



**ISI EŞANJÖRLERİNDE  
OPTİMUM SPREY KARAKTERİSTİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Altuğ KARABEY**

**Doktora Tezi  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji Bilim Dalı  
Prof. Dr. Kenan YAKUT**

**2016**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**ISI EŞANJÖRLERİNDE OPTİMUM SPREY  
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Altuğ KARABEY**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2016**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

ISI EŞANJÖRLERİNDE OPTİMUM SPREY KARAKTERİSTİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ

Prof. Dr. Kenan YAKUT danışmanlığında, Altuğ KARABEY tarafından hazırlanan bu çalışma 02 / 12 / 2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Enerji Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak ~~oy birliği/oy çokluğu (.../...)~~ ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Kenan YAKUT

İmza :

Üye : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Taner TEKİN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Sedat YAYLA

İmza :

Üye : Doç. Dr. Mehmet KAYA

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 27.../.../2017 tarih ve 30.../.../26..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ  
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 2013/103

**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

### ISI EŞANJÖRLERİNDE OPTİMUM SPREY KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Altuğ KARABEY

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

Danışman: Prof. Dr. Kenan YAKUT

Bir atomizerden belirli bir basınç ile çıkan kararsız bir sıvı kütlesi, aerodinamik direnç kuvvetlerinin ve atomizer tasarımına göre değişen çeşitli kuvvetlerin etkisiyle parçalanarak tabakalara, ligamentlere ve son olarak damlacıklara dönüşür. Sprey soğutma prosesi nozul çapı, yüzey alanı, yüzey geometrisi, kritik ısı akısı, kütle akısı, yer çekimi, spreyleme açısı, yüzey eğimi gibi pek çok parametreye bağlıdır. Sprey yapısını daha iyi analiz edebilmek için çok sayıda deney sonucuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcı kullanılarak yapılan bu deneysel çalışmada, nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı ( $h/d$ ), kanat yüksekliği, kanat genişliği, kanatlar arası  $x$  doğrultusundaki mesafe, kanatlar arası  $y$  doğrultusundaki mesafe, dilimler arası  $x$  doğrultusundaki mesafe, dilimler arası  $y$  doğrultusundaki mesafe, sıvı debisi, hava debisi ve zamanın ısı ve akım karakteristiklerine etkileri Taguchi yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Belirlenen on bir parametre için  $L_{27}(3^{11})$  ortogonal dizisi deney planı olarak seçilmiştir. Performans karakteristiği olarak Nusselt sayısı belirlenmiştir. Optimum sonuçlar; 15 mm kanat yüksekliği, 45 mm kanat genişliği,  $45^\circ$  kanat açısı, 20 mm kanatlar arası  $x$  doğrultusundaki mesafe, 20 mm kanatlar arası  $y$  doğrultusundaki mesafe, 20 mm dilimler arası  $x$  doğrultusundaki mesafe, 15 mm dilimler arası  $y$  doğrultusundaki mesafe,  $3.6 \text{ m}^3/\text{h}$  hava debisi,  $21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$  su debisi, (667) nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı ve 5 s spreyleme zamanı olarak tespit edilmiştir. Optimize edilmiş ısı alıcıyla yapılan deneyler sonucunda Nu sayısı, jet kalınlığı ve spreyleme açısı için korelasyonlar elde edilmiştir.

**2016, 162 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Sprey soğutma, ısı transferinin iyileşmesi, atomizasyon, Taguchi yöntemi, görüntü işleme

## ABSTRACT

Ph. D. Thesis

### DETERMINATION OF SPRAY CHARACTERISTICS FOR HEAT EXCHANGER

Altuğ KARABEY

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

Supervisor: Prof. Dr. Kenan YAKUT

An unstable mass of liquid, flowing out of a nozzle with a given pressure, will become into sheets, ligaments and droplets respectively, due to the aerodynamic resistance forces and other forces emerging from various atomizer designs. Spray cooling process has many parameters such as extended surface, angle of inclination, effect of gravity, diameter of nozzle, angle of spray, mass flux, geometry of cooled surface, thermal performance and critical heat flux of spray etc. There is need for more experimental results to understand better the complex structure of the spray.

In these experimental study with using rectangular pin fin heat sinks, the effects of the longitudinal and lateral distances of the consecutively arranged nozzle or diffuser-like fin pairs, widths of the fins, angle of fins, heights of fins, spraying time, air flow rate, liquid flow rate (ALR, the ratio of air-liquid flow rate) and the ratio of the nozzle-heat sink distance to the nozzle diameter (h/d) on heat and flow characteristics have been investigated by using Taguchi experimental design method. For this reason, characteristics of flow and heat transfer are considered separately. Nusselt number considered as performance statistic,  $L_{27}(3^{11})$  orthogonal array has been selected as an experimental design plan for the eleven parameters mentioned above. The Nusselt number was calculated by taking into account the characteristic length of heat sink and the optimized results were found to be fin width of 45 mm, fin angle of  $45^\circ$ , fin height of 15 mm, x direction distance between fins of 20 mm, y direction distance between fins of 20 mm, x direction distance between slices of 15 mm, y direction distances between slices of 20 mm, air flow rate of  $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , liquid flow rate of  $21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , spraying time of 5 s and the ratio of the nozzle-heat sink distance to the nozzle diameter (h/d) of 667. 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.

**2016, 162 pages**

**Keywords:** spray cooling, heat transfer enhancement, atomization, Taguchi methods, image processing.

## TEŞEKKÜR

Doktora tezimin belirlenmesi ve tamamlanması aşamalarında, öncelikle tezimi değerlendirerek değerli görüş ve eleştirileriyle her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kenan YAKUT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamdaki desteklerinden dolayı Yüzüncü Yıl Üniversitesi Erciş Meslek Yüksekokulu'nun değerli öğretim elemanlarına, deney tasarımında bilgilerine başvurduğum Sayın Prof. Dr. Cafer ÇELİK'e ve Yrd. Doç. Dr. Faruk YEŞİLDAL'a teşekkür ederim.

Çalışmadaki ekonomik destekleri nedeniyle Atatürk Üniversitesi Araştırma Fon Saymanlığı'na (BAP-2013/103), tezin hazırlanmasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen diğer mesai arkadaşlarıma ve fakültemizin teknik personeline şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam esnasında bana destek olan Sayın Öğr. Gör. Rıdvan YAKUT'a, Sayın Sahar AMJADI'ye, çok değerli bölüm arkadaşlarıma ve gönül dostlarıma teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Son olarak, yalnızca doktora tezimin hazırlanması aşamasında değil başarıyla sonuçlandırabildiğim her işte sınırsız manevi desteğini yanımda hissettiğim sevgili aileme şükran duygularımı sunarım.

**Altuğ KARABEY**

**Aralık, 2016**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Sıvı Atomizasyonu ve Sprey Uygulamalarının Literatürdeki Yeri .....	2
1.2. Spreyi Etkileyen Temel Parametreler.....	30
1.2.1. Yüzey gerilimi .....	31
1.2.2. Viskozite.....	32
1.2.3. Boyutsuz sayılar .....	33
1.2.4. Sprey biçimi .....	34
1.2.5. Sprey açısı .....	34
1.2.6. Damlacık boyutu .....	35
1.3. Sprey Karakteristik Çapları ve SMD Korelasyonları.....	40
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>48</b>
2.1. Damlacık Çarpma Rejimleri.....	48
2.1.1. Yapışma rejimi .....	49
2.1.2. Sıçrama rejimi .....	50
2.1.3. Yayılma rejimi.....	52
2.1.4. Parçalanma rejimi.....	54
2.2. Isı Transferi Kavram ve Tanımları .....	56
2.2.1. İletimle ısı transferi .....	57
2.2.2. Taşınım ile ısı transferi .....	57
2.2.3. Işınım ile ısı transferi.....	58
2.3. Sprey Soğutmada Isı Transfer Mekanizmaları.....	60
2.4. Atomizer (Nozul) Çeşitleri .....	62
2.4.1. Basınçlı sıvı atomizerleri.....	62

2.4.2. Pnömatik atomizerler .....	65
2.4.3. Diğer atomizerler.....	67
2.5. Sprey Görüntüleme Yöntemleri .....	69
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>71</b>
3.1. Sprey Soğutma Prosesi .....	71
3.2. Deney Düzenegi .....	72
3.3. Test Bölgesi ve Kullanılan Cihazlar.....	74
3.4. Test Elemanları.....	76
3.5. Sprey Soğutma Deney Yöntemi .....	77
3.6. Deney Tasarım Teknikleri ve Taguchi Deney Tasarımı .....	78
3.7. Deneysel Verilerin Karakteristik Hesaplamalarda Kullanılması .....	84
3.8. Hesaplamalarda Kullanılan Boyutsuz Sayılar .....	89
3.9. Sprey Bozulma Mesafesi ve Damlacık Çapı.....	89
3.10. Deneysel Belirsizlikler .....	93
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>95</b>
4.1. Parametreler ve Taguchi Deney Planı .....	95
4.2. Isı Transferi Analizi.....	99
4.2.1. Termal görüntüler.....	100
4.3. Taguchi Analizi .....	127
4.4. Nusselt Korelasyonu.....	134
4.5. Sprey Görüntüleri ve Akış Analizi .....	138
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>148</b>
KAYNAKLAR .....	152
ÖZGEÇMİŞ .....	163



## SİMGELER DİZİNİ

$\dot{m}$	Kütlelel debi, kg/s
$\dot{N}''$	Damlacık akısı, 1/m <sup>2</sup> s
$\dot{q}''$	Isı akısı, W/m <sup>2</sup>
$\dot{V}$	Hacimsel debi, m <sup>3</sup> /s
$\dot{V}''$	Hacimsel akı, m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> s
$\mu$	Dinamik (mutlak) viskozite, Pa.s
$a$	Isıl yayılım katsayısı, m <sup>2</sup> /s
$A$	Alan, m <sup>2</sup>
ALR	Hava-sıvı kütlelel debi oranı, $\dot{m}_A/\dot{m}_L$
BL	Bozulma mesafesi, m
C	Özgül ısı, kJ/kgK
CCD	Charge-coupled device
$C_D$	Sürüklenme katsayısı
$C_d$	Nozul tahliye katsayısı
D	Sprey çapı
d	Nozul çapı
$D^*$	Boyutsuz damla çapı
$d_{32}$	Sauter Ortalama Çap (SMD)
$d_j$	Jet çapı
Ec	Eckert sayısı
h	Isı transfer katsayısı, W/m <sup>2</sup> K
H	Nozul-yüzey mesafesi, mm
Ja	Jakob sayısı, $C_p\Delta T_{sat}/h_{fg}$
Nu	Nusselt sayısı, $hD/k$
Oh	Ohnesorge sayısı, $We^{0.5}/Re$
P	Basınç, Pa
$P_a$	Hava basıncı, Pa
$P_l$	Sıvı basıncı, Pa
Pr	Prandtl sayısı, $\nu/\alpha$
Re	Reynolds sayısı
SMD	Sauter Ortalama Çap, $\mu\text{m}$

T	Sıcaklık, °C
t	Zaman, s
T <sub>d</sub>	Doyma sıcaklığı, °C
T <sub>y</sub>	Yüzey sıcaklığı, °C
U	Hız, m/s
U <sub>R</sub>	Bağıl hız, m/s
We	Weber sayısı, $\rho u^2 d_0 / \sigma$
$\Gamma$	Gama fonksiyonu
$\Delta P$	Nozul boyunca basınç kaybı, Pa
$\lambda$	Spreyin boyun yaptığı yerdeki dalga boyu
$\lambda_{opt}$	Optimum dalga boyu
$\nu$	Kinematik viskozite, m <sup>2</sup> /s
$\sigma$	Yüzey gerilmesi, N/m

