütle transferi mekanizması altında yatan işlemleri anlamak için tamamlayıcı ısı transfer modeli geliştirmişlerdir. Çarpan jetin sadece yüzeye akışkanın iletilmesinde etkili olmadığını, aynı zamanda sadece birkaç yüz nanometreye kadar inceltmesi ve film boyunca iletim direncini önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Buna ek olarak buharlaşma için kütle transfer direnci spray jeti tarafından çevreleyen hava sürüklenmesinin sonucu olarak doğal konveksiyona kıyasla azaldığı, böylece pasif havada meydana gelenden çok daha yüksek buharlaşma oranları ve ısı yayılımı sağlandığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, elektrosprey soğutmanın; yüksek momentumlu elektrosprey jetlerinin elektrohidro dinamiği tarafından desteklenen hem sıvı hem gaz fazının ısı-kütle transferini benzersiz şekilde arttırdığını kanıtlamışlardır.

Jowkar *et al.* (2019), elektrosprey soğutmayı, yarım küre şeklindeki nozul ile sabit hacimsel debide deneysel olarak incelemişlerdir. Isı transfer katsayısını, ısı akısını ve yüzey sıcaklık sonuçlarını üç durum arasında karşılaştırmışlardır. İlk durum yarım küre nozul kullanılan elektrosprey, ikinci durum basit geleneksel nozul, üçüncü durum ise herhangi bir voltaj uygulanmadan sadece damlacık çarpmasıyla soğutma sağlanan basit geleneksel nozuldur. Bütün durumları aynı debi ve nozul-hedef yüzey arasındaki mesafede karşılaştırmışlardır. Debiye ve voltaja bağlı olarak yarım küre nozullu elektrosprey soğutma için kritik ısı akısının 5,66-15,13 W/cm² arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Aynı debi ve test yüzeyine olan mesafede basit bir nozul için 1,75-7,84 W/cm² arasında, damla darbeli soğutmada 3,8-11,54 W/cm² arasında ısı akısı gerçekteştiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca akış hızının ve voltajın artırılmasıyla, nozul-test yüzeyi arasındaki mesafe azaltılmasıyla maksimum ısı akısında bir iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir.

Gibbons and Robinson (2014), iki fazlı elektrosprey soğutmanın geliştirilmesi ve optimizasyonunun çeşitli elektriksel, geometrik, termal ve hidrolik parametrelerin hem ortalama hem de yerel ısı transfer katsayılarını nasıl etkilediğinin bilinmemesi sebebiyle gelişmemiş bir konu olduğunu belirtmişlerdir. Elektrosprey soğutmanın, Coulomb kuvvetlerinin enerji verimliliği sağlayan sıvı atomizasyonunu kullanarak iki fazlı soğutma sağlarken aynı zamanda çok az miktarda sıvı kullanarak gelişmiş ısı transferi sağladığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında; farklı nozul çapları, kaynak-hedef arası mesafe, hacimsel debi ve hedef yüzey ısı akısını karakterize etmeyi amaçlamışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma sonucu

en yüksek ısı transfer katsayısının ve gelişmiş radyal soğutma bölgesinin bazı durumlar için nozul çapına küçük bağıllıkla, soğutkan debisi ve hedef yüzey arası mesafeye bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca son derece düşük debilere sahip elektrospreylerle doğal konveksiyona göre çok daha yüksek ısı transferi sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Wang and Mamishev (2012b), sayısal elektrostatik alan modeli kullanarak mikro nozul temelli ESEC odaları için bir tasarım metodolojisi sunmuşlardır. Sayısal model ve ısı transferi deney sonuçları, mikro nozulların ucundaki gerilimin, ESEC ısı transfer performansında etkili olduğunu göstermiştir. Mikro nozulların ucundaki yüzey yük yoğunluğunun ısı transferi performansı üzerinde küçük bir etkisi olduğunu belirlemişlerdir. 1,87' lik maksimum iyileştirme oranını, araştırılan en düşük ısı akısında 8 nozullu ESEC odasıyla elde etmişlerdir. Bu durum, ESEC odalarının ısı transfer kapasitesinin ısı kaynağı yoğunluğu arttıkça azaldığını göstermiştir. Mikro nozul sayısının artırılmasının ve nozul başına debinin azaltılmasının, ESEC cihazlarının ısı transfer performansını etkili bir şekilde iyileştiremeyebileceğini ifade etmişlerdir.

Kim *et al.* (2020), geleneksel spreylere damlacık geri tepmesi nedeniyle düşük verimlilik sergilediğini ve yüksek pompalama gücü gerektirdiğini belirtmişlerdir. Bu problemlerin iyi damlacık dağılımı sağlayan, nispeten daha düşük pompalama gücü gerektiren elektrosprey ile çözülebileceğini ifade etmişlerdir. Elektrosprey gerilimini artırarak ısı transferi performansının tek fazlı bölgede %12,58, geçiş bölgesinde ise %6,65 arttığını göstermişlerdir. Çekirdek kaynama ve kritik ısı akısında ısı transferindeki iyileşmenin önemsiz seviyede olduğunu vurgulamışlardır. Her bir soğutma rejimi için korelasyonlar, Weber, Elektrik Weber ve Modifiye Edilmiş Kaynama Sayıları kullanılarak belirlemişlerdir.

Su *et al.* (2021), gerilimin substrate-ısıtılan yüzey arasındaki mesafenin, nanoakışkan debisinin ve nanoakışkan hacimsel oranının kritik ısı akısına etkisini incelemek için deneyler yapmışlardır. Nozul ile ısıtılan yüzey arasında oluşan elektrik alanını simüle etmişlerdir. Sonuç olarak kritik ısı akısının nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinden, elektrik alan kuvvetinden ve nanopartiküllerin yüzeyde birikmesinden büyük ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca koni jet modunda artan voltaj, debi, nanopartikül hacim oranı ve ısıtılan yüzey nozul arasındaki mesafeni azalmasıyla kritik ısı akısının önemli ölçüde azaldığını belirlemişlerdir.

Xu *et al.* (2021), spreysel soğutmanın ısı değişim kapasitesi, düşük debi ve homojen sıcaklık dağılımı ile ısıyı verimli şekilde uzaklaştırabilen etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında elektrospreysel soğutmanın ısı transfer performansını farklı ES modlarında deneysel olarak incelemişlerdir. Gerilim artışı ile damlacık çapının küçüldüğü,

püskürtme hızının arttığı damlacık çapının ve çarpma davranışının elektrik kuvvetleri ile yönetilebildiğini belirlemişlerdir. ES soğutmada gerilimsiz damlacık soğutmaya göre 2,8 kat daha iyi soğutma gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Genel olarak ES soğutmanın, soğutma kapasitesini büyük oranda arttırdığını belirtmişlerdir.

Yakut *et al.* (2021), çalışmalarında ortalama akış hızı, ortalama damlacık çapı ve elektrosprey modları arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Farklı gerilim, ortalama akış hızı ve damlacık çapları için soğutma geliştirme oranı hesaplamışlardır. Artan gerilim ile soğutma geliştirme oranı değerinin ve ortalama akış hızının arttığı, ortalama partükül çapının azaldığını belirlemişlerdir. Maksimum soğutma iyileştirme oranını 1,9 olarak tespit etmişlerdir.

Kabakuş *et al.* (2021), deneysel çalışmalarında düzlem plaka ile kanatçıklı ısı alıcı için elektrosprey soğutma performansını incelemişlerdir. Kanatçıklı yüzeyde düzlem plakaya göre 1.3-1.6 kat daha iyi soğutma gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Elektrosprey soğutmaya yönelik çalışmalardan farklı olarak, elektrosprey soğutmada daha önce kullanılmayan kanatçıklı ısı alıcıların ısı transferini daha da artırmada etkin bir parametre olarak kullanılabileceğini önermişlerdir.

Tablo 3. Elektrosprey Soğutma Genel Literatür Tablosu

Referans	Akışkan	Akış Debiti($\mu\text{l}/\text{dk}$)	Elektrosprey Tipi	Voltaj (kV)
Deng and Gomez 2011	Etanol+iyonik sıvı	417-1667	Çoklu nozul (Nozul+ekstraktör)	(V1-V2)=1,5 V2= 1-3 arası
Feng and Bryan 2008	Etanol	800-9000	Tekli nozul	0-8
Wang and Mamishev 2012;2012a;2012b	Etanol	17-133	Çoklu nozul	4-7,7
Chapman <i>et al.</i> 2019	Metanol	2-8	Tekli nozul	1-4,8
Wang <i>et al.</i> 2009	Etanol	4,2-33,3	Çoklu nozul	4-8
Gibbons and Robinson 2017	Etanol	2-16	Tekli nozul	2-5
Gibbons and Robinson 2018	Etanol	2-4	Tekli nozul	2-10
Jowkar <i>et al.</i> 2019	Etanol	20000-80000	Tekli nozul	7-10
Su <i>et al.</i> 2021	Deiyonize su+nano akışkan	630	Tekli nozul	8,5
Xu <i>et al.</i> 2021	Etanol	166,6-499,9	Tekli nozul	0-6,5
Yakut <i>et al.</i> 2021	Su	100-200	Tekli nozul	4-16
Kim <i>et al.</i> 2020	Deiyonize su	200-600	Tekli nozul	0-7
Kabakuş <i>et al.</i> 2021	Etanol	450-600	Tekli nozul	7 °C
Kim <i>et al.</i> 2020	Su	200-600	Tekli nozul	0-7

Sprey Soğutma Literatür Özetleri

Horacek *et al.* (2005), farklı miktarlarda çözülmüş gaz içeren tek nozul sprej soğutmanın ısı transfer mekanizmaları üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Tek bir nozul tarafından üretilen zaman ve mesafeyle çözülmüş ısı transfer dağılımlarını, bir dizi ayrı ayrı kontrol edilen mikro ısıtıcılar kullanılarak ölçmüşler, sıvı-katı temas alanının ve üç fazlı temas hattı uzunluğunun görselleştirilmesi ve ölçülmesini, toplam iç yansıma tekniği kullanılarak yapılmışlardır. Sonuç olarak, çözülmüş gazın varlığı sıvının etkili aşırı soğutmasını arttırmış ve sprej soğutma eğrilerini daha yüksek yüzey sıcaklıklarına kaydırmıştır. Ancak kritik ısı akısı da artmıştır. Faz değişikliğinin ısı transferine katkısının, test edilen deney koşulları için temas hattı uzunluğu ile doğrudan ilişkili olduğu belirtmişlerdir.

Kim (2007), sprej soğutmaya yüksek ısı transferi, ısı uzaklaştırma homojenliği, düşük akışkan debisi ihtiyacı, düşük damlacık etki hızı ve sıcaklığın aşırı yükselmemesi özellikleriyle ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, sprej soğutma sırasında ısının uzaklaştırıldığı mekanizmaların, bağımsız olarak kolayca değiştirilemeyen birçok parametreye bağımlı olmasından ve öngörme yetenekleri oldukça sınırlı olduğundan, iyi anlaşamadığını belirtmişlerdir. Yazarlar bu çalışmalarında, elektronik soğutma uygulamaları için sprej soğutmaya bir giriş yapmışlar, önerilen bazı sprej soğutma ısı transfer mekanizmalarını gözden geçirmişler ve yoğunlaşmayan gaz, yüzey iyileştirme, sprej eğimi ve yerçekimi etkileri ile ilgili verileri özetlemişlerdir.

Bostancı *et al.* (2009), otomotiv uygulamalarında kullanılan güç dönüştürücü modüllerin termal yönetimi için sprej soğutma sistemi geliştirmiş ve test etmişlerdir. Sistemde 0,15 l/dk- cm² debi, 145 kPa basınç düşümü ile 90 °C antifriz soğutucu kullanılan 1x2 basınçlı atomize nozul dizisi kullanmışlardır. Sistemde, mikro ölçek yapıyla iyileştirilmiş püskürtme yüzeyine sahip 2 cm² olarak simüle edilmiş cihaz, sadece 14 °C ısıtma ile 400 W/cm² ısı akısına ulaşmıştır. Bu deneysel sonuçlar, tek fazlı konvektif sistemlerle yaygın olarak soğutulan çevirici modüllerinin genel termal direncini büyük ölçüde azaltma yeteneğini olduğunu göstermiştir. Sunulan sistemin performansı, güç elektroniğinin sprej soğutmaya, tatmin edici ve homojen cihaz sıcaklıklarını korurken yüksek güç yoğunluklarını sağlayan çekici bir seçenek olduğunu kanıtlamıştır. Buna ek olarak, düşük debilerde yüksek sıcaklıktaki soğutma sıvısının kullanılması nedeniyle, sprej soğutma kompakt ve verimli sistem tasarımı sunduğunu belirtmişlerdir.

Glassman (2005), yüksek lisans çalışmasında, literatürdeki çok yüksek ısı akılarında soğutma üzerine yapılan çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma, birçok soğutma yönteminin soğutma performanslarının gözlenebilmesi açısından iyi bir referanstır.

Sprey soğutmanın diğer soğutma yöntemleriyle kıyaslandığında diğer yöntemlere göre performansının gayet iyi olduğunu belirtmiştir.

Tablo 4. Soğutma Yöntemleriyle Elde Edilen Isı Transfer Katsayıları ve En Yüksek Isı Akıları (Glassman 2005; Yan *et al.* 2011; Yaddessalage 2013)

Mekanizma	Soğutma Metodu	Isı transfer katsayısı (W/cm ² K)	En yüksek ısı akısı (W/cm ²)	Referans
Tek fazlı	Serbest hava taşınımı	0,0005-0,0025	15	Mudawar 2001
Tek fazlı	Zorlanmış hava taşınımı	0,001-0,025	35	Mudawar 2001
Tek fazlı	Doğal taşınım	0,1	0,1-3	Anderson and Mudawar 1989
Tek fazlı	Sulu doğal taşınım	0,08-0,2	5-90	Mudawar 2001
Çift fazlı	Sulu ısı boruları	-	250	Zuo <i>et al.</i> 2001
Tek fazlı	Mikro kanal	-	790	Tuckerman and Pease 1981
Elektrikli	Peltier soğutucu	-	125	Riffat and Ma 2004
Çift fazlı	Havuz kaynama	3,7	140	Rainey <i>et al.</i> 2003
Çift fazlı	Aşırı soğutulmuş kaynama	2	129	Sturgis and Mudawar 1999
Çift fazlı	Mikro kanal kaynama	10-20	275	Faulkner <i>et al.</i> 2003
Çift fazlı	Sprey soğutma	20-40	1200	Pais <i>et al.</i> 1992
Çift fazlı	Çarpan Jet	28	1820	Overholt <i>et al.</i> 2005

Sodtke and Stephan (2007), sprej soğutma deneylerini pürüzsüz bir ısıtıcı üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışılan akışkanın tamamını koni nozuldan geçirerek düşük basınçlı sprej odasına püskürtmüşlerdir. Nozul-ısıtıcı arasındaki mesafeyi değiştirerek farklı soğutucu debilerini incelemişlerdir. Kızılötesi kamera ile üç faz temas hattının uzunluğunun deneylerdeki ısı akısı yükseldikçe arttığını gözlemlemişlerdir. Bu bulgudan hareketle, üç fazlı temas hattında artışa sebep olan mikro yapılandırılmış yüzeylerin sprej soğutma performanslarını incelemişlerdir. Mikro yapıların yüzey özelliklerinden dolayı özellikle düşük soğutucu debilerinde ısı transferi performansında büyük bir artış gözlemlemişlerdir. Ayrıca farklı ısılarda renk değiştiren sıvı kristaller kullanarak düz bir ısıtıcı üzerinde yüksek uzamsal çözünürlük

sıcaklık ölçümleri elde etmişlerdir. Bu ölçümlerle, ısıtıcı yüzeyindeki soğutucu filmin yırtıldığı bir rejim için yüksek yerel sıcaklık gradyanlarını göstermişlerdir.

Yeşildal (2014) tez çalışmasında, hava destekli nozulda yapılan deneyler sonucu sprej akış karakteristiklerini CCD kamera ile tespit etmiş ve korelasyonlarla analizini yapmıştır. Jet ve sprej açısını görüntü işleme yöntemi ile bozulma mesafesi ve Sauter Ortalama Çapını ise korelasyonlarla elde etmiştir. Çalışmasında, akış analizi sonuçlarına göre hava-sıvı kütleli debi oranı arttıkça SMD azalmış ve daha üniform sprej elde edilmiştir. İkinci aşamada ise altıgen kanatçıklı ısı alıcısının sabit yüzey sıcaklığında sprej soğutma performansı ni incelemiştir. Isı alıcının geometrik özelliklerinin, akışkan debilerinin ve sprej zamanının ısı transferine etkileri Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile incelemiştir. Optimize edilmiş ısı alıcılarla yapılan deneyler sonucunda Nu sayısı, jet kalınlığı ve sprej açısı için korelasyonlar elde etmiştir.

Zhao *et al.* (2010) çalışmalarında, damlacık-film çarpması, film oluşumu, film hareketini, kabarcıklı kaynamayı, damlacık-kabarcık etkileşimini, hava taşınım ve ışınımının hacmini ve sprej soğutma ısı-kütle transferini öngören bir model sunmuşlardır. Damlacık-film etkisini damlacık Weber Sayısı ile ilgili ampirik bir korelasyona dayanarak modellemişlerdir. Film oluşumu, film hareketi, kabarcık büyümesi ve kabarcık hareketini dinamik temellere göre modellemişlerdir. Modeli, makalede sunulan deneysel sonuçlarla doğrulanmışlar ve %10' un altında bir sapma ile olumlu bir karşılaştırma göstermişlerdir. Film kalınlığı, film hızı ve homojen olmayan yüzey sıcaklığı dağılımını sayısal olarak elde etmişlerdir. Sırasıyla püskürtme açısı, yüzey ısı akısı yoğunluğu ve püskürtme akış hızının yüzey sıcaklığı dağılımı üzerindeki etkisini araştırmak için bir parametre duyarlılık analizi yapılmışlardır. Sonuç olarak, damlacık-film çarpması ve film yüzeyi konveksiyonu ile gerçekleşen ısı transferinin, ısıtılan yüzeyin aşırı ısıtılmadığı koşullar altında sprej soğutmada baskın olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, ısıtılan yüzey aşırı ısınırken kaynar kabarcıkların etkisinin hızla arttığını gözlemlemişlerdir.

Ang *et al.* 2015, çalışmalarında yüzey akustik dalga atomizasyonunu incelemişlerdir. Nozulsuz sprej soğutma tekniği olan yüzey akustik dalga atomizasyonunda deiyonize su kullanarak atomizasyon oranını %40 arttırdıklarında soğutma %15 artmış, yüzey akustik dalga cihazıyla yüzey arasındaki mesafeyi yarıya indirdiklerinde soğutma %20 artmıştır. CuO nanoparçacık konsantrasyonunu %3 kullandıklarında soğutma %30 artırmışlardır. Süspansiyondaki nanoparçacık kütle konsantrasyonunun sadece %1' den %3' e yükseltilmesi, ısıtılmış yüzeyde nanoparçacık kümelerinin birikmesi ve oluşumu nedeniyle soğutmada %10'

luk bir iyileşmeye yol açtığını belirtmişlerdir. Literatürde yer alan farklı soğutma çeşitlerini aşağıdaki gibi karşılaştırmışlardır.

Tablo 5. Soğutma Yöntemlerinin Akış Debilerinin Karşılaştırılması (Ang *et al.* 2015)

Damlacık oluşturma yöntemi	Akışkan	Akış Debisi (ml/dk)
Nozulsuz: SAW atomizasyon (Qi <i>et al.</i> 2008)	Su	0,5-0,7
Nozullu: Piezoelektrik uyarıcı (Huang <i>et al.</i> 2005)	Su	0,-1,2
Nozullu: Elektrosprey (Deng and Gomez 2011)	Etanol	0,4-1,7
Nozullu: Piezoelektrik mikropompa (Hsieh <i>et al.</i> 2014)	Su	2,4-32

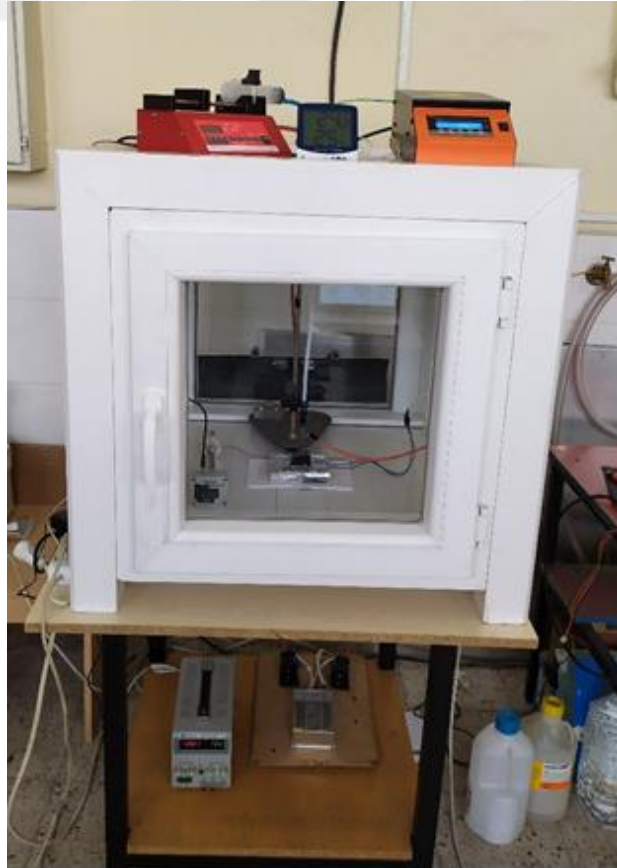
Cheng *et al.* (2016), üç aşamada (tek fazlı rejim, iki fazlı rejim ve kritik ısı akışı rejimi) spreylere soğutmanın ısı transfer mekanizmalarının mevcut araştırma ilerlemelerini özetlemişler ve etki faktörleri, spreylere özellikleri, ısıtma yüzeyi özellikleri, sıvı özellikleri ve dış çevre özelliklerini, ayrıntılı olarak analiz etmişlerdir. Özel bir spreylere soğutma biçimi olan flaş buharlaşma soğutmayı, düşük basınçlı çevre veya ortamdaki yeri doldurulamaz avantajı nedeniyle bir dizi çalışma ile araştırmışlardır. Film flaş buharlaşması ve damlacık flaş buharlaşmasının sistemin soğutma kapasitesini ve çalışma sıvısının kullanımını önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir.

MATERYAL VE METOT

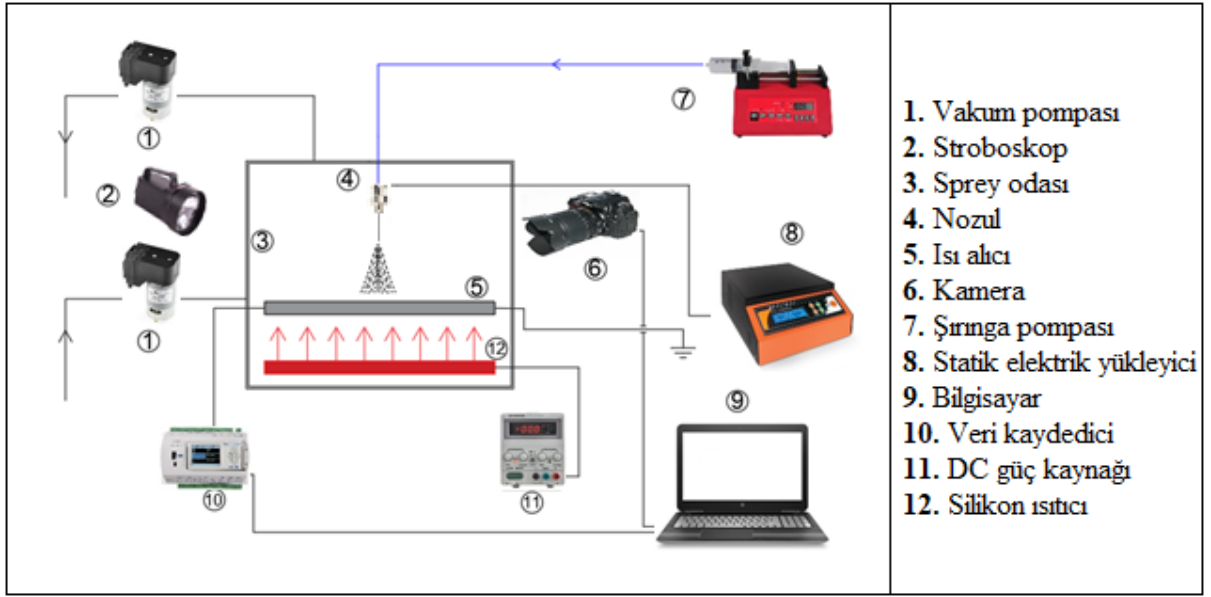
Yapılan deneysel çalışmada farklı geometrilerdeki ısı alıcılarda elektrosprey soğutma karakteristikleri incelenmiştir. Tezin bu bölümü deney düzeneğinin kurulması, hesaplamalar, belirsizlik analizi, tam faktöriyel metodu, sayısal analiz ve ısı alıcıların tasarlanması bölümlerinden oluşmaktadır.

Deney Düzeneği

Deneyler, Atatürk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından FBA-2018-6965 proje numarasıyla desteklenen “ Farklı Tip Isı Alıcılarda Çoklu Elektrosprey Soğutma” isimli proje kapsamında, Atatürk Üniversitesi Sprey Laboratuvarında kurulan deney düzeneğiyle gerçekleştirilmiştir. Deneyler farklı nozul çap ve sayılarında, ısı akılarında, optimum kanat geometrisinin belirlenmesi için koni-jet oluşumunu sağlayan akışkan debisi ve gerilimlerde ve ısı alıcı geometrilerinde gerçekleştirilmiş, bahsedilen değişken parametreler için ısı transfer analizi yapılmıştır. Kurulan deney düzeneğinin gerçek ve şematik görünümü **Şekil 16-17**'de görüldüğü gibidir. Deney düzeneğinde kullanılan cihaz ve ekipmanların özellikleri aşağıda sıralanmıştır.



Şekil 16. Deney düzeneği



Şekil 17. Deney düzeneği şematik görünümü

Vakum Pompası

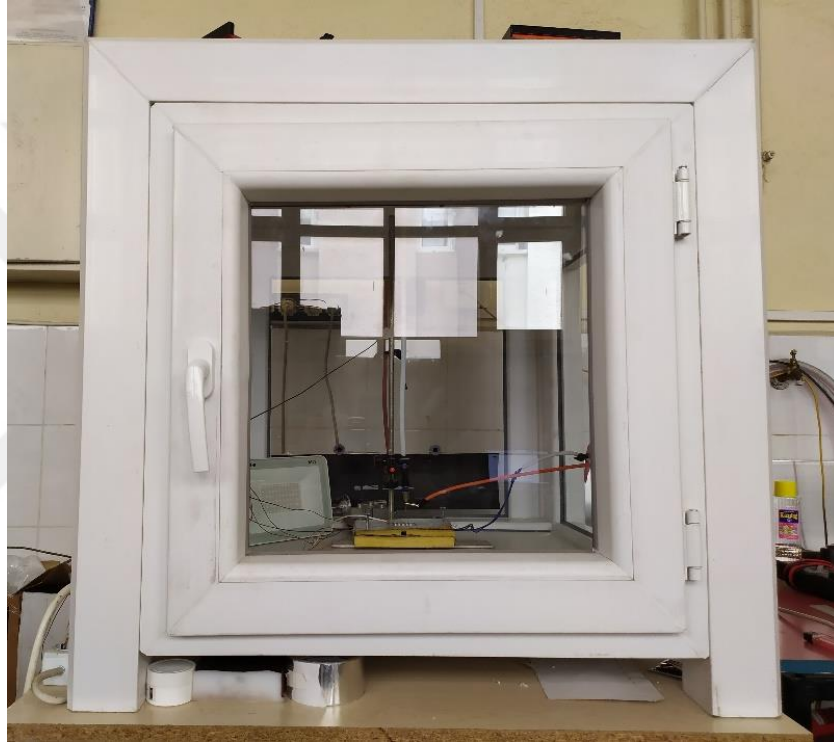
Deneylerde sprej odası içerisinde oluşan buharın tahliye ederek dış ortamdaki sprej odasına taze hava şarjını sağlayıp, sprej odası içerisindeki nem oranını sabit tutmaya yarayan cihazdır. Sprej odasının üst kısmından açılan iki adet deliğe montajı yapılan hortumlarla iç ortamdaki buhar tahliye edilip, sprej odasının arka yüzeyinden açılan (sprej akışını etkilemeyecek konumda) iki adet deliğe bağlanan hortumlarla dış ortamdaki taze hava sağlanmıştır. Deneylerde 12V DC AIRPO marka D2028B model vakum pompaları kullanılmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Vakum Pompası

Sprey odası

Elektrosprey oluşumu sırasında kullanılan yüksek voltajdan korunmak ve sabit ortam şartları sağlayarak spreyn dış ortamdaki etkilenmesinin önüne geçmek amacıyla, kapağı açıldığında düzenekte kullanılan cihaz ve ekipmanların (özellikle statik elektrik yükleyici) elektriğini kesen bir sisteme sahip sprej odası kullanılmıştır. Sprej odası 60x60x70 cm boyutlarında PVC profillerle imal edilmiştir. Sprej odasının üst ve alt yüzeyleri PVC lambiri, yan yüzeyleri ise tek katlı camdan, alt yüzey dışında bütün yüzeylerde kablo ve hortum geçişleri için ikişer delik olacak şekilde üretilmiştir. Sprej odasına açılan deliklerden gerekli elemanların geçişi sağlandıktan sonra deliklerin sızdırmazlıkları sağlanmıştır (**Şekil 19**).



Şekil 19. Sprej odası

Şırınga pompası

Isı alıcı üzerine sabit debide akışkanı gönderebilmek için kullanılan cihazdır. 50 ml' lik tek kullanımlık şırıngaya akışkan doldurulup şırınga pompası sayesinde nozula sabit debide akışkan gönderilmiştir. Deneylerde New Era marka NE-300 model tek kanallı şırınga pompası kullanılmıştır (**Şekil 20**).



Şekil 20. Şırınga pompası

Statik elektrik yükleyici

Şırınga pompasıyla nozula iletilen akışkanı atomize edebilmek için kullanılan cihazdır. Nozulun ucundan çıkan akışkana, yüksek voltaj kablosuna lehimlenmiş timsah ağzı vasıtasıyla statik elektrik yükleyici ile yüksek voltaj uygulanmış ve akışkan atomize olmuştur. Yüklü sprey damlacıkları topraklanmış olan ısı alıcıya (substrate) doğru hareket ederek yüklerini boşaltmış ve ısı alıcı yüzeyinde soğuma meydana getirmişlerdir. Çalışılan gerilim koni jet modu elde edebilmek için, akışkanın cinsine, nozul çapına, ısı alıcı-nozul arası mesafeye ve akışkan debisine göre değişkenlik göstermiştir. Deneylerde Puls Electronic marka HVDC-20 model statik elektrik yükleyici kullanılmıştır (Şekil 21). Statik elektrik yükleyicinin teknik özellikleri **Tablo 6**'da verilmiştir.



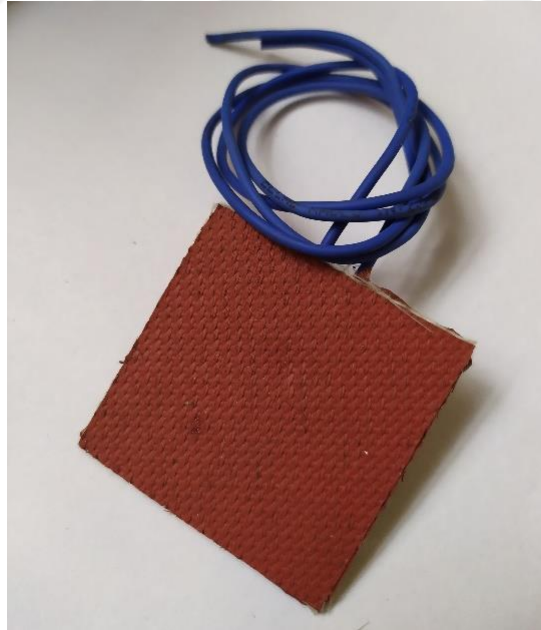
Şekil 21. Statik elektrik yükleyici

Tablo 6. Statik Elektrik Yükleyci Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	
Çıkış Gerilimi	220-230 VAC 30-300
Frekans	50 Hz/60Hz 30-3000
Max. Giriş Gücü	135 W 300-10000
Max. Çıkış Akımı	1 mA 500-20000
Max. Çıkış Gücü	45 W 3000-100000
Gerilim stabilizasyonu	%0,5
Çalışma Sıcaklığı	0-60 °C 3000-200000

Silikon Isıtıcılar

Isı alıcılara istenilen ısı akısının sağlanabilmesi için kullanılan, 40x40x2 mm boyutlarında, yanmaz malzemedен imal edilmiş, DC akım ile beslenen rezistanslardır (Şekil 22). Isı alıcının altında, arasına termal direnci önlemek için -50°C ... +200°C sıcaklık aralığında çalışan termal macun sürülerek kullanılmıştır.



Şekil 22. Silikon ısıtıcı

DC güç kaynağı

Isı alıcıların sıcaklığını artırmak için kullanılan silikon ısıtıcılara istenilen voltaj ve akımın sağlanması için DC güç kaynağı kullanılmıştır. Deneylerde Instek marka GPS-3030DD

model güç kaynağı kullanılmıştır (Şekil 23). Güç kaynağının teknik özellikleri aşağıdaki gibidir (Tablo 7).



Şekil 23. DC güç kaynağı

Tablo 7. DC Güç Kaynağı Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	
Çalışma aralığı	0-30 V 0-3 A 30-300
Hassasiyet (%)	$\pm 0,01(V)$ $\pm 0,2(A)$
Belirsizlik	$\pm 5mV$ $\pm 3mA$
Çalışma Sıcaklığı	0-40 °C 3000-200000

Veri kaydedici

Isı alıcı ve ortam sıcaklığının ölçülebilmesi için K Tipi ısı çiftleri kullanılmıştır. Isıl çiftler ısı alıcının dört yan yüzeyinin tam ortalarından 5-10-15-20 mm derinliklerde açılan deliklere termal macun sürülmüş halde bağlanmıştır. Belirlenen derinlikler ısı alıcıda homojen sıcaklık ölçümü alınacak şekilde tasarlanmıştır. Isıl çiftler akışı bozabilme, ısı transferini etkileyebilme ve hatalı okuma yapabilme ihtimallerinden ötürü ısı alıcı yüzeyine değil, ısı alıcının yan yüzeyleri delinerek bağlantıları yapılmıştır. Isı alıcıya bağlı ısı çiftlerinden okunan sıcaklık değerlerinin ortalaması alınarak ısı alıcı yüzey sıcaklığı belirlenmiştir. Deneylerdeki sıcaklık ölçümleri Novus marka Fieldlogger model veri kaydedici ile yapılmıştır (Şekil 24). Veri kaydedicinin özellikleri Tablo 8’de verilmiştir.



