

**SPREY SOĞUTMADA ISI VE AKIŞ
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Faruk YEŞİLDAL

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

Prof. Dr. Kenan YAKUT

2014

Her Hakkı Saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**SPREY SOĞUTMADA ISI VE AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Faruk YEŞİLDAL

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM
2014**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

SPREY SOĞUTMADA ISI VE AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN
BELİRLENMESİ

Prof. Dr. Kenan YAKUT danışmanlığında, Faruk YEŞİLDAL tarafından hazırlanan bu çalışma 26/05/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak **oybirliği (2/2)** ile kabul edilmiştir.

Başkan :	Prof. Dr. Suat CANBAZOĞLU	İmza :	
Üye :	Prof. Dr. M. Şahin GÜLABOĞLU	İmza :	
Üye :	Prof. Dr. Kenan YAKUT	İmza :	
Üye :	Doç. Dr. İsak KOTÇIOĞLU	İmza :	
Üye :	Doç. Dr. Bayram ŞAHİN	İmza :	

Yukarıdaki sonuç;
Enstitü Yönetim Kurulu 12.06.2014 tarih ve 24/753 nolu kararı ile
onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Doktora Tezi

SPREY SOĞUTMADA ISI VE AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Faruk YEŞİLDAL

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kenan YAKUT

Sprey soğutma, yüksek ısı transfer kapasitesi gerektiren en etkin uygulamalardan biridir. Sprey kontrollü bir soğutma sağlar. Sprey soğutma esnasındaki ısı transfer mekanizması tam olarak anlaşılabilmiş değildir. Sprey soğutma birçok bağımsız parametreye bağlıdır. Bu nedenle öngörü imkanları oldukça sınırlıdır. Bu deneysel çalışma sprej soğutmaya henüz yeterince aydınlatılmamış bazı değerli bilgileri eklemek için yürütülmüştür. Bu çalışmada hava destekli nozulda sprej akış karakteristikleri CCD (Yüklenme iliştilirilmiş araç) kamera ve korelasyonlarla elde edilmiştir. Jet çapı ve sprej açısı görüntü işleme ile, bozulma mesafesi ve Sauter Ortalama Çap (SMD) ise korelasyonlarla elde edilmiştir. Akış analizi sonuçlarına göre hava-sıvı kütleli debi oranı (ALR) arttıkça SMD azalır ve daha üniform sprej elde edilir. İkinci aşamada altıgen kanatçıklı ısı alıcının kaynama olmayan rejimde ve sabit yüzey sıcaklığında sprej soğutma karakteristikleri incelenmiştir. Nozul-yüzey mesafesi, kanat yüksekliği, kanat genişliği, kanatlar arası x ve y yönündeki mesafeler, hava-su debileri ve sprej zamanının ısı transferine etkileri Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile incelenmiştir. Nusselt sayısı performans istatistiği olarak dikkate alınmış ve 8 parametre için $L_{18}(2^1*3^7)$ ortogonal dizisi deney planı olarak seçilmiştir. Optimum sonuçlar 400 mm nozul-yüzey mesafesi, 10 mm kanat yüksekliği, 36 mm kanat genişliği, 15 mm kanatlar arası x yönündeki mesafe, 10 mm kanatlar arası y yönündeki mesafe, 3,6 m³/h hava debisi, 0,03 m³/h su debisi ve 5 s sprej zamanında tespit edilmiştir. Optimize edilmiş ısı alıcılarla yapılan deneyler sonucunda Nu sayısı, jet kalınlığı ve sprej açısı için korelasyonlar elde edilmiştir.

2014, 146 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sprej soğutma, atomizasyon, dijital görüntü işleme, Taguchi deney tasarımı

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

DETERMINATION OF HEAT AND FLOW CHARACTERISTICS IN SPRAY COOLING

Faruk YEŞİLDAL

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Energy Branch

Supervisor: Prof. Dr. Kenan YAKUT

Spray cooling is one of the most effective technologies required for high heat transfer capacity. Spray provides controlled cooling. During the spray cooling heat transfer mechanism has not completely understood. Spray cooling depends on many independent parameters. Therefore, predictive capabilities are quite limited. This experimental study was carried out to add some valuable information to the spray cooling which is not yet enough elucidated. In this study, air-assisted nozzle flow characteristics were obtained by CCD (Charge-coupled device) camera and correlations. The jet diameter and spray angle determined via image processing and breakup length and SMD (Sauter Mean Diameter) obtained with correlations. According to the results of flow analysis while ALR (Air-liquid mass ratio) is increasing SMD is decreasing and more uniform spray was observed. At the second stage, the spray cooling parameters of hexagonal finned heat sink for non-boiling regime and constant surface temperature were examined. The effects of the nozzle-surface distance, the heights and widths of the fins, horizontal and vertical distances between fins, air-water flow rates and spraying time on the heat transfer have been investigated by Taguchi experimental design method. Nusselt number considered as performance characteristics and $L_{18}(3^1 \cdot 2^7)$ orthogonal array has been selected as an experimental plan for the eight parameters mentioned above. The optimized results have been found to be nozzle-surface distance of 400 mm, fin height of 10 mm, fin width of 36 mm, distance to x direction between fins of 15 mm, distance to y direction between fins of 10 mm, air flow rate of 3,6 m³/h, water flow rate of 0,03 m³/h and spraying time of 5 second. As a results of the experiments which carried out with optimized heat sink element, the Nusselt number, jet thickness and spray angle correlations were obtained.

2014, 146 pages

Keywords: Spray cooling, atomization, digital image processing, Taguchi experimental design

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmasında her tŒrlŒ yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgisi ve tecrŒbesi ile beni yŒnlendiren tez danıŐmanım Sayın Prof. Dr. Kenan YAKUT'a içtenlikle teŐekkŒrlerimi sunarım. Ayrıca tez izleme jŒrimin diğer değerli Œyeleri Sayın Prof. Dr. M. Şahin GŒLABOęLU ve Sayın Doç. Dr. İsak KOTIOğLU'na da teŐekkŒr ederim.

Sevgili babam Yrd. Doç. Dr. Ruhi YEŞİLDAL'a maddi ve manevi desteklerinden dolayı teŐekkŒr ediyorum.

Son olarak, hayatımın her dŒneminde yanımda olduklarını hissettiren ve bu destekle baŐarılarımı temellendiren sevgili aileme ŐŒkran duygularımı sunarım.

Faruk YEŞİLDAL

Mayıs, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Sprey Karakteristikleri	42
1.2. Sprey Karakteristik Çapları ve SMD Korelasyonları.....	49
2. KURAMSAL TEMELLER.....	57
2.1. Genel Isı Transferi Kavramları.....	57
2.1.1. İletim ile ısı transferi	58
2.1.2. Taşınım ile ısı transferi	59
2.1.3. Işınım ile ısı transferi	60
2.2. Spreyde Isı Transferi Mekanizmaları	61
2.2.1. Sprey ısı transferi parametreleri	62
2.3. Jet Hızı ve Hacimsel Akı.....	66
2.4. Nozul Tahliye Katsayısı	67
2.5. Weber ve Ohnesorge Sayısı	68
2.6. Jet Bozulma (Dağılma) Uzunluğu	69
2.7. Sprey Bozulma Mesafesi ve Damlacık Çapı.....	72
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	75
3.1. Sprey Soğutma	75
3.2. Sprey Deney Seti ve Ölçümler	75
3.3. Yöntem	78
3.4. Optik Sprey Görüntüleme Yöntemleri	79
3.4.1. Yüksek hızda fotoğrafçılık	79
3.4.2. Schlieren tekniği.....	80
3.4.3. Shadowgraphy tekniği.....	80

3.4.4. Holografi yöntemi	80
3.5. Elektriksel Sprey Görüntüleme Yöntemleri	81
3.6. Diğer Sprey Görüntüleme Yöntemleri	82
3.6.1. Suya duyarlı kağıt (WSP) yöntemi.....	82
3.6.2. Magnezyum oksit yöntemi	82
3.6.3. Silikon yüzey yöntemi.....	82
3.7. Deney Tasarım Teknikleri ve Taguchi Deney Tasarımı	82
3.8. Deneysel Belirsizlikler	88
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	91
4.1. Parametreler ve Taguchi Deney Planı	91
4.2. Isı Transferi Analizi.....	95
4.2.1. Termal görüntüler.....	96
4.3. Taguchi Analizi	115
4.4. Nusselt Korelasyonu.....	120
4.5. Sprey Görüntüleri ve Akış Analizi	123
5. SONUÇ	135
KAYNAKLAR	138
ÖZGEÇMİŞ	147

SİMGELER DİZİNİ

a	Isıl yayılım katsayısı, m^2/s
A	Alan, m^2
ALR	Hava-sıvı kütleli debi oranı, \dot{m}_A/\dot{m}_L
BL	Bozulma mesafesi, m
C	Özgül ısı, kJ/kgK
CCD	Charge-coupled device
C_D	Sürükleme katsayısı
C_d	Nozul tahliye katsayısı
D	Sprey çapı
D^*	Boyutsuz damla çapı
d	Nozul çapı
d_j	Jet çapı
d_{32}	Sauter Ortalama Çap (SMD)
Ec	Eckert sayısı
h	Isı transfer katsayısı, W/m^2K
H	Nozul-yüzey mesafesi, mm
Ja	Jakob sayısı, $C_p\Delta T_{sat}/h_{fg}$
\dot{m}	Kütleli debi, kg/s
\dot{N}''	Damlacık akısı, $1/m^2s$
Nu	Nusselt sayısı, hD/k
Oh	Ohnesorge sayısı, $We^{0.5}/Re$
Pr	Prandtl sayısı, ν/α
P	Basınç, Pa
P_a	Hava basıncı, Pa
P_l	Sıvı basıncı, Pa
ΔP	Nozul boyunca basınç kaybı, Pa
\dot{q}''	Isı akısı, W/m^2
SMD	Sauter Ortalama Çap, μm
Re	Reynolds sayısı
Γ	Gama fonksiyonu

T	Sıcaklık, °C
t	Zaman, s
T _y	Yüzey sıcaklığı, °C
T _d	Doyma sıcaklığı, °C
U	Hız, m/s
U _R	Bağlı hız, m/s
\dot{V}	Hacimsel debi, m ³ /s
\dot{V}''	Hacimsel akı, m ³ /m ² s
σ	Yüzey gerilmesi, N/m
λ	Spreyin boyun yaptığı yerdeki dalga boyu
λ_{opt}	Optimum dalga boyu
μ	Dinamik (mutlak) viskozite, Pa.s
ν	Kinematik viskozite, m ² /s
We	Weber sayısı, $\rho u^2 d_0 / \sigma$

Alt indisler

a	Hava
d	Doymuş
h	Hava
k	Kanat
konv	Konveksiyon
l	Sıvı
mean	Ortalama
ort	Ortalama
R	Bağlı
rad	Radyasyon
sat	Doymuş
s	Yüzey
sp	Sprey
top	Toplam
y	Yüzey
w	Yüzey

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Düz dairesel jetin parçalanması	45
Şekil 1.2. Spreyin gelişme evreleri	46
Şekil 1.3. Sprey bozulma açısı	47
Şekil 1.4. Jet bozulma mesafesi ile jet hızı arasındaki ilişki.....	48
Şekil 2.1. Sprey soğutmada basınçlı ve hava destekli atomizasyonun karşılaştırılması	62
Şekil 2.2. Weber (We) sayısına göre sprej bozulma rejimleri	68
Şekil 2.3. Bozulma tiplerinin sınıflandırılması	69
Şekil 3.1. Sprej deney seti.....	76
Şekil 3.2. Deney setinin fotoğrafı	76
Şekil 3.3. Basınçlı su tankı.....	77
Şekil 3.4. DXD-HS1 hava destekli nozul ve bağlantıları	77
Şekil 3.5. IMPERX ICL B0620 CCD kamera ve Framelink.....	78
Şekil 3.6. LZT sıvı ve hava akış ölçerleri	78
Şekil 3.7. Lazer holografik sistemin şematik diyagramı.....	81
Şekil 4.1. Test elemanında incelenecek parametreler	93
Şekil 4.2. Taguchi L18 (3^1*2^7) deney planına göre hazırlanan ısı alıcı geometrileri	94
Şekil 4.3. Isı alıcı-1 (sprej gönderilmeden önce) termal görüntüsü	97
Şekil 4.4. Isı alıcı-1 (sprej gönderildikten sonra) termal görüntüsü	97
Şekil 4.5. Isı alıcı-2 (sprej gönderilmeden önce) termal görüntüsü	98
Şekil 4.6. Isı alıcı-2 (sprej gönderildikten sonra) termal görüntüsü	98
Şekil 4.7. Isı alıcı-3 (sprej gönderilmeden önce) termal görüntüsü	99
Şekil 4.8. Isı alıcı-3 (sprej gönderildikten sonra) termal görüntüsü	99
Şekil 4.9. Isı alıcı-4 (sprej gönderilmeden önce) termal görüntüsü	100
Şekil 4.10. Isı alıcı-4 (sprej gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	100
Şekil 4.11. Isı alıcı-5 (sprej gönderilmeden önce) termal görüntüsü	101
Şekil 4.12. Isı alıcı-5 (sprej gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	101
Şekil 4.13. Isı alıcı-6 (sprej gönderilmeden önce) termal görüntüsü	102
Şekil 4.14. Isı alıcı-6 (sprej gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	102

Şekil 4.15. Isı alıcı-7 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	103
Şekil 4.16. Isı alıcı-7 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	103
Şekil 4.17. Isı alıcı-8 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	104
Şekil 4.18. Isı alıcı-8 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	104
Şekil 4.19. Isı alıcı-9 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	105
Şekil 4.20. Isı alıcı-9 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntü	105
Şekil 4.21. Isı alıcı-10 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	106
Şekil 4.22. Isı alıcı-10 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	106
Şekil 4.23. Isı alıcı-11 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	107
Şekil 4.24. Isı alıcı-11 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	107
Şekil 4.25. Isı alıcı-12 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	108
Şekil 4.26. Isı alıcı-12 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	108
Şekil 4.27. Isı alıcı-13 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	109
Şekil 4.28. Isı alıcı-13 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	109
Şekil 4.29. Isı alıcı-14 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	110
Şekil 4.30. Isı alıcı-14 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	110
Şekil 4.31. Isı alıcı-15 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	111
Şekil 4.32. Isı alıcı-15 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	111
Şekil 4.33. Isı alıcı-16 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	112
Şekil 4.34. Isı alıcı-16 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	112
Şekil 4.35. Isı alıcı-17 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	113
Şekil 4.36. Isı alıcı-17 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	113
Şekil 4.37. Isı alıcı-18 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü	114
Şekil 4.38. Isı alıcı-18 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü.....	114
Şekil 4.39. Parametrelerin Nu sayısı üzerine etkileri.....	116
Şekil 4.40. Parametrelerin Nusselt üzerine katkı yüzdeleri	118
Şekil 4.41. Sprey zamanının Nusselt sayısı üzerine etkisi.....	121
Şekil 4.42. Kanat yüksekliğinin Nusselt sayısı üzerine etkisi	122
Şekil 4.43. Kanat genişliğinin Nusselt sayısı üzerine etkisi	122
Şekil 4.45. ALR=0.12 için sprej görüntüsü	124
Şekil 4.46. ALR=0.084 için sprej görüntüsü	124
Şekil 4.47. ALR=0.116 için sprej görüntüsü	125

Şekil 4.48. ALR=0.144 için sprej görüntüsü	125
Şekil 4.49. ALR=0.166 için sprej görüntüsü	126
Şekil 4.50. ALR=0.206 için sprej görüntüsü	126
Şekil 4.51. ALR=0.21 için sprej görüntüsü	127
Şekil 4.52. ALR=0.29 için sprej görüntüsü	127
Şekil 4.53. ALR=0.36 için sprej görüntüsü	128
Şekil 4.54. ALR= 0.12 için Matlab’de görüntü analizi	128
Şekil 4.55. Basınç-hacimsel debi oranlarının değişim grafiği	130
Şekil 4.56. ALR-Boyutsuz damla çapı (D^*) grafiği	130
Şekil 4.57. Feras ve Shanawany SMD korelasyonları ile ALR-SMD değişimi	131
Şekil 4.58. $L/d_0 - We^{0.5}$ grafiği	132
Şekil 4.59. Jet kalınlığı ile jet hızının değişimi	132
Şekil 4.60. Re sayısı ile jet bozulma mesafesinin değişimi	133
Şekil 4.61. Sprej Enerji-Momentum oranları grafiği	133

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Literatürdeki bazı sprej soğutma çalışmalarının karşılaştırılması	41
Çizelge 1.2. Jet bozulma rejimlerinin sınıflandırılması	48
Çizelge 1.3. Literatürdeki SMD korelasyonları ve kullanım aralıkları	52
Çizelge 2.1. Soğutmada ısı transferi katsayıları.....	60
Çizelge 2.2. Literatürdeki bazı bozulma mesafesi korelasyonları	71
Çizelge 3.1. Ölçülen büyüklüklerdeki belirsizlikler	90
Çizelge 4.1. Parametreler ve seviyeleri.....	91
Çizelge 4.2. L18 (2^1*3^7) deney planı	92
Çizelge 4.3. ANOVA ile Taguchi analizi başlangıç ekranı	92
Çizelge 4.4. Taguchi L18(2^1*3^7) deney planına göre parametrelerin değerleri	93
Çizelge 4.5. Parametreler ve seviyeleri (ANOVA)	95
Çizelge 4.7. Nusselt sayısı için yapılan varyans analizi sonuçları.....	115
Çizelge 4.8. Parametrelerin Nu sayısı üzerine etki sıraları	116
Çizelge 4.9. Nu için yapılan varyans analizi sonuçları (Anova).....	116
Çizelge 4.10. Optimum geometriye ait tahmin ve güven aralığı değerleri	117
Çizelge 4.11. Hesaplanan karakteristik büyüklükler ve bunlara ait değerler	117
Çizelge 4.12. Taguchi Nusselt sonuçları.....	118
Çizelge 4.13. Nusselt sayına göre yapılan optimizasyon ve optimum değerler	119
Çizelge 4.13. Sprej akış analizinde incelenen parametreler ve değerleri.....	129

1. GİRİŞ

Sprey soğutma; elektronik soğutma ve diğer yüksek ısı akıllı uygulamalar için araştırılan ve yüksek ısı transferi, ısı taşınım homojenliği ve düşük damlacık çarpma hızı ile nitelenen bir teknolojidir. Sprey soğutma esnasındaki ısı taşınım mekanizmasının yeterince anlaşılması ve olayın bağımsız bir şekilde kolayca değiştirilemeyen birçok parametreye bağlılığı nedeniyle öngörü imkanları oldukça sınırlıdır. Elektronik soğutma uygulamaları için ileri sürülen bazı sprej soğutma ısı transfer mekanizmalarını değerlendirme; yüzey artırımı, sprej eğim açısı ve yerçekimi etkilerine ilişkin dataları özetler (Kim 2007).

Sıvıların atomizasyonu; metal soğutma, içten yanmalı motorlar, kurutma uygulamaları, yangın söndürme işlemleri ve kaplama gibi birçok endüstriyel işlem için çok önemlidir. Sıvı atomizasyonu ayrıca partikül boyutu, hızı, püskürtmedeki damlacıkların yoğunluğu; alev dayanıklılığı ve tutuşma karakteristiklerini etkileyen ısı, kütle ve momentum transferi süreci üzerinde sırasıyla kritik bir etkiye sahiptir. Deneysel incelemeler, sprej parametrelerini nitel ve nicel şekilde anlayabilmek için gereklidir.

Sprej sistemi modellemesi sıvı jetinin parçalanmasının ardından damlacık çap dağılımının öğrenilmesiyle ilişkilidir. Jetlerin bozulması, enjektör içindeki akış niteliklerine ve sıvı içindeki türbülans bozulmasına, jetin yüzey çevresindeki etkileşimine ve normal koşullar altında jetin yüzeyinden ayrılan damlacık-ligament (bağ) gelişimine bağlıdır. Atomizasyon problemi, safhalar arasındaki etkileşim bilgisinin tam olarak çözülmediği türbülans analizindeki birçok sorunla uğraşmaktadır. Bu sorunların çözümü için sprejin elde edildiği nozul çapı, polarizasyon oranı, damlacık hızı, damla sıcaklığı, sprej soğutmada kullanılan sıvının cinsi, damlacık çapı, kritik ısı akısı gibi parametreler ve etkileşimleri detaylı bir şekilde incelenmelidir. Optik görüntüleme ve analiz yöntemleri ile geometriye ve sisteme uygun şekilde ölçümler yapılmalıdır.

Sprey; soğutma boyunca düşük sıcaklıklarda geniş miktarlarda enerji transferi için kullanılabilir. Havuz kaynamaya göre ısı yüzeyden daha kolay uzaklaştırılabilir. Bu yüzden ısı transfer oranı daha yüksektir. Ayrıca damlalar kendi aralarındaki kütle, enerji ve momentum değişimlerinden etkilenirler.

Son yıllarda zorlanmış hava jeti veya basınçlı nozullara göre hava destekli sprej soğutma endüstride daha çok kullanılmaktadır. Hava destekli sprej, hali hazırda hızlı soğutma gerektiren bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. Bunlar; normal kalınlıkta plakaların soğutulması, sıcak haddelenmiş çeliklerin soğutulması, otomotiv endüstrisinde cam temperleme, elektronik çip soğutma gibi uygulamalardır. Ayrıca yiyecek işleme endüstrisinde de hava destekli nozullar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sprej soğutma, uzay istasyonlarının ısı kontrolü, nükleer reaktör güvenliği ve türbin kanatlarının soğutulması gibi ileri teknoloji uygulamalarında da kullanılmaktadır (Wang *et al.* 2005).

Literatürde sprej oluşumu, sprejin mikro ve makro özellikleri, kanatçıklı ısı alıcılar, sprej soğutma, çalışma sıvısı, sprejin optik ve lazer görüntü işleme teknikleri ile analizi v.b. çalışmaların özetleri verilmiştir.

Estes and Mudawar (1995c) yaptıkları deneysel bir çalışmada jet ve sprej soğutma performanslarını karşılaştırmışlardır. Sprejin daha yüksek ısı transfer katsayısı ve daha üniform yüzey sıcaklığı sağladığını görmüşlerdir. Karşılaştırmaları aynı su debisinde yapmışlardır. Optimum soğutma performansının sprej çarpma alanında elde edildiği sonucuna varmışlardır. Deneyler sonucunda kritik ısı akısı (CHF) için korelasyon elde etmişlerdir.

Silk *et al.* (2006) bu çalışmada tek ve çift fazlı akış durumları için ısı akısı-duvar sıcaklığı, sprej etkinliği (%) - duvar sıcaklığı (°C) değişimlerini çeşitli nozul tipleri için (B37, B50, Bete #2, B120, B200, Bete #3) incelemiştir. d_{32} (sauter ortalama çap), hız

ve kritik ısı akısı (CHF) değerlerini karşılaştırmışlardır. Artırılmış yüzeyler için yüzey pürüzlülüğü ve yüzey geometrisi etkilerini de incelemişlerdir. Isı transferinin ölçülen ve tahmin edilen değerlerini karşılaştırmışlardır. İlave olarak kübik, piramit ve aralıksız kanatlar için ısı akısı-yüzey sıcaklığı değişimlerini incelemişlerdir. Isı akısı açısından yüzeylerin etkilerini kübik iğne kanatçık, piramit ve aralıksız kanatçıklar için analiz etmişlerdir. Aralıksız kanatçığın, düz yüzeye ve diğer kanatçıkla yüzeylere göre en büyük ısı akısına sahip olduğunu görmüşlerdir. Bütün yüzeylerde düz yüzeye göre CHF’de buharlaşma etkinliğinin arttığını gözlemişlerdir. 45°’ye kadar eksenel sprej açılarının ısı akısını artırdığı sonucuna varmışlardır. Alandan yararlanma faktörü (AUF), buharlaşma etkinliği ($\eta_{2-\Theta}$) ve sprej eğim açısı (Θ) değerlerini farklı nozul ve kanatçıklar için çizelge halinde sunmuşlardır.

Xie *et al.* (2013) bu çalışmada sprej soğutma ile kanatçıklı yüzeylerde ısı transferi etkilerini incelemişlerdir. Mikro ve makro yapıdaki artırılmış yüzeyleri kapalı sistemde, çalışma sıvısı olarak R134a ile test etmişlerdir. Deneyler sonucunda makro yapılı yüzeylerin soğutma performansında kanat dizilişinin basit bir artış sağlamaktansa belirleyici bir rol oynayacağını belirtmişlerdir. Mikro yapılı yüzeyi ise kılcallık etkisiyle çekirdek kaynamayı artırdığı için önermişlerdir. Düz pürüzsüz yüzey referans alınarak yapılan deneylerde mikro yapılı yüzeyde %32, makro yüzeyde %36 oranında ısı transferinin iyileştiğini görmüşlerdir.

Hesaplarda bir boyutlu ısı iletimini esas alarak ısıtıcı yüzey boyunca ısı akısını;

$$q'' = k_s \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x_1} \quad (1)$$

ile hesaplamışlardır. Ortalama ısı taşınım katsayısını ise;

$$\bar{h} = q''(T_y - T_{sat}) \quad (2)$$

ifadesi ile hesaplamışlardır.

Zhang *et al.* (2013) sprej soğutmada ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Mikro yapıda bakır yüzeyde tam koni nozul ile sprej karakteristiklerinin etkilerini incelemişlerdir. Artırılmış ve düz yüzeyler için debi, nozul-yüzey mesafesi ve yüzey pürüzlülüğü etkilerini araştırmışlardır. Artırılmış yüzeyde ısı transferi oranının düz yüzeye göre etkin olarak arttığını görmüşlerdir. Ayrıca sprej eğim açısı etkisini de incelemişlerdir. Sıfır derece eğim açısında en iyi ısı transfer oranını elde etmişlerdir. Isı transferinin yüzey pürüzlülüğü ile arttığını da görmüşlerdir.

Pavlova *et al.* (2008) kaynama olmayan rejimde sprej soğutma performansında sentetik (net kütle akışı sıfır) jetlerin etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Genel sprej karakteristiklerini akış kontrolü altında birkaç yolla değerlendirmek için PIV (Particle Image Velocimetry) ve *Shadowgraphy* kullanmışlardır. Bakır ısıtıcıya yerleştirilen termoçiftlerle sıcaklık ölçümlerini yapmışlardır. Akış kontrolüyle soğutma artırımında önemli bir rol oynayan sıcak yüzey ve sprej arasındaki mesafenin (H) sprej özellikleriyle birlikte normal duruma kıyasla daha iyi sonuç verdiğini görmüşlerdir. Sprej soğutmada jet ve spreji (FC-72 sıvısıyla) karşılaştırmışlardır. Hava debisini *LABVIEW* programı ile kontrol etmişlerdir. Soğutma performansında sprej soğutmada jetden daha yüksek kritik ısı akısı elde etmişlerdir. Soğutma karakteristiklerinin dağılıma bağlı çalışmasında her parametrenin çeşitli nozullar için diğerlerinden bağımsız olduğunu görmüşlerdir. Damlacık hızının CHF'de en büyük etkiye sahip olduğunu fakat ısı transfer katsayısında önemli bir etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir. Damlacık sayısı arttıkça CHF ve ısı transfer katsayısının arttığını görmüşlerdir. Bununla birlikte d_{32} (SMD) azaldıkça ısı taşınım katsayısı artarken, CHF'nin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Rybicki and Mudawar (2006) bu yayında kare ısıtıcı test yüzeyinde sprej çarpma etkisini PF-5052'nin soğutma karakteristiklerini belirlemek için yürütmüşlerdir. Deneysel tam koni sprej nozulları kullanmışlardır. FC-72, FC-87 ve PF-5052 sıvılarını sprej eğimi ve soğutma performansı açısından karşılaştırmışlardır. SMD ve soğutma etkilerini incelemişlerdir. Oluşturdukları veritabanı tek fazlı ısı transferi, çekirdek kaynama ve CHF için genel bir korelasyon geliştirmeye olanak sağlamıştır.

Farklı akışkanlar ile yukarı ve aşağı yönlerde çekirdek kaynama verisi, yoğunluk oranı, We sayısı ve Ja sayısına bağlı tek korelasyon elde etmişlerdir. Nozul tipi, nozul çapı, sprey açısı, SMD ve hacimsel debi değerlerini de çizelge halinde sunmuşlardır.

Chen *et al.* (2004) çalışmalarında kritik ısı akısında (CHF) sprey soğutma parametrelerini deneysel olarak araştırmışlardır. Spreyi üç bağımsız parametreye göre karakterize etmişlerdir. Parametreleri damlacık akısı (N), damlacık hızı (V) ve SMD (d_{32}) olarak belirlemişlerdir. Nozul çıkışı ile ısıtılan yüzey arasındaki mesafe ve çalışma basıncından birini sabit tutup diğer ikisini değiştirerek deneyleri yapmışlardır. Kritik ısı akısının $N^{1/6}$ ve $V^{1/4}$ ile değiştiğini, nispeten de d_{32} 'ye bağlı olduğunu görmüşlerdir. Çalışmada Bete#1, Bete#2 ve B200 nozulları kullanmışlardır. 7,1-13,7 m/s hız ve 80-120 psi basınç aralıklarında çalışmışlardır. Maksimum uygun kritik ısı akısına ulaşmak için minimum su kullanılması ve yüksek hızda küçük çaplı nozul kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Lin and Ponnappan (2002) bu yayında kapalı çevrimde çok nozullu (8 minyatür nozul ($1*2 \text{ cm}^2$)) soğutma deney setiyle yüksek ısı akılı ısı kaynağı soğutmasını hedef sprey dizilişi oluşturmak için yapmışlardır. Çalışma akışkanı olarak FC-87, FC-72, metanol ve su kullanmışlardır. Sınırlanmış ve kapalı sistemde çok nozullu sprey soğutma için termal performans verilerini çeşitli işletme sıcaklıkları ve ısı akılarında elde etmişlerdir. Nozul damla basıncını 0,69...3,1 bar aralığında incelemişlerdir. Sprey soğutucunun florokarbon akışkanlarda kritik ısı akısına 90 W/cm^2 'e kadar, metanolda 490 W/cm^2 'e kadar ulaşabildiğini görmüşlerdir. Su için kritik ısı akısının 500 W/cm^2 'den daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Sprey hunisi ve çevreleyen akışkan arasındaki etkileşimin çok nozullu durumda tek nozula göre daha güçlü olduğunu göstermişlerdir. Kritik ısı akısı, hacimsel akı ve basınç düşümünün artmasıyla artmıştır. Faz değişimiyle sprey soğutmanın kısmen geniş miktarlarda gizli ısıyla ve düşük aşırı ısıtma ile yüzeyden ısı akısının kaldırabildiği sonucuna varmışlardır. Çalışma sıvısı olarak su ile sprey soğutma ısı akısını 1000 W/cm^2 olarak göstermişlerdir (Yang *et al.* 1996). Sprey soğutma uygulamalarını farklı elektroniklerin soğutmasında kullanmışlardır. Uygulamada ısı transferinin önemli bir miktarının çekirdek kaynama ile meydana

geldiğini görmüşlerdir. Diğer uygulamaları 500 W/cm^2 den daha büyük ısı akıları için yapmışlardır.

Bazı araştırmacılar tarafından birçok deney tek nozul (Yang *et al.* 1996) ve çoklu nozul kullanılarak tam koni sprej ile kritik ısı akısı (CHF) ve çekirdek kaynama ısı transferini anlamak için yürütülmüştür. Sprej nozulu, hacimsel akı, SMD, aşırı soğutma ve çalışma sıvısı etkileri araştırılmıştır. Sprej soğutmanın ısı transferi mekanizması hem yüzey çekirdeklenmesi hem de hem de ikincil çekirdeklenmeden dolayı çekirdek kaynamaya, taşınım ile ısı transferine ve sıvı film yüzeyinden direk buharlaşmaya bağlıdır (Rini *et al.* 2002). İkincil çekirdeklenmenin yapısı sprej soğutmada ısı transferini arttırmayı anlamak için yararlıdır. Bu olay damlacık akısının artmasıyla ikincil çekirdeklerin sayısının artması ve çekirdek kaynama ve taşınım ile ısı transferinin artması ile sonuçlanır. Böylece verilen ısı akısı için daha düşük yüzey sıcaklığı elde edilir (Rini *et al.* 2002). (Mudawar and Valentine 1989), sprejde diğer hidrodinamik özelliklere kıyasla hacimsel akının daha baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir.

Lin and Ponnappan (2003b) deneysel sprej çalışmalarında akışkan olarak FC-72 ve FC-87 kullanmışlardır. 35° den daha fazla açılarda ve 1.72 bar dan daha büyük basınçlarda tam koni sprej nozul ile deneyleri yapmışlardır. Deney setini çok nozullu sprej soğutma ve CHF ölçümü için tasarlamışlardır. Sistem çoklu nozul plakası, ısıtıcı düzeneği, sıvı haznesi, sprej odası, helisel halka yoğuşturucu, tek faz ve çok faz için akış kanalları, manyetik dişli pompası, ön ısıtıcı, bypass devresi ve filtreden oluşmuştur. Sıcaklık ölçümlerini T-tip termocift ile almışlardır. Isıtıcı düzeneğinin soğutma yüzeyini testten önce $14\mu\text{m}$ SiC ile parlatmışlardır. Nozul çıkışı ve soğutma yüzeyi arasındaki mesafeyi 8.8 mm olarak belirlemişlerdir. Bu mesafenin sıvının ince damlacıklara bozulmasına yeterli olduğunu belirtmişlerdir. Kapalı çevrim sistem çalışma sıvısı ile doldurulmadan önce 5×10^{-6} torr basınçla boşaltılmıştır. Sprej odası basıncı (p_1), sıvı odasına giriş basıncı (p_2) ve kondenserden çıkış basıncını (p_3) üç tane basınç sensörü kullanarak ölçmüşlerdir. Isıtıcı düzeneğini *fiberfrax* ile yalıtmışlardır. Bütün sıcaklık ölçümlerini kaydetmek için veri toplama sistemi kullanmışlardır. Sıcak yüzey ısı akısını aşağıdaki şekilde hesaplamışlardır:

$$q'' = \frac{c_w k_h}{t_2} (T_{2,m} - T_{1,m}) \quad (3)$$

Burada $T_{1,m}$ ve $T_{2,m}$ üst ve alt düzleme yerleştirilen 4 termoçiftten okunan değerlerin aritmetik ortalamasıdır. t_2 ; iki termoçift arasındaki mesafe, k_h ise plakanın ısı iletkenliğidir.

Kritik ısı akısında (CHF) sprej soğutmanın etkinliği;

$$\eta_c = \frac{q''_c}{h_{fg} Q'' \rho_l} \quad (4)$$

SMD değerini daha önce yapılan korelasyona göre tahmin etmişlerdir (Estes and Mudawar 1995).

$$\frac{d_{32}}{d_0} = 3.07 \left(\frac{\rho_v^{0.5} \Delta p d_0^{1.5}}{\sigma^{0.5} \mu_l} \right)^{-0.259} \quad (5)$$

Sprej soğutma ısı taşınım katsayısı;

$$h = \frac{q''}{T_w - T_d} \quad (6)$$

Maksimum ısı taşınım katsayısını verilen doyma sıcaklığında elde etmişlerdir (Lin and Ponnappan 2003).

Klinzing *et al.* (1992) bu yayında altın kaplamalı minyatür bakır disk ile sprej soğutma deneylerini yürütmüşlerdir. Isı akısı korelasyonu için yüzey-akışkan sıcaklık farkı, hacimsel akı, SMD ve damla hızı gibi sprej hidrodinamik parametrelerini geniş bir aralık için incelemişlerdir. Film kaynamada damla çapının en az, hacimsel akının en büyük etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. ANSYS ile de sıcaklık ölçümlerini alarak kaynama korelasyonlarını sunmuşlardır. Isı akısı için aşağıdaki eşitliği kullanmışlardır:

(w: Bakır disk kalınlığı, U_m : Ortalama damlacık hızı)

$$q'' = -\rho_c C_{p,c} w \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

Deneyle sonucunda elde ettikleri korelasyon denklemleri ise;

$$q'' = C \Delta T^{n1} Q^{n2} U_m^{n3} d_{32}^{n4} \quad (8)$$

Korelasyon katsayılarını düşük ve yüksek spreylere için ayrı ayrı hesaplamışlardır (Klinzing *et al.* 1992).

Jiang *et al.* (2004) bu çalışmada elektronik çip üzerine HAGO nozul ile su spreylere göndermişlerdir. Deneyleleri kapalı sistem spreylere odasında yürütmüşlerdir. Isı transferi katsayısını hem tek fazlı, hem de kaynama durumunda araştırmışlardır. Kaynamada ısı transferi katsayısının toplam sistem basıncına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Kritik ısı akısını 127°C'de 230 W/cm², kaynama olmayan rejimde 80°C'de 130W/cm² olarak elde etmişlerdir. Isı transferi etkinliğini tüm damlacıkların buharlaştığı durum için;

$$\epsilon = \frac{q}{\dot{m}_l (h_{fg} + C_{p,l} \Delta T_w)} \quad (9)$$

olarak vermişlerdir. Nusselt sayısı korelasyonunu düşük sıcaklıklar için Re ve Pr sayısına bağlı olarak aşağıdaki gibi elde etmişlerdir (Jiang and Dhir 2004).

$$Nu_0 = 9.75 Re^{0.7} Pr^{1/3} \quad (10)$$

Hsieh *et al.* (2007) bu çalışmada R-134a spreylere ısıtılmış düz paslanmaz çelik yüzeye çarptırarak deneysel olarak incelemişlerdir. Spreylere akış yapısını belirlemek için optik görüntü sistemi LDV'yi kullanmışlardır. LDV ile eksenel ve radyal yönde hız

dağılımını belirlemişlerdir. Merkezde aksel hızın maksimum olduğunu, radyal hızın ise merkezden dışarıya doğru arttığını göstermişlerdir.

Ayrıca kaynama olmayan rejimde spreyn ısı transferini incelemişlerdir. Isı transferi oranını konvektif sınır şartlarına göre hesaplamışlardır.

$$k_{ss} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0^+} = h(T_s - T_c) \quad (11)$$

Burada k_{ss} , paslanmaz çeliğin (SS304) ısı iletkenliği; T_s , hedef yüzey sıcaklığı, T_c , spreyn sıvı sıcaklığıdır. Ortalama ısı transfer katsayısını;

$$\bar{h} = q_s'' / (T_s - T_1) \quad (12)$$

olarak elde etmişlerdir. Sonuç olarak spreyn ısı transferinin daha yüksek kütle akılarında ve yüksek We sayılarında arttığını bulmuşlardır. Nu sayısını We , SMD , nozul çapı ve sıcaklık farkına bağlı olarak korele etmişlerdir (Eşitlik 13).

$$\overline{Nu}_L = 933 We^{0.36} \left(\frac{d_{32}}{d_0} \right)^{0.25} \left(\frac{\Delta T}{T_s} \right)^{0.027} \quad (13)$$

Akış analizi sonuçlarına göre daha yüksek hacimsel akılarda spreyn daha üniform olduğu sonucuna varmışlardır. Kaynama olmayan rejimde ısı transferi katsayısının ΔT , kütle akısı, We sayısı ve d_{32}/d_0 'a bağlı olduğunu bulmuşlardır (Hsieh and Tien 2007).

Xie *et al.* (2013b) basınçlı dönele nozulun ısı transferi performansını ve spreyn karakteristiklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Spreyn akış yapısı, damlacık SMD çapı ve damlacık çarpma enerjisini çeşitli uzaklıklarda ve basınçlarda tanımlamışlardır. Aksel mesafe arttıkça spreyn şeklinin boş koniden dolu koniye doğru değiştiğini görmüşlerdir. Damlacık boyutunun başlangıçta aksel yönde azalırken, We sayısının azalmasıyla sonradan bir miktar arttığını gözlemlemişlerdir. Yüzey sıcaklık dağılımının

kaynama olmayan rejimde çarpan damlacık akısı dağılımına bağlı olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Isı transferi performansında nozul-yüzey mesafesinin etkisini yüzey sıcaklığına bağlı ve kompleks olarak tanımlamışlardır. Deneysel sonuçlarda Nu sayısı korelasyonunu Re sayısı, boyutsuz yüzey sıcaklığı (ξ) ve nozul-yüzey mesafesine bağlı olarak elde etmişlerdir.

Li *et al.* (2006) ters (inverse) hesaplamalı bu deneysel ve sayısal çalışmalarında mikroelektroniklerin spray soğutmasında spray açısının soğutma performansına etkilerini incelemişlerdir. Ters hesaplamalı ısı transferi algoritmasını saf silikon yüzeyde ölçülen sıcaklık verilerini kullanarak bilinmeyen spray soğutma ısı akılarını hesaplamak için geliştirmişlerdir. Hesaplama planını sonlu elemanlar metodu ve kısaltılmış tek değer yöntemleri (tanımlanan sınır değeri için) ile yapmışlardır. Sonuçta yanıl ısı iletiminin arttığını göstermişlerdir. Soğutucu akış debisini akışölçer ile görüntülemişlerdir. Deneysel sabit basınçta çeşitli pompa hızlarında tekrar etmişlerdir. Soğutucu besleme basıncı ve akrilik hazne buhar basıncını basınç transdüzerleri ile ölçmüşlerdir. SMD'yi 43 μ m kabul ettiler (Mudawar and Estes 1996). Püskürtücü açısının 20°, 40°, 50° ve 60° şartlarında çalışmışlardır. Soğutucu olarak PF5060 kullanmışlardır. Deneysel veriler ve ters (inverse) ısı transferi modelinde 50°'den fazla spray açılarında soğutma kapasitesinde önemli bir azalma olduğunu göstermişlerdir. Azalmanın bir başka önemli sebebinin de daha büyük spray açılarında yüzeyden gönderilen spray hacimsel akısındaki azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Estes and Mudawar (1995) çalışmalarında spray soğutmada CHF'yi \pm %30 aralığında tahmin edebilecek şu bağıntıyı geliştirmişlerdir:

$$\dot{q}_{CHF}'' = \left(\frac{\pi}{4}\right) 2.3 \rho_v h_{fg} \dot{V}'' \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{0.3} \left(\frac{\rho_l \dot{V}'' d_{32}}{\sigma}\right)^{-0.35} \left(1 + 0.0019 \frac{\rho_l c_p \Delta T_{sub}}{\rho_v h_{fg}}\right) \quad (14)$$

Püskürtülmüş koni şeklinde sprayde sentetik jetin etkilerini bazı momentum katsayılarında ve spray akış hızlarında deneysel olarak incelemişlerdir. Spray sentetik jet yapıcının etkilerini belirlemek için 5 ayrı hava debisinde PIV (Particle Image

Velocimetry) ile ölçüm yapmışlardır. Üç boyutlu sprej akış alanında damlacık boyutu, dağılımı ve konsantrasyonunda sentetik jetin etkilerini anlamak için mikroskobik karakteristikleri Shadowgraphy ve PTV (particle tracking velocimetry) ile ölçmüşlerdir. Yüksek akış hızlarında küçük damlacıkların birleştiği ve sprejin merkezi boyunca büyük damlacıkların sayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Çaplara göre damlacık sayılarını vermişlerdir. CCD kamera ile her durum için 2000 çift görüntü almışlar ve ortalama hız alanlarını hesaplamışlardır. Boyut, şekil ve hız bilgilerini genel bir algoritma yapmak için kullanmışlardır (Estes and Mudawar 1995).

Jia and Qiu (2003) bu çalışmada, sprej soğutmada damlacık ve ısı transferi dinamiklerini yatay bir bakır yüzeyde kayganlaştırıcı sodyum dodecyl sülfat ilaveli su çözeltisi kullanarak incelemişlerdir. Gelen ve giden damlacıkları lazer PDA (phase-doppler anemometry) ile ölmüşlerdir. Kayganlaştırıcı ilavesinin sprej soğutmada etkisini araştırmışlardır. Çap-nozul yerleşimi, çap-yoğunluk oranı, ısı akısı-yüzey sıcaklığı, CHF-kütle akısı grafiklerini sunmuşlardır.

Liu *et al.* (2006) bu yayında, yüksek sıcaklıktaki metal yüzeylerden çarpan su buharının ısı transferi mekanizmasını göstermek için sayısal ve deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çarpan hava jetine küçük bir miktar su eklendiğinde ısı transferinin önemli ölçüde arttığını görmüşlerdir. Model simülasyonla atmosferik şartlarda hava spreji için test verilerini karşılaştırmışlardır. Hava hızını TSI Air Velocimeter ile, hava ve su debisini rotametre ile ölçmüşlerdir. Sayısal hesaplamaları *FLUENT* kullanarak yürütmüşlerdir. Su buharının radyal dağılımı metal ve cam tabakaların soğutma işlemleri esnasında kalite kontrolü için önemlidir (Ashgriz 2011). Farklı kütle akılarında G ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) - h_{mist} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), ısı transferi oranı-radyal dağılım, LF (Leidenfrost sıcaklığı)- G grafiklerini vermişlerdir. En iyi soğutmayı, ısı transfer katsayısının zirvede olduğu duruma noktasında elde etmişlerdir. Leidenfrost sıcaklığının hem hava hızı hem de kütle akısı ile arttığı sonucuna varmışlardır.

Visaria and Mudawar (2008) bu yayında test yüzeyinde 3 tam koni sprej nozulda FC-77 kullanarak CHF ve sprej soğutma performansını incelemişlerdir. CHF'deki artışın düşük aşırı soğutmaya nazaran yüksek aşırı soğutmada daha fark edilir seviyede olduğunu deneysel olarak göstermişlerdir. Fakat kaynama altı soğutmanın buharlaşma etkinliğinde kayda değer bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varmışlardır. Test yüzeyinin dışı G-7 plastik ve fiberglas ile yalıtıldı. FC-72 sıvısını yüksek direnç, termal stabilite ve düşük akma noktası gibi özellikleri nedeniyle tercih etmişlerdir.

Estes and Mudawar (1995) bu çalışmada, tam koni sprejde kritik ısı akısı (CHF) ve çekirdek kaynamayı daha iyi anlamak için deneyleri yürütmüşlerdir. Sprej soğutmada hacimsel debi, aşırı soğutma ve çalışma sıvısı etkilerini araştırmışlardır. Yoğun sprejin buharlaşma etkinliğini fazlasıyla azalttığı ve kaynama eğrilerinin tek faz ile çekirdek kaynama arasında alışılmadık küçük bir artış gösterdiğini belirtmişlerdir. SMD yi, yüzey gerilmesinin çok farklı değerlerini kullanarak ilişkilendirmişlerdir. Bu ilişkinin nozul çapı, We sayısı ve Re sayısına (bozulmadan önceki) bağlı olduğunu göstermişlerdir. CHF korelasyonunu FC-72, FC-87 ve su için geliştirmişlerdir. Bu korelasyon CHF'nin hacimsel debi ve SMD ile güçlü ilişkisini göstermiştir. CHF ve SMD korelasyonları tam koni nozullar için pahalı ve zahmetli damla boyut ölçümlerini tahmin etmeyi sağlamıştır. Seyrek sprej; düşük We sayısında yüksek buharlaşma etkinliği gösterirken, yoğun sprejin yüksek We sayısında düşük buharlaşma etkinliğine sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Yiğit vd (2009) bu çalışmada, soğutucu olarak PF-5052 kullanarak kare ısıtıcı test yüzeyinde sprej jetinin soğutma karakteristiklerini araştırmışlardır. Ayrıca aşırı soğutma ve SMD etkilerini de incelemişlerdir. Verileri FC-72, FC-87 ve suyun soğutma performansları ile karşılaştırmışlardır. Yönlendirmenin (yukarı-aşağı) sprej soğutma rejimlerinde ölçülebilir bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varmışlardır. Sprej odasını G-10 fiberglas plastikten yaptılar ve spreji yukarı doğru gönderdiler. Sıcaklık ve basınç sensörlerinden HP3497A dijital toplama sistemi ile verileri almışlardır. Üç boyutlu ısı yayılım modelini plaka, termoçift ve test yüzeyi arasında bir boyutlu ısı iletimi esas

alınarak FLUENT ile göstermişlerdir. Sonuçta sıcaklıkların birbirine çok yakın olduğu görmüşlerdir. PF-5052 ve su için;

$$N_{d_{32}} = 4,70Re_{d_{32}}^{0,61}Pr_l^{0,32} \quad (15)$$

korelasyonu ile $\frac{Nu_d}{Pr_f d_{32}} - Re_{d_{32}}$ grafiklerini sunmuşlardır (Yigit *et al.* 2009).

Al-Ahamdi and Yao (2008) bu çalışmada yüksek sıcaklıktaki metallerin tam koni sprej ile soğutmasının deneysel bir çalışmasını yapmıştır. Deneyleri 12,5 cm çapında, 2,5 cm kalınlığında, 900°C’de silindirik çelik plaka için yürütmüştür. Direk ve ters iletimin sayısal tablosunu yapılan 25 deneyden çıkarmıştır. Lokal su kütleli debi aralığını 1,5-6,6 kg/m²s olarak belirlemiştir. Isı transferinin öncelikle lokal kütleli debiye bağlı olduğunu göstermiştir. Minimum film kaynama ısı akısı ve maksimum (kritik) ısı akısının kütleli debinin artmasıyla arttığı sonucuna varmıştır. Dikey olarak düşen sprejde kısmen daha yüksek ısı akısı olduğunu gözlemiştir. Akıntıya karşı birikip taşan suyun da kısmen daha yüksek ısı akıları, daha yüksek Leidenfrost ve kritik sıcaklıklara sebep olduğunu görmüştür. Sistemi yerçekimi etkileri ve sprej açısı bakımından da incelemiştir. Dikey sprejin kısmen daha yüksek ısı akısı sağladığı sonucuna varmıştır.