#### Alt indisler

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

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Sprey bozulma açısının şematik görünümü.....	35
Şekil 1.2. Düz dairesel jetin parçalanması .....	36
Şekil 1.3. Jet hızı ile ayrılma mesafesinin değişimi ve farklı akış rejimleri .....	37
Şekil 1.4. Silindirik sprej jetleri için farklı akış rejimi bölgeleri .....	39
Şekil 2.1. Damlacığın çarpma rejimleri. ....	49
Şekil 2.2. Farklı çap ve hıza sahip iki damlacığın sıçrama rejimi .....	50
Şekil 2.3. 400°C sıcaklığa sahip nikel yüzey üzerinde sıçrayan su damlacığı .....	51
Şekil 2.4. 200°C sıcaklığa sahip yüzey üzerinde sıçrayan n-heptan damlacığı .....	52
Şekil 2.5. Yayılma rejimi örnek görüntüsü.....	53
Şekil 2.6. Yayılma rejimi örnek görüntüsü.....	53
Şekil 2.7. Su damlacığının paslanmaz çelik malzeme üzerindeki parçalanma rejimi .....	56
Şekil 2.8. Sabit sıcaklıkta bir düz levha üzerinde akış için hız sınır tabaka kalınlığı ve yerel ısı transfer katsayısının değişimi .....	59
Şekil 2.9. Sprej soğutma prosesinde ısı transfer mekanizmaları.....	60
Şekil 2.10. Isı transfer mekanizması için örnek model.....	61
Şekil 2.11. Bazı basınçlı sıvı jet atomizer çeşitleri .....	63
Şekil 2.12. Eliptik çıkış ağızlı düzlemsel jet atomizeri.....	64
Şekil 2.13. Bazı döngülü atomizer çeşitleri .....	65
Şekil 2.14. Örnek pnömatik atomizer tasarımları .....	66
Şekil 2.15. Dönel atomizer çeşitleri.....	68
Şekil 3.1. Sprej soğutma deney setinin şematik görünümü .....	73
Şekil 3.2. Deney sisteminin görünüşü .....	73
Şekil 3.3. Basınç tankının görünüşü .....	74
Şekil 3.4. DXD-HS1 hava destekli nozul, debi ölçerler ve basınçölçerlerin görünüşü .....	75
Şekil 3.5. Framelink ve IMPERX ICL-B0620 CCD kameranın görünüşü .....	75
Şekil 3.6. Testo FC-875-2 model termal kameranın görünüşü.....	75
Şekil 3.7. PolyScience kapalı devre su/yağ banyosunun görünüşü .....	76

<b>Şekil 3.8.</b> Test elemanlarının görünüşü .....	77
<b>Şekil 4.1.</b> Isı alıcı üzerinde incelenecek parametreler.....	98
<b>Şekil 4.2.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre hazırlanan test elemanları .....	98
<b>Şekil 4.3.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 1. Deney için termal görüntü .....	100
<b>Şekil 4.4.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 1. Deney için termal görüntü .....	101
<b>Şekil 4.5.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 2. Deney için termal görüntü .....	101
<b>Şekil 4.6.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 2. Deney için termal görüntü .....	102
<b>Şekil 4.7.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 3. Deney için termal görüntü .....	102
<b>Şekil 4.8.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 3. Deney için termal görüntü .....	103
<b>Şekil 4.9.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 4. Deney için termal görüntü .....	103
<b>Şekil 4.10.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 4. Deney için termal görüntü .....	104
<b>Şekil 4.11.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 5. Deney için termal görüntü .....	104
<b>Şekil 4.12.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 5. Deney için termal görüntü .....	105
<b>Şekil 4.13.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 6. Deney için termal görüntü .....	105
<b>Şekil 4.14.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 6. Deney için termal görüntü .....	106
<b>Şekil 4.15.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 7. Deney için termal görüntü .....	106
<b>Şekil 4.16.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 7. Deney için termal görüntü .....	107
<b>Şekil 4.17.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 8. Deney için termal görüntü .....	107
<b>Şekil 4.18.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 8. Deney için termal görüntü .....	108
<b>Şekil 4.19.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 9. Deney için termal görüntü .....	108
<b>Şekil 4.20.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 9. Deney için termal görüntü .....	109
<b>Şekil 4.21.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 10. Deney için termal görüntü .....	109
<b>Şekil 4.22.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 10. Deney için termal görüntü .....	110
<b>Şekil 4.23.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 11. Deney için termal görüntü .....	110
<b>Şekil 4.24.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 11. Deney için termal görüntü .....	111
<b>Şekil 4.25.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 12. Deney için termal görüntü .....	111
<b>Şekil 4.26.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 12. Deney için termal görüntü .....	112
<b>Şekil 4.27.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 13. Deney için termal görüntü .....	112
<b>Şekil 4.28.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 13. Deney için termal görüntü .....	113
<b>Şekil 4.29.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 14. Deney için termal görüntü .....	113
<b>Şekil 4.30.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 14. Deney için termal görüntü .....	114
<b>Şekil 4.31.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 15. Deney için termal görüntü .....	114

<b>Şekil 4.32.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 15. Deney için termal görüntü .....	115
<b>Şekil 4.33.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 16. Deney için termal görüntü .....	115
<b>Şekil 4.34.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 16. Deney için termal görüntü .....	116
<b>Şekil 4.35.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 17. Deney için termal görüntü .....	116
<b>Şekil 4.36.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 17. Deney için termal görüntü .....	117
<b>Şekil 4.37.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 18. Deney için termal görüntü .....	117
<b>Şekil 4.38.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 18. Deney için termal görüntü .....	118
<b>Şekil 4.39.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 19. Deney için termal görüntü .....	118
<b>Şekil 4.40.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 19. Deney için termal görüntü .....	119
<b>Şekil 4.41.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 20. Deney için termal görüntü .....	119
<b>Şekil 4.42.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 20. Deney için termal görüntü .....	120
<b>Şekil 4.43.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 21. Deney için termal görüntü .....	120
<b>Şekil 4.44.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 21. Deney için termal görüntü .....	121
<b>Şekil 4.45.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 22. Deney için termal görüntü .....	121
<b>Şekil 4.46.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 22. Deney için termal görüntü .....	122
<b>Şekil 4.47.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 23. Deney için termal görüntü .....	122
<b>Şekil 4.48.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 23. Deney için termal görüntü .....	123
<b>Şekil 4.49.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 24. Deney için termal görüntü .....	123
<b>Şekil 4.50.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 24. Deney için termal görüntü .....	124
<b>Şekil 4.51.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 25. Deney için termal görüntü .....	124
<b>Şekil 4.52.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 25. Deney için termal görüntü .....	125
<b>Şekil 4.53.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 26. Deney için termal görüntü .....	125
<b>Şekil 4.54.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 26. Deney için termal görüntü .....	126
<b>Şekil 4.55.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 27. Deney için termal görüntü .....	126
<b>Şekil 4.56.</b> Taguchi $L_{27}(3^{11})$ deney planına göre 27. Deney için termal görüntü .....	127
<b>Şekil 4.57.</b> Parametrelerin Nusselt üzerine katkı yüzdeleri .....	130
<b>Şekil 4.58.</b> Parametrelerin Nusselt sayısı üzerine etkileri.....	131
<b>Şekil 4.59.</b> Spreyleme zamanının Nusselt sayısı üzerine etkileri .....	135
<b>Şekil 4.60.</b> Kanat yüksekliğinin Nusselt sayısı üzerine etkileri.....	136
<b>Şekil 4.61.</b> Kanat genişliğinin Nusselt sayısı üzerine etkileri.....	137
<b>Şekil 4.62.</b> h/d mesafesinin Nusselt sayısı üzerine etkileri.....	138
<b>Şekil 4.63.</b> ALR=0,12 için sprey görüntüsü .....	139

Şekil 4.64. ALR=0,084 için sprej görüntüsü .....	139
Şekil 4.65. ALR=0,116 için sprej görüntüsü .....	140
Şekil 4.66. ALR=0,166 için sprej görüntüsü .....	140
Şekil 4.67. ALR=0,206 için sprej görüntüsü .....	141
Şekil 4.68. ALR=0,144 için sprej görüntüsü .....	141
Şekil 4.69. ALR= 0,144 için Image-J’de görüntü analizi .....	142
Şekil 4.70. Basınç-hacimsel debi oranlarının değişim grafiği .....	143
Şekil 4.71. ALR-Boyutsuz damla çapı (D*) grafiği .....	144
Şekil 4.72. Batarseh ve Shanawany SMD korelasyonları ile ALR-SMD değişimi.....	144
Şekil 4.73. $L/d_0 - We^{0.5}$ grafiği.....	145
Şekil 4.74. Jet kalınlığı ile jet hızının değişimi.....	146
Şekil 4.75. Re sayısı ile jet bozulma mesafesinin değişimi .....	146
Şekil 4.76. Sprej Enerji-Momentum oranları grafiği .....	147

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Jet bozulma rejimlerinin sınıflandırılması .....	36
Çizelge 1.2. Literatürdeki SMD korelasyonları ve kullanım aralıkları .....	44
Çizelge 2.1. Isı transferi katsayısının tipik değerleri .....	58
Çizelge 3.1. Literatürdeki bazı bozulma mesafesi korelasyonları .....	92
Çizelge 3.2. Ölçülen büyüklüklerdeki belirsizlikler .....	94
Çizelge 4.1. Çalışmada incelenen parametreler ve değerleri .....	96
Çizelge 4.2. Seçilen $L_{27}(3^{11})$ deney planı.....	96
Çizelge 4.3. Isı transfer analizine göre elde edilen sonuçlar.....	99
Çizelge 4.4. Hesaplanan karakteristik büyüklükler ve bunlara ait S/N değerleri .....	128
Çizelge 4.5. Parametrelerin Nusselt üzerine katkı yüzdeleri .....	129
Çizelge 4.6. Nusselt için yapılan varyans analizi sonuçları.....	129
Çizelge 4.7. Nusselt sayısına göre yapılan optimizasyon ve optimum değerler.....	132
Çizelge 4.8. Sprey akış analizinde incelenen parametreler ve değerleri.....	142

## 1. GİRİŞ

Genel ifadeyle sprej, bir atomizerden belirli bir basınç ile çıkan sıvı kütlesinin, aerodinamik direnç kuvvetlerinin ve atomizer tasarımına göre değişen çeşitli kuvvetlerin etkisi sonucu parçalanması ile oluşturulan, çeşitli hız ve büyüklükteki damlacıklar topluluğudur. Atomizer çıkışından itibaren kararsız sıvı kütlesi sırasıyla katman oluşumu, ligament oluşumu ve damlacık oluşumu şeklinde parçalanma mekanizmasını gerçekleştirir. Spreyi oluşturan damlacıkların hız ve çap değerleri önemlidir. Belirli bir hız veya çap aralığındaki damlacıklar gruplandırıldığında damlacık hızı ve damlacık çapı dağılımı ortaya çıkar ki bu iki dağılım spreji karakterize eden temel büyüklüklerdir.

Sprej uygulamalarında damlacık çapını belirleyen etmenler; atomizer tasarımı, akış şartları ve akışkan özellikleridir. Başlıca akışkan özellikleri yüzey gerilimi, yoğunluk ve viskozitedir. Yoğunluk ve yüzey gerilimi, yalnızca sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişirken viskozite Newtonien olmayan akışkanlarda şekil değiştirme hızına bağlı olarak da değişir. Bununla birlikte nozul çapı, damlacık hızı, damlacık sıcaklığı, sprej sıvısının cinsi damlacık çapının belirlenmesinde etkili parametrelerdir.

Atomizasyon; soğutma uygulamaları süresince düşük sıcaklıklarda geniş yüzey alanlarından enerji transfer etmek için kullanılır. Havuz kaynamaya göre ısı yüzeyden daha kolay şekilde uzaklaştırılır. Bu nedenle ısı transfer oranı daha yüksektir. Bununla birlikte damlacıklar kendi aralarında kütle, enerji ve momentum değişimlerinden etkilenirler.

Sprej soğutma ile etkili bir enerji transferi sağlanır. Günümüzde mühendislik uygulamaları için araştırılan yüksek ısı transferi, ısı taşınım homojenliği, düşük damlacık çarpma hızı ile nitelenen bir teknolojidir. Sprej soğutma esnasındaki ısı taşınım mekanizmasının yeterince anlaşılabilmesi ve olayın birçok parametreye bağlılığı ile safhalar arasındaki etkileşimin tam çözülememiş olması nedeniyle sıvı atomizasyon mekanizmasıyla ilgili genel esaslar henüz ortaya konulamamıştır. Buna



karşın prosesteki karmaşık noktaları göz ardı ederek ideale yakın koşullarda problemin önemli parametrelerini tanımlayarak çözümlenebilmek adına, tek damlacık ile yapılan araştırmalar ciddi bir adım oluşturmaktadır.

Sıvıların atomizasyonu ile ilgili çalışmalar özellikle son 20 yıl içerisinde ivme kazanarak endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Atomizasyon uygulamalarına örnek olarak metal yüzeylerin ve elektronik elemanların soğutulması, kurutma uygulamaları, nemlendirme, yıkama, sulama ve yangın söndürme işlemleri, sıvı püskürtmeli yakıt enjeksiyon sistemleri, yüzey kaplama ve spreyc boyama işlemleri, tarımsal ilaçlama, ilaç imalatı, ağız ve burun yoluyla alınan spreyc ilaç mekanizmaları gösterilebilir. Atomizasyonun geniş kullanım alanı olmasından ötürü deneysel incelemeler, spreyc parametrelerini nitel ve nicel şekilde analiz edebilmek için gereklidir.