Şekil 24. Veri kaydedici

Tablo 8. Veri Kaydedici Teknik Özellikleri

Parametre	Özellik
Giriş Tipleri	Pt100, Isıl çift, 4-20 mA, 0-50 mV, 0-10 Vdc 30-300
Hassasiyet (%)	±0,15
Analog kanal sayısı	8
Çıkış	2 adet röle
Kayıt sıklığı	Saniyede 100 veya daha fazla
Haberleşme	Ethernet, USB, Rs485 portlar
Dahili hafıza	2 MB
Besleme	220 V AC 50 Hz
Çalışma sıcaklığı-Nem	0-50 °C – Azami %80

Nozullar

Deneylerde yüksek gerilimi aktararak akışkanın atomize olabilmelerini sağlamak amacıyla paslanmaz çelik nozullar kullanılmıştır (Şekil 25). Kullanılan nozullara hortum bağlantısının direkt yapılamamasından dolayı ara eleman olarak paslanmaz çelik lüer kullanılmış ve böylece şırınga ile nozul bağlantısı sağlanmıştır. Deneylerde 20-25-30 G olmak üzere üç çap tekli ve çiftli nozullar kullanılmıştır. Kullanılan nozulların ölçüleri **Tablo 9**'da verilmiştir.



Şekil 25. Tekli ve çiftli nozullar

Tablo 9. Tekli ve Çiftli Nozulların Ölçüleri

Nozul Çapı	İç Çapı (mm)	Dış Çapı (mm)	Uzunluk (mm)
20 G	0,61	0,9	13
25 G	0,25	0,51	13
30 G	0,15	0,31	13

Soğutucu Akışkanlar

Deneyleerde soğutucu akışkan olarak etanol, aseton ve su kullanılmıştır. Etanol fiziksel özellikleri sebebiyle literatürde yaygın kullanılan bir akışkandır. Aseton ise elektrosprey soğutma literatüründe rastlanılan bir akışkan olmamasına rağmen fiziksel özellikleri sebebiyle elektrosprey soğutmada kullanıldığı şartlara göre avantajlı olabilir. İki akışkanında en önemli dezavantajı düşük parlama sıcaklığına sahip oluşlarıdır. Fakat iki akışkanda yüksek dielektrik sabiti, düşük kaynama noktaları, yüksek buharlaşma oranları ve düşük yüzey gerilim katsayıları sebebiyle elektrosprey oluşumu için oldukça elverişli akışkanlardır. Su ise yüksek buharlaşma entalpisi ile diğer akışkanlardan ön plana çıkmaktadır. Fakat yüksek yüzey gerilimi sebebiyle atomizasyonu yüksek gerilimlerde gerçekleşmektedir. Kullanılan akışkanları fiziksel özellikleri **Tablo 10**'da sunulmuştur.

Tablo 10. Soğutucu Akışkanların Fiziksel Özellikleri (Anonymous 2020a, 2020b, 2021a, 2021e, 2021f)

Fiziksel Özellik	Su	Etanol	Aseton
Kaynama noktası (°C)	100	78,3	56
Yoğunluk (kg/m ³)	1000	790	790
Yüzey gerilimi (N/m)	0,072	0,0245	0,0237
Dielektrik sabiti (ϵ)	80 (20 °C)	25,3	20,7

Kamera

Elektrosprey ile yapılan çalışmalarda spreylere görüntüleri genellikle HSC' ler (High Speed Camera) ile alınmaktadır. Böylece elektrospreyin oluşumu ve modu dışında partikül çapları, hızları vb. parametrelerde incelenebilmektedir. Laboratuvar envanterinde HSC mevcut olmadığından, elektrosprey oluşumunu ve modunu görüntülemek için Nikon D90 profesyonel fotoğraf makinesi ve Nikon 18-105 lens kullanılmıştır (**Şekil 26**).



Şekil 26. Görüntüleme için kullanılan kamera ve lens

Isı Transfer Deneilerinin Yapılış Aşamaları

1. Isı alıcı ile silikon ısıtıcı arasında termal direnç oluşmasını engellemek için termal macun sürülerek ısı alıcı silikon ısıtıcı üzerine yerleştirildi. Isı alıcı ve silikon ısıtıcı camyünü plakadan imal edilen izolasyon malzemesinin içerisine sadece ısı alıcının üst yüzeyinden ısı transferi gerçekleşeceği şekilde konumlandırıldı. Isı alıcının yan yüzeylerinde yer alan ısı çift deliklerine, ısı çiftler uçlarına termal macun sürülerek yerleştirildi.

2. Paslanmaz çelik nozul, lüerle oluşturulan hortum bağlantısına takıldı. Nozulun ucuna statik elektrik yükleyiciye bağlı olan yüksek voltaj kablosu timsah ağzı ile bağlandı.
3. Nozul-ısı alıcı arası mesafe, gerilim, nozul çapı ve sayısı, akışkan türü ve debisi deney planına göre ayarlandı. Koni jet oluşumunun gerçekleştiği Nikon D 90 kamera, Nikon 18-105 lens ve ışık kaynağı olarak Lutron DT-2199 stroboskop kullanılarak teyit edildi.
4. DC güç kaynağı deneylerde kullanılacak olan akım ve voltaj değerlerine ayarlandı. Isı alıcı yüzey sıcaklığı artmaya başladıktan sonra şırınga pompası ile soğutucu akışkan nozula gönderildi.
5. Akışkan nozuldan damlamaya başladıktan sonra statik elektrik yükleyici çalışılan voltaj değeri ayarlanarak çalıştırıldı.
6. Vakum pompaları vasıtasıyla sprej odasındaki buhar deşarj edilerek, dışarıdan sprej odasına taze hava takviyesi yapıldı.
7. Akışkan atomize olduktan sonra sistemin kararlı hale gelmesi beklendi ve daha önce sıcak su banyosuyla kalibrasyonu yapılan K tipi ısı çiftlerinin bağlı olduğu veri kaydediciye ısı alıcı üzerindeki sıcaklıklar kaydedildi.
8. Sıcaklık ortalamaları alınarak ısı transferi analizi yapıldı.

Sprej Görüntüleme Aşamaları

1. Gün ışığında çıplak gözle sprej oluşumunu gözlemlemek mümkün olmadığından, bir ışık kaynağı yardımıyla karanlık ortamda görüntüleme gerçekleştirildi.
2. Deneylerin yapılacağı gerilim, debi, nozul ısı alıcı mesafe ayarlandıktan sonra deneyin yapılacağı nozul çapı ve sayısına göre nozulun sisteme montajı yapıldı.
3. Soğutucu akışkan nozul ucunda damla halinde görüldüğü anda statik elektrik yükleyici ile nozula yüksek voltaj verildi.
4. Stroboskop sprej partiküllerini görünür kılacak şekilde uygun açıda yerleştirildi.
5. Sprej oluşumunu net şekilde görebilmek için fon olarak siyah mat zemin kullanıldı.
6. Görüntüler profesyonel fotoğraf makinesi ve lens ile alınarak oluşan elektrosprej modu belirlendi (**Şekil 27**).



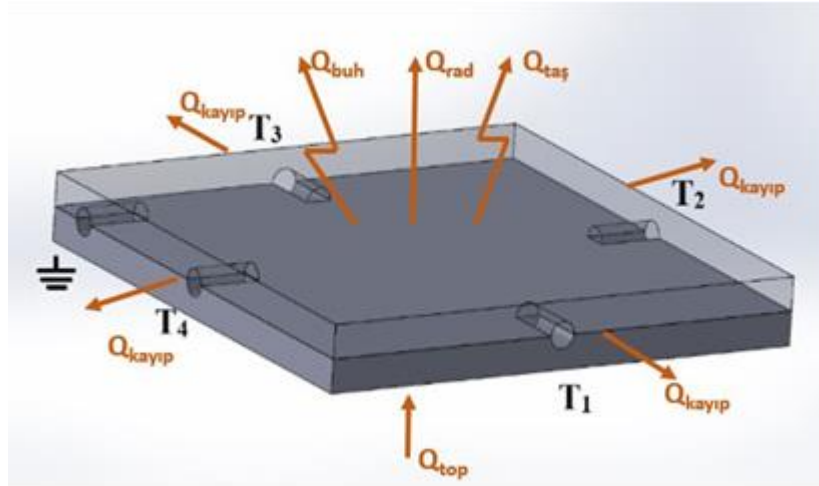
Şekil 27. Elektrosprey görüntüleme

Isı Transfer Analizi

Isı alıcı üzerinde temel olarak taşınım ve ışınım ile ısı geçişi gerçekleşmektedir. Isıtılan yüzeyde gerçekleşen ısı ışınımı (Q_{rad}), konvektif ısı transferi ($Q_{taş}$) ve buharlaşma ile ısı transferi (Q_{buh}) ile ifade edilebilir. Bunun yanı sıra test bölgesinde gerçekleşen ısı kayıplarını da ($Q_{kayıp}$) göz önüne alırsak, silikon ısıtıcıdan ısı alıcı yüzeyine geçen toplam ısı miktarı (Q_{top});

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

olarak ifade edilebilir (Şekil 28).



Şekil 28. Isı alıcıda gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları

Isı alıcının yüzey alanının düşük oluşu (40x40x5 mm), kullanılan alüminyum malzemenin yüzeyinin temizlenerek parlatılması ve düşük yüzey sıcaklıklarında (~100 C°) çalışılması göz önüne alınarak radyasyonla gerçekleşen ısı transferi hesabı yapılmıştır ve ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transferi miktarının %1' inden düşük çıkmıştır. Ayrıca yapılan

hesaplama sonucu test bölgesinde gerçekleşen toplam ısı kaybı, toplam ısı transferi miktarının %3' ünden düşük olarak hesaplanmıştır. Dolayısı ile radyasyonla gerçekleşen ısı transferi miktarı ve sistemde gerçekleşen ısı kaybı miktarları ihmal edilebilir boyutlardadır. Bu durumda sistemden gerçekleşen toplam ısı transferi miktarı;

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

olarak ifade edilebilir.

Isı akısı ise eşitlik 3 ile ifade edilebilir. Q_{top} toplam ısı miktarı, A_y ise ısı alıcı yüzey alanını ifade eder.

$$q'' = \frac{Q_{top}}{A_y} \quad (3)$$

Isı taşınım katsayısı;

$$h = \frac{Q_{top}}{A_y(T_y - T_{\infty})} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada T_y ısı alıcı üzerindeki ortalama sıcaklık, T_{∞} ise ortam sıcaklığını ifade etmektedir.

Elektrosprey soğutmada kanatçığın etkisini görebilmek için de kanat iyileştirme oranı (KİO) belirlenmiştir. Aynı yüzey sıcaklığında kanatçıklı yüzeyden atılan ısı miktarının, kanatçiksiz yüzeyden atılan ısı miktarına oranı kanat iyileştirme oranı olarak belirtilmiştir. Kanat iyileştirme oranı;

$$KİO = \frac{Q_{kanatçıklı}}{Q_{kanatçiksiz}} \quad (5)$$

olarak ifade edilebilir.

Etkin ısı transferi elde edebilmek için ısı alıcı yüzeyine çarpan sprej damlacıklarının boyutları önem arz etmektedir. Sprey oluşum karakteristiğinin ısı transferine etkisini belirtmek amacıyla Weber Sayısı ve Elektrik Weber Sayısı kullanılmıştır.

Weber Sayısı, atalet kuvvetlerin yüzey gerilme kuvvetlerine oranıdır. Weber sayısının artışı sprej oluşumunda daha yüksek kararsızlığa ve bunun sonucu olarak da daha küçük damlacık dağılımı oluşumuna sebep olmaktadır (Yeşildal 2014; Ergen ve Tunçer 2015). Modifiye edilmiş Weber sayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Wang and Mamishev 2012). ρ

akışkan yoğunluğunu, D_0 nozul dış çapı (karakteristik uzunluk), σ akışkanın yüzey gerilimini, Q toplam hacimsel debiyi, D_i nozul iç çapını ve N ise nozul sayısını göstermektedir.

$$We = \frac{16 \rho D_0}{\sigma} \times \frac{Q^2}{(N\pi D_i^2)^2} \quad (6)$$

Elektrik Weber Sayısı, elektrik kuvvetlerinin yüzey gerilimine oranını ifade eder. Elektrik alanının akışı nasıl etkilediğini belirlemek için kullanılır. Elektrik Weber Sayısı'nın artışıyla sprey damlacıklarının ayrılmaları da artmaktadır (Eow *et al.* 2001). Elektrik Weber Sayısının belirlenmesi için aşağıdaki eşitlik kullanılır (Wang and Mamishev 2012). D_0 nozul dış çapı, E_0 ortalama elektrik alan şiddeti, ε akışkan elektrik geçirgenliği ve σ akışkanın yüzey gerilimini ifade etmektedir.

$$We_E = \frac{\varepsilon E_0^2 D_0}{2\sigma} \quad (7)$$

Elektrik Weber Sayısı'nın hesap edilmesinde kullanılan elektrik alan eşitliği aşağıdaki gibidir. r_0 nozul dış yarıçapını, H nozul – ısı alıcı arası mesafeyi, V ise uygulanan gerilimi ifade etmektedir (Zhong *et al.* 2009; Wang and Mamishev 2012).

$$E_0 = \frac{\sqrt{2} V}{r_0 \ln\left(\frac{AH}{r_0}\right)} \quad (8)$$

Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmanın sonucunda, belirsizlik analizi aşağıdaki eşitlikle yapılmıştır.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0,5} \quad (9)$$

Eşitlikte belirtilen (x_1, x_2, \dots, x_n) bağımsız değişkenleri, R bağımsız değişkenlerin fonksiyonu, (w_1, w_2, \dots, w_n) bağımsız değişkenlerin belirsizliği, w_R ise sistem belirsizliğini ifade etmektedir (Kline and McClintock, 1953).

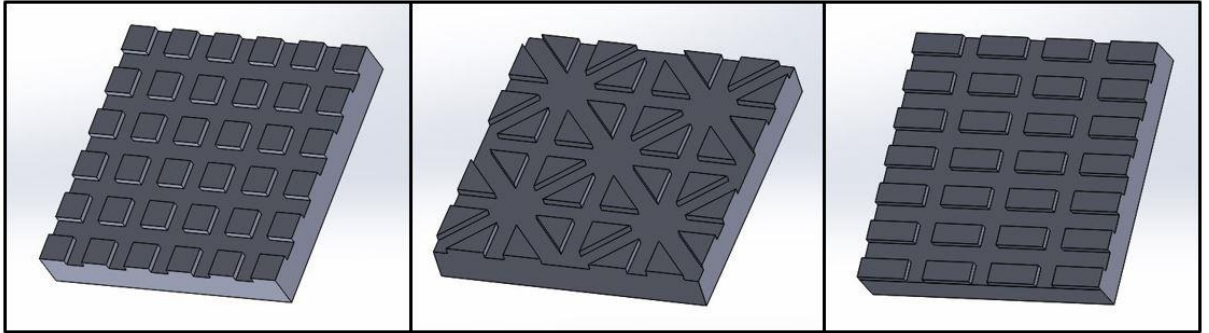
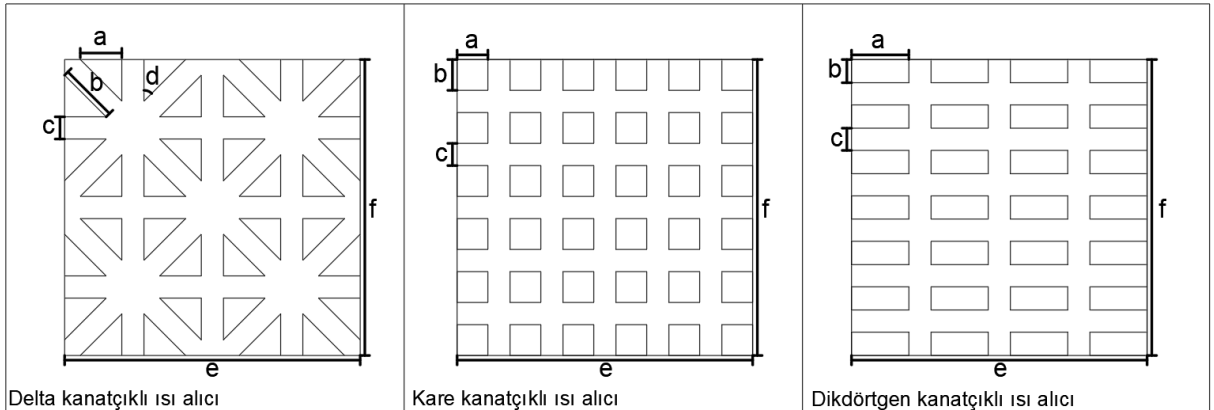
Yukarıda belirtilen eşitlik kullanılarak, deneysel belirsizlik kanatçık iyileştirme oranı (KIO) için % 0,4, ısı taşınım katsayısı (h) için % 0,95, Elektrik Weber Sayısı için (We_E) %2,95, Weber Sayısı (We) içinse %3,47 olarak hesaplanmıştır. Deneysel kullanılan cihazların hassasiyeti ve belirsizliği aşağıda verilmiştir (**Tablo 11**).

Tablo 11. Kullanılan Cihazların Hassasiyeti ve Belirsizliği

Cihaz	Hassasiyet (%)	Belirsizlik
Veri kaydedici (°C)	$\pm 0,2$	± 1 C°
Şırınga Pompası (ml)	± 1	$\pm 0,5$ ml
Statik elektrik yükleyici (kV)	$\pm 0,5$	$\pm 0,1$ kV
DC güç kaynağı (V)	$\pm 0,01$	± 5 mV
(A)	$\pm 0,2$	± 3 mA

Isı Alıcıların Tasarımı

Isı alıcıların optimizasyonu için ilk olarak kare, dikdörtgen ve delta olmak üzere üç adet ısı alıcı geometrisi tasarlanmıştır (Şekil 29). Etkin soğutmayı sağlayan geometrinin belirlenebilmesi için farklı geometrilerde, aynı yüzey alanına sahip ısı alıcılar belirlenmiştir. Tasarlanan ısı alıcıların taban kalınlıkları 5 mm, kanat yükseklikleri 1 mm' dir. Isı alıcılar Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuvarında bulunan metal CNC ile üretilmiştir. Tasarlanan ısı alıcıların geometrileri Şekil 30' da verilmiş olup, ısı alıcı ölçüleri Tablo 12' de verilmiştir.

**Şekil 29.** Tasarımı yapılan ısı alıcılar**Şekil 30.** Tasarımı yapılan ısı alıcı geometrileri

Tablo 12. Tasarlanan Isı Alıcı Ölçüleri

Isı alıcı	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (°)	e (mm)	f (mm)
Delta K.	5,63	7,96	3	45	40	40
Dikdörtgen K.	4,17	4,17	3	-	40	40
Delta K.	7,75	3,14	3	-	40	40

Isı alıcılar kolay işlenebilir olması sebebiyle 5000 serisi alüminyum plakalar kullanılarak üretilmiştir. Yüzey alanı 1600 mm^2 olan düzlem plakaya 1 mm kanat yüksekliğinde yukarıdaki geometrilerde kanatçıklar eklendiğinde, delta kanatçıklı ısı alıcının yüzey alanı 2215 mm^2 , dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcının 2200 mm^2 ve kare kanatçıklı ısı alıcının 2209 mm^2 olmaktadır. Böylece tasarlanan bütün ısı alıcılarda düzlem plakaya göre yüzey artışları yaklaşık %38 olarak gerçekleşmiştir.

Tam Faktöriyel Metodu

Deney tasarımı, sonuç değişkenine etkileyen değişkenlerin belirlenmesinde ve bu parametrelerin sonuç üzerine etkilerinin araştırılmasında kullanılan bir yöntemdir. Deney tasarımının temel amacı, deney hatalarını minimize etmektir (Hinkelmann and Kempthorne 2008; Şişman ve Demirtaş 2016). Ayrıca deney tasarımı, etkili parametreleri etkisiz parametrelerden ayırarak etkili parametrelerle elde edilen optimum parametreler vasıtasıyla hatayı en aza indirmeyi amaçlar (Krottmair 1993; Şişman ve Demirtaş 2016). Deney tasarımında yaygın şekilde kullanılan yöntemlerden biri tam faktöriyel deney tasarımıdır.

R. A. Fisher tarafından geliştirilen faktöriyel deney tasarımları, parametrelerin birbirleriyle etkileşimleri durumunda kullanılan deney tasarımı yöntemlerindedir (İzgiz 1999; Gündoğan 2015). Faktöriyel deney tasarımıyla kast edilen, her deney veya deney tekrarında, her parametrenin bütün seviyeleriyle birlikte kombinasyonlarının denenmesidir (Montgomery 2005; Gündoğan 2015). Bu durum göz önüne alındığında, parametre etkilerinin değerlendirilmesi için en etkili tasarım yöntemi tam faktöriyel metodu olduğu görülmektedir. Tam faktöriyel deney tasarımında her bir değişken parametrenin sonuç parametresi üzerine etkisi ve parametrelerin birleşik etkilerini belirlenebilmesi için kullanılan etkili bir metottur (Şişman ve Demirtaş 2016).

Sonuç parametresinin faktör seviyesine bağlılığının ölçüldüğü deneylerde, klasik tasarım yerine faktöriyel tasarım kullanılmasının iki temel nedeni vardır:

- 1) Faktöriyel deneyler, parametreler arasında etkileşimleri belirleyerek hesaplama yapılmasını sağlar.

- 2) Eğer parametrelerin etkisi toplanabilir ise, bu durumda aynı kesinliği elde etmek için faktöriyel tasarım klasik yaklaşımdan daha az sayıda ölçüme ihtiyaç duyar (Miller and Miller 2008; Gündoğan 2015).

Tam faktöriyel deney tasarımının en önemli avantajı, bütün parametrelerin sonuç parametresi üzerinde gösterdiği etkiyi ve parametrelerin birbirleriyle etkileşiminin kolay bir şekilde irdelenebildiği bir tasarım yöntemi olmasıdır. Bütün değişken parametreleri kullanarak deneyleri yapmasından dolayı zaman ve maliyet açısından dezavantaja sahip bir deney tasarım metodudur (Şişman ve Demirtaş 2016).

Bu deney tasarım yönteminde analizlerin yapılmasında varyans ve regresyon analizi kullanılmaktadır. Varyans ve regresyon analizi ile değişken parametrelerin deney üzerine etkileri hesaplanabilir (Breyfogle 2003). Varyans analizi hangi işlem üzerinde hangi değişken parametrelerin ne kadar etkili oldukları verisini sunarken (Yang ve Tarng 1998; Gündoğan 2015), regresyon analizi ise, bağımsız girdi değişken parametresi ve bağımlı çıktı değişken parametresi arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılır (Hamzaçebi ve Kutay 2003; Gündoğan 2015).

Sayısal Analiz

Elektrosprey soğutma deneyleri ardından geleneksel sprej soğutma metodu ısı transferi analizi için ANSYS Fluent paket programı kullanılarak modellenmiş, soğutma performansı elektrosprey ile kıyaslanmıştır. ANSYS Fluent Multiphase modu kullanılarak sayısal analizi yapılan geleneksel sprej soğutma için aşağıdaki şartlar uygulanmıştır.

- ❖ Soğutucu akışkan etanol kullanılmıştır.
- ❖ Isı alıcı-nozul arası mesafe 20 mm olarak modellenmiştir.
- ❖ Geleneksel sprej olarak hava destekli nozul kullanılmıştır.
- ❖ Soğutucu akışkan debisi 0,2 ml/dk olarak uygulanmıştır.

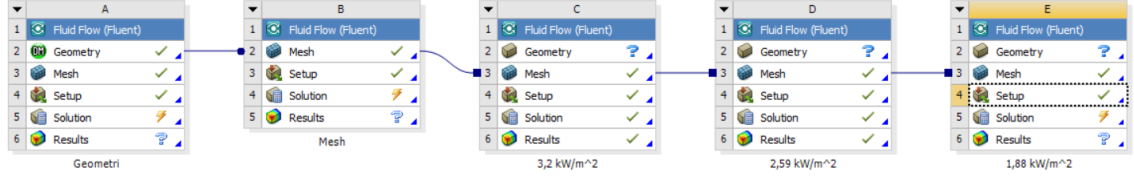
ANSYS Fluent programı ile yapılan ısı transfer analizlerinde kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklemler sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\rho \vec{v}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \rho + \rho \vec{v} \cdot \vec{v} = 0 \quad (11)$$

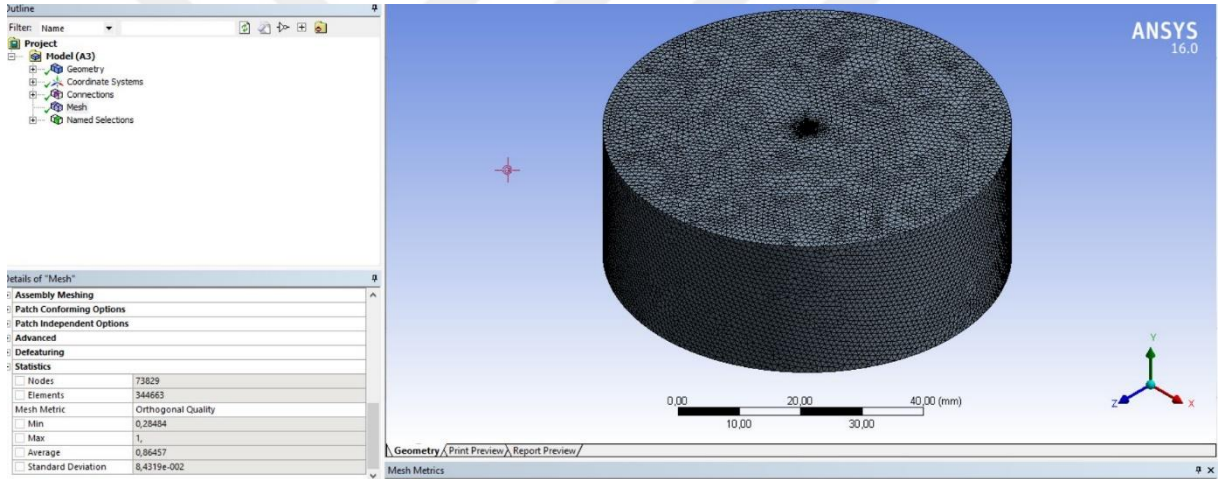
$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (12)$$

Geleneksel spray için sayısal analiz $3,2-2,59-1,88 \text{ kW/m}^2$ ısı akıları için gerçekleştirilmiştir. Ansys Fluent yazılımına düzlem plaka geometrisi tanıtılmıştır. Ansys Workbench arayüzü Şekil 31'deki gibidir.

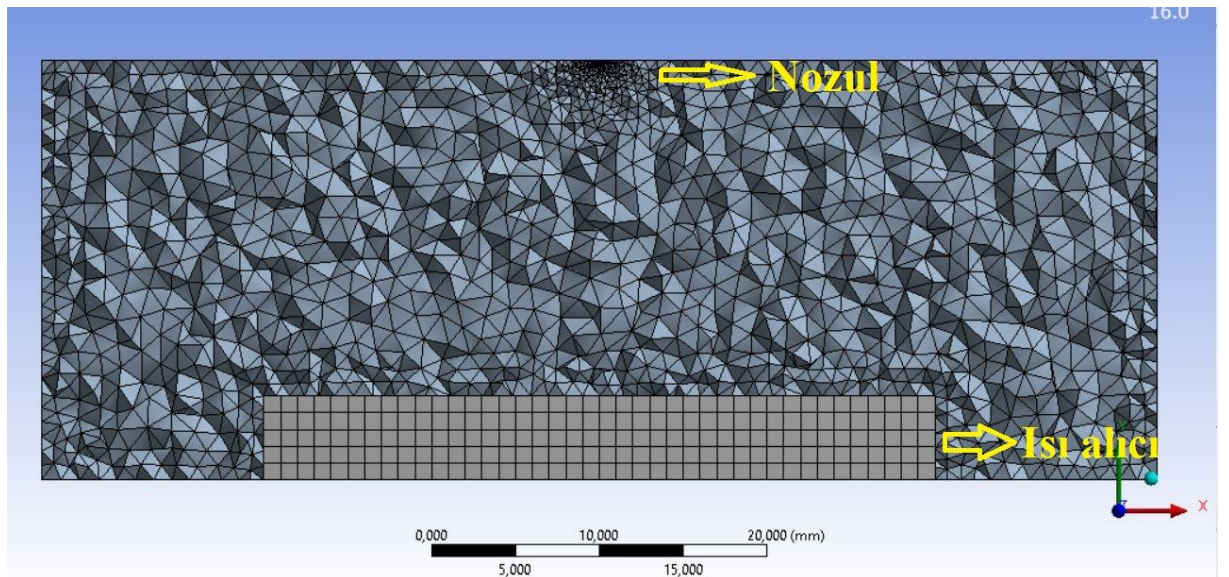


Şekil 31. Ansys Workbench arayüzü

Düzlem plaka geometrisinin Workbench' e tanıtılmasının ardından 0,61 mm iç çapına sahip hava destekli nozul programa tanıtılmış ve mesh elemanları oluşturulmuştur. Mesh sayısı doğru sonucu yaklaşmak açısından önem arz etmektedir. Oluşturulan mesh görünümü Şekil 32-33'deki gibidir.



Şekil 32. Kontrol hacmi mesh görüntüsü



Şekil 33. Kontrol hacmi mesh kesiti

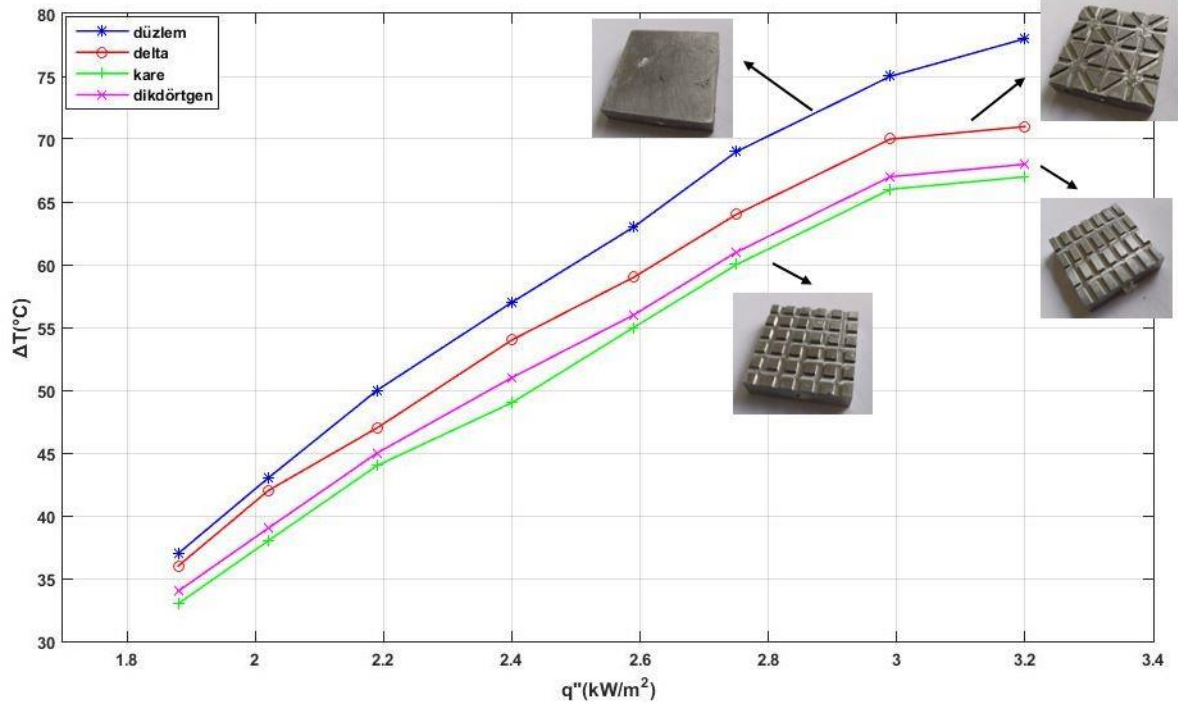
Mesh oluşturulduktan sonra çözüme geçilmiştir. Bu bölümde elektrosprey soğutma deneylerinin kararlı hale geldiği süre baz alınarak “Transient-Zamana Bağlı” analiz tanımlaması yapılıp, türbülans modeli tanımlanarak çok fazlı çözüm başlatılmıştır.



ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Optimum Isı Alıcı Geometrisinin Belirlenmesi

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında farklı geometrilere ısı alıcılar tasarlanarak optimum ısı alıcı geometrisinin tespiti hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk etapta delta, dikdörtgen ve kare olmak üzere üç çeşit ısı alıcı tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan bu üç ısı alıcının ortak özelliği yüzey alanlarının eşit oluşudur. Bu ısı alıcılarda en iyi soğutmayı sağlayan geometrinin tespiti için deneyler 20 G nozul iç çapında, 4,4 kV gerilimde, 0,2 ml/dk ve 20 mm nozul-ısı alıcı (substrate) arası mesafede gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri, kararlı ısı alıcı yüzey sıcaklık şartlarının kolay yakalanabilmesi için, sabit ve kararlı damlacık çapının üretildiği koni jet modunda yapılacak şekilde belirlenmiştir (Wang and Mamishev 2012; Jaworek and Krupa 1999). Soğutucu akışkan olarak etanol kullanılmıştır. Isı transferi analizi için deneyler sekiz sabit ısı akısı değerinde (3,2-2,99-2,75-2,59-2,4-2,19-2,02-1,88 kW/m²) yapılmıştır. Belirlenen sabit ısı akısı değerleri ise bir mikroişlemcinin optimum 45 °C sıcaklık değerinde kullanılması gerektiği (Wang and Mamishev 2012) ve sıcaklığının 100 °C' yi aşmaması gerektiği göz önüne alınarak (Tan vd. 2015) belirlenmiştir. En iyi soğutmanın elde edildiği geometri **Şekil 34'** de görüldüğü üzere kare kanatçıklı ısı alıcıda elde edilmiştir.