Chen *et al.* (2002) bu çalışmada sprej parametrelerinden CHF’de sıvı kullanımının etkinliğini deneysel olarak su sprej soğutma için araştırmışlardır. Sprej; damlacık hızı (V), damlacık akısı (N) ve SMD (d₃₂) gibi üç bağımsız parametreye bağlıdır. Sprej nozulu, çalışma basıncı ve ısıtıcı yüzeyi ile nozul çıkışı arasındaki mesafenin kombinasyonu ile bu üç bağımsız parametreden ikisini sabit tutarak üçüncüsünü incelemiştir. Nozulu değiştirerek minimum miktarda su kullanıp maksimum CHF’ye ulaşmayı amaçlamışlardır. Bete#1, B 200 ve Bete#2 nozul tipleri için verileri çizelge halinde sunmuşlardır. Sonuçları η -N, CHF-N, η -d₃₂, CHF-V grafikleri olarak vermişlerdir.

Langrish and Kota (2007) çalışmalarında damlacık boyutu dağılımı ölçümlerine dayanarak tek ve çift nozul ile su spreyde damlacık çarpışmasının iki ayrı kombinasyonunu kullanarak birleşme oranlarını tahmin etmişlerdir. Birleşmeleri Eulerian–Eulerian yaklaşımı ile incelemişlerdir.

Pandey and Kushari (2008) bu patent çalışmasında çift akışkanlı içten karışimli atomizerler ve geleneksel basınçlı dönel atomizerlerin bir birleşimi olan hibrit atomizer geliştirmişlerdir. Bu dizaynın geleneksel dizaynlara göre daha iyi enerji dönüşüm etkinliğine (basınçtan kinetik enerjiye) sahip olduğunu göstermişlerdir.

Castanet *et al.* (2009) bu çalışmada, ısıtılmış düz nikel yüzeyde damlacık çarpmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çarpma rejimlerini (rebound, splash ve sıvı filminin çökmesi) gözlemek için yüksek hızlı kamera kullanmışlardır. Deneyle çeşitli çarpma koşullarında (yüzey sıcaklığı, damlacık çarpma açısı, hızı ve boyutu) yürütmüşlerdir. Sıcaklık ölçümlerini iki renkli lazer floresan termometre ile farklı çarpma rejimlerinde almışlardır.

Wang *et al.* (2005) bu görsel çalışmayı, ısıtılmış bakır, alüminyum ve paslanmaz çelik yüzeylerde 50-112°C çalışma aralıklarında çekirdek kaynama ve buharlaşmayı araştırmak için yürütmüşlerdir. Yüksek hızda video görüntüleme sistemi kullanarak buharlaşmanın dinamik sürecini çaptaki ve temas açısındaki değişimi ölçerek incelemişlerdir. Sonuçta ısı akısı ve ısıtıcı yüzey sıcaklığı arasındaki doğrusal ilişkiyi hem çekirdek hem de film buharlaşma rejimleri için bulmuşlardır.

Baillard *et al.* (2011) bu yayında çelik yüzey soğutma uygulamasıyla sprey dinamiğini deneysel ve sayısal olarak ele almışlardır. Sprey karakteristiklerini nozuldan 250-500 mm uzaktan detaylı olarak incelemişlerdir. Örnek verileri çap ve hız için PDF (Probability Density Function) yöntemi ile incelemişlerdir. Sayısal yaklaşımda Eulerian-Lagrangian formülasyonunu esas almışlardır. Gaz fazında RANS k-ε modeli ile momentum ve türbülans eşitlikleriyle çözüm yapmışlardır. Sayısal ve deneysel

sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmada bozulma modelini eklemek için ikincil atomizasyonun simülasyonuna ihtiyaç duymuşlardır. Bunun için de LES Eulerian / Lagrangian simülasyonunun gaz etrafındaki damlacıklarda daha iyi sonuç verdiğini görmüşlerdir.

Wendelstorf *et al.* (2008) bu yayında, otomatikleştirilmiş soğutma test standında, temiz yüzey koşullarında (oksidlenmeyen) ısı transfer katsayısını incelemiştir. Ortak düşünceye göre, yüksek sıcaklık rejiminde fazladan sıcaklığa bağımlılık olduğunu görmüşlerdir. Malzemedeki su spreye olan ısı transferi miktarını iki fazlı akış alanının basit modelinde açıklamışlardır. Deneysel verilerle ısı transferi katsayısının analitik korelasyonlara bağımlılığını V_s (su etki yoğunluğu) ve ΔT olarak öngörmüşlerdir. Ortalama damla çapı ve damlacık hızı değerlerini korelasyonlardan elde etmişlerdir.

Semiao *et al.* (1996) bu sayısal çalışmada basitleştirilmiş Nukiyama-Tanasawa eşitliklerinde damlacık çap dağılımı için SMD korelasyonları elde etmişlerdir. Korelasyonları basınçlı ve hava destekli spreler için çalışmışlardır.

Somasundaram and Tay (2013) spre soğutmada aralıklı ve sürekli spreyi tek fazlı rejimde düşük ısı akılarında, çift fazlı rejimde ise yüksek ısı akılarında karşılaştırmışlardır. Debi ve frekansı kontrol ederek hedef yüzeyde gerekli soğutma oranını elde etmişlerdir. Aralıklı sprede soğutma etkinliğinin sürekli spreye göre daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Aralıklı spreğin düşük debilerde spre etkinliğini artırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca spre açısını da görüntü işleme ile elde etmişlerdir.

Moreira *et al.* (2007) bu yayında buji ateşlemeli ve dizel motorların yakıt enjeksiyon sistemleri ve dermatolojik (cilt) cerrahi uygulamalarında kullanılan çoklu-aralıklı spreyle soğutmanın deneysel yöntemini tanımlamışlardır. Spre karakteristikleri ve yüzeyin ısıl davranışını birleştirilmiş hızlı tepkili ısıl çiftlerle faz-dopler anemometresi kullanarak ölçmüşlerdir. Bu donanım spre etkisi esnasında zamanla değişen ısı akısı ve

akışkanlar dinamiği karakteristiklerini MATLAB ile tahmin etmek için Doppler ve termoçift sinyallerini eşzamanlı incelemeyi sağlamıştır. Ölçümleri, elde edilen kaynama eğrilerinin faz ortalaması değerlerinde ani ısı akıları için yapmışlardır. Sprey soğutma olayının termal analizinde çoklu-aralıklı enjeksiyonu çalışma koşulları bakımından inceleyerek (frekans, süre ve enjeksiyon basıncı) karakteristik parametrelerden ikisinin (kritik ısı akısı (CHF) ve Leidenfrost olayı) kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Çoklu ve birbirini takip eden damlacık etkileşimiyle ısı transferi sürecini belirlemek için integral metodunu ileri sürmüşlerdir. Yöntemde; enjeksiyon koşullarına bağlı olan tüm kaynama eğrilerini dikkate almış ve çoklu-aralıklı spreyn etkisinde ısı transferi sürecini karakterize etmek için kullanmışlardır. Yöntemi delikli yakıt enjeksiyonlu (port-fuel) içten yanmalı benzinli motor emme sübabında enjeksiyon şartlarının ısı transferine etkisini incelemek için bir ön çalışmayla test etmişlerdir. CHF’de sıcaklık hedef yüzeye farklılık göstermesine rağmen, analizler etki alanının tamamı göz önünde bulundurulduğu zaman ısı akısının sabit kaldığını göstermiştir. Çok kısa darbe süreleri için (5 ms) soğutma etkinliğini kritik ısı akısı şartında düşük enjeksiyon frekansını arttırmak için hesaplamışlardır.

Panao ve Moreira daha önceki çalışmalarında (Panao and Moreira 2004, 2005a) ortam sıcaklığında sprej ve çarptığı düz yüzey arasındaki akışkan dinamiği etkileşimini incelemişlerdir. Akışkan dinamiği ve termal mekanizmalar arasındaki ilişkiyi ısı transferi, yüzey sıcaklığı ve damlacık karakteristiklerinin eş zamanlı ani ölçümlerine dayanarak araştırmışlardır.

Deneysel koşulların geniş bir aralığında Jakob ve Reynolds sayılarıyla ilişkili Nusselt sayısı için ani sprej/yüzey ısı transferi korelasyonunu elde etmişlerdir. Ayrıca sprej etkisi altındaki tüm yüzeyde ısı transferini ve komşu damlacıklar arasındaki etkileşimi açıklamak için ampirik integral yöntemini geliştirmişlerdir.

Ölçümleri lazer akış görüntüleme ile 0,79 mm çapında delikli koni enjektör için 8° iç ve 19° dış koni açılarında almışlardır. Alüminyum plakayı elektrik rezistansı ile ısıtıp, alttan

yalıtmışlardır. Sıvı olarak doyma sıcaklığı 60°C olan ticari gazolin kullanmışlardır. Deneylede yüzey sıcaklığını 125-225°C, enjeksiyon süresini 5ms, enjeksiyon basıncını 3 bar olarak belirlemişlerdir. Sıcaklık ölçümlerinde aşındırılmalı tip (L-tip) hızlı tepkili 3 temoçift ve veri toplama için DAQ veri toplama kartı kullanmışlardır. Toplanan verileri Matlab programı ile kontrol etmişlerdir.

Sonuç olarak eşzamanlı olarak ölçülen damlacık çapı, sıcaklığı, hızı ve ısı akısı verileri ile yüzey sıcaklığı (°C)-duvar ısı akısı (W/m²) grafiğinde film buharlaşma, çekirdek kaynama, geçiş ve film kaynama bölgeleri ile Leidenfrost sıcaklığını göstermişlerdir. Bahsedilen parametreler arasındaki ilişkiyi şu şekilde geliştirmişlerdir:

$$f(h_c, D, U, \rho, k, \mu, C_p, \sigma, h_{fg}, \Delta T_{sat}) = 0 \quad (16)$$

Yapılan boyut analizi ani sprej jet ısı transferi için ampirik korelasyonun değişkenliğine izin vermiştir. Bulunan korelasyon; $Nu = aRe^m Pr^n$ şeklindedir. Buna We sayısını da ekleyerek,

$$Nu = aRe^m Pr^n We^p \quad (17)$$

korelasyonunu elde etmişlerdir. Bu korelasyonlara hissedilir gizli ısının ölçüsü olan Jakob sayısı (Ja) ve duvar ısı transferi analizinde damlacık bozulması esnasında izafi viskoz enerji dağılımını gösteren Eckert sayısını (Ec) da ekleyerek yeni korelasyonu şu şekilde geliştirmişlerdir:

$$Nu = aRe^m Pr^n We^p Ja^q Ec^w \quad (18)$$

Gazolin için Ec ve We sayıları ihmal edilip, deneysel sonuçlarda eklenince korelasyonun son halini aşağıdaki şekilde sunmuşlardır:

$$Nu = 3.4 * 10^{-5} * Re^{1.51} / Ja^{0.254} \quad (19)$$

Bu korelasyonu grafik halinde daha önce (Arcoumanis and Chang 1993) tarafından yüksek ısı akılarında dizel yakıt için yapılan çalışmayla karşılaştırmış ve farklılıkları göstermişlerdir (Panao and Moreira 2009).

Shao and Yan (2008) bu çalışmada dizel spreyn yakıt karakteristiklerinde direk fotoğrafik görüntü ve görüntü işleme sisteminin uygulamasını sunmuşlardır. Işık kaynağı ve yüksek çözünürlüklü CCD kamerayı saydam odadan spreyn görüntülerini yakalamak için kullanmışlardır. Sprey parametrelerinin makroskobik karakteristiklerinin bir kısmını (uç yayılması, yakın ve uzak alan açısı, spreyn uç açısı, ortalama yakıt alanı yoğunluğu) görüntülerden elde etmişlerdir. Deneysel çalışmayı common-rail yakıt enjeksiyon sisteminde yürütmüşlerdir. Sprey karakteristikleri ve benzer enjeksiyon koşulları arasındaki ilişkiyi tartışmışlardır.

Görüntü sistemi yüksek çözünürlüklü CCD kamera, frame grabber, bilgisayar, ışık kaynağı, reflektör (yansıtıcı) ve fiberoptik kablodan oluşmaktadır. Sistemi aralıklı dizel spreyn görüntülemek için düzenlemişlerdir. Bu çalışmada görüntü sistemini test bölgesine yerleştirmişlerdir. İç yüzeyleri spreyn görüntülerindeki yansıma etkilerini azaltmak için siyah boya ile boyamış ve spreyn odasını flaş ile aydınlatmışlardır.

Uç yayılmasını, spreyn çıkışı ile uç noktası arasındaki maksimum mesafe olarak belirlemişlerdir. Uzak alan açısını (far field angle) $100D$, yakın alan açısını $60D$ olarak belirlemişlerdir (D , nozul çapı). Ortalama spreyn uç hızını birbirini takip eden iki spreyn görüntüsünü kullanarak iki görüntü arasındaki farkı spreyn mesafesi (tip penetration) farkına bölerek tahmin etmişlerdir. Görüntü işleme algoritmasını ham spreyn görüntülerinden spreyn karakteristiklerini ölçmek için geliştirmişlerdir. Deneysel Minisac ve VCO nozulları ayrı ayrı test etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada ortalama spreyn yoğunluğunu da elde etmişlerdir. Spreyn açısı – Zaman, Yakıt alanı yoğunluğu- Zaman, Spreyn uç Hızı (m/s) – Zaman grafiklerini iki tip nozul için değişik basınçlarda (25-40 bar) göstermişlerdir.

Sonuç olarak sunulan dijital görüntü işleme algoritması ile fotoğrafik görüntülemeyi dizel sprey sayısal analizinde yararlı bir araç olarak görmüşlerdir. Geliştirdikleri deney setinde belirlenen sprey parametrelerinin ölçümlerinde tekrar edilebilirlik ve mükemmel bir doğrulukla sonuçları elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlar belirlenen sprey parametrelerinin uygunluğunu ve görüntü işleme yazılımının yararlılığını göstermiştir. Sprey karakteristikleri ve uygun enjeksiyon koşulları arasındaki ilişkiyi belirlemişlerdir (Shao and Yan 2008).

Qi *et al.* (2006) bu çalışmada LPG'li motorlarda yakıt enjeksiyonu kontrolü için LPG sprey karakteristiklerini incelemişlerdir. Sunulan çalışmada sprey uç yayılması (tip penetration), sprey açısı, izdüşüm sprey alanı ve sprey hacmini içeren LPG sprey geometrisini Schlieren fotoğraflama ve dijital görüntü işleme tekniklerini kullanarak araştırmışlardır. (Hosch and Walters 1977)'a göre Schlieren eksenel ışık ışını görüntüsünün neden olduğu bozukluğu azaltmak için iki konkav aynadan oluşan Z tip optik dizilişine göre kurmuşlardır. Xe lambadan gönderilen ışık ışınlarını 1. Konkav aynaya paralel yansıyacak şekilde göndermişlerdir. Paralel ışık ışınlarını her iki yanı saydam kuvars cam olan sabit hacimli odanın içinden geçirmişlerdir. 2. konkav ayna ile düzlem ve teğet odakların keskin kenarlarını saptırarak bir noktada birleştirmişlerdir. Daha sonra ışık ışınlarını CCD kamera ile görüntülemişlerdir.

Aynı nozul çapına sahip iki tip nozul (çift delikli ve bölmeli) kullanmışlardır. Spreyi 0,4 mm çaplı nozullardan 1 MPa basınç ve 356 mL/dk'lık debi ile göndermişlerdir. Sonuçlar daha yüksek enjeksiyon basıncında daha uzun sprey uç yayılması, daha geniş sprey izdüşüm alanı, sprey hacmi ve daha küçük sprey koni açısı olacağını göstermiştir. Orta ve geç enjeksiyon zamanında çift delikli nozulun daha iyi atomizasyon ve daha kısa sprey uç yayılması oluşturduğunu gözlemişlerdir.

İki enjektör tipi ve üç ayrı enjeksiyon basıncında sprey biçimlerini 6 kombinasyon için incelemişlerdir. Görüntü işleme algoritmasını gerçekleştirmek için Matlab kodu geliştirmişlerdir. Kenar algılaması için Matlab 'Sobel' operatörünü kullanmışlardır.

Biçimsel işlemi tamamlamak için aşınma ve genişleme usüllerini kullanmışlardır (Gonzalez *et al.* 2003).

Sprey uç yayılmasını (S), nozul enjektör çıkışının merkezi ile sprey dış çizgisi arasındaki maksimum mesafe olarak tanımlamışlardır. Spreyin ana hatları çok pürüzlü ve değişken olduğundan, nozuldan çıkan spre y yüzeyini istatistiki açıdan dö nen yüzey olarak düşünmüşlerdir (Qi *et al.* 2006).

Kodların doğruluğunu kanıtlamak için kod tarafından oluşturulan spre y uç yayılmalarını elle yapılan deneylerle karşılaştırmışlardır. İki yöntem arasındaki maksimum farkı %5 olarak gözledikleri için kodun yeterince doğru olduğu sonucuna varmışlardır. Sprey uç yayılması S(mm)–Zaman (ms) grafikleri incelendiğinde tek delikli ve çift delikli enjektörle yapılan deneylerde uç yayılmasının geçen zamanla ve enjeksiyon basıncıyla arttığını görmüşlerdir. Tek delikli enjektör ile karşılaştırıldığında çift delikli enjektörün spre y formunda daha hızlı buharlaşma ve böylece yüksek yoğunluk değişimine sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Sonuçta *Schilieren* tekniğiyle gözlemlere dayanarak çift delikli enjektörün ilk aşamada daha uzun spre y uç yayılması sergilediğini gözlemişlerdir. Enjeksiyon basıncının artmasıyla spre y uç yayılması, spre y izdüşüm alanı ve spre y hacmi artarken, spre y açısının azaldığı sonucuna varmışlardır (Qi *et al.* 2006).

Press *et al.* (2009) bu çalışmada çift fazlı nozullarda su-yağ emülsiyonunun atomizasyona etkisini dijital mikrofotografi metodu ile incelemiştir. Dijital kamera ile alınan görüntüleri *Image Pro-plus* görüntü işleme programı ile analiz etmişlerdir. Sprey açısı, spre y damlacık spektrumu ve SMD'yi hesaplamışlardır. SMD değerini (Rizk ve Lefebvre 1989)'nin korelasyonu ile elde etmişlerdir. Emülsiyon viskozitesi arttıkça SMD'nin arttığı sonucuna varmışlardır.

Lee *et al.* (2010) bu çalışmada düşük hızlı çapraz akışlı dö nen sıvı jetin spre y biçimlendirmesi ve bozulmasını deneysel olarak araştırdılar. Makro ve mikroskobik

sprey parametrelerinde çapraz akışın etkilerini jet Weber sayısı ile sıvı-gaz momentum oranı bakımından optik olarak ölçtüler. Momentum oranını göz önüne almadan daha yüksek jet Weber sayılarında spreyn profilinin hemen hemen hiç değişmediğini gözlediler. Çapraz akışın jet bozulmasını arttırdığı ve enjeksiyon hızlarının tüm aralıklarında ince spreye dönüştürdüğünü gördüler.

Çoğu endüstriyel uygulamada spreylere sıfırdan farklı bağıl hıza sahip bir çapraz akışta uygulanmıştır. Sıvı ve gaz akışları arasındaki kütle, momentum ve enerji transferinden dolayı aerodinamik etkileşim yüzey gerilmesini yenerek sıvı-gaz ara yüzeyindeki sapmayı harekete geçirir ve sıvı jetin atomizasyonunu harekete geçiren kararsız dalgaları yükseltir. Bu konveksiyonla desteklenmiş spreyn biçimi uygulaması endüstride turbo-jet, ramjet ve scram jetlerde yakıt enjeksiyonu uygulamalarında kullanılmıştır. Bu uygulamalarda yüksek atomizasyon kalitesi sağlanır. Deneysel çalışmalar çeşitli boyut ve geometrilerdeki enjeksiyon portlarında normalden yüksek Mach sayılı subsonic hava akışlarına kadar sıvı jetin bozulması ve yayılması için yapılmıştır. Jet yayılmasının korelasyonları gerekli enjeksiyon parametreleri ile önerilmiştir. Spreyn görüntüsü, yayılma yüksekliği, hız alanı ve sıvı özelliğini de incelemişlerdir. (Fuller and Wu 2000). Hem subsonic hem de supersonic çapraz akışlar incelenmiştir. Anlık shadowgraphy fotoğrafları durgun havada savrulan küresel damlacığın ikincil bozulmasını andıran sıvı kolunu bozulmasını göstermiştir (Sallam *et al.* 2004). Damlacıkların şok dalga etkileşimleri boyunca ikincil bozulmasını da araştırmışlardır. Şok dalga etkileşimiyle aerodinamik kuvvetler tarafından bozulan küresel damlacık seri damlacık fotoğrafları ile açığa çıkarılmıştır. Daha sonra jet Weber sayısı artarken bag, multimode (bag/plume) ve kırpma (plume/shear) şeklinde sıralı olarak parçalara ayrılmıştır. Türbülanslı olmayan sıvı jetin birincil bozulmasını darbeli shadowgraphy ve holograf tekniklerini kullanarak göstermişlerdir. (Taylor 1950), dönen enjektörde potansiyel akış ve spreyn açısı ile film kalınlığı arasındaki lineer ilişkiyi teorik olarak çözmüştür. (Rizk and Lefebvre 1985a), bu ilişkinin doğrusal metodunu geliştirmiştir. Bazı araştırmacılar teorik ve deneysel çalışmaları iç ve dış spreyn karakteristikleri için yapmışlardır. Film kalınlığı, bozulma mesafesi ve spreyn koni açısının parametrik (dağılıma bağımlı)

araştırmasını akış şartları ve geometriyle bağlantılı olarak yürütmüşlerdir (Chung and Presser 2001; Kim 2007).

Fraser and Eisenklam (1950) bu çalışmada deney sistemini basınç tankı, ayarlayıcı, optik görüntüleme ve veri toplama ünitelerinden oluşturmuşlardır. Tank basıncının değişimlerini sınırlamak için gelişmiş servo devresiyle hassas bir şekilde kütleli debinin devamlılığını sağlamışlardır. Dikdörtgen kesitli sesaltı rüzgar tüneli ile (150mm x 150mm) 10-40 m/s akış hızlarında hava göndermişlerdir. Ani sprej görüntülerini yakalamak için darbeli shadowgraph tekniği kullanmışlardır. CCD kamerayı (Flow-Master 3S, LaVision inc.) stroboskopa aydınlatarak kullanmışlardır. Yüksek çözünürlükte ani görüntülerin yakalanması için A Questar QM100 uzun odaklı mikroskop lensi kullanmışlardır. Tek damlacıkların aritmetik ortalama çapını elde etmişler ve SMD'yi hesaplamışlardır. LISA (linear instability sheet atomization) yöntemine göre su enjeksiyonunu 1.4...9.8 g/s debi, 3.9...25.4 m/s hız aralıklarında ve yaklaşık olarak 3800 ile 25300 Reynolds aralığında yapmışlardır. Sprej artan Weber sayısı ile basınçlı dönel jetde beş bozulma rejimine ayrıldı. Bunlar $We=203$ de damla evresi (dribble stage), $We=371$ de çarpılmış kalem evresi (distorted pencil), $We=657$ de soğan evresi (onion stage), $We=2020$ de lale evresi (tulip stage) ve $We = 8834$ de tam gelişmiş sprej olarak sınıflandırılmıştır (Lefebvre 1989). Her bozulma rejimini 3 ayrılma biçimiyle belirtmişlerdir. Bunlar Weber sayısı ve yüzey gerilmesinin büyüklüğüne bağlı olan kenar (rim), dalga ve delikli tabaka (perforated sheet) biçimleridir.

Atomizasyon kalitesini, sıvı-gaz momentum oranı ve sıvı jetin Weber sayısı bakımından incelemişlerdir. Genel anlamda yüksek hızlı çapraz akışta jet Weber sayısı;

$$We_l \cong \frac{\rho_g d(u_1 - u_2)^2}{\sigma} \quad (20)$$

olarak tanımlanır. Başka bir deyişle enine gaz akışında sprej oluşumu durumunda gaz-sıvı arayüzünü kontrol eden sıvı jetle dikey momentum taşınır. Kesin olarak jet

bozulması için sıvı akışı ve gaz arasındaki bağıl hız yaklaşık olarak sıvı jetin dikey enjeksiyon hızıdır (Lefebvre 1989). Sıvı jet bozulmasında çapraz akışın atalet etkisi momentum oranı ($q = \frac{\rho_l u_l^2}{\rho_g u_g^2}$) bakımından değerlendirilmiştir. Yüksek jet Weber sayılarında delikli sıvı koni merkezkaç kuvvetinin artmasından ve incelmelerinden dolayı gittikçe büyür. Weber sayısı artarken dairesel SMD dağılımı açısal momentumun artmasıyla genişler.

Sonuçta dönmeli sıvı jet sprej dinamikleri ve bozulması düşük hızlı çapraz akışta deneysel olarak incelemiştirler. Makroskobik ve mikroskobik sprej parametrelerini jet Weber sayısı ve momentum oranı bakımından incelemiştirler. Düşük jet Weber sayılarında sıvı akışı Rayleigh bozulmasına maruz kalır. Yüksek momentum oranlarında bag bozulması olur ve sıvı kolonu çember gibi bir yapıya şeklini bozma eğiliminde olur. Orta dereceli jet Weber sayılarında aerodinamik etkileşim ve henüz şekillenmiş ikincil akışlar yüzey dalgalarının artması ve çok modlu bozulmaya sebep olur. Sıvı tabakası devamlı olarak yüzeyden aşındırılır ve böylece hızlı bir şekilde parçalanır. Daha yüksek Weber sayılarında sprej dinamikleri momentum oranına daha zayıf olarak bağlıdır ve böylece sprej profili hemen hemen çapraz akış tarafından değiştirilir. Tüm Weber sayılarında daha geniş damlalar sıvı tabakası civarında zorla hareket eder ve damlalar hem sprej kenarı hem de sprej çekirdeğine doğru daha küçük olur. Çapraz akış jet bozulmasını destekler ve enjeksiyon hızlarının geniş bir aralığında ince spreje dönüştürür. Etkileri düşük enjeksiyon hızlarında daha belirgindir (Fraser and Eisenklam 1953).

Li *et al.* (2012) bu çalışmada içten karışimli su-hava çift fazlı atomizeri incelemiştirler. Çift faz karışım süreci ve akış şeklini yüksek hızlı CCD kamera ile görsel olarak izlemiştirler. Gözlemleri içten karışımında GLR (Hava-sıvı kütleli debi oranı)'nin baskın olduğunu ortaya çıkarmıştır. GLR artarken, akış şeklinin dalgalı akıştan dairesel akışa doğru geliştiğini görmüşlerdir. Akış desenini tahmin etmek için Oshinowo ve Charles'ın eşlemesini kullanmışlardır. SMD damlacık boyutsal dağılımını PDA ile farklı çalışma koşullarında elde etmişlerdir. GLR'nin artmasıyla SMD'nin azaldığını

görmüşlerdir. Basıncın artmasıyla daha ince sprej elde edilmiştir. Damlacık boyutunda PDF (Olasılıksal yoğunluk fonksiyonu) dağılımını, damlacık birleşme ve bozulmasını nicel olarak göstermek için analiz etmişlerdir. Sonuç olarak en iyi atomizasyon performansını gelişmemiş akış bölgesinde elde etmişlerdir.

Santolaya *et al.* (2010) çalışmalarında konik sıvı tabakasının bozulmasından kaynaklanan sprej yapısını deneysel olarak incelemişlerdir. Dağınık ve sürekli faz hızları ve damlacık boyutlarını PDPA ile analiz etmişlerdir. Veri işleme için genelleştirilmiş integral metodunu uygulamışlar ve çeşitli damlacık boyutu sınıflarında hacimsel debiyi incelemek için kullanmışlardır. Ölçümleri TSI-Aerometrics 3100 PDPA sistemi ile almışlardır. Damlacık çapı ve iki bileşenli hız ölçümlerini eş zamanlı olarak almışlardır. Görüntü almak için CCD kamera ile stroboskop kullanmışlardır. Basıncılı dönel nozul olarak Danfoss 0.5-80°H modelini kullanmışlardır. Denejleri 80° koni açısı, 0,2 mm orifis çapı, 16 bar basınçta 95°C’de yürütmüşlerdir. Aerosol sprej için $D_{10}=3.4 \mu\text{m}$ olan su-gliserin karışımını kullanmışlardır.

Chang *et al.* (2007) bu yayında su damlacık akışı ve alevlenme arasındaki ilişki hakkında bilgi vermişlerdir. Önleme etkinliği etkileşimini açıklamışlardır. Yangın önleyici olarak su damlacık akışları ve su sprej kullanmışlardır. CCD kamera, makroskopik lens ve video kayıt cihazını görüntüleme için sisteme uygun şekilde yerleştirmişlerdir. Basınç kaynağı ve titreşim frekansını damlacık akışına göre ayarlamışlardır. Ani görüntüleri 30 fps’lik kamera ile almışlardır. Alev ve damlacık boyutunu *Intellicam* yazılımı ile hacimsel debi eşitliğini kullanarak doğrulamışlardır. Söndürme zamanını enjeksiyon başladıktan sonra video fotoğraflarından hesaplamışlardır.

Laryea and No (2004) çalışmalarında şarjlı, elektrostatik basınçlı helezon nozulda sıvı bozulma mesafesi ve sprej koni açısı gibi sprej karakteristiklerini araştırmışlardır. Çalışmayı, elektrosprej nozul geliştirme ve yakıt yanma uygulaması için yürütmüşlerdir. Nozulun sprej karakteristiklerini kerosen kullanarak incelemişlerdir.

Geliştirilen şarjlı, elektrostatik basınçlı helezon nozul için basınç aralığını 0.7-0.9 Mpa, debi aralığını 69-77.6 ml/dak olarak belirlemişlerdir. Sprey açısının sağlanan voltaj ve enjeksiyon basıncı ile artarken, sıvı bozulma mesafesi ile azaldığını görmüşlerdir. Çoklu sprej görüntülerini yakalamak için SONY A-3 CCD video kamera ve stroboskop kullanmışlardır. Görüntüleri *Photoshop* görüntü analiz yazılımı ile işlemişlerdir. Elektrostatik basınçlı-dönel nozulda bozulma mesafesini öngörmek için ampirik bir eşitlik önermişlerdir. Deneysel sonuçların ampirik eşitlik ile aynı aralıkta sonuç verdiğini görmüşlerdir.

Bozulma mesafesini iki kritere göre belirlemişlerdir. Bunlar perforation (delik) ve sprej yapısıdır. Birincisini, nozul orifis çıkışı ile sıvı kolonunda delinmenin (perforation) görüldüğü yer olarak tanımladılar. İkincisini, damla şekillenmesi ile nozul arasındaki mesafe olarak belirlediler. Her görüntü için damla şekillenmesiyle bozulma mesafesi ve başlangıç sprej açısını $20d_0$ da ölçtüler. Bu çalışmada sadece sıvı atomizasyonunun makro yapısını ele almışlardır (Laryea and No 2004).

Negeed *et al.* (2011) bu yayında basınçlı düz fan jet nozulda sıvı tabaka bozulmasını analitik ve deneysel olarak çalışmayı amaçlamışlardır. Dört farklı çapta (1, 1.5, 2 ve 2.5 mm) nozulla sıvı tabaka karakteristiklerinde nozul geometrisinin ve sprej basıncının etkisini araştırmışlardır. Sıvı tabaka bozulma uzunluğu, sıvı tabaka hızı ve oluşan damlacıkların boyutunu yüksek hızlı kamera ile ölçmüşlerdir. Atmosferde düz sıvı tabakanın bozulma karakteristiklerini lineer ve lineer olmayan hidrodinamik kararsızlık analiziyle analitik olarak incelemişlerdir. Sıvı tabaka bozulma sürecini başlangıçtaki sinüzoidal ve sonradan genişleyen bozulma modlarında çalışmışlardır. Sonuçları nozul çapı, sprej basıncı ve damlacık çapının etkileri şeklinde sunmuşlardır. Dört tip nozul için deneysel sonuçları teorik analizle karşılaştırmışlar ve %4-12 arasında uyuşma görmüşlerdir. Ampirik korelasyonlarla sıvı bozulma karakteristiklerini sıvı tabaka Re sayısı, We sayısı ve nozul çapının etkilediği sonucuna varmışlardır.

(Negeed *et al.* 2011) tarafından önerilen bozulma mesafesi ve damlacık kütle ortalama çapı (d_{30}) ampirik korelasyonları aşağıda verilmiştir:

$$L_b = 76.6864 * 10^3 W_n (Re)^{-0.7766} (We)^{0.1015} \quad (21)$$

$$d_{30} = 1.2506 * 10^3 W_n (Re)^{-0.8497} (We)^{0.1665} \quad (22)$$

Shao *et al.* (2003) bu çalışmada dizel spreyn yakıt özelliklerinin belirlenmesi için dijital görüntüleme ve görüntü işleme uygulamasını sunmuşlardır. Optik sistemi kaynama olmayan basınçlı ortamda, sabit hacimli odada dizel spreyn için 8 delikli nozuldan alınan görüntülerle yapılandırmışlardır. Spreyn görüntülerini yakalamak için flaş ışık kaynağı ve yüksek çözünürlüklü CCD kamera kullanmışlardır. Özel görüntü işleme yazılımını yakın alan açısı, uzak alan açısı ve uç yayılmasını içeren birtakım karakteristik spreyn parametrelerini belirlemek için geliştirmişlerdir. Yakın alan açısını spreyn nozul çıkışından 60D, uzak alan açısını da 100D mesafesinde spreyn dış çizgisine teğet çizerek belirlemişlerdir. Görüntü işleme yazılımı için *Visual C++* programını kullanmışlardır. Yazılım kullanarak elde edilen spreyn parametreleri ile elle hesaplanan değerleri karşılaştırmışlardır. Normal spreyn koşullarında elde edilen sonuçların yazılım ile daha doğru, tutarlı ve etkin olduğunu görmüşlerdir. VCO nozul için farklı koşullarda yapılan deneylerde aynı enjeksiyon basıncında uç yayılmasının daha düşük oda basınçlarında daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı oda basıncında uç yayılmasının daha düşük enjeksiyon basınçlarında daha kısa olduğu sonucuna varmışlardır. Yakın ve uzak alan açılarının artan oda basıncı ve enjeksiyon basıncıyla birlikte daha yüksek değerler aldıklarını göstermişlerdir.

Ciofalo *et al.* (1999) bu çalışmada sıcak alüminyum yüzeyde spreyn ısı transferini araştırmışlardır. Kullanılan yöntemde ilk önce 750 K'e kadar ısıtılan çift taraflı düzlemsel alüminyum plakaya iki taraftan çeşitli çaplarda tam koni dönел nozullarla spreyn göndermişlerdir. Soğutma geçişi esnasında plakanın orta düzlem sıcaklığını ince folyolu K-tipi termoçift ve yüksek frekanslı veri toplama sistemiyle kaydetmişlerdir.

Yüzey sıcaklığı (T_w), yüzey ısı akısı (q_w'') ve Nukiyama ısı transfer eğrisini ($q_w''-T_w$) belirlemek için iki farklı yaklaşım kullanmışlardır. Birincisi inverse (ters) ısı iletim probleminin çözümüne, ikincisi Nukiyama eğrisinin ölçülebilirliği ve minimum probleminin çözümüne dayanmaktadır. Her ısı transferi eğrisinden kritik ısı akısı ve tek faz ısı transfer katsayısı gibi belirgin ısı transferi değerlerini elde etmişlerdir. Bunların spray etkisi olayını karakterize eden bazı temel parametrelere (kütleli debi ve damla hızı) bağımlılığını başlangıç hidrodinamik belirleme temeline göre araştırmışlar ve uygun korelasyonları önermişlerdir.

Liu *et al.* (2011) kaynama olmayan rejimde su ile spray soğutmada artırılmış yüzeylerde ısı transferi performansını araştırmak için deneyleri yürütmüşlerdir. Yüzey artırımı düz kanatlar (straight fin) ile yapılmıştır. Yüzeyleri kesit alanı 10mm x 10mm olan bakır blokların üstüne yerleştirmişlerdir. Spray hacimsel akısını 0,044-0,053 m³/m²s aralığında *Unijet* tam koni nozul ile yüzeye göndermişlerdir. Isı transferinin düz kanatlı yüzeylerde düz yüzeye göre açık bir şekilde arttığı sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte kanat yüksekliği arttıkça artım miktarının azaldığını tespit etmişlerdir.

Pais *et al.* (2002) çalışmalarında spray soğutmada yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemişlerdir. Spreyde ısı akısı ve konveksiyon katsayısının artan ısıtıcı yüzey pürüzlülüğü ile arttığını belirtmişlerdir.

Bernardin and Mudawar (1997) bu yayında spray film kaynama ısı transferini belirlemek için ampirik bir yaklaşım sunmuşlardır. 400°C sıcaklıkta parlak nikel (Ni) yüzeyde sürekli damlacık akışı halinde film kaynama ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Ampirik korelasyonları film kaynama ısı transfer aralığı ve çok çeşitli çalışma şartlarında damlacık ısı transferi etkinliği için vermişlerdir. Deneylerde farklı çaplarda (0.130, 0.249, 0.343 ve 0,533 mm) nozullar ve çalışma sıvısı olarak iyonize su kullanmışlardır. Sonuç olarak film kaynama ısı transferi ampirik korelasyonlarını çıkararak en etkili parametreleri yüzey sıcaklığı, damlacık çapı ve damlacık hızı olarak

tespit etmişlerdir. Tek damla korelasyonlarından ekstrapolasyonla çoklu damla akışı korelasyonlarını türetmişlerdir (Bernardin and Mudawar 1997).

Lee and Kim (2004) bu çalışmada sprej partikül ölçümü ve sayımı için çeşitli görüntü işleme tekniklerini gözden geçirmişlerdir. Partikül belirleme ve odak ayarı konularını esas alarak detaylı bir şekilde tartışmışlardır. Partikül belirleme işleminde, sınır tespiti için eşik seviyesinin belirlenmesi, yığılmış veya çakışmış partikül görüntülerinden birincil partikülleri ayırma ve küresel olmayan partiküllerin davranışını belirlemişlerdir. Belirlenen partikülleri ölçülendirip sayarak boyut dağılımını vermişlerdir. Alan derinliği etkisi partikül boyut ölçümünü etkilediğinden bu değer azaldıkça küçük partiküllerin ölçümünün zorlaştığını görmüşlerdir. İki önemli problemden biri olan odak ölçütü için belirleyici olarak gri düzeyi (gray level) değişimi ve kontrast değerini belirlemişlerdir. Bunlardan gri değerinin büyük partiküller için, kontrast değerinin ise küçük partiküller için uygun olduğunu tespit etmişlerdir. Partikül belirleme için örnek tanıma ve boyut ölçümünü ana temalar olarak belirlemişlerdir. Birçok durumda partikül çapları partiküllerin tahmini alanlarından belirlendiği için convex-hull, hough transform, model eşleme, fourier transform ve sınır-kavis belirleme metodlarını kullanmışlardır. Görüntü işleme algoritmasını genel işlem ve lokal işlem olarak ikiye ayırmışlardır. Genel işlemde sınır ve çevre belirleme, lokal işlemde ise çakışan partiküllerin ayrılması, tekrar sınır ve çevre belirleme, odak ölçütü ile partikül çıkarma, alan derinliği düzeltme ve ortalama çapın hesaplanması işlemlerini yapmışlardır (Lee and Kim 2004).

Sridhara and Raghunandan (2010) bu çalışmada, sprej karakteristiklerinin analizinde kullanmak için akış görüntüleme tekniklerinin kapsamlı bir gözden geçirmesini sunmuş ve farklı aydınlatma tekniklerinin deneysel uygulamasını yapmışlardır. Havalı (airblast) ve girdap (swirl) atomizerlerin sprej fotoğraflarını arka aydınlatma, aralıklı aydınlatma (slit), flaşlı aydınlatma (incident) ve yeni bir yöntem olan saçılan ışık görüntüsü yöntemleri ile tanıtmışlardır. Bu yöntemlerle alınan fotoğrafların jet bozulma olayı, iç ayrıntılar ve sprejin dış görünüşünü çıkarmak için kullanışlı olduğunu göstermişlerdir. Farklı tekniklerin birleşiminin uygun tanımlamalar için gerekli olabileceği sonucuna varmışlardır.

Bazı araştırmacılar sprey uygulamalarında akış görüntülemeyi nitel ve nicel analiz için kullanmışlardır. Damla boyutu ve damla ayrılması (Jones 1977), Hay *et al.* 1998), bozulma olayı ve bozulma mesafesi (Dombrowski and Fraser 1954), Fraser *et al.* (1963a, 1963b, 1963c); Chigier and Reitz 1995; Eroğlu and Chigier 1991) ile koni açısını analiz etmişlerdir (Shivakumar and Raghunandan, 1996; Sridhara and Raghunandan 2010).

Gadgil and Raghunandan (2011) bu çalışmada nozul çıkışında sprey bozulmasını hava destekli nozulda düşük GLR (gaz/sıvı kütle oranı) oranlarında deneysel olarak araştırmışlardır. Sprey akış görüntülemesi için iki farklı kamera ve yüksek frekanslı görüntüyü dondurmak için stroboskop kullanmışlardır. Sprey görüntülerini yakalamak için Shadowgraphy tekniğini uygulamışlardır. Orifis yakınında sprey yapılarını  modda sınıflandırmışlardır. Bunları; kesikli habbe patlaması, sürekli habbe patlaması ve dairesel konik sprey olarak belirlemişlerdir. Parametrik alışma ile ortalama habbe patlama mesafesinin hava debisi, jet çapı ve karışım hızına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Diğer ikisiyle karşılaştırıldığında en baskın etkinin jet çapı olduğunu gözlemişlerdir. Bu parametrelerle boyutsuz iki fazlı akış sayısı ve habbe patlama mesafesi korelasyonunu sunmuşlardır.

Watanawanyoo *et al.* (2012) bu çalışmada içten karışmalı hava destekli atomizer geliştirmişler ve sprey karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Geliştirdikleri bu hava destekli nozulu mikro gaz türbin yanma odasında kullanmışlardır. Sprey karakteristiklerini elde etmek için nozul yakınında ve akış doğrultusunda akışı incelemişlerdir. Akışı görüntülemek için Shadowgraphy tekniğini uygulamışlar, Nd-YAG lazer ve yüksek hızlı CMOS kamera ile görüntüleri almışlardır. Kenar belirleme için görüntü işleme algoritmasını *MATLAB*'de geliştirmişlerdir. alışmaları 0.18-0.58 ALR aralığında yürütmüşler ve sprey açılarını 13-20° aralığında elde etmişlerdir.

Ding *et al.* (2011) bu çalışmada sprey yapısı ve gelişimini çok delikli enjeksiyon kullanarak incelemişlerdir. Sabit hacimli haznede yapılan deneylerde enjeksiyon

basıncı, ortam basıncı ve sıcaklığın etkilerini incelemişlerdir. Yüksek hızlı CCD kamera (Phantom V12.1) ile alınan görüntüleri *Matlab*'da yapılan program ile analiz etmişlerdir. Sprey uç yayılması ve sprey koni açısını elde etmişlerdir. Uç yayılmasında ortam sıcaklığı kısmen daha az etkiliyken, ortam basıncı ve enjeksiyon basıncının daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Grout *et al.* (2007) bu yayında nozul çıkışından atomizasyon sürecinin sonuna kadar birincil atomizasyonun fraktal şeklinin uygunluğunu araştırmışlardır. İlk önce üç fraktal yöntemi sentetik görüntülerde test etmişlerdir. Bu yöntemler; minimum grid sayma metodu (MGC), Euclidean mesafe haritası metodu (EDM) ve Kütle metodudur (MM). Bu yöntemlerle üç boyutlu görüntülerden iki boyutlu fraktal görüntü oluşturmuşlardır. Birincil atomizasyon sürecinde fraktal yöntemin uygunluğunu göstermişlerdir. EDM metodunu en uygun yöntem olarak elde etmişlerdir.

Choo and Kang (2004) bu yayında sprej damlacıklarının hızlarını ve boyutlarını ölçmeyi amaçlayan optik bir yöntem geliştirmek için çalışmışlardır. Ardışık sprej görüntülerini yakalayarak boyut ölçümü, üst üste binmiş partiküllerin ayrılması, iki görüntü arasında eşleme ve partikül izleme için bir görüntü işleme programı geliştirmişlerdir. Üst üste binmiş partikülleri tanımak ve ayırmak için sınır bölünmesini sırasıyla çevreye ve dışbükey örtü (convex hull)'ye göre morfolojik yöntemle incelemişlerdir. MPM (Match Probability Method)'yi partikül izleme ve eşleme için kullanmışlardır. Çeşitli sprej ve atomizasyon düzeneklerinde hareket ve boyut dağılım analizi yapmışlardır. En küçük damla çapını 20 μm , ortalama sprej çapını 124,33 μm , sprej hızını da 4,03 m/s olarak bulmuşlardır.

Liu *et al.* (2006) bu çalışmada hava üfleli (air-blast) atomizer ile damlacık çap dağılımını sayısal ve deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Sonlu olasılıksal bozulma modelini (FSBM) hava üfleli atomizasyon prosesi için damlacık bozulmasının benzerliğine göre tasarlamışlardır. Sonlu olasılıksal bozulma modelinde D_0 (başlangıç damla çapı), D_c (maksimum kararlı damla çapı), a (minimum kütle oranı) ve $P(D)$

(Damlacık bozulma olasılığı) gibi dört parametreyi incelemişlerdir. Damlacık çap dağılımının simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların birbiriyle örtüştüğünü görmüşlerdir. Bu model ile hava üfleli atomizasyon prosesinin damlacık çap dağılımı ve ortalama damlacık çapları arasındaki lineer olmayan ilişkiyi öngörmüşlerdir. FSMB varsayımını *Matlab 6.5* programı ile analiz etmişlerdir. Damlacık boyut yayılmasının bir ölçüsü olan Rosin-Rammler'in dağılım parametresi (N) ve SMD arasındaki ilişkiyi deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Damlacık çap dağılımının Rosin-Rammler ifadesi ile de uyum gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Lal *et al.* (2010) bu yayında çift akışkanlı ve içten karışimli püskürtücünün deneysel çalışmasını yapmışlardır. Damlacık çap dağılımını belirlemek için Malvern Particle Analyzer kullanmışlardır. Sprey karakteristiklerini eşzamanlı olarak sıvı basıncı ve püskürtme havasına bağlı olarak ölçmüşlerdir. Kontrollü atomizasyon sonuçlarını özellikle yangın söndürme uygulamaları için sunmuşlardır. Çeşitli koşullar için SMD korelasyonlarını elde etmişlerdir. Tahliye katsayısı ve boyutsuz damlacık çapının ALR ile değişim grafiklerini sunmuşlardır. Deneyleri hava basıncı 2-7.5 bar, sıvı basıncı 0.3-1.7 bar ve ALR 0.16-2.9 aralıklarında yürütmüşlerdir. ALR arttıkça tahliye katsayısının ve SMD'nin azaldığını görmüşlerdir. Damlacık boyut dağılım parametrelerini de vermişlerdir. Bu değerleri SMD: 15-85 μm , Dv_{10} :8-42 μm , Dv_{90} :79-283 μm , Dv_{50} :32-115 μm aralıklarında elde etmişlerdir. Sonuçta çift fazlı atomizerlerin kontrollü sprej elde etmek için uygun olduğunu göstermişlerdir.

Aguilar *et al.* (2001) bu çalışmada krojenik (çok soğuk) sprejlerde soğutma etkinliğini incelemişlerdir. Ortalama boyut (D), hız (V) ve sıcaklıkları elde etmek için çeşitli araç ve yöntemleri kullanmışlardır. Deneylerde düz boru nozulda *tetrafluoroethane* sprej kullanmışlardır. Tek damla buharlaşma modelini nozuldan uzaklığın bir fonksiyonu olarak damlacık çapı ve sıcaklığını tahmin etmek için incelemişlerdir. Modelde çap ve hızın, D^2 -law ve sürüklenme kuvvetine bağlı olarak azaldığını görmüşlerdir. Sıcaklık ve boyutun nozuldan olan uzaklıkla değişimi deneysel verilerle uyum göstermiştir. Görüntüleri Pulnix 9700 TMC kamera ile hızlı flaş lamba fotoğrafı (FFLP) yöntemi kullanarak almışlardır. Flaş lamba olarak 5 μs tepki süreli FX-1160 by EG&G

kullanmışlardır. Görüntüleri iki farklı uzaklıktan (yakın ve uzak) almışlardır. Damlacık çap ve hız ölçümleri için Malvern EPCS ve PDI kullanmışlardır. Damlacık çapını nozuldan olan uzaklığın fonksiyonu olarak elde etmişlerdir.

Charalampous *et al.* (2010) bu yayında havalı atomizerlerde sıvı jetin bozulma uzunluğunun ölçümünde üç farklı teknik denemişlerdir. Birincisinde; yüksek hızda shadowgraphy yöntemiyle parçalanma mesafesi ve süresini belirlemek için yüksek çözünürlükle tek kare fotoğraf almışlardır. İkinci teknik olan elektriksel iletkenlik metodunda jetteki elektriksel iletkenliği düşey yönde ölçmüşlerdir. Üçüncü yöntem olan optik bağlantı yöntemi ise jetin lazerle aydınlatılarak fotoğraflanması temeline dayanır. Bu üç bozulma mesafesi ölçüm yönteminin avantajlarını ve kısıtlamalarını karşılaştırmışlardır.