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

### **1.1. Sıvı Atomizasyonu ve Spreyc Uygulamalarının Literatürdeki Yeri**

Sıvıların atomizasyonu konusundaki ilk ve en önemli kaynak 1989 yılında Lefebvre tarafından oluşturulmuştur. Bunu sıvı yakıt atomizasyonu konusunda geniş bilgiler içeren Bavyel ve Orzechowski (1993) takip etmiştir. Bu kaynak spreyc parametreleriyle ilgili günümüzde de hazırlanan kaynaklara yol gösterici niteliği taşımaktadır. 2002 yılında Nasr *et al.*'un atomizer çeşitleri ve atomizer tasarımıyla ilgili kaynak oluşturmalarını takiben 2011 yılında Nasser Ashgriz, "Spreyc ve Atomizasyon El Kitabı" başlıklı detaylı bilgilere sahip kaynak kitap yayınlamışlardır.

Atomizasyonun temelini sıvı jetlerin parçalanması konusu oluşturmaktadır. Düşük hızlarda bir sıvı jetinin yüzeyindeki kararsızlık dalgalarının yol açtığı parçalanma Rayleigh (1879) tarafından başarıyla modellenmiştir. Weber (1931) ve Ohnesorge (1936) ise yüksek hızlarda çalışmalar gerçekleştirmiş, aerodinamik direnç kuvvetlerinin

etkisini de hesaba katarak farklı akış rejimleri ortaya koymuşlardır. Sprey içerisinde yer alan damlacıkların temsili çap değeri ile tarif edilerek damlacıkların çap ve hız dağılımlarının modellenmesi analiz sürecine yarar sağlayarak uygulamanın kalitesini artırmıştır. Babinsky and Sojka (2002), sprej akışlarında kullanılan temsili çap değerleri ve çap dağılımı modellerini incelemişlerdir.

Atomizasyon analizi ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar, XX yüzyılın ikinci yarısında geliştirilen akış görüntüleme teknikleri ve optik esaslı ölçüm yöntemleri sayesinde ivme kazanmıştır. 1960'lı yıllarda optik ölçme yöntemlerindeki gelişme neticesinde bir akış içerisindeki küçük parçacıklardan yansıyan Doppler frekans farkı ölçülerek parçacıkların hızlarının elde edilmesini sağlayan Laser Doppler Velocimetry (LDV) yöntemi, atomizasyon uygulamalarında kullanılmıştır.

1970'li yılların sonlarına doğru küresel damlacıkların hız ve çap değerlerinin aynı anda ölçülebilmesini mümkün kılan faz/doppler interferometresi Bachalo (1980) tarafından geliştirilmiştir. Bu buluş sayesinde atomizasyonda oluşan damlacık hız ve çaplarının deneysel olarak elde edilmesi kolaylıkla sağlanmıştır. Bu sayede 1980'li yıllardan günümüze kadar çok sayıda deneysel çalışmanın yapılmasına imkan tanımıştır.

Kheirabadi and Groulx (2016) yayınladıkları derlemelerinde elektronik elemanların soğutulmasıyla ilgili endüstrideki mevcut uygulamaları ve ısı transferi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada soğutma uygulamaları altı başlıkta incelenmiştir. Bunlar, hava ile soğutma, tek-çift fazlı sıvı etkili soğutma, ısı boruları, havuz kaynama, sprej soğutma ve çarpan jet olarak değerlendirilmiştir. Yapılan uygulamalarla ilgili ısı akısı değerleri, soğutucu debileri ve sıcaklıkları incelenmiş ısı transferini sınırlayan durumlar ve her soğutma çözümünün güç gereksinimleri sunulmuştur. Yukarıdaki başlıklar karşılaştırıldığında sıvı kullanılarak gerçekleştirilen soğutma uygulamalarında yüksek ısı transfer performansı sağlandığı belirtilmiştir. 2020 yılına dek bireysel kullanımdaki işlemcilerde ait ısı yüklerinin 190 W'a ulaşmasının öngörüldüğü ve bu durumda hava soğutmalı sistemlerin uygulanabilir olmaya devam edebileceği ifade edilmiştir. Buna karşın genel amaçlı bilgi iletişim sistemlerinin ısı yüklerinin 300 W'a ulaşacağını

öngörülmesi nedeniyle işletme maliyetleri, atık ısı geri kazanımı ve güvenilirlik faktörleri göz önüne alınarak sıvı soğutmalı sistemlerin teşvik edilebilir olduğu vurgulanmıştır.

Liu *et al.* (2016) yayınladıkları makalelerinde düz bakır yüzeyin soğuma performansını R134-a akışkanı kullanarak incelemiştir. Oluşturulan deney düzeneğinde tam koni nozul tercih edilmiştir. Isı akısı, debi, kritik ısı akısı, sprej verimliliği karakteristik özellikler olarak belirlenip farklı basınç değerlerinde sprej soğuma performansı incelenmiştir. Deneyler sonucunda sprej basıncının artmasıyla sprej verimliliğinin ve kritik ısı akısının arttığı gözlemlenmiştir. Buna ilave olarak ısı akısı için Jacop sayısı, Weber Sayısı, boyutsuz kütle geçiş oranı, boyutsuzlaştırılmış basınç ve boyutsuzlaştırılmış damlacık yarıçapına bağlı amprik eşitlik elde edilmiştir.

Cheng *et al.* (2015) yayınladıkları makalelerinde, elektronik elemanlar üzerinde sprej soğutma parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Sistemlerinde kullandıkları ana kartı ısı akısını da kontrol edebilmek amacıyla radyo frekans sistemiyle bağlantılı baskılı devre kartıyla simüle etmişlerdir. Çalışmalarında HF7100 ve PF5060 akışkanlarını kullanarak doğrusal bir nozul dizisi tasarlamışlardır. Kararlı ve kararlı olmayan durumlar için üç farklı debi, iki farklı soğutma sıvısı ve dört farklı kanatçık konumlandırması sağlayarak ısı transferi üzerine sprejleme açısının etkileri incelemiştir. Gerçekleştirdikleri deneylerde sprejlemenin başladığı andan kısa süre sonra yüzey sıcaklığının sabitlendiğini ve 75°'lik sprejleme açısında ısı transferinin belirgin şekilde iyileştiğini tespit etmişlerdir. En yüksek ısı akısının 81.6 W/cm<sup>2</sup> ile 51.1°C yüzey sıcaklığında elde edildiğini belirtmişlerdir.

Zhang and Wang (2015), kaynama olmayan rejimde ısı transferi üzerine ısı akısının ve yüzey parametrelerinin etkilerini tam koni nozul kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarında bir adet düz, altı adet kanatçıklı yüzey kullanmışlardır. Kanatçıklı yüzeylerin kanat yüksekliği ve kanatçıklar arası mesafeleri 0.1-0.7mm aralığında seçilmiştir. Yapılan deneylerde yüzey sıcaklığı 100°C'nin altında ve nozul-yüzey mesafesi 1cm olarak belirlenmiştir. Sonuçta ısı transferinin 0,5mm kanatçık yüksekliği,

0,4mm kanatçıklar arası mesafe ve  $1.604 \text{ l/m}^2\text{s}$  hacimsel debide optimum şekilde gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Buna ek olarak hacimsel debinin  $12.73 \text{ l/m}^2\text{s}$  olduğu durumda, yüzey geometrisi 0.5 mm kanatçık yüksekliği ve 0.2 mm kanatçık genişliğine sahipken  $80^\circ\text{C}$ 'de  $202.5 \text{ W/cm}^2$  ısı akısı değeri ile optimuma yakın bir sonuç elde edilmiştir. Bu sonucun düz yüzeye göre %61.6 oranında ısı transferinde iyileşme sağladığı ifade edilmiştir. Kanatçıkların spreyleme etkisi altında kalan üç yüzeyinin ısı transfer verimliliğini etkilediğini belirtmişlerdir. Belirtilen üç yüzey üzerinde spreyleme sırasında düşen damlacığın yüzeye uyguladığı kuvvet analizi ile debinin artmasıyla soğutma etkisinin artacağını vurgulamışlardır.

Chen *et al.* (2015) çalışmalarında R-134a ve R-22 akışkanlarının spreyleme soğutmada ısı transfer karakteristiklerini karşılaştırmışlardır. Yanmazlık, düşük toksisite, OPD'siz ve düşük GWP'ye sahip olması nedeniyle R-22'nin en iyi alternatifi olarak R-134a'yı öngörmüşler ve karşılaştırmaya değer gördüklerini ifade etmişlerdir. İki akışkanın termal performansını incelemek için aynı tip nozullar ile iki kapalı sistem dizayn edilmiştir. Kritik ısı akısı, ısı transfer katsayısı ve yüzey sıcaklığı karşılaştırılacak ana parametreler olarak belirlenmiştir. Deneyler neticesinde R-134a'nın gizli ısı değerinin düşük olması nedeniyle kritik ısı akısının düşük olduğu ifade edilmiştir. Aynı püskürtme basıncında R-22 kullanılarak oluşturulan spreylemenin ısı transfer katsayısının R-134a ile oluşturulandan yüksek olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte ısı akısının  $80 \text{ W/cm}^2$ 'den az olduğu faz değişim bölgesinde R-134a kullanılarak yapılan spreyleme soğutmanın tercih dileyebileceğini vurgulamışlardır.

Ravikumar *et al.* (2015) yayınladıkları makalelerinde, yüksek ısı akısına sahip uygulamalar için hava destekli spreyleme soğutma ile nanoakışkan kullanılan durumu incelemişlerdir. Nanoakışkanın hazırlanması esnasında, piyasada kullanılan çapı 13 nm.'den düşük çapa sahip  $\text{Al}_2\text{O}_3$  partikülleri ve su kullanılmıştır. Isı transfer deneyleri boyutları  $100 \times 100 \times 6 \text{ mm}$  ebatlarında önceden ısıtılmış çelik yüzey üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çelik yüzey sıcaklığı  $900^\circ\text{C}$ 'de başlangıç deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada %0.1 oranında su- $\text{Al}_2\text{O}_3$  karışımına ilaveten Tween-20 ve SDS soğutucu akışkanlarından yararlanılarak ısı transfer performansları karşılaştırılmıştır. Deneyler neticesinde hava destekli atomizasyona göre nanoakışkan

kullanıldığı durumda kritik ısı akısı, ısı transfer katsayısı ve soğutma hızının önemli ölçüde iyileşme gösterdiği sonucuna varılmıştır. Tween 20 kullanılarak elde edilen soğutucu akışkanın soğutma performansının en iyi olduğunu belirtilmiştir. Buna ek olarak saf su ile karşılaştırıldığında  $Al_2O_3$  partiküllü akışkanın %10.2, su-SDS- $Al_2O_3$  karışımlı akışkanın %18.6 ve su-Tween20- $Al_2O_3$  karışımlı akışkanın %32.3 oranında ısı transferini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Cheng *et al.* (2015) çalışmalarında tasarladıkları soğutma odasında genişletilmiş yüzeylerdeki spreyci soğutma performansını kaynama olmayan rejimde incelemiştir. Hazırladıkları deney setinde geniş alana sahip ısıtılmış yüzeyleri dar alanlarda verimli şekilde soğutabilmek amacıyla çoklu nozul kullanmış ve kapalı sistem spreyci soğutma kulesi tasarlamışlardır. Nozul karakteristikleri PDA sistem ile kontrol edilmiştir. Yüzey aktif maddesi olarak etil hegzanol kullanılarak sıcaklık dağılımı, spreyci uzunluğu, debi ve ısı transfer performansı incelenmiştir. 30x30 mm boyutlarındaki ısıtılmış yüzeyde elde edilen spreyci soğutma grafiklerine göre yüzey aktif maddesi kullanıldığında ısı akısı  $102.6 \text{ W/cm}^2$  hesaplanırken bu değer saf su için  $91.5 \text{ W/cm}^2$  olarak hesaplanmıştır. Artan ısı akısıyla yüzey üzerinde sıcaklık dağılımının düzensiz bir yayılıma sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuçta ısı transfer performansının spreyci mesafesi ve debiyle doğru orantılı şekilde geliştiğini ifade etmişlerdir. Buna ek olarak kullanılan akışkana 200 ppm oranda etil hegzanol yüzey aktif maddesi ilave edildiğinde ısı transfer performansının %15 iyileştiğini belirtmişlerdir.