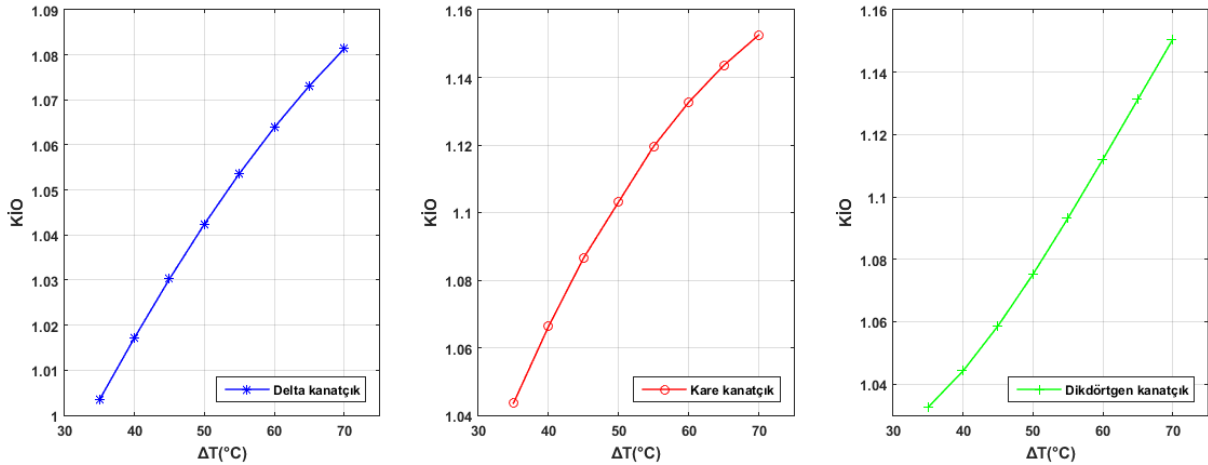


Şekil 34. Farklı geometrilere sahip ısı alıcılarındaki sıcaklık farkı-ısı akısı grafiği

Grafikte y ekseninde yer alan sıcaklık farkı ifadesi (ΔT), ısı alıcı yüzeyinin ortalama sıcaklığı ile ortam sıcaklığının farkıdır. Literatürde bazı çalışmalarda ortalama yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı farkı alınırken(Wang and Mamishev 2012a;2012b), bazı çalışmalarda da yüzey sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı farkı alınmıştır (Kim *et al.* 2020; Robinson and Gibbons 2014). Bu çalışmada sabit ortam şartlarında ve düşük debilerde çalışıldığı için ortam sıcaklığı kullanılmıştır.

Deneyle sonuçunda en iyi soğutmanın kare kanatçıklı ısı alıcıda olduğu belirlenmiştir. Kare kanatçıklı ısı alıcının ardından dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcıda, daha sonra ise delta kanatçıklı ısı alıcıda düzlem plakaya göre daha iyi soğutma elde edildiği tespit edilmiştir. En yüksek ısı akısında yüzey sıcaklığı, düzlem plakaya göre kare kanatçıklı ısı alıcıda %13,8, dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcıda %13, delta kanatçıklı ısı alıcıda ise %9,3 düşmüştür. En düşük ısı akısında ise yüzey sıcaklığı, düzlem plakaya göre kare kanatçıklı ısı alıcıda %11,3, dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcıda %8,9, delta kanatçıklı ısı alıcıda ise %3,2 düşmüştür.

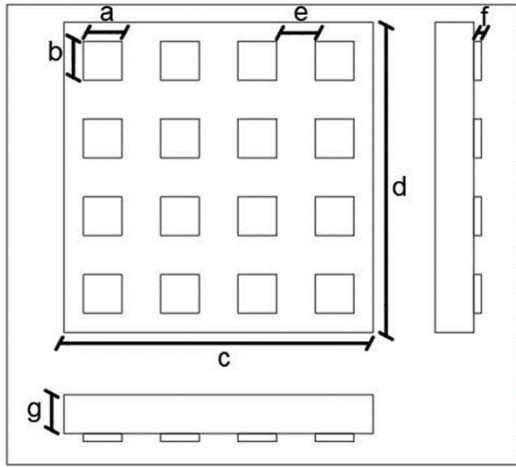
Deneyle farklı kanatçık geometrilerine sahip ısı alıcıların kıyaslanmasının yanı sıra bu ısı alıcıları düzlem plakaya göre ısı transferine etki oranları da belirlenmiştir. Bu oran kanatçık iyileştirme oranı (KİO) olarak ifade edilmiştir. KİO-sıcaklık farkı değişim grafiği Şekil 35' de verilmiştir.



Şekil 35. KİO-sıcaklık farkı değişim grafiği

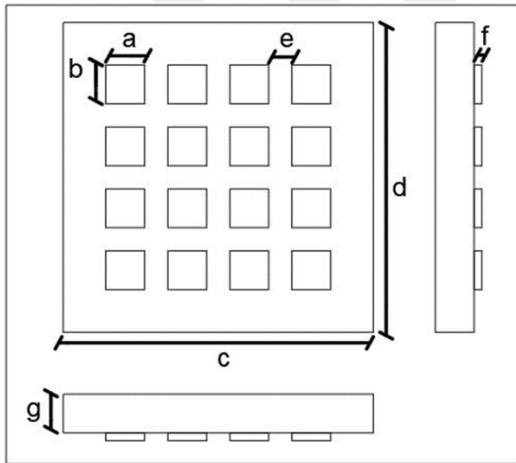
Kanatçık iyileştirme oranının, yüzey sıcaklığı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Isı alıcı yüzeyinden en etkili şekilde ısının atıldığı geometri olan kare kanatçıklı ısı alıcıda düzlem plakaya göre %15,4 daha iyi ısı uzaklaştırılmıştır. Düzlem plakaya göre sabit yüzey sıcaklıklarında, dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcıda %14,9, delta kanatçıklı ısı alıcıda ise %8 daha iyi ısı atılmıştır. En iyi ısı transferinin gerçekleştiği kare kanatçıklı ısı alıcının optimizasyonu

için üç adet kanat genişliğinde (3-4-5 mm), üç adet kanatlar arası mesafede (1-3-5 mm) ve üç adet kanatçık yüksekliğinde (1-2-3 mm) olmak üzere toplam 27 adet ısı alıcı geometrisi tasarlanmıştır. Tasarlanan ısı alıcı geometrileri aşağıdaki gibidir.



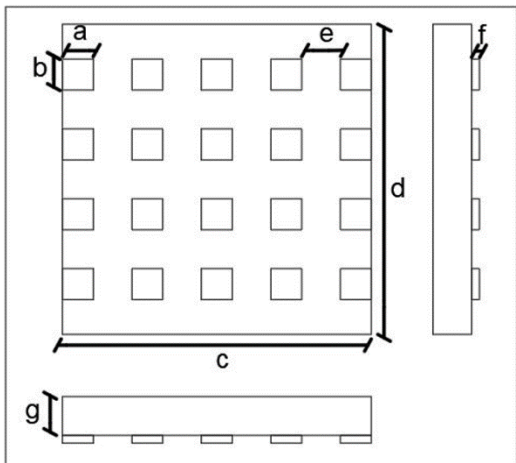
Parametre	Kare-1	Kare-2	Kare-3	
a	Kanat eni (mm)	5	5	5
b	Kanat boyu (mm)	5	5	5
c	Taban eni (mm)	40	40	40
d	Taban boyu (mm)	40	40	40
e	Kanatlar arası mesafe (mm)	5	5	5
f	Kanat yüksekliği (mm)	1	2	3
g	Taban yüksekliği (mm)	5	5	5
A	Isı alıcı yüzey alanı (mm ²)	1920	2240	2560

Şekil 36. Kare-1/2/3 ısı alıcıların geometrik özellikleri



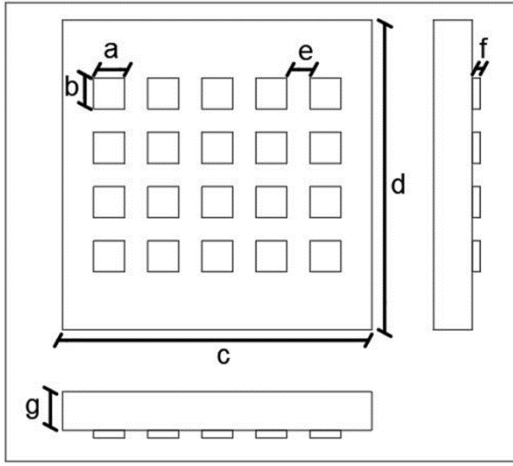
Parametre	Kare-4	Kare-5	Kare-6	
a	Kanat eni (mm)	5	5	5
b	Kanat boyu (mm)	5	5	5
c	Taban eni (mm)	40	40	40
d	Taban boyu (mm)	40	40	40
e	Kanatlar arası mesafe (mm)	3	3	3
f	Kanat yüksekliği (mm)	1	2	3
g	Taban yüksekliği (mm)	5	5	5
A	Isı alıcı yüzey alanı (mm ²)	1920	2240	2560

Şekil 37. Kare-4/5/6 ısı alıcıların geometrik özellikleri



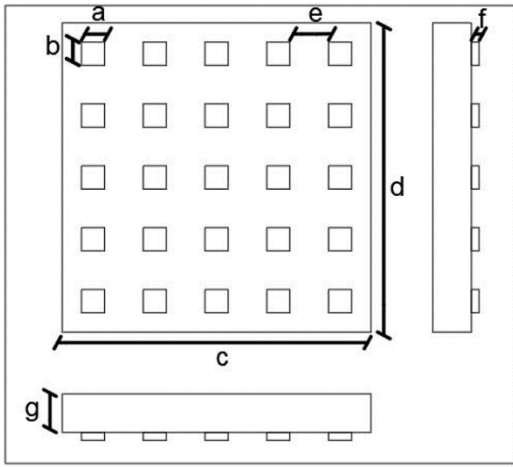
Parametre	Kare-7	Kare-8	Kare-9	
a	Kanat eni (mm)	4	4	4
b	Kanat boyu (mm)	4	4	4
c	Taban eni (mm)	40	40	40
d	Taban boyu (mm)	40	40	40
e	Kanatlar arası mesafe (mm)	5	5	5
f	Kanat yüksekliği (mm)	1	2	3
g	Taban yüksekliği (mm)	5	5	5
A	Isı alıcı yüzey alanı (mm ²)	1920	2240	2560

Şekil 38. Kare-7/8/9 ısı alıcıların geometrik özellikleri



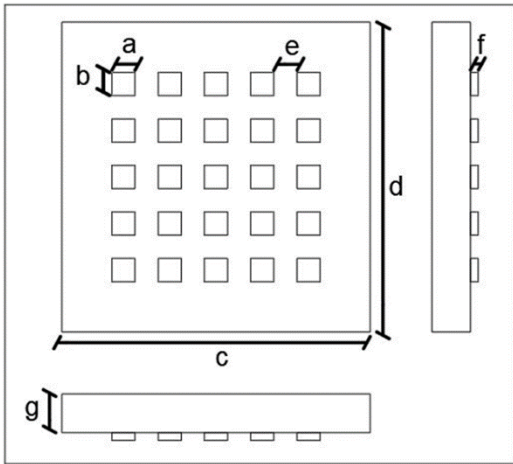
Parametre	Kare-10	Kare-11	Kare-12	
a	Kanat eni (mm)	4	4	4
b	Kanat boyu (mm)	4	4	4
c	Taban eni (mm)	40	40	40
d	Taban boyu (mm)	40	40	40
e	Kanatlar arası mesafe (mm)	3	3	3
f	Kanat yüksekliği (mm)	1	2	3
g	Taban yüksekliği (mm)	5	5	5
A	Isı alıcı yüzey alanı (mm ²)	1920	2240	2560

Şekil 39. Kare-10/11/12 ısı alıcıların geometrik özellikleri



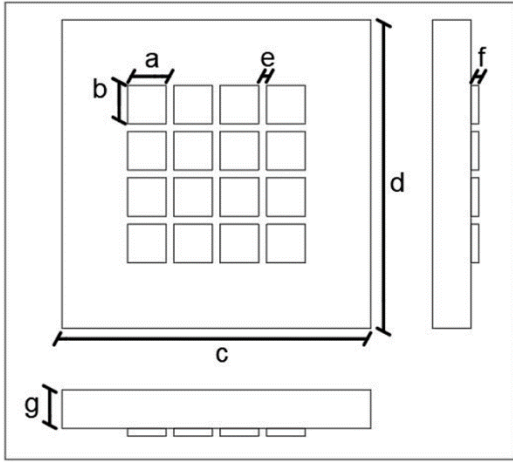
Parametre	Kare-13	Kare-14	Kare-15	
a	Kanat eni (mm)	3	3	3
b	Kanat boyu (mm)	3	3	3
c	Taban eni (mm)	40	40	40
d	Taban boyu (mm)	40	40	40
e	Kanatlar arası mesafe (mm)	5	5	5
f	Kanat yüksekliği (mm)	1	2	3
g	Taban yüksekliği (mm)	5	5	5
A	Isı alıcı yüzey alanı (mm ²)	1900	2200	2500

Şekil 40. Kare-13/14/15 ısı alıcıların geometrik özellikleri



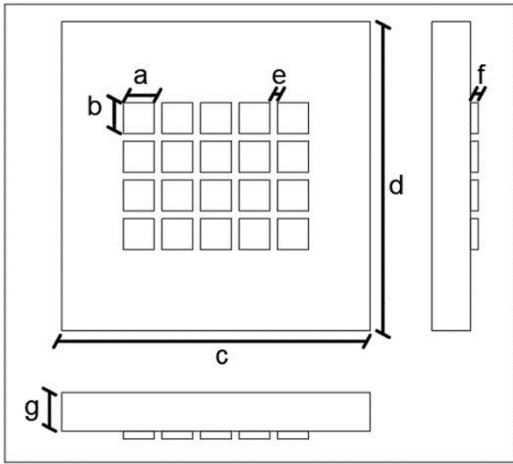
Parametre	Kare-16	Kare-17	Kare-18	
a	Kanat eni (mm)	3	3	3
b	Kanat boyu (mm)	3	3	3
c	Taban eni (mm)	40	40	40
d	Taban boyu (mm)	40	40	40
e	Kanatlar arası mesafe (mm)	3	3	3
f	Kanat yüksekliği (mm)	1	2	3
g	Taban yüksekliği (mm)	5	5	5
A	Isı alıcı yüzey alanı (mm ²)	1900	2200	2500

Şekil 41. Kare-16/17/18 ısı alıcıların geometrik özellikleri



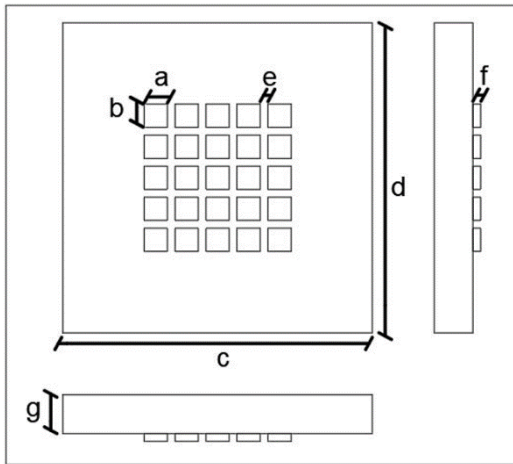
Parametre	Kare-19	Kare-20	Kare-21	
a	Kanat eni (mm)	5	5	5
b	Kanat boyu (mm)	5	5	5
c	Taban eni (mm)	40	40	40
d	Taban boyu (mm)	40	40	40
e	Kanatlar arası mesafe (mm)	1	1	1
f	Kanat yüksekliği (mm)	1	2	3
g	Taban yüksekliği (mm)	5	5	5
A	Isı alıcı yüzey alanı (mm ²)	1920	2240	2560

Şekil 42. Kare-19/20/21 ısı alıcıların geometrik özellikleri



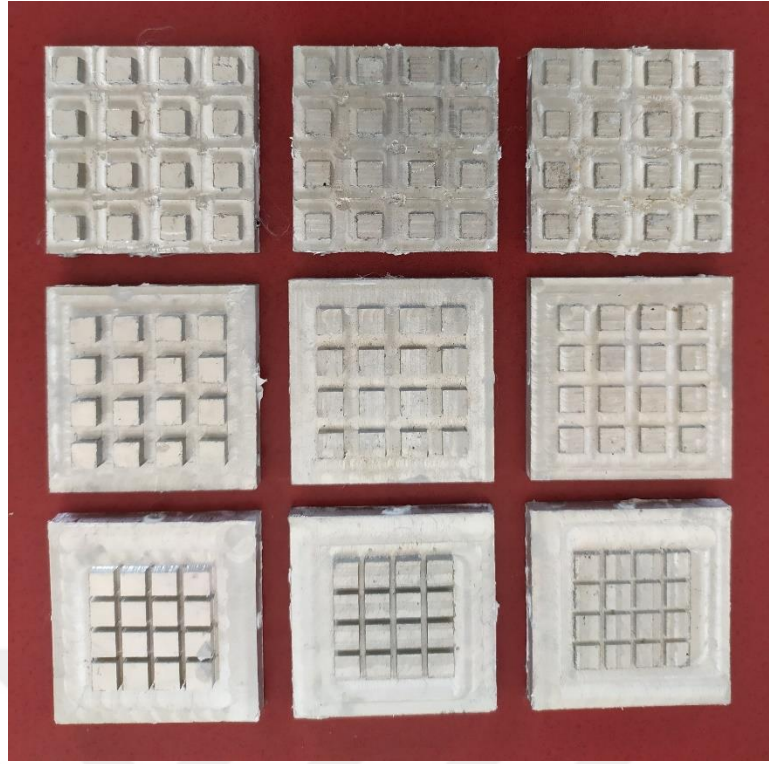
Parametre	Kare-22	Kare-23	Kare-24	
a	Kanat eni (mm)	4	4	4
b	Kanat boyu (mm)	4	4	4
c	Taban eni (mm)	40	40	40
d	Taban boyu (mm)	40	40	40
e	Kanatlar arası mesafe (mm)	1	1	1
f	Kanat yüksekliği (mm)	1	2	3
g	Taban yüksekliği (mm)	5	5	5
A	Isı alıcı yüzey alanı (mm ²)	1920	2240	2560

Şekil 43. Kare-22/23/24 ısı alıcıların geometrik özellikleri

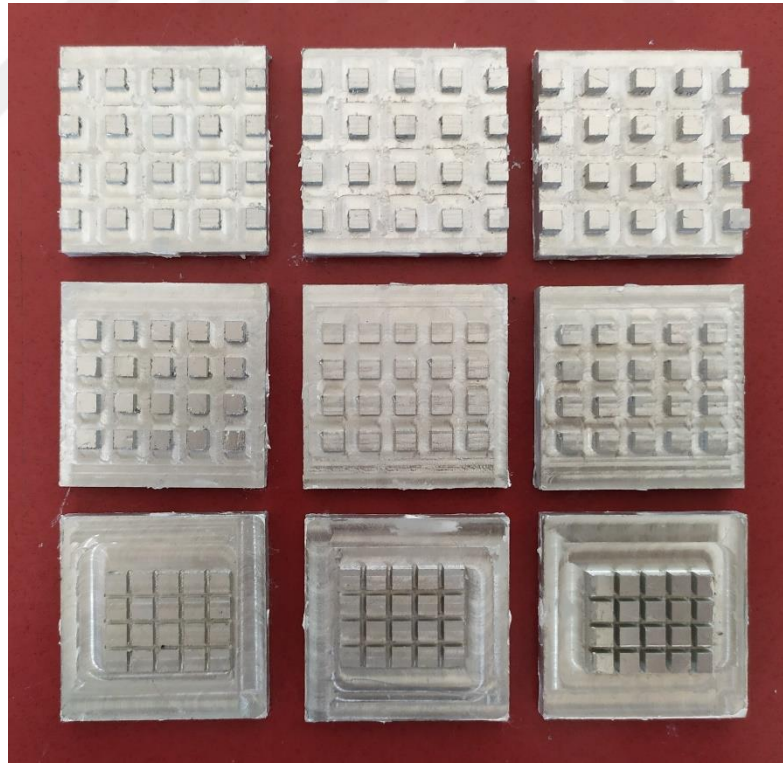


Parametre	Kare-25	Kare-26	Kare-27	
a	Kanat eni (mm)	3	3	3
b	Kanat boyu (mm)	3	3	3
c	Taban eni (mm)	40	40	40
d	Taban boyu (mm)	40	40	40
e	Kanatlar arası mesafe (mm)	1	1	1
f	Kanat yüksekliği (mm)	1	2	3
g	Taban yüksekliği (mm)	5	5	5
A	Isı alıcı yüzey alanı (mm ²)	1900	2200	2500

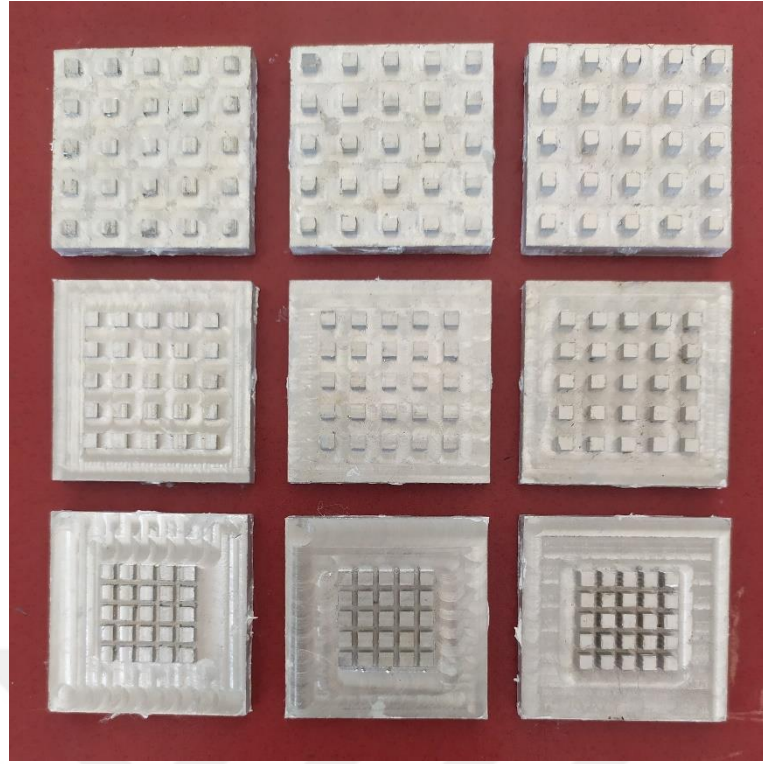
Şekil 44. Kare-25/26/27 ısı alıcıların geometrik özellikleri



Şekil 45. Üretimi yapılan 5 mm kanat genişliğindeki ısı alıcılar



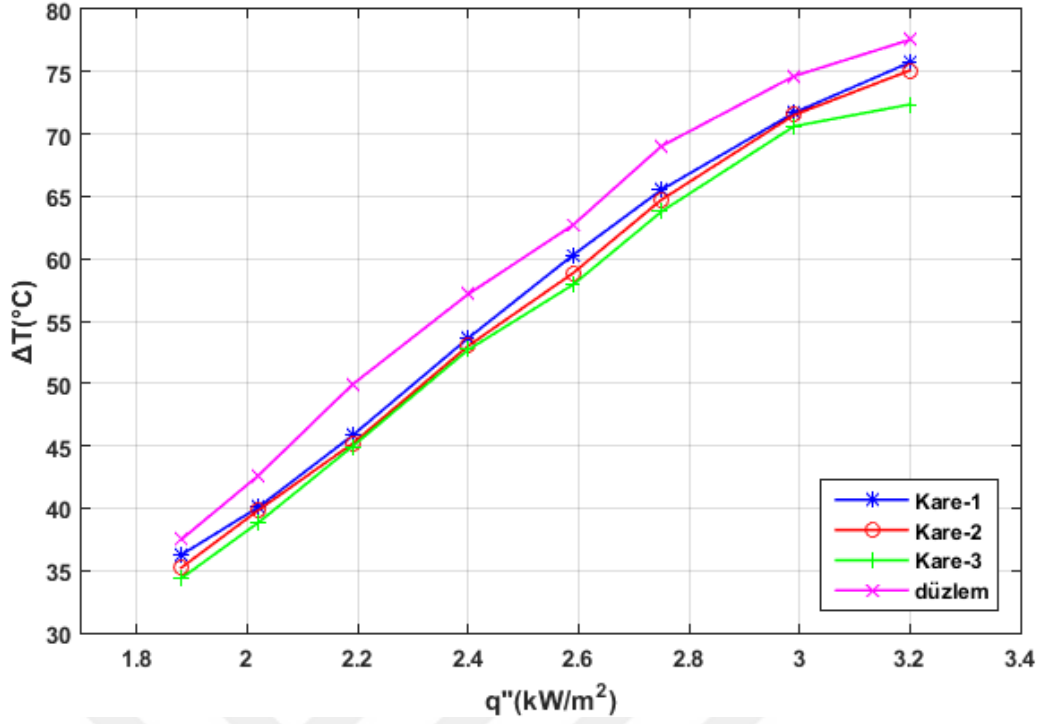
Şekil 46. Üretimi yapılan 4 mm kanat genişliğindeki ısı alıcılar



Şekil 47. Üretimi yapılan 3 mm kanat genişliğindeki ısı alıcılar

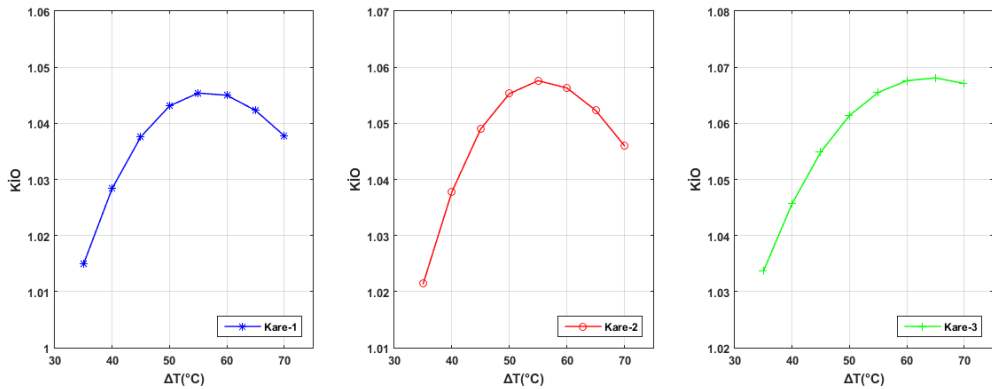
Tasarımı yapılan kare kanatçıklı ısı alıcılar, 9 farklı geometri (3 adet kanat genişliği, 3 adet kanatlar arası mesafe) ve 3 farklı kanat yüksekliğinden oluşmaktadır. Bu ısı alıcıların ortak özelliği, her bir kanat yüksekliği için kendi içerisinde yüzey alanlarının aynı oluşudur. 1 mm kanat yüksekliğine sahip ısı alıcılar düzlem plakaya göre %19, 2 mm kanat yüksekliğine sahip ısı alıcılar %38, 3 mm kanat yüksekliğine sahip ısı alıcılar %57 daha yüksek alana sahiptirler.

Geometrik parametrelerin ısı transferine etkilerinin araştırılması için deneyler, 4,4 kV gerilim, 20 G nozul çapı, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe, 0,2 ml/dk debi ve 3,2-2,99-2,75-2,59-2,4-2,19-2,02-1,88 kW/m² ısı akılarında yapılmıştır. Soğutucu akışkan olarak etanol kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki gibidir.



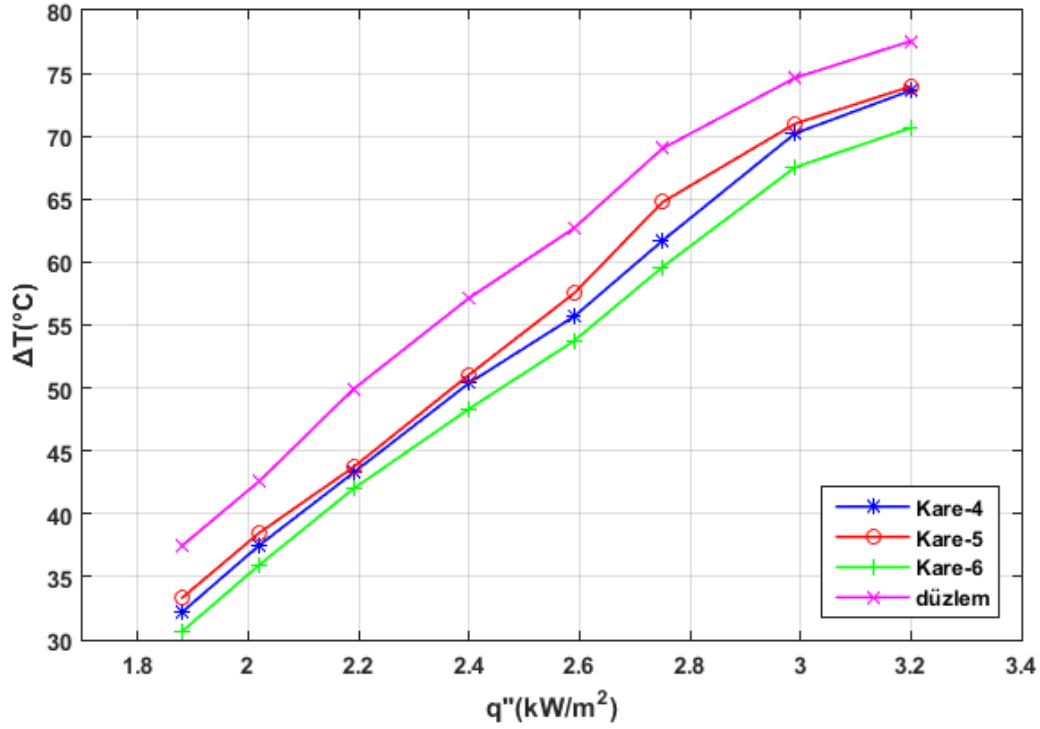
Şekil 48. Kare-1/2/3 ısı alıcılarının ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği

Kare-1/2/3 ısı alıcılarda ısı akısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Düzlem plakaya göre en iyi soğutma 3 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-3 ısı alıcıda gerçekleşmiştir. Kare-1/2/3 ısı alıcılarda kanat yüksekliği arttıkça ısı transferi de artmıştır. Sıcaklık farkı, en yüksek ısı akısında düzlem plakaya göre Kare-3 ısı alıcıda %6,7, Kare-2 ısı alıcıda %3,2, Kare-1 ısı alıcıda %2,3 azalmıştır. Sıcaklık farkı, en düşük ısı akısında ise düzlem plakaya göre Kare-3 ısı alıcıda %8,3, Kare-2 ısı alıcıda %6, Kare-1 ısı alıcıda %3,3 azalmıştır (Şekil 48).



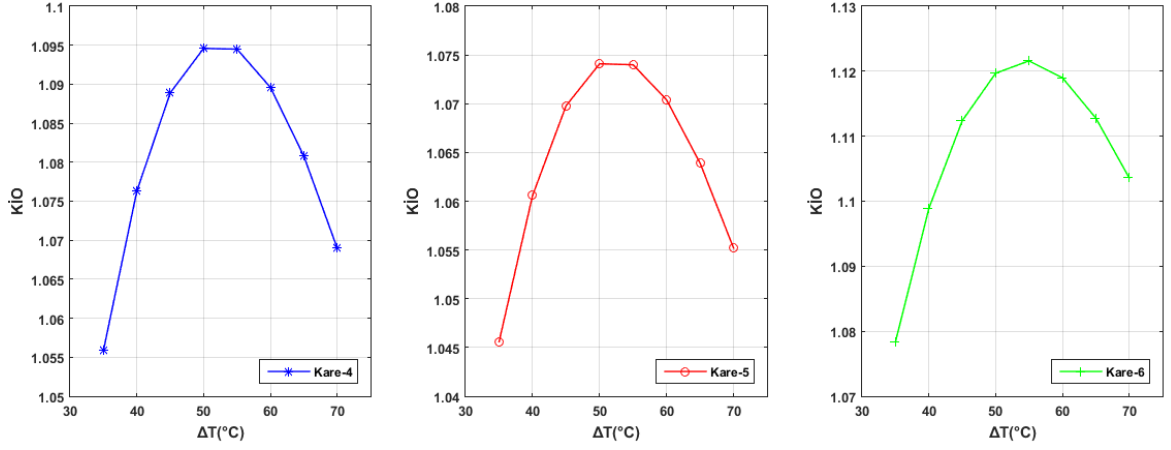
Şekil 49. Kare-1/2/3 KİO-yüzey sıcaklık farkı grafiği

Kanat iyileştirme oranının en iyi Kare-3 ısı alıcıda gerçekleştiği görülmektedir. Kare-3 ısı alıcıda maksimum %6,8, Kare-2 ısı alıcıda %5,8, Kare-1 ısı alıcıda %4,5 ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Kare-1/2 ısı alıcılar için kritik sıcaklık farkının 55 °C olduğu, Kare-3 ısı alıcı için ise kritik sıcaklık farkının 65 °C olduğu tespit edilmiştir. Kritik yüzey sıcaklıklarına ulaşana kadar sıcaklık arttıkça kanatçık iyileştirme oranı artmış, kritik yüzey sıcaklığından sonra ise KİO düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 49).



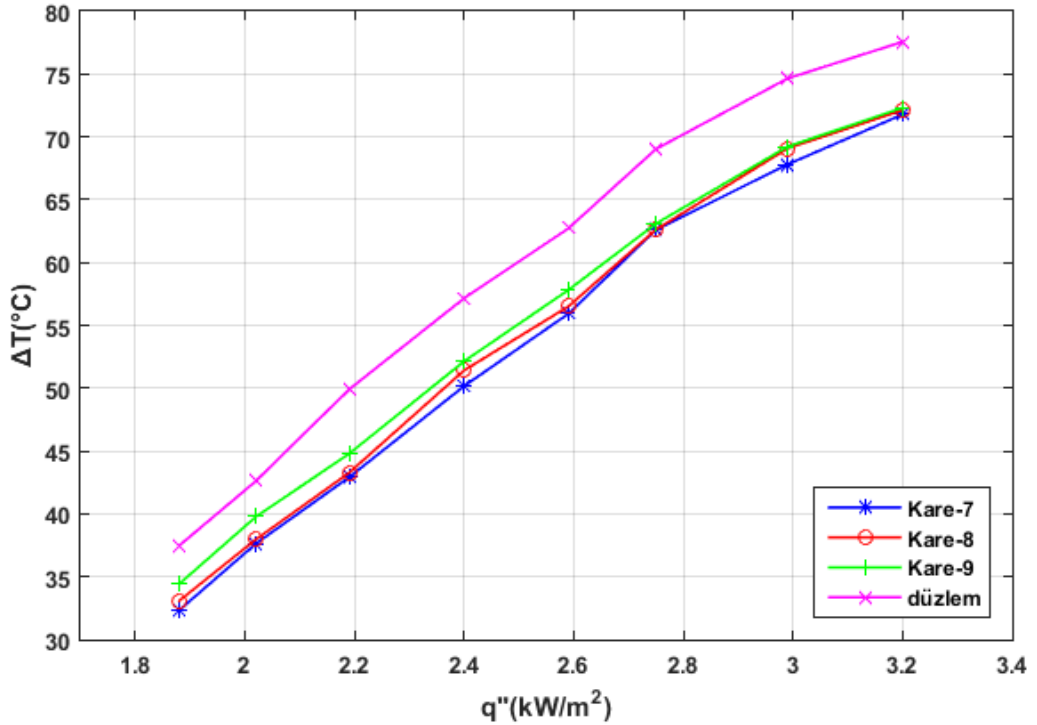
Şekil 50. Kare-4/5/6 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği

Kare-4/5/6 ısı alıcılarda ısı akısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Düzlem plakaya göre en iyi soğutma 3 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-6 ısı alıcıda gerçekleşmiştir. 1 mm kanat yüksekliğine sahip Kare-4 ısı alıcıda, 2 mm kanat yüksekliğine sahip Kare-5 ısı alıcıya göre daha iyi soğutma sağlanmıştır. Sıcaklık farkı, en yüksek ısı akısında düzlem plakaya göre Kare-6 ısı alıcıda %8,9, Kare-5 ısı alıcıda %4,6, Kare-4 ısı alıcıda %5 azalmıştır. Sıcaklık farkı, en düşük ısı akısında ise düzlem plakaya göre Kare-6 ısı alıcıda %18, Kare-5 ısı alıcıda %11, Kare-4 ısı alıcıda %14,1 azalmıştır (Şekil 50).