Pnueli *et al.* (1990) bu deneysel araştırmada su jeti ile sıcak yüzeylerin hızlı soğutmasının uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Yüzey sıcaklıklarını kararsız film kaynama ve kısmi çekirdek kaynama bölgesinde kaynama noktasının üstünde ölçmüşlerdir. Deneyle ısıtılmış borunun iç yüzeyine su jeti püskürterek yürütmüşlerdir. Su miktarlarını 50, 100 ve 150 lt/m² olarak belirlemişlerdir. Yüzey sıcaklığını ölçülerek ısı akısını elde etmişlerdir. Sonuçları; boru yüzey sıcaklığının fonksiyonu olarak 110°C-220°C aralığı için sunmuşlardır. Sunulan araştırmada su spreyi 110-220°C deki yüzeye tek ani fişkırmayla göndermişlerdir. Kaynama ısı transferi soğutma süresini yaklaşık 1 s olarak belirlemişlerdir. Bakır boru için elde edilen deneysel sonuçlara göre birim boru alanından atılan toplam ısı miktarının birim boru alanına sağlanan su miktarıyla orantılı olduğunu ispatlamışlardır. Deneyle çeşitli boru sıcaklıkları için yapmışlardır. Sistemde buharlaşmanın gözlenmediğini belirtmişlerdir. Deneysel sonuçları ısı transfer katsayısını da analiz etmek için kullanmışlardır.

Mudawar and Estes (1996) bu çalışmada sıcak yüzey sprey soğutmasını CHF’de hedef yüzey-nozul mesafesinin etkilerini belirlemek için araştırmışlardır. Sprey sıvısı olarak tam koni spreyle FC-72 ve FC-87’yi kullanmışlardır. Sprey hacimsel debisini doğru

tahmin etmek için teorik model düzenlemişlerdir. Bu modeli doğrulamak için çeşitli deneysel sprej numuneleri planlamışlardır. CHF’de hacimsel debi dağılımının etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Kare yüzey için aynı debide ve farklı nozul-yüzey mesafelerinde CHF’yi hesaplamışlardır. Bu optimum düzenlemeyi kullanarak geniş bir debi aralığında CHF verilerini almışlardır. Sonuçta, hacimsel debinin yüzey etki alanı merkezinden dışa doğru azaldığını; jetlerin aksine sprejin, aynı nozul ve aynı debide sadece nozul-yüzey mesafesi değiştirilerek daha iyi soğutma performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Farklı nozullarla ve farklı debi aralıklarında tam koni sprejde CHF’yi doğru tahmin etmek için yeni korelasyon geliştirmişlerdir.

Karwa *et al.* (2007) bu deneysel çalışmada kaynama olmayan rejimde yatay yüzeyde basınçlı atomizer ile sağlanan (Danfoss ve Unijet nozullarla) su sprejle 20 mm çapındaki bakır yüzeyi soğutmuşlardır. Yüzeyi alttan elektrikle ısıtarak kenarlarını yalıtmışlardır. 35-85 W/cm² ısı akısı aralığı, 95°C yüzey sıcaklığı ve 2,6-9,9 kg/m² kütleli debilerinde deneyleri yürütmüşlerdir. Bu şartlar altında ısı transfer katsayısını 9000-24000 W/m²K aralığında bulmuşlardır. Kütleli debinin artmasıyla ısı transferinin arttığını görmüşlerdir. Deneysel sonuçlarla ortalama Nusselt sayısı ve Reynolds sayısı ile ilişkili olan ampirik korelasyonu geliştirmişlerdir. Bu korelasyonu $Nu=20,344(Re)^{0,659}$ olarak vermişlerdir. Hedef yüzey sıcaklık dağılımını (Rybicki and Mudawar 2006)’ın daha önce önerdiği şekilde extrapolasyonla hesaplamışlardır. Sonuç olarak sprejle kaynama olmayan rejimde bile ısı transferinin zorlanmış konveksiyona göre önemli ölçüde fazla olduğunu göstermişlerdir.

Kyriopoulos *et al.* (2008) bu çalışmada kaynama olmayan rejimde su ile sprej soğutmanın ısı transferi performansını araştırmak için deneysel bir araştırma yürütmüşlerdir. Isı transfer katsayısında ve ısı akısında yüzey sıcaklığı ile kütle akısının etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Isı transferi katsayısının artan kütle akısı ve yüzey sıcaklığı ile arttığını görmüşlerdir. Yüzey sıcaklığı ile ilişkili Nu sayısı ve ortalama Nu sayısı için genelleştirilmiş korelasyonları, sprej Re sayısı ve boyutsuz sıcaklığın fonksiyonu olarak geliştirmişlerdir. Verileri (Oliphant *et al.* 1998) ile karşılaştırmış ve korelasyonların kullanım aralığını genişletmişlerdir. Sonuçta

geleneksel zorlanmış konveksiyon ısı transferi verileri ile karşılaştırıldığında, kaynama olmayan sprej soğutma rejiminde ısı transfer katsayısının sadece soğutucunun hareket durumu ve özelliklerine değil, yüzey sıcaklığına da bağlı olduğunu göstermişlerdir. Hava destekli atomizerler için ortalama Nusselt sayısı korelasyonunu Re sayısının $10 < Re < 1000$ aralığı için;

$$\overline{Nu} = 32.5Re^{0.51} \quad (23)$$

olarak elde etmişlerdir.

Mzad and Tebbal (2009) bu yayında su jetlerinin çarpmasından dolayı düzlemden olan ısı transferi oranını ısı iletim eşitliklerinin sayısal çözümüyle araştırmışlardır. Simülasyonu çeşitli akışkan enjeksiyon basınçlarında (1-3 bar) 8 farklı nozul için yürütmüşlerdir. Yüzey boyunca ısı transfer değişimlerini 600°C yüzey sıcaklığında çelik için hesaplamışlardır. 300 W/cm^2 ısı akısında çelik için sıcaklık-zaman grafiklerini vermişlerdir. Daha düşük sıcaklıklar için tahmin edilen yerel ısı transfer katsayısının önemli ölçüde arttığını gözlemişlerdir (Mzad and Tebbal 2009). Bazı araştırmacılar yüzey pürüzlülüğünün etkisini de çalışmışlardır. Pürüzlülük arttıkça ısı akısı ve konveksiyon katsayısının arttığını görmüşlerdir (Chow *et al.* 1992; Zhang *et al.* 2013).

Yamamoto and Kuwahara (2011) bu çalışmada yüksek ısı taşıma teknolojisi olarak ince taneli püskürtmeli soğutmayı yüksek sıcaklık çalışma malzemelerini soğutmak için uygulamışlardır. Çalışma materyalinin sıcaklığı ve su partiküllerinin davranışını incelemek için üç boyutlu nümerik simülasyon geliştirmişlerdir. İnce taneli sis partiküllerinin %50'sinin analiz bölgesine çarparken %50'sinin ise bölgenin dışına aktığını göstermişlerdir. Çarpan partiküllerin %20-30'unun buharlaştığı ve bunların %70-80'inin de yüzeyde kaldığı sonucuna varmışlardır.

Sivadas and Moreira (2006) bu yayında hava destekli atomizerlerde oda sıcaklığında su-hava arayüzünün iki boyutlu kararlılık mekanizmasını ve jet bozulmasını

incelemişlerdir. Yüksek hızlı kamera ile jet bozulması, dalga genliği ve hız parametrelerini araştırmışlardır. We sayısını sıvı atalet kuvvetleri ve aerodinamik kuvvetlere göre iki ayrı durumda sınıflandırmışlardır. Akış görüntüleme ile akış alanının kalitatif ve kantitatif analizini yapmışlardır. Kritik dalga genliğinin We sayısının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varmışlardır. Laminer sıvı tabakasının dalga karakteristikleri çeşitli dinamik çevre koşullarında yapısal farklılık göstermiştir. Çevre havasının düşük hızlarında arayüzde sinüzoidal dalgalar baskın olurken, fiziksel sürecin ve dalga oluşumunun çıkış geometrisine, atalet kuvvetlerine ve yerçekimi kuvvetine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Yakut *et al.* (2001) bu çalışmada JATO nozul ile su ve gliserol çözeltisini enjekte etmişlerdir. Basıncılı tank ile düşük basınçta çikolata kaplamak için 0,5 L/dk (7,9 gph) akış debisinde boş koni sprej ile çalışmışlardır. Görüntüleme için Greenfield Image Analyzer kullanmışlardır. Nozul çıkışında ve nozuldan 1 inç uzaklıkta akış görüntülerini almışlardır. Sıvı kolonunu yaklaşık 10 mm mesafede birincil bozulma başlama noktası olarak gözlemişlerdir. 1 inç mesafede ise sprej bozulma sürecinin tamamlandığı ve damlacıkların oluştuğunu belirlemişlerdir. Malvern Particle Sizer ile ortalama boyut dağılımlarını elde etmişlerdir. Radyal mesafede 0, 1, 2, 3 inç uzaklıklarda alınan ölçümlerde SMD'yi sırasıyla 77, 69, 63, 100 μm olarak belirlemişlerdir. Bu değerleri PDPA ile yine aynı mesafede 52, 68, 84 ve 92 μm olarak belirlemişlerdir. Ortalama aksel hızı 2,05 m/s olarak ölçmüşlerdir. Ayrıca D_{10} değerlerini de merkezde ve radyal yönde belirlemişlerdir.

Gemci *et al.* (2001) bu çalışmada nozuldan çıkan su sprejinin damla çapı ve hızını madencilik sektöründe toz tutma için ölçmeyi amaçlamışlardır. Tek akışkanlı nozullarda iki farklı su basıncında, hava destekli nozullarda ise iki farklı su ve hava basıncında çalışmışlardır. Aksel yönde 10 farklı nozulda etkinlik ve tesiri artırmak için çalışmışlardır. 8 ayrı tek akışkanlı nozul (boş koni, tam koni ve düz fan) ve iki tane çift akışkanlı nozulu (boş koni) test etmişlerdir. Ölçümleri aksel olarak nozuldan 1 ve 2 fit uzaklıklarda (30-60 cm) almışlardır. Tek akışkanlı nozullar için 80 psig (5,5 bar) ve 160 psig (11 bar)'da çalışmışlardır. Ölçümlerde PDPA kullanmışlardır. PDPA dinamik

olarak partikül çapı, hızı, sayı yoğunluğu ve hacimsel akıyı vermiştir. Ortalama istatistiksel çapları (D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{32} , $D_{V0.1}$, $D_{V0.9}$) ve ortalama hızları (eksenel (U_x) ve radyal (U_r) hızlar) PDPA ile elde etmişlerdir. D_{32} 'yi ise iki eksenel uzaklık için, iki farklı basınçta sprey merkezinden radyal olarak ölçmüşlerdir. SMD dağılımının sprey merkezinden radyal mesafeye bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Liu and Reitz (1996) çalışmalarında sıvı damlalarının yüksek hızda, sıvı akışına dik yönde hava jeti ile bozulma mekanizmasını oda sıcaklığı ve atmosfer şartlarında incelemişlerdir. Bag bozulması, sınır tabaka ayrılma bozulması ve yıkıcı (catastrophic) bozulma rejimlerini anlık fotoğraflama ile belirlemişlerdir. Bu üç bozulma rejimi için We sayılarını sırasıyla 56, 260 ve 463 olarak bulmuşlardır. Damla bozulma sürecini iki aşamada incelemişlerdir. İlk aşamada üç bozulma rejimi için de damlanın küresel formdan basık forma geçişini gözlemişlerdir. Damla yörüngesini analiz etmek için dinamik sürüklenme ve bozulma modelini (DDB) kullanmışlardır. İkinci aşamada üç rejim de farklı bozulma özellikleri göstermiştir. Bag bozulma rejiminde boşlukların büyümesi ile bag kolonu aerodinamik basınç etkisiyle basık damlanın merkezinde patlamıştır. Sınır tabaka ayrılması bozulma rejiminde basık damlanın kenarından boyun vermesi ile ligamentlerin oluştuğunu gözlemişlerdir. Katastrofik bozulma rejimi de basık damla yüzeylerinde kılcal dalgaların büyümesi ile sonuçlanmıştır. İlâveten deneysel sonuçlar, We sayısı sabitken aynı bozulma rejiminde farklı damla boyutları oluştuğunu ve Re sayısının da baskın bir rol oynamadığını göstermiştir. Bozulma rejimlerinde viskoz etkilerin önemli olduğu sonucuna varmışlardır.

Shavit (2001) bu çalışmada iki akışkanlı atomizasyon bozulma bölgesinde sıvı ve hava arasındaki etkileşimi incelemiştir. Türbülans oluşturuçu kullanarak ortalama hızı artırmadan türbülans yoğunluğunu artırmıştır. Hava hızını ölçmek için TSI Argon-ion Laser Doppler Velocimetry (LDV) kullanmıştır. Bozulma mesafesi için aşağıdaki korelasyonu elde etmiştir.

$$\frac{IL}{\Delta} = \left[\frac{3\mu\rho_l d^2 U_r^3}{4(\rho_a U_r^2 - 2\frac{\sigma}{d})^2} \right]^{1/3} \quad (24)$$

$$\Delta = \ln(nd/\delta_0) \quad (25)$$

Burada $\delta_0=5.57 \times 10^{-10}$ m (başlangıç bozulması) değeri (Grant and Middleman 1966)'dan alınmıştır.

Wang *et al.* (2011) deneysel çalışmalarında kaynama olmayan rejimde su ile spray soğutmanın ısı transfer performansını araştırmışlardır. Isı transfer katsayısında ve ısı akısında yüzey sıcaklığı ile kütle akısının etkilerini deneysel olarak çalışmışlardır. Isı transferi katsayısının artan kütle akısı ve yüzey sıcaklığı ile arttığını görmüşlerdir. Genelleştirilmiş korelasyonları duvar sıcaklığı ile ilişkili Nusselt sayısı, spray Re sayısı ve boyutsuz sıcaklıkla ilişkili ortalama Nu sayısı için geliştirmişlerdir. Nu korelasyonunu;

$$Nu_T = 0.1275Re^{0.9322}\xi^{2.2485} \quad (26)$$

olarak elde etmişlerdir. Nusselt sayısını spray Re sayısı ve boyutsuz sıcaklık (ξ) ile ilişkili olarak geliştirmişlerdir. Ortalama Nusselt sayısını ise;

$$\overline{Nu} = 32.5Re^{0.51} \quad (27)$$

olarak vermişlerdir. Bu çalışmada soğutucu olarak su kullanılmış ve çevre sıcaklığı 20°C'dir. Korelasyonların hava destekli atomizerler için geçerli olduğunu belirtmişlerdir.

Strotos *et al.* (2008) bu yayında su damlacıklarının atmosferik şartlarda ısıtılmış düz yüzeye çarpmasının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) sayısal simülasyonunu sunmuş ve deneysel verilerle doğrulamışlardır. Damlacığın serbest yüzeyden olan sıvı buharlaşma sürecini VOF (akışkan hacmi) tabanlı yöntem ile tahmin etmişlerdir. Başlangıçta 120°C'deki katı yüzeyin soğumasını akışkan akışı ve buharlaşma süreci ile eşzamanlı olarak çözmüşlerdir. Çarpma hızlarını 1,3-3 m/s aralığında incelemişlerdir.

Damlacık buharlaşma oranını Fick kanununa dayalı model kullanarak ve çeşitli fiziksel özellikleri (yerel sıcaklık gibi) göz önünde bulundurarak öngörmüşlerdir. İlaveten kinetik teori modelini sıvı-gaz arayüzünde termal dengesizlik koşullarının önemini değerlendirmek için kullanmış ve ihmal edilebileceği sonucuna varmışlardır. Sayısal sonuçlar ile deneysel verilerin uyumlu sonuç verdiğini görmüşlerdir. Damlacık şekli, sıcaklığı, akış dağılımı ve buharlaşan sıvı dağılımı için akış mekanizmaları ile model ortaya çıkarmışlardır. Fakat bu sonuçların deneysel gözlemlerle kolayca elde edilemediğini belirtmişlerdir.

Sümer vd (2012) bu çalışmada basınçlı girdap tipi nozul içindeki akışı yüksek hızlı görüntüleme tekniği ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği araçlarını kullanarak incelemişlerdir. Oyuk koni şeklindeki spreyn özelliklerini PDPA ile elde etmişlerdir. Deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmışlardır. ANSYS-FLUENT yazılımı ile üç boyutlu ve iki boyutlu simetrik model ile çözüm yapmışlardır. Elde edilen görüntüleri görüntü işleme programı ile nicel olarak incelemişlerdir. SMD'nin basınçla radyal olarak değişimini göstermişlerdir. Eksenden uzaklaştıkça damlacık çapının arttığı sonucuna varmışlardır.

Cheng *et al.* (2012) bu teorik çalışmada spreyste damlacık hızı, SMD dağılımı, damlacık sayısı çeşitlilikleri ile sıcak yüzeyde akışkan film hızı, ısıtma gücü ve yüzey sıcaklığı dağılımını incelemişlerdir. Yüzey sıcaklığını kaynama olmayan rejimde ve çekirdek kaynama rejimlerinde ilişkilendirmişlerdir. Sonuçta; spreyn parametrelerinin çeşitliliği azaldıkça ısıtıcı yüzeydeki akışkan film kalınlığının daha üniform olduğunu, sıvı film hızının arttığını ve böylece yüzey sıcaklığının da daha üniform olduğunu görmüşlerdir.

Cheng *et al.* (2011) bu çalışmada kaynama olmayan rejimde spreyn soğutma ısı transferi deneylerini damıtılmış su kullanarak yürütmüşlerdir. Spreyn karakteristiklerini ölçmek için PDA (Phase Doppler Anemometry) kullanmışlardır. Spreyn debisi, spreyn yüksekliği ve spreyn soğutma ısı transferinde su sıcaklığının etkilerini incelemişlerdir. Spreyn

karakteristikleri ve suyun termo-fiziksel özelliklerinin kaynama olmayan rejimde ısı transferini etkilediği sonucuna varmışlardır. Damlacık hızı ve SMD için orifis çapı, We sayısı, bozulmadan önceki jet Re sayısı, boyutsuz spray yüksekliği ve radyal yönde spray çapına bağlı olarak korelasyonları elde etmişlerdir. Kaynama olmayan rejimde ısı transferi için Nusselt korelasyonunu da We sayısı, Re sayısı, boyutsuz yüzey sıcaklığı ve yüzey çapına bağlı olarak vermişlerdir.

Chen *et al.* (2013) bu çalışmada spray soğutmayla düz alüminyum mikrokanal ısı değiştiricinin (4 geçişli, paralel akışlı) ısı transferi performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyleri, tam koni spray nozulda 19 cm uzaktan depodan pompa ile spray göndererek 4,9-5,34 kg/dk debi aralığında yürütmüşlerdir.

Su spray oranı, hava oranı ve bağıl nem etkilerini araştırmışlardır. Sonuçta ısı transferi performansının artan spray debisi ile arttığını göstermişlerdir.

Chan *et al.* (2011) bu araştırmalarında metal kaplamalı polimer nanofiber sıcak yüzeyden ısı akısını artırmaya çalışmışlardır. Kaplamaları nikel, bakır ve gümüş ile hazırlamışlardır. Deneyleri çeşitli sıcaklıklarda 17.95 cm yükseklikten yüzeye damlacık çarptırarak yürütmüşlerdir. Çeşitli numunelerde damlacık çarpması ve sonrasında meydana gelen buharlaşma ısı transferi karakteristiklerini karşılaştırmışlardır. Gümüş kaplamalı numunelerin en yüksek, nikelin ise en düşük ısı akısını sağladığını görmüşlerdir. Ancak gümüşün 200°C'nin üzerinde oksitlenme eğiliminden dolayı kullanışlı olmadığını da belirtmişlerdir. Deneylerde damlacık çarpma hızlarını 1.76-2.72 m/s aralığında elde etmişlerdir. Görüntüleri almak için 2000 fps, ve 1/1000-1/2000 saniye hızında CCD kamera (Pulnix TM-7EX) kullanmışlardır. Deneyleri 125-150 ve 200°C yüzey sıcaklıkları için yürütmüşlerdir. Spray soğutma etkinliğinin yüzeyle damlacık arasındaki ısı akısına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Tao *et al.* (2011) bu yayında, kaynama olmayan spray soğutma sisteminde deiyonize su kullanarak ısı transferini incelemişlerdir. Açık sistemde iki tam koni spray nozul ile

deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sıvı hacimsel debisi, nozul-yüzey mesafesi ve sıvı giriş sıcaklığının etkilerini incelemişlerdir. Hacimsel debisinin artmasıyla ve sıvı giriş sıcaklığının azalmasıyla ısı transfer katsayısının önemli ölçüde arttığını gözlemişlerdir. Çalışma sıvısına yüzey aktif madde (surfactant) ilavesinin de ısı transferini arttıracakını belirtmişlerdir.

Ravikumar *et al.* (2014) bu çalışmada, 6 mm kalınlığında paslanmaz çelik plakada hava destekli spray soğutmayı ve yüzey aktif madde ilavesini incelemişlerdir. Yüzey aktif madde olarak Tween20 kullanmışlardır. Çeşitli karışımlar için maksimum soğutma oranlarını hesaplamışlardır. Etanol-su-yüzey aktif madde karışımı için bu değeri 235°C/s olarak elde etmişlerdir. Bunu çok hızlı soğutma rejimi olarak tanımlamışlardır. Bu araştırmayı çok hızlı soğutma sürecini artırmak için yürütmüşlerdir. Çekirdek kaynama rejiminde (200°C) yüzey ısı transfer katsayısının etanol-su-yüzey aktif madde karışımında en çok artışı gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Nakoryakov *et al.* (2012) bu çalışmada buharlaşma sürecinde damlacık hacimlerinin ve ısıtılmış yüzey sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Damlacık buharlaşmasında yüzeyin geometrik parametreleri ve termofiziksel etkilerini göstermişlerdir. Damlacık çap değişimi ve yüzey kalınlığının buharlaşma rejiminde değişime yol açtığını gözlemişlerdir. Damlacık boyunca arayüz sıcaklık dağılımını da ölçmüşlerdir. Deneyleri bakır ve paslanmaz çelik için yürütmüşlerdir. Sıcaklık ölçümlerini termal kamera ve termoçiftlerle eşzamanlı olarak almışlardır. Damlacık kaynama rejiminin havuz kaynamasından önemli ölçüde farklı olduğu sonucuna varmışlardır.

Literatürdeki bazı spray soğutma çalışmaları; kullanılan nozul tipi, SMD, kütleli debi ve kritik ısı akısı değerleri açısından Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Literatürdeki bazı sprej soğutma çalışmalarının karşılaştırılması

Yazar	SMD	Nozul tipi	Kütlesel debi /Kütle akısı	İncelenen parametreler	Kritik ısı akısı (W/cm ²)
(Webb <i>et al.</i> 1992)	32-56 µm	Hava destekli tam koni	1,03-6,1 kg/m ²	SMD, V _{drop} , kütleli akı	150
(Pais <i>et al.</i> 1992)	7,2-28,4 µm	Hava destekli	1,4-5,1 L/h	SMD, kütleli debi, yüzey pürüzlülüğü, T _{sub}	650
(Estes and Mudawar 1995)	110-225 µm	Tam koni	-	Sprej açısı, SMD, hacimsel akı, T _{sub}	10-800
Halvorson <i>et al.</i> (1994)	2,3-3,8 µm	İğne	0,07 L/h	SMD, T _{sub} , V _{drop}	170
(Mudawar and Estes 1996)	-	Tam koni	0,23 L/h	Nozul-yüzey mesafesi, T _{sub}	100
Marcos <i>et al.</i> (2002)	-	Hava destekli tam koni	0,17-0,5 L/h	T _{sub} , debi	400
Xia (2002)	100-300 µm	Piezo-elektrik	-	Damlacık hızı	924
(Fillius 2004)	17-35 µm	Tam koni	3,78-42,32 L/h	SMD, Hacimsel debi	220
(Jiang and Dhir 2004)	-	Hava destekli tam koni	0,0091-0,21 g/cm ² s	Kütlesel akı, yüzey sıcaklığı	230
Silk <i>et al.</i> (2006)	-	Basınçlı dönel	0,005-0,026 m ³ /m ² s	Artırılmış yüzey, hacimsel akı, Açık	80-140

Çizelge 1.1 (devam)

<i>Yazar</i>	<i>SMD</i>	<i>Nozul tipi</i>	<i>Kütlesel debi /Kütle akısı</i>	<i>İncelenen parametreler</i>	<i>Kritik ısı akısı (W/cm²)</i>
(Toda 1971)	88-146 µm	Hava destekli	2,92 L/h	SMD, V _{drop} , T _{sub}	600
(Choi and Yao 1987)	0,407-0,530 mm	Piezo-elektrik	0,1-0,16 g/cms	SMD, V _{drop} , kütlesel akı	350
Bonacina <i>et al.</i> (1979)	300-500 µm	Hava destekli	-	V _{drop} , SMD	220
(Comini and Giudice 1979)	45-99 µm	Tam koni	-	SMD, T _e	220

1.1. Sprey Karakteristikleri

Çoğu uygulamada atomizerin işlevi sadece sıvının küçük damlalara ayrılması değil, ayrıca çevre ortamına simetrik veya üniform dağılım sağlayabilmesidir. Dağılım; koni açısına, ortalama damla çapına, çap dağılımına ve fiziksel özelliklere bağlıdır. Bu çalışmada da kullanılan çift akışkanlı atomizerlerde damlalar daha üniformdur. Sprey geometrisi her iki akışkanın özelliğine göre değişir.

Sprey sisteminin modellenmesi sıvı jetinin parçalanmasının ardından damlacık çap dağılımının öğrenilmesiyle ilişkilidir. Spreyin elde edildiği nozul çapı, damlacık hızı, damla sıcaklığı, sprej soğutmada kullanılan sıvının cinsi, damlacık çapı, ısı akısı gibi parametreler ve etkileşimleri detaylı bir şekilde incelenmelidir. Sprej soğutmadaki temel sprej karakteristikleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

1. Sprey Biçimi:

- Boş koni (Hollow cone)
- Dolu koni (Full cone)
- Düz sprej (Flat)

2. Kapasite:

Kapasite ve basınç arasındaki ilişki;

$$Q_2 = \frac{Q_1}{\sqrt{P_2/P_1}} \quad (28)$$

Q_1 , P_1 basıncında bilinen kapasite; Q_2 , P_2 basıncında belirlenen kapasitedir.

3. Sprej darbesi (çarpma):

Hedef yüzeye sprej etkisi kuvvet/alan ile ifade edilir (N/m^2). Bu değer, sprej örnek dağılımına (pattern distribution) ve sprej açısına bağlıdır. Genellikle aralıksız nozullar veya dar sprej açılı düz fan (flat fan) nozullar yüksek etkili uygulamalarda arzu edilir.

Sprej etkisi (F_l); hacimsel debi (Q) ve basınç düşüşüne (ΔP) bağlıdır.

$$F_l = CQ\sqrt{\Delta P} \quad (29)$$

C sabitini nozul tipi ve nozul-yüzey mesafesi etkiler.

4. Nüfuz etme (Penetrasyon):

Penetrasyon; spreyn durgun havaya enjekte edildiğinde ulaşabileceği maksimum mesafe olarak tanımlanabilir. İki bağıl büyüklükle kontrol edilir. Bunlar, başlangıçtaki sıvı jetin kinetik enerjisi ve çevre havasının aerodinamik direncidir.

5. Sprey açısı:

$$C = 2D \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (30)$$

Burada C, teorik kaplama alanıdır.

6. Sprey Deseni:

Atomizer tarafından üretilen spreyn deseni çoğu pratik uygulamada önemli bir değişkendir. Örnek olarak spreyn kurutmada simetrik olmayan desen yetersiz sıvı-gaz karışımına neden olabilir. Bu da işlemin etkinliğini ve ürün kalitesini azaltır. Desen; yanma, boyama ve kaplama uygulamalarında da önemlidir.

7. Damla Boyutu:

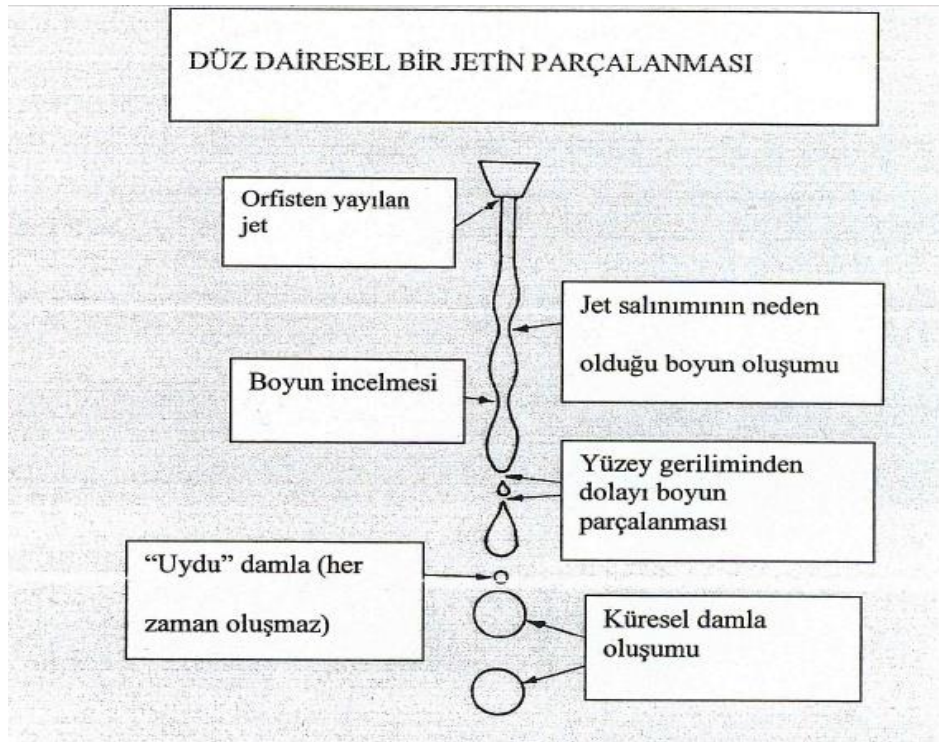
Spreyn inceliği, spreyn tarafından üretilen yüzey alanı bakımından ifade edilir. D_{32} , tüm damlaların hacim/yüzey alanı oranına göre bulunur. VMD ($D_{V0.5}$), hacim ortanca çap olarak tanımlanır. Damla boyutu sıvı spreyn hacmine göre ifade edilir. Damla boyutu hacim boyutu (veya kütle) ile ölçülür. Kütle olursa MMD (kütle ortanca çap) ile ifade edilir. VMD toplam sıvı spreyn hacminin %50'sidir. Toplam hacmin %50'sinden büyük olanlar alınır.

Bağıl span faktörü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

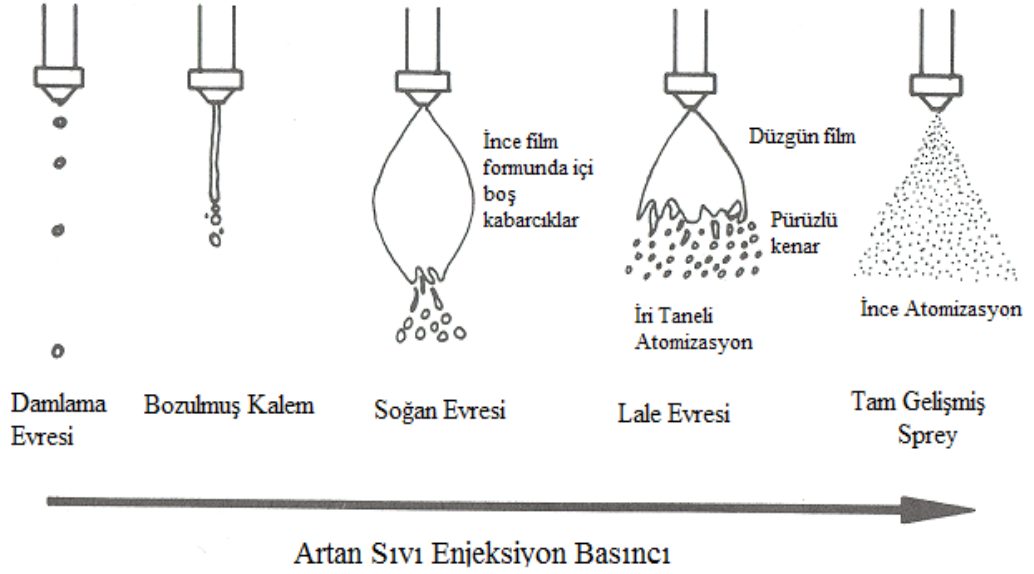
$$RSF = \frac{D_{V0.9} - D_{V0.1}}{D_{V0.5}} \quad (31)$$

Bu değer damla çap dağılımının benzerliğini gosterir. Bu sayı 1'e yakınsa, daha üniform sprey elde edilebilir.

RSF; çeşitli damla boyutu dağılımlarını karşılaştırmak için pratik bir araç sağlar.



şekil 1.1. Düz dairesel jetin parçalanması



Şekil 1.2. Spreyin gelişme evreleri

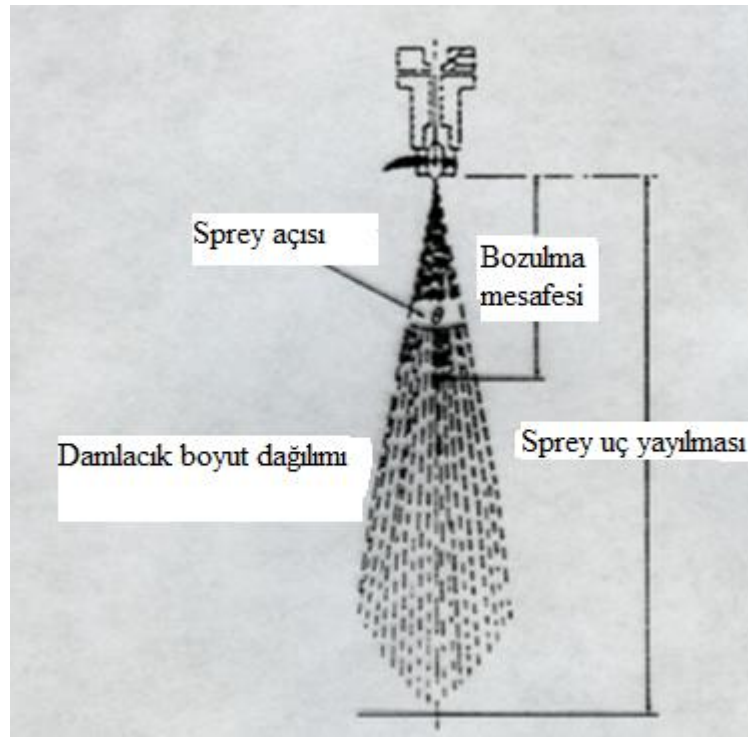
Sıvı atomizasyonu yığın sıvı hacminin, damlacıklara dönüşmesi sürecidir. Başka bir deyişle atomizasyon süreci, sıvının sahip olduğu kinetik enerjiyle veya yüksek hızlı hava akımına maruz kalmasıyla sıvı jetinin parçalanmasıdır.

Şekil 1.2’de artan sıvı enjeksiyon basıncıyla spreyn gelişme evreleri gösterilmiştir.

Bunlar;

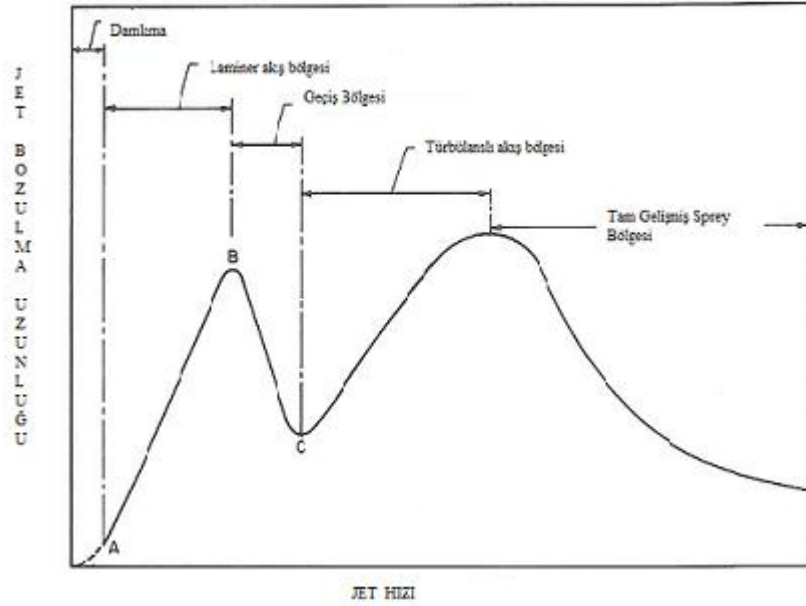
- Akış, düşük basınçlarda nozuldaki sıvı damlaması şeklinde olur.
- Daha sonra sıvı ince bozulmuş kalem formuna ayrılır.
- Sıvı koni orifiste şekillenir. Fakat yüzey gerilme kuvvetleriyle kapalı baloncuk haline dönüşür (Soğan evresi).
- Baloncuk, içi boş lale şekline açılarak kenarları yırtılır. Sıvı büyük damlalara ayrılır (Lale evresi).

- Kavisli yüzey konik tabakaya dönüşür. Tabaka, kalınlığı azalarak genişler ve kısa sürede kararsız hale gelerek ligamentlere dönüşür. Ondan sonra koni spreye dönüşür (Atomizasyon).
- Sıvı damlalarının büyük olması halinde damla yüzeyi üzerindeki dengelenmemiş hava basıncı damlayı bir torba haline getirir. Meydana gelen bu torbanın zayıf yerinden daha küçük damlalar oluşur.



Şekil 1.3. Sprey bozulma açısı

Düşük jet Weber sayılarında sıvı akışı Rayleigh jet bozulmasına maruz kalır. Yüksek momentum oranlarında bag bozulması meydana gelir ve sıvı kolonunun bozulmasına yol açar. Jet Weber sayısı arttığında daha güçlü aerodinamik etkileşim ve ikincil akışlar çok biçimli bozulmaya neden olur (Lefebvre 1989).



Şekil 1.4. Jet bozulma mesafesi ile jet hızı arasındaki ilişki

Çizelge 1.2. Jet bozulma rejimlerinin sınıflandırılması

Rejim	Tanımlama	Baskın Damla Yapısı Mekanizması	En yakın (sonraki) rejime geçiş kriteri
1	Rayleigh ayrılması	Yüzey gerilme kuvveti	$We_A > 0,4$ $We_A > 1,2 + 3,4(Oh)^{0,9}$
2	İlk ayrılma uyarması	Yüzey gerilme kuvveti Çevreleyen havanın dinamik basıncı	
3	İkinci ayrılma uyarması	Başlangıçtaki yüzey gerilme kuvvetine karşı havanın dinamik basıncı	$We_A > 40,3$ $We_A > 13$
4	Atomizasyon	Bilinmiyor	

1.2. Sprey Karakteristik çapları ve SMD Korelasyonları

Sprey karakteristik çapları için genel ifade ($p > q$):

$$\overline{D}_{pq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i^p}{\sum_{i=1}^n N_i D_i^q} \right)^{1/(p-q)} \quad (32)$$

D_i : i. sınıfta bulunan ortalama damla çapı (μm)

N_i : i. sınıfta bulunan ortalama damla sayısı (adet)

i : Damla ap değerine ait sınıf numarası

n : Damla çapına ait toplam sınıf sayısı

Aritmetik Ortalama ap (d_{10}): Bu ap buharlaşma oranını hesaplamak için çok uygundur.

Hacimsel Ortalama ap (d_{30}): Hidroloji gibi hacim kontrol uygulamalarına uygundur.

Sauter Ortalama ap (d_{32}): Kimyasal reaksiyonlarda kütle transfer oranı ve etkinliğini hesaplamak için uygundur. Toplam sprey hacminin toplam sprey alanına oranıdır.

SMD'nin aritmetik ortalama çaptan daha iyi olarak damlacıkların ısı ve kütle transferini karakterize ettiği bilinir (Lefebvre 1989).

Yüzey Ortalama ap (d_{20}): Absorbsiyon gibi yüzey kontrolü uygulamalarına uygundur.

Hacimsel Ortanca ap ($d_{v,5}$): Damla boyutunun sıvı sprey hacmi bakımından ifadesidir. Bazı damlalar toplam sıvı hacminin (veya kütlesinin) %50'sinden az, bazıları fazladır.

Herdan Çapı (d_{43}): Bu çap yanma çalışmaları için uygundur.

$d_{v,1}$: Sıvı spreycin hacminin %10'undan küçük olanları hesaplar. Zirai uygulamalarda nozul sapma potansiyeli ölçümü için uygundur.

$d_{v,9}$: Sıvı spreycin hacminin %90'ından daha küçük ve eşit damlacıkları kapsar. Spreycin tamamen buharlaşması durumu için gereklidir.

Homojenlik katsayısı (r) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$r = \frac{d_{v,5}}{d_{N,5}} \quad (33)$$

Çap değerlerinin benzerlik göstermesi durumunda homojenlik katsayısı (r) 1'e yakın olur.

Su ve kerosen gibi düşük viskoziteli sıvılar için SMD'de baskın faktörler; sıvı yüzey gerilmesi, hava yoğunluğu ve hava hızıdır. Diğer taraftan yüksek viskoziteli sıvılar için hava özelliklerinin etkisi daha az önemlidir. SMD özellikle viskozite gibi sıvı özelliklerine daha bağlı olur (Semiao *et al.* 1996).

$SMD = SMD_1 + SMD_2$ olarak tanımlanmıştır. SMD_1 düşük viskoziteli sıvıların atomizasyonunda belirleyicidir.

Yüksek viskoziteli sıvılar SMD_2 ile temsil edilir ve farklı bir mekanizma ile açıklamak gerekir. Bu da Ohnesorge (Z) sayısıdır.

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (34)$$

Burada We ve Re sayıları aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$Re = \frac{\rho_L V_R d_0}{\mu_L} \quad (35)$$

$$We = \frac{\rho_A V_A^2 d_0}{\sigma} \quad (36)$$

Spreyde temsili damlacık çapının tahmini ile ilgili birçok literatür vardır. Bunlardan biri klasik ampirik yaklaşımdır. Bu yöntem, geniş bir yelpazede toplanan deneysel verilerle eğri uydurulmasıdır. Bunlardan bazıları damlacık çap dağılımını karakterize eder. Bunlar; Rosin-Ramler, Nukiyama-Tanasawa, Log-normal, Root-normal ve Log-hiperbolik ifadeleridir (Lefebvre 1989).

Ampirik yaklaşıma alternatif olarak son yıllarda damlacık çap dağılımı modelini irdelemek için çeşitli analitik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan ilki Maksimum Entropi (ME) yöntemidir. ME metodunun öncülüğü (Sellens and Brzustowski 1985) ile (Li and Tankin 1992) tarafından yapılmıştır. Bu methoda ayrıntılı kısıtlamalarla entropi maksimizasyonu prensibi kullanılarak spray oluşumu tamamıyla rastgele modellenebilir. Çoğu muhtemel damlacık çap dağılımı fiziksel kısıtlamalar altında entropi maksimizasyonuna uyar (Ashgriz 2011).

İkincisi analitik bir yaklaşım olan DPF (Discrete Probabality Function) metodudur (Sovani *et al.* 1999; Sovani *et al.* 2000; Babinsky and Sojka 2002). Bu yöntem ilk kez (Sivathanu and Gore 1993) tarafından Newtonian spreylere uygulanmıştır. DPF metodu spray oluşum prosesini rastgele ve rastgele olmayan kısım olarak ikiye böler. Verilen başlangıç şartlarında (akışkan fiziksel özellikleri ve atomizer parametreleri) ve bozulma mekanizması modelinde damlacık çapları belirlenir (Ashgriz 2011).

PDF her D damla çapı aralığında damla ayrılmasını temsil eder. Tüm damla çap dağılımını bulmaktansa ortalama damla çapı veya ortanca çapı bulmak kullanışlıdır.

NMD (Number Median Drop Dia.), VMD ve MMD gibi çaplar bulunabilir (Reitz 1999).

(Villermaux *et al.* 2004) ve (Marmottent and Villermaux, 2004) damlacık çap dağılımının ligament bozulmasıyla bağlantılı olduğunu göstermişlerdir. Bu gamma (Γ) dağılımı ile temsil edilmiştir (Eggers and Villermaux 2008).

$$P_B \left(x = \frac{D}{\langle D \rangle} \right) = \frac{n^n}{\Gamma(n)} x^{n-1} e^{-nx} \quad (37)$$

Bu ifadede $\langle D \rangle$: Ortalama damla çapı (D_{10}), $\Gamma(n)$: Gama fonksiyonudur. n değeri hava hızı ile biraz artar.

Karakteristik damla çaplarının belirlenmesi için bazı korelasyonlara ihtiyaç vardır. Bunlardan en önemlisi Sauter Ortalama Çap (d_{32}) için kullanılan korelasyonlardır. Çizelge 1.3'de sprej karakteristik çapı d_{32} 'nin çeşitli nozul tipleri, çalışma basınçları, hava-sıvı kütleli debi oranı (ALR), sprej açısı, yoğunluk ve bağıl hız gibi parametreler için verilen korelasyonları özetlenmiştir.