Hou *et al.* (2015) yayınladıkları çalışmalarında, kapalı sistemde R-134a akışkanının spreyci soğutma karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Deneylerde ısıtılmış dairesel düz bakır yüzey üzerine dolu koni spreyci uygulanmıştır. Farklı hacimsel debilerde R-134a akışkanının spreyci soğutma karakteristikleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda akışkanın hacimsel debisi arttığında kritik ısı akısı değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte hacimsel debinin kritik değerin üstüne çıkmasıyla sistem verimi olumsuz etkilenir. Yüzey sıcaklığının 319 K, hacimsel debinin 0.356 l/dk. olduğu durumda maksimum kritik ısı akısı  $117.2 \text{ W/cm}^2$  olarak elde edilmiştir. Neticede R-134a akışkanının spreyci soğutma sistemlerinde verimli soğutma karakteristiklerine sahip olduğu belirtilmiştir.

Labergue *et al.* (2015) çalışmalarında ısıtılmış yüzeylerin soğuma karakteristiklerini tam koni spreyleme ile deneysel olarak incelemişlerdir. Buna ilave olarak sıvı jetin kullanılması durumuna göre de karşılaştırma yapılmıştır. Deneylede kullanılan 175 mm çapında 5mm kalınlığındaki nikel disk elektromanyetik indüksiyonlama ile yaklaşık 800°C sıcaklığa ısıtılmıştır. Çalışmada ısıtılmış yüzeyden ısı akısı yardımı ile spreyleme özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca kütle geçiş dağılımının yanı sıra damlacık etkisini inceleyebilmek için üç farklı nozul kullanılmıştır. Kütle geçiş dağılımı her bir spreylemede patternator yardımıyla ölçülmüştür. Soğutma esnasında kızılötesi termografi uygulanırken bununla eş zamanlı olarak damlacık özellikleri Phase Doppler System ile belirlenmiştir. Tam koni spreyleme, sıvı jetiyle kıyaslandığında ısı akısının daha üniform dağılım gösterdiği ve soğutma veriminin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Soğutma verimliliği ve ısı akısı üzerinde kütle geçiş etkisinin önceki çalışmalarla uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir. Üç farklı nozul ve sıvı jetinin soğutma performansı yüzey sıcaklığı dikkate alınarak incelendiğinde değerlerin birbirine yakın olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca sıvı jetin kullanıldığı durumda uzun soğutma zamanı ve yüksek sıvı tüketimi olduğu vurgulanmıştır.

Ang *et al.* (2015) yüzeye gönderilen akustik dalga atomizasyonu (SAW) ile nozul kullanılmaksızın spreyleme soğutma tekniği uygulamışlardır. Çalışmada deiyonize edilmiş su kullanıldığında atomizasyonun %40, soğutmanın %15 iyileşme gösterdiği belirtilmiştir. Bununla birlikte SAW ile soğutmanın %20 iyileştiği ifade edilmiştir. Ayrıca atomizasyonda CuO nanopartikül süspansiyonu %3 oranında kullanıldığında soğutma performansının %30 etkilendiği vurgulanmıştır.

Ravikumar *et al.* (2014) çalışmalarında, 6 mm kalınlığında paslanmaz çelik plakada yüzey aktif maddesi kullanarak hava destekli spreyleme soğutmayı incelemişlerdir. Çelik yüzey sıcaklığı 900°C'de başlangıç deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yüzey aktif madde olarak Tween 20 kullanarak çeşitli oranlardaki karışımlar için maksimum soğutma oranlarını hesapladılar. Etanol-su-yüzey aktif madde karışımı için bu değer 235°C/s olarak elde edilmiştir. Bunu çok hızlı (ultrafast) soğutma rejimi olarak tanımlayıp araştırmalarını çok hızlı soğutma sürecini arttırmak için devam ettirmişlerdir. Sonuç olarak çekirdek kaynama rejiminde (200°C) yüzey ısı transfer

katsayısının etanol-su-yüzey aktif madde karışımında en çok artışı gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Chen *et al.* (2013) çalışmalarında sprej soğutmayla düz alüminyum mikrokanallı ısı değiştiricinin (4 geçişli, paralel akışlı) ısı transferi performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde tam koni nozul kullanılmıştır. Yüzeje 19 cm uzaklıktan sprej gönderilerek 4.9-5.34 kg/dk debi aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Su sprej oranı, hava oranı ve bağıl nem etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta ısı transferi performansının artan sprej debisi ile arttığı sonucuna varmışlardır.

Somasundaram and Tay (2013) sprej soğutmada aralıklı ve daimi spreji tek fazlı rejimde düşük ısı akılarında, çift fazlı rejimde ise yüksek ısı akılarında karşılaştırmışlardır. Debi ve frekansı kontrol ederek hedef yüzeyde istenilen soğutma oranını elde etmişlerdir. Daimi olmayan sprejde soğutma etkinliğinin daimi spreje göre daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Buna ek olarak daimi olmayan sprejin düşük debilerde sprej etkinliğini artırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca sprej açısını da görüntü işleme ile elde etmişlerdir.

Xie *et al.* (2013b) basınçlı dönel nozulun ısı transfer performansını ve sprej karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Sprej akış yapısı, damlacık SMD çapı ve damlacık çarpma enerjisini çeşitli uzaklıklarda ve basınçlarda araştırmışlardır. Eksenel mesafe arttıkça sprej şeklinin boş koniden dolu koniye doğru değiştiğini gözlemlenmişlerdir. Damlacık boyutunun başlangıçta eksenel yönde azalırken, We sayısının azalmasıyla sonradan bir miktar arttığını belirtmişlerdir. Yüzey sıcaklık dağılımının kaynama olmayan rejimde çarpan damlacık akısı dağılımına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Isı transferi performansında nozul-yüzey mesafesinin etkisini yüzey sıcaklığına bağlı ve kompleks olarak tanımlamışlardır. Deneyler sonucunda Nu sayısı korelasyonunu Re sayısı, boyutsuz yüzey sıcaklığı ( $\xi$ ) ve nozul-yüzey mesafesine bağlı olarak formüle etmişlerdir.

Zhang *et al.* (2013) spray soğutmada ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada tam koni nozul kullanılarak mikro yapıda bakır yüzeyde spray karakteristiklerinin etkilerini araştırmışlardır. Artırılmış ve düz yüzeyler için debi, nozul-yüzey mesafesi ve yüzey pürüzlülüğü etkilerini incelemişlerdir. Artırılmış yüzeyde ısı transferi oranının düz yüzeye göre etkin olarak arttığı sonucuna varmışlardır. Çalışmada ayrıca incelenen spray eğim açısı etkisi için sıfır derece eğim açısında en iyi ısı transfer oranına sahip olduğu belirtilerek ısı transferinin yüzey pürüzlülüğü ile arttığını ifade etmişlerdir.

Xie *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada spray soğutma ile kanatçıklı yüzeylerde ısı transferi etkilerini araştırmışlardır. Mikro ve makro yapıdaki artırılmış yüzeyleri kapalı sistemde, çalışma sıvısı olarak R134a kullanarak test etmişlerdir. Deneyler sonucunda makro yapılı yüzeylerin soğutma performansında kanat dizilişinin belirleyici bir rol oynayacağını belirtmişlerdir. Mikro yapılı yüzeyleri, 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 sonucunu elde etmişlerdir.

Hesaplamalarda bir boyutlu ısı iletimini esas alarak ısıtıcı yüzeyi boyunca ısı akısını;

$$q'' = k_s \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x_1} \quad (1.1)$$

denklemini ile hesaplamışlardır. Ortalama ısı taşınım katsayısını ise;

$$\bar{h} = q''(T_y - T_{sat}) \quad (1.2)$$

eşitliği ile hesaplamışlardır.

Nakoryakov *et al.* (2012) buharlaşma sürecinde damlacık hacimlerinin ve yüzey sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Damlacık buharlaşmasında yüzeyin geometrik



özellikleri ve termofiziksel etkilerini incelemişlerdir. Damlacık çap değişimi ve yüzey kalınlığının buharlaşma rejiminde değişime yol açtığını belirtmişlerdir. Damlacık boyunca ara yüz sıcaklık dağılımını da ölçmüşlerdir. Deneysel bakır ve paslanmaz çelik kullanmışlardır. Sıcaklık ölçümlerini termal kamera ve termopiletlerle eşzamanlı olarak gerçekleştirmişlerdir. Damlacık kaynama rejiminin havuz kaynamasından önemli ölçüde farklı olduğu sonucuna varmışlardır.

Cheng *et al.* (2012) yaptıkları teorik çalışmada spreyn damlacık hızı, SMD dağılımı, damlacık sayısı çeşitlilikleri ile sıcak yüzeyde akışkan film hızı ve yüzey sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. Yüzey sıcaklığını kaynama olmayan rejimde ve çekirdek kaynama rejimlerinde araştırmışlardır. 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 tespit etmişlerdir.

Sümer vd (2012) çalışmalarında basınçlı girdap tipi nozul içindeki akışı yüksek hızlı görüntüleme tekniği ve hesaplamalı akışkanlar dinamiğini kullanarak incelemişlerdir. 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.

Watanawanyoo *et al.* (2012) içten karışımli hava destekli atomizer geliştirerek spreyn karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Mikro gaz türbin yanma odasında geliştirdikleri hava destekli nozulu kullanmışlardır. Spreyn karakteristiklerini elde etmek için akış yönünde ve nozul çevresinde incelemeler yapmışlardır. Akışı görüntülemek için Shadowgraphy tekniğini kullanıp, Nd-YAG lazer ve yüksek hızlı CMOS kamera ile görüntüleri elde etmişlerdir. Çalışmaları 0.18-0.58 ALR aralığında gerçekleştirerek spreyn açılarını 13-20° aralığında elde etmişlerdir.

Li *et al.* (2012) çalışmalarında içten su-hava karışimli çift fazlı atomizeri incelemiştir. Çift faz karışım süreci ve akış şeklini yüksek hızlı CCD kamera ile görsel olarak izlemiştir. Gözlemleri içten karışımında GLR (Hava-sıvı kütleli debi oranı)'nin baskın olduğunu ortaya çıkarmıştır. GLR artarken, akış şeklinin dalgalı akıştan dairesel akışa doğru geliştiğini tespit etmiştir. Akış desenini öngörmek için Oshinowo ve Charles'ın eşlemesinden yararlanmışlardır. SMD dağılımını PDA ile farklı çalışma koşullarında elde etmiştir. GLR'nin artmasıyla SMD'nin azaldığını ifade etmiştir. Basıncın artmasıyla daha ince sprey elde edilmiştir. Damlacık boyutunda PDF (Olasılıksal yoğunluk fonksiyonu) dağılımını, damlacık birleşme ve bozulmasını nicel olarak göstermek için analiz etmiştir. Sonuç olarak en iyi atomizasyon performansını gelişmemiş akış bölgesinde elde etmiştir.

Tao *et al.* (2011) çalışmalarında, kaynama olmayan sprey soğutma sisteminde deiyonize su kullanarak ısı transferini araştırmışlardır. Açık sistemde iki tam koni sprey nozul ile deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sıvı hacimsel debisi, nozul-yüzey mesafesi ve sıvı giriş sıcaklığının etkilerini incelemiştir. Hacimsel debinin artmasıyla ve sıvı giriş sıcaklığının azalmasıyla ısı transfer katsayısının önemli ölçüde arttığını gözlemlemiştir. Çalışma sıvısına yüzey aktif madde (surfactant) ilavesinin de ısı transferini arttırdığını ifade etmiştir.

Chan *et al.* (2011) yayınladıkları çalışmalarında metal kaplamalı polimer nanofiber yüzeyden ısı akısını artırabilmeyi araştırmışlardır. Nikel, bakır ve gümüş kaplamalar kullanılarak deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarını çeşitli sıcaklıklarda ve 17.95 cm yükseklikten yüzeye damlacık ulaştırarak yürütmüşlerdir. Çeşitli numunelerin buharlaşma etkisinde ısı transfer karakteristiklerini karşılaştırmışlardır. Gümüş kaplamalı numunelerin en yüksek, nikelin ise en düşük ısı akısını sağladığını belirtmişlerdir. Buna karşılık gümüşün 200°C'nin üzerinde oksitlenme eğiliminden dolayı kullanışlı olmadığını da ifade etmiştir. Deneylerde damlacık çarpma hızları 1.76-2.72 m/s aralığında ölçülmüştür. Görüntüleri almak için 2000 fps, ve 1/1000-1/2000 saniye hızında CCD kamera (Pulnix TM-7EX) kullanılmıştır. Deneyleri 125, 150 ve 200°C yüzey sıcaklıkları için gerçekleştirmişlerdir. Sprey soğutma etkinliğinin yüzeyle damlacık arasındaki ısı akısına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Cheng *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada kaynama olmayan rejimde sprej soğutma ısı transferi deneylerini damıtılmış su kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sprej karakteristiklerini ölçmek için PDA (Phase Doppler Anemometry)'den yararlanmışlardır. Sprej debisi, sprej yüksekliği ve sprej soğutma ısı transferinde su sıcaklığının etkilerini sprej karakteristikleri olarak belirlemişlerdir. Sprej 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 sprej yüksekliği ve radyal yönde sprej çapına bağlı olarak korelasyonlar elde etmişlerdir. Kaynama olmayan rejimde ısı transferi için Nusselt korelasyonunu da We sayısı, Re sayısı, boyutsuz yüzey sıcaklığı ve yüzey çapına bağlı olarak ifade etmişlerdir.