Şekil 51. Kare-4/5/6 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği

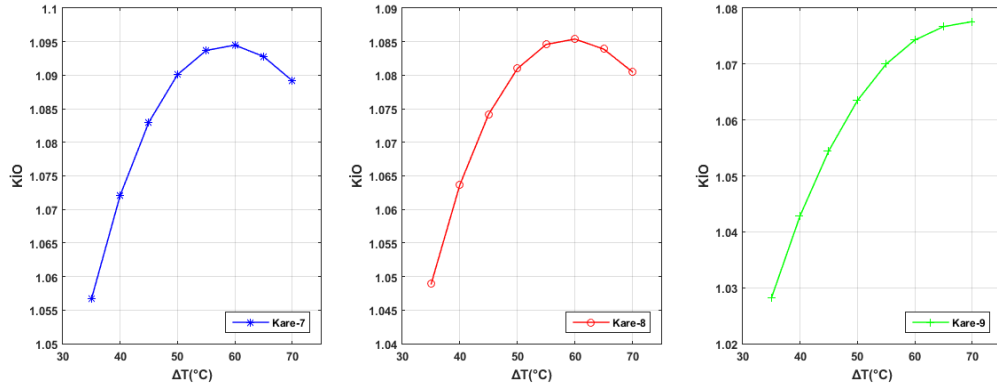
Kanat iyileştirme oranı Kare-6 ısı alıcıda en iyi gerçekleşmiştir. Kare-6 ısı alıcıda maksimum %12,2, Kare-5 ısı alıcıda %7,1, Kare-4 ısı alıcıda %9,5 ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Kare-4/5/6 ısı alıcılar için kritik sıcaklık farkının yaklaşık 55 °C olduğu tespit edilmiştir. Kritik yüzey sıcaklıklarına ulaşana kadar sıcaklık arttıkça kanatçık iyileştirme oranı artmış, kritik yüzey sıcaklığından sonra ise KİO düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 51).



Şekil 52. Kare-7/8/9 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği

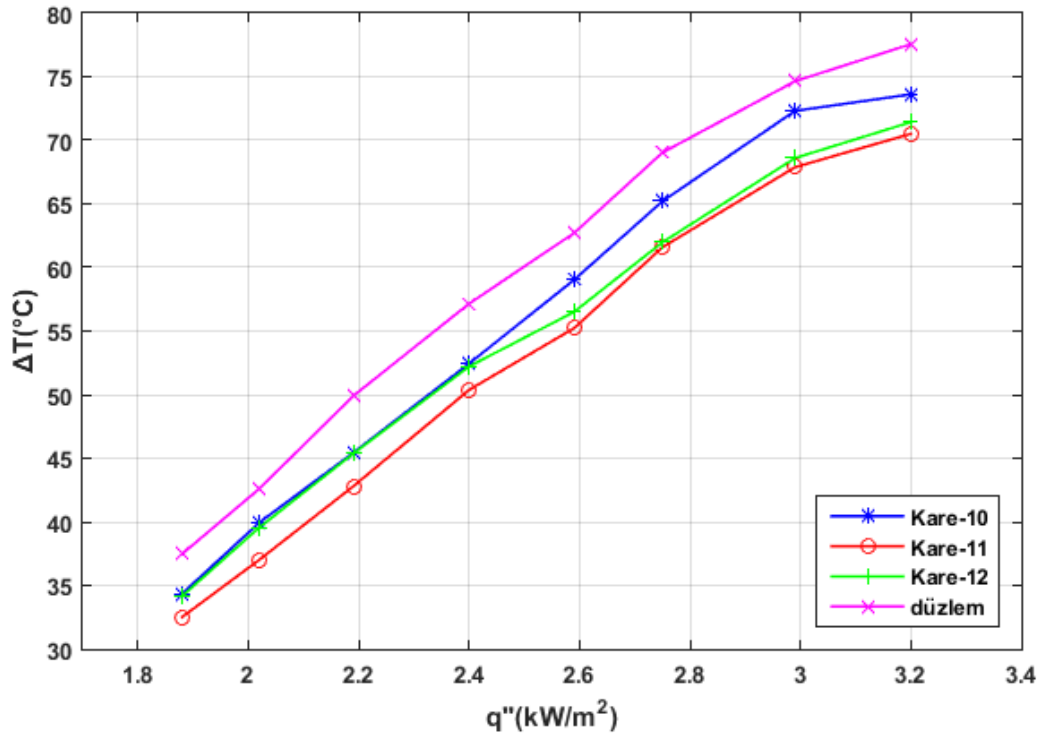
Kare-7/8/9 ısı alıcılarda ısı akısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Düzlem plakaya göre en iyi soğutma 1 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-7 ısı alıcıda gerçekleşmiştir. Kare-7/8/9 ısı alıcılarda kanat yüksekliği arttıkça ısı transferi de azalmıştır.

Sıcaklık farkı, en yüksek ısı akısında düzlem plakaya göre Kare-7 ısı alıcıda %7,5, Kare-8 ısı alıcıda %7, Kare-9 ısı alıcıda %6,8 azalmıştır. Sıcaklık farkı, en düşük ısı akısında ise düzlem plakaya göre Kare-7 ısı alıcıda %13,7, Kare-8 ısı alıcıda %11,47, Kare-9 ısı alıcıda %8,4 azalmıştır (Şekil 52).



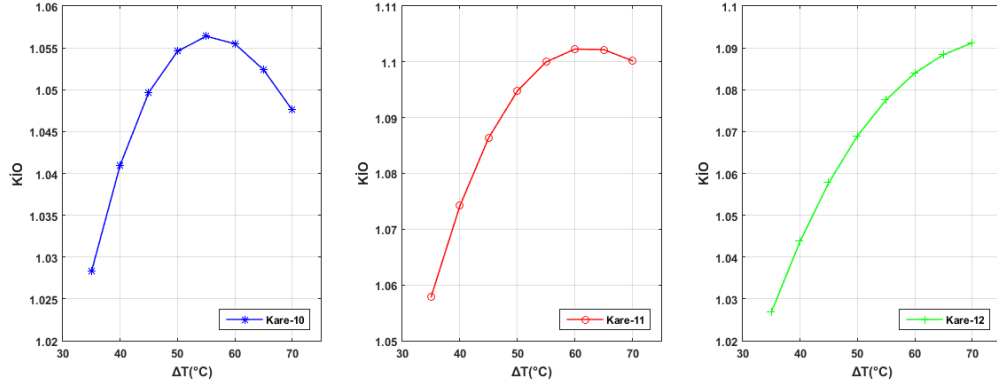
Şekil 53. Kare-7/8/9 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği

Kanat iyileştirme oranı Kare-7 ısı alıcıda en iyi gerçekleşmiştir. Kare-7 ısı alıcıda maksimum %9,5, Kare-8 ısı alıcıda %8,6, Kare-9 ısı alıcıda %7,7 ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Kare-7/8 ısı alıcılar için kritik sıcaklık farkının yaklaşık 60 °C olduğu tespit edilmiştir. Kritik yüzey sıcaklıklarına ulaşıncaya kadar sıcaklık arttıkça kanatçık iyileştirme oranı artmış, kritik yüzey sıcaklığından sonra ise KİO düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 53).



Şekil 54. Kare-10/11/12 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği

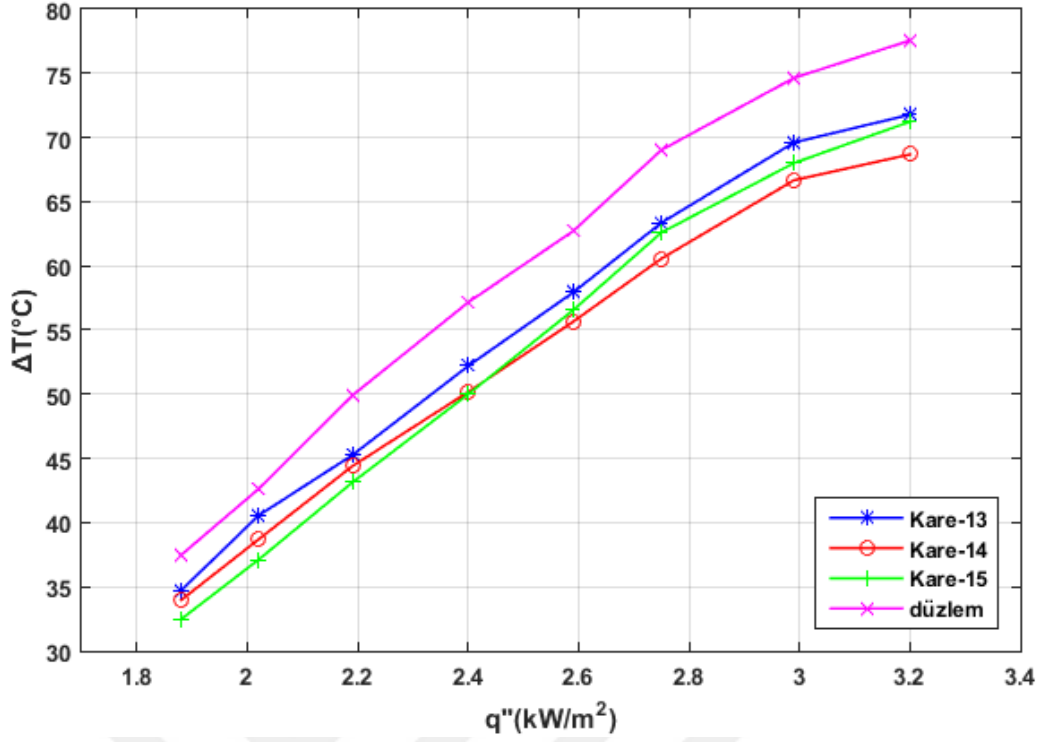
Kare-10/11/12 ısı alıcılarda ısı akısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Düzlem plakaya göre en iyi soğutma 2 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-11 ısı alıcıda gerçekleşmiştir. 3 mm kanat yüksekliğine sahip Kare-12 ısı alıcıda, 1 mm kanat yüksekliğine sahip Kare-10 ısı alıcısına göre daha iyi soğutma sağlanmıştır. Sıcaklık farkı, en yüksek ısı akısında düzlem plakaya göre Kare-11 ısı alıcıda %9,1, Kare-10 ısı alıcıda %5,1, Kare-12 ısı alıcıda %7,9 azalmıştır. Sıcaklık farkı, en düşük ısı akısında ise düzlem plakaya göre Kare-11 ısı alıcıda %13,2, Kare-10 ısı alıcıda %8,3, Kare-12 ısı alıcıda % 8,8 azalmıştır (**Şekil 54**).



Şekil 55. Kare-10/11/12 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği

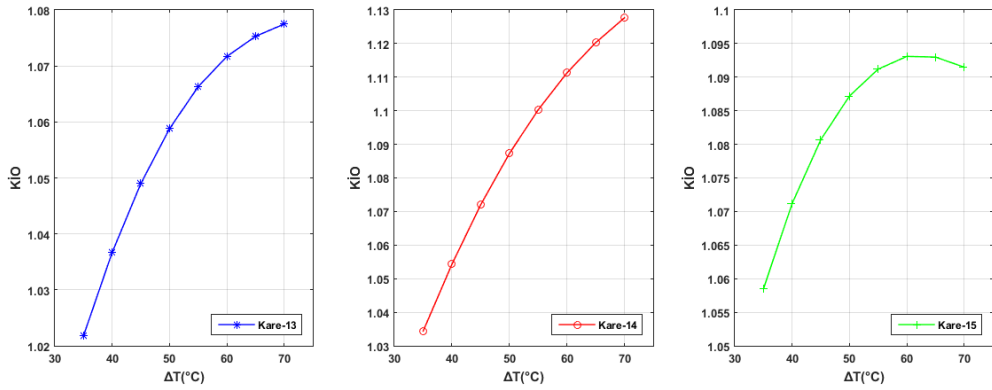
Kanat iyileştirme oranı Kare-11 ısı alıcıda en iyi gerçekleşmiştir. Kare-11 ısı alıcıda maksimum %10, Kare-10 ısı alıcıda %5,7, Kare-12 ısı alıcıda %9,2 ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Kare-10 ısı alıcı için kritik sıcaklık farkının yaklaşık 55 °C, Kare-11 ısı alıcı için kritik sıcaklık farkının yaklaşık 60 °C olduğu tespit edilmiştir. Kritik sıcaklık farkına ulaşıncaya kadar kanatçık iyileştirme oranı artmış, kritik sıcaklık farkından sonra ise KİO düşme eğilimi göstermiştir (**Şekil 55**).

Kare-13/14/15 ısı alıcılarda ısı akısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Düzlem plakaya göre en iyi soğutma 2,4 kW/m² ısı akısına kadar, 3 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-15 ısı alıcıda, 2,4 kW/m² ısı akısından sonra, 2 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-14 ısı alıcıda gerçekleşmiştir. Kare-14/15 ısı alıcılarda, Kare-13 ısı alıcısından daha iyi soğutma gerçekleşmiştir. Sıcaklık farkı, en yüksek ısı akısında düzlem plakaya göre Kare-14 ısı alıcıda %11,4, Kare-15 ısı alıcıda %8,2, Kare-13 ısı alıcıda %7,3 azalmıştır. Sıcaklık farkı, en düşük ısı akısında ise düzlem plakaya göre Kare-15 ısı alıcıda %13,3, Kare-14 ısı alıcıda %9,4, Kare-13 ısı alıcıda %7,4 azalmıştır (**Şekil 56**).

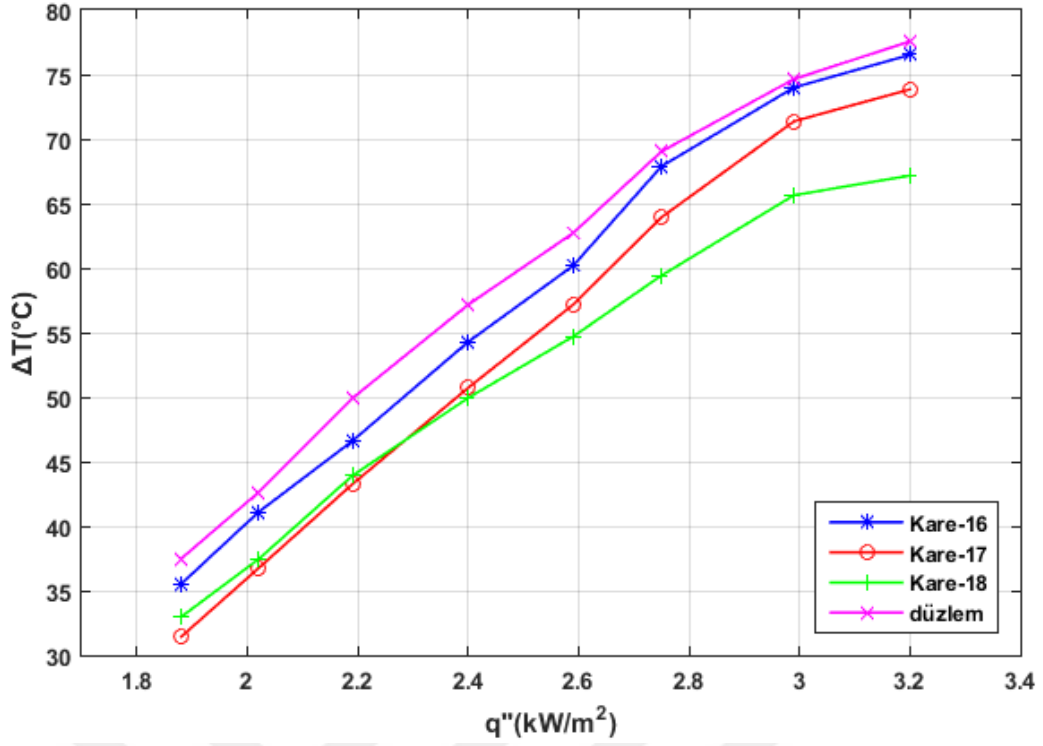


Şekil 56. Kare-13/14/15 ısı alıcılarının ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği

Kanat iyileştirme oranı Kare-14 ısı alıcıda en iyi gerçekleşmiştir. Kare-14 ısı alıcıda maksimum %12,7, Kare-15 ısı alıcıda %9,3, Kare-13 ısı alıcıda %7,8 ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Kare-15 ısı alıcı için kritik sıcaklık farkının yaklaşık 60 °C olduğu tespit edilmiştir. Kritik sıcaklık farkına yaklaştıkça kanatçık iyileştirme oranı artmış, kritik sıcaklık farkından sonra ise KİO düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 57).

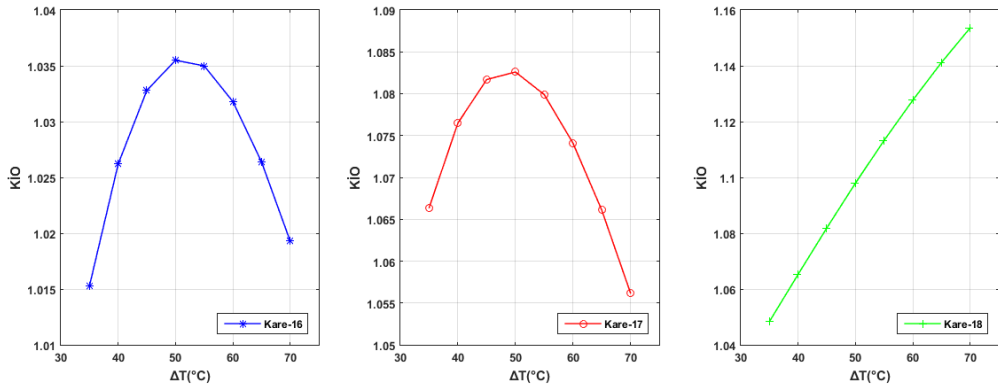


Şekil 57. Kare-13/14/15 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği



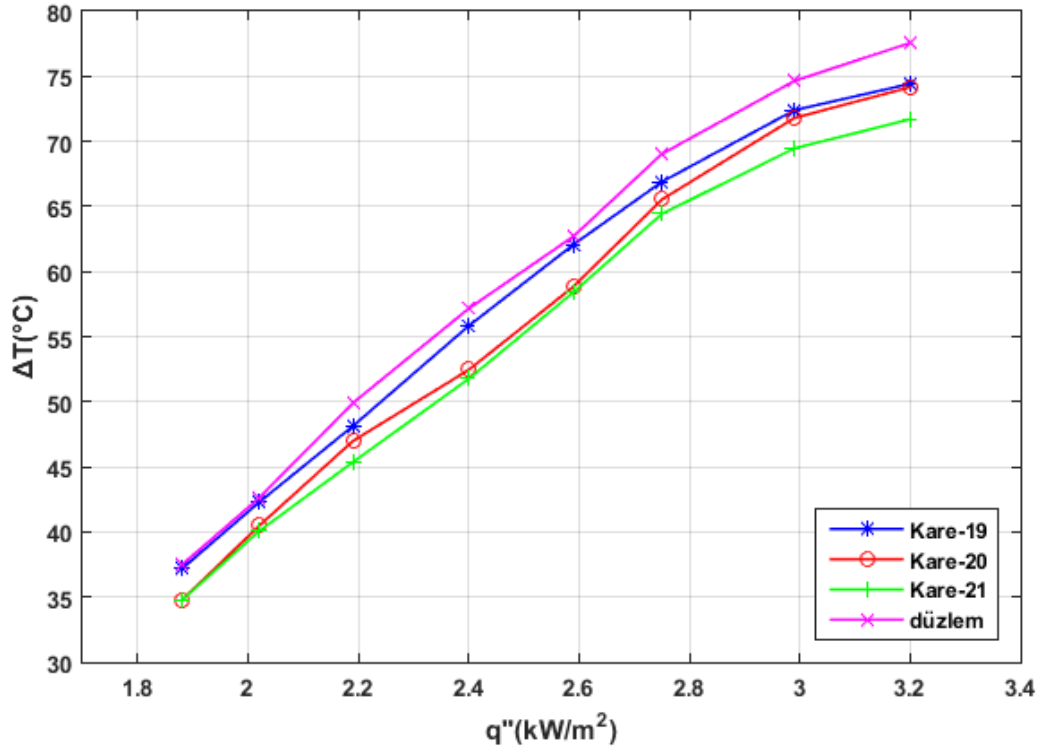
Şekil 58. Kare-16/17/18 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği

Kare-16/17/18 ısı alıcılarda ısı akısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Düzlem plakaya göre en iyi soğutma $2,19 \text{ kW/m}^2$ ısı akısına kadar, 2 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-17 ısı alıcıda, $2,19 \text{ kW/m}^2$ ısı akısından sonra, 3 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-18 ısı alıcıda gerçekleşmiştir. Kare-17/18 ısı alıcılarda, Kare-16 ısı alıcıdan daha iyi soğutma gerçekleşmiştir. Sıcaklık farkı, en yüksek ısı akısında düzlem plakaya göre Kare-18 ısı alıcıda %13,4, Kare-17 ısı alıcıda %4,8, Kare-16 ısı alıcıda %1,3 azalmıştır. Sıcaklık farkı, en düşük ısı akısında ise düzlem plakaya göre Kare-17 ısı alıcıda %16,1, Kare-18 ısı alıcıda %12, Kare-16 ısı alıcıda %5,2 azalmıştır (Şekil 58).



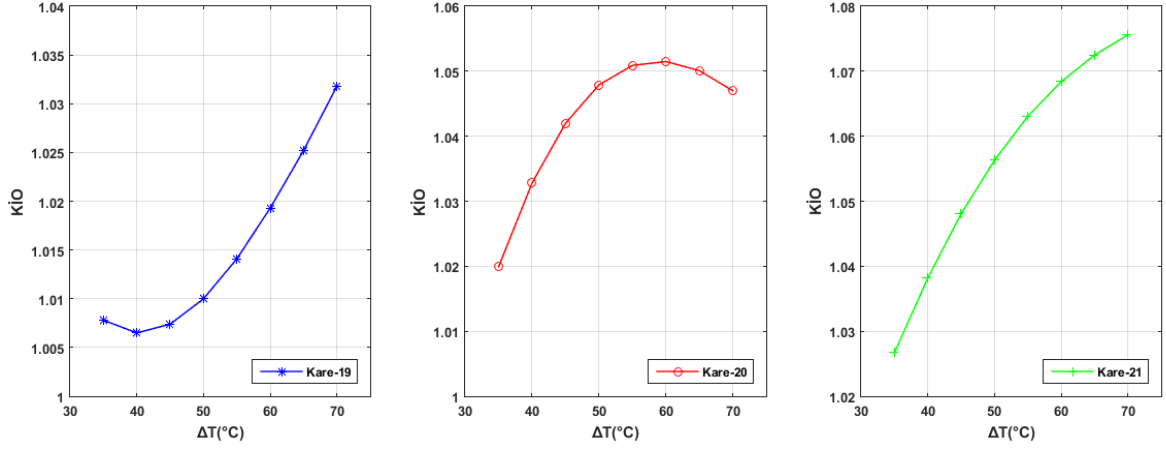
Şekil 59. Kare-16/17/18 KfO- yüzey sıcaklık farkı grafiği

Kanat iyileştirme oranı Kare-18 ısı alıcıda en iyi gerçekleşmiştir. Kare-18 ısı alıcıda maksimum %15,4, Kare-17 ısı alıcıda %8,3, Kare-16 ısı alıcıda %3,6 ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Kare-16/17 ısı alıcılar için kritik sıcaklık farkının yaklaşık 50 °C olduğu tespit edilmiştir. Kritik sıcaklık farkına yaklaştıkça kanatçık iyileştirme oranı artmış, kritik sıcaklık farkından sonra ise KİO düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 59).



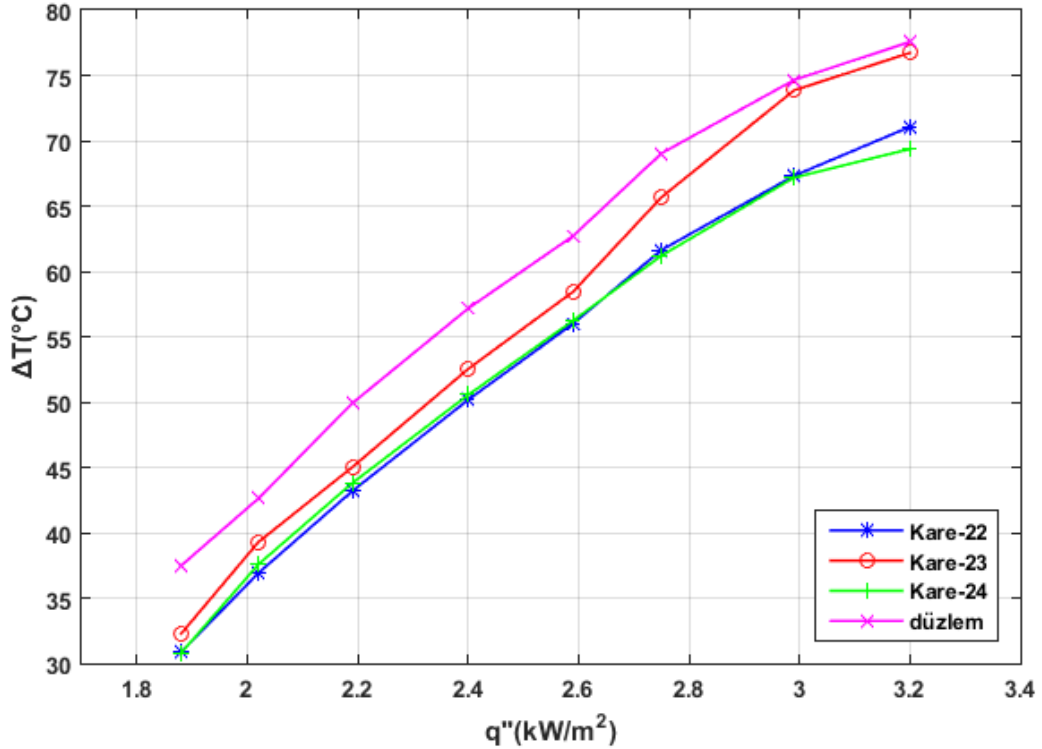
Şekil 60. Kare-19/20/21 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği

Kare-19/20/21 ısı alıcılarda ısı akısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Düzlem plakaya göre en iyi soğutma 3 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-21 ısı alıcıda gerçekleşmiştir. Kare-19/20/21 ısı alıcılarda kanat boyu arttıkça ısı transferi de artmıştır. Sıcaklık farkı, en yüksek ısı akısında düzlem plakaya göre Kare-21 ısı alıcıda %7,6, Kare-20 ısı alıcıda %4,4, Kare-19 ısı alıcıda % 4 azalmıştır. Sıcaklık farkı, en düşük ısı akısında ise düzlem plakaya göre Kare-21 ısı alıcıda %7,3, Kare-20 ısı alıcıda %7,2, Kare-19 ısı alıcıda %1 azalmıştır (Şekil 60).



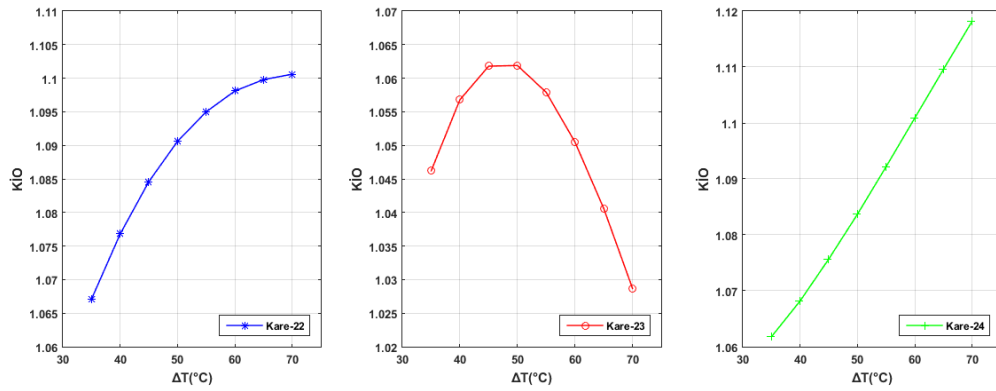
Şekil 61. Kare-19/20/21 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği

Kanat iyileştirme oranı Kare-21 ısı alıcıda en iyi gerçekleşmiştir. Kare-21 ısı alıcıda maksimum %6,9, Kare-20 ısı alıcıda %5,2, Kare-19 ısı alıcıda %3,2 ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Kare-20 ısı alıcı için kritik sıcaklık farkının yaklaşık 60 °C olduğu tespit edilmiştir. Kritik sıcaklık farkına yaklaştıkça kanatçık iyileştirme oranı artmış, kritik sıcaklık farkından sonra ise KİO düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 61).



Şekil 62. Kare-22/23/24 ısı alıcıların ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği

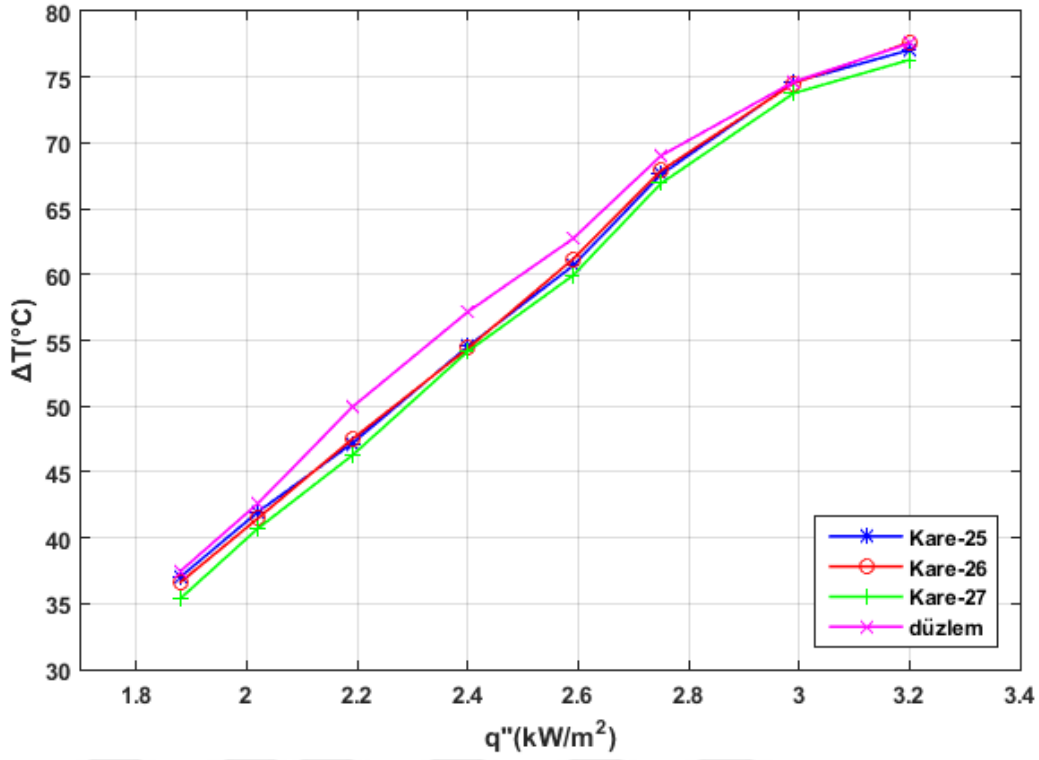
Kare-22/23/24 ısı alıcılarda ısı akısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Düzlem plakaya göre en iyi soğutma $2,59 \text{ kW/m}^2$ ısı akısına kadar, 1 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-22 ısı alıcıda, $2,59 \text{ kW/m}^2$ ısı akısından sonra 3 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-24 ısı alıcıda gerçekleşmiştir. Kare-22/24 ısı alıcılarda, Kare-23 ısı alıcından daha iyi soğutma gerçekleşmiştir. Sıcaklık farkı, en yüksek ısı akısında düzlem plakaya göre Kare-24 ısı alıcıda %10,6, Kare-23 ısı alıcıda %1,1, Kare-22 ısı alıcıda %8,4 azalmıştır. Sıcaklık farkı, en düşük ısı akısında ise düzlem plakaya göre Kare-24 ısı alıcıda %17,8, Kare-23 ısı alıcıda %13,9, Kare-22 ısı alıcıda %17,7 azalmıştır (**Şekil 62**).



Şekil 63. Kare-22/23/24 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği

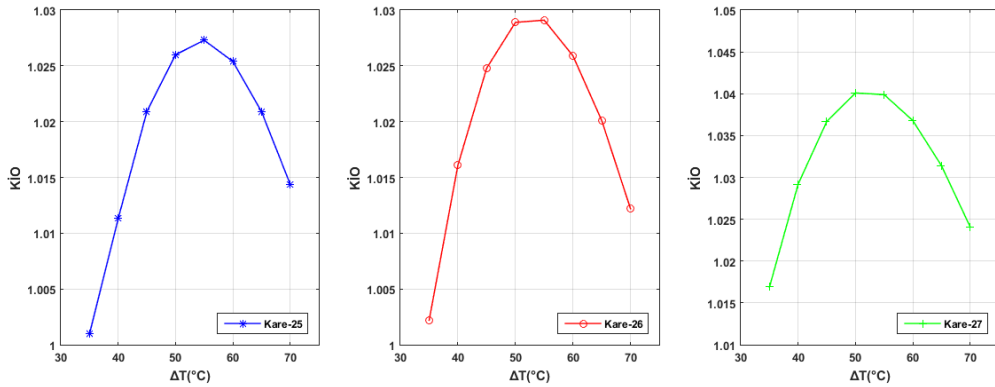
Kanat iyileştirme oranı Kare-24 ısı alıcıda en iyi gerçekleşmiştir. Kare-24 ısı alıcıda maksimum %11,8, Kare-23 ısı alıcıda %6,2, Kare-22 ısı alıcıda %10 ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Kare-23 ısı alıcı için kritik sıcaklık farkının yaklaşık $50 \text{ }^\circ\text{C}$ olduğu tespit edilmiştir. Kritik sıcaklık farkına yaklaştıkça kanatçık iyileştirme oranı artmış, kritik sıcaklık farkından sonra ise KİO düşme eğilimi göstermiştir (**Şekil 63**).