Çizelge 1.3. Literatürdeki SMD korelasyonları ve kullanım aralıkları

	Yazar	Korelasyon	Kullanım aralığı
1.	(Ayres <i>et al.</i> 2001)	$SMD = 10^{-3} \left[\frac{\sqrt{\sigma \rho_L}}{\rho_A V_A} \right] \left(1 + \frac{1}{AFR} \right)^{0.5} + 6 \times 10^{-5} \left[\frac{\mu_L^2}{\sigma \rho_A} \right]^{0.425} \left(1 + \frac{1}{AFR} \right)^{0.5}$	Prefilmin g airblast atomizerlerde
2.	(Wang and Lefebvre 1987)	$SMD = A \left[\frac{\sigma^{0.5} \mu_L}{\rho_A \Delta P_L} \right]^{0.5} [t \cos \theta]^{0.25} + B \left[\frac{\sigma \rho_L}{\rho_A \Delta P_L} \right]^{0.25} [t \cos \theta]^{0.75}$	
3.	(Ayres <i>et al.</i> 2001)	$SMD = 1.58 \times 10^{-3} \left[\frac{\sigma}{\rho_A V_A^2 d_0} \right]^{0.5} d_0 \left[\frac{\sigma}{\mu_L V_A} \right]^{0.55} \left(\frac{\rho_L}{\rho_A} \right)^{-1} \left[1 + \frac{1}{AFR} \right]^{0.5} + 166 \left[\frac{\mu_L}{\rho_L d_0 V_A} \right]^{1.1} \left[\frac{\sigma}{\rho_A V_A^2 d_0} \right]^{0.2} d_0 \left(\frac{\rho_L}{\rho_A} \right)^{0.35} \left[1 + \frac{1}{AFR} \right]^{-0.48}$	Plain-jet airblast atomizer
4.	(Li and Tankin 1987)	$SMD = \left(\frac{6}{\pi} \right)^{1/3} \frac{\Gamma(2)}{\Gamma\left(\frac{5}{3}\right)} \left[\frac{\dot{m}_L}{\rho_L \dot{v}} \right]$	

Çizelge 1.3 (devam)

	Yazar	Korelasyon	Kullanım aralığı
5.	(Lorenzeto and Lefebvre 1977)	$D_{32} = 0.95 \left[\frac{(\sigma \mu_L)^{0.33}}{\sigma_L^{0.37} \rho_A^{0.3} U_R} \right] \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)^{1.7} + 0.13 \left(\frac{\mu_L^2 d_0}{\sigma \rho_L} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)^{1.7}$	Plain-jet airblast atomizerlerde
6.	(Ashgriz 2011)	$SMD = 0.585 \left(\frac{\sigma}{\rho_L U_R^2} \right)^{0.5} + 53 \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma \rho_L} \right)^{0.225} \left(\frac{Q_L}{Q_A} \right)^{1.5}$	Air-assist atomizerlerde
7.	(Ingebo and Foster 1957)	$D_{32} = 5 \left(\frac{\sigma \mu_L d_0^2}{\rho_A \rho_L U_R^3} \right)^{0.25}$	Çapraz akışlı hava enjeksiyonu olan nozullarda
8.	(Ingebo and Foster 1957)	$D_{32} = 37 \left(\frac{\sigma \mu_L d_0^{0.5}}{\rho_A \rho_L U_R^3} \right)^{0.4}$	Çapraz akışlı hava enjeksiyonu olan nozullarda
9.	(Ashgriz 2011)	$D_{32} = 1.06 \times 10^5 U_A^{-3} \left(\frac{P}{P_A} \right)^{-4.1} \dot{m}_L^{0.83}$	Dust granulation (toz öğütme)
10.	(Mulhem <i>et al.</i> 2006)	$D_{32} = 0.21 d_L (Oh)^{0.0622} \left(W_{e_A} \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_L} \right)^{-0.4}$	Plain-jet airblast atomizerler (su ve yağ)
11.	(El-Shanawany and Lefebvre 1980)	$D_{32} = D_h \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right) \left[0.33 \left(\frac{\sigma}{\rho_A U_A t} \right) \left(\frac{\rho_A}{\rho_L} \right)^{0.1} + 0.068 \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma \rho_L t} \right)^{0.5} \right]$	Air-assist ve airblast
12.	(Batarseh 2008)	$D_{32} = 0.95 \frac{(\sigma \mu_L)^{0.33}}{\rho_L^{0.37} \rho_A^{0.30} U_A} \left[1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right]^{1.7} + 0.13 \left(\frac{\mu_L^2 d_0}{\sigma \rho_L} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)^{1.7}$	Air-assist ve airblast
13.	(Batarseh 2008)	$0.48 d_0 \left(\frac{\sigma}{d_0 \rho_A U_R^2} \right)^{0.4} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)^{0.4} + 0.15 \left(\frac{\mu_L^2 d_0}{\sigma \rho_L} \right)^{0.15} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)$	Air-assist ve airblast
14.	(Ingebo and Foster 1957)	$D_{32} = (2.67 \times 10^4 U_L P_A^{-0.33} + 4.11 \times 10^6 \rho_A U_A P_A^{-0.75})^{-1}$	Air-assist ve airblast

Çizelge 1.3 (devam)

	Yazar	Korelasyon	Kullanım aralığı
15.	(Batarseh 2008)	$D_{32} = 3.33 \times 10^{-3} d_0 \frac{(\sigma \rho_L d_0)^{0.5}}{\rho_A U_A} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A}\right) + 13 \times 10^{-3} \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma \rho_L}\right)^{0.425} d_0^{0.575} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A}\right)^2$	Air-assist ve airblast
16.	(Batarseh 2008)	$SMD = 0.33 d_0 \left(\frac{\sigma}{d_0 \rho_A U_R^2}\right)^{0.6} \left(\frac{\rho_A}{\rho_L}\right)^{0.1} d_0 \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A}\right) + 0.068 \left(\frac{\mu_L^2 d_0}{\sigma \rho_L}\right)^{0.5} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A}\right)$	Air-assist ve airblast
17.	(Estes and Mudawar 1995)	$\frac{d_{32}}{d_0} = 3.07 \left[\frac{\rho_g^{\frac{1}{2}} \Delta P d_0^{\frac{3}{2}}}{\sigma^{\frac{1}{2}} \mu_f} \right]^{-0.259}$	Sprey soğutma, Tek ve çift fazlı akış
18.	(Estes and Mudawar 1995)	$\frac{d_{32}}{d_0} = 3.67 \left[We_{d_0}^{\frac{1}{2}} Re_{d_0} \right]^{-0.259}$	Su ve FC-72 için geçerlidir.
19.	(Lefebvre 1989)	$SMD = 0.48 D \left(\frac{\sigma}{\rho_{gas} U^2 d}\right)^{0.4} \left(1 + \frac{1}{ALR}\right)^{0.4} + 0.15 d \left(\frac{\mu_{liq}^2}{\sigma \rho_{liq} d}\right)^{0.5} \left(1 + \frac{1}{ALR}\right)$	Airblast nozullarda $d_0 = 0.55-0.75$ aralığında geçerlidir.
20.	Olinger	$\frac{SMD}{d_0} = 0.39 X^{-0.07} GLR^{-0.28} M^{-0.45}$	Air-assist nozullarda
21.	(Cheng, Han <i>et al.</i> 2011)]	$\frac{d_{32}}{d_0} = 13.62 We_{d_0}^{-0.12} Re_{d_0}^{-0.26} \alpha^{0.36} \beta^{0.29} \exp(-1.07\beta)$	Kaynama olmayan rejimde sprej soğutmada
22.	Sakai <i>et al.</i>	$SMD = (14 \times 10^{-6} d_0^{0.75}) \left(\frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A}\right)^{0.75}$	Air-assist atomizerlerde
23.	Rosin-Rammler	$d_{32} = 133 \lambda We^{-0.74}$	Basıncılı nozullarda
24.	(Qian Lin and Xiong 2009)]	$SMD(cm) = 10^{-4} \left\{ 1.103 y \left(\frac{GLR}{0.12}\right)^{-0.218} + 14.72 \left(\frac{GLR}{0.12}\right)^{-0.3952} \left(\frac{\mu}{0.2}\right)^{0.1571} \left(\frac{\sigma}{46}\right)^{0.8199} \right\}$	Air-assist ve airblast nozullarda
25.	(Kohnen <i>et al.</i> 2010)	$\frac{d_{32}}{D_n} = 5900 (We)^{\frac{12}{13}} (Oh)^{2/13}$	Hollow cone (boş koni) nozullarda
26.	(Kohnen <i>et al.</i> 2010)	$\frac{d_{32}}{D_n} = 400 (\Delta P^*)^{-\frac{3}{4}} \left(\frac{\rho}{\rho_g}\right)^{1/5} Oh^{1/7}$	Tam koni nozullarda
27.	(Batarseh 2008)	$SMD = 2.25 \sigma^{2.25} \mu_L^{0.25} \dot{m}_L^{0.25} \Delta P_L^{-0.5} \rho_A^{-0.25}$	Air-assist ve airblast

Çizelge 1.3 (devam)

	Yazar	Korelasyon	Kullanım aralığı
28.	(Elkottb 1982)	$SMD(\mu m) = 3.08\mu_L^{0.385}(\sigma\rho_L)^{0.737}\rho_A^{0.06}\Delta P_L^{-0.54}$	Basıncılı nozullarda
29.	(Lal <i>et al.</i> 2010)	$SMD = A \frac{d_{out}^{0.12} \mu_L^{0.12}}{d_{in}^{-0.56} \mu_a} ALR^{-0.3}$ (A=8.55x10 ⁻⁴)	Air-assist nozullarda
30.	(Lefebvre 1989)	$SMD (cm) = 0,071 \left(\frac{t_s X \sigma \mu_L^{0.5}}{\rho_L^{0.5} U_L^2} \right)^{1/3}$	Fan-sprey nozullarda ; μ : 0,003-0,025 kg/ms aralığında
31.	(Lefebvre 1989)	$\frac{SMD}{t} = \left[1 + \frac{16850 Oh^{0.5}}{We(\rho_L/\rho_A)} \right] \left[1 + \frac{0.065}{(\dot{m}_A/\dot{m}_L)} \right]$ t: Başlangıç film kalınlığı t = D ₀ h / D _{an} D _{an} : Gaz çıkış çapı, D ₀ : Nozul çıkış çapı , We = $\rho_A U_{At}^2 / \sigma$	External-mixing air assist nozullarda
32.	(Lefebvre 1989)	$SMD = 51d_0 Re^{-0.39} We^{-0.18} \left(\frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)^{0.29}$ Re = $\rho_L U_R d_0 / \mu_L$ We = $\rho_L d_0 U_R^2 / \sigma$	External-mixing air assist nozullarda
33.	(Simmons 1979)	$SMD = C \left(\frac{\rho_L^{0.25} \mu_L^{0.25} \sigma^{0.375}}{\rho_A^{0.375}} \right) \left(\frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_L U_L + \dot{m}_A U_A} \right)^{0.55}$	Tüm nozullarda C 'nin değeri nozul dizaynına bağlıdır
34.	(Lefebvre, 1989)	$D_{32} = 2.83 d_0 \left(\frac{\sigma \mu_L^2}{\rho_g d_0^3 \Delta P_L} \right)^{0.25} + 0.26 d_0 \left(\frac{\sigma \rho_L}{\rho_g d_0 \Delta P_L} \right)^{0.25}$	Düz fan nozullarda

Literatürde sprej soğutma, görüntü işleme, damlacık boyut dağılımı ve ısı transferinin iyileştirilmesi ile ilgili çok fazla çalışma vardır. Bu çalışmada literatürde karşılaşılmayan sabit yüzey sıcaklığında ve kaynama olmayan rejimde altıgen kanatçıklı ısı alıcılarda optimum parametreler Taguchi deney tasarım tekniği kullanılarak belirlenmiştir. İlk aşamada ısı transferine etki eden parametreler; nozul-yüzey mesafesi, kanat yüksekliği, kanat genişliği, kanatlar arası x yönündeki mesafe, kanatlar arası y yönündeki mesafe, sıvı debisi, hava debisi ve zaman olarak belirlenmiştir. L₁₈(2¹*3⁷) ortogonal dizisi deney planı olarak seçilmiştir. Performans karakteristiği olarak Nusselt

sayısı belirlenmiştir. Nusselt sayısı dikkate alınarak genel optimum şartlar belirlenmiş ve bu optimum şartlar için doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra test istatistiği ve katkı yüzdesi değerlerine göre en etkin parametreler belirlenerek Nusselt sayısı için korelasyon belirlemeye yönelik deneyler yapılarak Nu korelasyonu elde edilmiştir. Belirlenen ALR değeri için sprej açısı ve jet çapı korelasyonları elde edilmiştir. ALR-Nu değişimleri de grafikler halinde sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Genel Isı Transferi Kavramları

Isı transferi konusu bugün mühendisliğin tüm dallarında uygulama sahası bulmakta özellikle Makine Mühendisliğinde bu daha da geniş olmaktadır. Makine Mühendisliği, ısı transferi ilmini ısıtma, soğutma, klima, havalandırma konularında, içten yanmalı motorlarda, buhar üretiminde, ısı değiştiricilerinin dizaynında ve Makine Mühendisliğinin daha pek çok dallarında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Isı transferi teorisi ileri fizik ve ileri matematik uygulamaları ile irdelenebilmekte, çoğu problemlere ancak basitleştirmek ve bazı kabuller yapmak suretiyle matematiksel bir çözüm getirebilmektedir.

Isı transferi sıcaklık potansiyelinden dolayı ortaya çıkan enerji biçimidir. Bir ortam içinde veya ortamlar arasında, bir sıcaklık farkının mevcut olduğu her durumda ısı transferi mutlaka gerçekleşir. Durgun bir katı veya akışkan ortam içinde, bir sıcaklık farkı olması durumunda, ortam içinde gerçekleşen ısı transferi için, iletim terimi kullanılır. Buna karşın, bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan farklı sıcaklıklarda ise, aralarında gerçekleşen ısı transferi, taşınım terimi ile ifade edilir. Sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeyler elektromanyetik dalgalar halinde enerji yayarlar. Farklı sıcaklıktaki iki yüzey arasında, birbirlerini görmeye engel bir ortam yoksa meydana gelen ısı alışverişine ışıınım denir. Kanatçıklı ısı alıcılarda spreyci soğutma dizayn ve analizi yapılırken bu üç ısı transferi mekanizması da incelenmelidir.

Isı transferi mekanizması üç değişik şekilde olmakta ve bunlar:

- A. İletim (Kondüksiyon)
- B. Taşınım (Konveksiyon)
- C. Işıınım (Radyasyon)

olarak adlandırılmaktadırlar.

Her üç ısı transferinde de bir sıcaklık farkı gelmekte, ısı yüksek sıcaklık tarafından alçak sıcaklık tarafına doğru akmakta ve bir kaynağı terk eden ısı miktarı onu alan elemanların ısı artışına eşdeğer olmaktadır.

Endüstriyel uygulamaların birçoğunda ısı transferinin bu üç şekilde mevcuttur. Bununla birlikte uygulamadaki çalışma şartlarına ve baskın ısı transferi türüne göre biri veya bir kaçını ihmal edilebilir.

2.1.1. İletim ile ısı transferi

Isı iletimi bir ortam içerisinde bulunan bölgeler arasında veya doğrudan doğruya fiziki temas durumunda bulunan farklı ortamlar arasında, atom ve moleküllerin fark edilebilir bir yer değiştirmesi olmaksızın bunların doğrudan teması sonucu meydana gelen ısı geçişi işlemidir. Termodinamiğin II. Kanununa göre ısı yüksek sıcaklıkta bulunan bir bölgeden düşük sıcaklıktaki bir bölgeye akar. Kinetik teoriye göre bir maddenin sıcaklığı, bu maddeyi meydana getiren moleküllerin veya atomların ortalama kinetik enerji ile orantılıdır. Kinetik enerjinin fazla olması iç enerjinin fazla olması demektir. Bir bölgede moleküllerin ortalama kinetik enerjisi, sıcaklık farkından dolayı bitişik bölgedeki moleküllerin ortalama kinetik enerjilerden fazla ise, enerjileri fazla olan moleküller bu enerjiyi komşu olan moleküllere iletirler.

Isı iletimi Fourier yasası ile tanımlanır. Sabit kesit alanına sahip bir cisimden bir boyutlu, kararlı ısı iletimi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (38)$$

Buna göre ısıya çeşitli malzemeler üzerinden iletme oranı;

- 1) Malzeme kalınlığı
- 2) Kesit alanı
- 3) Malzemenin iki tarafındaki sıcaklık farkı
- 4) Malzeme ısı iletkenliği
- 5) Isı akışının süresi

gibi faktörlere bağlıdır.

2.1.2. Taşınım ile ısı transferi

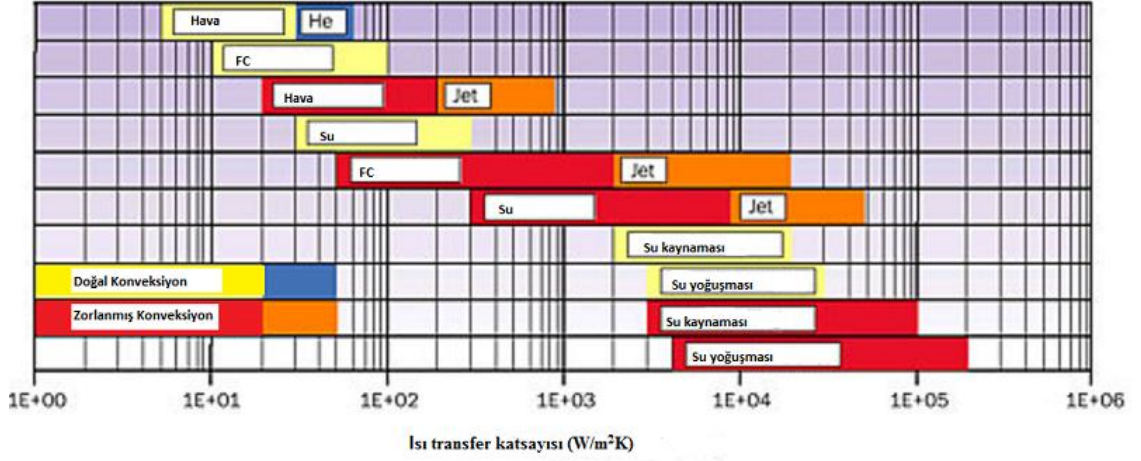
Taşınım ile ısı transferi, akışkan hareketi ile enerji taşınımı işlemidir. Ortam bir sıvı veya gaz ise, akışkan hareketi ile ısı enerjisi bir bölgeden diğer bir bölgeye sıcaklık farkından dolayı transfer edilecektir. Isı transferinin en önemli konusu konveksiyondur. Isı değiştiricilerinde akışkanlar, katı cisimler (yüzeyler) ile birbirinden ayrılmış olduklarından, konveksiyon, bir yüzey ile akışkan arasındaki enerji taşınımında en önemli ısı transferi mekanizmasıdır.

Sıcak bir nesneden soğutucu akışkana olan ısı transferi Newton'un Soğutma Yasası olarak bilinen aşağıdaki eşitlikte ilişkilendirilmektedir:

$$q = hA_y(T_y - T_\infty) \quad (39)$$

Konveksiyon katsayısı h , akış yönündeki katı cismin şekli ve boyu gibi bir takım fiziksel geometrilere ve akışkanın tipi ve çalışma sıcaklığı gibi termofiziksel özelliklerine bağlıdır. Çizelge 2.1'de soğutmada ısı transfer katsayısı aralıkları görölmektedir.

Çizelge 2.1. Soğutmada ısı transferi katsayıları (Clemens and Lasance 2005)



2.1.3. Işınım ile ısı transferi

Radyasyonla ısı transferi sonlu sıcaklıktaki malzeme tarafından yayılan ve elektromanyetik dalgalarla iletilen enerjidir. Enerji iletim ve taşınım ile transfer edilirken bir madde ortamına gerek duyar, fakat radyasyonda buna gerek yoktur. Sonlu sıcaklıktaki her bir cisim ya da nesne radyasyon yaydığı gibi aynı zamanda bu cisim ya da nesnelere çevrelerindeki radyasyon yayan cisimlerin yaydığı radyasyonlar için alıcı konumundadır. Bu olay radyasyonun soğurulması olarak bilinir. Bu nedenle radyasyonun etkisinden bahsedilirken aşağıdaki eşitlikle verilen bir yüzey ve çevresi arasındaki net radyasyon ısı değişim miktarını dikkate almak gerekmektedir;

$$Q_{rad} = \varepsilon A_y \sigma (T_y^4 - T_\infty^4) \quad (40)$$

Radyant ısı, koyu renkli veya donuk cisimler tarafından kolayca soğurulur. Oysa açık renkli yüzeyler, ışık ışınlarını olduğu gibi, radyant ısı dalgalarını da yansıtırlar. Bu nedenle buzdolapları açık renkte imal edilirler.

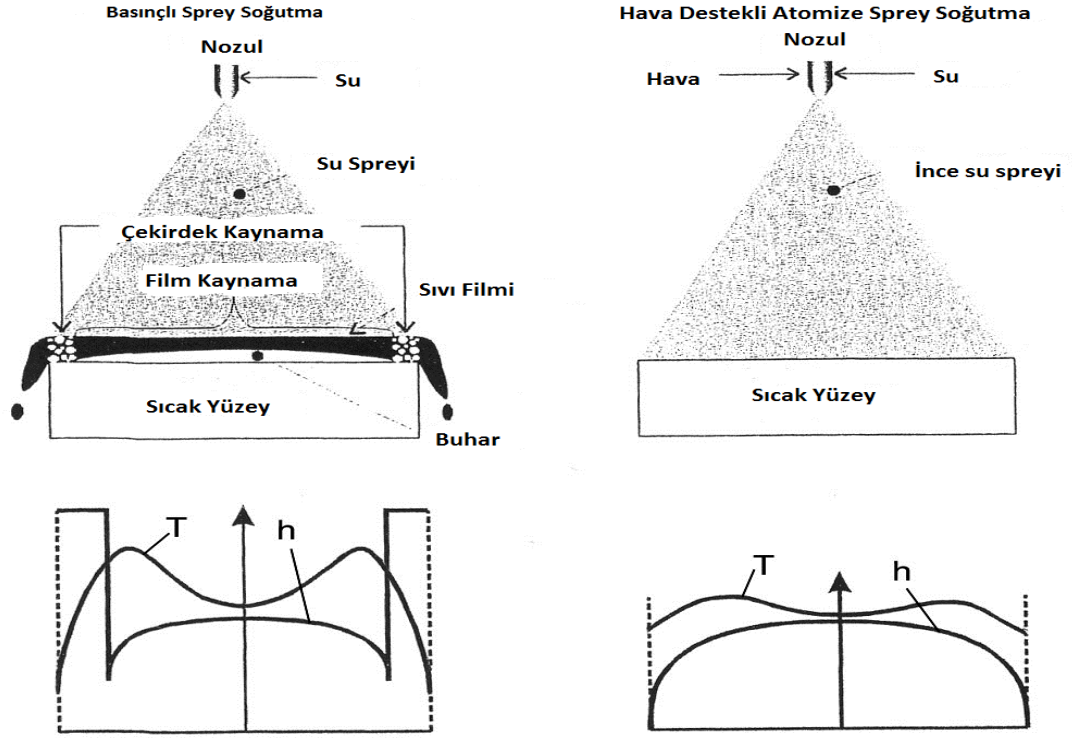
2.2. Spreyde Isı Transferi Mekanizmaları

Kaynama olmayan rejimde yüzey sıcaklığı soğutucunun kaynama sıcaklığından düşüktür. Sprey esnasında damlacıklar ısıtıcı yüzeyinde hareketli sıvı film formunda toplanır. Kaynama olmayan rejimde ısı transferi mekanizması zorlanmış konveksiyon ve sıvı film buharlaşmasından ibarettir. Yüzey sıcaklığı soğutucunun kaynama noktasına doğru artarken faz değişikliği ısı akısının önemli oranda artışıyla sonuçlanır. Kaynama olmayan rejimde sprej soğutma özellikle elektronik soğutmada yüksek ısı atan kontrollü bir soğutma sağlar.

Metal soğutmasında sıvı damlacıklarla yüzey temasını artırdığı için sprej soğutma en etkili yöntemdir. Hava destekli sprej de buna avantaj sağlar (Issa 2009).

Kaynama rejiminde ısı transferi mekanizması 4 anahtar mekanizmadan oluşur.

- Konvektif ısı transferi
- Sıvı buharlaşması
- Çekirdek kaynama (Yüzeyde sabit çekirdekten kaynaklanan çekirdek kaynama)
- Çekirdek kaynama (Sıvı filmle ikincil çekirdekten dolayı çekirdek kaynama)



Şekil 2.1. Sprey soğutmada basınçlı ve hava destekli atomizasyonun karşılaştırılması

2.2.1. Sprey ısı transferi parametreleri

Sonuç parametresi olarak incelenecek Nusselt sayısını hesaplamak için;

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (41)$$

Damlacık çapı (D) bazı uygulamalarda hidrolik çap olarak da alınabilir.

Isı taşınım katsayısı;

$$h = \frac{q''}{(T_y - T_w)} \quad (42)$$

Sprey ısı gücü ve Nu sayısı literatürdeki bazı çalışmalarda aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\dot{q} = \dot{m}(C_p \Delta T_{sub} + h_{fg}) \quad (43)$$

$$\dot{q}'' = \rho_l \dot{V}''(C_p \Delta T_{sub} + h_{fg}) \quad (44)$$

$$\Delta T_{sub} = (T_y - T_w) \quad (45)$$

$$Nu = \frac{\dot{q}''}{(T_y - T_w)} \left(\frac{D_h}{k} \right) \quad (46)$$

Burada D_h hidrolik çapı $4A_{alan}/\text{Çevre}$ ile hesaplanacaktır. Prandtl sayısı ise;

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (47)$$

Sıvı-buhar faz değişimi esnasında duyulur ısının gizli ısıya oranı olan Jakob sayısı;

$$Ja = \frac{c_p \Delta T_{sat}}{h_{fg}} \quad (48)$$

$$\Delta T_{sat} = (T_d - T_w) \quad (49)$$

$$Ja_{aug} = \frac{c_p \Delta T_{sub}}{h_{fg}} \quad (50)$$

Düzeltilmiş Ja sayısında (Ja_{aug}) sıcaklık farkındaki doyma sıcaklığı yerine yüzey sıcaklığı kullanılmıştır.

Nusselt sayısı böylece;

$$Nu = \left(\frac{\rho_i \dot{V}'' D_h}{\mu}\right) \left(\frac{\mu C_p}{k}\right) \left(\frac{h_{fg}}{C_p(T_y - T_w)}\right) (Ja + 1) \quad (51)$$

ve değerler boyutsuz sayılar cinsinden yazılırsa;

$$Nu = Re * Pr \left(\frac{1}{Ja_{aug}}\right) (Ja + 1) \quad (52)$$

şeklinde ifade edilir.

Bunun yanında Nu sayısını hesaplamak için literatürde bazı korelasyonlar verilmiştir.

Metalik yüzeyler için (Mudawar and Valentine 1989);

$$Nu_{32} = 2,512 Re_{32}^{0,76} Pr_f^{0,56} \quad (53)$$

(Moreira and 2007)'a göre Nu ifadesi ise;

$$Nu = 3,4 * 10^{-5} \frac{Re^{1,51}}{Ja^{0,254}} \quad (54)$$

Tam koni nozul için (Rybicki and Mudawar 2006)'in korelasyonu;

$$Nu_{d_{32}} = 4.70 Re_{d_{32}}^{0.61} Pr_f^{0.3} \quad (55)$$

Kaynama olmayan ısı transferi rejimi için (Cheng *et al.* 2011)'in korelasyonu;

$$Nu = 0,036 Re^{1,04} We^{0,28} Pr^{0,51} (3,02 + \epsilon^{1,53}) \quad (56)$$

Bu korelasyonda ϵ değeri;

$$\epsilon = \frac{(T_y - T_f)}{T_{sat}} \quad (57)$$

ifadesi ile tanımlanmıştır.

(Ranz and Marshall 1952)'in Nu korelasyonu;

$$Nu = \frac{h_0 d}{k_g} = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr_d^{1/3} \quad (58)$$

$$q'' = 1,87 * 10^{-5} (T_y - T_w)^{5,55} \quad (59)$$

$$h = 0,098 T_{y_0} + 2,8 \quad (60)$$

Burada T_{y_0} (K) başlangıçtaki yüzey sıcaklığıdır.

Film buharlaşma için ısı akısı ifadesi;

$$q'' = 976 T_s - 45392 \quad (61)$$

Çekirdek kaynamada;

$$q'' = 6800 T_s - 638890 \quad (62)$$

ilişkileri verilmiştir.

Bu çalışmada ise sabit yüzey sıcaklığında, kaynama olmayan rejimde, altıgen kanatçıklı alüminyum ısı alıcılar için Bi sayısı çok düşük bulunmuş ve toplam kütle yaklaşımının kullanılmasına karar verilmiştir. Buna göre alüminyum yüzeyde üretilen ısı miktarı;

$$Q = m_{Al}C_p\Delta T \quad (63)$$

ile hesaplanmıştır. Burada ΔT , yüzeyin spreyden önceki ve sonraki ortalama yüzey sıcaklıklarıdır. Hava destekli nozul ile gönderilen sprey için ısı transferi katsayısı ise sprey ısı transferi katsayısı olarak şu şekilde tanımlanmıştır:

$$h_{sp} = \frac{(Q - Q_{rad} - Q_{buh.})}{A_y(T_y - T_{sp})} \quad (64)$$

Buradan Nu sayısı ise;

$$Nu = \frac{h_{sp}D_h}{k} \quad (65)$$

ile hesaplanmıştır. Işınım ile ısı transferinin etkisi yüzeyin sprey süresindeki ortalama sıcaklığına göre hesaplanmıştır. Buharlaştırma ile atılan ısı ise yüzeydeki bağıl nemin değişimine göre çeşitli sprey zamanları için hesaplanmıştır. Bu değer 5 s, 10 s ve 15 s sprey süreleri için sırasıyla; %16.27, %17.36 ve %22.24 olarak elde edilmiştir.

2.3. Jet Hızı ve Hacimsel Akı

Jet hızı ifadesi (Soriano 2011)'e göre;

$$U_j = \frac{4\dot{m}}{\pi\rho d_j^2} \quad (66)$$

(Srivastava *et.al.* 2006)'ya göre jet hızı korelasyonu;

$$U_j = 280 \frac{(\sigma)^{0.42} (\mu_l)^{0.18}}{(\rho_l)^{0.59} (t_{jet})^{0.59}} \quad (67)$$

Damlacık hızı;

$$V_d = (V_j^2 - \frac{12\sigma}{\rho d_{32}})^{1/2} \quad (68)$$

Kare ısıtıcı yüzeyler için hacimsel akı (Mudawar and Valentine 1989);

$$H \tan\left(\frac{Q}{2}\right) = L/2 \quad (69)$$

Burada $H \cdot \tan(Q/2)$, sprey etki alanı yarıçapıdır.

Hacimsel akı ise;

$$\bar{Q}'' = \frac{Q}{\left(\frac{\pi L^2}{4}\right)} \quad (70)$$

2.4. Nozul Tahliye Katsayısı

Hava destekli nozullar için nozul tahliye katsayısı (C_d) aşağıdaki eşitlikle hesaplanır. (Lal *et al.* 2010).

$$C_d = \frac{\dot{m}_W}{A_0 (2\rho_W)^{0.5}} \quad (71)$$

Ayrıca bu katsayı ALR'nin fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde de hesaplanabilir.

$$C_d = -0.01 \ln(ALR) + 0.29 \quad (72)$$

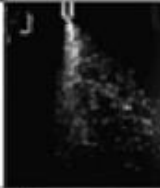
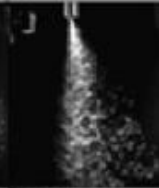










2.5. Weber ve Ohnesorge Sayısı

We sayısı, atalet kuvvetlerinin yüzey gerilme kuvvetlerine oranıdır. Spreyde atalet kuvvetleri hava sürtünmesinden doğan aerodinamik kuvvetlerdir. We sayısı; damlacık kinetik enerjisi ve yüzey enerjisinin bağıl etkisinin bir ölçüsüdür. We sayısı;

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma} \quad (73)$$

Ohnesorge sayısı, viskoz kuvvetlerin (viskoz kesme kuvveti) yüzey gerilme kuvvetlerine oranıdır. Oh sayısı jet hızının fonksiyonudur. Ayrıca viskozitenin etkisini temsil eder. $Oh < 0.1$ ise viskozitenin etkisi düşük, yüzey gerilmesinin etkisi baskındır.

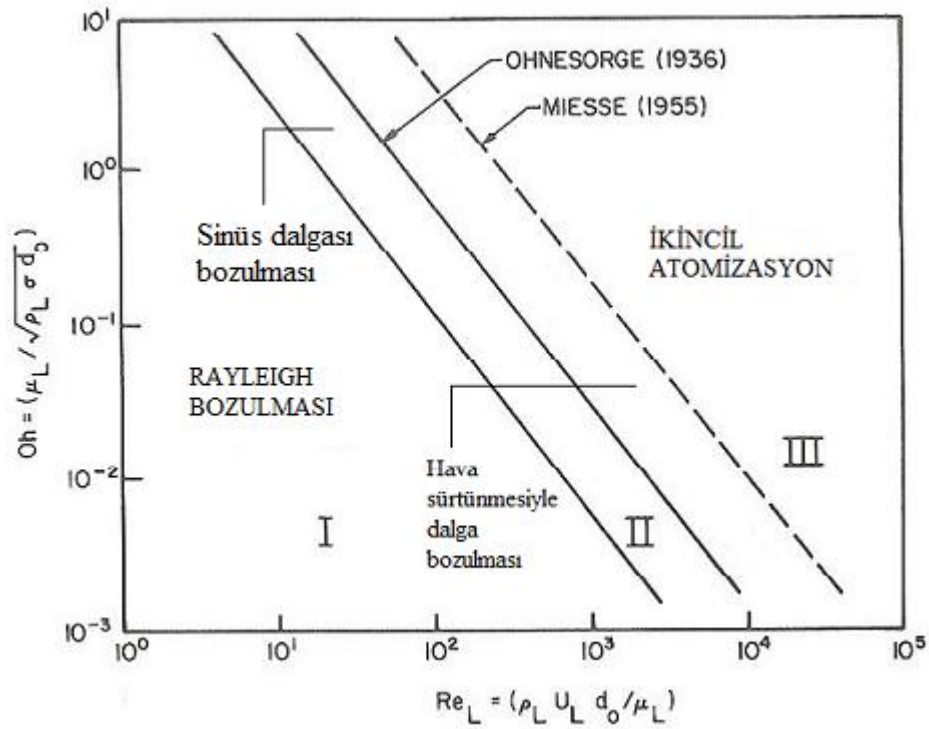
$$Oh = \left(\frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma d_0}} \right) \quad (74)$$

Bozulma rejimi	Bağ bozulması		Uzama ve incelme bozulması		Katastrofik bozulma	
	We	We	We	We	We	We
Görüntü	52	68	106	129	383	538
Makro görüntü						
Mikro Görüntü						

Şekil 2.2. Weber (We) sayısına göre sprej bozulma rejimleri

2.6. Jet Bozulma (Dağılma) Uzunluğu

Jet bozulma uzunluğu nozuldan çıktıktan sonra sprej yapısının oluşmaya başladığı mesafedir. Bu mesafe sıvı kolonunda delinmenin görüldüğü yer veya damla şekillenmesinin başladığı yer olarak tarif edilir.



Şekil 2.3. Bozulma tiplerinin sınıflandırılması

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi (Ohnesorge 1936), çeşitli jet bozulma mekanizmalarını Oh ve We sayılarına bağlı olarak üç bölgede göstermiştir. Bu mekanizmalar;

1. Düşük Re sayılarında jet, oldukça üniform boyutta büyük damlalara ayrılır. Bu, Rayleigh bozulma mekanizmasıdır.
2. Normal Re sayılarında jet bozulması jet salınımları ile gerçekleşir. Bu salınımların büyüklüğü jet tamamen bozuluncaya kadar hava direnciyle artar. Bu mekanizmayla çok geniş boyut aralıklarında damla üretilir.

3. Yüksek Re sayılarında atomizasyon nozul çıkışında kısa bir mesafede tamamlanır.

(Grant and Middleman 1966)'a göre bozulma mesafesini belirlemek için genel bir korelasyon önerilmiştir. Buna göre;

Laminer akışta,

$$L = 19,5d_0We^{0,5}(1 + 3Oh)^{0,85} \quad (75)$$

Türbülanslı akışta,

$$L = 8,51d_0We^{0,32} \quad (76)$$

ifadeleri geçerlidir.

Kritik Reynolds sayısında jet akışı laminerden türbülansa geçer.

$$Re_{crit} = 12000\left(\frac{l_0}{d_0}\right)^{-0,3} \quad (77)$$

Aynı basınç, termal ve dış akış şartları için sadece nozul (lüle) tipi değiştirilirse (üçgen, silindirik, dikdörtgen vb.) sprey içindeki partikül çap dağılımları ve hız dağılımları tüm şartlar aynı ise nozulun tipine bağlıdır.

Hava destekli atomizerler için Lefebvre'nin bozulma mesafesi korelasyonu;

$$\frac{BL}{d_j} = 0.5(We_a^{-0.4}Re_L^{0.6}) \quad (78)$$

Burada aerodinamik We sayısı (We_a), $We_a = \frac{d_j \rho_a U_R^2}{2\sigma}$ ile hesaplanmıştır. Re_L ve We_L ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Aerodinamik We sayısı damlacık bozulma rejimlerini ayırmak için kullanılır.

$$Re_L = \frac{d_L U_L}{\nu} \quad (79)$$

$$We_L = \frac{\rho_L d_L U_R^2}{\sigma} \quad (80)$$

Literatürdeki bazı bozulma mesafesi korelasyonları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Literatürdeki bazı bozulma mesafesi korelasyonları

Yazar	Bozulma mesafesi korelasyonu
(Sirotkin & Yoh, 2012)	$\frac{L_b}{d_0} = 13\sqrt{We}(1 + 30h)$
Eroglu <i>et al.</i> (1991)	$\frac{L_c}{d_L} = 0.66We_R^{-0.4}Re_L^{0.8}$ $\frac{L}{2a} = 0.5We_L^{-0.4}Re_g^{0.6}$
Woodwart <i>et al.</i> (1994)	$\frac{L_c}{d_L} = 0.095\left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{-0.36/Z} We_R^{-0.22/Z} Re_L^{0.68}$
Lasheras <i>et al.</i> (1998)	$\frac{L_{p_c}}{d_L} = \frac{6}{\sqrt{M}}$
Porcheron <i>et al.</i> (2002)	$\frac{L_c}{d_L} = 2.85\left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{-0.38} Oh^{0.34} M^{-0.13}$
Leroux <i>et al.</i> (2007)	$\frac{L_c}{d_L} = \frac{10}{M^{0.3}}$
(Shavit 2001), çift akışkanlı	$\frac{IL}{\Delta} = \left[\frac{3\mu\rho_l d^2 U_r^3}{4(\rho_a U_r^2 - 2\frac{\sigma}{d})^2}\right]^{1/3}$
(Lefebvre 1989), hava destekli	$\frac{L}{d_L} = 0.5(We_a^{-0.4}Re_L^{0.6})$
(Lam, 2008)	$L = 19.5d_0(We)^{0.5}(1 + Oh^3)^{0.85}$

2.7. Sprey Bozulma Mesafesi ve Damlacık Çapı

Viskoz olmayan sıvılar için (Bachalo *et.al.* 2001) tarafından verilen bozulmada dalga boyu mesafesi;

$$\lambda = \sqrt{2}\pi d = 4,4d \quad (81)$$

$$D = 1,88d \quad (82)$$

$$\lambda_{min} = \pi d \quad (83)$$

Viskoz sıvılar için;

$$\lambda_{opt} = \sqrt{2}\pi d \left[1 + \frac{3\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma d}} \right]^{0,5} \quad (84)$$

Burada λ , Spreyin boyun yaptığı yerdeki dalga boyu; d , Orifis çapı; D , Sprey damlacık çapı; σ , Yüzey gerilmesi; λ_{opt} , Optimum dalga boyu olarak tanımlanmıştır.

$$We_{crit} = \frac{\rho D^2 V^2}{\sigma D} = \frac{\rho V^2 D_{max}}{\sigma} \quad (85)$$

Parçalanmaya başlama noktası değerleri;

Hinze'ye göre;

$$We_{crit} = 1,18 \quad (86)$$

(Sevik and Park 1973)'a göre;

$$We_{crit} = 1,04 \quad (87)$$

değerleri ile ifade edilir.

Türbülans akış alanında damla bozulması için;

$$We_{crit} = \frac{\rho A \dot{u}^2 D_{max}}{\sigma} \quad (88)$$

Rayleigh Mekanizması için optimum dalga boyu (Strutt and Rayleigh 1878);

$$\lambda_{opt} = 4,51d \quad (89)$$

Dalga boyu 4,51d olduktan sonra küresel damla oluşur (Bachalo *et.al.* 2001).

$$4,51d \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2 = \left(\frac{\pi}{6}\right) D^3 \quad (90)$$

$$D = 1,89d \quad (91)$$

Damla Bozulması, aerodinamik sürüklenme olduğunda ve yüzey gerilme kuvvetleri eşitlendiğinde ortaya çıkar.

$$C_D \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) (0,5 \rho A U_R^2) = \pi D \rho \quad (92)$$

$$C_D = C_{D_{basınç}} + C_{D_{sürtünme}} \quad (93)$$

Düzenlenirse;

$$(\rho AU_R^2 D)_{krit} = \frac{8}{c_D} \quad (94)$$

ifadesi elde edilir.

Böylece kritik We sayısı;

$$We_{krit} = \frac{8}{c_D} \quad (95)$$

ile ifade edilir.

Maksimum kararlı damla çapı;

$$D = \frac{8\sigma}{c_D \rho AU_R^2} \quad (96)$$

Damla ayrılması için kritik bağıl hız:

$$U_{R_{krit}} = \left(\frac{8\sigma}{c_D \rho AD} \right)^{0,5} \quad (97)$$

(Lane 1951)'e göre;

$$U_{R_{krit}} = \left(\frac{\sigma}{D} \right)^{0,5} \quad (98)$$

Bu ifade su için düzenlenirse bu değer damlacık çapına (μm) bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$U_{R_{krit}} = \frac{784}{\sqrt{D}} \quad (99)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Sprey Soğutma

Sprey soğutma etkili bir ısı taşıma metodudur ve mühendislik uygulamalarının geniş bir alanında kullanılır. Deneysel verilerin birçoğu ve yorumlayıcı modeller olayın tüm evrelerinde yıllar boyunca toplandı ve geliştirildi. Bu evreler; damla oluşumu, çap-hız dağılımı, damla-hava etkileşimi, etki ve yayılma mekanizması, damla-yüzey ısı transferidir. Sıvı parçalanmasını yüzey gerilmesi, sıvı damlanın çıkış hızı (u_0) ve hava destekli nozullarda hava debisi etkilemektedir. Sprey damlaları, boyut (çap) dağılımı, hız dağılımı ve üç boyutlu dağılım ile karakterize edilir.

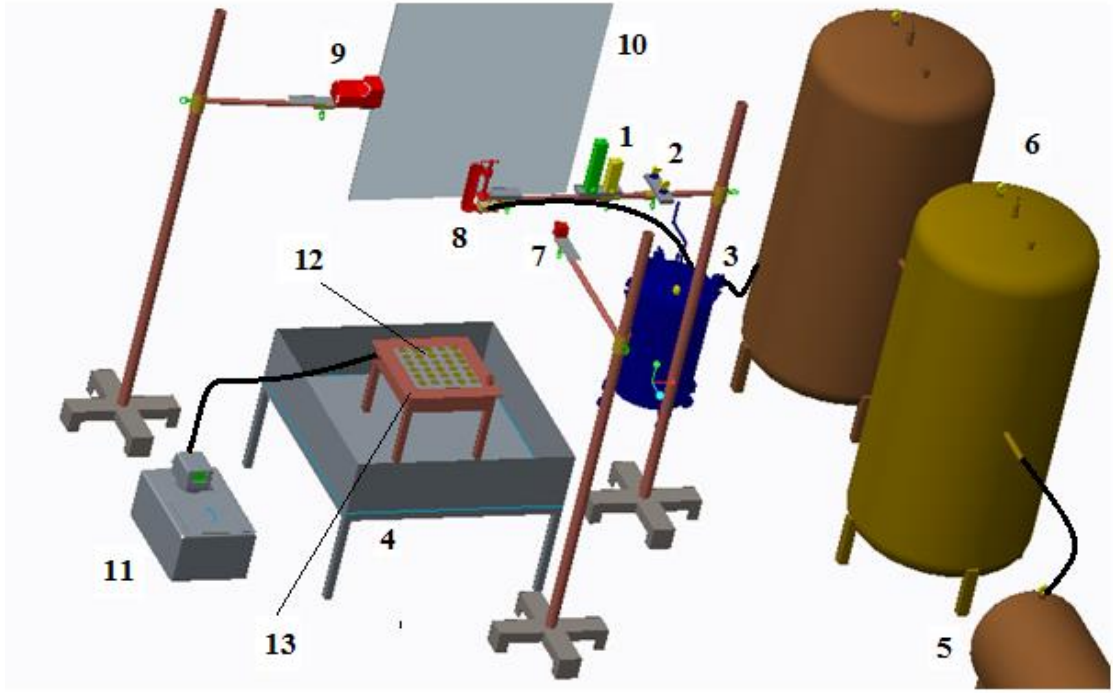
3.2. Sprey Deney Seti ve Ölçümler

Altıgen kanatçıklı ısı alıcılarda hava destekli sprej soğutmanın hava (jet) soğutmaya ve basınçlı sprej soğutmaya göre avantajları nozul çapı, damlacık hızı, çalışma sıvısı, soğuma süresi ve ısı akısı etkilerinin birlikte incelenmesiyle araştırıldı.

Kurulan sprej deney seti ile (Şekil 3.1) sprejin nozuldan çıkış hızı, damlacık çapı, SMD ve jet çapı gibi parametreleri görüntü işleme ve korelasyonlar ile belirlendi. Elde edilen görüntüler *Imagej* ve *Matlab* programları yardımıyla işlenerek sprej parametreleri incelendi.

İkinci etapta kanatçık boyunun, dağılımının hava destekli atomizasyonda sprej soğutmaya etkileri Taguchi $L18(2^1*3^7)$ yöntemi ile incelendi. Sonuçlar grafikler halinde verilerek ısı transferi katsayısının ısı akısı üzerine artırıcı etkisi gösterildi.

Şekil 3.1.'de sprej deney setinin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 3.1. Sprey deney seti

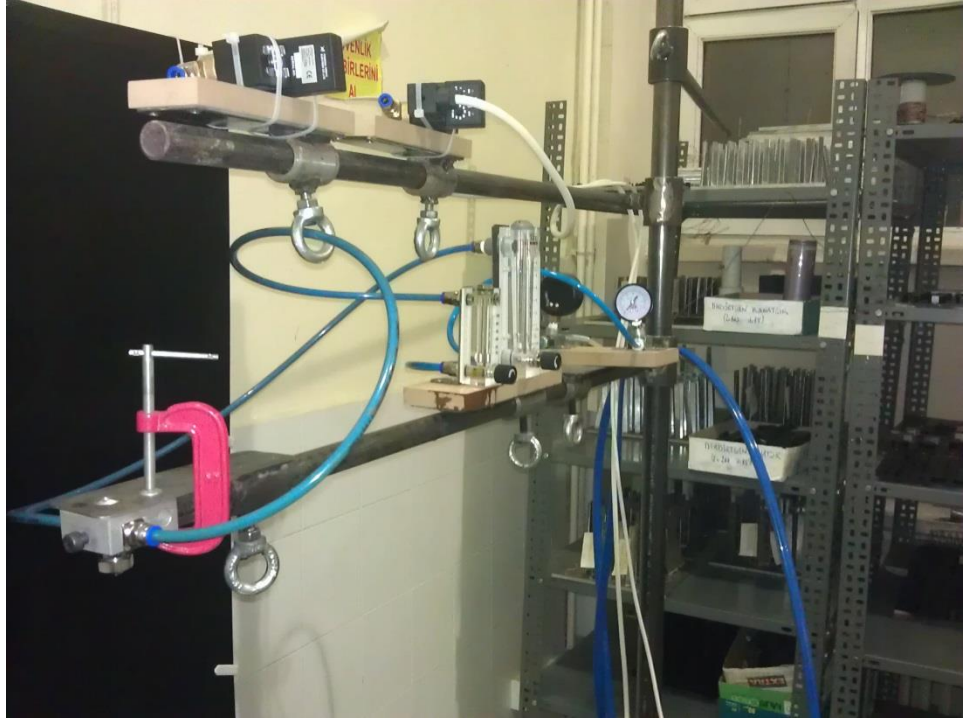
1: Akışölçer, 2: Manometre, 3: Basınçlı su tankı, 4: Rezervuar, 5: Kompresör, 6: Hava tankı, 7: CCD Kamera, 8: Nozul, 9: Stroboskop, 10. Arka plan, 11: Su/yağ banyosu, 12: Altıgen kanatçıklı ısı alıcı, 13: Reaktör



Şekil 3.2. Deney setinin fotoğrafı



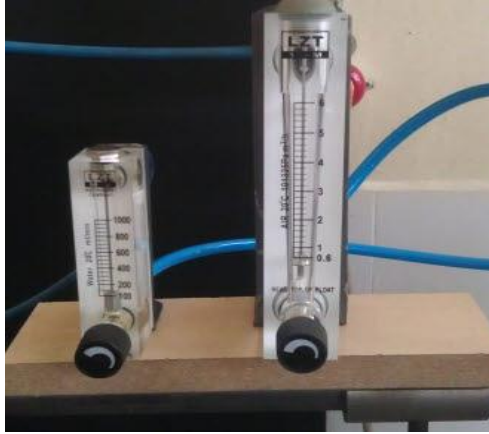
Şekil 3.3. Basınçlı su tankı



Şekil 3.4. DXD-HS1 hava destekli nozul ve bağlantıları



Şekil 3.5. IMPERX ICL B0620 CCD kamera ve Framelink



Şekil 3.6. LZT sıvı ve hava akış ölçerleri

3.3. Yöntem

Bu tezde spray karakteristiklerinin altıgen kanatçıklı ısı alıcılarda soğutma üzerine etkileri, spray soğutmanın avantajları ve parametrelerin etkileri Taguchi deney tasarımı ile belirlenmiştir. Parametrelerin incelenmesi için kullanılan yöntem şu aşamalardan oluşmaktadır;

1. Yapılan araştırmalar neticesinde Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Laboratuvarı'nda spray soğutma sistemi kurulumu tamamlandı.

2. Ölçümler için kullanılacak cihazlar (CCD kamera, stroboskop, manometre, akışölçerler) sisteme uygun şekilde monte edildi.
3. Sabit sıcaklıkta ısıtılacak olan yüzey için sirkülatörlü sabit sıcaklık yağ banyosu alındı ve reaktör tasarlandı.
4. Sıcaklık ölçümleri için laboratuvarımızda mevcut olan veri toplama ünitesi sisteme adapte edildi. Ayrıca ölçümler Termal kamera ile de alındı. Termal kamera sonuçları ile termoçift sonuçları arasındaki fark çok düşük çıktığı için daha detaylı incelemeye imkan verdiğinden dolayı termal kamera kullanılmasına karar verildi.
5. Alınan sprej görüntüleri optik görüntü işleme yöntemleri ile analiz edildi.
6. Alınan görüntüler *Imagej* ve *MATLAB* programlarında işlenerek makroskobik olarak sprej karakteristikleri belirlendi.
7. Taguchi L18 (2^1*3^7) deney planına göre *ANOVA-TM* programı ile parametreler ve seviyeleri belirlendi. Deney planı oluşturuldu. Deneyler bu plana göre yürütüldü.
8. Taguchi deneyleri sonunda bulunan optimum geometriye ait doğrulama deneyleri yapıldı. Sonuçlar hesaplanan tahmin ve güven aralığı aralıklarında bulundu.
9. Taguchi sonuçlarına göre bulunan en etkin parametreler için korelasyon deneyleri yapılarak *STATISTICA* programında Nusselt korelasyonu elde edildi.
10. Belirlenen ALR oranları için sprej açısı ve jet kalınlığı korelasyonları elde edildi.

3.4. Optik Sprej Görüntüleme Yöntemleri

3.4.1. Yüksek hızda fotoğraflama

Yüksek hızda fotoğraflama sprej damlacık boyutu ve hız ölçümü için en doğru ve ucuz tekniklerden biridir. Genellikle yeterli yoğunlukta ışık ve yeterli etki süresi ile fotoğraflama yapılır. Çoğu araştırmacı çalışmalarında yüksek yoğunluklu ışık kaynağı oluşturmak için civa buharlı lambalar, flaş lambalar, led lambalar ve lazer ışınlarını kullanmışlardır (Dombrowski and Fraser 1954; Mullinger and Chigier 1974).

3.4.2. Schlieren tekniği

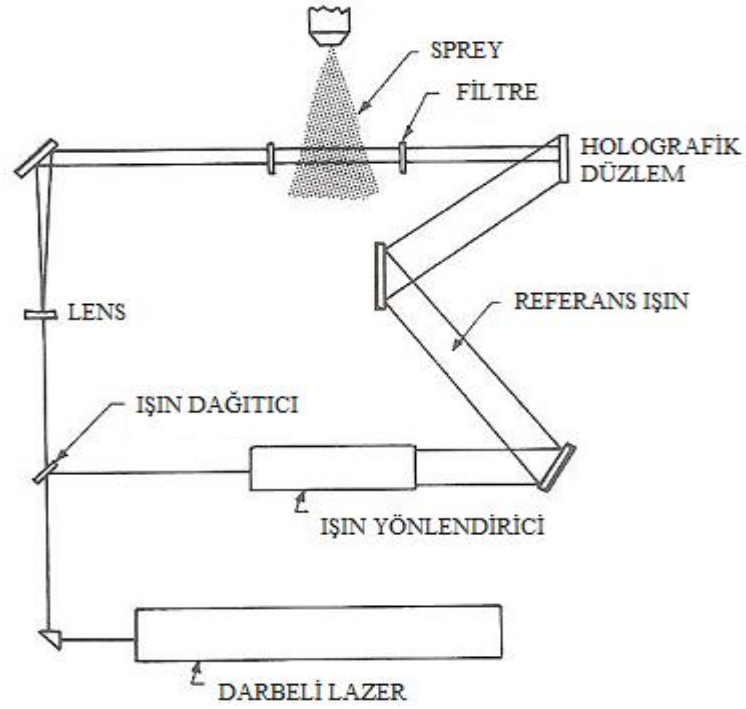
Bu yöntem ince bir yarıktan çıkan ışının mercekler ile paralel hale getirilmesinden sonra bir ekrana yansıtılması ile uygulanır (Settles 2001).