Wang *et al.* (2011) gerçekleştirdikleri çalışmalarında kaynama olmayan rejimde su ile sprej soğutmanın ısı transfer performansını incelemişlerdir. Isı transfer katsayısı ve ısı akısı üzerinde yüzey sıcaklığı ile kütle akısının etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada çevre sıcaklığının 20°C olduğu kabul etmişlerdir. Isı transferi katsayısının artan kütle akısı ve yüzey sıcaklığı ile arttığını ifade etmişlerdir. Genelleştirilmiş korelasyonları duvar sıcaklığı ile ilişkili Nusselt sayısı, sprej Re sayısı ve boyutsuz sıcaklıkla ilişkili ortalama Nu sayısı için geliştirmişlerdir. Korelasyonların hava destekli atomizerler için geçerli olduğunu ifade etmişlerdir.

Yamamoto and Kuwahara (2011) yüksek sıcaklıkta çalışan malzemelerde ince taneli sprej soğutma ile ısı transferini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. 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 ifade etmişlerdir. Çarpan partiküllerin %20-30'unun buharlaştığı ve bunların %70-80'inin de yüzeyde kaldığı sonucuna varmışlardır.

Ding *et al.* (2011) sprej yapısı ve oluşumunu çok delikli enjeksiyon kullanarak araştırmışlardır. 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 oluşturulan program ile analiz etmişlerdir. Sprey uç yayılması ve sprej koni açısını hesaplamışlardır. Uç yayılmasında ortam sıcaklığı daha az etkiliyken, ortam basıncı ve enjeksiyon basıncının daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Gadgil and Raghunandan (2011) nozul çıkışında sprej bozulmasını hava destekli nozul yardımıyla düşük gaz/sıvı kütle oranlarında (GLR) deneysel olarak incelemişlerdir. İki farklı kamera yardımıyla sprej akışı görüntülenmiştir. Buna ilaveten yüksek frekanslı görüntüyü dondurmak için stroboskop kullanılmıştır. Sprej görüntülerini yakalamak için Shadowgraphy tekniğinden yararlanılmıştır. Orifis yakınındaki sprej yapısı üç şekilde sınıflandırmışlardır. Bunlar; kesikli habbe patlaması, sürekli habbe patlaması ve dairesel konik sprej olarak adlandırılmıştır. Parametrik çalışma ile ortalama habbe patlama mesafesinin hava debisi, jet çapı ve karışım hızına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Diğer ikisiyle karşılaştırıldığında en etkili parametrenin jet çapı olduğunu belirtmişlerdir.

Liu *et al.* (2011) çalışmalarında kaynama olmayan rejimde su ile sprej soğutmada artırılmış yüzeylerde ısı transferi performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Yüzey artırımı düz kanatlar (straight fin) ile yapılmıştır. Yüzeyleri kesit alanı 10 mm x 10 mm olan bakır blokların üstüne yerleştirmişlerdir. Sprej hacimsel akışını 0.044-0.053 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>s aralığında oluşturarak *Unijet* tam koni nozul ile yüzeye göndermişlerdir. Denejler neticesinde ısı transferinin düz kanatçıklı yüzeylerde düz yüzeye göre açık bir şekilde iyileştiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte kanat yüksekliği arttıkça iyileşme değerlerinin azaldığını ifade etmişlerdir.

Negeed *et al.* (2011) basınçlı düz nozulda sıvı tabaka bozulmasını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Dört farklı çapta (1, 1.5, 2 ve 2.5 mm) nozul kullanarak sıvı tabaka karakteristikleri üzerine nozul geometrisinin ve sprej basıncının etkisini araştırmışlardır. Sıvı tabaka bozulma uzunluğu, sıvı tabaka hızı ve oluşan damlacıkların boyutunu yüksek hızlı kamera ile ölçülmüştür. Atmosferde düz sıvı tabakanın bozulma

karakteristiklerini lineer ve lineer olmayan hidrodinamik kararsızlık analiziyle sayısal olarak incelemiştir. Çalışma sonuçlarını nozul çapı, sprej basıncı ve damlacık çapının etkileri şeklinde ifade etmiştir. Seçilen dört nozul için deneysel sonuçları sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlar ve %4-12 arasında uyuma olduğunu belirtmişlerdir. Ampirik korelasyonlarla sıvı bozulma karakteristiklerini sıvı tabaka  $Re$  sayısı,  $We$  sayısı ve nozul çapının etkilediği sonucuna varmışlardır.

Baillard *et al.* (2011) çalışmalarında çelik yüzey soğutma uygulamasıyla sprej dinamiğini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Sprej karakteristiklerini nozuldaki 250-500 mm uzaklıkta incelemiştir. Örnek verileri çap ve hız için PDF (Probability Density Function) yönteminden yararlanılmıştır. Sayısal çözümlemede Eulerian-Lagrangian formülasyonu kullanılmıştır. Gaz fazında RANS  $k-\epsilon$  modeli ile momentum ve türbülans eşitlikleri yardımıyla çözümleme yapmışlardır. Buna ilaveten sayısal ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmaya bozulma modelini ilave etmek amacıyla ikincil atomizasyonun simülasyonuna ihtiyaç duymuşlardır. Bunun için de LES Eulerian/Lagrangian simülasyonunun gaz etrafındaki damlacıklarda daha iyi sonuç verdiğini ifade etmişlerdir.

Charalampous *et al.* (2010) çalışmalarında havalı atomizerlerde sıvı jetin bozulma uzunluğunun ölçümünde üç farklı teknik uygulamışlardır. 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 yönteminde ise jetin lazerle aydınlatılarak fotoğraflanması sağlanmıştır. Bu üç bozulma mesafesi ölçüm yönteminin avantajlarını ve kısıtlamalarını karşılaştırmışlardır.

Lal *et al.* (2010) yayınladıkları çalışmalarında çift akışkanlı ve içten karışımli atomizerde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Damlacık çap dağılımını belirlemek için Malvern Particle Analyzer kullanmışlardır. Sprej karakteristiklerini eşzamanlı olarak sıvı ve hava basınçlarına bağlı olarak ölçmüşlerdir. Kontrollü

atomizasyon sonuçlarını özellikle yangın söndürme uygulamaları için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Çeşitli koşullar için SMD korelasyonları geliştirmişlerdir. Ayrıca 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 gerçekleştirmişlerdir. ALR arttıkça tahliye katsayısının ve SMD'nin azaldığını belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak damlacık boyut dağılım parametreleri de sunulmuştur. Bu değerleri SMD: 15-85  $\mu\text{m}$ ,  $Dv_{10}$ :8-42  $\mu\text{m}$ ,  $Dv_{90}$ :79-283  $\mu\text{m}$ ,  $Dv_{50}$ :32-115  $\mu\text{m}$  aralıklarında elde etmişlerdir. Sonuçta çift fazlı atomizerlerin kontrollü sprej elde etmek için uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Sridhara and Raghunandan (2010) sprej karakteristiklerinin analizlerinde kullanılan akış görüntüleme tekniklerini kapsamlı şekilde incelemiş ve farklı aydınlatma tekniklerinin deneysel uygulamalarını ele almışlardır. Havalı (airblast) ve girdap (swirl) atomizerlerin sprej fotoğraflarını dört farklı yöntemle incelemişlerdir. Bunlar; arka aydınlatma, aralıklı aydınlatma (slit), flaşlı aydınlatma (incident) ve yeni bir yöntem olan saçılan ışık görüntüsü yöntemleri olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemlerle alınan fotoğrafların jet bozulma olayı, saçılma detayları ve sprejin dış görünüşünü oluşturmak için kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca farklı tekniklerin aynı anda kullanılmasının çözümlemede etkili olabileceği sonucuna varmışlardır.

Santolaya *et al.* (2010) makalelerinde konik sıvı tabakasının bozulmasından kaynaklanan sprej yapısını deneysel olarak ele almışlardır. Dağınık ve sürekli faz hızları ve damlacık boyutlarını PDPA ile analiz etmişlerdir. Veri işleme için geliştirilmiş integral metodunu uygulamışlar ve çeşitli damlacık boyutu sınıflarında hacimsel debi etkileşimini incelemişlerdir. Ölçümleri TSI-Aerometrics 3100 PDPA sistemi ile gerçekleştirmişlerdir. Damlacık çapı ve iki bileşenli hız ölçümlerini eş zamanlı olarak elde etmişlerdir. Görüntü almak için CCD kamera ile stroboskop kullanılmıştır. Basıncı dönel nozul olarak Danfoss 0.5-80°H modelinden yararlanılmıştır. Deneyleri 80° koni açısı, 0.2 mm orifis çapı, 16 bar basınçta 95°C'de gerçekleştirmişlerdir. Aerosol sprej için  $D_{10}=3.4 \mu\text{m}$  olan su-gliserin karışımını kullanmışlardır.

Lee *et al.* (2010) çalışmalarında düşük hızlı çapraz akışlı dönen sıvı jetin spreynin hareketini ve evrelerini deneysel olarak araştırdılar. Makro ve mikro boyutta spreynin parametreleri değerlendirmelerinde çapraz akışın etkilerini jet Weber sayısı ile sıvı-gaz momentum oranı bakımından optik olarak ölçmüşlerdir. Momentum oranını göz önüne almaksızın yüksek jet Weber sayılarında spreynin profilinin neredeyse hiç değişmediğini gözlemlemişlerdir. Çapraz akışın jet bozulmasını arttırdığı ve enjeksiyon hızlarının tüm aralıklarında ince spreynin dönüşürdüğünü ifade etmişlerdir.

Mzad and Tebbal (2009) çalışmalarında su jetlerinin çarpmasından dolayı düzlemde olan ısı transfer 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<sup>2</sup> ısı akısında çelik için sıcaklık-zaman grafiklerini sunmuşlardır.

Press *et al.* (2009) yayınlanan çalışmalarında çift fazlı nozullarda su-yağ emülsiyonunun atomizasyona etkisini dijital mikrofotografi metodu ile incelemişlerdir. Dijital kamera ile alınan görüntüleri *Image Pro-plus* görüntü işleme programı ile analiz etmişlerdir. Spreynin açısı, spreynin 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.

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

Yiğit vd (2009) yayınlanan çalışmalarında, kare ısıtıcı test yüzeyine gönderdikleri spreynin jetinin soğutma karakteristiklerini araştırmışlardır. Soğutucu akışkan olarak PF-

5052 tercih etmişlerdir. Ayrıca aşırı soğutma ve SMD etkilerini de incelemişlerdir. Elde edilen verileri FC-72, FC-87 ve suyun soğutma performansları ile karşılaştırmışlardır. Sprey soğutma rejimlerinde akışkan yönünün (yukarıdan aşağı veya aşağıdan yukarı yönlendirilmesi) ölçülebilir bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varmışlardır. Sprey odasını G-10 fiberglas plastikten dizayn ederek spreyi yukarı doğru göndermişlerdir. Sıcaklık ve basınç sensörlerinden HP3497A dijital toplama sistemi ile veriler alınmıştır. 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.

Strotos *et al.* (2008) makalelerinde su damlacıklarının atmosferik şartlarda ısıtılmış düz yüzeye çarpmasının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) sayısal simülasyonunu sunmuş ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. 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.

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;

$$\overline{Nu} = 32.5Re^{0.51} \quad (1.3)$$

olarak elde etmişlerdir.

Shao and Yan (2008) bu çalışmada dizel sprejnin yakıt karakteristiklerinde direk fotoğrafik görüntü ve görüntü işleme sisteminin uygulamasını sunmuşlardır. Işık kaynağı ve yüksek çözünürlüklü CCD kamerayı saydam odadan sprej görüntülerini yakalamak için kullanmışlardır. Sprej parametrelerinin makroskobik karakteristiklerinin bir kısmını (uç yayılması, yakın ve uzak alan açısı, sprej uç açısı, ortalama yakıt alanı yoğunluğu) görüntülerden elde etmişlerdir. Deneysel çalışmayı common-rail yakıt enjeksiyon sisteminde yürütmüşlerdir. Sprej 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 spreji görüntülemek için düzenlemişlerdir. Bu çalışmada görüntü sistemini test bölgesine yerleştirmişlerdir. İç yüzeyleri sprej görüntülerindeki yansıma etkilerini azaltmak için siyah boya ile boyamış ve sprej odasını flaş ile aydınlatmışlardır.