Kare-25/26/27 ısı alıcılarda ısı akısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Düzlem plakaya göre en iyi soğutma 3 mm kanat yüksekliğine sahip olan Kare-27 ısı alıcıda gerçekleşmiştir. Kare-27/26/25 ısı alıcılarda ısı transferi değişimi birbirine yakın seyretmiştir. Sıcaklık farkı, en yüksek ısı akısında düzlem plakaya göre Kare-27 ısı alıcıda %1,6, Kare-25 ısı alıcıda %1 azalmıştır. Kare-26 ısı alıcıda ise sıcaklık farkında düzlem plakaya göre %1' in altında azalma gözlenmiştir. Sıcaklık farkı, en düşük ısı akısında ise düzlem plakaya göre Kare-27 ısı alıcıda %5,5, Kare-26 ısı alıcıda %2,2, Kare-25 ısı alıcıda %1,1 azalmıştır (**Şekil 64**).



Şekil 64. Kare-25/26/27 ısı alıcılarının ısı akısı-sıcaklık farkı grafiği

Kanat iyileştirme oranı Kare-27 ısı alıcıda en iyi gerçekleşmiştir. Kare-27 ısı alıcıda maksimum %4, Kare-26 ısı alıcıda %3, Kare-25 ısı alıcıda %2,8 ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Kare-25/26/27 ısı alıcı için kritik sıcaklık farkının yaklaşık 55 °C olduğu tespit edilmiştir. Kritik sıcaklık farkına yaklaştıkça kanatçık iyileştirme oranı artmış, kritik sıcaklık farkından sonra ise KİO düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 65).



Şekil 65. Kare-25/26/27 KİO- yüzey sıcaklık farkı grafiği

3 farklı kanat genişliği, 3 farklı kanat yüksekliği ve 3 farklı kanatlar arası mesafe için üretilen 27 farklı geometriye sahip ısı alıcılarla yapılan deneyler sonucunda, Kare-18 ısı alıcının elektrosprey soğutmada en etkili geometri olduğu belirlenmiştir. Etkili geometrinin tespiti akabinde, değişken parametrelerin kanatçık iyileştirme oranına etki seviyelerini görebilmek amacıyla bütün deney sonuçları varyans analizi tam faktöriyel yöntemi kullanılarak

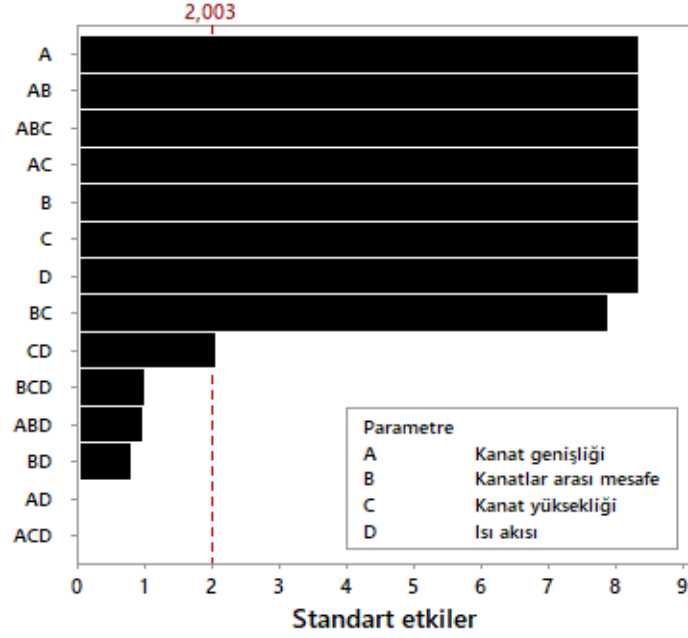
değerlendirilmiştir. Tam faktöriyel tasarımda uygulanan regresyon için %95 güven aralığı belirlenmiştir. P oranı 0,05' ten küçük değerler için belirtilen parametreler veya parametrelerin birleşik etkileri anlamlı ve etkilidir (**Tablo 13**).

Tablo 13. Kanatçık İyileştirme Oranı İçin Varyans Analizi Tablosu

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Model	159	0,18708	0,00118	10,05	0,000
Lineer	13	0,08998	0,00692	59,14	0,000
Kanat genişliği	2	0,01293	0,00646	55,24	0,000
Kanatlar arası mesafe	2	0,02970	0,01485	126,87	0,000
Kanat yüksekliği	2	0,01799	0,00900	76,87	0,000
Isı akısı	7	0,02936	0,00420	35,84	0,000
2 yollu etkileşim	54	0,06696	0,00124	10,6	0,000
Kanat genişliği*Kanatlar arası mesafe	4	0,03936	0,00984	84,07	0,000
Kanat genişliği*Kanat yüksekliği	4	0,01237	0,00309	26,42	0,000
Kanat genişliği*Isı akısı	14	0,00053	0,00004	0,33	0,988
Kanatlar arası mesafe*Kanat yüksekliği	4	0,00989	0,00247	21,13	0,000
Kanatlar arası mesafe*Isı akısı	14	0,00168	0,00012	1,03	0,441
Kanat yüksekliği*Isı akısı	14	0,00313	0,00022	1,91	0,045
3 yollu etkileşim	92	0,03015	0,00033	2,8	0,000
Kan. gen.*Kan. ara mes.*Kan. yük.	8	0,02210	0,00276	23,6	0,000
Kan. gen.*Kan. ara. mes.*Isı akısı	28	0,00370	0,00013	1,13	0,343
Kan. gen.*Kan. yük.*Isı akısı	28	0,00059	0,00002	0,18	1,000
Kan. ara. mes.*Kan. yük.*Isı akısı	28	0,00377	0,00014	1,15	0,321
Hata	56	0,00655	0,00012		
Toplam	215	0,19364			

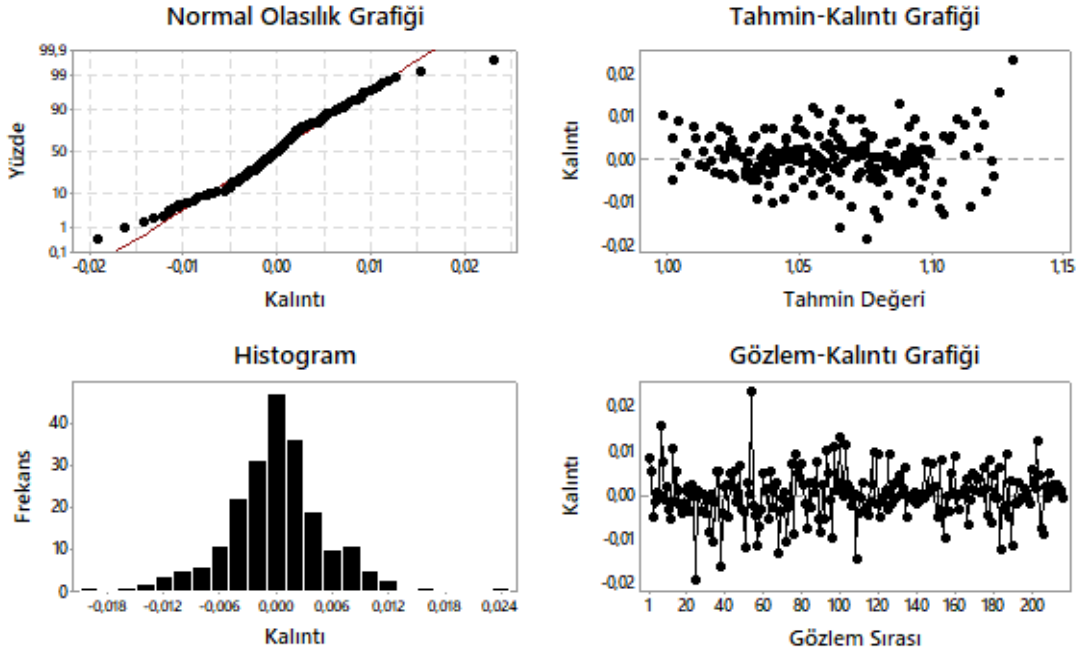
Tablo 14. Kanatçık İyileştirme Oranı İçin Model Özeti

Hassasiyet	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahmini R ²
0,0108179	%96,62	%87,01	%49,65



Şekil 66. Parametre etkilerinin pareto grafiği

Pareto grafiği değişken parametrenin deney üzerindeki etkisini ve önemini belirlemek için kullanılır. Grafik etkilerin mutlak değerini gösterir ve grafik üzerinde bir referans çizgisi çizer. Bu referans çizgisini geçen etkiler, istatistiksel olarak anlamlı olur. Grafikte görülen etki çubuklarının uzunlukları parametrelerin ne kadar etkili olduğu ile orantılıdır. Grafiğe göre bütün değişken parametrelerin, sonuç parametresi (KİO) için etkili olduğu, bunun haricindeki kanat genişliği*kanatlar arası mesafenin, kanat genişliği*kanat yüksekliği, kanatlar arası mesafe*kanat yüksekliği ve kanat genişliği*kanatlar arası mesafe*kanat yüksekliği birleşik etkilerinin de sonuç parametresine ulaşmada oldukça etkili oldukları belirlenmiştir. (Şekil 66).



Şekil 67. KİO için kalıntı grafikleri

Gerçek değerlerle tahmin değerleri arasındaki farkı gösterebilmek için kalıntı analizi kullanılır. Kanatçık iyileştirme için oluşturulan kalıntı grafikleri; normal olasılık grafiği, kalıntı- tahmin grafiği, kalıntı-gözlem grafiği ve histogramdan oluşmaktadır (**Şekil 67**).

Normal olasılık grafiğinde kalıntı değerlerinin referans çizgisini izlediği görülmektedir. Bu durum regresyon modelinin güven aralıklarının ve p-değerlerinin hatalı olmadığını gösterir.

Kalıntı-tahmin değeri grafiğinde, kalıntıların rastgele dağıtıldığı ve sabit varyansa sahip olduğu varsayımını doğrulamak için kullanılır. Bu grafikte noktalar sıfırın her iki tarafına rastgele düşmeli ve noktalar belirli bir desen oluşturmamalıdır. KİO verileriyle oluşturulan modelin kalıntılarının bu şartları sağladığı görülmektedir.

Histogram da ise bütün gözlemler için kalıntıların dağılımını gösterir. Ayrıca verilerin aykırı değerler içerip içermediğini belirlemek için kalıntı histogramı kullanılır. Histogram grafiğinde sıfır değerinin sağında ve solundaki sütunların simetrik olması durumunda oluşturulan veri dağılımı anlamlı olur. KİO verileriyle oluşturulan histogram grafiğinin simetrik olduğu, yani verilerin anlamlı olduğu görülmektedir.

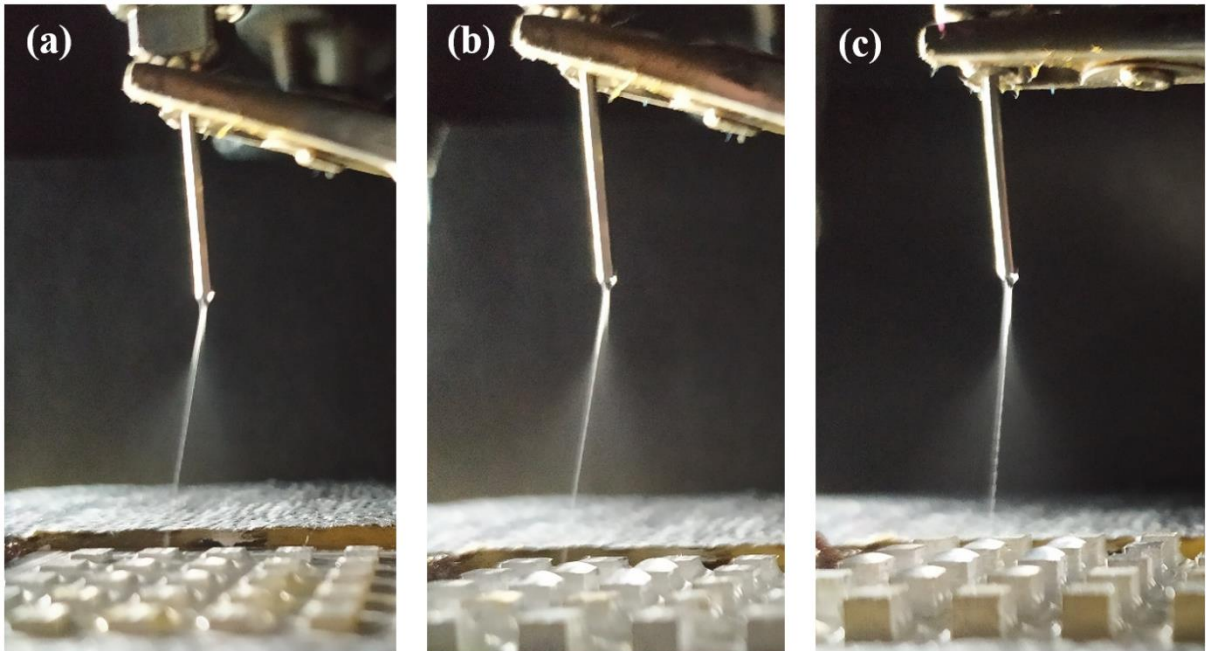
Kalıntı-gözlem sırası grafiği, kalıntıları verilerinin toplanma sırasına göre görüntüler. Kalıntıların birbirinden bağımsız olduğu varsayımını doğrulamak için bu grafik kullanılır.

Bağımsız kalıntılar, zaman sırasına göre görüntülendiğinde hiçbir eğilim veya model göstermez. Noktalardaki desenler, birbirine yakın kalıntıların ilişkili olabileceğini ve dolayısıyla bağımsız olmadığını gösterebilir. Bu grafikte kalıntı noktaları rastgele bir şekilde merkez çizgisi etrafına düşmesi durumunda veriler anlamlı olur. KİO verileriyle oluşturulan

kalıntı gözlem sırası grafiği incelendiğinde verilerin anlamlı olduğu, aykırı veriler içermediği noktaların dağılımından görülmektedir.

Sonuç olarak, etanol ile elektrosprey soğutmada en etkili ısı alıcı geometrisinin 3 mm kanat genişliği, 3 mm kanatlar arası mesafe ve 3 mm kanat yüksekliğine sahip Kare-18 ısı alıcı olduğu, yapılan tam faktöriyel analizle kanatçık iyileştirme oranının belirlenmesinde bütün girdi parametrelerin etkili olduğu ve kalıntı grafiklerine bakıldığında modelin anlamlı olduğu belirlenmiştir.

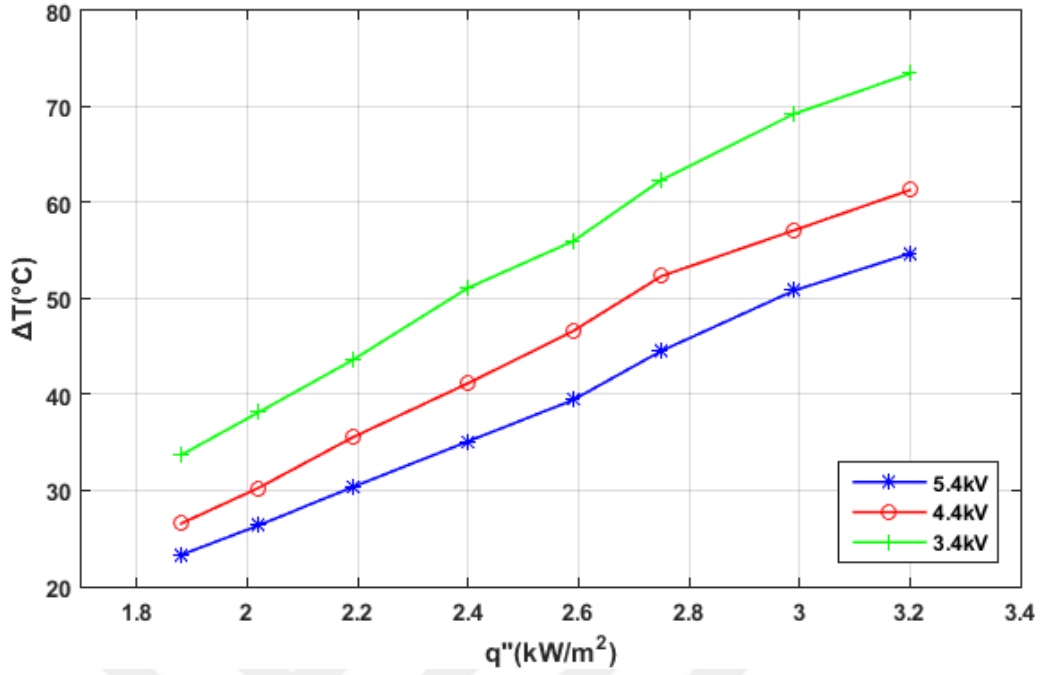
Kare-16/17/18 ısı alıcılarda 20 G nozul çapı, 0,2 ml/dk debi ve 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafede yapılan deneyler için oluşan elektrosprey görüntüleri **Şekil 68**' da verilmiştir. Her üç kanat boyunda aynı şartlarda yapılan deneylerde elektrosprey modunun koni jet modunda olduğu görülmektedir.



Şekil 68. (a) Kare-16, (b) Kare-17, (c) Kare-18 ısı alıcılarda elektrosprey oluşumu

Sprey soğutmada ısı alıcı yüzeyi pürüzlü ise; çekirdeklenme bölgeleri, temas alanı ve temas süresi artırılarak ısı transfer miktarı artar (Cheng *et al.* 2016). Kare, delta ve dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcıların yüzey alanları eşit olduğu için elektrosprey oluşumu sonucu kanatçık geometrilerinin çekirdeklenme bölgelerine etkisi sonucu ısı transfer miktarları farklı gerçekleşmiştir. Tasarımı yapılan ısı alıcı geometrilerinde de aynı parametre etkili olurken kanat boyu artışının yüzey alanını artırmasının bazı ısı alıcı geometrilerinde çekirdeklenme bölgelerini olumsuz etkilemesi sonucu ısı transferi olumsuz etkilenmiştir.

Optimum Isı Alıcı İçin Elektrosprey Soğutma Parametrelerinin Analizi

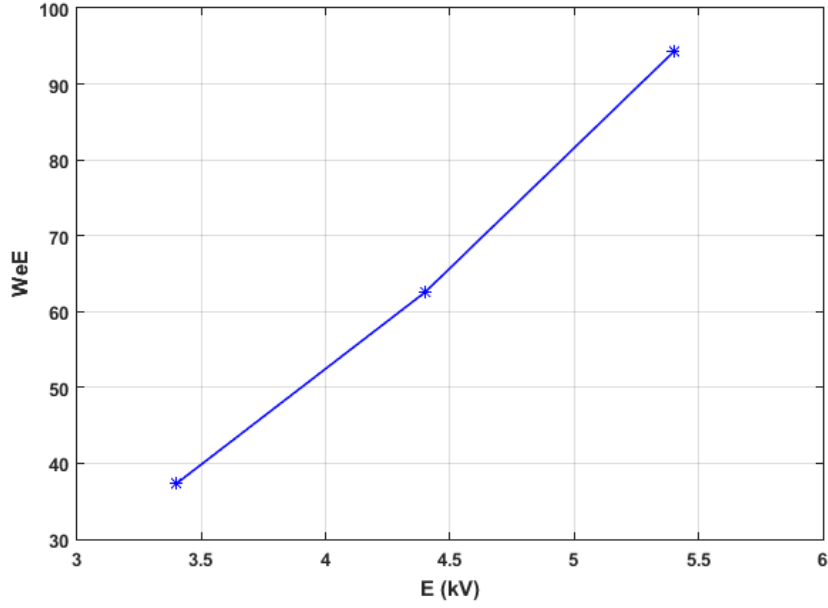


Şekil 69. Kare-18 ısı alıcıda farklı gerilimler için soğutma grafiği

En etkin ısı alıcı geometrisi belirlendikten sonra bu geometride farklı parametrelerde deneyler yapılarak, ısı alıcı geometrisinin haricinde ısı transferine etki eden diğer faktörler incelenmiştir. İlk olarak 0,2 ml/dk debi, 30 G nozul çapı, 20 mm nozul ısı alıcı arası mesafe, optimizasyon için kullanılan sekiz farklı ısı akısı ile gerilimin ısı transferine etkisini görebilmek için üç farklı gerilimde (3,4-4,4-5,4 kV) deneyler yapılmıştır. Şekil 69' de de görüldüğü üzere üç farklı gerilim için en iyi soğutma 5,4 kV gerilim için gerçekleşmiştir. Gerilim arttıkça ısı transferi de artmıştır.

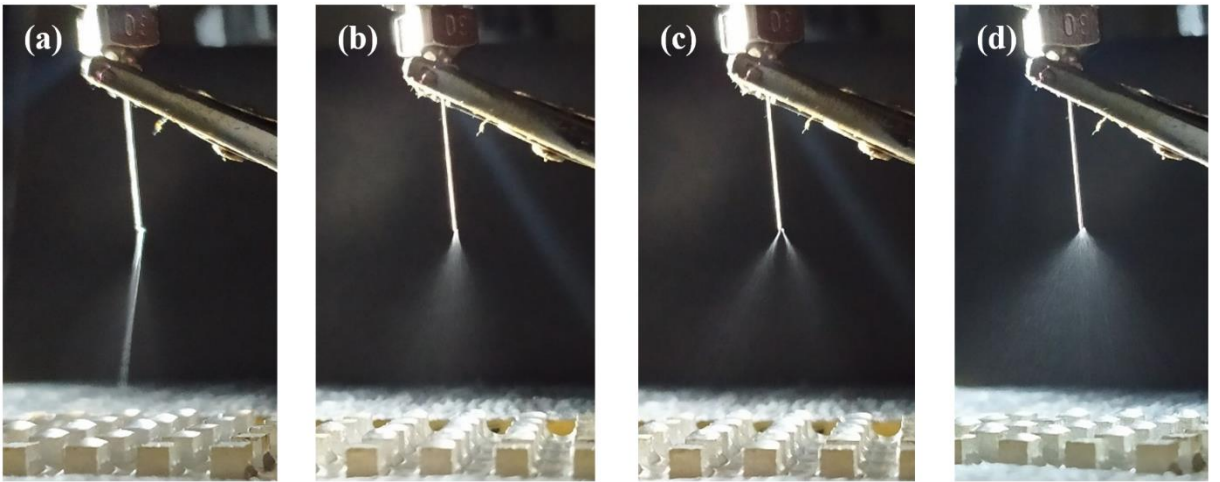
En yüksek ısı akısında 3,4 kV gerilime göre, 4,4 kV gerilimde %17, 5,4 kV gerilimde ise %25 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 3,4 kV gerilime göre, 4,4 kV gerilimde %21, 5,4 kV gerilimde ise %31 daha iyi soğutma elde edilmiştir.

Nozula uygulanan gerilimle Elektrik Weber Sayısı değişimi Şekil 70' de verilmiştir. Bütün deneysel şartlar sabit tutulup gerilim değişiminin partikül boyutuna etkisi incelenmiştir. 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.

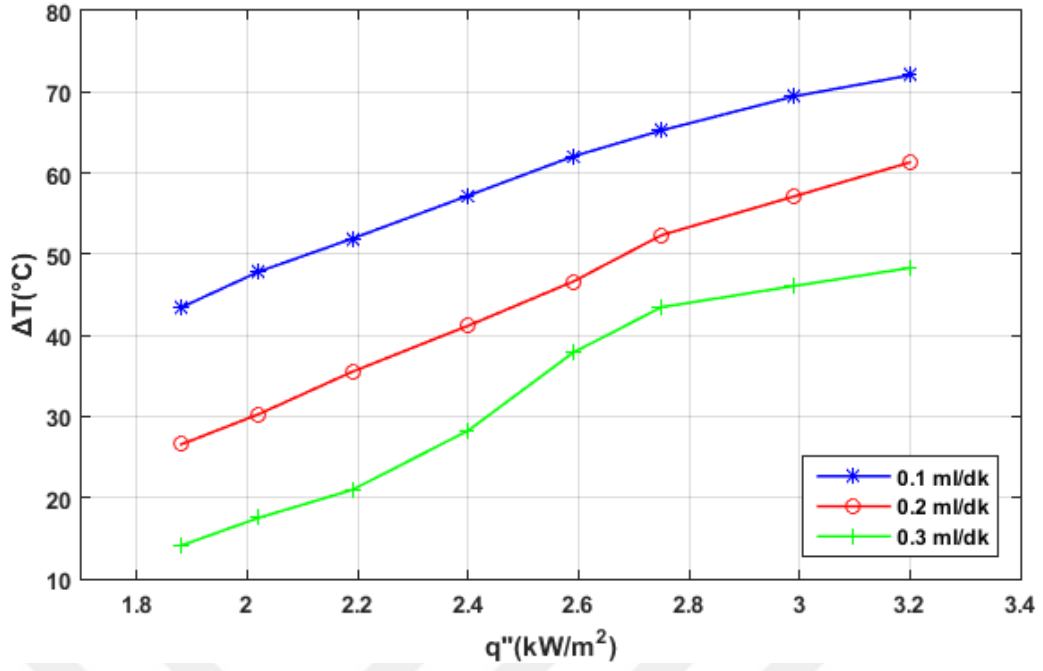


Şekil 70. Kare-18 ısı alıcı için gerilim- We_E değişim grafiği

Gerilim artışının ısı transferine bu büyüklükte etki etmesinin sebebi, soğutucu akışkana uygulanan gerilimin artışıyla atomizasyonun iyileşmesi ve daha düşük partikül çapı elde edilebilmesidir. Partikül çapı azaldıkça, ısı alıcı yüzeyine çarpan damlacıklar daha kolay buharlaşıp daha hızlı ısı atımına sebep olmaktadır. 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 71**). Koni jet modu her ne kadar kararlı partikül çapı ve stabil akış sağlasa da gerilim artışı ile oluşan multi jet modunda partiküller daha iyi atomize olmuş ve çapları küçüldüğü için daha iyi soğutmaya neden olmuştur.



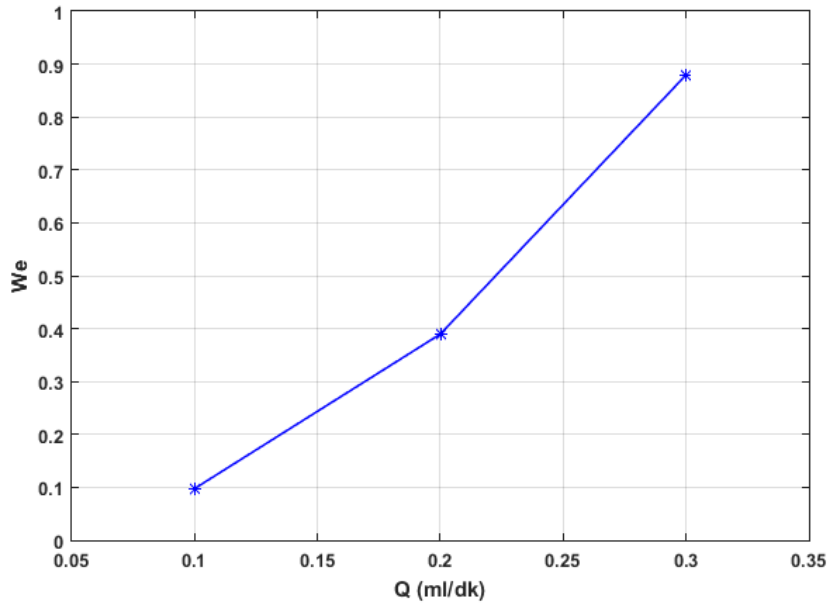
Şekil 71. Kare-18 ısı alıcıda (a) 3,4 kV, (b-c) 4,4 kV, (d) 5,4 kV gerilimleri için elektrosprey oluşumu



Şekil 72. Kare-18 ısı alıcıda farklı debiler için soğutma grafiği

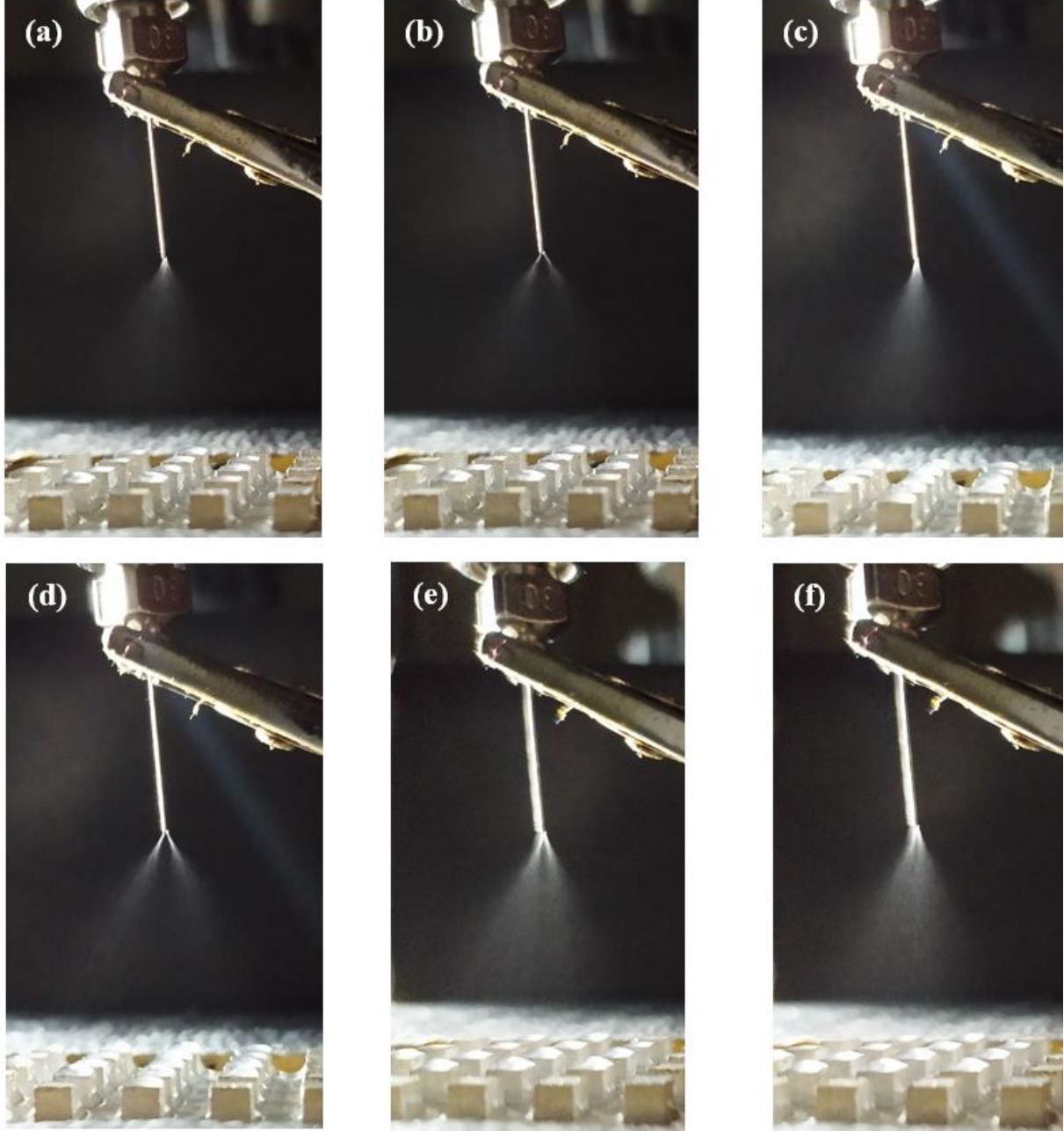
4,4 kV gerilim, 30 G nozul çapı, 20 mm nozul ısı alıcı arası mesafe, optimizasyon için kullanılan sekiz farklı ısı akısı ile gerilimin ısı transferine etkisini görebilmek için üç farklı debide (0,1-0,2-0,3 ml/dk) deneyler yapılmıştır. Soğutmanın en iyi gerçekleştiği debi 0,3 ml/dk olarak belirlenmiştir. Debi arttıkça soğutmanında iyileştiği belirlenmiştir (**Şekil 72**).

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 73. Kare-18 ısı alıcı için debi-We değişim grafiği

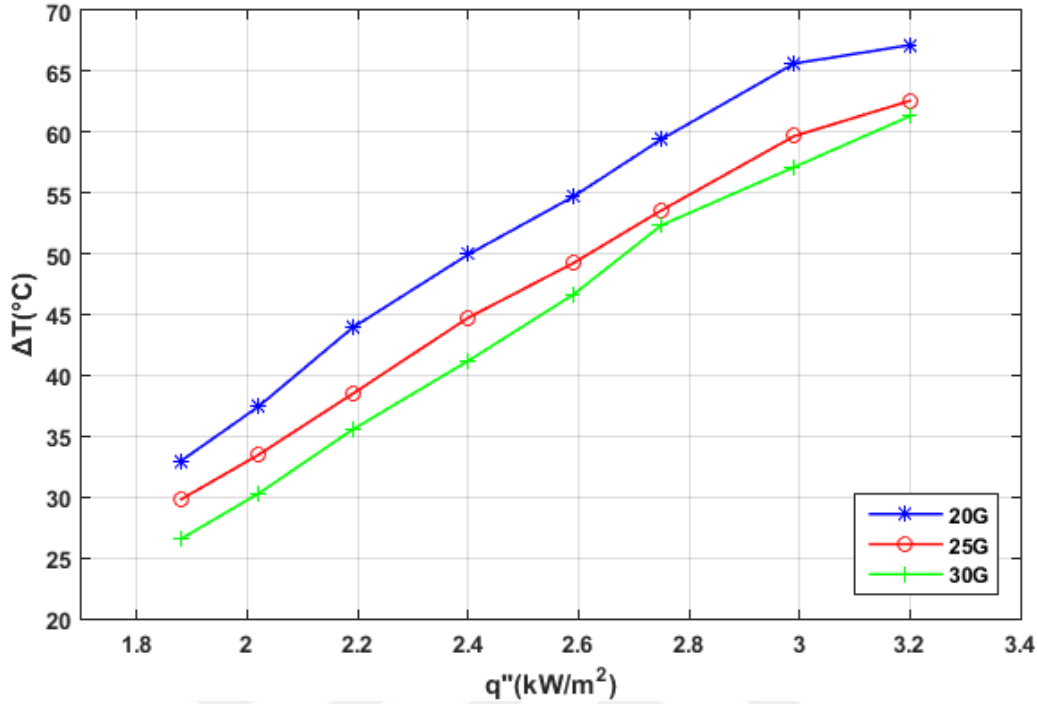
Nozula uygulanan debi ile Weber Sayısı değişimi **şekil 73'** de verilmiştir. Bütün deneysel şartlar sabit tutulup debi değişiminin partikül boyutuna etkisi incelenmiştir. Debi artışıyla We sayısı artış göstermiştir. We sayısı artışıyla nozuldan çıkış yapan soğutucu akışkanda damlacık ayrışması artmıştır. Damlacık boyutunun azalması ve debi artışı sebebiyle 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 74. Kare-18 ısı alıcıda (a-b) 0.1 ml/dk, (c-d) 0.2 ml/dk, (e-f) 0.3 ml/dk debileri için elektrosprey oluşumu

Farklı debilerde yapılan deneylerde oluşan elektrosprey görüntüleri **şekil 74'** de verilmiştir. Her üç debide de elektrosprey modunun kararsız multi jet modunda olduğu görölmektedir. 0,3 ml/dk debide diğer debilere kıyasla kararlı duruma daha yaklaştığı

belirlenmiştir. Debi arttıkça atomize olan partikül sayısı artmış ve partiküllerin buharlaşması sonucu ısı alıcı üzerinden daha fazla ısı atılarak daha iyi bir soğutma gerçekleşmiştir.