3.4.3. Shadowgraphy tekniği

Bu teknik akış görüntülemeye akışkan yoğunluğundaki değişiklikleri incelemek için kullanılan optik görüntüleme sistemidir. Sistem, ışık kaynağı kullanılarak yoğunluk değişiminin gölge görüntüsünü kaydeder. (Merzkirch 1987)

3.4.4. Holografi yöntemi

Holografi yöntemi sınırlı alan derinliği sağlayan diğer yöntemlere göre ölçülebilir bölgeyi genişletmesinden dolayı avantajlıdır. Bu yöntem, hareketli damlaların lazer uyumlu ışık demetleriyle aydınlatılarak fotoğraflanmasına dayanır. Bu yöntem daha küçük damlacık çaplarının (<15 µm) ölçülmesine olanak sağlar. Yöntemin sprej sisteminde uygulamaları (Chigier 1983), (Jones 1977) ve (Murakami and Ishikawa 1978) tarafından tanımlanmıştır. Şekil 3.7'de lazer holografik sistemin şematik diyagramı ayrıntılı şekilde verilmiştir.



Şekil 3.7. Lazer holografik sistemin şematik diyagramı

3.5. Elektriksel Sprey Görüntüleme Yöntemleri

Elektriksel yöntemler genellikle damlacık boyut dağılımını hesaplamak için sprej tarafından üretilen elektronik titreşimlerin belirlenmesi ve analizine dayanır. Elektriksel damlacık ölçüm yöntemleri şunlardır:

1. Wicks Duckler Yöntemi
2. Şarjlı Tel (Charged-Wire) Yöntemi
3. Sıcak Tel (Hot-Wire) Yöntemi

3.6. Diğer Sprey Görüntüleme Yöntemleri

3.6.1. Suya duyarlı kağıt (WSP) yöntemi

Bu yöntemde damlaları toplamak için suya duyarlı kartlar kullanılır. Kart zerine düşen spre y damlacıkları sarı renkteki kağıtta mavi izler bırakır. Daha sonra tarayıcıda 600 dpi'de taranan görüntülerden elde edilen boyutlar yayılma katsayılarına bölünerek elde edilen gerçek boyutlar herhangi bir görüntü işleme programı ile işlenir. Elde edilen çaplar ile spre y karakteristik damla çapları tanımlayıcı istatistik ile bulunur.

3.6.2. Magnezyum oksit yöntemi

Bu yöntemde altında yakılan 3 mm genişliğindeki bantların cam yüze ye yapışmasıyla oluşan MgO tabakasına püskürtülen damlacıkların 3 boyutlu izlerinin mikroskopta incelenmesi ve alınan görüntülerin işlenmesi ile boyut ölümü yapılmaktadır. Elde edilen çapın %86 sı damla çapını vermektedir.

3.6.3. Silikon yüzey yöntemi

Bu yöntemde silikon kaplı lamel cam yüzey üzerine damlalar püskürtülür. Elde edilen çapın %75'i damla çapını verir.

3.7. Deney Tasarım Teknikleri ve Taguchi Deney Tasarımı

Gerek retim gerek ARGE (Araştırma-Geliştirme) alışmalarının en önemli unsuru deneydir. Deneyler bağımlı ve bağımsız değişkenlerden oluşur. İnceleme altına aldığımız olgunun, önceden belirlediğimiz şartlar altında gösterdiği değişimleri incelemek için oluşturacağımız deney düzeneğimiz belli bir disipline sahip olmalıdır. Deney, tam veya kesirli eşleştirmeli gibi geleneksel düzenlerde olabileceği gibi Taguchi düzeneği ile de olabilir.

Yeni ürünlerin geliştirilmesinden pazara sunumuna kadar geçen süre gün geçtikçe kısalmaktadır. Kompleks hale gelen ürün dizaynlarının söz konusu olduğu durumda; tüm parametreleri dikkate alan ürün ve proses geliştirme süreçlerinin oluşturulması ve aynı zamanda uygun kalite düzeyi, kısa teslimat süresi ve düşük maliyet bileşenlerinin sağlanması gerekmektedir. Deney tasarımı metodu, İngiliz Ronald Aylner Fischer'in tarım sektöründe kullandığı çalışmalara dayanmaktadır. Endüstriyel anlamda problemlerin çözümünde deney tasarımı metodlarının kullanımı, E.P. Box ve K.B. Wilson'un çabaları sonucu gerçekleşmiştir.

Deneysel tasarım yöntemlerinin amacı, incelenen sistemdeki değişimlerin nedenini araştırmak ve değişimleri ortadan kaldırmaya veya değişimlere karşı sistemi güçlendirmeye yönelik çalışmalar yapmaktır. Değişkenliğin kontrol altında tutulmasıyla kalitenin yükseltilmesi ve maliyetin düşürülmesi sağlanabilir. Düşük maliyetle yüksek kaliteye ulaşma yolunda, yönlendirilmiş deney tekniklerinin yaygın olarak kullanılabilirliğinin ortaya çıkması, birçok araştırmacıyı bu alana yöneltmiş ve aşağıda sıralanan bazı yöntemler geliştirilmiştir (Celik 1996);

1. Her defasında bir faktörü değiştirerek deney yapma
2. Klasik istatistiksel deney tasarımı
 - a. Tam faktöriyel deney tasarımı
 - b. Kesirli faktöriyel deney tasarımı
3. Taguchi deney tasarımı

Her defasında bir faktörü değiştirerek deney yapma stratejisinde ürün ve süreci etkileyen faktörlerin performans değeri üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için her defasında bir faktör değiştirilip diğerleri sabit tutularak deneyler gerçekleştirilmektedir. Fazla sayıda deney gerektirmesi ve optimum çalışma şartlarını her zaman belirleyememesi, her defasında bir faktörü değiştirerek deney yapma yönteminin ne pratik, ne ekonomik, ne de etkin olmadığını göstergesidir.

Performans değerini etkileyen faktörlerin tüm kombinasyonlarının incelendiği tam faktöriyel tasarım stratejisinde tüm faktörler aynı anda değiştirilmektedir. Her defasında bir faktör değiştirerek deney yapma stratejisine göre her yönü ile daha avantajlı olan tam faktöriyel tasarımın tek ve en önemli dezavantajı faktör ve/veya seviye artıkça yapılması gereken deney sayının aşırı derecede artmasıdır.

Çok sayıda faktörü içeren gerçek hayat problemlerinin çözümünde tam faktöriyel tasarım stratejisi ile çok fazla sayıda deney yapmak gerekmektedir. Bu durum, çoğu kez, deneysel çalışmanın başlamadan bitmesine neden olur. Deneysel çalışmanın yapılabilirliğini sağlayabilmek için kesirli faktöriyel tasarım stratejisi kullanılabilir bir alternatiftir. Kesirli faktöriyel tasarım, tam faktöriyel tasarımdan dikkatlice seçilmiş deneyleri kullanarak bazı bileşik etki bilgilerinin kaybına karşın deney sayısında önemli miktarda azalma sağlamaktadır.

Klasik istatistiksel tasarımların nihai amacı, performans değeri ortalamasını hedeflenen değere getirmek olup, hedef civarındaki değişkenlikle ilgilenilmez. Oysa kitle üretiminde karşılaşılan en önemli problem performans değerindeki değişkenliktir.

Klasik istatistiksel tasarımda kontrol edilmeyen faktörler deneylerde incelenmediği için deneyler üzerinde bazı sınırlamalar getirmektedir. Deneysel malzemedeki heterojenliğin etkisini ortadan kaldırmak için rastgeleleştirme kullanılmaktadır. Böyle bir hareket tarzı ile kontrol edilmeyen faktörlerdeki beklenmeyen değişkenliklerin (ortamın sıcaklığı, nemi, basıncı, vb.) olumsuz etkileri azaltılabilir. Ancak, bütün kontrol edilmeyen faktörlerin performans değeri üzerindeki etkileri sabit olmadığı için kısmi başarı elde edilse de, tam sağlıklı sonuç elde edilememektedir. Klasik deney tasarım yöntemlerinin eleştirilen diğer bir yönü de istatistiksel kurallara son derece bağlı olmasıdır. Sözelimi, deneyler sonunda bir faktörün modele alınıp alınmayacağı F testi ile belirlenir. Ayrıca, deneylerde çok sayıda bileşik etkinin incelenmesi ve böylece performans değerinin elde edilmesinde faktörlerin toplanabilirliğinin bozulması nedeniyle laboratuvar ortamında belirlenen optimum değerler, gerçek üretim şartlarında elde edilemeyebilir (Celik 1996).

Taguchi metodu kullanılarak, hedef değere tam olarak ulaşmanın yanısıra, kontrol edilemeyen faktörlere karşı tasarımın duyarlılığı en aza indirgenerek, maliyet ve kalite faktörlerinde optimum bir tolerans aralığının belirlenmesi hedeflenir. Taguchi deney tasarımı metotları ile maliyet etkin tasarımlara ulaşılır.

Taguchi metodu, üründe ve proseste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım metodudur (Canıyılmaz ve Kutay 2003). Bu metot; ürünlerin kalitesinin iyileşmesinde etkili olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkânını vermektedir (Canıyılmaz ve Kutay 2003), (Ross 1989). Bunun yanında felsefe olarak, kalitenin tasarım ve proseste sağlanmasını öngörmektedir (Taguchi and Clausing 1990). Bu metotta faktör seviyelerinin tespit edilmesinde; gözlem yöntemi, sıralama yöntemi, sütun farkları yöntemi, varyans analizi yöntemi ve faktör etkilerinin grafiksel gösterimi yöntemlerinden birisi uygulanmaktadır (Ross 1989).

Taguchi'ye göre bir ürün veya sürecin performansı;

- Kullanılacağı çevre şartlarından,
- Üretimde kullanılan bileşenlerden

etkilenir. Ürün veya süreç faktörlerinin optimum değerleri, ürünün veya sürecin kullanılacağı çevresel şartların ve üretimde kullanılan bileşenlerin durumları dikkate alınarak belirlenmelidir. Ürün ve süreci etkileyen faktörler ise; kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen olmak üzere iki grupta toplanabilir. Taguchi deney stratejisinde, kontrol edilebilen faktörlerin optimum değerlerini belirlemek için ortogonal dizileri içeren yüksek kesirli deneyler kullanılır. Deneyler sonunda elde edilen verilerin analizi ile belirlenen optimum şartlarda doğrulama deneyleri (confirmation experiments) yapılarak, beklenen sonucun elde edilip edilemeyeceği kontrol edilir (Phadke 1989; Celik 1996), Taguchi'nin 18 farklı ortogonal dizi geliştirdiğini belirtmektedir. Taguchi,

ayrıca bu dizilere faktörler ile bileşik etkilerin yerleşimini sağlamada esas alınacak lineer grafikler (linear graphs) ve üçlü çizelgeleri (triangular tables) de geliştirmiştir. Birçok problemde standart ortogonal dizilerden biri doğrudan deney planı olarak kullanılabilir. Bazı durumlarda da lineer grafikler, üçlü çizelgeler ve benzeri araçlardan yararlanılarak standart ortogonal diziler üzerinde kısmi düzenlemelerle probleme uygun deney planı geliştirilebilmektedir. Başka bir ifade ile, çok faktörlü ve/veya seviyeli deneylerin planlanmasında basitlik ve mükemmel esneklik sağlanmaktadır (Sahin 2004).

Çok yüksek maliyet gerektirmeleri nedeniyle kontrol edilmeyen faktörlerin olumsuz etkilerini belirleyip ortadan kaldırmak yerine, bunların olumsuz etkilerini ortadan kaldıracak veya azaltacak kontrol edilebilen parametrelerin değerleri araştırılır. Kontrol edilebilen faktörler de performans değerine etkileri bakımından üç grupta sınıflandırılabilir:

- Kontrol faktörleri,
- Düzeltme faktörleri,
- Etkisiz faktörler

Deneysel sonuçta elde edilen performans değerleri ve performans istatistiği (signal to noise ratio) bilgileri analiz edilerek bu sınıflama yapıldıktan sonra; kontrol faktörleri yardımıyla değişkenlik azaltılır, düzeltme faktörleri yardımıyla da ortalama hedeflenen değere getirilir. Etkisiz faktörlerin de en uygun ve en ekonomik değerleri seçilir.

(Kackar 1985), incelenen probleme bağlı olarak kullanılacak çok (60'dan fazla) sayıda performans istatistiği geliştirildiğini belirtmektedir. "Daha büyük daha iyi" durumu için geliştirilen;

$$Z_B = -10 \text{Log} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (100)$$

ve “daha küçük daha iyi” durumu için geliştirilen

$$Z_K = -10 \text{Log} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (101)$$

performans istatistiği optimizasyon kriteri olarak seçilebilecek alternatiflerden ikisidir. Burada Z_B ve Z_K performans istatistiklerini, n bir deneysel kombinasyonda yapılan tekrar sayısını ve Y_i i . deneyin performans değerini göstermektedir.

Taguchi yönteminde optimum çalışma şartlarına karşı gelen deney çalışma süresince yapılmamış olabilir. Böyle durumlarda optimum şartlara karşı gelen performans değeri, aşağıdaki toplamsal modelden yararlanılarak tahmin edilebilir (Phadke 1989):

$$Y_i = \mu + X_i + e_i \quad (102)$$

Burada μ performans değerinin genel ortalaması, X_i i . deneydeki parametre-seviye kombinasyonunun sabit etkisi ve e_i i . deneydeki rassal hatayı göstermektedir. Deneysel veriler kullanılarak hesaplanan bir nokta tahmini olduğundan, bu değer anlamlı olup olmadığını belirlemek için güven aralığı hesaplanmalıdır. Seçilen hata seviyesindeki güven aralığı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir (Ross 1989):

$$Y_i \pm \sqrt{F_{\alpha;1,DF_{MSe}} * MSe * \left(\frac{1+m}{N} + \frac{1}{n_r} \right)} \quad (103)$$

Burada F çizelge değeri, α hata seviyesi, DF_{Mse} hata kareler ortalamasının serbestlik derecesi toplamı, m optimum çalışma şartlarının tahmininde kullanılan parametrelerin serbestlik dereceleri toplamı, N toplam deney sayısı ve n_r doğrulama deneyindeki tekrar sayısını göstermektedir. Eğer deneysel sonuçlar yüzdelik (%) ise hesaplanmadan önce aşağıdaki eşitlik yardımıyla yüzdelik değerlerin omega dönüşümü yapılır. Daha sonra ilgilenilen değerler aynı eşitlik yardımıyla ters dönüşüm yapılarak belirlenir (Taguchi 1987):

$$\Omega(dB) = -10 \text{Log} \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \quad (104)$$

Burada Ω (dB) yüzdelik değerin omega dönüşümü ile bulunan desibel değeri, p deneysel olarak elde edilen ürünün yüzdelik değerini göstermektedir.

Deneysel maliyetleri minimum düzeyde tutan Taguchi yönteminin klasik deney tasarım yöntemlerine göre üstünlüklerinden birisi performans değerinin ortalamasını hedeflenen düzeye getirirken, hedef civarındaki değişkenliği minimum yapmasıdır. Bir diğeri de laboratuvar ortamında elde edilen sonuçların gerçek üretim ortamında da elde edilebilmesidir.

3.8. Deneysel Belirsizlikler

Deneysel sonuçların hata analizi için Kline ve McClintock (1953) tarafından belirsizlik analizi adı verilen aşağıdaki yöntem bulunmuştur.

Yapılacak bir deney sonucunda x bağımsız değişkenlerinin ölçülmesiyle hesaplanacak olan R bağımlı değişkeni aşağıdaki şekildeki bir fonksiyonla verilmiş olsun.

$$R = R(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (105)$$

Burada x_1, x_2, \dots, x_n ; bağımsız değişkenleri R ise sonuç bağımlı değişkenini göstermektedir. w_1, w_2, \dots, w_n ise bağımsız değişkenlerdeki belirsizliği ve R büyüklüğünün hata oranını göstermek üzere aşağıdaki ilişki Kline and McClintock (1953) tarafından verilmiştir.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (106)$$

Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen yöntem kullanılarak, araştırılan boyutsuz parametrelere ait belirsizlikler; Nusselt sayısı için %8.84 Weber sayısı için %6.87, Reynolds sayısı için %10.49 ve ALR için %2.81 olarak elde edilmiştir. Ayrıca ölçülen ve boyutsuz parametrelerin belirsizliklerine etki eden fiziksel parametrelerin her birisine ait hata katkıları çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Ölçülen büyüklüklerdeki belirsizlikler

Değişkenler	Belirsizlik (W_R)
Alüminyumun kütlesi, m	0.09
Yüzey sıcaklığı, T_y ; Akışkan sıcaklığı, T_{sp}	0.09
Özgül ısı, C	0.1
Su debisi, Q_1	0.03
Hava debisi, Q_a	0.05
Nozul çapı, d_0	0.025
Yüzey gerilmesi, σ	0.001
Suyun termal iletkenliği, k, (tablodan)	0.01
Suyun yoğunluğu, ρ , (tablodan)	0.002

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Parametreler ve Taguchi Deney Planı

Hava destekli nozulda sprej soğutma için altıgen kanatlı ısı alıcılarda özellikle sprej süresi, sprej damlacık çaplarını ve homojenliğini etkileyen hava ve sıvı debileri, kanat yüksekliği, kanat genişliği, kanatların birbirlerine göre diziliş şekli ve nozul-yüzey mesafesinin akışı ve akışın yapısal özelliklerini etkileyen temel parametreler olduğu araştırılmıştır. Klasik deney tasarım metodlarından Taguchi deney tasarımı ile $L_{18}(2^1 \cdot 3^7)$ deney planı kullanılarak sadece 18 adet deney numunesi ile 36 adet deney yapılmıştır. Buna göre bu çalışmada ısı transferi karakteristiklerini etkileyebileceği düşünülerek seçilen kontrol edilebilir parametreler belirlenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen bu parametreler ve deneylerde incelenen seviye değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Parametreler ve seviyeleri

Parametreler		Seviyeler		
		1	2	3
A	H/d oranı	800/1.2	400/1.2	--
B	Kanat yüksekliği, h_k [mm]	10	15	20
C	Kanat Genişliği, s [mm]	14	26	36
D	x yönünde kanatlar arası mesafe, a [mm]	10	15	20
E	y yönünde kanatlar arası mesafe, b [mm]	10	15	20
F	Hava debisi, Q_a [m^3/h]	2,1	2,9	3,6
G	Sıvı debisi, Q_l [m^3/h]	0,012	0,021	0,03
H	Zaman, T [s]	5	10	15

Taguchi deney tasarımı için ANOVA-TM programı ile $L_{18}(2^1 \cdot 3^7)$ deney planı Çizelge 4.2'de çıkarılmıştır:

Çizelge 4.2. L18 ($2^1 \cdot 3^7$) deney planı

	A1#1	A1#2	A1#3	A1#4	A1#5	A1#6	A1#7	A1#8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	
19									

Çizelge 4.3. ANOVA ile Taguchi analizi başlangıç ekranı

Experimental Layout

Header

Experiment

More

Data

More

Group 1

Orthogonal Array L18

Group 2

Group 3

Group 4

Data Classification

Variable Number of repetitions

Attribute

Frequency

Accumulation

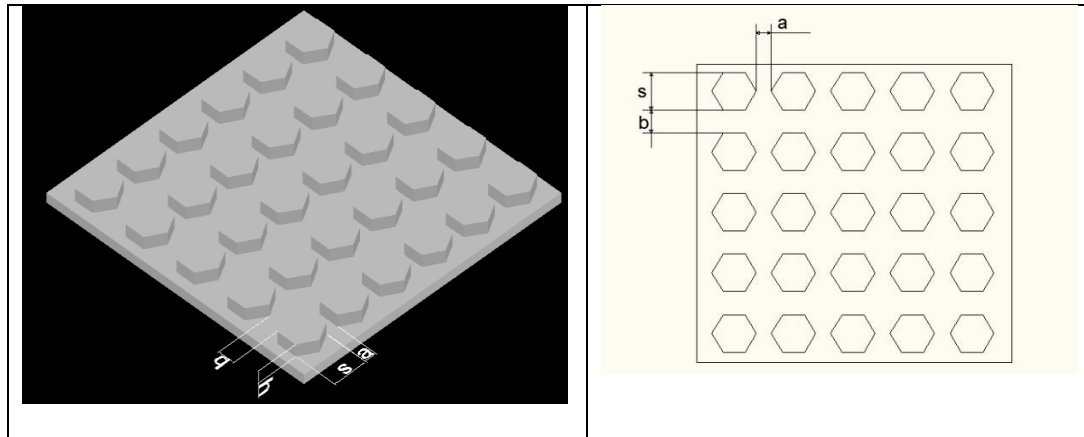
Signal to Noise Ratio

Larger the Better

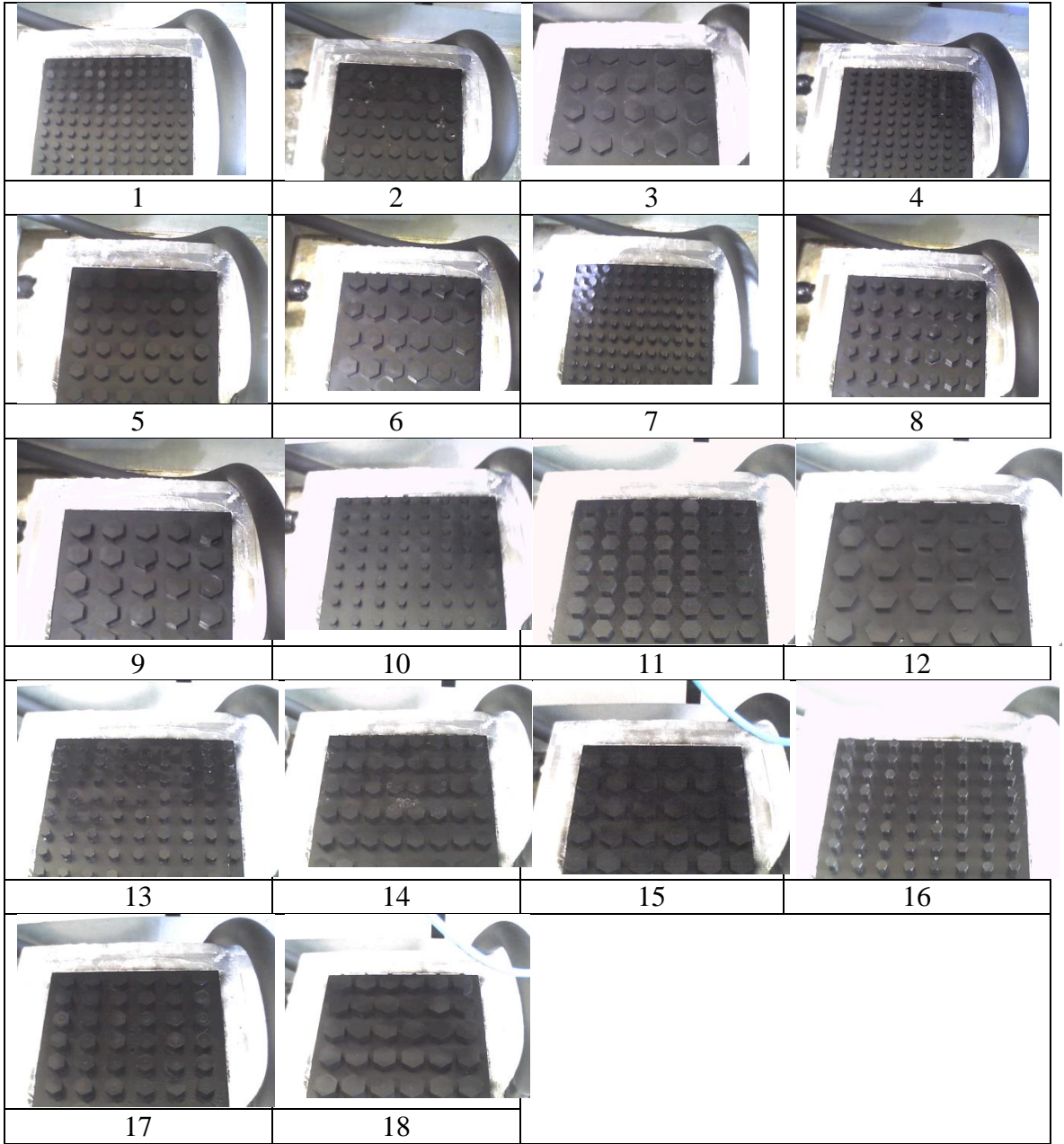
$$\eta = -10 \cdot \log \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

Çizelge 4.4. Taguchi L18($2^1 \times 3^7$) deney planına göre parametrelerin değerleri

H/d	h_k (mm)	s (mm)	a (x yönü)	b (y yönü)	Q_a (m^3/h)	Q (m^3/h)	T (s)
800/1.2	10	14	10	10	2,1	0,012	5
800/1.2	10	26	15	15	2,9	0,021	10
800/1.2	10	36	20	20	3,6	0,03	15
800/1.2	15	14	10	15	2,9	0,03	15
800/1.2	15	26	15	20	3,6	0,012	5
800/1.2	15	36	20	10	2,1	0,021	10
800/1.2	20	14	15	10	3,6	0,021	15
800/1.2	20	26	20	15	2,1	0,03	15
800/1.2	20	36	10	20	2,9	0,012	10
400/1.2	10	14	20	20	2,9	0,021	5
400/1.2	10	26	10	10	3,6	0,03	10
400/1.2	10	36	15	15	2,1	0,012	15
400/1.2	15	14	15	20	2,1	0,03	10
400/1.2	15	26	20	10	2,9	0,012	15
400/1.2	15	36	10	15	3,6	0,021	5
400/1.2	20	14	20	15	3,6	0,012	10
400/1.2	20	26	10	20	2,1	0,021	15
400/1.2	20	36	15	10	2,9	0,03	5



Şekil 4.1. Test elemanında incelenecek parametreler



Şekil 4.2. Taguchi L18 ($3^1 \times 2^7$) deney planına göre hazırlanan ısı alıcı geometrileri

Çizelge 4.5. Parametreler ve seviyeleri (ANOVA)

	Combo	Label	Idle	Shared	Factor Name	Level 1	Level 2	Level 3
1		A	<input type="checkbox"/>		h/D	666.66	333.33	
2	<input type="checkbox"/>	B			hk	10	15	20
3	<input type="checkbox"/>	C			s	14	26	36
4	<input type="checkbox"/>	D			a	10	15	20
5	<input type="checkbox"/>	E			b	10	15	20
6	<input type="checkbox"/>	F			Qa	2.1	2.9	3.6
7	<input type="checkbox"/>	G			Ql	0.012	0.021	0.03
8	<input type="checkbox"/>	H			T	5	10	15

4.2. Isı Transferi Analizi

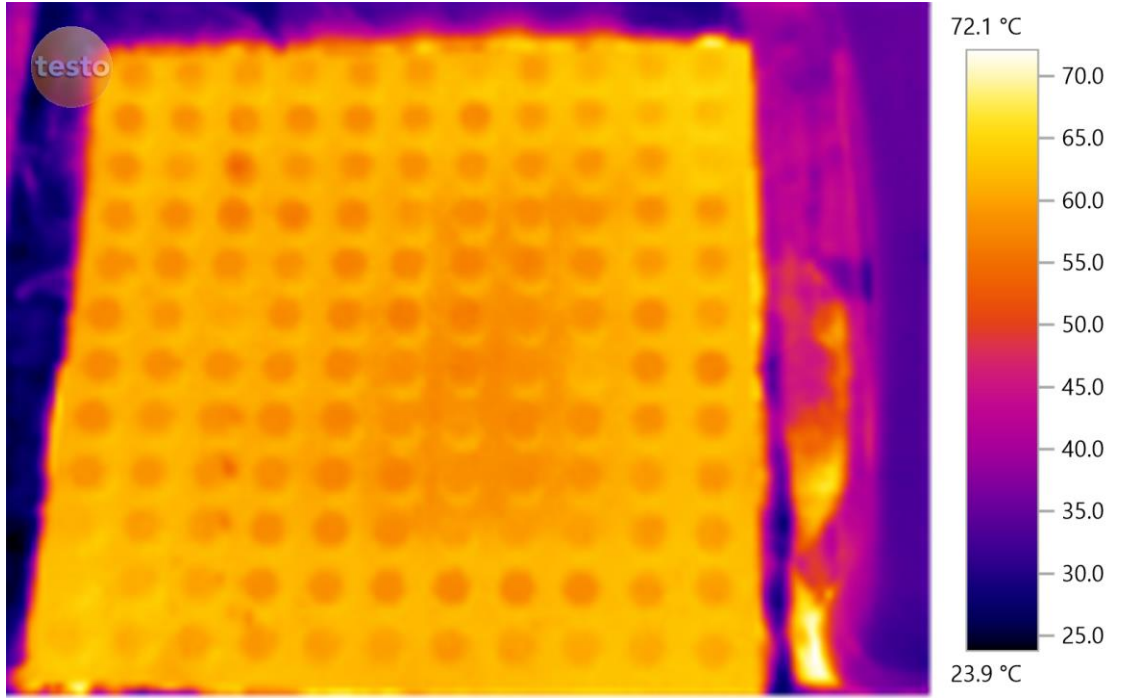
Taguchi deney planına göre yapılan deneyler ve alınan termal görüntülerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Taguchi deney planına göre elde edilen ısı sonuçları

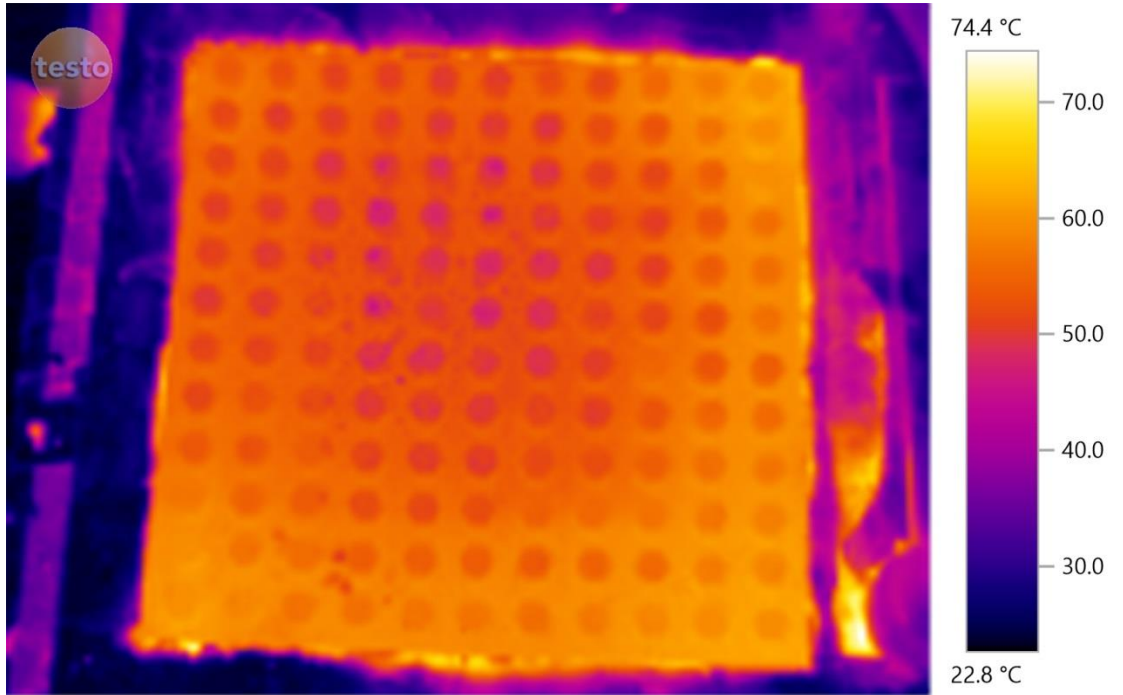
Deney no	Ty ₁ (°C)	Ty ₂ (°C)	T _{su} (°C)	ΔT (°C)	m _{su} (kg/s)	m _{Al} (kg)	Q (J)	Zaman (s)	Toplam alan (m ²)
1	61	54.2	22	6.8	0.00333	2.452	14589.4	5	0.153
2	65.3	53.8	22	11.5	0.00583	2.553	25689.6	10	0.128
3	65.4	50.7	22	14.7	0.00833	2.649	34072.8	15	0.120
4	56.2	44.5	22	11.7	0.00833	2.6	26617.5	15	0.168
5	63.7	57.7	22	6	0.00333	2.722	14290.5	5	0.139
6	55.8	48.3	22	7.5	0.00583	3.257	21374.1	10	0.144
7	58.8	46.8	22	12	0.00583	2.835	29767.5	15	0.196
8	61.7	51.5	22	10.2	0.00833	3.159	28194.1	15	0.166
9	62.5	55.2	22	7.3	0.00333	3.385	21621.7	10	0.150
10	57	50.8	18	6.2	0.00583	2.222	12054.4	5	0.125
11	59.1	46.6	18.5	12.5	0.00833	2.761	30198.4	10	0.140
12	57.5	48.4	17	9.1	0.00333	2.8	22295.0	15	0.126
13	56.9	44.9	17	12	0.00833	2.456	25788.0	10	0.148
14	60.3	49.8	18.5	10.5	0.00333	3.001	27571.7	15	0.155
15	62.3	56	19.5	6.3	0.00583	3.257	17954.2	5	0.144
16	60.7	50.4	19	10.3	0.00333	2.603	23459.5	10	0.167
17	60.5	50.4	18.5	10.1	0.00583	3.163	27953.0	15	0.166
18	63.4	55.6	19	7.8	0.00833	3.677	25095.5	5	0.162
DD1	62	54.8	21	7.2	0.00833	2.8	17640	5	0.126
DD2	59.3	52.8	21	6.5	0.00833	2.8	15625	5	0.126

4.2.1. Termal görüntüler

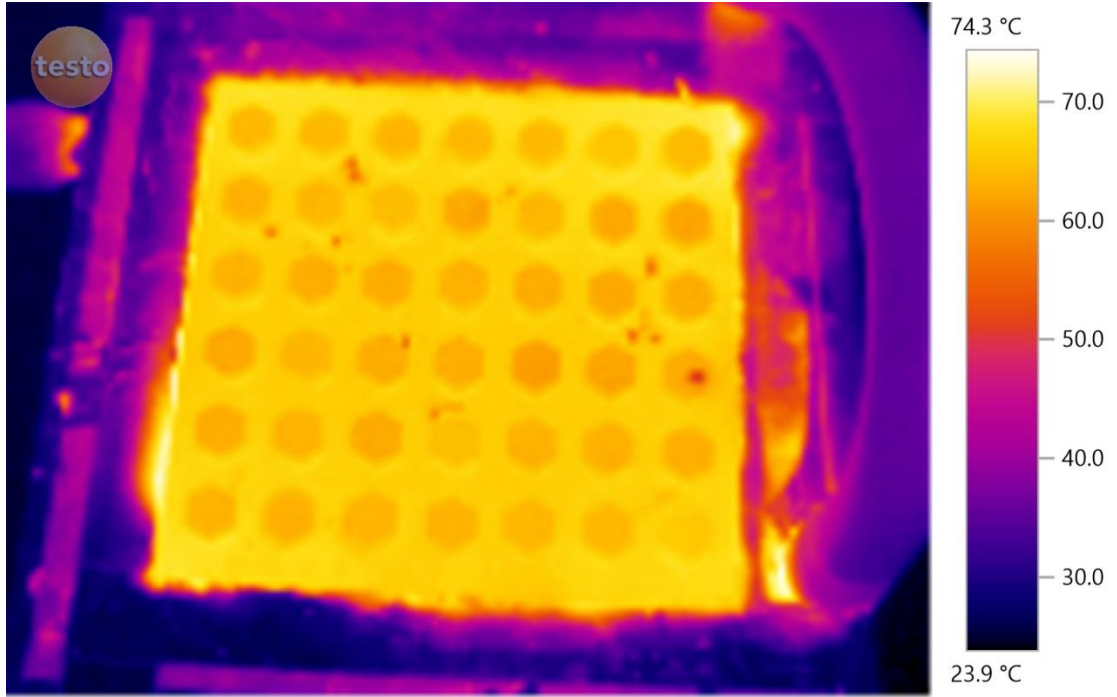
Termal görüntüler için 18 farklı ısı alıcı yüzeyi mat siyah renge boyanarak emisivite değeri $\epsilon = 0.98$ olarak alınmıştır. Testo 875-2 model termal kamera ile spreylendirilmeden önce ve spreylenden hemen sonra görüntüler alınarak analiz edilmiştir. Termal görüntüler Taguchi $L_{18}(2^1 \cdot 3^7)$ deney planına göre belirlenen 18 farklı ısı alıcı geometrisi için aşağıda verilmiştir.



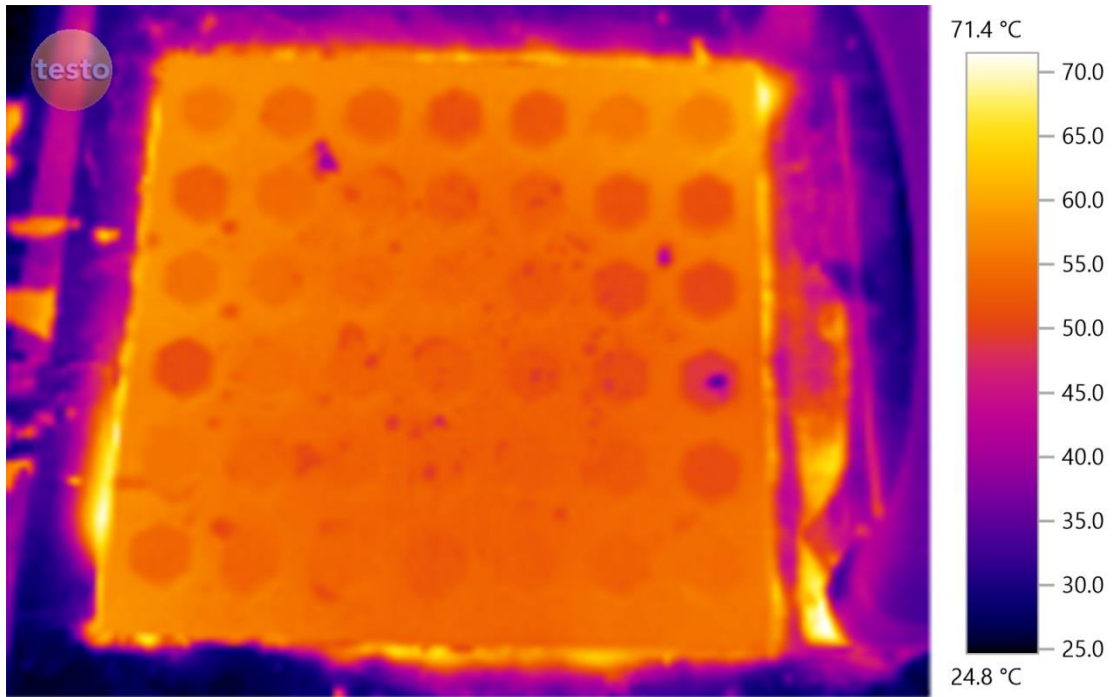
Şekil 4.3. Isı alıcı-1 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



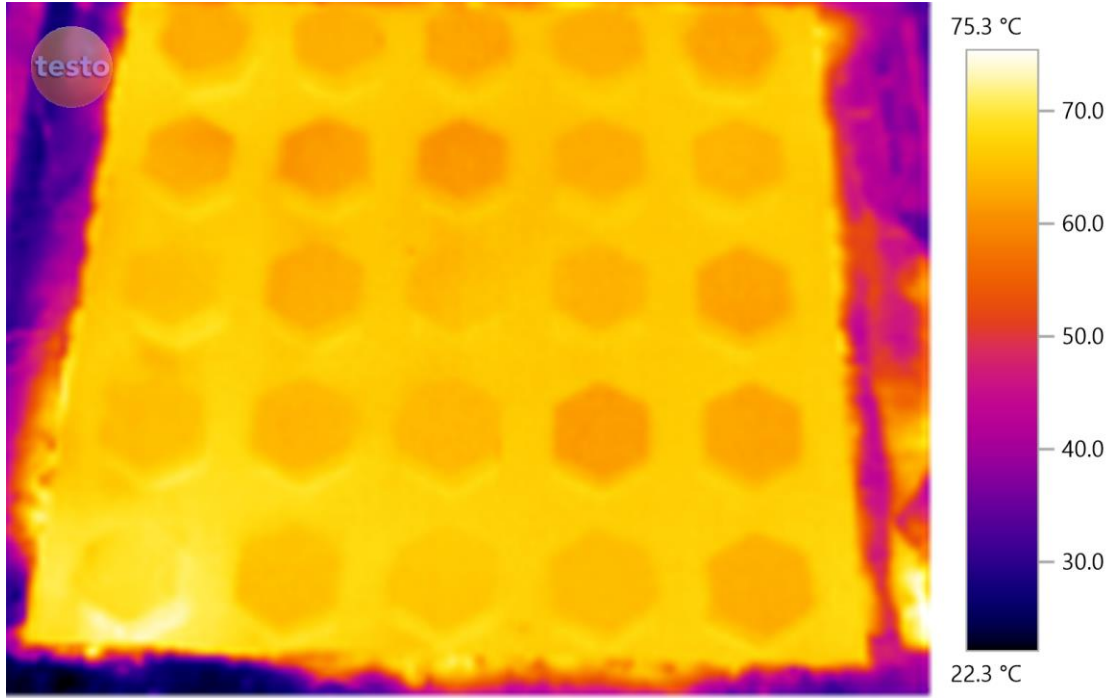
Şekil 4.4. Isı alıcı-1 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



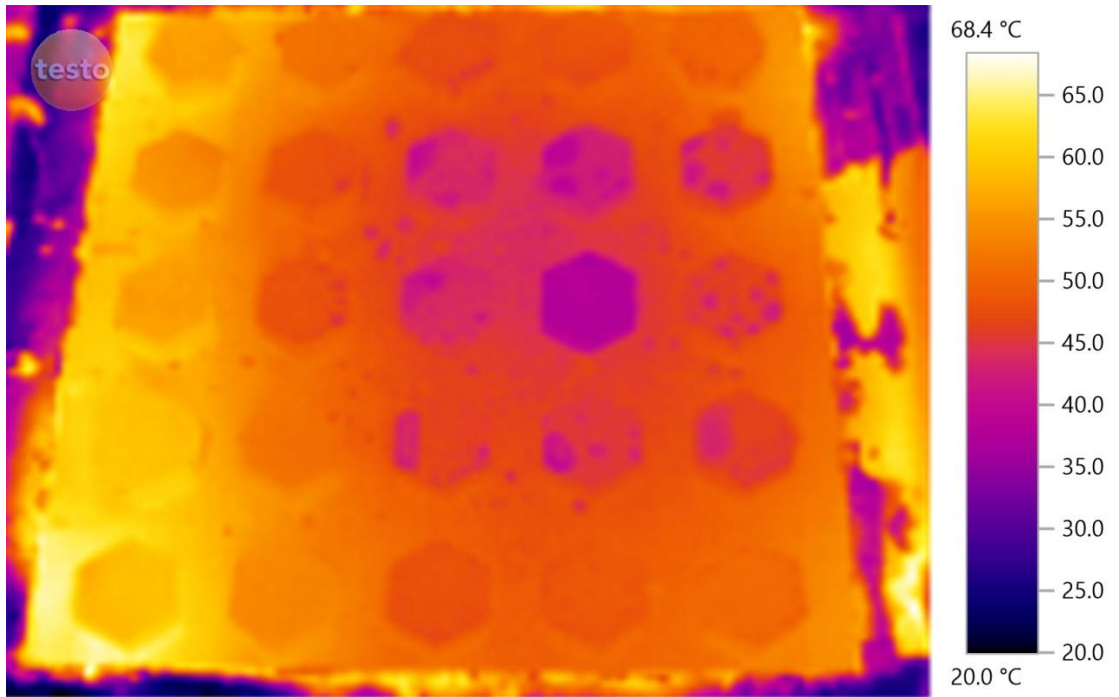
Şekil 4.5. Isı alıcı-2 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



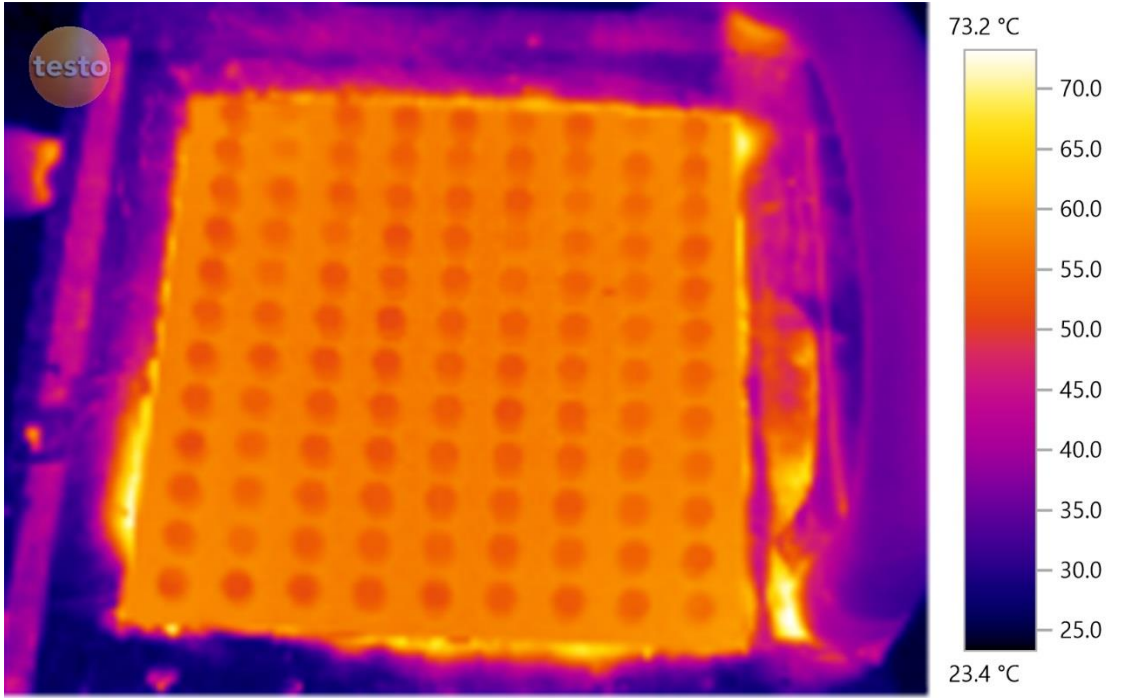
Şekil 4.6. Isı alıcı-2 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



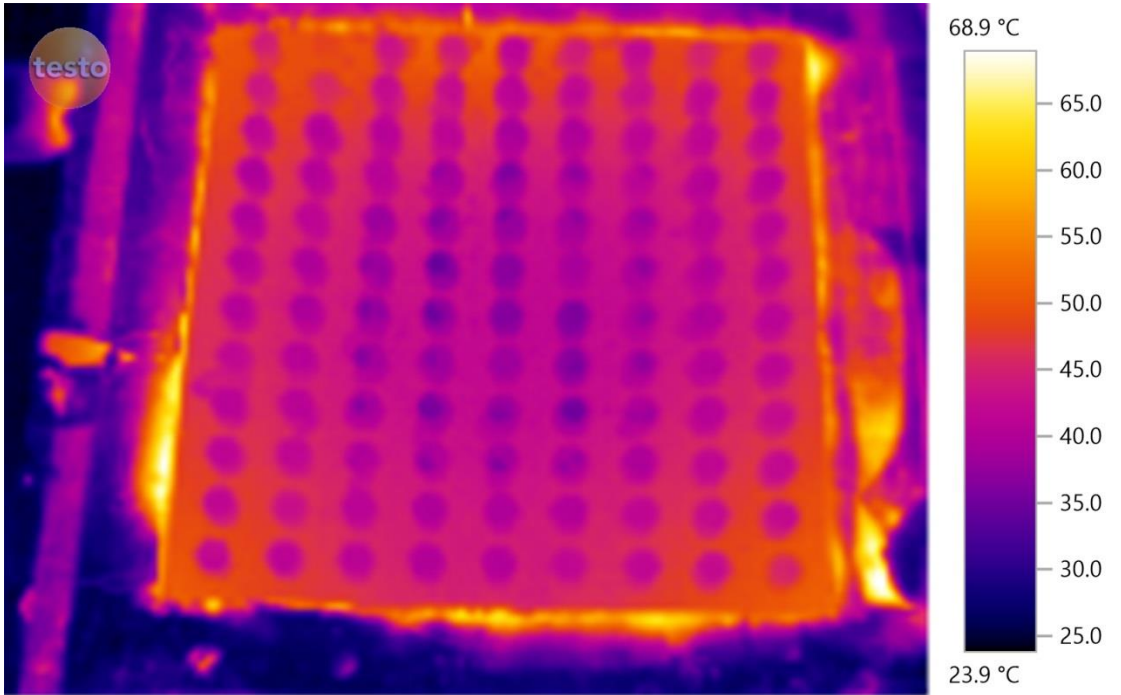
Şekil 4.7. Isı alıcı-3 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