Uç yayılmasını, sprej 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 sprej uç hızını birbirini takip eden iki sprej görüntüsünü kullanarak iki görüntü arasındaki farkı sprej mesafesi (tip penetration) farkına bölerek tahmin etmişlerdir. Görüntü işleme algoritmasını ham sprej

görüntülerinden sprej karakteristiklerini ölçmek için geliştirmişlerdir. Deneyselde Minisac ve VCO nozulları ayrı ayrı test etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada ortalama sprej yoğunluğunu da elde etmişlerdir. Sprej açısı – Zaman, Yakıt alanı yoğunluğu- Zaman, Sprej uç Hızı (m/s) – Zaman grafiklerini iki tip nozul için değişik basınçlarda (25-40 bar) göstermişlerdir.

Sonuç olarak sunulan dijital görüntü işleme algoritması ile fotografik görüntülemeyi dizel sprej sayısal analizinde yararlı bir araç olarak görmüşlerdir. Geliştirdikleri deney setinde belirlenen sprej parametrelerinin ölçümlerinde tekrar edilebilirlik ve mükemmel bir doğrulukla sonuçları elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlar belirlenen sprej parametrelerinin uygunluğunu ve görüntü işleme yazılımının yararlılığını göstermiştir. Sprej karakteristikleri ve uygun enjeksiyon koşulları arasındaki ilişkiyi belirlemişlerdir.

Wendelstorf *et al.* (2008) bu yayında, otomatikleştirilmiş soğutma test standında, temiz yüzey koşullarında (oksitlenmeyen) ısı transfer katsayısını incelemişlerdir. Ortak düşünceye göre, yüksek sıcaklık rejiminde fazladan sıcaklığa bağımlılık olduğunu görmüşlerdir. Malzemedeki su spreje 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  $\Delta T$  olarak öngörmüşlerdir. Ortalama damla çapı ve damlacık hızı değerlerini korelasyonlardan elde etmişlerdir.

Pandey and Kushari (2008) bu patent çalışmasında çift akışkanlı içten karışımli 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.

Al-Ahamdi and Yao (2008) bu çalışmada yüksek sıcaklıktaki metallerin tam koni sprej ile soğutmasının deneysel bir çalışmasını yapmıştır. Deneysleri 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/m<sup>2</sup>s 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 sprede 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 spre açısı bakımından da incelemiştir. Dikey spreyn kısmen daha yüksek ısı akısı sağladığı sonucuna varmıştır.

Visaria and Mudawar (2008) bu yayında test yüzeyinde 3 tam koni spre nozulda FC-77 kullanarak CHF ve spre soğutma performansını incelemiştir. 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.

Pavlova *et al.* (2008) kaynama olmayan rejimde spre soğutma performansında sentetik (net kütle akışı sıfır) jetlerin etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Genel spre karakteristiklerini akış kontrolü altında birkaç yolla değerlendirmek için PIV (Particle Image Velocimetry) ve *Shadowgraphy* kullanmışlardır. Bakır ısıtıcıya yerleştirilen termociftlerle sıcaklık ölçümlerini yapmışlardır. Akış kontrolüyle soğutma artırımında önemli bir rol oynayan sıcak yüzey ve spre arasındaki mesafenin (H) spre özellikleriyle birlikte normal duruma kıyasla daha iyi sonuç verdiğini görmüşlerdir. Spre soğutmada jet ve spre (FC-72 sıvısıyla) karşılaştırmışlardır. Hava debisini *LABVIEW* programı ile kontrol etmişlerdir. Soğutma performansında spre soğutmada jetten 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  $d_{32}$  (sauter mean diameter) azaldıkça ısı transfer katsayısı artarken, CHF'nin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Yakut *et al.* (2001) çalışmalarında JATO nozul ile su ve gliserol çözeltisini enjekte etmişlerdir. Basınçlı 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 nozuldaki 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  $\mu\text{m}$  olarak belirlemişlerdir. Bu değerleri PDPA ile yine aynı mesafede 52, 68, 84 ve 92  $\mu\text{m}$  olarak belirlemişlerdir. Ortalama aksel hızı 2.05 m/s olarak ölçmüşlerdir. Ayrıca  $D_{10}$  değerlerini de merkezde ve radyal yönde belirlemişlerdir.

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.

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  $\text{W}/\text{cm}^2$  ısı akısı aralığı, 95°C yüzey sıcaklığı ve 2.6-9.9  $\text{kg}/\text{m}^2$  kütleli debilerinde deneyleri yürütmüşlerdir. Bu şartlar altında ısı transfer katsayısını 9000-24000  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  aralığında bulmuşlardır. Kütleli debinin artmasıyla ısı transferinin arttığını görmüşlerdir. Deneysel sonuçlarla ortalama Nusselt sayısı ve Reynolds

sayısıyla 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 spreyle kaynama olmayan rejimde bile ısı transferinin zorlanmış konveksiyona göre önemli ölçüde fazla olduğunu göstermişlerdir.

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.

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.

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. Sprey karakteristikleri ve yüzeyin ısıl davranışını birleştirilmiş hızlı tepkili ısıl çiftlerle phase-doppler anemometresi kullanarak ölçmüşlerdir. Bu donanım sprej 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 supabında enjeksiyon şartlarının ısı transferine etkisini incelemek için bir ön çalışmayla test etmişlerdir. CHF’de sıcaklık hedef yüzeyle 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.

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.

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

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 ( $d_{32}$ ) 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 amaçlamıştır. Bete#1, B 200 ve Bete#2 nozul tipleri için verileri çizelge halinde sunmuşlardır. Sonuçları  $\eta$ -N, CHF-N,  $\eta$ -d<sub>32</sub>, CHF-V grafikleri olarak vermişlerdir.

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 spreyi için test verilerini karşılaştırmışlardır. Hava hızını TSI Air Velocimeter ile, hava ve su debisini rotametre ile ölçtüler. 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  $G$  (kg/m<sup>2</sup>s) -  $h_{mist}$  (W/m<sup>2</sup>K), ısı transferi oranı-radyal dağılım, LF (Leidenfrost sıcaklığı)- $G$  grafiklerini vermişlerdir. En iyi soğutmayı, ısı transfer katsayısının zirvede olduğu durma noktasında elde etmişlerdir. Leidenfrost sıcaklığının hem hava hızı hem de kütle akısı ile arttığı sonucuna varmışlardır.

Li *et al.* (2006) ters (inverse) hesaplamalı bu deneysel ve sayısal çalışmalarında mikroelektroniklerin sprey soğutmasında sprey açısının soğutma performansına etkilerini incelemiştir. Ters hesaplamalı ısı transferi algoritmasını saf silikon yüzeyde ölçülen sıcaklık verilerini kullanarak bilinmeyen sprey soğutma ısı akılarını hesaplamak için geliştirmişlerdir. Hesaplama planını sonlu elemanlar metodu ve kısaltılmış tek değer yöntemleri (tanımlanan sınır değeri için) ile yapmışlardır. Sonuçta yanal ısı iletiminin arttığını göstermişlerdir. Soğutucu akış debisini akış ölçer ile görüntülemişlerdir. Deneysel verileri sabit basınçta çeşitli pompa hızlarında tekrar etmişlerdir. Soğutucu besleme basıncı ve akrilik hazne buhar basıncını basınç transdüzerleri ile ölçmüşlerdir. SMD'yi 43µm 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 sprey açıları soğutma kapasitesinde önemli bir azalma olduğunu göstermişlerdir.

Azalmanın bir başka önemli sebebinin de daha büyük sprej açılarındaki yüzeyden gönderilen sprej hacimsel akısındaki azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Chandra *et al.* (1996); saf suyun yüzey gerilmesini azaltmak için 100-1000 ppm oranlarında sodyum dodesil yüzey aktif maddesi (SDS) eklemişlerdir. Çalışmalarında damlacık çapı 2.05 mm ve yüzey sıcaklığı 60-110°C aralığındadır. Sonuç olarak yüzey aktif madde eklendiğinde damlacıkların yüzey üzerinde daha fazla yayılma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Damlacık daha fazla yayıldığında, yüzey üzerinde daha ince bir sıvı filmi tabakası oluşmakta ve bunun sonucu olarak ısı transferi artmaktadır.

Pasandideh *et al.* (1995); akışkana ilave edilen yüzey aktif maddenin, damlacık dinamiklerine etkileri üzerine bir çalışma yürüttüler. Çalışmalarında SDS'nin konsantrasyonu 0-1000 ppm aralığında, damlacık çapı ve çarpma hızı sırasıyla 2.05 mm ve 1.05 m/s'dir. Nozul ile yüzey arasındaki mesafe 50 mm'dir. Genelde, damlacıklar yüzey üzerinde biriktiği zaman radyal olarak yayılır ve sonar merkeze doğru geri sıçrar. Araştırmalarında yüzey aktif maddenin eklenmesinin sadece damlacığın yüzeydeki yayılma çapını arttırmadığı, aynı zamanda geri sıçrama yüksekliğini de azalttığını rapor ettiler ve damlacık deformasyonu için bir numerik model geliştirdiler.

Cader *et al.* (2004); elektronik çiplerin soğutulması üzerine yaptıkları çalışmada, sprej soğutma sistemiyle hava soğutma sistemini karşılaştırdılar. Sprej soğutma ile çiplerin bağlantı noktasındaki sıcaklıkta 37°C'lik bir düşüş ve enerji tüketiminde ise %35'lik bir tasarruf sağlandığı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir.

Schwardskopf *et al.* (2004); sprejin açısının soğutma prosesi üzerine etkisini inceledikleri çalışmalarında soğutulacak yüzey aşağı doğrudur ve nozul yukarı doğru 0 den 600 m'ye kadar eğimle sprej püskürtmektedir. Akışkan olarak 101 kPa basınçta PF-5060 kullanılmaktadır. Araştırmacılar, nozulun eğim açısı 0 ile 400 m arasındayken ısı akışının 63 W/cm<sup>2</sup> olduğunu ve eğim açısı 400m'nin üzerine çıktığında kritik ısı akışının ani bir şekilde düştüğünü tespit etmişlerdir.



Issa and Yao (2005); damlacık ile yüzey arasındaki etkileşim dinamiklerinin ve çeşitli çevre basıncı koşullarında ısı transferi mekanizmasının benzeşimini yapmak için, bir sayısal model geliştirdi. Araştırmacılar basınç arttıkça Leidenfrost Sıcaklığının (Minimum ısı akışı geçişinin meydana geldiği sıcaklık) da arttığını tespit etmişlerdir. Buna bağlı olarak damlacığın çarpma esnasında yüzeyi ıslatma miktarı ve temas ısı transfer etkinliği de artmaktadır.

Xishi *et al.* (2004); yüzey sıcaklığı, damlacık çapı ve hızı gibi spray karakteristiklerinin soğutma prosesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. 0.2 MPa, 0.4 MPa ve 0.6 MPa değerlerindeki farklı çalışma basınçlarında ve 80°C, 100°C ve 120°C yüzey sıcaklıklarında yürüttükleri deneysel çalışmalarda, damlacığın soğutma etkinliğinin yüzey sıcaklığına ve spray karakteristiklerinden özellikle Weber Sayısına bağlı olarak önemli değişim gösterdiğini saptamışlardır.

Halvorson *et al.* (1994) sıvı damlacıkları ile soğutulan ısıtılmış bir yüzeyin kritik ısı akısını incelemişlerdir. Çalışmalarında, damlacıkların frekansı 2-15 Hz, çapları ise 2.3 mm ile 3.8 mm arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Saf su ihtiva eden damlacıklar yaklaşık 9 cm mesafeden 1.3 m/s hızla yüzeye çarptırılmıştır. Kritik ısı akısının altındaki değerlerde damlacıkların yüzey boyunca üniform olarak yayıldığı ve buharlaştığı görülürken, kritik ısı akısı değerine yaklaşıldığında dış bölge buharlaşmaya devam ederken sıvı filminin merkezindeki bölge çekirdek kaynamaya maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Bütün kritik ısı akısı değerlerinin saf suyun kaynama sıcaklığının 25-45°C üzerindeki sıcaklık aralığında meydana geldiği belirtilmiştir. Buna ilaveten kızgın buhar sıcaklığının hem damlacık çapı hem de frekansındaki artış ile artma eğilimi gösterdiği ifade edilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada damlacık çapı küçüldüğünde kritik ısı akısının arttığını gözlemlemişlerdir. Hem Pais *et al.* (1992) hem de Estes and Mudawar (1995) damlacık çapı azaldığında kritik ısı akısının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca daha küçük damlacıkların yüzey üzerinde daha ince bir sıvı filmi tabakası oluşturacağı düşüncesiyle sıvı filmi tabakasının kalınlığı azaldığında ısı akısının artacağı varsayımını yapmışlardır. Mesler and Mailen (1977) daha önce yaptıkları çalışmalarında bu varsayımı destekleyici sonuçlar bulmuştur.