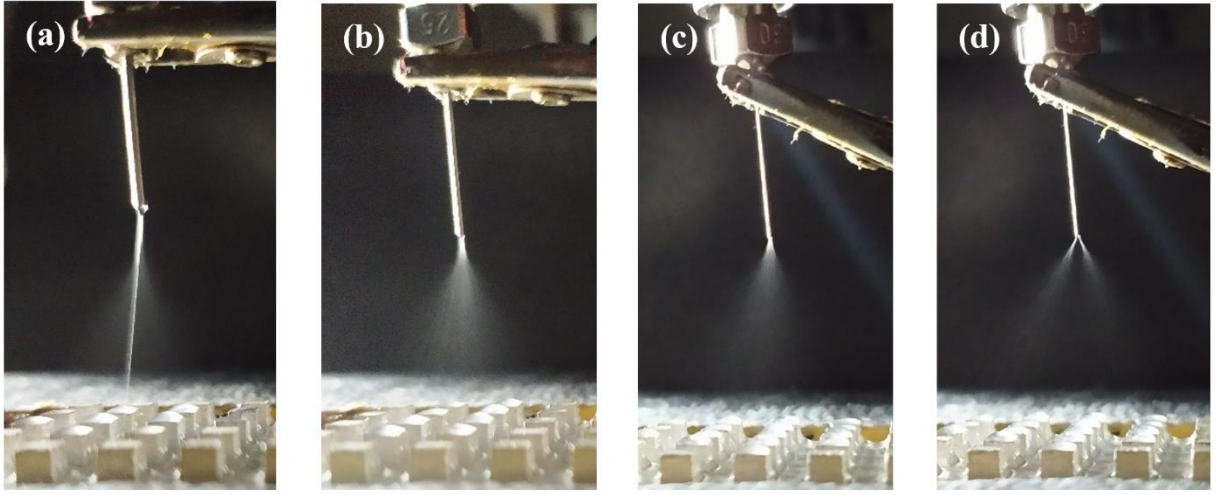


Şekil 75. Kare-18 ısı alıcıda etanol için tekli nozul ile farklı nozul çaplarında soğutma grafiği

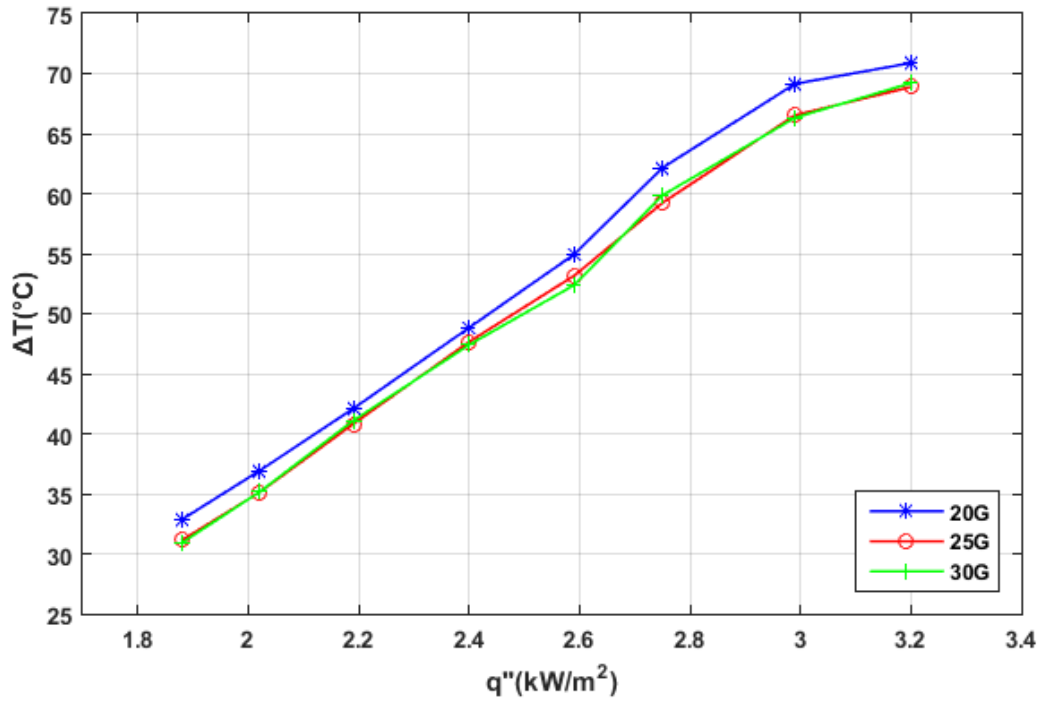
Farklı nozul çaplarında, Kare-18 ısı alıcıda, etanol ile tekli nozul için yapılan deneylerde gerçekleşen soğutma grafiği **Şekil 75'** de verilmiştir. En iyi soğutmanın 30 G nozul çapında gerçekleştiği görülmektedir. Nozul çapı azaldıkça ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transferi artmış ve daha iyi bir soğutma elde edilmiştir.

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.

Tekli nozulla etanolle yapılan deneylerde nozul çapı düştükçe koni jet modundan multi jet moduna geçiş evreleri **Şekil 76'** da gösterilmiştir. Nozul çapı düştükçe elektrosprey oluşumunda atomizasyonun daha da iyileştiği görülmektedir. Bu iyileşme 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 elektrosprey multi jet moduna geçiş yapmıştır.



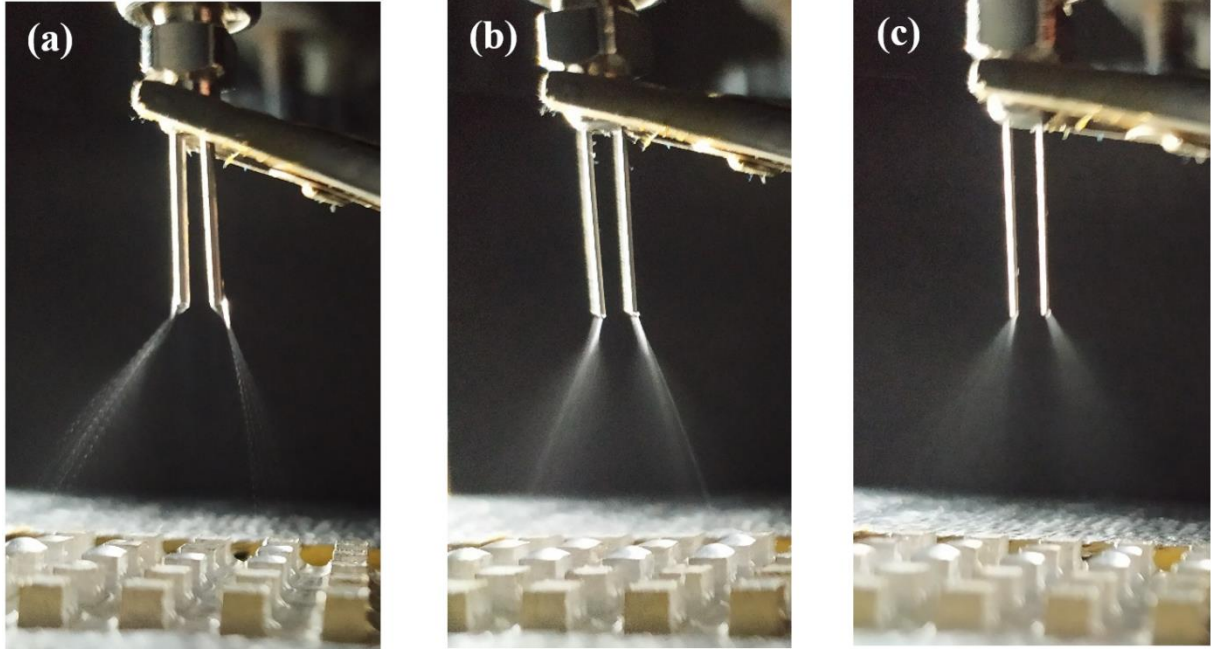
Şekil 76. Kare-18 ısı alıcıda etanol için tekli nozul ile (a) 20 G, (b) 25 G, (c-d) 30 G nozul çapları için elektrosprey oluşumu



Şekil 77. Kare-18 ısı alıcıda etanol için çiftli nozul ile farklı nozul çaplarında soğutma grafiği

Farklı nozul çaplarında, Kare-18 ısı alıcıda, etanol ile çiftli nozul için yapılan deneylerde gerçekleşen soğutma grafiği **Şekil 77'** de verilmiştir. En iyi soğutmanın 25 G ve 30 G nozul çaplarında gerçekleştiği görülmektedir. 25 G ve 30 G nozulların iç çaplarının ölçüleri birbirine çok yakın olduğundan soğutma eğrileri birbirine çok yakın seyretmiştir. Grafik irdelendiğinde düşük nozul çaplarında daha iyi soğutma elde edildiği görülmektedir.

En yüksek ısı akısında 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %3, 30 G nozul çapında ise %2 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %5, 30 G nozul çapında ise %6 daha iyi soğutma elde edilmiştir. Grafiğe göre, düşük ısı akılarında yüksek ısı akılarına göre daha iyi ısı transferi gerçekleştiği belirlenmiştir.

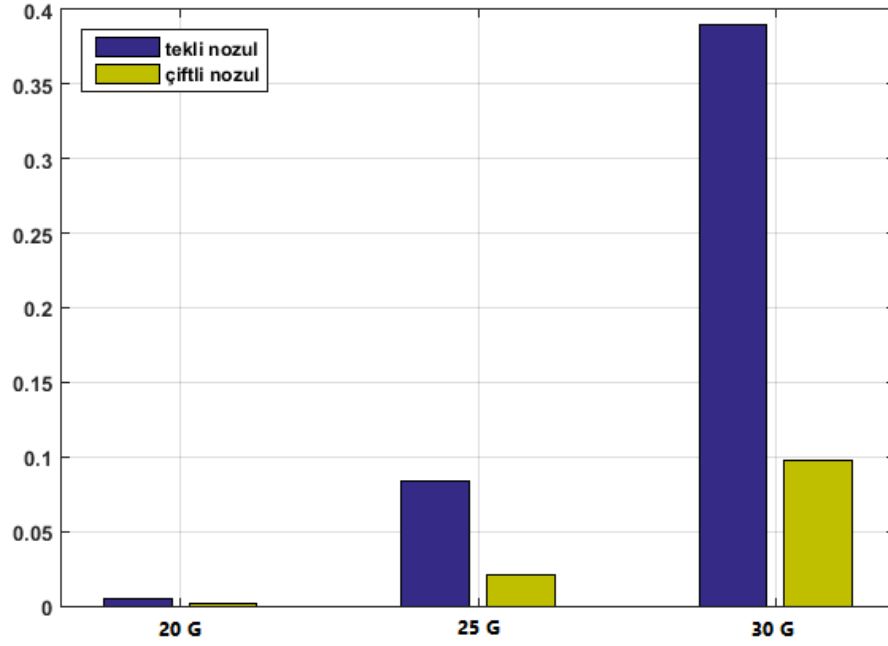


Şekil 78. Kare-18 ısı alıcıda etanol için çiftli nozul ile (a) 20 G, (b) 25 G, (c) 30 G nozul çapları için elektrosprey oluşumu

Çiftli nozulla etanolle yapılan deneylerde elektrosprey oluşum evreleri **Şekil 78'** de gösterilmiştir. Nozul çapı düştükçe elektrosprey oluşumunda atomizasyonun daha da iyileştiği görülmektedir. Bu iyileşme neticesinde ısı alıcıdan gerçekleşen ısı transferinde artış meydana gelmiştir. 20 G nozul çapında bir koni jet modu oluşurken, 25 G ve 30 G nozul çaplarında 20 G nozul çapına göre sprey oluşumu iyileşmiş, atomizasyon artmıştır.

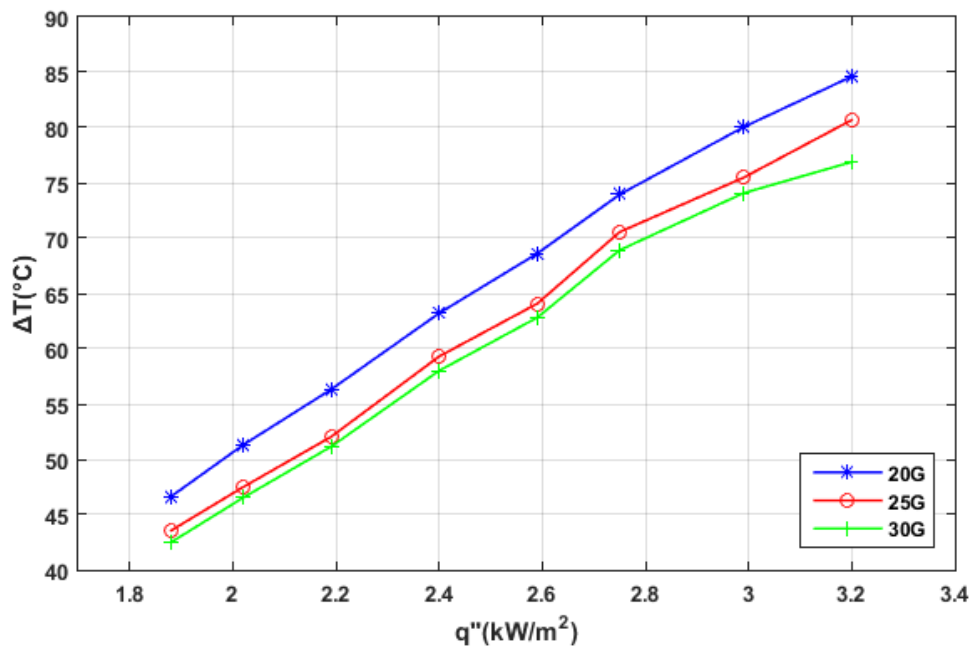
0,2 ml/dk debi, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe, 20-25-30 G nozul çapları ve sekiz farklı ısı akısıyla etanol ile yapılan deneyler neticesinde ısı transferinin tekli nozulda çiftli nozula göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. **Şekil 76** ve **Şekil 78** incelendiğinde tekli nozulda atomizasyonun daha iyi gerçekleştiği görülmektedir. Daha düşük çaptaki damlacıklar ısı alıcı yüzeyinden daha hızlı şekilde buharlaşma yoluyla ısıyı uzaklaştıracaktır.

Tekli nozulda çiftli nozula göre en yüksek ısı akısında, 20 G nozul çapında %5, 25 G nozul çapında %9, 30 G nozul çapında %11 daha iyi soğutma sağlanmıştır. En düşük ısı akısında ise tekli nozulda çiftli nozula göre 20 G nozul çapında %1, 25 G nozul çapında %4, 30 G nozul çapında %14 daha iyi soğutma sağlanmıştır.



Şekil 79. Kare-18 ısı alıcıda etanol için tekli ve çiftli nozul Weber Sayısı-nozul çapı değişim grafiği

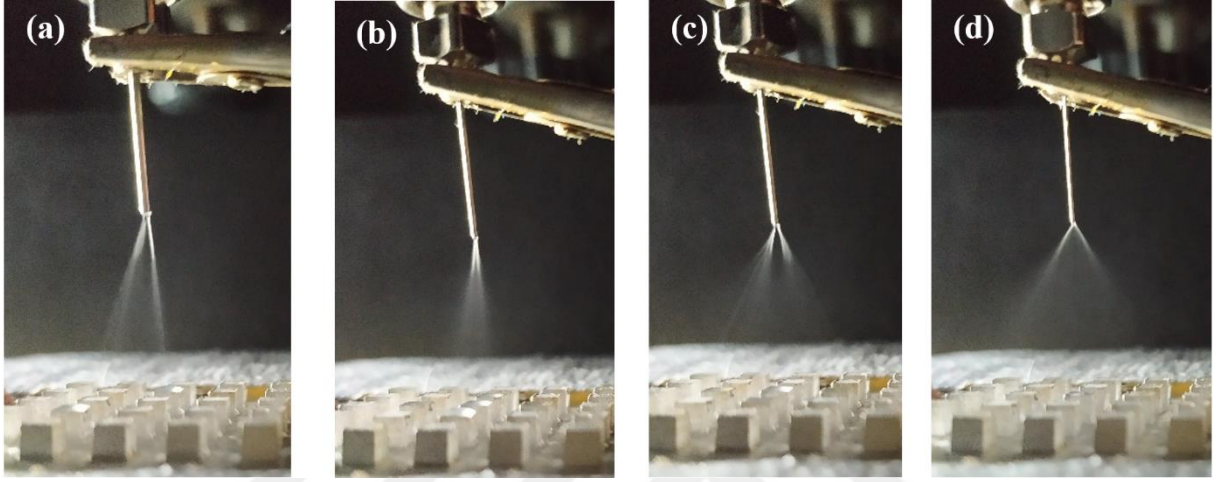
Kare-18 ısı alıcıda etanol ile yapılan deneyler sonucunda Weber Sayısı' nın nozul çapı ile değişim grafiği **Şekil 79'** da verilmiştir. Tekli nozulda da çiftli nozulda da nozul çapı arttıkça Weber Sayısı' nın azaldığı dolayısı ile üretilen sprey damlacıklarının boyutlarının arttığı belirlenmiştir. Weber sayısı $d_i=0,15$ mm (30 G), $d_i=0,25$ (25 G) ve $d_i=0,60$ (30 G) çapındaki tekli nozullarda çiftli nozullara göre yaklaşık 4 kat artmıştır. Sonuç olarak daha yüksek Weber Sayısı' nın elde edildiği tekli nozulda daha iyi atomizasyon elde edildiği görülmektedir.



Şekil 80. Kare-18 ısı alıcıda aseton için tekli nozul ile farklı nozul çaplarında soğutma grafiği

Farklı nozul çaplarında, Kare-18 ısı alıcıda, aseton ile tekli nozul için yapılan deneylerde gerçekleşen soğutma grafiği **Şekil 80'** de verilmiştir. En iyi soğutmanın 30 G nozul çapında gerçekleştiği görülmektedir. Nozul çapı azaldıkça ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transferi artmış ve daha iyi bir soğutma elde edilmiştir.

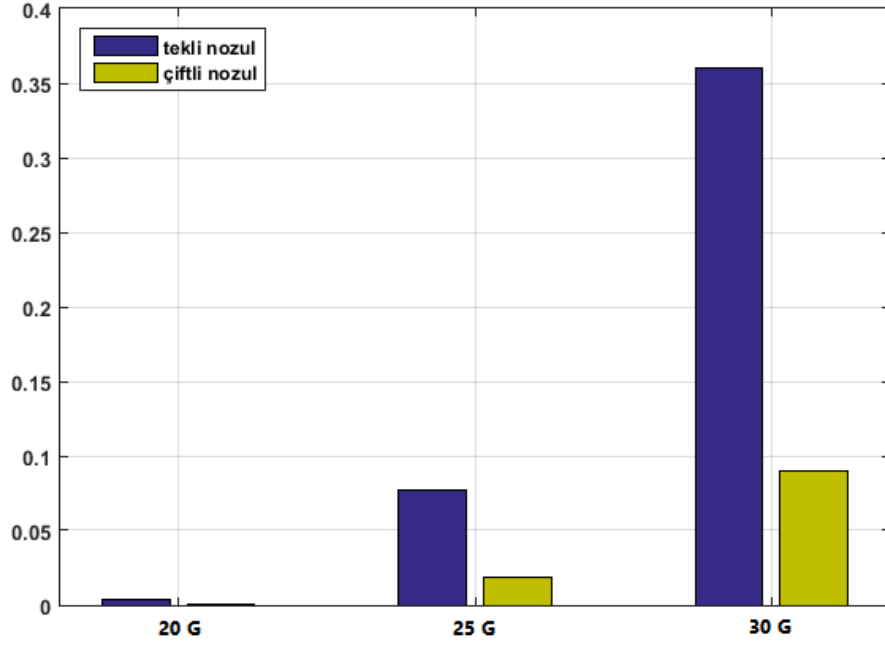
En yüksek ısı akısında 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %5, 30 G nozul çapında ise %9 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %7, 30 G nozul çapında ise %9 daha iyi soğutma elde edilmiştir.



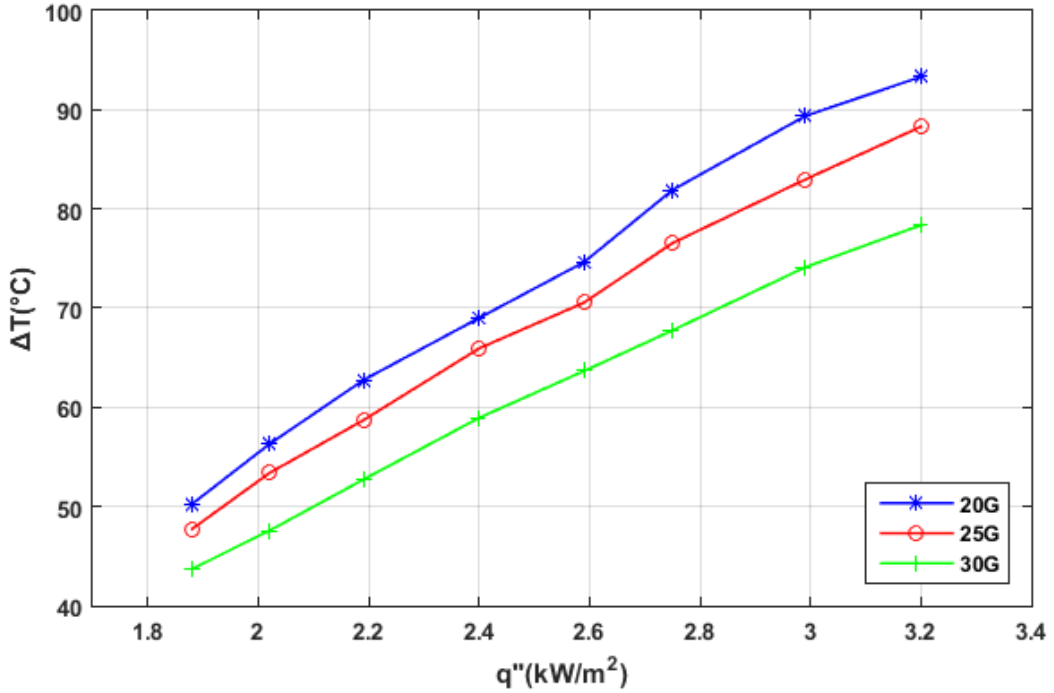
Şekil 81. Kare-18 ısı alıcıda aseton için tekli nozul ile (a) 20 G, (b-c) 25 G, (d) 30 G nozul çapları için elektrosprey oluşumu

Tekli nozulla asetonla yapılan deneylerde nozul çapı düştükçe multi jet modundaki değişim **Şekil 81'**de gösterilmiştir. Nozul çapı düştükçe elektrosprey oluşumunda atomizasyonun daha da iyileştiği görülmektedir. Bu iyileşme neticesinde ısı alıcıdan gerçekleşen ısı transferinde artış meydana gelmiştir. 20 G nozul çapında oluşan multi jet elektrospreyin açısı 25 G ve 30 G nozul çaplarında gittikçe artarak daha homojen damlacık dağılımı sağlanmıştır.

Kare-18 ısı alıcıda aseton ile yapılan deneyler sonucunda Weber Sayısı' nın nozul çapı ile değişim grafiği **Şekil 82'** de verilmiştir. Tekli nozulda da çiftli nozulda da nozul çapı arttıkça Weber Sayısı' nın azaldığı dolayısı ile üretilen spreyci damlacıklarının boyutlarının arttığı belirlenmiştir. Weber sayısı $d_i=0,15$ mm (30 G), $d_i=0,25$ (25 G) ve $d_i=0,60$ (30 G) çapındaki tekli nozullarda çiftli nozullara göre yaklaşık 4 kat artmıştır. Sonuç olarak daha yüksek Weber Sayısı' nın elde edildiği tekli nozulda daha iyi atomizasyon elde edildiği belirlenmiştir.



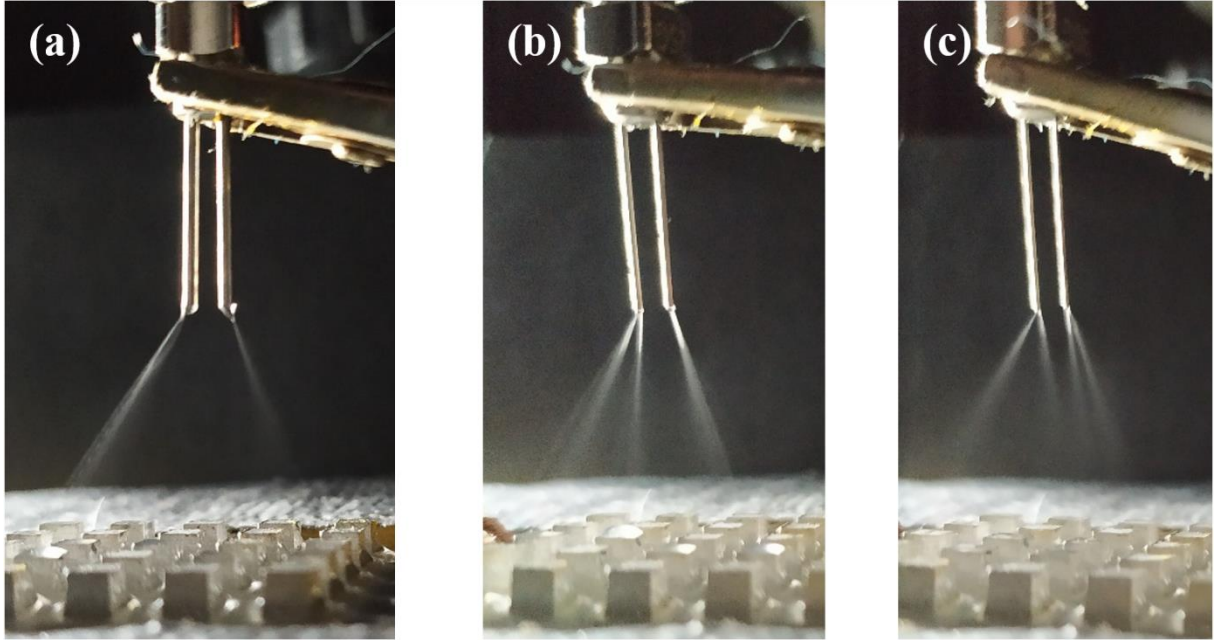
Şekil 82. Kare-18 ısı alıcıda aseton için tekli ve çiftli nozul Weber Sayısı-nozul çapı değişim grafiği



Şekil 83. Kare-18 ısı alıcıda aseton için çiftli nozul ile farklı nozul çaplarında soğutma grafiği

Farklı nozul çaplarında, Kare-18 ısı alıcıda, aseton ile çiftli nozul için yapılan deneylerde gerçekleşen soğutma grafiği **Şekil 83**'de verilmiştir. En iyi soğutmanın 30 G nozul çapında gerçekleştiği görülmektedir. Nozul çapı azaldıkça elektrosprey soğutma performansının yükseldiği görülmektedir.

En yüksek ısı akısında 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %5, 30 G nozul çapında ise %16 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %5, 30 G nozul çapında ise %13 daha iyi soğutma elde edilmiştir. Grafiğe göre, düşük ısı akılarında yüksek ısı akılarına göre daha iyi ısı transferi gerçekleştiği belirlenmiştir.

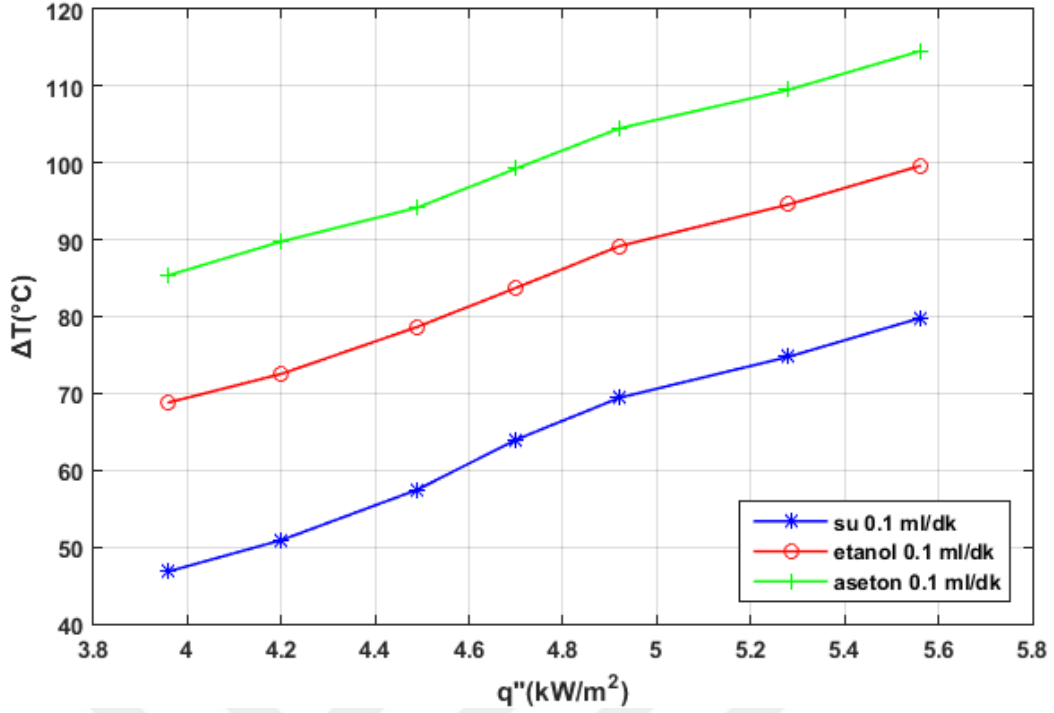


Şekil 84. Kare-18 ısı alıcıda aseton için çiftli nozul ile (a) 20 G, (b) 25 G, (c) 30 G nozul çapları için elektrosprey oluşumu

Çiftli nozulla asetonla yapılan deneylerde elektrosprey oluşum evreleri **Şekil 84'** de gösterilmiştir. Nozul çapı düştükçe elektrosprey oluşumunda atomizasyonun daha da iyileştiği görülmektedir. Bu iyileşme neticesinde ısı alıcıdan gerçekleşen ısı transferinde artış meydana gelmiştir. 20 G nozul çapında bir koni jet modu oluşurken, 25 G ve 30 G nozul çaplarında multi jet modu oluşarak 20 G nozul çapına göre sprej oluşumu iyileşmiş, atomizasyon artmıştır.

0,2 ml/dk debi, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe, 20-25-30 G nozul çapları ve sekiz farklı ısı akısıyla aseton ile yapılan deneyler neticesinde ısı transferinin tekli nozulda çiftli nozula göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. **Şekil 81** ve **Şekil 84** incelendiğinde tekli nozulda bütün nozul çaplarında multijet modunun olduğu, çiftli nozulda ise 20 G nozul çapında koni jet oluşumunun ardından diğer çaplarda multi jet moduna geçiş yaptığı tespit edilmiştir.

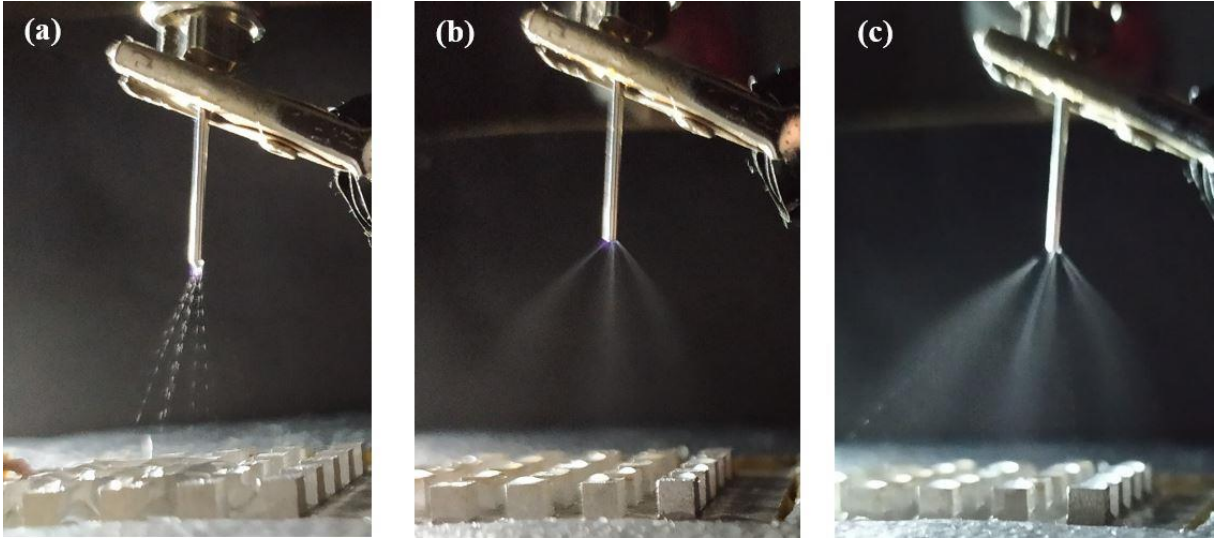
Tekli nozulda çiftli nozula göre en yüksek ısı akısında, 20 G ve 25 G nozul çaplarında %9, 30 G nozul çapında %2 daha iyi soğutma sağlanmıştır. En düşük ısı akısında ise tekli nozulda çiftli nozula göre 20 G nozul çapında %7, 25 G nozul çapında %9, 30 G nozul çapında %3 daha iyi soğutma sağlanmıştır.