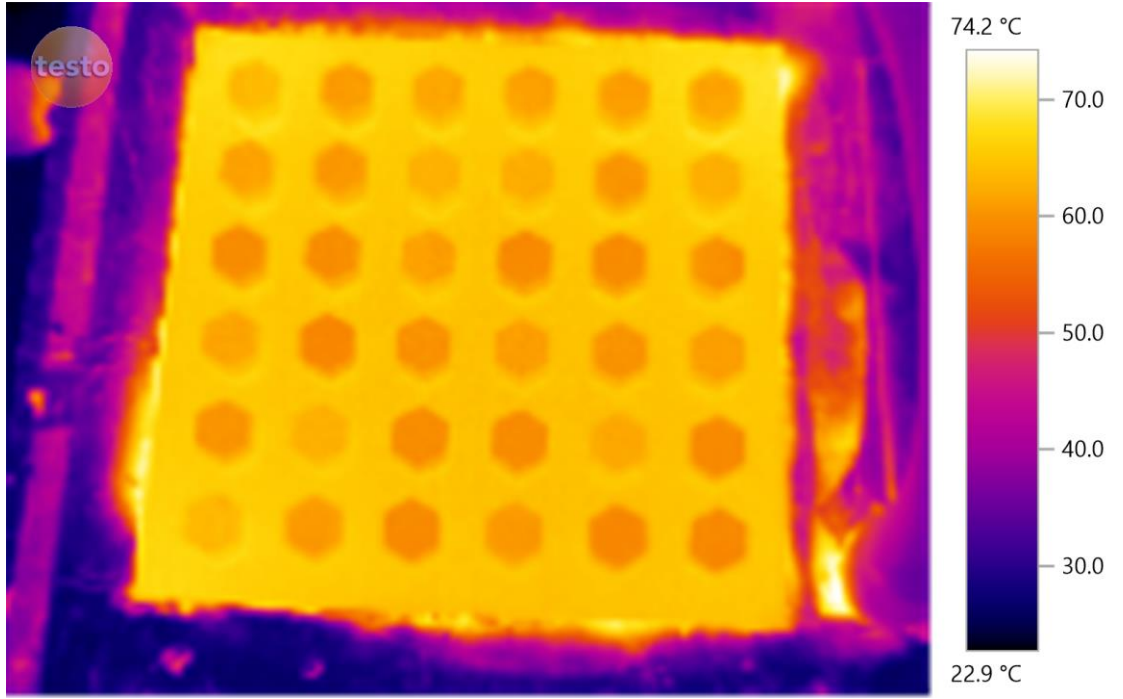
Şekil 4.8. Isı alıcı-3 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



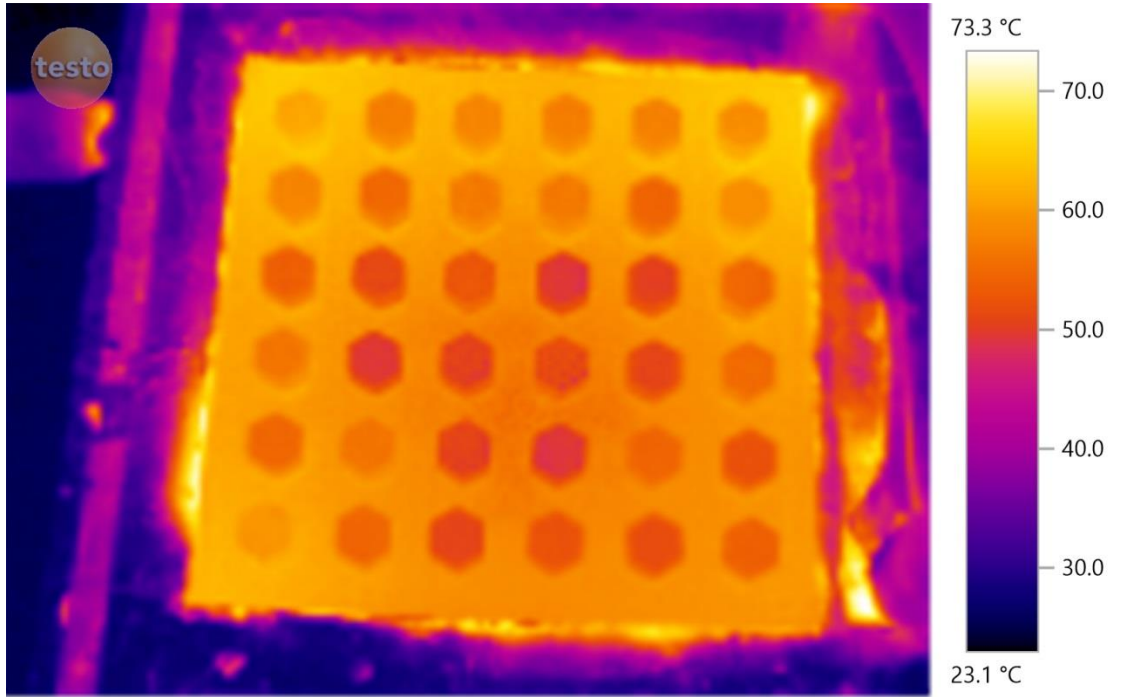
Şekil 4.9. Isı alıcı-4 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



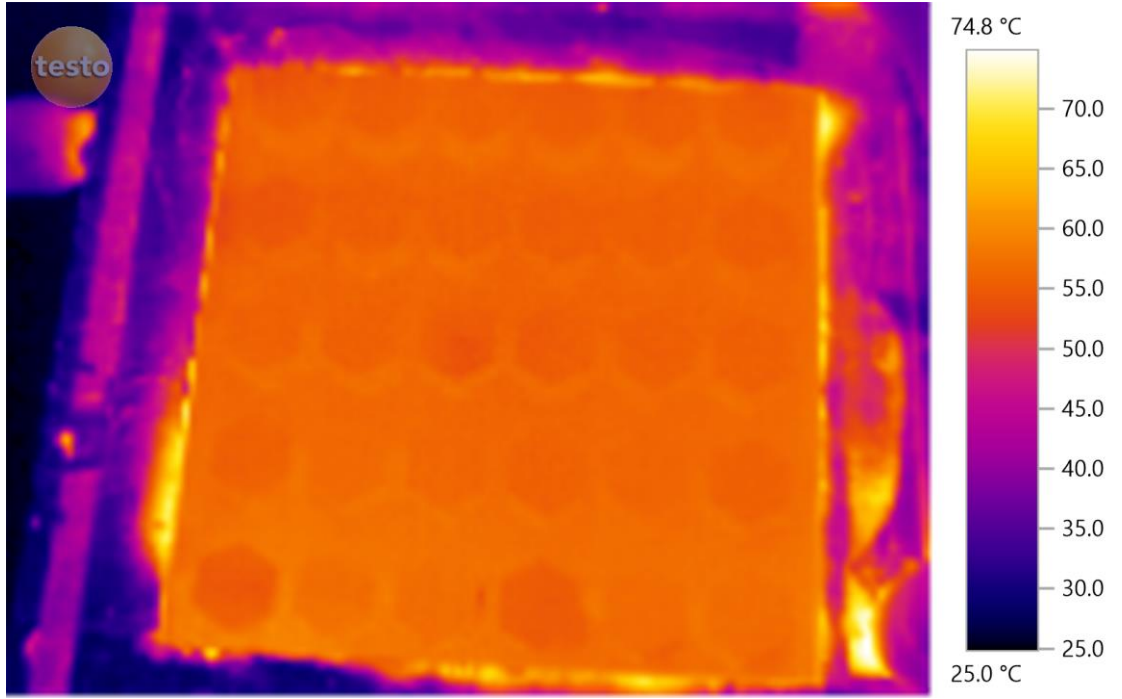
Şekil 4.10. Isı alıcı-4 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



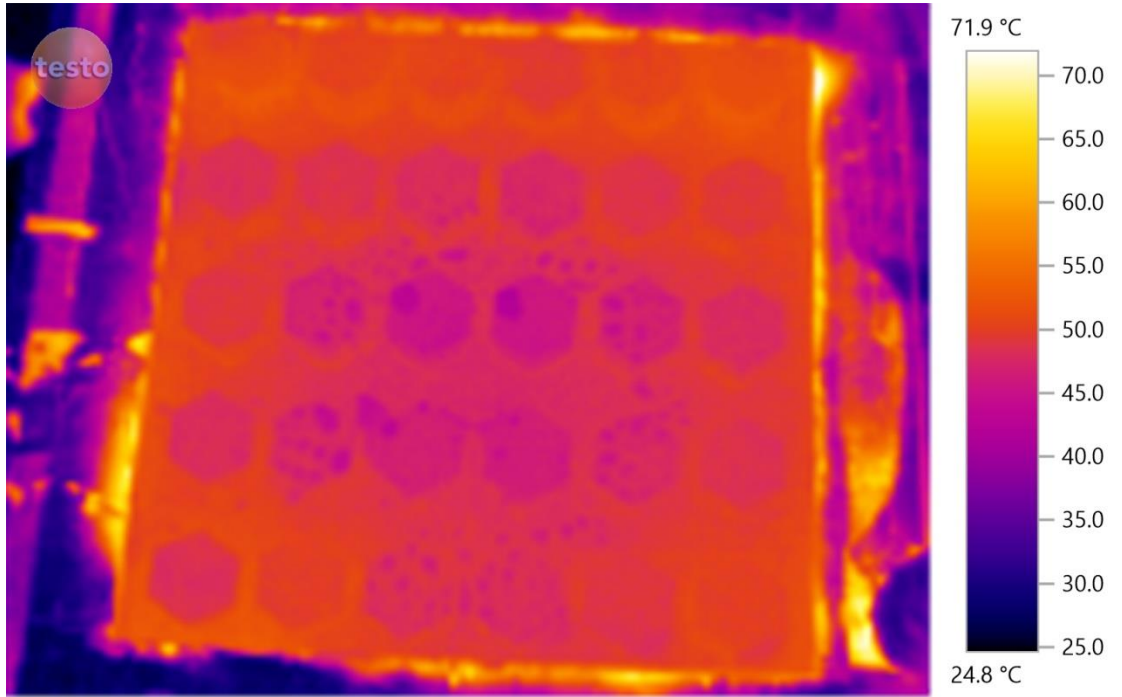
Şekil 4.11. Isı alıcı-5 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



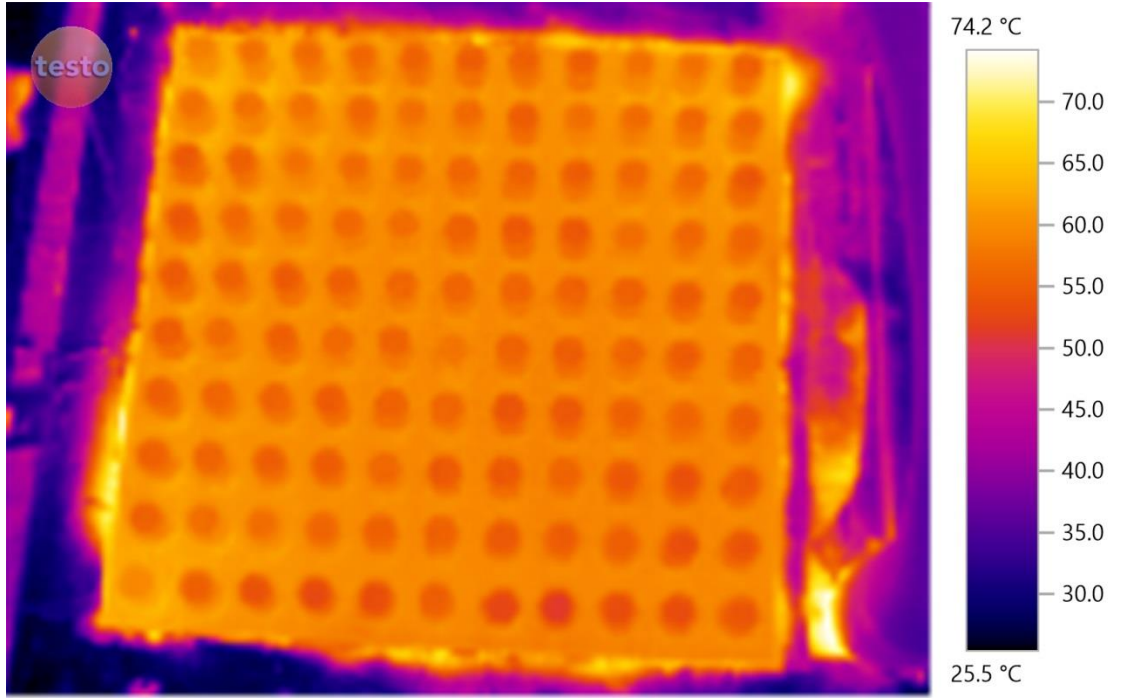
Şekil 4.12. Isı alıcı-5 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



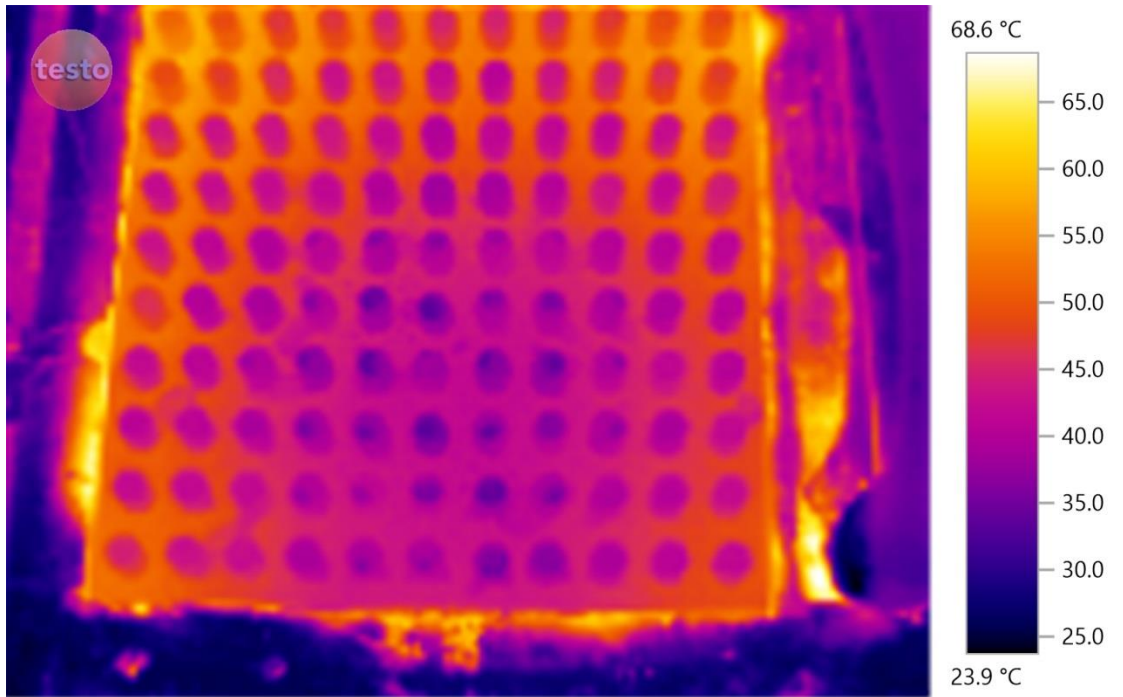
Şekil 4.13. Isı alıcı-6 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



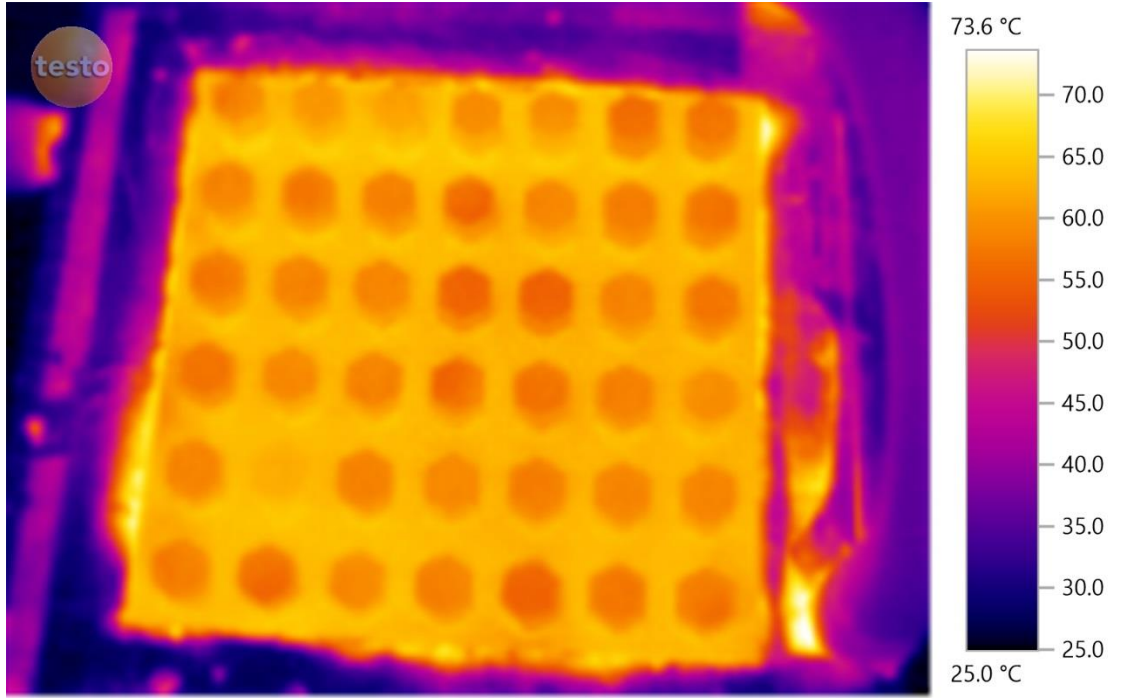
Şekil 4.14. Isı alıcı-6 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



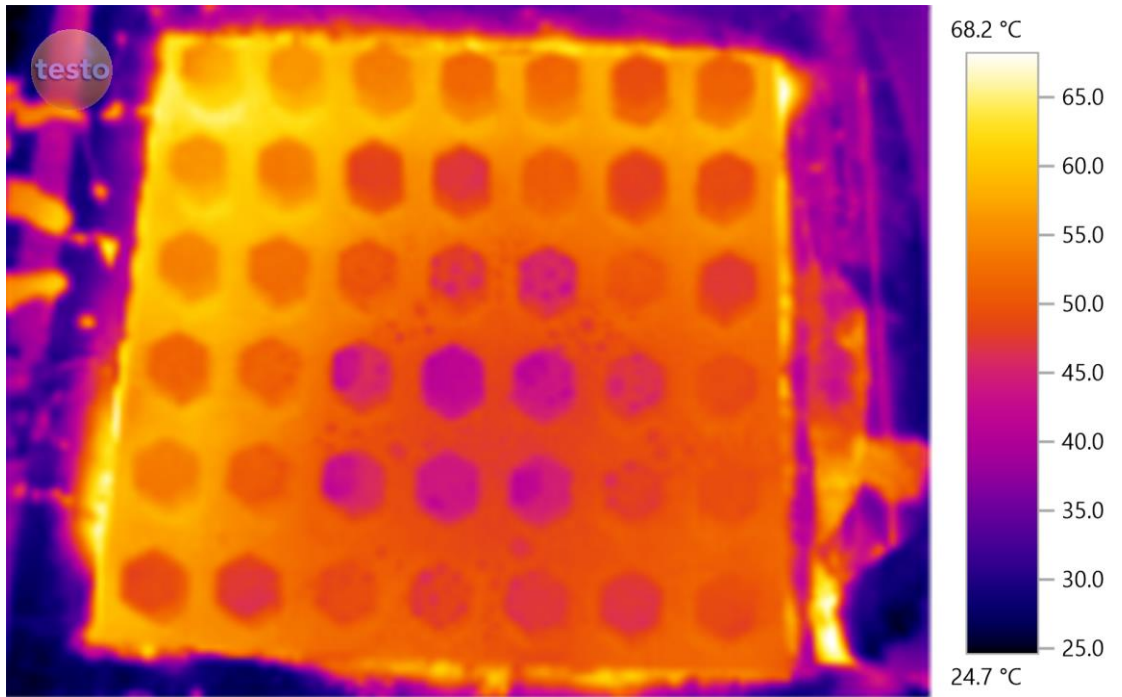
Şekil 4.15. Isı alıcı-7 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



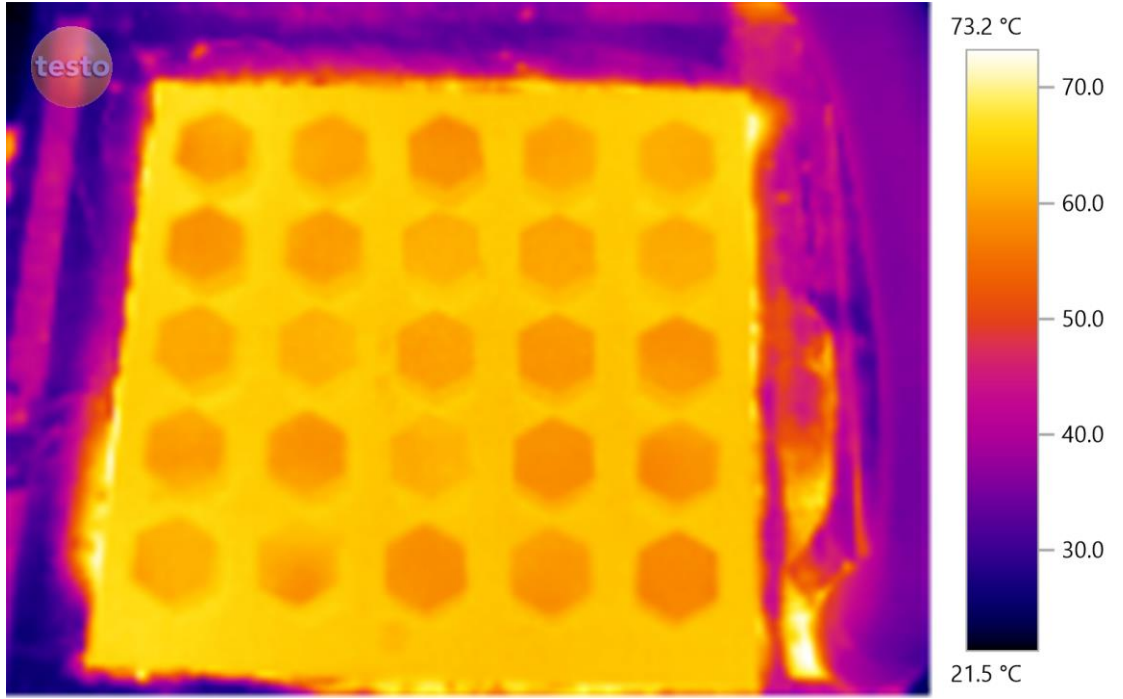
Şekil 4.16. Isı alıcı-7 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



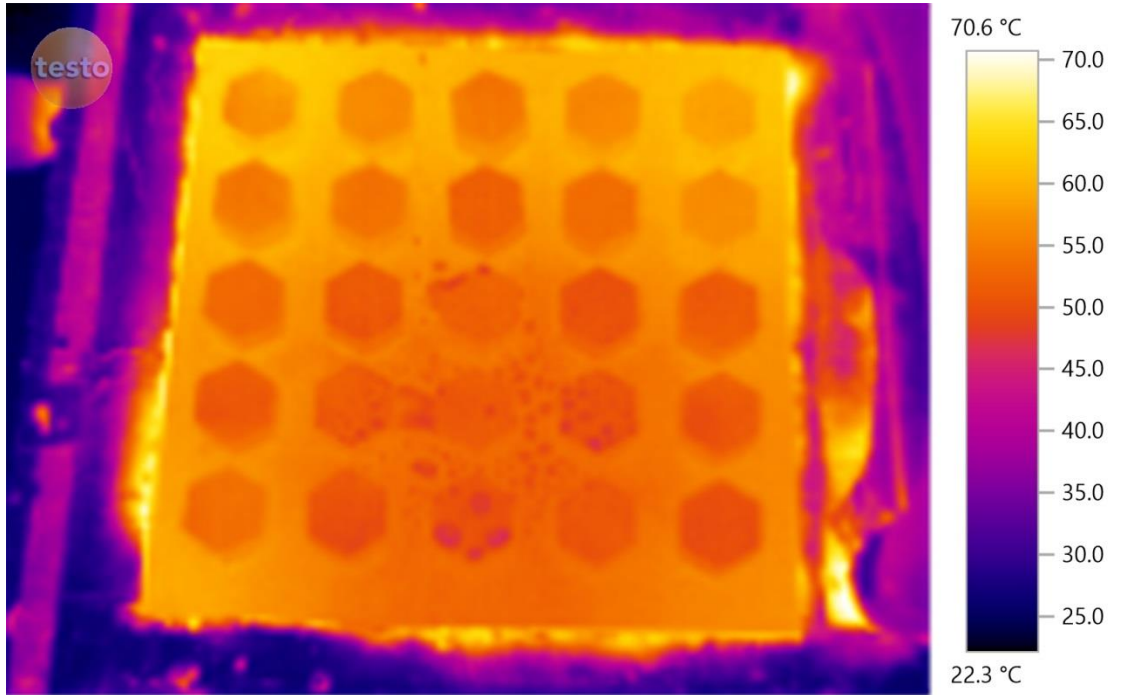
Şekil 4.17. Isı alıcı-8 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



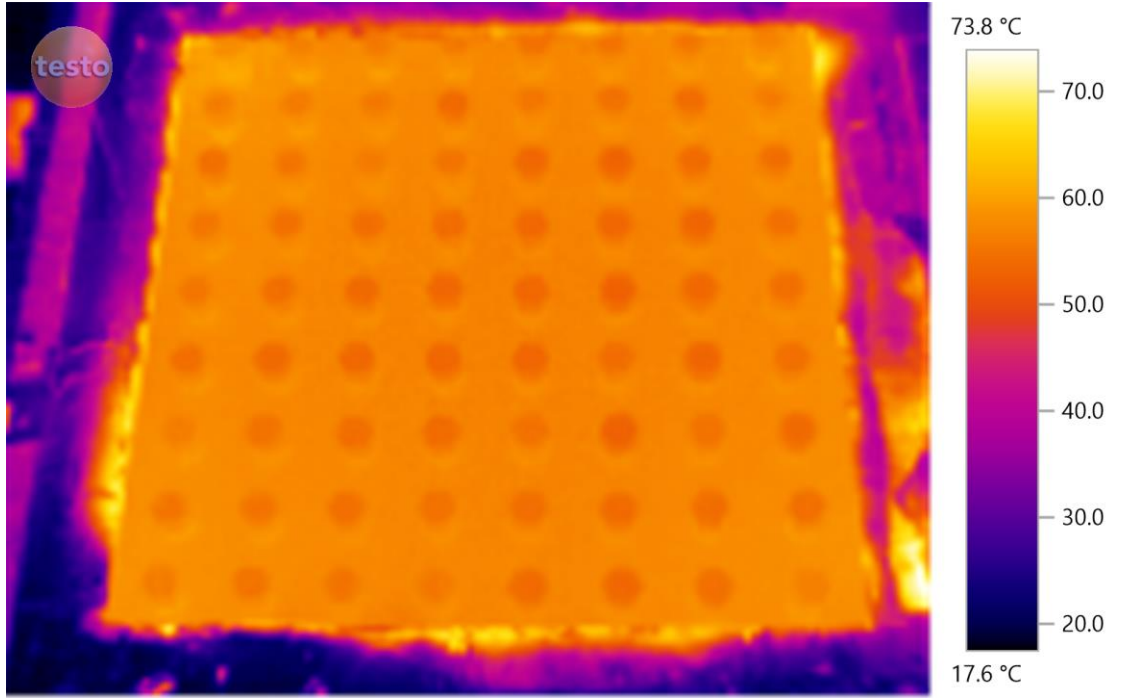
Şekil 4.18. Isı alıcı-8 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



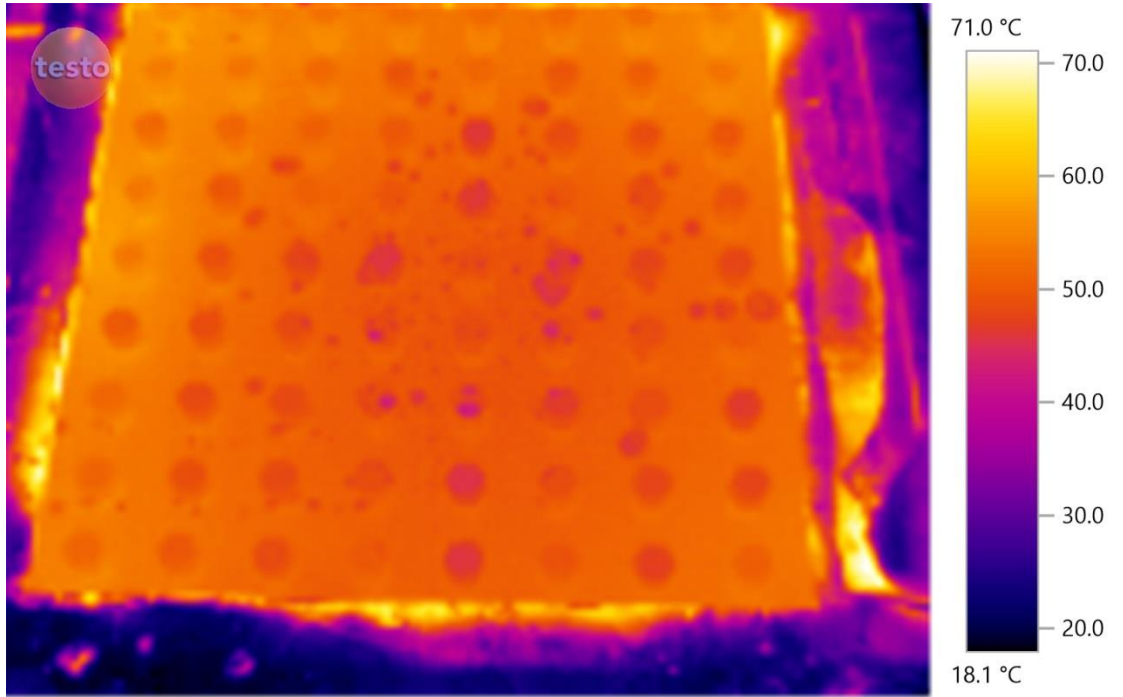
Şekil 4.19. Isı alıcı-9 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



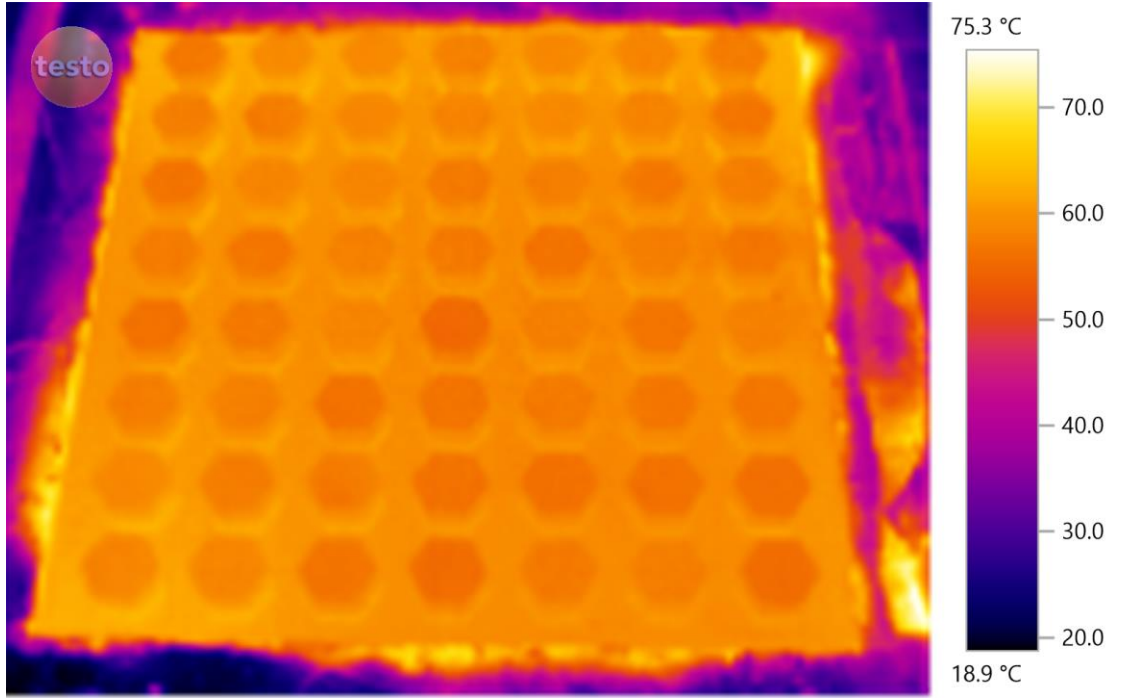
Şekil 4.20. Isı alıcı-9 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntü



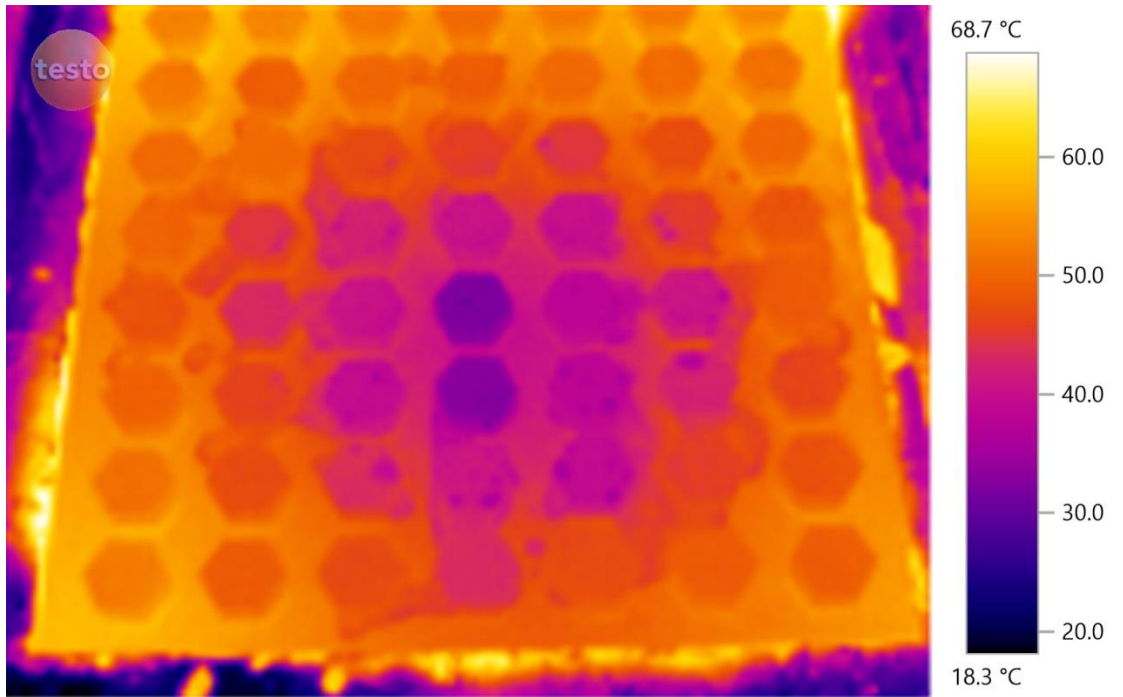
Şekil 4.21. Isı alıcı-10 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



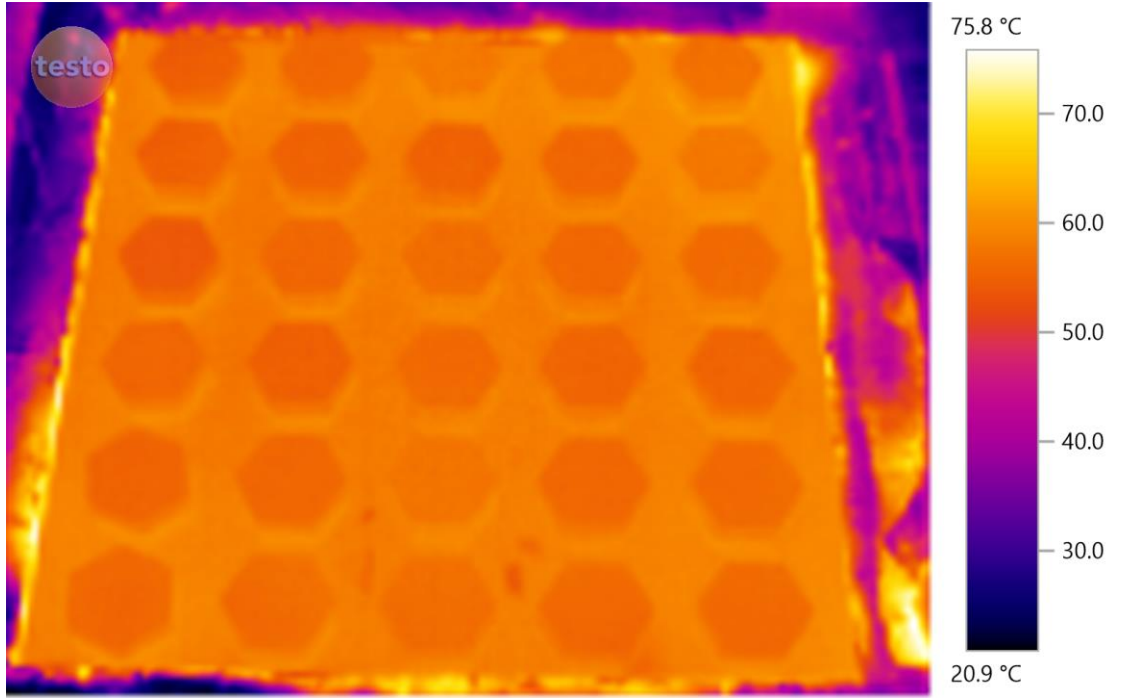
Şekil 4.22. Isı alıcı-10 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



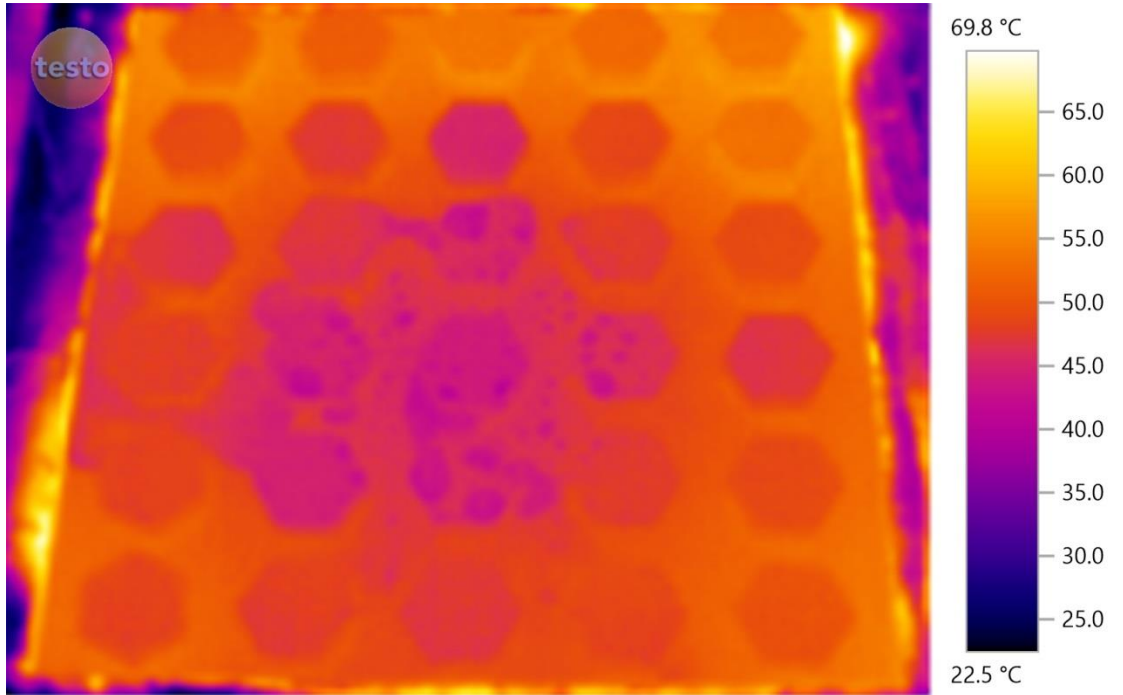
Şekil 4.23. Isı alıcı-11 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



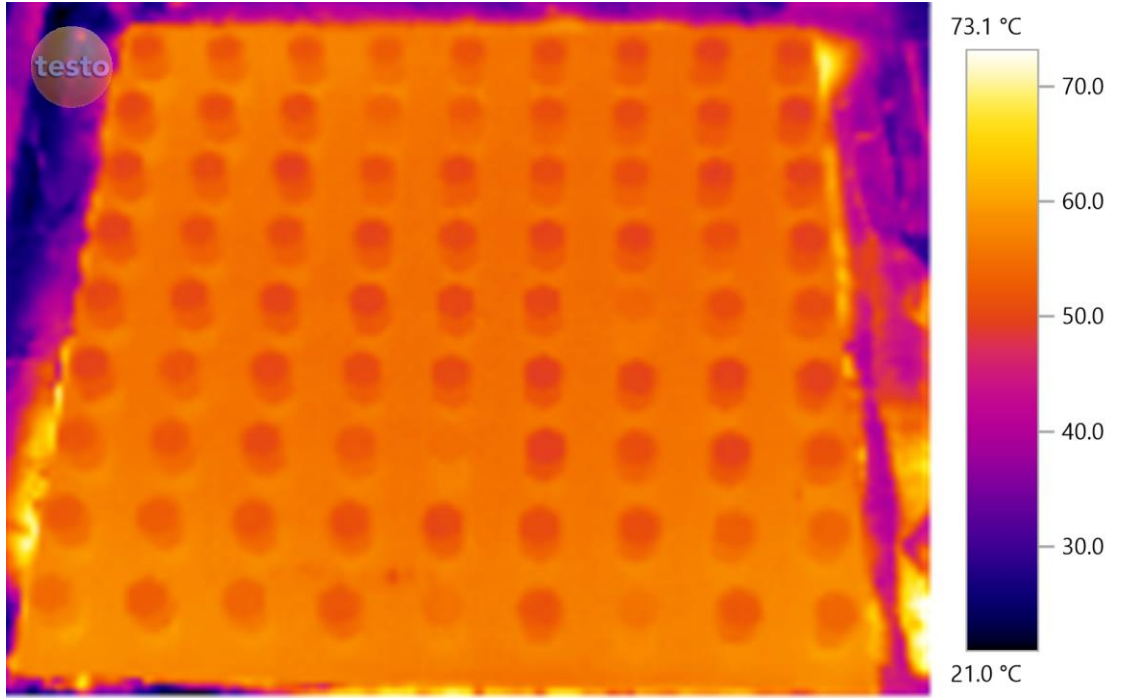
Şekil 4.24. Isı alıcı-11 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



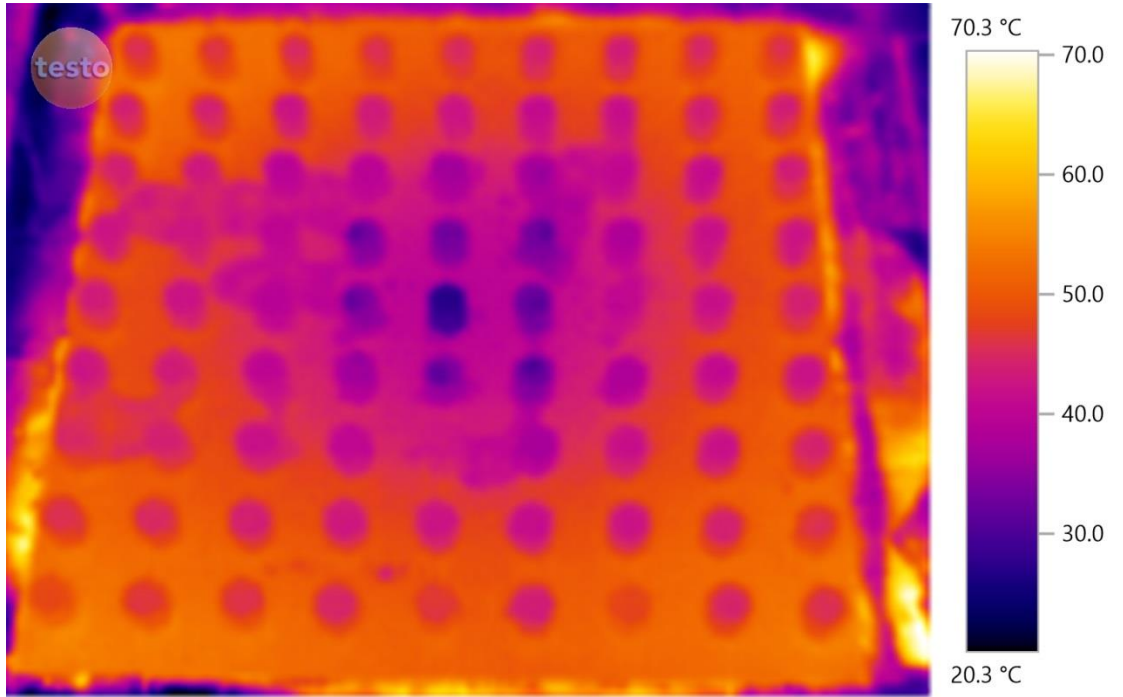
Şekil 4.25. Isı alıcı-12 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



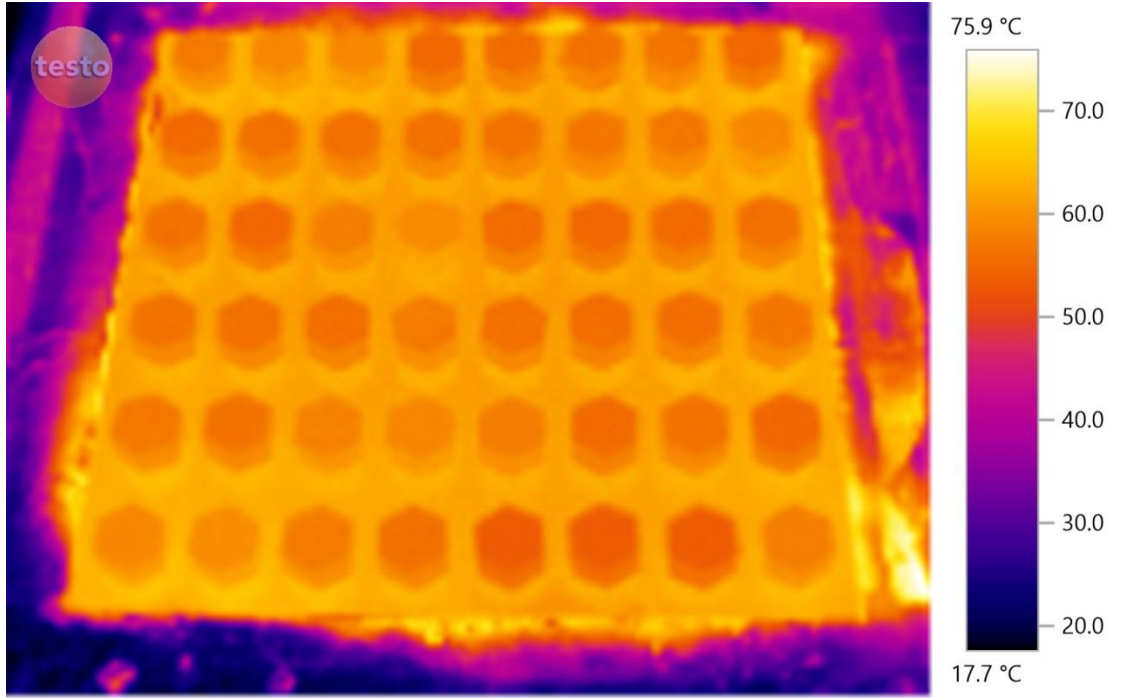
Şekil 4.26. Isı alıcı-12 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



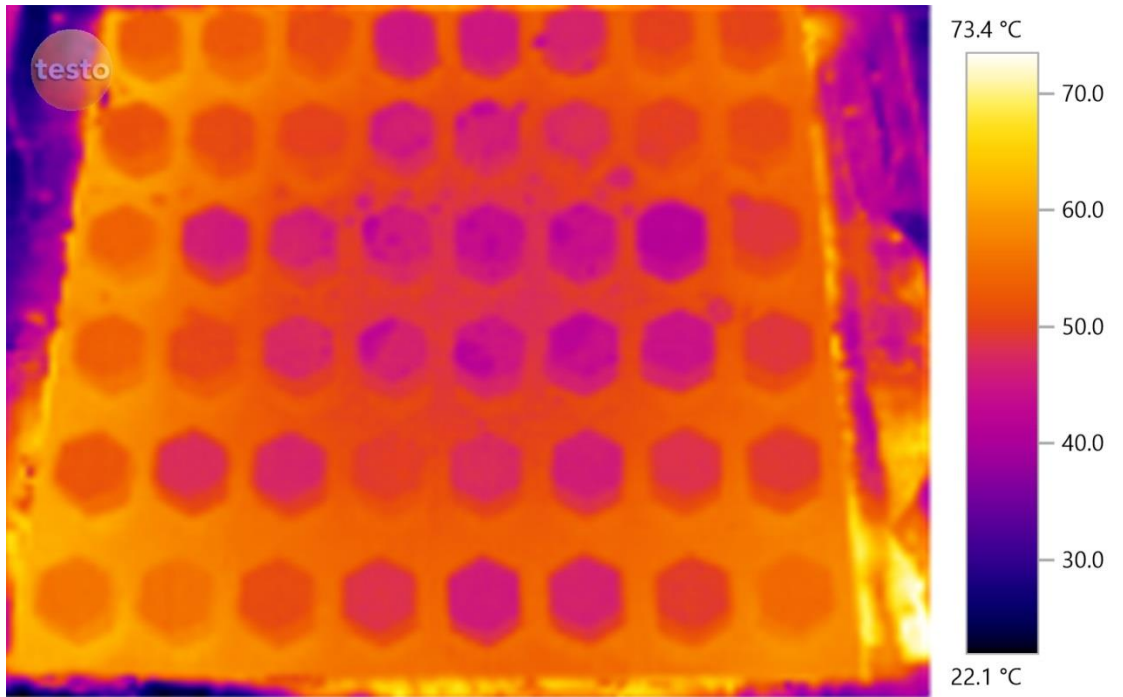
Şekil 4.27. Isı alıcı-13 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