Sawyer *et al.* (1997) yayınladıkları çalışmalarında damlacık çapı, frekans ve hızın kritik ısı akısı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Saf su damlacıklarının çapları 1.5-2.7 mm arasında, hızları 2.4-4.6 m/s aralığında ve Weber Sayısı (We) ise 170-730 aralığında seçilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarında artan frekans ve kütle akısının kritik ısı akısının artmasına yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kritik ısı akısı için ampirik bağıntı geliştirmişlerdir. Çalışmaya paralel olarak Sehmey *et al.* (1995) ve Chow *et al.* (1997) yaptıkları çalışmalarda kritik ısı akısının sıvı kütle akısı ile doğru orantılı değişim gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Healy *et al.* (1998), Sawyer *et al.* (1997) tarafından elde edilen bağıntıyı, farklı basınç koşullarında deneysel veriler elde ederek geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu bağıntının 0.2-2 atm basınç aralığında ve düşük Weber Sayılarında iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra Cabrera and Gonzalez (2003) çekirdek kaynama rejiminde ısı akısı için damlacık çapı, damlacık hızı, kütle akısı, çevre basıncı ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerine bağlı bir ampirik formül geliştirmişlerdir.

Chen *et al.* (2002) yayınladıkları makalelerinde damlacık çapı, ısı akısı ve hız parametrelerinin kritik ısı akısı ve ısı transferi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sadece bir parametreyi değiştirip diğerlerini sabit tutarak deneysel çalışmalarını yürütmüşlerdir. Her bir parametrenin artışına bağlı olarak kritik ısı akısının ve ısı taşınım katsayısının arttığını ve en baskın parametrenin damlacık hızı olduğunu ifade etmişlerdir.

Pedersen (1970), Kendall and Rohsenow (1978), Senda *et al.* (1988) tek damlacığın ısı transferi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalarda yüzeyde meydana gelen ısı transferini etkileyen en önemli parametrelerin damlacık büyüklüğü, yüzey sıcaklığı ve damlacık Weber Sayısı olduğunu belirtmişlerdir.

Bazı araştırmacılar düşük yüzey gerilimine sahip damlacıkların yüzey üzerinde daha fazla yayılacağından hareketle daha fazla ıslak alan ve daha ince sıvı filmi tabakası oluşacağını öne sürmüş ve akışkanın yüzey gerilmesini azaltmaya çalışarak ısı

transferini arttırmayı hedefleyen çalışmalar yapmışlardır. Bu doğrultuda akışkana değişik oranlarda yüzey aktif madde eklenerek damlacığın yüzey gerilmesi azaltılmıştır.

Pasandideh-Fard *et al.* (1995) akışkana ilave edilen yüzey aktif maddenin, damlacık dinamiklerine etkileri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında SDS'nin konsantrasyonu 0-1000 ppm aralığında, damlacık çapı ve çarpma hızı sırasıyla 2.05 mm ve 1.05 m/s; nozul ile yüzey arasındaki mesafe ise 50 mm olarak belirlenmiştir. Genelde, damlacıklar yüzey üzerinde biriktiği zaman radyal olarak yayılır ve sonra merkeze doğru geri sıçrar. Araştırmalarında yüzey aktif maddenin eklenmesinin sadece damlacığın yüzeydeki yayılma çapını arttırmadığı, aynı zamanda geri sıçrama yüksekliğini de azalttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca damlacık deformasyonu için bir nümerik model geliştirmişlerdir.

Strotos *et al.* (2008) 120°C'ye ısıtılmış paslanmaz çelik üzerine çarpan su damlacıklarının soğutma etkinliği üzerine etkilerini inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Damlacığın çarpma hızı arttığında daha fazla yayıldığını ve sıcak yüzey üzerinde daha çok ıslak alan meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Buna bağlı olarak, çarpma hızının soğutma etkinliği üzerine dikkate değer bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir.

Sözbir *et al.* (2003) yüksek sıcaklıktaki metal yüzeylere çarpan su sisinin ısı transferi üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Yapılan deneylerde hava jetine eklenen az miktarda suyun ısı transferini çarpıcı bir şekilde arttırdığı tespit edilmiştir. Bu konuda yapılmış bir başka çalışmada Sözbir and Yao (2002) sertleştirilmiş cam için su sisi ile soğutma prosesini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, yüksek basınçlı havanın kullanımında kesin bir tasarruf sağlandığı ayrıca sistemin enerji gereksinimlerinin dikkate değer bir biçimde düşürüldüğü saptanmıştır.

Nirmalan *et al.* (1998) deneysel çalışmalarında türbin pervanelerinin su sisiyle soğutulmasında ısı transfer performansını incelemişlerdir. Çalışmalarının neticesinde

hava içerisine katılan %5 oranında suyun ısı transferini yaklaşık olarak %20-30 arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Yang *et al.* (1993) atomizasyon basıncının ve sıvı kütle akısının ısı transferi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deneysel gerçekleştirdikleri çalışmalarında damlacık çapı 12.4-17.3  $\mu\text{m}$ , damlacık hızı 25.6-57.3 m/s, yüzey üzerinde oluşan sıvı filmi kalınlığı 85-235  $\mu\text{m}$  aralığında ve yüzey pürüzlülüğü 0.28  $\mu\text{m}$ 'den küçüktür. Çalışma sonucunda sıvı kütle akısı arttığında ısı akısının da arttığını tespit etmişlerdir. Yang *et al.* (1996) gerçekleştirdikleri diğer bir çalışmalarında hava ve saf suyun kütleli debilerinin soğutma prosesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Neticede, 1993 yılında gerçekleştirdikleri çalışmayla paralel yönde spreyi oluşturan akışkanlardan birinin kütleli debisi sabit tutulurken diğerinin ki artırıldığında ısı akısının da arttığını ifade etmişlerdir.

Issa and Yao (2005) damlacık ile yüzey arasındaki etkileşim dinamiklerinin ve çeşitli çevre basıncı koşullarında ısı transferi mekanizmasının benzetimini yapmak için bir sayısal model geliştirdi. Araştırmacılar basınç arttıkça Leidenfrost sıcaklığının (Minimum ısı akısı geçişinin meydana geldiği sıcaklık) da arttığını tespit etmişlerdir. Buna bağlı olarak damlacığın çarpma esnasında yüzeyi ıslatma miktarı ve temas ısı transfer etkinliği de artmıştır.

Cichelli *et al.* (1946) ile Bonilla *et al.* (1941) gerçekleştirdikleri çalışmalarda soğutucu akışkan olarak suyun yanı sıra etanol, benzen, aseton, bütanol, propan ve n-heptan kullanarak maksimum ısı akısı değerinin hangi basınç aralığında olduğunu incelemişlerdir. Su için değerlerin 54-73 atm aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Ghadbane and Holman (1991) sprey soğutma prosesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada akışkan olarak Freon-113 kullanmışlardır. Yapılan deneylerde damlacık hızı 5.0 m/s ile 28.0 m/s, damlacık çapı ise 210  $\mu\text{m}$  ile 980  $\mu\text{m}$  aralığında belirlenmiştir. Akışkanın kütle akısının, damlacık hızının, damlacık çapının ve nozul ile yüzey

arasındaki mesafenin ısı akısı üzerine etkilerini inceledikleri çalışmalarında Weber sayısının ısı transferi üzerine son derece etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Yang and Fan (2006) üç boyutlu olarak modelledikleri n-heptan ve su damlacığının düz bir yüzey üzerindeki ısı transferini incelemişlerdir. Araştırmacılar n-heptan damlacıklarının su damlacıklarına nazaran yüzey üzerinde soğutma performansının daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu alanda çalışmalar yürüten diğer araştırmacılar; Sözbir and Yao (2004), Chang and Yao (2000), Ortiz and Gonzalez (1999), Ohkubo and Nishio (1992) ve Pais *et al.* (1992) yüzeyde meydana gelen ısı transferini etkileyen en önemli parametrelerin yüzey sıcaklığı, damlacık çapı ve Weber sayısını olduğunu belirtmişlerdir.

Webb and Ma (1995) sprey soğutma sistemleri üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Neticede yüzey üzerinde en yüksek ısı transferinin durgunluk noktasında meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Su sisi 100  $\mu\text{m}$ 'den daha küçük damlacıklar içerir ve hava akışı ile taşınabilir. Su sisinin sıvı kütle akısı düşük olduğundan ısı transferi oranı su spreylere kadar yüksek değildir. Ancak su sisi göreceli olarak üniform ısı transfer dağılımı sağlar ve yüksek su kullanım verimliliğine sahiptir. Bundan başka, hem su hem de hava akış oranları geniş bir yelpazede ısı transferi değişimlerine uyarlanabilir. Bu avantajlarından dolayı, su sisi ile soğutma metodunun ince metal yüzeylerin, ince kalıpların, elektronik çiplerin ve sertleştirilmiş camların soğutulması proseslerinde yüksek sıcaklıktaki film kaynama rejimi koşulunda kullanılması tercih edilebilir (Yiğit, 2009).

## 1.2. Spreyi Etkileyen Temel Parametreler

Bu bölümde, bu çalışmada ele alınan bazı önemli kavramlar açıklanmaktadır. Öncelikle yüzey gerilimi ve viskozite gibi özelliklerin sprey oluşumuna etkisi açıklanmaktadır.

Genel ve basit bir tanımla, bir sprej oluşturabilmek için, belirli bir sıvı kütlesinin toplam yüzeş alanının bir atomizer yardımıyla artırılması gerekir. Sprej kalitesinin temel göstergelerinden biri, sprej oluşumundan sonra tüm damlacıkların yüzeş alanları toplamının, atomizer girişindeki sıvı kütlesinin yüzeş alanına göre artış oranıdır.

Sprej oluşumunu etkileyen en önemli akışkan özellikleri; yoğunluk, yüzeş gerilimi ve viskozitedir. Kullanılan akışkanların, yoğunluk değerleri merteye olarak birbirlerine yakın oldukları halde, viskozite ve yüzeş gerilimi değerleri arasında önemli farklar bulunabilir. Ayrıca belirli bir akışkanın bünyesine çeşitli katkı maddeleri katıldığında, viskozite ve yüzeş gerilimi önemli oranda değiştirilirken, yoğunluk genellikle sabit kalır. Bu nedenle, yüzeş gerilimi ve viskozitenin sprej oluşumu üzerindeki etkileri aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Sprej sisteminin modellenmesi sıvı jetinin parçalanmasının ardından damlacık çap dağılımının öğrenilmesiyle ilişkilidir. Sprejin 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.

### **1.2.1. Yüzeş gerilimi**

Bir sıvı yüzeş ile bunu çevreleyen buhar ya da başka bir gaz ortam arasında, termodinamik özelliklerde ani bir süreksizliğin meydana geldiği ince tabakaya ara yüzeş denilmektedir. Ara yüzeş, birkaç moleköl çapı büyüklüğündeki bir kalınlığa sahip hayali bir zar şeklinde düşünülebilir.

Doğada sıvılar, en düşük serbest enerjiye tekabül eden yüzeş şeklini alma gayreti içerisindedir. Herhangi bir katı yüzeşle temas halinde olmadan yol alan küçük bir akışkan kütlesinin, en düşük yüzeş enerjisine sahip olduğu şekil “küre” olmaktadır. Bu nedenle, sprej akışlarında ana kütlenin parçalara ayrılmasıyla oluşan sıvı kütleleri, nihayetinde küresel damlacıklara dönüşmektedir.

Yüzey alanı  $A=4\pi R^2$  olan bu damlanın yarıçapı  $dR$  kadar artırıldığında, alanındaki artış miktarı  $dA = 8\pi R dR$  ve bu artışı gerçekleştirmek için harcanması gereken enerji  $dE_A = 4\pi R^2 \Delta P dR$  kadardır. Bu durumda, bu küresel damlanın yüzeyindeki yüzey gerilimi, aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{\Delta P R}{2} \quad (1.4)$$

Belirli bir sıcaklık ve basınçta yüzey gerilimi sabit olduğundan, yazılı eşitliğe göre, damlacık çapı küçüldüğünde, damla içerisindeki basınç artmaktadır. Sprey akışlarında, damlacık çapı kritik bir değerden küçük olan küresel bir sıvı damlası, kararlı bir yapıda olduğu için daha küçük damlalara bölünmeyecektir. Sıvı damlasında deformasyona yol açan aerodinamik kuvvetlere karşılık, yüzey geriliminin toparlayıcı ve kararlı hale getiren bir etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle, yüzey gerilimi yüksek olan sıvılarla oluşturulan bir spreyle, daha büyük çaplı kararlı damlacıklar oluşmaktadır (Lefebvre 1989).