Şekil 85. Kare-18 ısı alıcıda 0.1 ml/dk debide soğutucu akışkanların sıcaklık farkı ısı akısı grafiği

Nozul çapı ve sayısı, soğutucu akışkanın debisi ve akışkana uygulanan gerilimin ısı transferine etkileri incelendikten sonra farklı fiziksel özelliklere sahip akışkanların elektrosprey soğutmada, aynı şartlarda ısı transfer performansları incelenmiştir. Deneyler 8 kV gerilim, 20 mm nozul ısı alıcı arası mesafe, 20 G nozul çapı ve 0,1 ml/dk debide gerçekleştirilmiştir. Soğutucu akışkan olarak su, aseton ve etanol kullanılmıştır. Suyun, asetonun ve etanolün yüzey gerilimleri sırasıyla yaklaşık 0,072 N/m, 0,024 N/m ve 0,022 N/m' dir (Anonymous 2021a). Suyun yüzey gerilimi diğer akışkanlara göre oldukça yüksek olduğundan atomize olabilmesi için 8 kV gerilimde deneyler yapılmıştır. Suyun, asetonun ve etanolün buharlaşma sıcaklıkları sırasıyla 100, 56, 78 °C'dir. Suyun buharlaşma sıcaklığı diğer akışkanlardan oldukça yüksek olduğundan 0,1 ml/dk debide ve 5,6-5,2-4,9-4,7-4,5-4,2-3,9 kW/m² ısı akılarında deneyler yapılmıştır. Deneyler ısı alıcı yüzeyinde akışkan birikmediği, tam buharlaşmanın gerçekleştiği durumda gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sonucunda en iyi soğutma performansını su, en kötü soğutma performansını ise aseton göstermiştir. En yüksek ısı akısında asetona göre etanolla %13, su ile %30 daha iyi soğutma sağlanmıştır. En düşük ısı akısında ise asetona göre etanolla %19, su ile %45 daha iyi soğutma sağlanmıştır (**Şekil 85**).



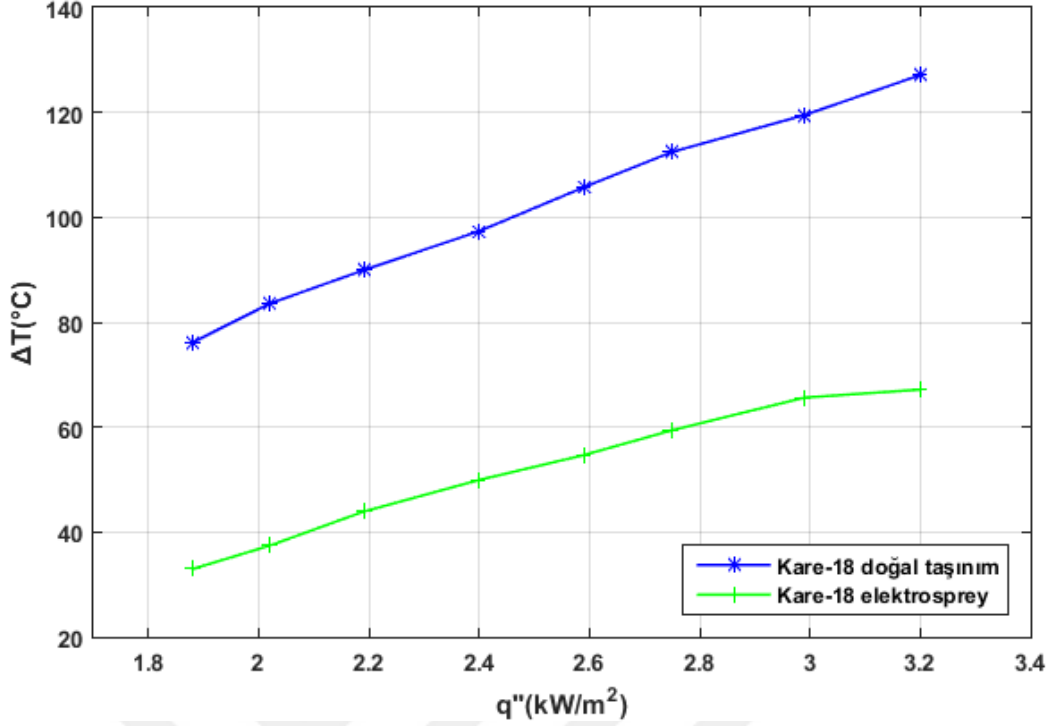
Şekil 86. Kare-18 ısı alıcıda 0,1 ml/dk debide (a) su, (b) aseton, (c) etanol için elektrosprey oluşumu

Su, aseton ve etanol ile oluşturulan elektrosprey görüntüleri incelendiğinde en yüksek yüzey gerilimine sahip olan suda koni jet elektrosprey modu olduğu, aseton ve etanolde ise multi jet modlarının olduğu görülmektedir. Asetona göre daha düşük yüzey gerilimine sahip etanolle oluşan atomizasyonun asetonla oluşan atomizasyondan daha iyi olduğu görülmektedir (**Şekil 86**).

Etanolle ve asetonla oluşturulan elektrosprey atomizasyonunun su ile oluşturulandan daha iyi olmasına rağmen en etkin soğutma suda gerçekleşmiştir. Bu durumda göstermektedir ki soğutma performansını spreyn daha iyi atomize oluşundan daha çok etkileyen başka bir parametre vardır. Bu parametre soğutucu akışkanların buharlaşma entalpileridir. Deneylede kullanılan akışkanların buharlaşma entalpileri **Tablo 15**'de verilmiştir. Soğutucu akışkanların buharlaşma entalpilerine bakıldığında en yüksek buharlaşma entalpisine sahip olan suyun diğer soğutucu akışkanlara göre daha iyi soğutma gerçekleştirdiği görülmektedir. Ancak bu durum suyun buharlaşabileceği yüzey sıcaklıkları için geçerlidir. Düşük ısı akılarında su buharlaşamayacak, yüzeyde birikerek film tabaka oluşturacak bu durumda da taşınım ile ısı transferi düşeceğinden soğutma performansı bu durumdan olumsuz etkilenecektir. Yani düşük ısı akılarında su yerine buharlaşma sıcaklığı daha düşük akışkanlar tercih edilerek soğutma iyileştirilebilir.

Tablo 15. Soğutucu Akışkanların Buharlaşma Entalpileri (Anonymous 2021b, 2021c, 2021d)

Soğutucu akışkan	Buharlaşma entalpisi (kJ/kg)
Aseton	534 30-300
Etanol	919
Su	2358 (60 °C için)

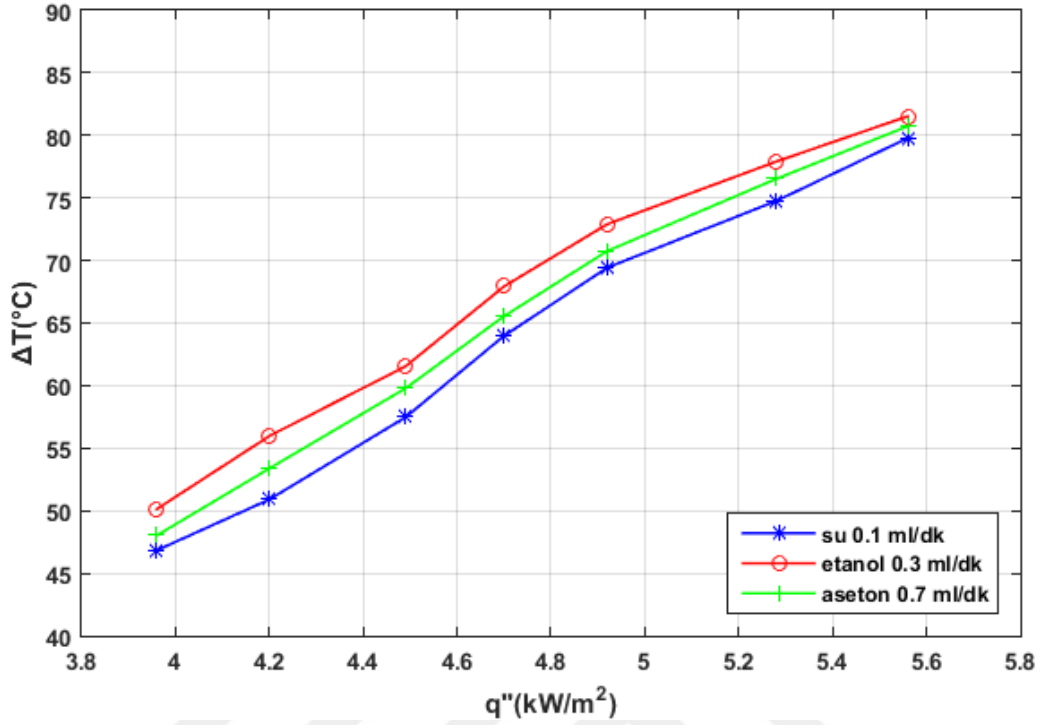


Şekil 87. Kare-18 ısı alıcıda doğal taşınım ile ve elektrosprey soğutma ile soğutma grafiği

Elektrosprey soğutmanın etkinliğini görebilmek için elektrosprey soğutma performansı, doğal taşınım ile gerçekleşen soğutma performansı ile karşılaştırılmıştır (**Şekil 87**). Deneyler 3,2-2,99-2,75-2,59-2,4-2,19-2,02-1,88 kW/m² ısı akılarında, 20G nozul çapında, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafede, 0,2 ml/dk debide ve 4,4 kV gerilimde yapılmıştır. Grafik incelendiğinde doğal taşınım ile gerçekleşen ısı atımı sonucundaki kararlı yüzey sıcaklıkları, elektrosprey soğutma ile gerçekleşen kararlı yüzey sıcaklıkları arasında oldukça büyük bir fark olduğu görülmektedir. Isı alıcı yüzeyinde farklı ısı akılarında elektrosprey soğutma ile doğal taşınım ile gerçekleşen yüzey sıcaklıkları arasındaki fark 45 ila 60 °C arasında olduğu görülmektedir. Düşük ısı akılarında elektrosprey soğutmada düşük buharlaşma sıcaklığına sahip akışkanların etkin bir soğutma sağlayabileceği görülmektedir.

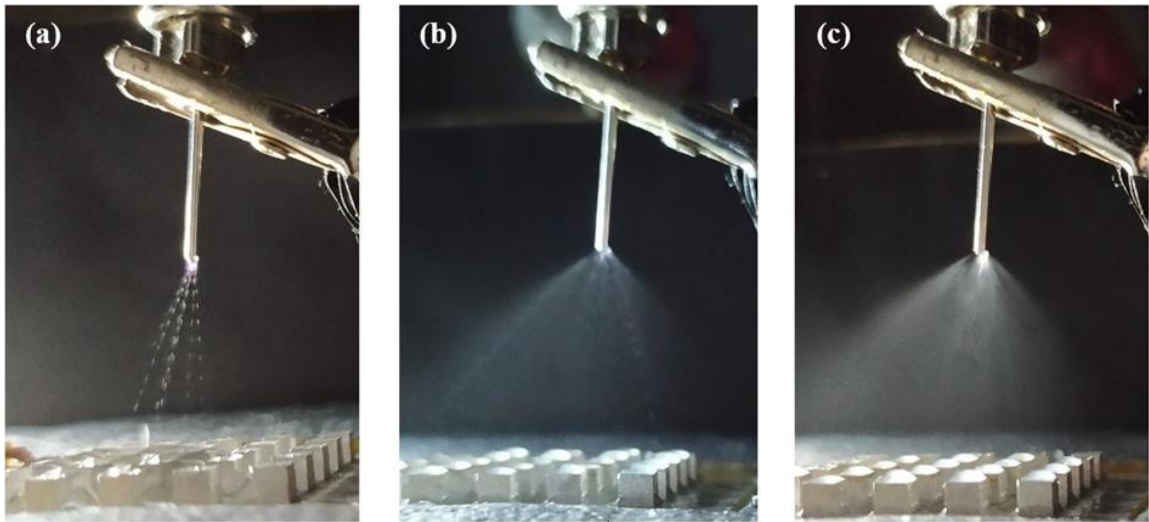
Kare-18 ısı alıcıda aynı debide farklı soğutucu akışkanlarla yapılan deneyler sonucu akışkan atomizasyon kalitesinin yanı sıra akışkanın buharlaşma entalpisinde çok etkili bir parametre olduğu **Şekil 85'** de görülmektedir. Buharlaşma entalpisinin ısı alıcı yüzeyinden atılan ısı miktarına etkisini gösterebilmek için yaklaşık buharlaşma entalpileri oranında debiler artırılarak deneyler tekrarlanmıştır. **Şekil 88'** de görüldüğü gibi yaklaşık aynı kararlı yüzey sıcaklıklarını, aynı şartlarda su ile 0,1 ml/dk, etanol ile 0,3 ml/dk, aseton ile 0,7 ml/dk debilerde elde edilmiştir. Bu durumda buharlaşma entalpisinin elektrosprey soğutma performansı üzerindeki önemini göstermiştir. Elektrosprey soğutma için kullanılacaksa, kullanılacak olan

soğutucu akışkanın düşük buharlaşma sıcaklığı, düşük yüzey gerilimi, yüksek dielektrik sabiti ve yüksek buharlaşma entalpisine sahip olan akışkanlara öncelik verilmelidir.



Şekil 88. Kare-18 ısı alıcıda farklı tip akışkanlarda aynı soğutmayı elde etmek için kullanılan debiler

Kare-18 ısı alıcısı üzerine gönderilen farklı debilerdeki akışkanların elektrosprey oluşum görüntüleri **Şekil 89'** de görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde yüksek yüzey gerilimine sahip suyun diğer akışkanlara göre daha kötü atomize olduğu ve koni jet modunun gerçekleştiği, aseton ve etanolün daha fazla debi gönderilmesine rağmen multi jet modunda çalıştıkları ve düşük yüzey gerilimlerinden dolayı daha iyi atomize oldukları görülmektedir.



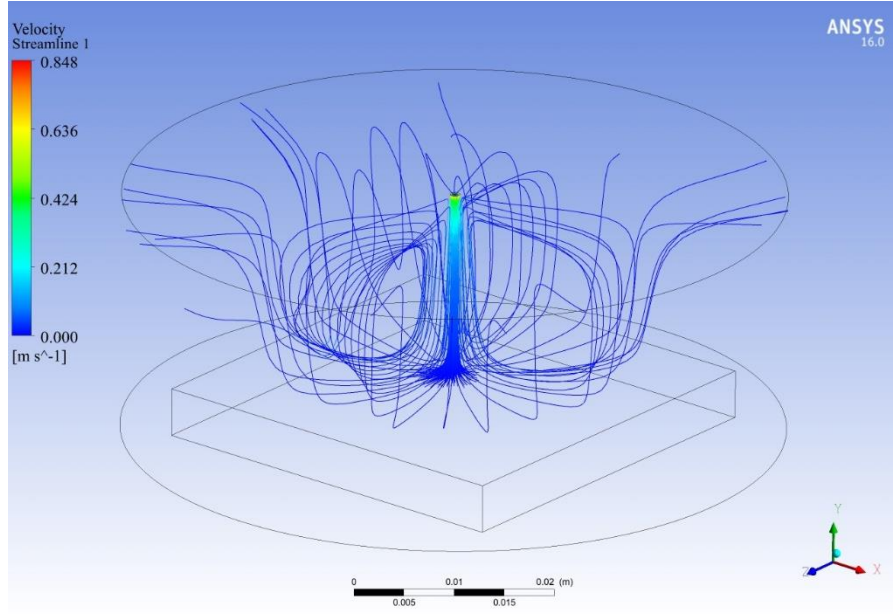
Şekil 89. Kare-18 ısı alıcıda aynı soğutma için kullanılan (a) 0,1 ml/dk su, (b) 0,3 ml/dk etanol, (c) 0,7 ml/dk aseton için elektrosprey oluşumu

Elektrosprey Soğutma İle Geleneksel Sprey Soğutma Performansının Karşılaştırılması

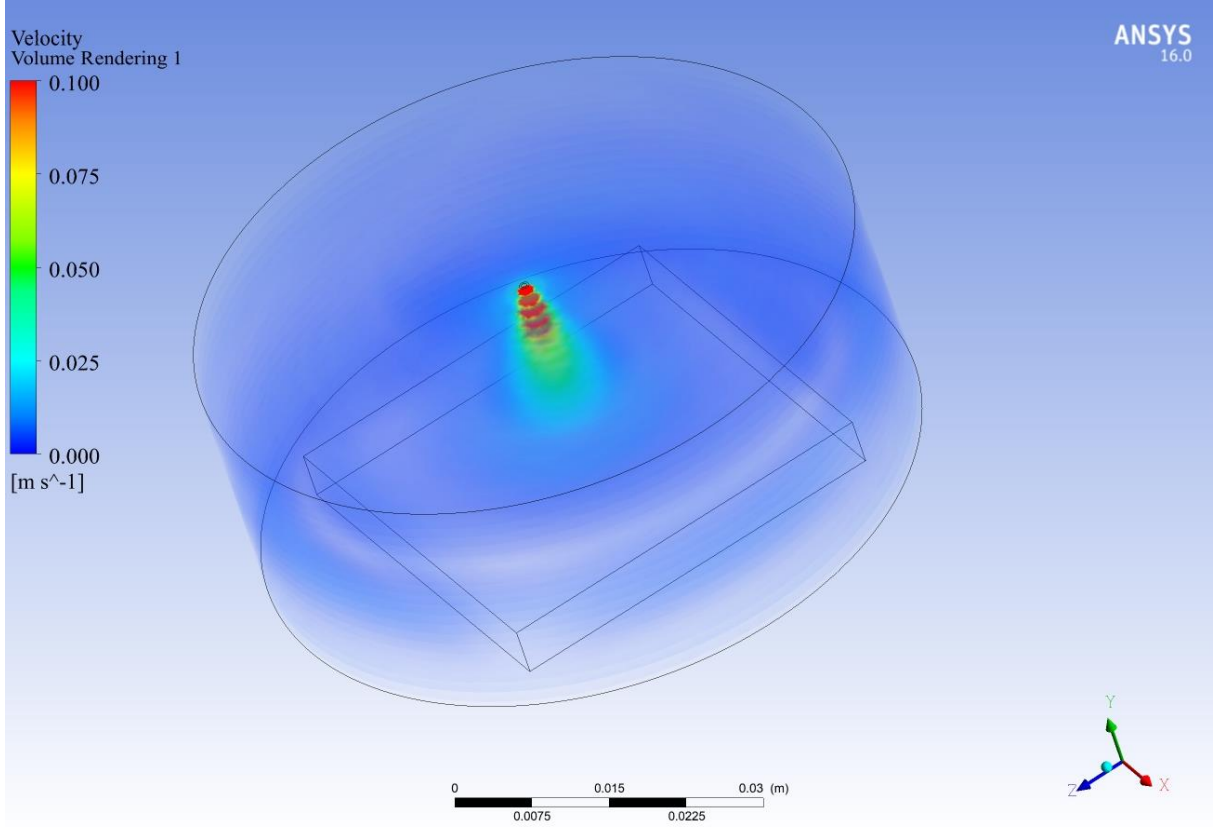
Elektrosprey soğutma ile sprej soğutma mekanizmaları benzer olmasına rağmen sprej oluşum şekilleri farklıdır. Elektrosprey soğutmada atomizasyon yüksek gerilime maruz bırakılan akışkanın damlacıklara ayrılmasıyla oluşurken, geleneksel sprej oluşumu akışkanın basınçlandırılması vasıtasıyla gerçekleşir. Çalışmanın bu bölümünde elektrosprey soğutma ile düzlem plaka üzerinde gerçekleşen ısı transferi ile ANSYS-Fluent ile modellenen geleneksel sprej soğutmada elde edilen ısı transferi karşılaştırılmıştır. Elektrosprey soğutma ile ilgili literatürde CFD analizine rastlanılmamıştır. Bunun sebebi olarak sprej oluşumunun elektrik vasıtasıyla gerçekleşmesi ve oluşan sprej damlacıklarının ısı alıcı yüzeyine çarptırılması sonucu meydana gelen ısı transferi çözümünün multifizik problemi olması gösterilebilir.

Elektrosprey soğutma deneyleri, 20 G ($d_i=0,61$ mm) nozul çapı, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe, 0,2 ml/dk debi ve 4,4 kV gerilimde etanolle oluşturulan sprej ile gerçekleştirilmiştir.

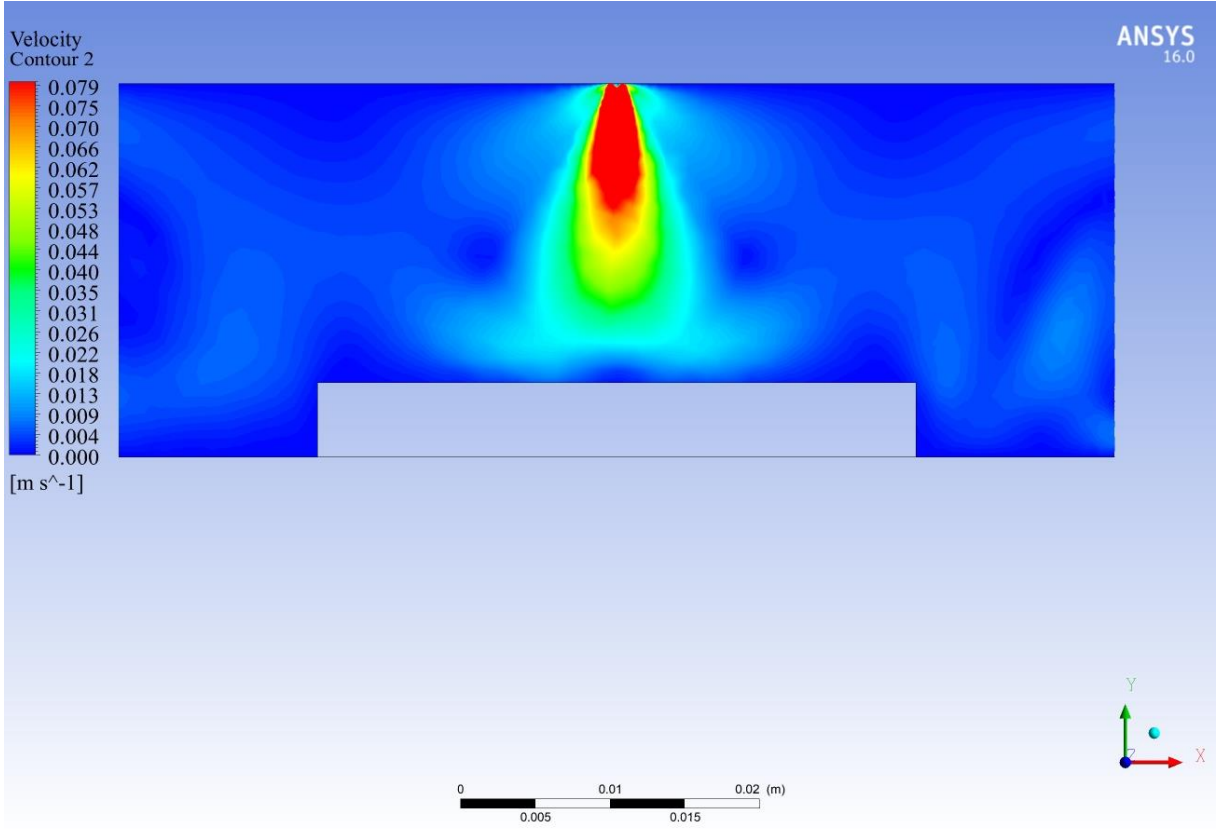
Geleneksel sprej soğutma deneyleri ise 0,61 mm nozul çapı, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe 0,2 ml/dk etanol debisi ve 25 ml/dk hava debisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel sprej modellemesinde yaygın kullanımı ve basınçlı nozullara göre daha küçük damlacık üretmesi sebebiyle (Yeşildal 2014) hava destekli nozul kullanılmıştır. 0,2 ml/dk etanol debisine karşılık kullanılması gereken hava debisi optimum akış karakteristiğini belirten ALR (Air Liquid Ratio) değerine göre hesaplanarak 25 ml/dk olarak belirlenmiştir (Yeşildal 2014). Belirtilen sınır şartlarına göre ANSYS-Fluent ile modellenen geleneksel sprej soğutma sonuçları aşağıdaki gibidir.



Şekil 90. Geleneksel sprejde hava ve etanolün oluşturduğu akım çizgileri

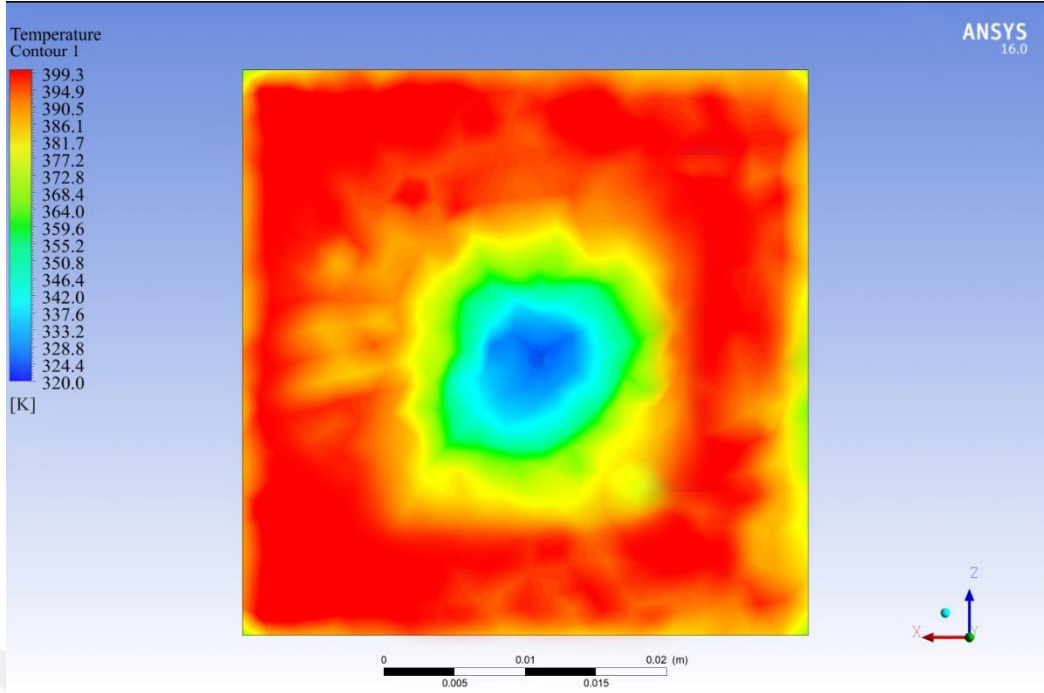


Şekil 91. Nozul çıkışında geleneksel sprej oluşumu

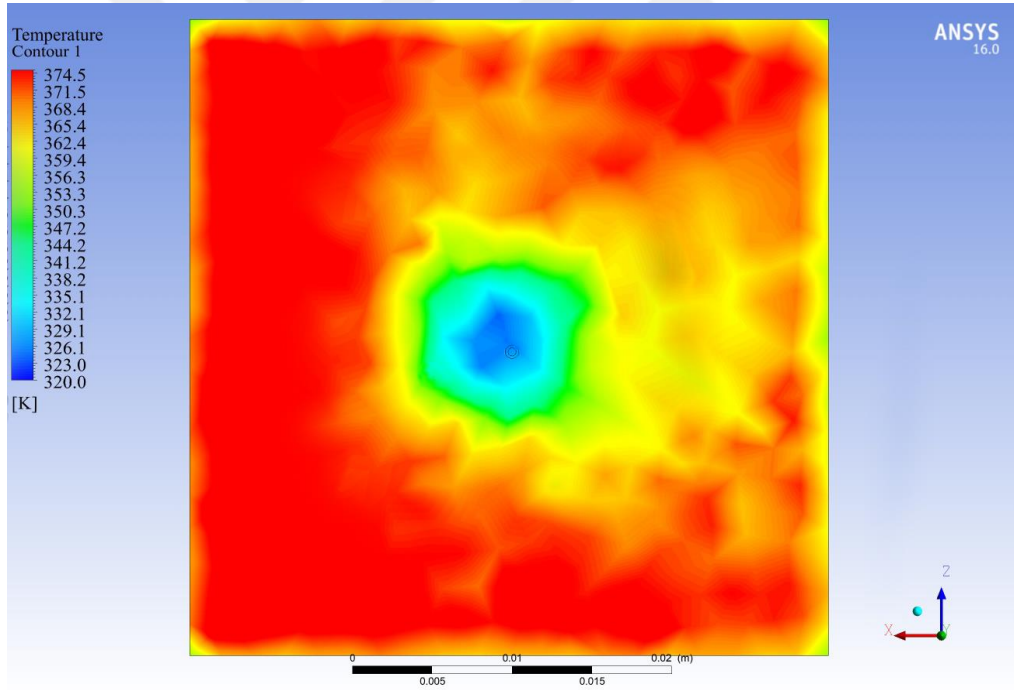


Şekil 92. Geleneksel sprej hız konturleri

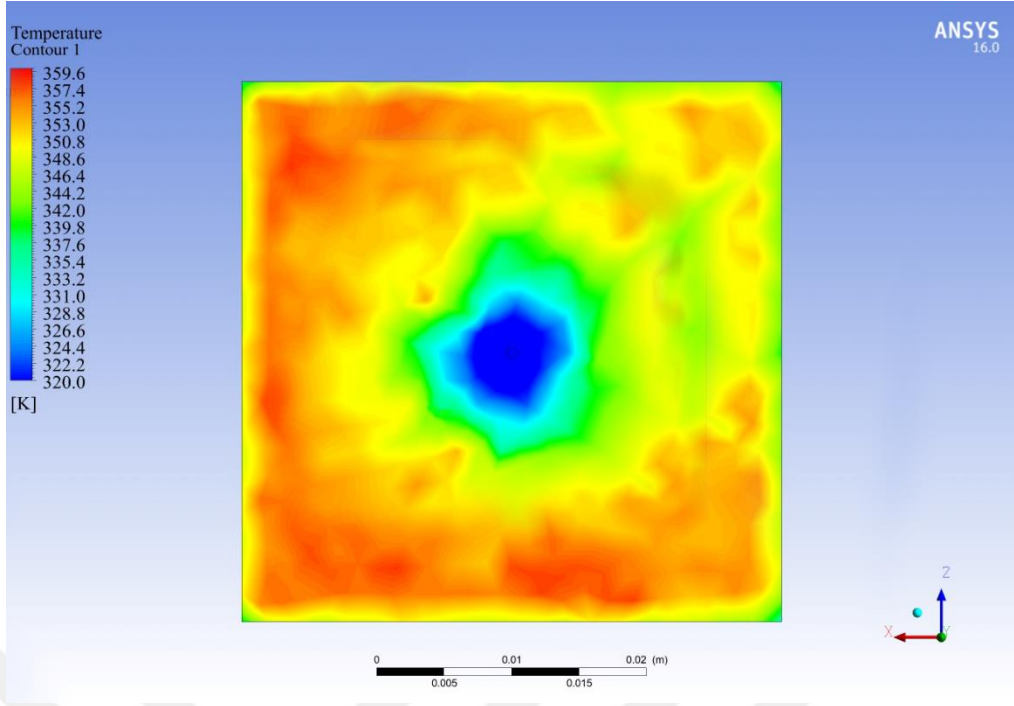
Geleneksel sprej için oluşturulan akım çizgileri ve hız konturleri incelendiğinde, hava destekli oluşturulan sprejin yüzeye çarpmasının ardından etrafa saçıldığı görülmektedir. Bu durum geleneksel sprej soğutmanın en büyük dezavantajını göz önüne sermektedir. Elektrosprej soğutmada yüklü damlacıklar topraklamanın yapıldığı yüzeye akıp, üzerlerindeki yükleri boşaltarak yüzeyden buharlaşmaktadır (Şekil 90). Geleneksel sprejin nozul çıkışında sprej hızının maksimum olduğu, ısı alıcı yüzeyine yaklaştıkça hızının azaldığı, yüzeye çarpan havanın yatay düzlemde saçıldığı belirlenmiştir (Şekil 91-92).



Şekil 93. 3,2 kW/m² ısı akısında ısı alıcı yüzeyinde oluşan sıcaklık konturleri

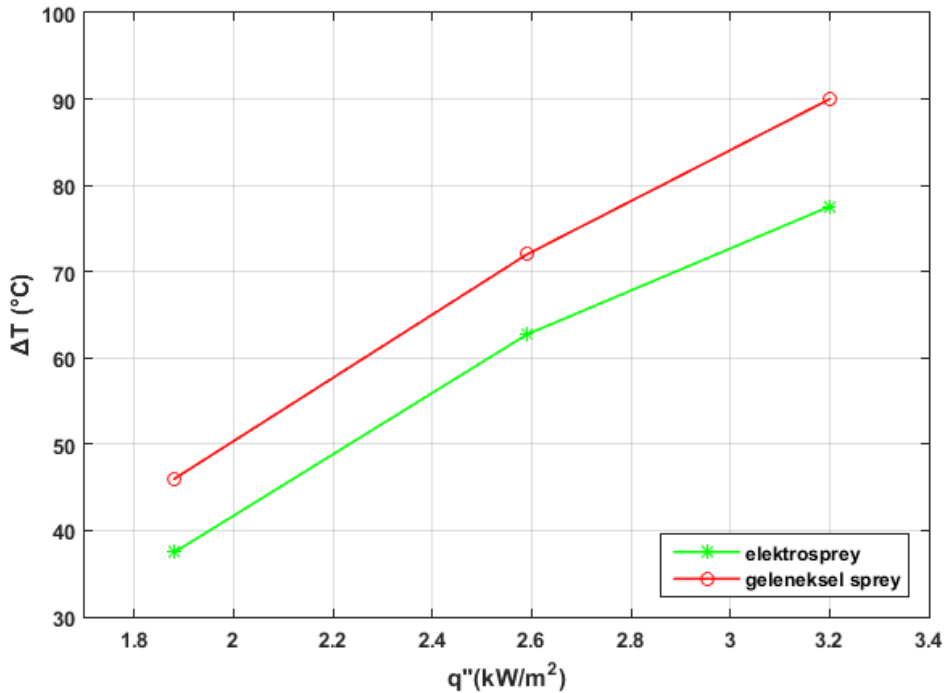


Şekil 94. 2,59 kW/m² ısı akısında ısı alıcı yüzeyinde oluşan sıcaklık konturleri

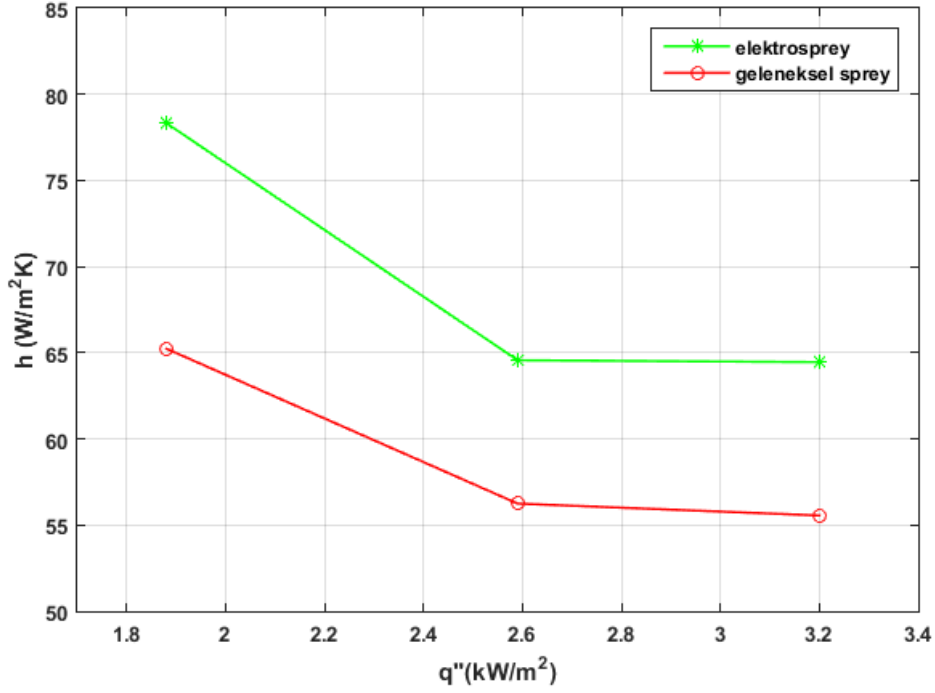


Şekil 95. 1,88 kW/m² ısı akısında ısı alıcı yüzeyinde oluşan sıcaklık konturleri

Isı alıcı üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı 3 farklı ısı akısı için (3,2-2,59-1,88 kW/m²) belirlenmiştir. Bütün ısı akılarında ısı alıcı üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları incelendiğinde, spreyn yoğunlukla çarptığı ve buharlaşmanın yüksek oranda gerçekleştiği ısı alıcı merkezinde yüzey sıcaklığının daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 93-93-95). Isı alıcı üzerinde oluşan sıcaklıkların ortalamaları alınarak elektrosprey soğutma ile geleneksel sprej soğutmada gerçekleşen ısı transferi karşılaştırması $\Delta T-q''$ ve $h-q''$ grafikleriyle irdelenmiştir.