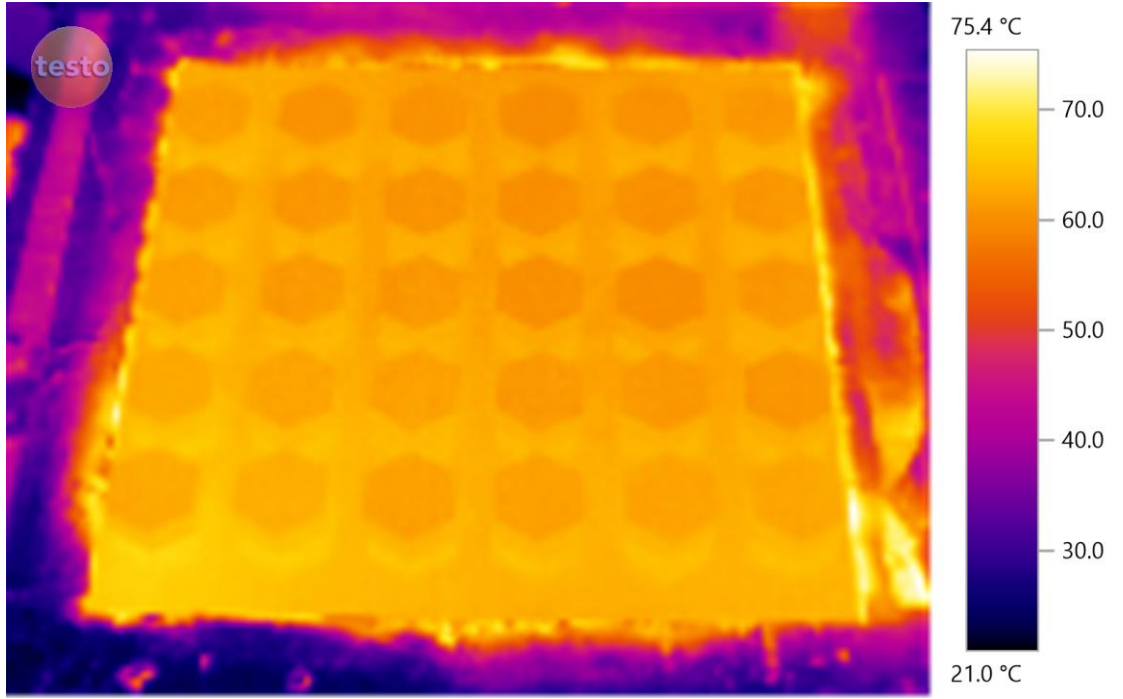
Şekil 4.28. Isı alıcı-13 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



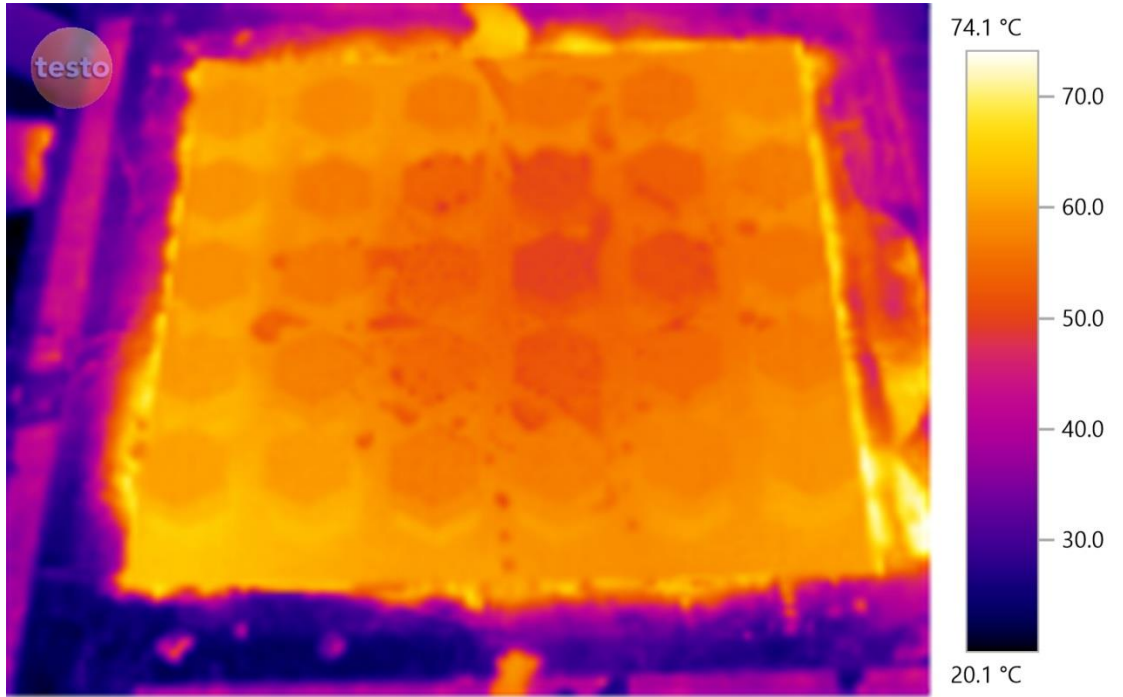
Şekil 4.29. Isı alıcı-14 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



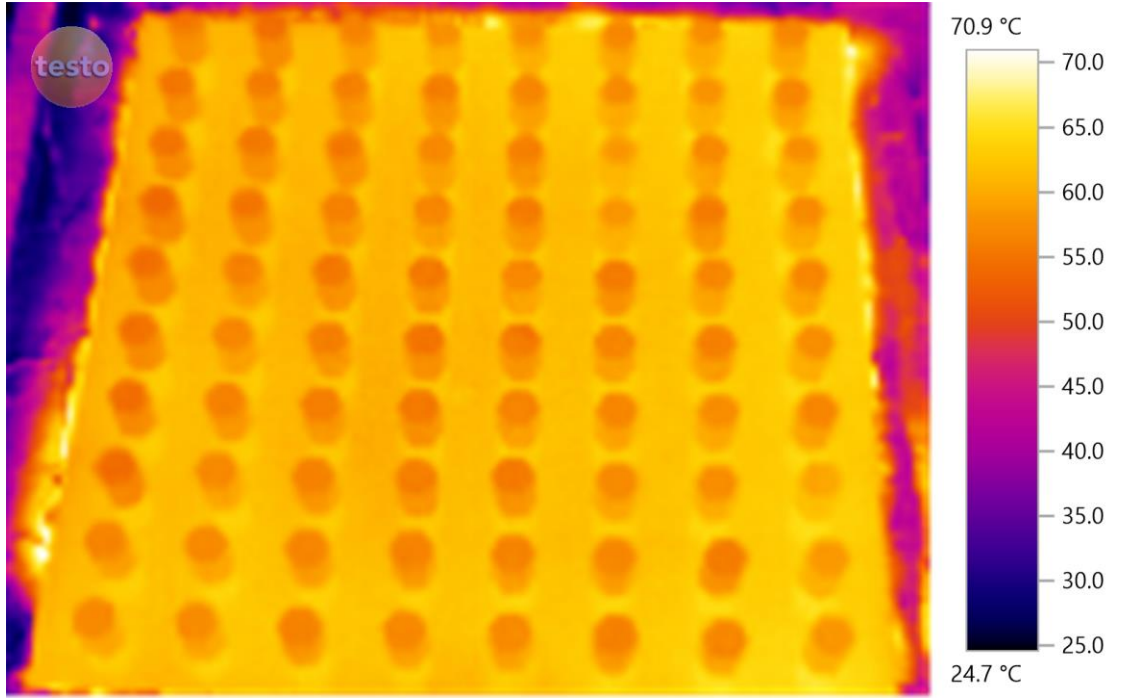
Şekil 4.30. Isı alıcı-14 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



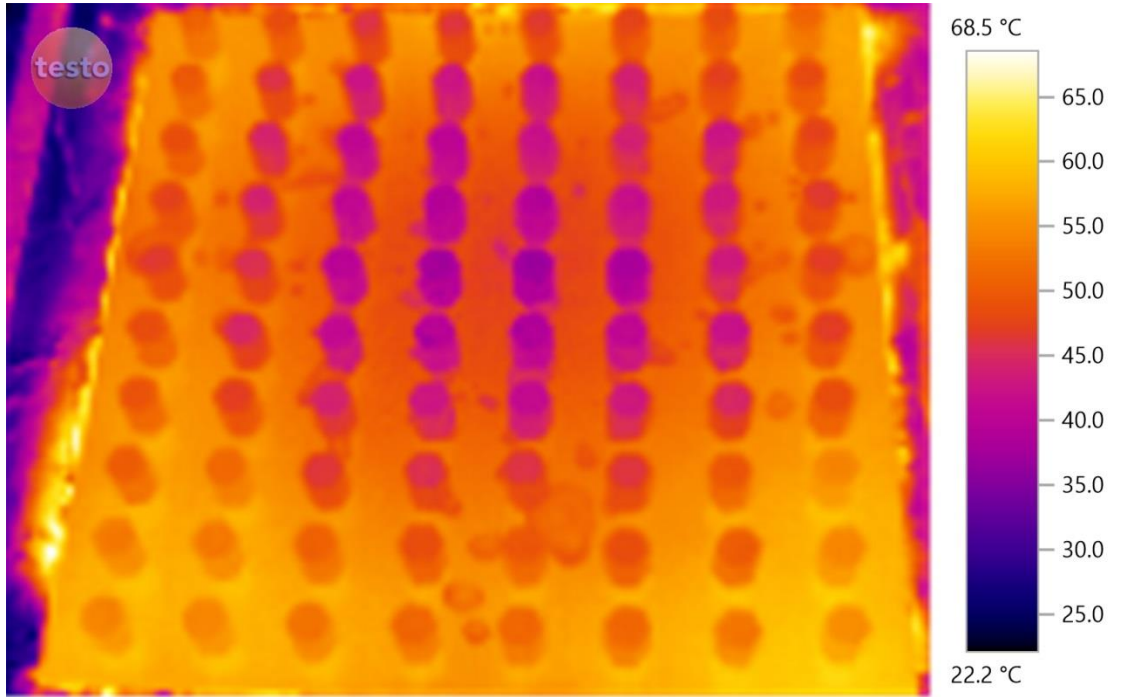
Şekil 4.31. Isı alıcı-15 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



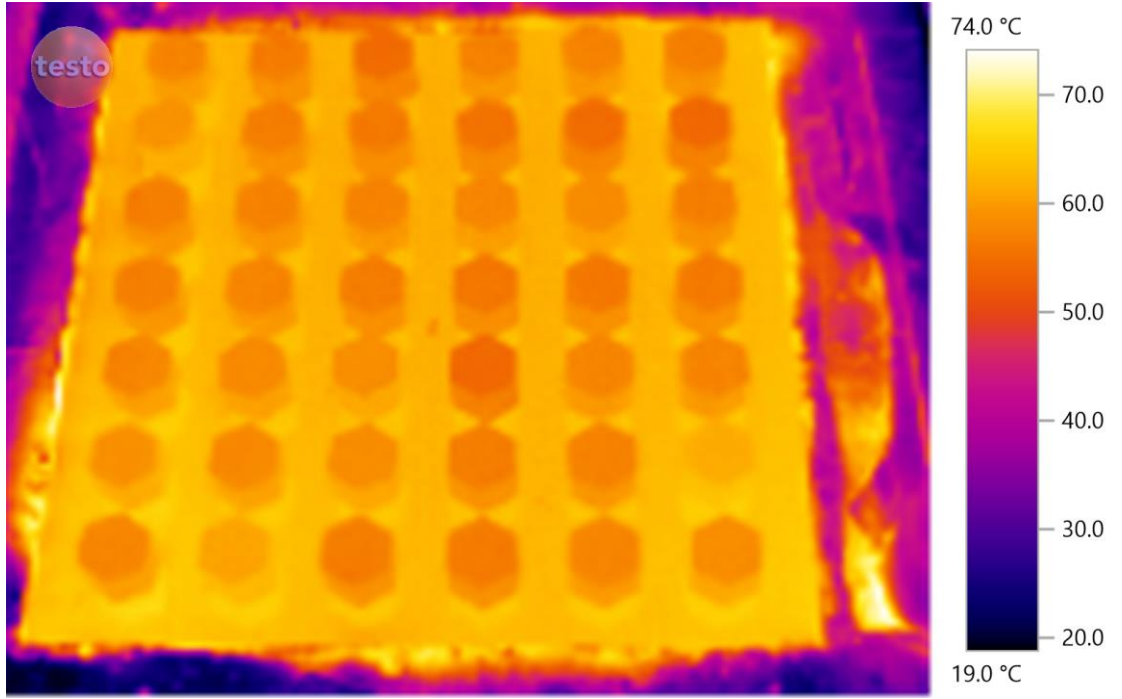
Şekil 4.32. Isı alıcı-15 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



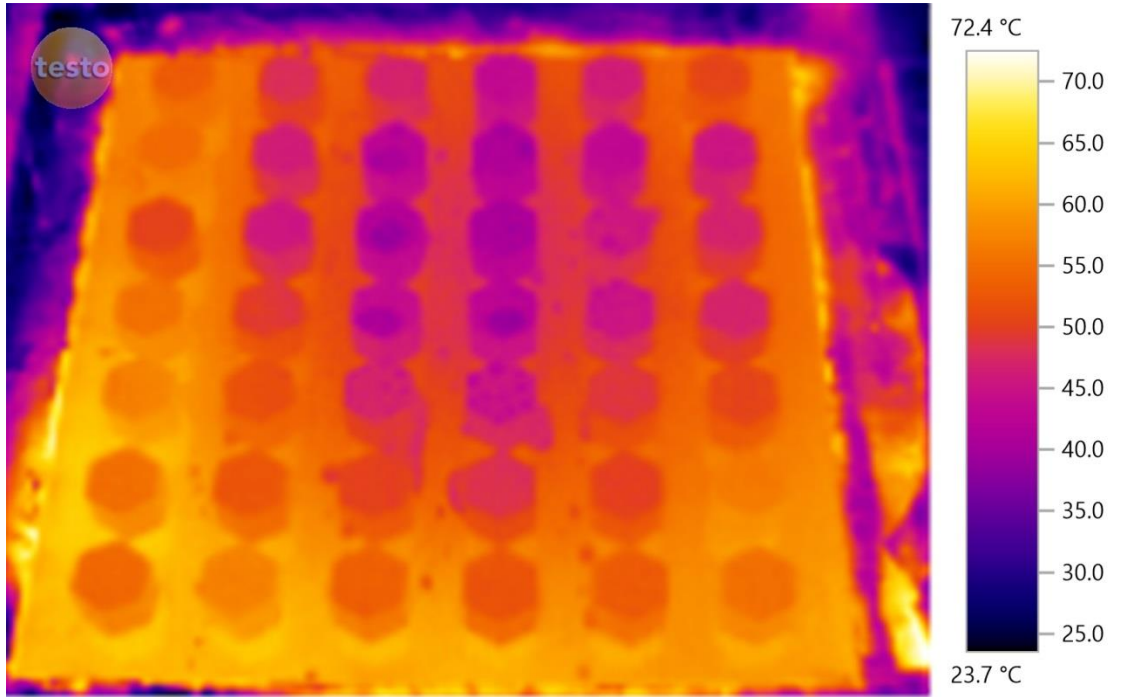
Şekil 4.33. Isı alıcı-16 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



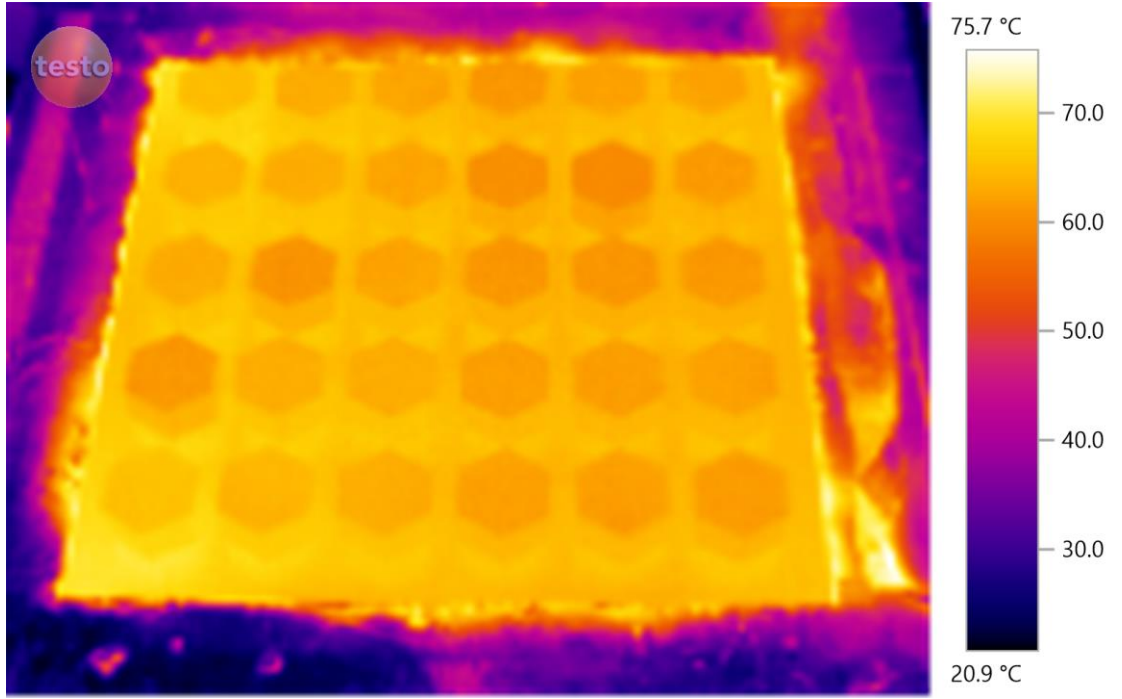
Şekil 4.34. Isı alıcı-16 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



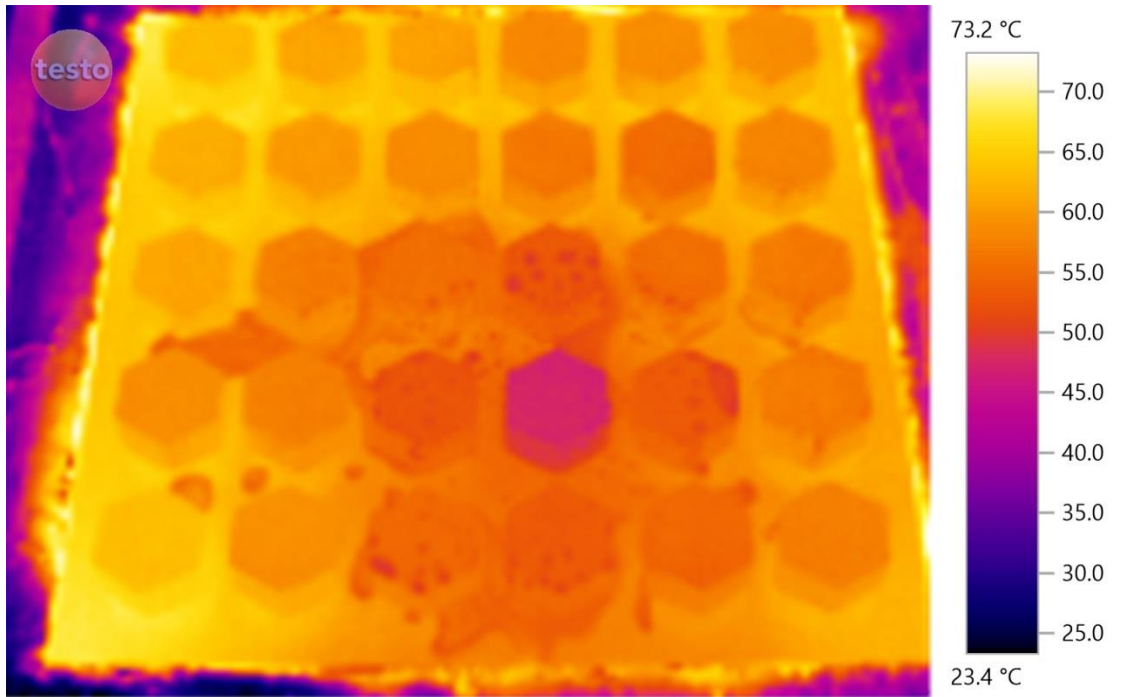
Şekil 4.35. Isı alıcı-17 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



Şekil 4.36. Isı alıcı-17 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü



Şekil 4.37. Isı alıcı-18 (sprey gönderilmeden önce) termal görüntüsü



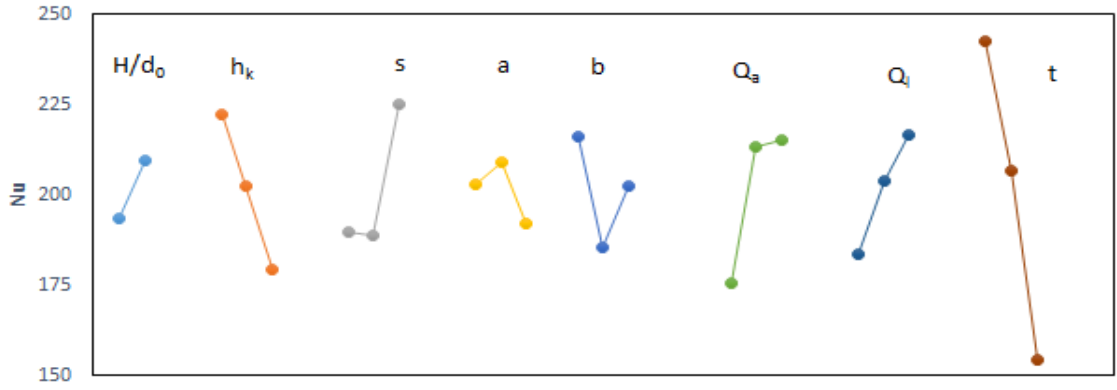
Şekil 4.38. Isı alıcı-18 (sprey gönderildikten sonra) termal görüntüsü

4.3. Taguchi Analizi

Klasik deney tasarım metodlarından tam faktöriyel tasarım ile $2^1 \cdot 3^7 = 4374$ adet deney yapmak yerine Taguchi deney tasarımı ile $L_{18}(2^1 \cdot 3^7)$ deney planı kullanılarak sadece 18 adet deney numunesi ile 36 adet deney yapılmıştır. Deneylerde bozucu ve tesadüfi faktörlerin etkisini gözlemleyebilmek için her deney farklı zamanlarda iki defa tekrarlanmıştır. Deneyler ve ölçümler yapıldıktan sonra, toplanan veriler ANOVA-TM paket programı ile analiz edilmiştir. Optimizasyon kriteri olarak “performans istatistiği” seçilmiştir. Parametrelerin optimizasyon kriterine etkilerini gözlemleyebilmek için Nusselt sayısına ait performans değerleri hesaplanmıştır. Nusselt sayısına göre genel optimum elde edilmiştir. Nusselt sayıları için “daha büyük daha iyi” performans istatistikleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.7. Nusselt sayısı için yapılan varyans analizi sonuçları

<i>Değişkenlik kaynağı</i>		<i>Serbestlik derecesi (DF)</i>	<i>Kareler toplamı S (SS)</i>	<i>Kareler ortalaması MS (V)</i>	<i>Test istatistiği (F)</i>	<i>Katkı yüzdesi (rho) (%)</i>
A	Nozul-yüzey mesafesi / Nozul çapı , H/d	1	2,327.0976	2,327.0976	8.6661	1,91
B	Kanat yüksekliği, h_k [mm]	2	11,119.0600	5,559.5300	20.7037	9,84
C	Kanat genişliği, s [mm]	2	10,340.7498	5,170.3749	19.2545	9,12
D	Kanatlar arası x yönünde mesafe, a [mm]	2	1,804.6528	902.3264		
E	Kanatlar y yönünde mesafe, b [mm]	2	5,655.6694	2,827.8347	10.5308	4,76
F	Hava debisi, Q_a [m ³ /h]	2	12,033.7316	6,016.8658	22.4068	10,69
G	Sıvı debisi, Q_l [m ³ /h]	2	6,771.1743	3,385.5872	12.6079	5,80
H	Zaman, t [s]	2	47,406.3837	23,703.1919	88.2706	43,58
AXB	Bileşik etki	2	6,526.2856	3,263.1428	12.1519	5,57
Hata (Birleştirilmiş hata)		20	5,370.5743	268.5287		8,74
Toplam		35	107,550.7264	3,072.8779		100



Şekil 4.39. Parametrelerin Nu sayısı üzerine etkileri

Çizelge 4.8. Parametrelerin Nu sayısı üzerine etki sıraları

	H/d ₀	h _k	s	a	b	Q _a	Q _i	t
Seviye 1	193.2300	222.1692	189.7508	202.8492	215.9108	175.4475	183.3533	242.6917
Seviye 2	209.3100	202.4700	188.8267	209.0433	185.2958	213.0392	203.7958	206.7975
Seviye 3	-----	179.1708	225.2325	191.9175	202.6033	215.3233	216.6608	154.3208
Delta	16.0800	42.9983	36.4058	17.1258	30.6150	39.8758	33.3075	88.3708
Etki sırası	8	2	4	7	6	3	5	1

Çizelge 4.9. Nu için yapılan varyans analizi sonuçları (Anova)

Source	Pool	DF	S	V	F	S'	rho
A		1	2,327.0976	2,327.0976	8.6661	2,058.5689	1.91
B		2	11,119.0600	5,559.5300	20.7037	10,582.0026	9.84
C		2	10,340.7498	5,170.3749	19.2545	9,803.6924	9.12
D	(e)	2	1,804.6528	902.3264			
E		2	5,655.6694	2,827.8347	10.5308	5,118.6119	4.76
F		2	12,033.7316	6,016.8658	22.4068	11,496.6742	10.69
G		2	6,771.1743	3,385.5872	12.6079	6,234.1169	5.80
H		2	47,406.3837	23,703.1919	88.2706	46,869.3263	43.58
A x B		2	6,526.2856	3,263.1428	12.1519	5,989.2282	5.57
e1							
e2	(e)	18	3,565.9215	198.1068			
(e)	UnPool	20	5,370.5743	268.5287		9,398.5051	8.74
Total	Auto	35	107,550.7264	3,072.8779			

Çizelge 4.10. Optimum geometriye ait tahmin ve güven aralığı değerleri

Prediction & Optimum Conditions

Conditions to estimate
A2 B1 C3 D2 E1 F3 G3 H1

Initial
 Optimum
Calculate It

Factor label	Level	Interaction	Le
A	2		
B	1		
C	3		
D	2		
E	1		
	-		

Summary of Mean Prediction ($\bar{\mu}$)

Average	Value	C.I.
Grand	201.2700	± 25.2004
$\bar{\mu}$ Initial		
$\bar{\mu}$ Optimum	347.4517	± 42.6216

Confidence level: 99 %

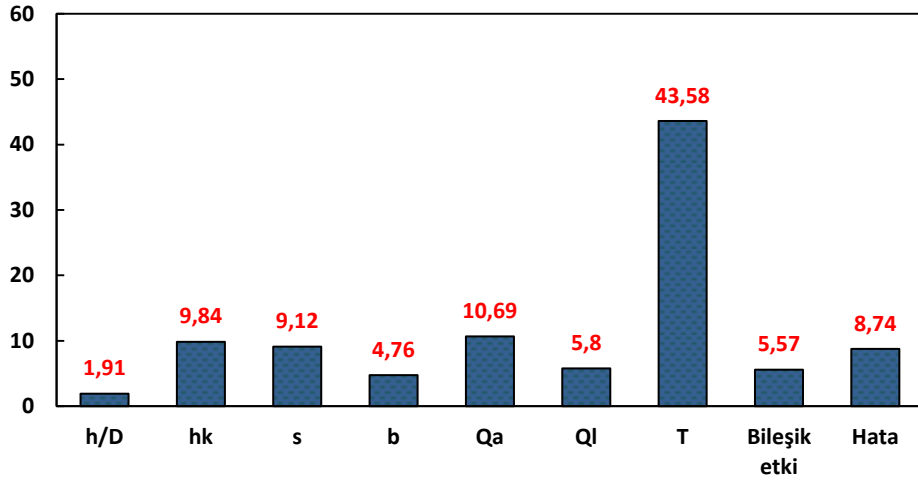
Çizelge 4.11. Hesaplanan karakteristik büyüklükler ve bunlara ait değerler

Deney	Parametreler								Nusselt	
	A	B	C	D	E	F	G	H	1	2
1	666.67	10	14	10	10	2,1	0,012	5	240.81	218.93
2	666.67	10	26	15	15	2,9	0,021	10	229.13	224.20
3	666.67	10	36	20	20	3,6	0,03	15	215.24	236.61
4	666.67	15	14	10	15	2,9	0,03	15	151.92	155.68
5	666.67	15	26	15	20	3,6	0,012	5	244.04	223.41
6	666.67	15	36	20	10	2,1	0,021	10	216.62	205.35
7	666.67	20	14	15	10	3,6	0,021	15	135.06	131.39
8	666.67	20	26	20	15	2,1	0,03	15	139.99	151.85
9	666.67	20	36	10	20	2,9	0,012	10	174.83	183.08
10	333.33	10	14	20	20	2,9	0,021	5	245.12	260.94
11	333.33	10	26	10	10	3,6	0,03	10	262.11	249.09
12	333.33	10	36	15	15	2,1	0,012	15	142.74	141.11
13	333.33	15	14	15	20	2,1	0,03	10	215.14	181.10
14	333.33	15	26	20	10	2,9	0,012	15	139.14	151.23
15	333.33	15	36	10	15	3,6	0,021	5	288.16	257.85
16	333.33	20	14	20	15	3,6	0,012	10	165.72	175.20
17	333.33	20	26	10	20	2,1	0,021	15	131.04	120.69
18	333.33	20	36	15	10	2,9	0,03	5	345.80	295.40
Optimum	333.33	10	36	15	10	3,6	0,03	5	338.35	326.91

Çizelge 4.12. Taguchi Nusselt sonuçları

Group 1	A	B	C	D	E	F	G	H	Rep.	1	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1		240.8100	218.9300
2	1	1	2	2	2	2	2	2		229.1300	224.2000
3	1	1	3	3	3	3	3	3		215.2400	236.6100
4	1	2	1	1	2	2	3	3		151.9200	155.6800
5	1	2	2	2	3	3	1	1		244.0400	223.4100
6	1	2	3	3	1	1	2	2		216.6200	205.3500
7	1	3	1	2	1	3	2	3		135.0600	131.3900
8	1	3	2	3	2	1	3	1		139.9900	151.8500
9	1	3	3	1	3	2	1	2		174.8300	183.0800
10	2	1	1	3	3	2	2	1		245.1200	260.9400
11	2	1	2	1	1	3	3	2		262.1100	249.0900
12	2	1	3	2	2	1	1	3		142.7400	141.1100
13	2	2	1	2	3	1	3	2		215.1400	181.1000
14	2	2	2	3	1	2	1	3		139.1400	151.2300
15	2	2	3	1	2	3	2	1		288.1600	257.8500
16	2	3	1	3	2	3	1	2		165.7200	175.2000
17	2	3	2	1	3	1	2	3		131.0400	120.6900
18	2	3	3	2	1	2	3	1		345.8000	295.4000

Katkı yüzdesi (%)



Şekil 4.40. Parametrelerin Nusselt üzerine katkı yüzdeleri

Katkı yüzdeleri ilgili parametrenin performans istatistiği üzerindeki etkisini göstermektedir ve aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$KY = \frac{(\text{Parametrenin Kareler Toplamı}) - (\text{Serb. derecesi} * \text{Hata kareler ort.})}{\text{Genel Kareler Toplamı}} \quad (107)$$

Katkı yüzdesi, bir deneyde gözlenen toplam değişkenliğin her bir anlamlı parametreye veya bileşik etkiye atfedilen kısmıdır.

Hatanın katkı yüzdesi %15'den düşük ise önemli herhangi bir parametrenin deneyin dışında bırakılmadığı kabul edilir. Hatanın katkı yüzdesi %50'den yüksek ise bazı önemli parametrelerin deney dışında bırakıldığı kabul edilir. Bu durumda şartların hassas kontrol edilemediği veya hataların aşırı yüksek olduğu kabul edilir (Ross 1989).

Çizelge 4.13. Nusselt sayına göre yapılan optimizasyon ve optimum değerler

		Parametreler								Performans Değeri		
		A	B	C	D	E	F	G	H	Nusselt Sayısı		
		H/d	h_k	s	a	b	Q_a	Q_l	t	Tahmin	Güven Aralığı	Gerçek
Nusselt Sayısı	Optimum seviye	2 [☆]	1 ⁺	3 [°]	2 [◊]	1 [□]	3 [•]	3 [△]	1 [*]	347.45 17	304.8301 - 390.0733	332.97 29
	Optimum Değer	333 .33	10	36	15	10	3.6	0.03	5			
		*:1. derecede etkin		+:2. derecede etkin		•:3. derecede etkin		°:4. derecede etkin		△: 5. derecede etkin		
		□:6.derecede etkin		◊: 7. derecede etkin		☆: 8. derecede etkin						

Nusselt sayısına parametrelerin etkisi sırasıyla; sprej zamanı (T), kanat yüksekliği (h_k), hava debisi (Q_a), kanat genişliği (s), su debisi (Q_l), kanatlar arası y yönünde mesafe (b), kanatlar arası x yönünde mesafe (a) ve nozul-yüzey mesafesi (H/d)'dir.

Çizelge 4.13'den de görülebileceği gibi Nusselt sayısı üzerinde en etkili parametre sprej zamanıdır. Sprej süresinin artması test yüzeyinde ısı taşınım katsayısının artması anlamına gelir. Sprej zamanının 5 s olduğu durum Nusselt sayısını en büyük yapmaktadır. Nusselt sayısı hesaplamaları yapılırken ortalama taşınım katsayısı toplam kanatçıklı yüzey alanına göre belirlenmiştir.

Nusselt sayısı üzerinde ikinci etkin parametre kanat yüksekliğidir. Nusselt sayısına etki eden üçüncü parametre hava debisi (Q_a) olmuştur. Hava debisi atomizasyon ve çap dağılımı için çok önemlidir. Hava debisinin artması daha homojen ve etkin bir soğutma sağlar. Dördüncü etkin parametre kanat genişliği olarak elde edilmiştir. Beşinci etkin parametre sıvı debisidir. Kullanılan hava destekli nozul için hava ve sıvı kütleli debileri oranı olan ALR'nin içinde bu iki parametre sprej soğutma etkinliği açısından birlikte değerlendirilmiştir. Su akışı arttıkça verilen sıcaklıkta ısı akışı artar. Bu artan damlacık yoğunluğundan kaynaklanan taşınım ile ısı transferinin artmasından dolayıdır.

Varyans analizleri yapılırken test istatistiği (F) ve katkı yüzdesi (ρ) çok düşük olan parametreler deneysel hatanın hesaplanmasında kullanılmıştır. Örneğin Çizelge 4.9'da kanatlar arası x yönünde mesafenin (a) katkı yüzdesi çok düşük olduğu için bu parametre hata terimi içerisine katılmış, böylelikle hata teriminin serbestlik derecesi 20'ye çıkmıştır. Bu işlem hata varyansını daha iyi tahmin etmek için sütun etkilerinin birleştirilmesidir. Buna hata varyanslarının birleştirilmesi anlamına gelen pooling up (birleştirme) işlemi denir.

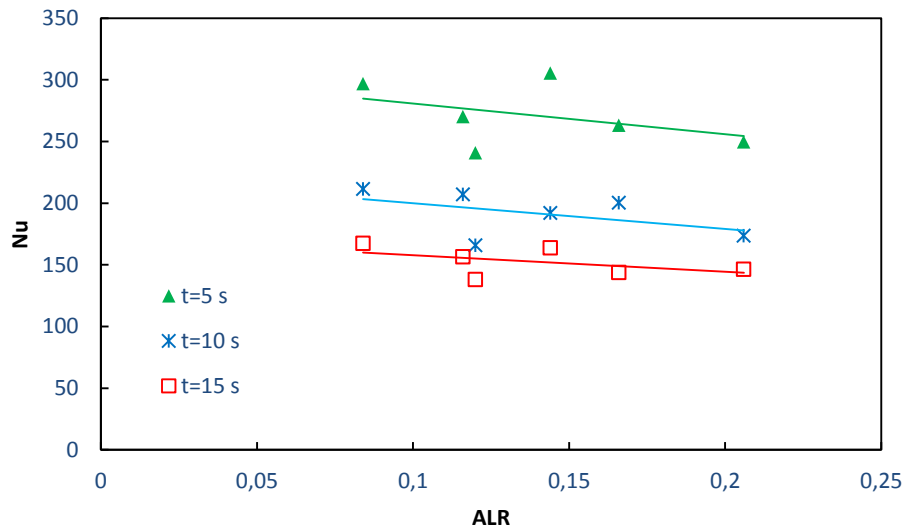
4.4. Nusselt Korelasyonu

Altıgen kanatçıklı ısı alıcılar için yapılan Taguchi analiz sonuçlarına göre Nusselt sayısı üzerine en etkin parametreler Sprej zamanı (t), Hava debisi (Q_a), Kanat yüksekliği (h_k) ve Kanat genişliği (s) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre sprejin homojenliğini ve damlacık boyutunu etkileyen hava-sıvı debi oranı (ALR) için 6 farklı değer, sprej zamanı, kanat yüksekliği ve kanat genişliği içinse 3 farklı değer belirlenmiştir. Korelasyondaki a, b ve H/d değerleri içinse Taguchi ile elde edilen optimum değerler kullanılmıştır. Toplam 54 deney yapılarak Nu korelasyonu *STATISTICA* programı kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.41'de sprej zamanının, Şekil 4.42'de kanat yüksekliğinin, Şekil 4.43'de kanat genişliğinin ALR'ye bağlı olarak Nu sayısı üzerine etkisi gösterilmiştir.

Altıgen kanatçıklı ısı alıcılarda Taguchi ile bulduğumuz optimum ısı alıcı geometrisi ve optimum şartlar için yapılan deneyler sonucunda Nusselt sayısı korelasyonu *STATISTICA* programında “Custom Loss” fonksiyonu ile hesaplanarak $R=0.9098$ değerinde aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

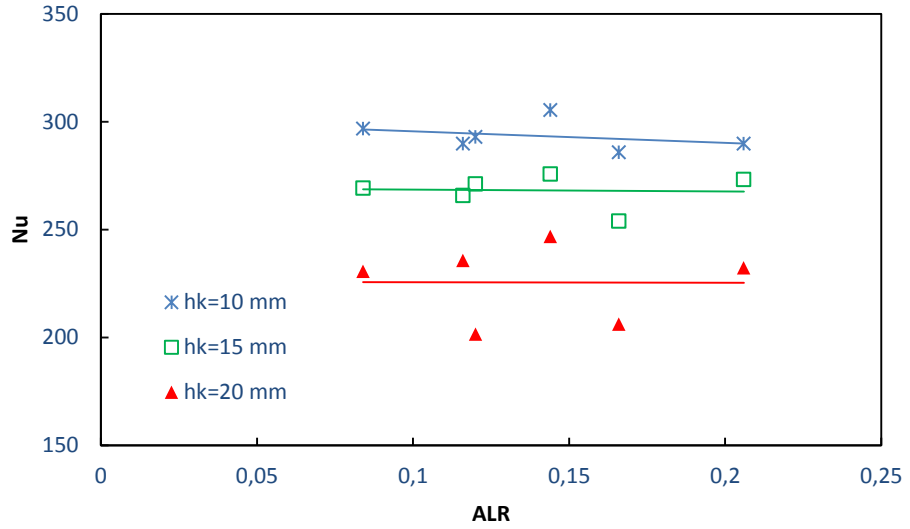
$$Nu = 0.7797ALR^{-0.1112}t^{-0.5829}h_k^{-0.1822}s^{34.3723}a^{76.1372}b^{-38.4312}\left(\frac{H}{d}\right)^{-40.2525} \quad (108)$$

Taguchi deney tasarımı ile bulunan optimum yüzeyde korelasyon için yapılan deneylere göre ALR-Nusselt değişimleri; sprej zamanı (t), kanat yüksekliği (h_k) ve kanat genişliğine (s) göre çizilmiştir.



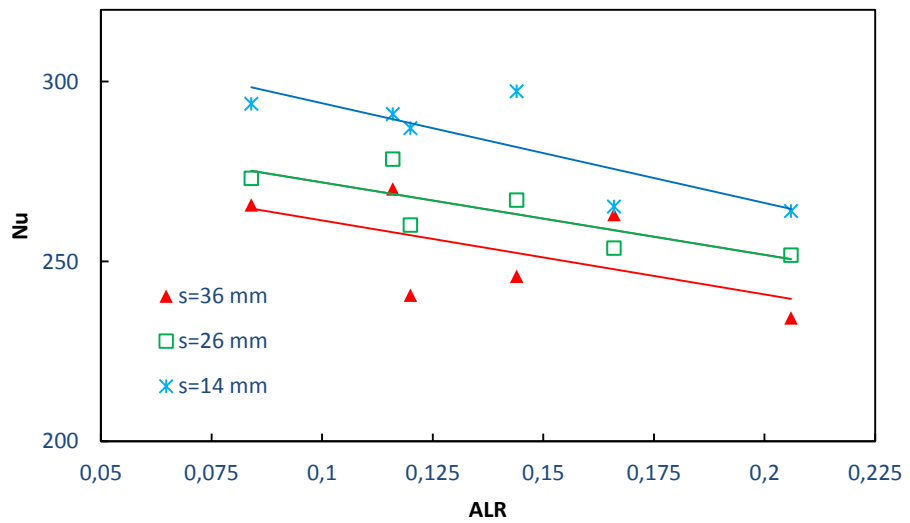
Şekil 4.41. Sprej zamanının Nusselt sayısı üzerine etkisi

Şekil 4.41’de sprej zamanına bağlı olarak ALR-Nu değişimi verilmiştir. En yüksek Nusselt sayısı 5 s sprej süresi için elde edilmiştir. Nusselt sayısı ALR ile azalma eğilimindedir. 5 ve 10 s sprej süreleri için Nu sayısında %29-37, 10 ve 15 s için %15-20, minimum ve maksimum değerler arasında ise %41-46’lık bir azalma gözlenmiştir.



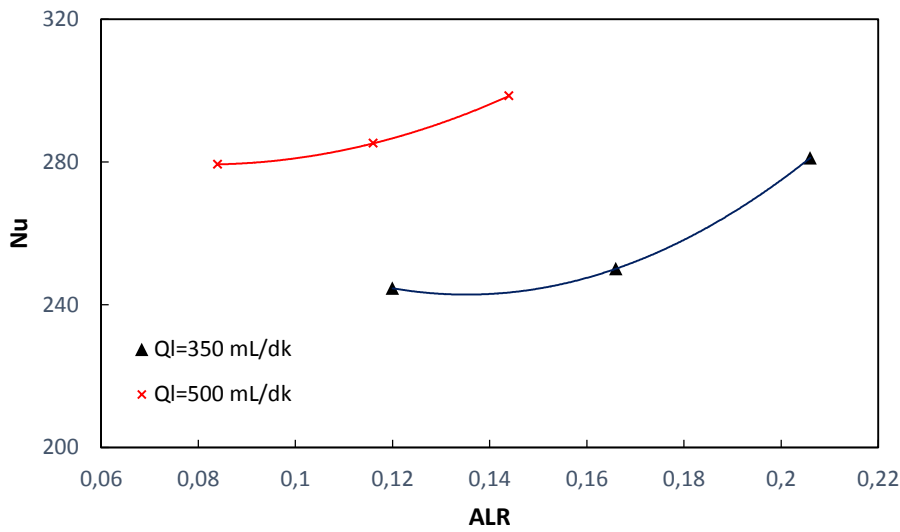
Şekil 4.42. Kanat yüksekliğinin Nusselt sayısı üzerine etkisi

Şekil 4.42’de ALR-Nu değişimi kanat yüksekliğine göre çizilmiştir. En yüksek Nu değeri 10 mm kanat yüksekliğinde elde edilmiştir. ALR arttıkça Nu sayısında tüm kanat yüksekliklerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Kanat yüksekliğinin artmasıyla Nu sayısı azalmıştır. Bu azalma 10 ve 15 cm kanat yüksekliği için %5-9, 15 ve 20 cm için %10-15, 10 ve 20 cm arasında ise %19-22 aralığında elde edilmiştir.



Şekil 4.43. Kanat genişliğinin Nusselt sayısı üzerine etkisi

Şekil 4.43’de ALR- Nu değişimi kanat genişliğine göre çizilmiştir. En yüksek Nu sayısı 14 mm kanat genişliğinde elde edilmiştir. Bu grafikte ALR arttıkça Nu sayısının bütün kanat genişliklerinde azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Kanat genişliği arttıkça Nu sayısı azalmaktadır. Bu azalma 14 ve 26 mm kanat genişlikleri arasında %5-7, 26 ve 36 mm kanat genişliklerinde %3-7 ve en dar ve en geniş kanatlar arasında da %9-11 olarak belirlenmiştir.



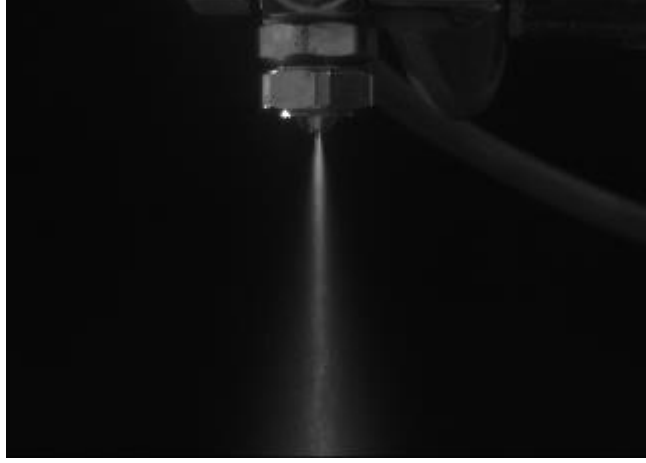
Şekil 4.44. Sprey su debisine göre ALR-Nu değişimi

Şekil 4.44.’de 350 mL/dk ve 500 mL/dk sıvı debileri için ALR-Nu değişimi verilmiştir. Bu grafiğe göre sıvı debisi arttıkça Nu sayısının arttığı görülmektedir.

4.5. Sprey Görüntüleri ve Akış Analizi

Sprey görüntüleri IMPERX Bobcat ICL-B0620 CCD kamera (256fps) ve FrameLink Grabber ile alınmıştır. Görüntüler alınırken stroboskop kullanılmıştır. Görüntü işleme ile sprej jet çapı ve sprej açısı belirlenmiştir. Hava destekli nozulda akış analizi için sprej basınç aralıkları, debi, ALR, nozul boyunca basınç kaybı, sprej boyutsuz sayıları, bozulma mesafesi ve SMD gibi parametreler Çizelge 4.13’de verilmiştir.