Şekil 96. Düzlem plaka için elektrosprey ve geleneksel sprej soğutma grafiği



Şekil 97. Düzlem plaka için elektrosprey ve geleneksel spreyn ısı taşınım katsayısı değişim grafiği

Grafikler irdelendiğinde ısı akısı artışıyla ısı alıcı yüzeyindeki ortalama sıcaklık-ortam sıcaklığı farkı artmıştır. Geleneksel spreyn soğutma performansı CFD çözümleri ile elde edilmiştir. Bu çözümlerde ısı akısının hiçbir kayba uğramadan ısı alıcı yüzeyinden uzaklaştırıldığı için deneysel yöntemle göre daha avantajlı olmasına rağmen elektrosprey soğutma, geleneksel spreyn soğutmaya göre daha iyi soğutma performansı göstermiştir. Elektrospreyde geleneksel spreye göre 1,88 kW/m² ısı akısında % 17, 2,59 kW/m² ısı akısında %14, 3,2 kW/m² ısı akısında ise %13 daha iyi soğutma elde edilmiştir (**Şekil 96**). Dolayısıyla elektrosprey soğutmada geleneksel spreyn soğutmaya göre bütün ısı akılarında daha yüksek ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir. Her iki soğutma yönteminde birden ısı akısı artışıyla ısı taşınım katsayısında düşüş gözlemlenmiştir (**Şekil 97**). Bunun sebebi ısı alıcı yüzeyinden buharlaşan soğutucu akışkan miktarının ısı akısı artışıyla yüzeyden atabileceği ısı kapasitesinin üzerine çıkılmasıdır. Geleneksel spreyn soğutma metodunda soğutucu akışkanın ısı alıcı yüzeyinden buharlaşmasının yanı sıra yüzeye çarpan havanın ısı transferine olumlu katkısı olmasına rağmen elektrosprey soğutma metodunda daha etkin bir soğutma gözlemlenmiştir. Elektrospreyde geleneksel spreye göre daha düşük damlacık çapı üretiliyor oluşu (Badıllı ve Tarımcı 2009) ısı alıcı yüzeyinden ısının daha hızlı atılmasına sebebiyet vermiş ve böylece daha etkin bir soğutma gerçekleşmesini sağlamıştır.

SONUÇ

Yapılan deneysel çalışma optimum ısı alıcının belirlenmesi ve optimum geometri için elektrosprey soğutma parametrelerinin analizi üzere iki başlıktan oluşmaktadır. Optimum ısı alıcı geometrisinin belirlenebilmesi için soğutucu akışkan olarak etanol kullanılmıştır. Deneyler 4,4 kV gerilim, 0,2 ml/dk debi, 20 G nozul çapı, 20 mm nozul-ısı alıcı (substrate) arası mesafede, 3,2-2,99-2,75-2,59-2,4-2,19-2,02-1,88 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler stabil ve homojen damlacık dağılımına sahip olan koni jet modunun oluşacağı ve ısı alıcı yüzeyine düşen damlacıkların tam buharlaşabileceği şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Optimum ısı alıcının belirlenebilmesi için ilk olarak aynı kanat yüksekliğine ve yüzey alanına sahip kare, delta ve dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılar üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda $\Delta T-q''$ ve $KfO-q''$ grafikleri çizilerek etkin kanatçık geometrisi belirlenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Kare, delta ve dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılarla yapılan deneyler sonucu, düzlem plakaya göre en etkin soğutmanın kare kanatçıklı ısı alıcıda gerçekleştiği belirlenmiştir.
- Kare kanatçıklı ısı alıcıda düzlem plakaya göre yüzey sıcaklıkları en yüksek ısı akısında yaklaşık %14, en düşük ısı akısında yaklaşık %11 azalmıştır.
- Kare kanatçık ısı alıcıda kanatçık iyileştirme oranı 65 °C için 1,14, 45 °C için 1,07 olarak hesaplanmıştır.
- En etkin kanatçık geometrisi olan kare ısı alıcı için 1-3-5 kanatlar arası mesafe, 1-2-3 kanat yüksekliklerinde, 3-4-5 kanat genişliklerinde toplam 27 adet ısı alıcı tasarımı yapılmıştır.
- Aynı şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda Kare-18 ısı alıcının en etkin soğutmanın gerçekleştiği kanatçık geometrisine sahip olduğu belirlenmiştir.
- Kare-18 ısı alıcıda yüzey sıcaklıkları düzlem plakaya göre en yüksek ısı akısında yaklaşık % 14, en düşük ısı akısında ise yaklaşık %12 azalmıştır.
- Kare-18 ısı alıcı için kanatçık iyileştirme oranı 70 °C için 1,15, 35 °C için 1,05 olarak hesaplanmıştır.
- Deney verileri Varyans Analizi Full Factorial metoduyla değerlendirilerek deneylerde kullanılan parametrelerin etkileri incelenmiş ve ana parametrelerin tamamının KfO' nun bulunmasında etkili olduğu belirlenmiştir.

- Varyans analizi kalıntı grafikleri incelendiğinde deney sonuçlarının, tahmin değerleri ile tutarlı olduğu, deneysel verilerin anlamlı olduğu ispat edilmiştir.
- Sprey görüntüleme sonucu Kare-18 ısı alıcı için bütün kanat yüksekliklerinde hedeflendiği gibi koni jet modu olduğu gözlemlenmiştir.

Optimum ısı alıcı geometrisi belirlendikten sonra Kare-18 ısı alıcı üzerinde deney parametreleri değiştirilerek ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Gerilim, debi, nozul sayısı, nozul çapı ve akışkan çeşidinin elektrosprey soğutmada ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Deney parametrelerinin değişimi ile elektrosprey modlarının değişimi irdelenmiştir. Ayrıca geleneksel sprej soğutma metodu ANSYS Fluent CFD programı ile modellenerek elektrosprey soğutma ile ısı transfer performansları karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları $\Delta T-q''$, We_E-E , $We-Q$, $We-d_i$ grafikleri ile ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- ❖ Gerilimin elektrosprey soğutmaya etkisini araştırmak amacıyla 0,2 ml/dk debi, 30 G nozul çapı, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe, 3,4-4,4-5,5 kV gerilim ve 3,2-2,99-2,75-2,59-2,4-2,19-2,02-1,88 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda, en etkin soğutmanın 5,4 kV gerilimde gerçekleştiği belirlenmiştir. Soğutmada en düşük ısı akısında %30, en yüksek ısı akısında %25' e varan artış gözlemlenmiştir. Gerilim arttıkça soğutma performansının da arttığı görülmüştür. Gerilimin artışıyla elektrosprey modunun koni jet moddan, multijet moduna doğru geçiş yaptığı, bu sayede atomize olan damlacık çaplarının daha da küçüldüğü ve ısı alıcı yüzeyinden daha hızlı şekilde ısının atılmasını sağlayarak ısı transfer performansını arttırdığı belirlenmiştir.
- ❖ Atomizasyonda damlacık ayrışmasını ifade eden We_E sayısı hesaplanarak gerilimle değişimi irdelenmiş, gerilim arttıkça Elektrik Weber sayısı %40-60 arasında artış göstermiştir.
- ❖ Debinin elektrosprey soğutmaya etkisini araştırmak amacıyla 4,4 kV gerilim, 30 G nozul çapı, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe, 0,1-0,2-0,3 ml/dk debilerde ve 3,2-2,99-2,75-2,59-2,4-2,19-2,02-1,88 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda, en etkin soğutmanın 0,3 ml/dk debide gerçekleştiği belirlenmiştir. Soğutmada en düşük ısı akısında %67, en yüksek ısı akısında %33' e varan artış gözlemlenmiştir. Debi arttıkça soğutma performansının da arttığı görülmüştür. Elektrosprey görüntüleme sonucu her üç debi için de kararsız bir multi jet yapısının olduğu, farklı olarak atomize olan damlacık miktarının arttığı, böylece ısı alıcı yüzeyinden uzaklaştırılan ısı miktarının da arttığı belirlenmiştir.

- ❖ We-Q grafikleri irdelendiğinde debi artışıyla Weber sayısının %75-89 arasında artış tespit edilmiştir.
- ❖ Kare-18 ısı alıcıda etanol ile tekli nozul için farklı nozul çaplarında yapılan deneyler sonucunda, en etkin soğutmanın 30 G nozul çapında gerçekleştiği belirlenmiştir. Nozul çapı azaldıkça ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. Nozul çapı düştükçe elektrosprey modunun koni jet modundan multi jet moduna geçtiği görülmüştür. Bu sayede atomizasyonu sağlanan spreyc taneciklerinin boyutu azalmış ve ısı alıcı yüzeyinden daha etkin ısı atımı gerçekleşmesine sebep olmuştur.
- ❖ Kare-18 ısı alıcıda etanol ile çiftli nozul için farklı nozul çaplarında yapılan deneyler sonucunda, en etkin soğutmanın 25 ve 30 G nozul çaplarında gerçekleştiği belirlenmiştir. Çiftli nozulda da tekli nozulda olduğu gibi nozul çapı azaldıkça spreyc atomizasyonu artmıştır.
- ❖ Spreyc görüntülerinden anlaşıldığı üzere etanolla farklı nozul çaplarında yapılan deneyler sonucu tekli nozulda çiftli nozula göre daha iyi bir spreyc atomizasyonu gerçekleştiği için, tekli nozul çiftli nozula göre en yüksek ısı akısında %11, en düşük ısı akısında ise %14' e kadar daha iyi soğutma performansı göstermiştir.
- ❖ Kare-18 ısı alıcıda aseton ile tekli nozul için farklı nozul çaplarında yapılan deneyler sonucunda, en etkin soğutmanın 30 G nozul çapında gerçekleştiği belirlenmiştir. Nozul çapı azaldıkça ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. Nozul çapı düştükçe elektrospreyc modunun koni jet modundan multi jet moduna geçtiği görülmüştür. Atomizasyonu sağlanan spreyc taneciklerinin boyutu azalmış ve ısı alıcı yüzeyinden daha etkin ısı atımı gerçekleşmesine sebep olmuştur.
- ❖ Kare-18 ısı alıcıda aseton ile çiftli nozul için farklı nozul çaplarında yapılan deneyler sonucunda, en etkin soğutmanın 30 G nozul çapında gerçekleştiği belirlenmiştir. Çiftli nozulda da tekli nozulda olduğu gibi nozul çapı azaldıkça spreyc atomizasyonu artmıştır.
- ❖ Asetonla farklı nozul çaplarında yapılan deneyler sonucu tekli nozulda çiftli nozula göre daha iyi bir spreyc atomizasyonu gerçekleştiği için, tekli nozul çiftli nozula göre en yüksek ısı akısında da en düşük ısı akısında da %9' a kadar daha iyi soğutma performansı göstermiştir.
- ❖ Etanol ve asetonla, tekli-çiftli nozularla yapılan deneyler sonucu Weber Sayısı' nın tekli nozulda çiftli nozula göre 4 kat fazla olduğu, dolayısı ile damlacık ayrışmasının (atomizasyonun) daha iyi geliştiği tespit edilmiştir.

- ❖ Akışkan türünün elektrosprey soğutmaya etkisini araştırmak amacıyla 8 kV gerilim, 20 G nozul çapı, 20 mm nozul-ısı alıcı arası mesafe, 0,1 ml/dk debilerde ve 5,6-5,2-4,9-4,7-4,5-4,2-3,9 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda, en etkin soğutmanın su ile sağlandığı belirlenmiştir. Yüzey gerilimlerinin daha düşük olması sebebiyle aseton ve etanolde multi jet modu oluşurken suda koni jet modu oluşmuştur. Atomizasyonun diğer iki soğutucu akışkana göre daha kötü olmasına rağmen en etkili soğutma suda gerçekleşmiştir. Bunun sebebi suyun buharlaşma entalpisinin aseton ve etanole göre oldukça yüksek olmasıdır. Sonuç olarak düşük ısı akıları için düşük buharlaşma entalpisine sahip soğutucu akışkan kullanımı yeterli olmasına rağmen yüksek ısı akılarında istenilen sıcaklık aralığını yakalayabilmek için yüksek buharlaşma entalpisine sahip akışkanlar kullanılmalıdır.
- ❖ Buharlaşma entalpisinin soğutmaya etkisini görebilmek adına, aseton-etanol ve su için aynı yüzey sıcaklığının yakalanabileceği debiler araştırılmış ve aynı şartlarda, aynı yüzey sıcaklığının yakalanabildiği sıcaklıklara aseton ile 0,7 ml/dk, etanol ile 0,3 ml/dk, su ile 0,1 ml/dk debilerde ulaşılabildiği görülmüştür.
- ❖ Elektrosprey soğutma için soğutucu akışkan seçiminde akışkanın yüzey gerilimi, buharlaşma sıcaklığı ve dielektrik sabitinin yanı sıra buharlaşma entalpisinin de göz ardı edilmemesi gerektiği belirtilmiştir.
- ❖ Elektrosprey soğutmada geleneksel sprej soğutmaya göre bütün ısı akılarında yaklaşık %15 daha iyi soğuma elde edilmiştir. Bunun temel sebebi daha düşük sprej partikülleri üretebilen elektrosprey metodunun ısı alıcı yüzeyinden ısıyı hızlı bir şekilde atabilme kabiliyeti olarak gösterilebilir.

Çalışma sonunda bundan sonraki araştırmalar için aşağıdaki öneriler belirlenmiştir:

- Optimum ısı alıcı geometrisi etanol için belirlenmiştir. Farklı soğutucu akışkanlar için ısı alıcı optimizasyonu yapılabilir.
- Deneylerde kullanılan soğutucu akışkan buharlaştıktan sonra sprej odasından tahliye edilmiştir. Kapalı bir sistem oluşturularak bir soğutma çevrimi oluşturulabilir.
- Deneylerde işlemci optimum yüzey sıcaklık aralığı baz alınarak ısı akıları uygulanmıştır. Farklı endüstriyel uygulamalar için farklı ısı akılarında etkin elektrosprey soğutma şartları belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Anderson T. M., Mudawar I., 1989. Microelectronic cooling by enhanced pool boiling of a dielectric fluorocarbon liquid. *Journal of Heat Transfer*, (111), 752–759.
- Ang, K. M., Yeo, L. Y., Friend, J. R., Hung, Y. M., Tan, M. K., 2015. Nozzleless spray cooling using surface acoustic waves. *Journal of Aerosol Science*, (79), 48-60.
- Anglart, H., Alavyoon, F., Novarini, R., 2010. Study of spray cooling of a pressure vessel head of a boiling water reactor. *Nuclear Engineering and Design*, (240), 252-257.
- Anonymous, 2020a. <https://www.interlab.com.tr/assets/upload/services/document/901-026-acetone-67-64-1-en-rev-1-pdf28082020084837.pdf>. (18.12.2020)
- Anonymous, 2020b. <https://www.interlab.com.tr/assets/upload/services/document/920-026-ethanol-absolute64-17-5-en-r-1-pdf23112019075511.pdf>. (18.12.2020)
- Anonymous, 2021a. https://www.engineeringtoolbox.com/surface-tension-d_962.html. (21.04.2021)
- Anonymous, 2021b. https://www.engineeringtoolbox.com/acetone-2-propanone-dimethyl-ketone-properties-d_2036.html. (21.04.2021)
- Anonymous, 2021c. https://www.engineeringtoolbox.com/ethanol-ethyl-alcohol-properties-C2H6O-d_2027.html. (21.04.2021)
- Anonymous, 2021d. https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html. (21.04.2021)
- Anonymous, 2021e. https://www.engineeringtoolbox.com/liquid-dielectric-constants-d_1263.html. (12.05.2021)
- Anonymous, 2021f. https://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html. (12.05.2021)
- Ashgriz, N., 2011. *Handbook of atomization and sprays*. Springer, 935 p, Newyork, USA.
- Badıllı, U., Tarımcı, N., 2009. Elektrosprey püskürtme yöntemi ve nanoteknolojideki uygulamaları. *Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi*, (38), 117-135.
- Baghel, K., Sridharan, A., Murallidharan, J. S., 2020. Experimental and numerical study of inclined free surface liquid jet impingement. *International Journal of Thermal Sciences*, (154), 106389.
- Breyfogle, F.W., 2003. *Implementing six sigma: Smarter solution using statistical methods*. Wiley&Sons Inc., 549-570, New Jersey.
- Bostanci, H., Ee, D. V., Saarloos, B. A., Rini, D. P., Chow, L. C., 2009. Spray cooling of power electronics using high temperature coolant and enhanced surface. *IEEE*, USA.
- Cader, T., Westra, L. J., Eden, R. C., 2004. Spray cooling thermal management for increased device reliability. *IEEE Trans Device Mater Reliab*, (4), 605-613.
- Castillo-Orozco, E., Kar, A., Kumar, R., 2017. Electrospray mode transition of microdroplets with semiconductor nanoparticle suspension. *Scientific Reports*, (7), 1-10.
- Chakraborty, S., Liao, I. C., Adler, A., Leong, K.W., 2009. Electrohydrodynamics: A facile technique to fabricate drug delivery systems. *Advance drug delivery reviews*, (61), 1043-1054.

- 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.
- Cheng, W. I., Chen, H., Hu, L., Zhang, W. W., 2015. Effect of droplet flash evaporation on vacuum flash evaporation cooling: Modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (84), 149-157.
- Cheng, W. L., Zhang, W. W., Chen, H., Hu, L., 2016. Spray cooling and flash evaporation cooling: The current development and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (55), 614-628.
- Cloupeau, M., Prunet-Foch, B., 1990. Electrostatic spraying of liquids: Main functioning modes. *Journal of Electrostatics*, (25), 165-184.
- Cloupeau, M., Prunet-Foch, B., 1994. Electrohydrodynamic spraying functioning modes: A critical Review. *Journal of Aerosol Science*, (25), 1021-1036.
- Deng, W., Gomez, A., 2011. Electrospray cooling for microelectronics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (54), 2270-2275.
- Ergen, T., Tunçer, O., 2015. Basınç girdaplı bir püskürteçte damlacık boyut dağılımı ve hava çekirdeği kararsızlığının incelenmesi. 19. Ulusal Mekanik Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- 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.
- Estes, K.A., Mudawar, I., 1995. Comparison of two-phase electronic cooling using free jets and sprays. *Journal of Electronic Packaging*, (117), 323-332.
- Faulkner, D., Khotan, M., Shekariz, R., 2003. Practical Design of a 1000 W/cm² Cooling System. 19th IEEE Semi-Therm Symposium, San Jose, USA.
- Feng, X., Bryan, J.E., 2008. Application of Electrohydrodynamic Atomization to Two-Phase Impingement Heat Transfer. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, (130), 072202.
- 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.
- Gibbons, M.J., Robinson, A.J., 2018. Electrospray array heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*, (129), 451-461.
- Glassman, B.S., 2005. Spray cooling for land, sea, air and space based applications, a fluid management system for multiple nozzle spray cooling and a guide to high heat flux heater design. Master of Science Thesis, University of Central Florida, Department of Mechanical, Materials and Aerospace Engineering, Florida.
- Gündoğan, B., 2015. Karbapenem grubu ilaçların analizi için ters faz sıvı kromatografi yönteminin geliştirilmesinde deneysel tasarımın kullanılması, Y.Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Hamzaçebi, C., Kutay, F., 2003. Taguchi Metodu: Bir Uygulama. *ZKÜ Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji Dergisi*, 6, 3-4.
- Hinkelmann, K., Kempthorne, O., 2008. Design and analysis of experiments Volume 1, Introduction to experimental design. John Wiley&Sons, 672 s, New Jersey.
- Horacek, B., Kiger, K. T., Kim, J., 2005. Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (48), 1425-1438.

- Hou, Y., Tao, Y., Huai, X., Guo, Z., 2012. Numerical characterization of multi-nozzle spray cooling. *Applied Thermal Engineering*, (39), 163-170.
- Hsieh, S. S., Hsu, Y. F., Wang, M. L., 2014. A microspray-based cooling system for high powered LEDs. *Energy Conversion and Management*, (78), 338-346.
- Huang, Y. L., Chang, S. H., Wang, C. H., Lee, C. I., 2005. Piezoelectric actuating sprayed phase-change cooling technique for VLSI chips. *ASME 2005 Summer Heat Transfer Conference collocated with the ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems*, (4), 503-509.
- İzgiz, S., 1999. Deney tasarımı ve Taguchi Metodu- Ürün ve proseslerin optimizasyonu. *Federal Mogul*, 335 s, İstanbul.
- Jaworek, A., Krupa, A., 1999. Classification of the modes of EHD spraying. *Journal of Aerosol Science*, (30), 873-893.
- Jaworek, A., 2007. Micro and nanoparticle production by electrospraying. *Powder Technology*, (176), 18-35.
- Jaworek, A., Krupa, A., Sobczyk, A. T., Lackowski, M., Czech, T., Ramakrishna, S., Sundarajan, S., Pliszka, D., 2008. Electro spray nanocoating of microfibres. *Solid State Phenomena*, (140), 127-132.
- Jaworek, A., Sobczyk, A. T., 2008. Electrospraying route to nanotechnology: An overview. *Journal of Electrostatics*, (66), 197-219.
- Jaworek, A., Sobczyk, A., Krupa, A., 2018. Electro spray application to powder production and surface coating. *Journal of Aerosol Science*, (125), 57-92.
- Jiang, Z., Gan, Y., Ju, Y., Liang, J., Zhou, Y., 2019. Experimental study on the electro spray and combustion characteristics of biodiesel-ethanol blends in a meso-scale combustor. *Energy*, (179), 843-849.
- Jowkar, S., Jafari, P.M., Morad, M.R., 2019. Heat transfer characteristics of high flow rate electro spray and droplet cooling. *Applied Thermal Engineering*, (162), 114239.
- Kabakuş, A., 2012. Kanal akışında optimize edilmiş ısı alıcılarda çarpan jetle ısı ve akış karakteristiklerinin belirlenmesi. *Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.*
- Kabakuş, A., Yakut, K., Özakın, A.N., Yakut, R., 2021. Experimental determination of cooling performance on heat sinks with cone-jet electro spray mode. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, (24), 665-670.
- Kline, S.J., McClintock, F.A., 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, (75), 3-8.
- Kandlikar, S. G., Bapat, A. V., 2007. Evaluation of jet impingement, spray and microchannel chip cooling options for high heat flux removal. *Heat Transfer Engineering*, (28), 11-23.
- Karakaya, M. C., 2012. Elektrosprey enjeksiyon sistemi tasarımı ve karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.*
- Karwa, N., Kale, S. R., Subbarao, P.M.V., 2007. Experimental study of non-boiling heat transfer from a horizontal surface by water sprays. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (32), 571-579.
- Kim, J., 2007. Spray cooling heat transfer: The state of the art. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, (28), 753,767.

- Kim, H. H., Kim, J. H., Ogata, A., 2011. Time-resolved high-speed camera observation of electrospray. *Journal of Aerosol Science*, (42), 249-263.
- 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.
- Krottmaier, J., 1993. *Optimizing engineering design*. McGraw-Hill Inc., 201 s, New York.
- Le, N. T., Myrick, J.M., Seigle, T., Huynh, P. T., Krishnan, S., 2018. Mapping electrospray modes and droplet size distributions for chitosan solutions in unentangled and entangled concentration regimes. *Advanced Powder Technology*, (29), 3007-3021.
- Lenguito, G., De La Mora, F. J., Gomez, A., 2014. Scaling up the power of an electrospray microthruster. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, (24), 1-10.
- Lin, L., Ponnappan, R., 2005. Two-phase high capacity spray cooling loop-nozzle orientation effects and performance results. 3rd International Energy Conversion Engineering Conference, San Francisco, USA.
- Manay, E., Şahin, B., Dilek, E. F., 2012. Mikrokanallarda nanoakışkanların kullanımı. *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, (53), 38-42.
- Martinez-Galvan, E., Ramos, J. C., Anton, R., Khodabandeh, R., 2011. Film thickness and heat transfer measurements in a spray cooling system with R134a. *Journal of Electronic Packaging*, (133), 011002.
- Mesler, R., 1992. Improving nucleate boiling using secondary nucleation. *Proceedings of Engineering Foundation Conference, Pool and External Flow Boiling*, Santa Barbara, USA.
- Miller, J., Miller, J., 2008. *Analitik kimyacılar için istatistik ve kemometri*. İlke Yayınevi, 312 s, Ankara.
- Montgomery, D.C., 2005. *Design and analysis of experiment*. John Wiley&Sons Inc., 538 s, New York.
- Morad, M. R., Rajabi, A., Razavi, M., Sereshkeh, S. R. P., 2016. A very stable high throughput Taylor Cone-jet in electrohydrodynamics. *Scientific Reports*, (6), 38509.
- Mudawar, I., Bharathan, D., Kelly, K., Narumanchi, S., 2009. Two-phase spray cooling of hybrid vehicle electronics. *IEEE Transactions On Components And Packaging Technologies*, (32), 501-512.
- Mudavar, I., 2001. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, (24), 122-141.
- Oliphant, K., Webb, B. W., McQuay, M. Q., 1998. An experimental comparison of liquid jet array and spray impingement cooling in the non-boiling regime. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (18), 1-10.
- Overholt, M. R., McCandless, A., Kelly, K. W., Becnel, C. J., Motakef, S., 2005. Micro-jet arrays for cooling of electronic equipment. 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels, Canada.
- Pais M. R., Chow L. C., Mahefkey E.T., Surface roughness and its effect on the heat transfer mechanism in spray cooling. *Journal of Heat Transfer*. (114), 211–219.
- Panao, M. R. O., Moreira, A. L. N., Durao, D. F. G., 2011. Thermal-fluid assessment of multijet atomization for spray cooling applications. *Energy*, (36), 2302-2311.

- Pongrac, B., Kim, H. H., Janda, M., Martisovits, V., Machala, Z., 2014. Fast imaging of intermittent electro spraying of water with positive corona discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, (47), 1-10.
- Qi, A., Yeo, L. Y., Friend, J. R., 2008. Interfacial destabilization and atomization driven by surface acoustic waves. *Physics of Fluids*, (20), 074103.
- Rainey K. N., You S. M., Lee S., 2003. Effect of pressure, subcooling, and dissolved gas on pool boiling heat transfer from microporous, square pin-finned surfaces in FC-72. *International Journal of Heat Transfer*, (46), 23-35.
- Riffat S. B., Ma X., 2004. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review. *International Journal of Energy Research*, (28), 753–768.
- Rini, D. P., 2000. Pool boiling and spray cooling with FC-72. Ph.D. Thesis, University of Central Florida.
- Rini, D. P., Chen, R. H., Chow, L. C., 2001. Bubble behavior and heat transfer mechanism in FC-72 pool boiling. *Experimental Heat Transfer*, (14), 27-44.
- Rini, D. P., Chen, R. H., Chow, L. C., 2002. Bubble behavior and nucleate boiling heat transfer insaturated FC-72 spray cooling. *Journal of Heat Transfer*, (124), 63-72.
- Robinson, A., Gibbons, M., 2014. Plume characterisation of a single source electro spray for micro electronic cooling. *International Symposium on Electrohydrodynamics*, Okinawa, Japan.
- Shi, J. W., Zheng, L. N., Ma, R. L., Wang, B., Chen, H.Q., Wang, M., Wang, H. F., Feng, W. Y., 2019. Chemical analysis and imaging of fingerprints by air-flow assisted desorption electro spray ionization mass spectrometry. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, (47), 1909-1914.
- Si, B. Q., Byun, D., Lee, S., 2007. 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.
- Sienski, K., Eden, R., Schaefer, D., 1996. 3-D electronic interconnect packaging. *IEEE Aerospace Applications Conference*, Aspen, USA.
- Silk, E. A., Gollhofer, E. L., Selvam, R. P., 2008. Spray cooling heat transfer: Technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application. *Energy Conversion and Management*, (49), 453-468.
- Singhal, V., Garimella, S. V., 2007. Induction electrohydrodynamics micropump for high heat flux cooling. *Sensors and actuators A: Physical*, (134-2), 650-659.
- Sodtke, C., Stephan, P., 2007. Spray cooling on micro structured surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (50), 4089-4097.
- Sturgis J. C., Mudawar I., 1999. Critical heat flux in a long, rectangular channel subjected to onesided heating – II. Analysis of critical heat flux data. *International Journal of Heat Mass and Transfer*, (42), 1849–1862.
- Su, Y., Jiang, H., Liu, Z., 2021. An experimental investigation on heat transfer performance of electrostatic spraying used in machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (112), 1285-1294.
- Şişman, Y., Demirtaş, H., 2016. Tam faktoriyel deney tasarımı ile kadaastro haritalarının sayısallaştırılması.

- Tan, F., Canbolat, A.S., Türkan, B., Yüce, B.E., 2015. Elektronik cihazların soğutulmasının farklı türbülans modelleri ve duvar yaklaşımları ile CFD simülasyonu. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye.
- Tan, S. W., 2001. Computer simulation of a spray cooling system with FC-72. Ph.D. Thesis, University of Central Florida.
- Tatemoto, Y., Ishikawa, R., Takeuchi, M., Takeshita, T., Noda, K., Okazaki, T., 2007. An Electro spray Method Using a Multi-Capillary Nozzle Emitter. *Chemical Engineering and Technology*, (30), 1274-1279.
- Tuckerman, D. B., Pease, R. F. W., 1981. High-performance heat sink for VLSI. *IEEE Electron Device Letters*, (2), 126–129.
- Wang, H., Hsu, C.P., Mamishev, A.V., 2009. The enhancement ratio of corresponding convection heat transfer coefficient using electro spray evaporative cooling system. ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference, San Francisco, California USA.
- Wang, H., Mamishev, A.V., 2012. Heat transfer correlation models for electro spray evaporative cooling chambers of different geometry types. *Applied Thermal Engineering*, (40), 91-101.
- Wang, H., Mamishev, A.V., 2012a. Optimization methodology for electro spray evaporative cooling chambers. *Journal of Electrostatics*, (70), 384-392.
- Wang, H., Mamishev, A., 2012b. Design methodology for the micronozzle-based electro spray evaporative cooling devices. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, (2), 17-31.
- Wang, Z., Xia, L., Tian, L., Wang, J., Zhan, S., Huo, Y., Tu, J., 2018. Natural periodicity of electrohydrodynamic spraying in ethanol. *Journal of Aerosol Science*, (117), 127-138.
- Xu, H., Wang, J., Li, B., Yu, K., Tian, J., Wang, D., Zhang, W., 2021. Effect of spray modes on electro spray cooling heat transfer of ethanol. *Applied Thermal Engineering*, (189), 116757.
- Yaddessalage, J. B., 2013. Study of the capabilities of electrowetting on dielectric digital microfluidics (EWOD DMF) towards the high efficient thin-film evaporative cooling platform. Ph.D. Thesis, The University of Texas.
- Yakut, R., Yakut, K., Sabolsky, E., Kuhlman, J., 2021. Experimental determination of cooling and spray characteristics of the water electro spray. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (120), 105046.
- Yan, Z., Duan, F., Wong, T. N., Toh, K. C., Choo, K. F., Chan, P. K., Chua, Y. S., 2011. Spray cooling. Two phase flow, phase change and numerical modeling, Ahsan, A.. Intech Open, United Kingdom, 285-310.
- Yang, J., Chow, L., Pais, M., 1996. Nucleate boiling heat transfer in spray cooling. *Journal of Heat Transfer*, (118), 668-671.
- Yang, Y., Deng, J., Yao, Z. P., 2015. Field-induced wooden-tip electro spray ionization mass spectrometry for high-throughput analysis of herbal medicines. *Analytica Chimica Acta*, (887), 127-137.
- Yang, W.H., Tarn, Y.S., 1998. Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations Based on the Taguchi Method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84, 122-129.
- Yeşildal, F., 2014. Sprey soğutmada ısı ve akış karakteristiklerinin belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.

- Yüncü, H., Kakaç, S., 1999. Temel ısı transferi. Bilim Kitabevi, 454, Ankara, Türkiye.
- Zhao, R., Cheng, W. I., Liu, Q., Fan, H. I., 2010. Study on heat transfer performance of spray cooling: model and analysis. Heat and Mass Transfer, (46), 821-829.
- Zhong, X., Yi, R., Holliday, A.E., Chen, D.D., 2009. Field distribution in an electrospray ionization source determined by finite element method. Rapid Communications In Mass Spectrometry, (23), 689-697.
- Zuo Z. J., North M. T., Wert K. L., 2001. High heat flux heat pipe mechanism for cooling of electronics. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, (24), 220-225.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Abdüssamed KABAKUŞ
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Aydın Efeler Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fak., Makine Müh. (2010)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens, Enerji A.B.D. (2012)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens, Enerji A.B.D. (2021)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	