DXD-HS1 hava destekli nozul ile yapılan akış deneyi görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.45. ALR=0.12 için sprej görüntüsü
($Q_a=2.1 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_l=0.35 \text{ L/dk}$, $P_a=0.5 \text{ bar}$, $P_l=1.5 \text{ bar}$)



Şekil 4.46. ALR=0.084 için sprej görüntüsü
($Q_a=2.1 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_l=0.5 \text{ L/dk}$, $P_a=0.5 \text{ bar}$, $P_l=2.5 \text{ bar}$)



Şekil 4.47. ALR=0.116 için sprej görüntüsü
($Q_a=2.9 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_l=0.5 \text{ L/dk}$, $P_a=1.5 \text{ bar}$, $P_l=2.5 \text{ bar}$)



Şekil 4.48. ALR=0.144 için sprej görüntüsü
($Q_a=3.6 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_l=0.5 \text{ L/dk}$, $P_a=2.5 \text{ bar}$, $P_l=2.5 \text{ bar}$)



Şekil 4.49. ALR=0.166 için sprej görüntüsü
($Q_a=2.9 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_l=0.35 \text{ L/dk}$, $P_a=1.5 \text{ bar}$, $P_l=1.5 \text{ bar}$)



Şekil 4.50. ALR=0.206 için sprej görüntüsü
($Q_a=3.6 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_l=0.35 \text{ L/dk}$, $P_a=2.5 \text{ bar}$, $P_l=1.5 \text{ bar}$)



Şekil 4.51. ALR=0.21 için sprej görüntüsü
($Q_a=2.1$ m³/h, $Q_l=0.2$ L/dk, $P_a=0.5$ bar, $P_l=0.5$ bar)

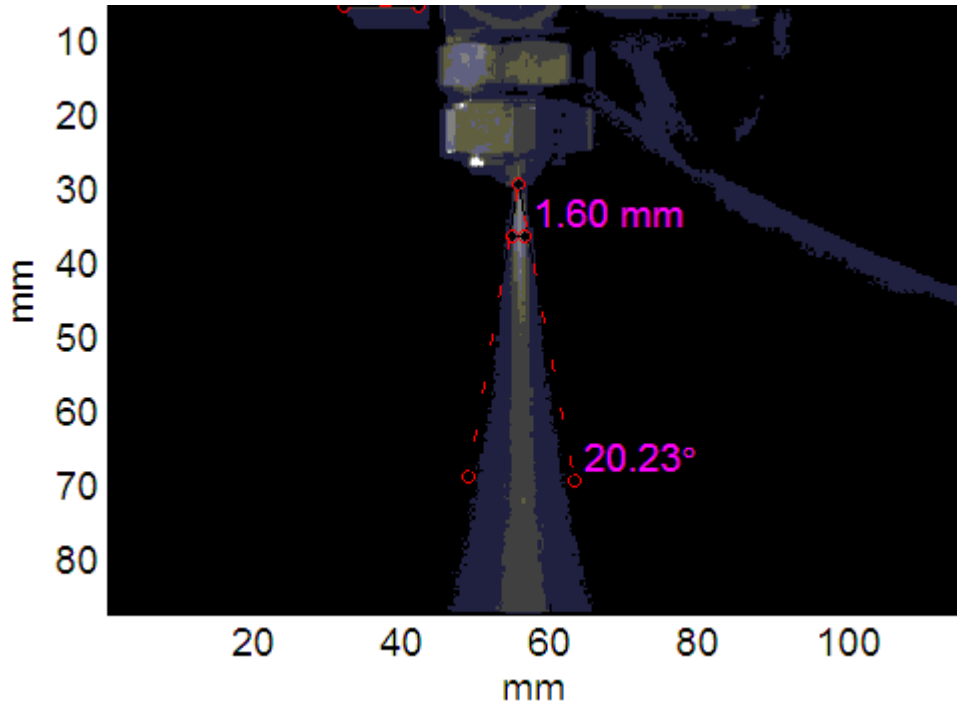


Şekil 4.52. ALR=0.29 için sprej görüntüsü
($Q_a=2.9$ m³/h, $Q_l=0.2$ L/dk, $P_a=1.5$ bar, $P_l=0.5$ bar)



Şekil 4.53. ALR=0.36 için sprej görüntüsü
($Q_a=3.6 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_l=0.2 \text{ L/dk}$, $P_a=2.5 \text{ bar}$, $P_l=0.5 \text{ bar}$)

Şekil 4.54.'de Matlab'de oluşturulan GUI ile görüntü işleme analizi için bir örnek verilmiştir. Burada jet kalınlığı ve sprej açısı görüntü işleme ile belirlenmiştir.

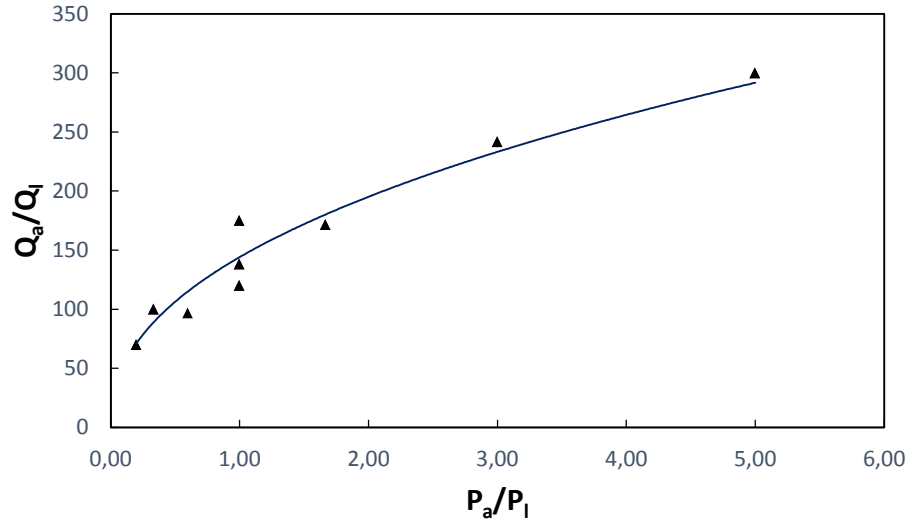


Şekil 4.54. ALR= 0.12 için Matlab'de görüntü analizi

Çizelge 4.13. Sprey akış analizinde incelenen parametreler ve değerleri

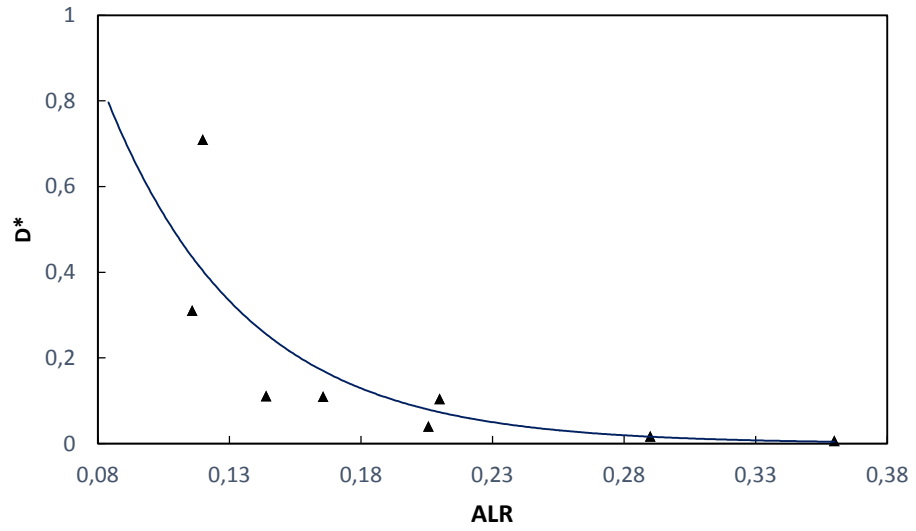
P_a (bar)	P_1 (bar)	Q_A (m ³ /h)	Q_L (mL/dk)	ALR	t_{jet} (m)	Re_{jet}	ΔP (Pa)	SMD (Feras)	SMD (Lef.)
0.5	0.5	2.1	200	0.210	0.00145	31214	4329	125	363
1.5	1.5	2.9	350	0.166	0.0017	33317	13257	131	273
2.5	2.5	3.6	500	0.144	0.00164	32830	27056	133	258
1.5	2.5	2.9	500	0.116	0.00151	31737	27056	223	421
2.5	0.5	3.6	200	0.360	0.0018	34107	4329	38	112
0.5	1.5	2.1	350	0.120	0.0016	32499	13257	284	532
2.5	1.5	3.6	350	0.206	0.00185	34493	13257	80	169
0.5	2.5	2.1	500	0.084	0.00164	32830	27056	492	718
1.5	0.5	2.9	200	0.290	0.0015	31651	4329	60	196
1.5	1.5	2.9	350	0.166	0.0017	33317	13257	131	273
2.5	2.5	3.6	500	0.144	0.00164	32830	27056	133	258
0.5	0.5	2.1	200	0.210	0.00145	31214	4329	125	363
0.5	2.5	2.1	500	0.084	0.00164	32830	27056	492	718
1.5	0.5	2.9	200	0.290	0.0015	31651	4329	60	196
2.5	1.5	3.6	350	0.206	0.00185	34493	13257	80	169
2.5	0.5	3.6	200	0.360	0.0018	34107	4329	38	112
0.5	1.5	2.1	350	0.120	0.0016	32499	13257	284	532
1.5	2.5	2.9	500	0.116	0.00151	31737	27056	223	421

Deneylerde kullanılan $d_0=1.2$ mm çapında DXD-HS1 hava destekli tam koni nozul için Çizelge 4.13'e göre çizilen grafikler aşağıdadır:



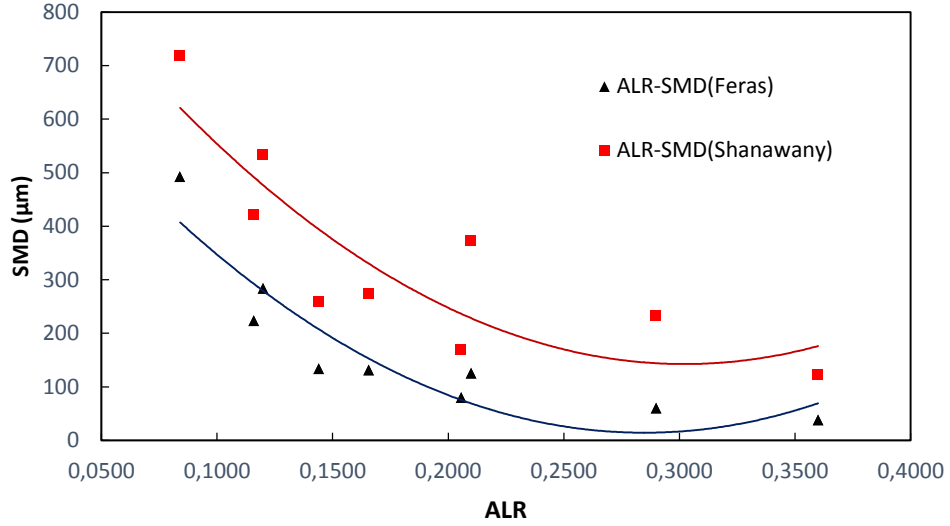
Şekil 4.55. Basınç-hacimsel debi oranlarının değişim grafiği

Şekil 4.55'de çizilen grafikte hava/su basınç oranı arttıkça yine hava/su hacimsel debileri de artmaktadır. Bu artış yüksek basınç oranlarında daha belirgindir.



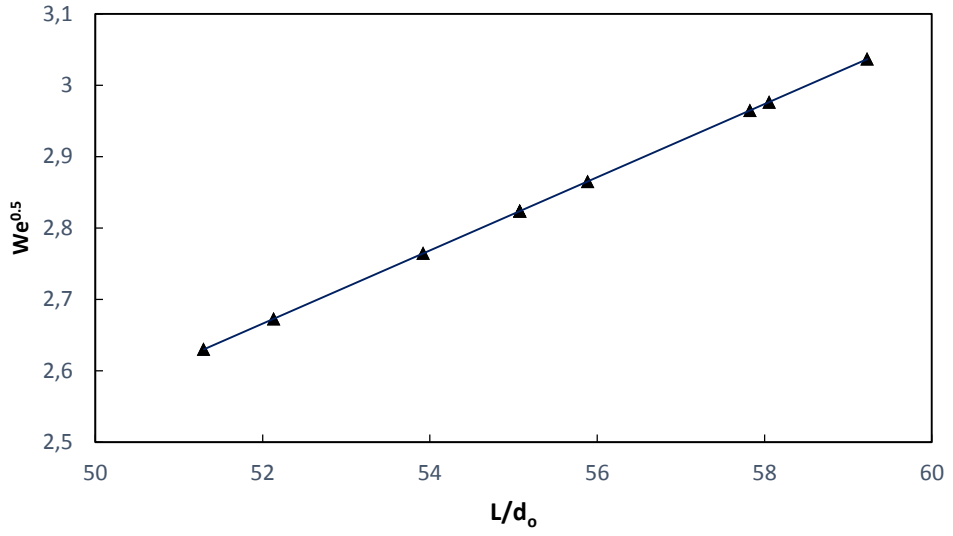
Şekil 4.56. ALR-Boyutsuz damla çapı (D^*) grafiği

Şekil 4.56'da ALR ile boyutsuz damla çapı değişimi verilmiştir. Boyutsuz damla çapı ifadesi $D^* = \frac{SMD \cdot P_l}{d_o P_a}$ ile hesaplanmıştır. ALR arttıkça boyutsuz damla çapının azaldığı görülmektedir.



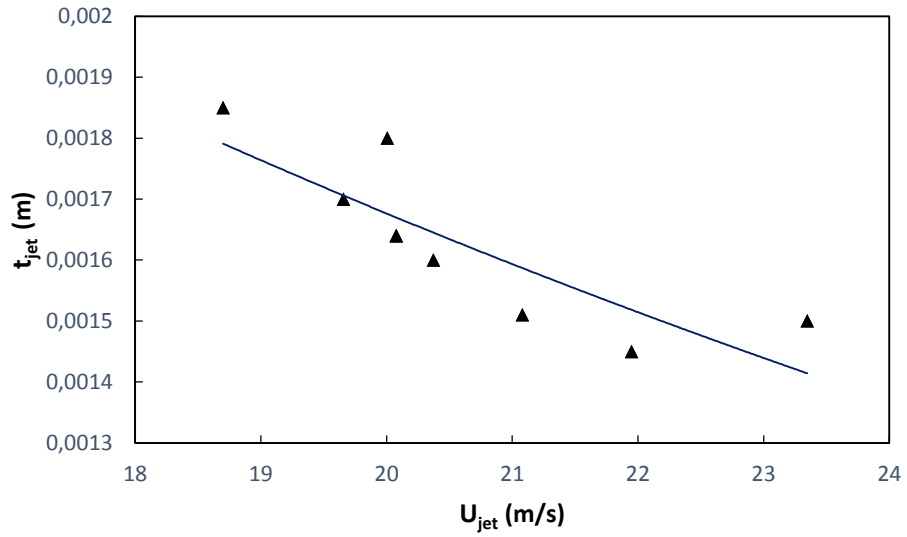
Şekil 4.57. Feras ve Shanawany SMD korelasyonları ile ALR-SMD değişimi

Şekil 4.57'de belirlenen su ve hava debileri için ALR-SMD değişimleri Feras ve Shanawany'nin korelasyonları ile çizilmiştir. ALR arttıkça SMD'nin azaldığı görülmektedir. Bu korelasyonlar Çizelge 1.3'te (11 ve 12. korelasyonlar) verilmiştir.



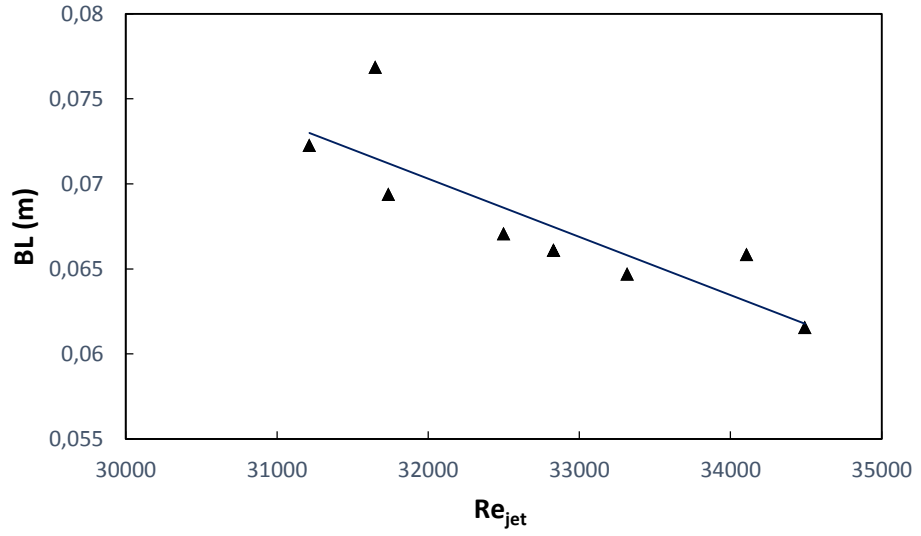
Şekil 4.58. $L/d_0 - We^{0.5}$ grafiği

Şekil 4.58’de bozulma mesafesi nozul çapına bölünerek boyutsuz $L/d_0 - We^{0.5}$ grafiği verilmiştir. Bozulma mesafesi We sayısının karekökü ile lineer olarak artmaktadır.



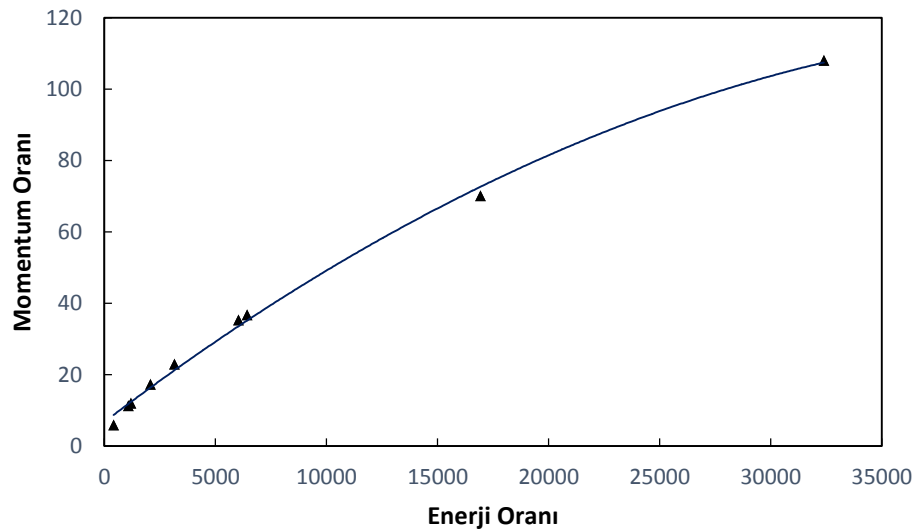
Şekil 4.59. Jet kalınlığı ile jet hızının değişimi

Şekil 4.59’da jet kalınlığı arttıkça jet hızının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.60. Re sayısı ile jet bozulma mesafesinin değişimi

Şekil 4.60'da Re sayısı arttıkça bozulma mesafesinin azaldığı görülmektedir. (Lam, 2008)'den alınan bozulma mesafesi korelasyonuna göre Re sayısı arttıkça bozulma mesafesinin azaldığı görülmektedir. Re sayısının minimum ve maksimum değerleri arasında bozulma mesafesinde %12'lik bir azalma gözlenmiştir.



Şekil 4.61. Sprey Enerji-Momentum oranları grafiği

Ayrıca akış korelasyonları da çıkarılmıştır. DXD-HS1 hava destekli nozulda çeşitli ALR oranlarında elde edilen deneysel bulgular ile sprej açısı (Θ) ve jet kalınlığı (t_{jet}) için STATISTICA programında “*Custom Loss*” fonksiyonu ile korelasyonlar elde edilmiştir.

Sprej açısı için ALR, We sayısı, hava-sıvı basınç oranı ve Pr sayısına bağlı olarak aşağıdaki korelasyon elde edilmiştir (R=0.9842).

$$\theta = 1.16347 * ALR^{-0.183964} We^{-0.052335} (P_a/P_t)^{0.175272} Pr^{1.564740} \quad (109)$$

Jet kalınlığı için de ALR, We, hava-sıvı basınç oranı ve Pr sayısına bağlı olarak aşağıdaki korelasyon elde edildi (R=0.8418).

$$t_{jet} = 0.06782 * ALR^{0.65067} We^{0.1139} (P_a/P_t)^{-0.143729} Pr^{-1.65378} \quad (110)$$

5. SONUÇ

- Taguchi deney tasarımı ile $L_{18}(2^1*3^7)$ standart deney planı kullanılarak Nusselt sayısı hesaplanmış ve Nusselt sayısına parametrelerin etkisi önem sırasına göre; sprej zamanı (T), kanat yüksekliği (h_k), hava debisi (Q_a), kanat genişliği (s), su debisi (Q_l), kanatlar arası y yönünde mesafe (b), kanatlar arası x yönünde mesafe (a) ve nozul-yüzey mesafesi (H/d) olarak elde edilmiştir.
- Optimum sonuçlar; 400 mm nozul-yüzey mesafesi, 10 mm kanat yüksekliği, 36 mm kanat genişliği, 15 mm kanatlar arası x yönünde mesafe, 10 mm kanatlar arası y yönünde mesafe, 3,6 m³/h hava debisi, 0,03 m³/h su debisi ve 5 s sprej zamanı olarak tespit edilmiştir.
- Nusselt sayısı üzerine en etkin parametreler olarak bulunan sprej zamanı, kanat yüksekliği ve kanat genişliğinin çeşitli değerlerinde Nu sayısı-ALR değişimleri incelenmiştir.
- En yüksek Nusselt sayısı 5 s sprej süresi için elde edilmiştir. Nusselt sayısının ALR ile azaldığı gözlemlenmiştir.
- En yüksek Nu değeri 10 mm kanat yüksekliğinde elde edilmiştir. ALR arttıkça Nu sayısında tüm kanat yüksekliklerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Kanat yüksekliğinin artmasıyla Nu sayısı azalmaktadır.
- En yüksek Nu sayısı 14 mm kanat genişliğinde elde edilmiştir. ALR ve kanat genişliği arttıkça Nu sayısının azaldığı gözlemlenmiştir.
- Tüm ALR değerlerinde sıvı debisi arttıkça, taşınım ile ısı transferi de artmaktadır. Su akışı arttıkça verilen sıcaklıkta ısı akışı artar. Bu artan damlacık yoğunluğundan kaynaklanan taşınım ile ısı transferinin artmasından dolayıdır.
- Taguchi deney tasarımı ile elde edilen optimum ısı alıcı geometrisinde yapılan deneylerle Nu sayısı, sprej açısı ve jet çapı korelasyonları aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Nu = 0.7797ALR^{-0.1112}t^{-0.5829}h_k^{-0.1822}s^{34.3723}a^{76.1372}b^{-38.4312}\left(\frac{H}{d}\right)^{-40.2525} \quad (111)$$

$$\theta = 1.16347 * ALR^{-0.183964}We^{-0.052335}\left(\frac{P_a}{P_l}\right)^{0.175272}Pr^{1.564740} \quad (112)$$

$$t_{jet} = 0.06782 * ALR^{0.65067}We^{0.1139}\left(\frac{P_a}{P_l}\right)^{-0.143729}Pr^{-1.65378} \quad (113)$$

Altıgen kanatçıklı ısı alıcılar için sprej soğutma ile ısı transferi ve akış karakteristiklerini belirlemeye yönelik deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Akış deneyleri sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Hava/su basınç oranı arttıkça hava/su hacimsel debileri oranı da artmaktadır. Bu artışın, yüksek basınç oranlarında daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.
- ALR arttıkça SMD azalır. Toplam sprej hacminin sprej alanına oranı olan SMD'nin azalmasıyla taşınım ile ısı transferinin arttığı görülmüştür.
- Daha yüksek hava debisi, damlacık momentumunu artırır. Böylece yüzeye çarpan damlacıklar, taşınım ile ısı transferinin artışına neden olmaktadır.
- Jet Re sayısı arttıkça bozulma mesafesinin azaldığı görülmüştür. Re sayısının minimum ve maksimum değerleri arasında bozulma mesafesinde %12'lik bir azalma belirlenmiştir.
- We sayısı arttıkça, viskozitenin etkisini temsil eden Oh sayısının arttığı gözlemlenmiştir.
- ALR arttıkça SMD'ye benzer şekilde boyutsuz damla çapı da azalmıştır.

Çalışma sonunda bundan sonraki araştırmalar için aşağıdaki öneriler belirlenmiştir:

- Sprej akış karakteristiklerini belirlemeye yönelik çalışmalar oldukça kompleks çalışmalardır. Bu nedenle sprej akış yapısının detaylı analizine imkan veren lazerle ölçüm yapmak gerekmektedir.

- Sprey soğutmada çalışma sıvısı olarak FC-72 ve FC-87 gibi florinert sıvılar kullanılabilir. Yüzey aktif maddeler de eklenerek ısı transferi süreci incelenmelidir.
- Bu çalışma kaynama sıcaklığının altında yürütülmüştür. Bundan sonraki çalışmalar, kaynama sıcaklığının üzerinde ve Leidenfrost sıcaklığında da yürütülebilir.
- Bu çalışma sonunda elde edilen parametrelerin optimum değerlerinin arasında en fazla etkili olanlarının tam faktöriyel deney metotlarıyla tekrar incelenmesi gerekmektedir.
- Bu çalışmada da kullanılan hava destekli nozullar için farklı nozul geometrileri tasarlamaya yönelik araştırmalar yapılmalıdır.
- ANSYS-FLUENT gibi yazılımlar kullanılarak ısı transferi ve akış süreci matematiksel olarak irdelenebilir.

KAYNAKLAR

- Aguilar, G., Majaron, B., Verkruysse, W., Zhou, Y., Nelson, J., & Lavernia, E. (2011). Theoretical and experimental analysis of droplet diameter, temperature, and evaporation rate evolution in cryogenic sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(44), 3201-3211.
- Al-Ahamdi, H., & Yao, S. (2008). Experimental Study on the Spray Cooling of High Temperature Metal Using Full Cone Industrial Sprays. *Experimental Heat Transfer*(21), 38–54.
- Arcoumanis, C., & Chang, J. (1993). Heat transfer between a heated plate and an impinging transient diesel spray. *Exp. Fluid*(16), 105–119.
- Ashgriz, N. (2011). *Handbook of Atomization and Sprays*. Springer. doi:10.1007/978-1-4419-7264-4
- Ayres, D., Caldas, M., Semiao, V., & Carvalho, M. (2001). Prediction of the droplet size and velocity joint distribution for sprays. *Fuel*(80), 383±394.
- Babinsky, E., & Sojka, P. (2002). Modeling drop size distributions. *Progress in Energy and Combustion Science*(28), 303-329.
- Bachalo, W., Chigier, N., & Reitz, R. (2001). *Spray Technology Short Course Notes*. Pittsburg, USA.
- Baillard, C., Labergue, A., Caballina, O., & Borean, J. (2011). Experimental and numerical investigations of spray dynamics with an application in cooling of steel plate – How to improve the method of simulation. Estoril, Portugal: ILASS Europe, 24th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems.
- Batarseh, F. Z. (2008). *Spray generated by an airblast atomizer: atomization, propagation and aerodynamic instability*. Damstadt, Germany: Technische Universität Darmstadt.
- Bernardin, J., & Mudawar, I. (1997). Film boiling heat transfer of droplet streams and sprays. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40(2), 2579-2593.
- Canıylmaz, E., & Kutay, F. (2003). Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım. *J. Fac. Eng. Arch.*, 8(3), 51-63.
- Castanet, G., Liénart, T., & Lemoine, F. (2009). Dynamics and temperature of droplets impacting onto a heated wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(52), 670–679.
- Celik, C. (1996). Tasarımda yönlendirilmiş deney teknikleri. *Endüstri Mühendisliği*, 7(6), 14-20.
- Chan, Y., Charbel, F., Zhang, Y., Ray, S., & Yarin, A. (2011). Hydrodynamics of Drop Impact and Spray Cooling through Nanofiber Maths. *Journal of Undergraduate Research*, 4(43).
- Chang, J., Lin, C., & Huang, S. (2007). Experimental study on the extinction of liquid pool fire by water droplet streams and sprays. *Fire Safety Journal*(42), 295-309.
- Charalampous, G., Hadjiyiannis, C., Hardalupas, Y., & Taylor, A. (2010). Measurement of continuous liquid jet in atomizers with optical connectivity, electrical conductivity and high-speed photography techniques. Brno, Czech Republic: ILASS-Europe.

- Chen, C., Yang, C., & Hu, Y. (2013). Heat Transfer Enhancement of Spray Cooling on Flat Aluminum Tube Heat Exchanger. *Heat Transfer Engineering*, 34(1), 29-36.
- Chen, R.-H., Chow, L., & Navedo, J. (2002). Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(45), 4033–4043.
- Chen, R.-H., Chow, L., & Navedo, J. (2004). Optimal spray characteristics in water spray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(47), 5095-5099.
- Cheng, W., Han, F., Liu, Q., & Fan, H. (2011). Spray characteristics and spray cooling heat transfer in the non-boiling regime. *Energy*(36), 3399-3405.
- Cheng, W., Han, F., Liu, Q., & Zhao, R. (2012). Theoretical investigation on the mechanism of surface temperature non-uniformity formation in spray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(55), 5357–5366.
- Chigier, N. (1983). Drop Size and Velocity Instrumentation. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 9, 155-177.
- Choi, K., & Yao, S. (1987). Mechanisms of Film Boiling Heat Transfer of Normally Impacting Spray. *International Journal Heat Mass Transfer*, 30(2).
- Choo, Y., & Kang, B. (2004). Extraction of Sizes and Velocities of Spray Droplets. *KSME International Journal*, 18(7), 1236-1245.
- Chow, C., Tilton, D., & Pais, M. (1992). *Pulse Mitigating and Heat Transfer Vol.1-Spray Cooling*.
- Chung, I., & Presser, C. (2001). Fluid Property effects on sheet disintegration of simplex pressure swirl atomizer. *J.Propul.Power*, 17(1), 212-216.
- Ciofalo, M., Brucato, V., & Di Piazza, I. (1999). Investigation of the cooling of hot walls by liquid water sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(42), 1157-1175.
- Clemens, J., & Lasance, C. (2005, November 1). *Advances in High-Performance Cooling for Electronics*. <http://www.electronics-cooling.com/2005/11/advances-in-high-performance-cooling-for-electronics/#respond> adresinden alındı
- Comini, G., & Giudice, S. (1979). Dropwise Evaporation. *Journal of Heat Transfer* (101), 441-446.
- Ding, H., Huang, D., Huang, R., & Wang, Z. (2011). Experiment Study On Spray Structure Of A Multi-Hole GDI Injector. doi:978-1-4244-8039-5/11
- Dombrowski, N., & Fraser, R. (1954). A Photographic Investigation into the Disintegration of Liquid Sheets. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, 247(924), 101-130.
- Eggers, J., & Villermaux, E. (2008). *Physics of liquid jets*. IOP Publishing.
- Elkotb, M. (1982). Fuel atomization for spray modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*(8), 61-91.
- El-Shanawany, M., & Lefebvre, A. (1980). Airblast Atomization: The Effect of Linear Scale on Mean Drop Size. *J. Energy*, 4(4), 184-189.
- Estes, K., & Mudawar, I. (1995). Correlation of Sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16(38), 2985-2996.
- Estes, K., & Mudawar, I. (1995c, December). Comparison of Two-Phase Electronic Cooling Using Free Jets and Sprays. *Journal of Electronic Packaging*, 117(4), 323-332.

- Fillius, J. (2004). *An Experimental Study of Steady State High Heat Flux Removal Using Spray Cooling*. Monterey, California: Naval Postgraduated School.
- Fraser, R., & Eisenklam, P. (1953). Research into the performance of atomizers for liquids. *Imperial College of Chemical Engineering and Society*(7), 52-68.
- Fuller, R., & Wu, P. (2000). Effects of injection angle on atomization of liquid jets in transverse airflow. *AIAA Journal*, 38(1), 64-72.
- Gadgil, H., & Raghunandan, B. (2011). Some features of spray breakup in effervescent atomizers. *Exp Fluids*(50), 329-358.
- Gemci, T., Yakut, K., & Chigier, N. (2001). *Measurement of Spray Nozzle Parameters and Water Droplet Properties*. Pittsburg, USA: Spray System Technology Center.
- Gonzalez, R., Woods, R., & Eddins, S. (2003). *Digital Image Processing* (2nd ed.).
- Grant, R., & Middleman, S. (1966). Newtonian Jet Stability. *AIChE J.*(12), 669-678.
- Grout, S., Dumouchel, C., Cousin, J., & Nuglish, H. (2007). Fractal analysis of atomizing liquid flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 33(9), 1023-1044.
- Hosch, J., & Walters, J. (1977). High spatial resolution schlieren photography. *Appl. Opt.*(16), 473-485.
- Hsieh, S., & Tien, C. (2007). R-134a spray dynamics and impingement cooling in the non-boiling regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(50), 502-512.
- Ingebo, R., & Foster, H. (1957). *Drop-Size Distribution for Crosscurrent Breakup of Liquid Jets in Airstreams*. Washington, USA: Lewis Flights Propulsion Laboratory.
- Issa, R. J. (2009). *Multiphase Spray Cooling Technology in Industry*. Advanced Technologies. Retrieved from <http://www.intechopen.com/books/advanced-technologies/multiphase-spray-cooling-technology-in-industry>
- Jia, W., & Qiu, H. (2003). Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*(27), 829-838.
- Jiang, S., & Dhir, V. K. (2004). Spray cooling in a closed system with different fractions of non-condensibles in the environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(47), 5391-5406.
- Jones, A. (1977). A Review of Drop Size Measurement-The Application of Techniques to Dense Fuel Sprays. *Prog. Energy Combust. Sci.*(3), 225-234.
- Kackar, R. (1985). Off-line quality control, parameter design and Taguchi methods. *J. Qual. Tech.*(17), 176-209.
- Karwa, N., Kale, S., & Subbarao, P. (2007). Experimental study of non-boiling heat transfer from a horizontal surface by water sprays. *Experimental Thermal and Fluid Science*(32), 571-579.
- Kim, D. (2007). Effects of ambient gas density on spray characteristics of swirling liquid sheets. *J.Propul.Power*, 23(3), 603-611.
- Kim, J. (2007). Spray cooling heat transfer: The state of the art. *International Journal of Heat and Fluid Flow*(28), 753-767.
- Kline, S., & McClintock, F. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mech. Eng.*(75).

- Klinzing, W., Rozzi, J., & Mudawar, I. (1992). Film and Transition Boiling Correlations for Quenching of Hot Surfaces with Water Sprays. *J. Heat Treating*(9), 91-103.
- Kohnen, B. T., Musemic, E., Straßburger, F., Küpper, B., & Walzel, P. (2010). Measurement of the droplet size distribution of a full cone nozzle. *23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Brno, Czech Republic: ILASS – Europe 2010.
- Kyriopoulos, O., Roisman, I., Roisman, T., Stephan, P., & Tropea, C. (2008). Dynamics of a Liquid Film Produced by Spray Impact onto a Heated Target. (pp. 13-15). Como Lake, Italy: ILASS-08.
- Lal, S., Kushari, A., Gupta, M., Kapoor, J., & Maji, S. (2010). Experimental study of an air assisted mist generator. *Experimental Thermal and Fluid Science*(34), 1029–1035.
- Lam, C. (2008). On the Column Breakup Conditions From The Impact of a Droplet on an orifice.
- Lane, W. (1951). Shatter of Drops in Streams of Air. *Ind. Eng. Chem.*, 43(6), 1312-1317.
- Langrish, T., & Kota, K. (2007). A comparison of collision kernels for sprays from one and two-nozzle atomisation systems. *Chemical Engineering Journal*(126), 131–138.
- Laryea, G., & No, S. (2004). Spray angle and breakup length of charge-injected electrostatic pressure-swirl nozzle. *Journal of Electrostatics*(60), 37-47.
- Lee, S., & Kim, Y. (2004). Sizing of Spray Particles using Image Processing Technique. *KSME International Journal*, 18(6), 879-894.
- Lee, S., Kim, W., & Yoon, W. (2010). Spray Formation by a swirl spray jet in low speed cross-flow. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(2), 559-568.
- Lefebvre, A. (1989). *Atomization and Sprays* (Second Ed. ed.). Philadelphia, USA: Hemisphere.
- Li, B., Cader, T., Schwarzkopf, J., Okamoto, K., & Ramaprian, B. (2006). Spray angle effect during spray cooling of microelectronics: Experimental measurements and comparison with inverse calculations. *Applied Thermal Engineering*(26), 1788–1795.
- Li, X., & Tankin, R. (1987). *Combustion Sci Tech*. 56-65.
- Li, X., & Tankin, R. (1992). On the Prediction of Droplet Size and Velocity distributions in sprays through maximum entropy principle. *Particle & Particle Systems Characterization*(9), 195-201.
- Li, Z., Wu, Y., Cai, C., Zhang, H., Gong, Y., Takeno, K., . . . Lu, J. (2012). Mixing and atomization characteristics in an internal-mixing twin-fluid atomizer. *Fuel*(97), 306-314.
- Lin, L., & Ponnappan, P. (2002). Critical Heat Flux of Multi-Nozzle Spray Cooling in a Closed Loop. 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.
- Lin, L., & Ponnappan, R. (2003). Heat transfer characteristics of spray cooling in a closed loop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(46), 3737–3746.
- Liu, H., Gong, X., Li, W., Wang, F., & Yu, Z. (2006). Prediction of droplet size distribution in sprays of prefilming air-blast atomizers. *Chemical Engineering Science*(61), 1741 – 1747.

- Liu, M., Wang, Y., Liu, D., Xu, K., & Chen, Y. (2011). Experimental study of the effects of structured surface geometry on water spray cooling performance in non-boiling regime. *Front. Energy*, 5(1), 75-82. doi:DOI 10.1007/s11708-010-0014-0
- Liu, Z., & Reitz, R. (1997). An Analysis of the Distortion and Breakup Mechanisms of High Speed Liquid Drops. *Int. J. Multiphase Flow*, 23(4), 631-65.
- Lorenzetto, G., & Lefebvre, A. (1977). Measurements on Drop Size on a Plain jet Air Blast Atomizer. *AIAA J.*, 15(7), 1001-1010.
- Merzkirch, W. (1987). Shadowgraph Technique. doi:10.1615/AtoZ.s.shadowgraph_technique
- Moreira, A., Carvalho, J., & Panao, M. (2007). An experimental methodology to quantify the spray cooling event at intermittent spray impact. *International Journal of Heat and Fluid Flow*(28), 191-202.
- Mudawar, I., & Estes, K. (1996). Optimizing and Predicting CHF in Spray Cooling of a Square Surface. *Transactions of the ASME*(118), 672-679.
- Mudawar, I., & Valentine, W. (1989). Determination of the Local Quench Curve for Spray-Cooled Metallic Surfaces. *J. Heat Treat.* (1989) 7:107-121(7), 107-121.
- Mulhem, B., Schulte, G., & Fritsching, U. (2006). Solid-Liquid Separation in Suspension Atomization. *Chemical Engineering Science*(61), 2582–2589.
- Mullinger, P., & Chigier, N. (1974). The Design and Performance of Internal Mixing Multi-Jet Twin-Fluid Atomizers. *J. Inst. Fuel*(47), 251-261.
- Murakami, T., & Ishikawa, M. (1978). Laser Holographic Study on Atomization Processes. *Proceedings of 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, (s. 317-324). Tokyo.
- Mzad, H., & Tebbal, M. (2009). Thermal diagnostics of highly heated surfaces using water-spray cooling. *Heat Mass Transfer*(45), 287–295.
- Nakoryakov, V., Misyura, S., & Elistratov, S. (2012). The behavior of water droplets on the heated surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(55), 6609–6617.
- Negeed, S., Hidaka, S., Kohno, M., & Takata, Y. (2011). Experimental and analytical investigation of liquid sheet breakup characteristics. *International Journal of Heat and Fluid Flow*(32), 95-106.
- Ohnesorge, W. (1936). Formation of Drops by Nozzles and the Breakup of Liquid Jets. *Z. Angew. Math. Mech.*(16), 355-358.
- Oliphant, K., Webb, B., & McQuay, M. (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.
- Pais, M., Chow, L., & Mahefkey, E. (1992). Surface roughness and its effects on the heat transfer mechanism of spray cooling. *J Heat Transf.* 1(114), 211-219.
- Panao, M., & Moreira, A. (2004). Experimental study of the flow regimes resulting from the impact of an intermittent gasoline spray. *Experiments in Fluids*(37), 834-855.
- Panao, M., & Moreira, A. (2005 a). Flow characteristics of spray-impingement in PFI injection systems. *Experiment in Fluids*(39), 364-374.

- Panao, M., & Moreira, A. (2005b). Thermo-and fluid dynamics characterization of spray cooling with multiple-intermittent sprays. *Experimental Thermal and Fluid Science*(30), 79-96.
- Panao, M., & Moreira, A. (2009). Heat transfer correlation for intermittent spray impingement: A dynamic approach. *International Journal of Thermal Sciences*(48), 1853–1862.
- Pandey, S., & Kushari, A. (2008). A Controllable Twin- Fluid Internally Mixed Swirl Atomizer. *Recent Patents on Mechanical Engineering, 1*(1), 45-50.
- Pavlova, A., Otani, K., & Amitay, M. (2008). Active control of sprays using a single synthetic jet actuator. *International Journal of Heat and Fluid Flow*(29), 131–148.
- Phadke, M. (1989). *Quality engineering using robust design*. NJ, USA: Prentice-Hall.
- Pnueli, D. (1990). Transient Cooling by a Liquid Spray of a Surface Heated Above the Boiling Temperature. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*(17), 537-544.
- Press, L., Ochowiak, M., Rozanski, J., & Woziwodzki, S. (2009). The atomization of water–oil emulsions. *Experimental Thermal and Fluid Science*(33), 955–962.
- Qi, Y., Xu, B., & Cai, S. (2006). An application of digital image processing techniques to the characterization of liquid petroleum gas (LPG) spray. *Meas. Sci. Technol.*(17), 3229–3236.
- Qian, L., Lin, J., & Xiong, H. (2009). A Fitting Formula for Predicting Droplet Mean Diameter for Various Liquid in Effervescent Atomization Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*(19), 586–601. doi:10.1007/s11666-009-9457-4
- Ranz, W., & Marshall, W. (1952). Evaporation from drops (parts I and II). *Chemical Engineering Program*(48), 141–146, 173–180.
- Ravikumar, S., Jha, J., Sarkar, I., Pal, S., & Chakraborty, S. (2014). Enhancement of heat transfer rate in air-atomized spray cooling of a hot steel plate by using an aqueous solution of non-ionic surfactant and ethanol. *Applied Thermal Engineering*(64), 64-75.
- Reitz, R. D. (1999). Liquid Atomization and Spraying. In F. Kreith, & S. Berger, *Fluid Mechanics* (p. 177). Boca Raton: CRC Press LLC.
- Rini, D., Chen, R., & Chow, L. (2002, February). Bubble Behavior and Nucleate Boiling Heat Transfer in Saturated FC-72 Spray Cooling. *Journal of Heat Transfer*(124), 63-72.
- Rizk, N., & Lefebvre, A. (1985a). Internal flow characteristics of simplex swirl atomizer. *J.Propul.Power, 1*(3), 193-199.
- Ross, P. (1989). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. Singapore: McGraw-Hill.
- Rybicki, J., & Mudawar, I. (2006). Single-phase and two-phase cooling characteristics of upward-facing and downward-facing sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(49), 5-16.
- Sahin, B. (2004). Daralan-genişleyen geometride dizilmiş dikdörtgen kanatçıklı ısı değiştiricilerinde ısı ve akış karakteristiklerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*. Erzurum.
- Sallam, K., Aalburg, C., & Faeth, G. (2004). Breakup of Round Nonturbulent Liquid Jets in Gaseous Crossflow. *AIAA Journal, 42*(12), 2529-2540.

- Santolaya, J., Aísa, L., Calvo, E., García, I., & García, J. (2010). Analysis by droplet size classes of the liquid flow structure in a pressure swirl hollow cone spray. *Chemical Engineering and Processing*(49), 125–131.
- Sellens, R. W., & Brzustowski, T. A. (1985). A prediction of the drop size distribution in a spray from first principles. *Atomisation and Spray Technology*, 2(1), 89–102.
- Semiao, V., Andrade, P., & Carvalho, M. (1996). Spray characterization: numerical prediction of Sauter mean diameter and droplet size distribution. *Fuel*, 15(75), 1707–1711.
- Settles, G. S. (2001). *Schlieren and Shadowgraph Techniques*.
- Sevik, M., & Park, S. (1973). The splitting of drops and bubbles by turbulent fluid flow. *Trans. ASME J. Fluid Eng.*(95), 53.
- Shao, J., & Yan, Y. (2008). Digital Imaging Based Measurement of Diesel Spray Characteristics. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 57(9), 2067–2073.
- Shao, J., Yan, Y., Greeves, G., & Smith, S. (2003). Quantitative characterization of diesel sprays using digital imaging techniques. *Meas. Sci. Technol.*(14), 1110–1116.
- Shavit, U. (2001). Gas-liquid interaction in the liquid breakup region of twin-fluid atomization. *Experiments in Fluids*(31), 550–557.
- Silk, E. A., Kim, J., & Kiger, K. (2006). Spray cooling of enhanced surfaces: Impact of structured surface geometry and spray axis inclination. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(49), 4910–4920.
- Simmons, H. (1979). The Prediction of Sauter Mean Diameter for Gas Turbine Fuel Nozzles of Different Types. *ASME Paper*, 79-WA/GT-5.
- Sirotkin, F., & Yoh, J. (2012). A new particle method for simulating breakup of liquid jets. *Journal of Computational Physics*, 1650–1674.
- Sivadas, V., & Moreira, A. L. (2006). Surface Waves on Liquid Sheets Emerging from Air-assist Atomizers. Kyoto, Japan: ICLASS-06.
- Sivathanu, Y., & Gore, J. (1993). A Discrete Probability Function Method for the Equation of Radiative Transfer. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 49(3), 269–280.
- Somasundaram, S., & Tay, A. (2013). Comparative study of intermittent spray cooling in single and two phase regime. *International Journal of Thermal Sciences*(74), 174–182.
- Soriano, G. (2011). *Study of the Physics of Droplet Impingement Cooling*.
- Sovani, S., Sojka, P., & Sivathanu, Y. (1999). Prediction of Drop Size Distributions from First Principles: The Influence of Fluctuations in Relative Velocity and Liquid Physical Properties. *Atomization and Sprays*(9), 113–152.
- Sovani, S., Sojka, P., & Sivathanu, Y. (2000). Prediction of Drop Size Distributions from First Principles: Joint-PDF Effects. *Atomization and Sprays*(10), 587–602.
- Sridhara, S., & Raghunandan, B. (2010). Photographic Investigations of Jet Disintegration in Airblast Sprays. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 3(2), 111–123.
- Srivastava, A., Goering, C., Rohrbach, R., & Buckmaster, D. (2006). *Engineering Principles of Agricultural Machines*.

- Strotos, G., Gavaises, M., Theodorakakos, A., & Bergeles, G. (2008). Numerical investigation of the cooling effectiveness of a droplet impinging on a heated surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(51), 4728–4742.
- Strutt, J., & Rayleigh, L. (1878). On the instability of jets. *Proceedings of the London mathematical society*(10), 4-13.
- Sümer, B., Erkan, N., Uzol, O., & Tuncer, İ. (2012). Basıncılı Girdap Tipi Bir Püskürtecin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. *IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*. İstanbul: Hava Harp Okulu.
- Tagucgi, G., & Clausing, D. (1990). Robust Quality. *Harvard Business Review*, 65-76.
- Taguchi, G. (1987). System of experimental design, quality resources. New York: International Publications.
- Tao, Y., Huai, X., Wang, L., & Guo, Z. (2011). Experimental characterization of heat transfer in non-boiling spray cooling with two nozzles. *Applied Thermal Engineering*(31), 1790-1797.
- Taylor, G. (1950). The boundary layer in converging nozzle of a swirl atomizer. *Q. J. Mech. Appl. Math*, 3(2), 129-139.
- Toda, S. (1971). A Study of Mist Cooling (1st. Report: Investigation of Mist Cooling). *Heat Transfer-Japan*(1), 39-50.
- Visaria, M., & Mudawar, I. (2008). Effects of high subcooling on two-phase spray cooling and critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(51), 5269–5278.
- Wang, X., & Lefebvre, A. (1987). Atomiz. *Spray Tech.* 3-209.
- Wang, X., Lu, G., Peng, X., & Wang, B. (2005). Evaporation and Nucleate Boiling of an Individual Droplet on Surfaces. *Proceedings of HT2005 2005 ASME Summer Heat Transfer Conference*. San Francisco. Retrieved from <http://www.paper.edu.cn>
- Wang, Y., Liu, M., Liu, D., & Xu, K. (2011). Heat Flux Correlation for Spray Cooling in the Nonboiling Regime. *Heat Transfer Engineering*, 32(11-12), 1075-1081.
- Watanawanyoo, P., Mochida, H., Furukawa, T., Nakamura, M., & Hiraharab, H. (2012). Experimental Study on the Spray Characteristics of an Air Assisted Atomizer with Internal Mixing Chamber. *European Journal of Scientific Research*, 84(4), 507-521.
- Webb, B., Queiroz, M., Oliphant, K., & Bonin, M. (1992). Onset of Dry-Wall Heat Transfer in Low Mass Flux Spray Cooling. *Journal of Experimental Heat Transfer*(5), 33-50.
- Wendelstorf, J., Spitzer, K.-H., & Wendelstorf, R. (2008). Spray water cooling heat transfer at high temperatures and liquid mass fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(51), 4902–4910.
- Xie, J., Gan, Z., Duan, F., Wong, T., Yu, S., & Zhao, R. (2013b). Characterization of spray atomization and heat transfer of pressure swirl nozzles. *International Journal of Thermal Sciences*(68), 94-102.
- Xie, J., Tan, Y., Duan, F., Ranjith, K., Wong, T., Toh, K., . . . Chan, P. (2013). Study of heat transfer enhancement for structured surfaces in spray cooling. *Applied Thermal Engineering*(59), 464-472.

- Yakut, K., Gemci, T., & Chigier, N. (2001). *Analysis of Chocolate Atomization and Spray Coating of Ice Cream Cones for Nestle*. Pittsburg, USA: Carnegie Mellon University.
- Yamamoto, T., & Kuwahara, T. (2011). Numerical Simulation of Fine Mist Cooling for High Temperature Work Material. Delft, The Netherlands: 22nd International Symposium on Transport Phenomena.
- Yang, J., Chow, L., & Pais, M. (1996, August). Nucleate Boiling Heat Transfer in Spray Cooling. *Journal of Heat Transfer* (118), 668-671.
- Yigit, C., Sozbir, N., Issa, R. J., & Guven, H. (2009). Experimental and Computational Investigation of Spray Cooling on High Temperature Metal Surfaces. Abu Dhabi: Proceedings of the Fourth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications.
- Zhang, Z., Li, J., & Jiang, P. (2013). Experimental investigation of spray cooling on flat and enhanced surfaces. *Applied Thermal Engineering* (51), 102-111.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, Orta ve Lise eğitimini Erzurum’da tamamladı. 2002 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2003 yılında Makina Mühendisleri Odası Konya Şube Aksaray İl Temsilciliği’nde teknik görevli olarak çalıştı. 2007 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisansını tamamladı. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı’nda Doktora başladı. 2005 yılından itibaren İbrahim Çeçen Üniversitesi Ağrı Meslek Yüksekokulu’nda Arş. Gör. olarak çalışmaktadır. Evli ve 1 çocuk babasıdır.