### 1.2.2. Viskozite

Sprey akışlarında viskozite, damlacık çapı dağılımının yanısıra, atomizör çıkışından önceki basınç kayıplarını, dolayısıyla spreyle açısı ve akış debisi gibi önemli parametreleri de etkilemektedir. Bu nedenle viskozitenin, spreyle oluşumuna en büyük etkiyi yapan akışkan özelliği olduğu söylenebilir. Akışkanın viskozitesi arttığında, verilen enerjinin daha küçük bir kısmı atomizasyonu gerçekleştirmek için harcanır. Bu etki, viskozitenin daha yüksek olduğu akışkanlarda, sıvı külesinin parçalanmasının gecikmesine ve daha büyük damlacıkların oluşmasına neden olur.

Newton tipi akışkanlarda dinamik viskozite ( $\mu$ ), sadece sıcaklık ve basınç gibi özelliklere bağlı olarak değişen termodinamik bir özelliktir (Durst 2008). Newton tipi olmayan akışkanlarda ise, akış koşullarına ve/veya akışkanın akıştan önce geçirdiği sürece (zamana) bağlı olarak viskozite değişebilir.

### 1.2.3. Boyutsuz sayılar

Kararsız sıvı kütlelerinin parçalanmasında rol oynayan kuvvetler; atalet kuvvetleri, yüzey gerilimi ve viskoz kuvvetler şeklinde sıralanabilir. Bu nedenle bu tür akışları karakterize eden boyutsuz sayılar bu üç farklı kuvvetin farklı kombinasyonlarından oluşmaktadır. Herhangi bir zorlanmış akış problemini karakterize eden boyutsuz sayılar arasında ilk akla gelen, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak bilinen Reynolds sayısıdır.

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (1.5)$$

Burada  $\rho$  ve  $\mu$  sırasıyla akışkanın yoğunluğunu ve viskozitesini,  $d$  ve  $V$  ise sırasıyla atomizör çıkışındaki hidrolik çapı ve akış hızını göstermektedir. Kararsız haldeki sıvı kütlelerinin hava ya da bir başka ortam içerisindeki serbest hareketinde, yüzey gerilimi önem kazanmaktadır. Atalet kuvvetlerinin yüzey gerilimi kuvvetlerine oranını gösteren Weber sayısı,

$$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \quad (1.6)$$

şeklinde tarif edilmektedir. Burada  $L$ , kararsız akışkan kütlesi için karakteristik bir uzunluğu temsil etmektedir. Weber sayısının karakterize ettiği bazı kararsızlık problemlerinde, sıvı üzerindeki yüzey gerilme kuvvetleriyle, aerodinamik direnç kuvvetleri oranlanmaktadır. Bu durumda, Weber sayısındaki yoğunluk değerinin, sürekli ortama yani havaya ait olduğuna dikkat edilmelidir.

Özellikle viskozitenin önem kazandığı kararlılık problemlerinde, viskoz kuvvetler ile yüzey gerilimi kuvvetlerinin oranını gösteren ve içerisinde akış hızının bulunmadığı bir başka boyutsuz sayıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için gerek boyut analiziyle, gerekse Reynolds ve Weber sayılarından atalet kuvvetlerinin yok edilmesiyle elde edilebilen, Ohnesorge sayısı,



$$Oh = \frac{\sqrt{W_e}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma L}} \quad (1.7)$$

kullanılmaktadır (Ohnesorge 1936). Çeşitli kaynaklarda Ohnesorge sayısı yerine, bu sayının tersinin karesine eşit olan Laplace sayısının ( $L_p=Oh^{-2}$ ) kullanımına da rastlanmaktadır.

#### 1.2.4. Sprey biçimi

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 karakteristiklerinden biri de sprej biçimidir. Literatürde bilinen sprej biçimleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Yeşildal 2014).

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

#### 1.2.5. Sprej açısı

Sprej açısı özellikle sprej soğutma uygulamalarında soğutma karakteristiklerinin belirlenmesine yardımcı olan önemli bir parametredir. Literatürde karşılaşılan sprej açısı eşitliği aşağıda sunulmuştur.

$$C = 2D \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.8)$$

Burada C, teorik kaplama alanıdır.

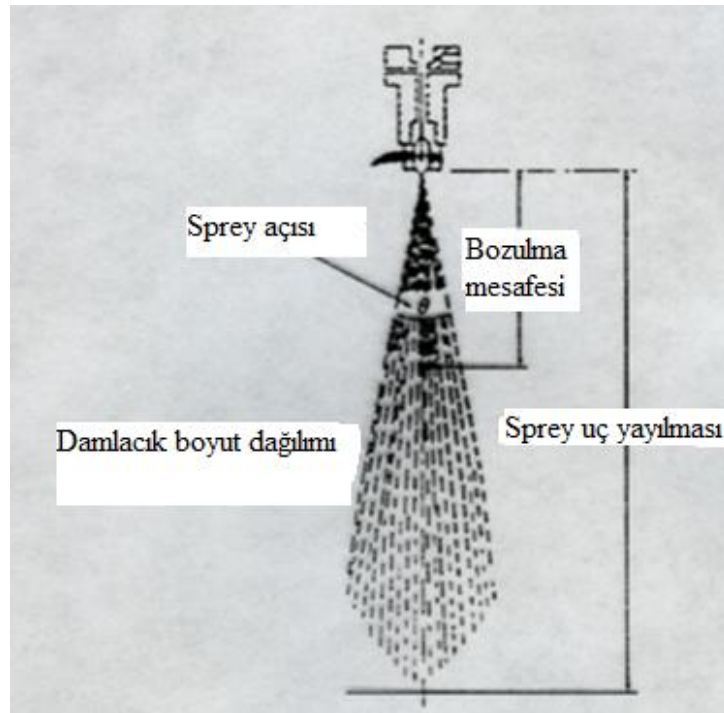
### 1.2.6. Damlacık boyutu

Spreyin 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.

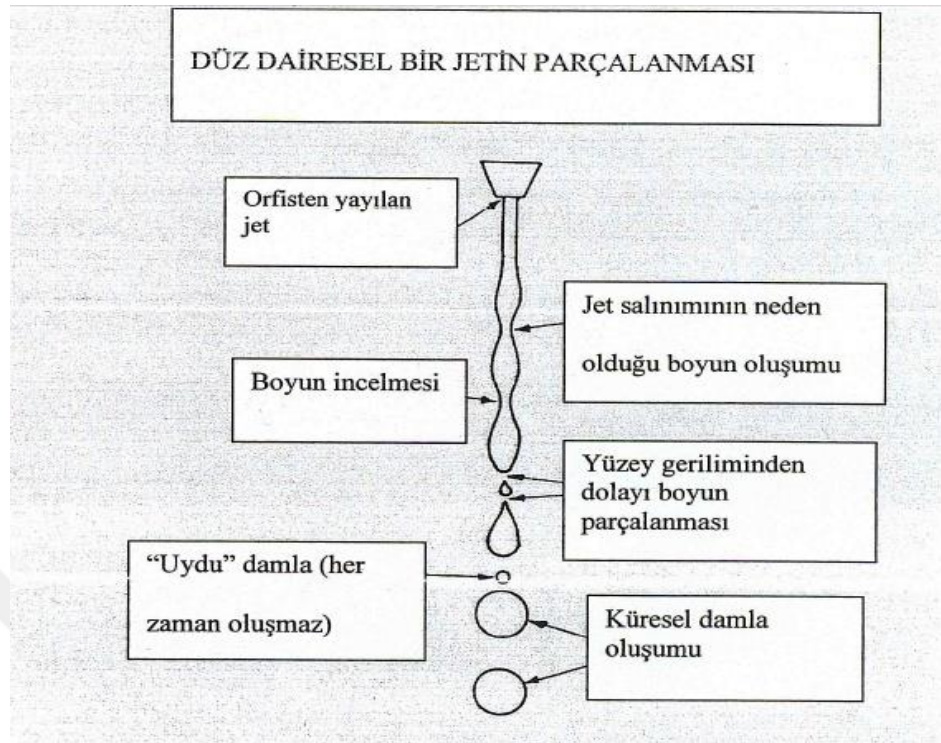
Bağıl span faktörü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$RSF = \frac{D_{V0.9} - D_{V0.1}}{D_{V0.5}} \quad (1.9)$$

Bu değer damla çap dağılımının benzerliğini gösterir. Bu sayı 1'e yakınsa, daha üniform spreyn elde edilebilir.



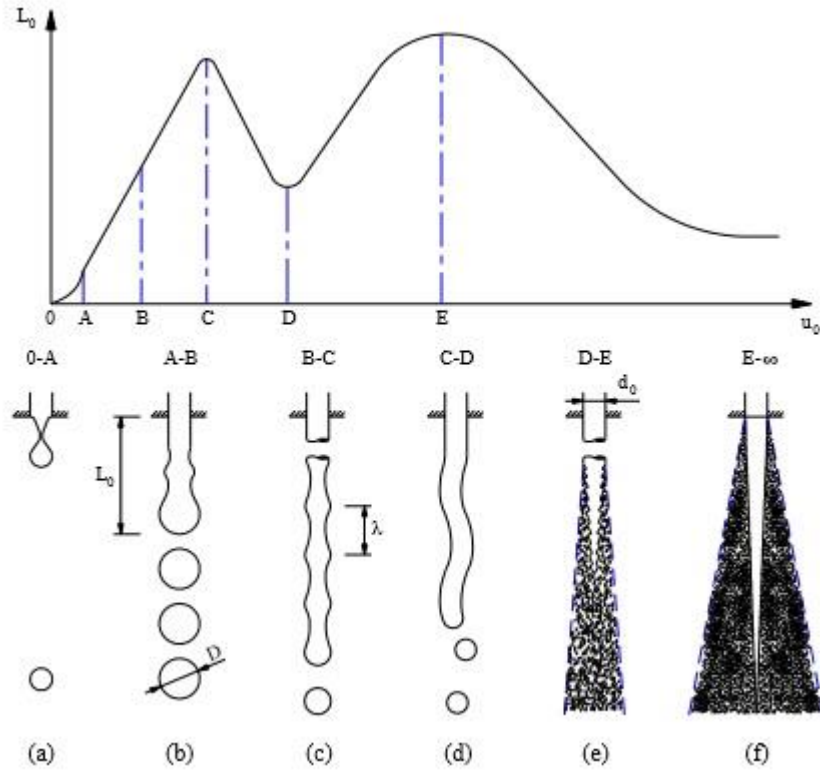
Şekil 1.1. Spreyn bozulma açısının şematik görünümü



**Şekil 1.2.** Düz dairesel jetin parçalanması

**Çizelge 1.1.** Jet bozulma rejimlerinin sınıflandırılması

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



**Şekil 1.3.** Jet hızı ile ayrılma mesafesinin değişimi ve farklı akış rejimleri

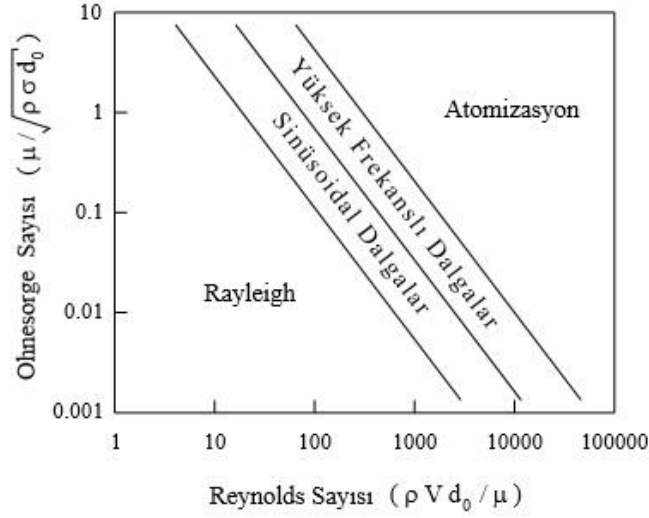
a) Damlama, b) ve c) Rayleigh, d) Sinüsoidal, e) Yüksek frekanslı dalgalar ve f) Atomizasyon (Lefebvre, 1989).

Jet akışlarının parçalanmasını karakterize eden önemli büyüklükler parçalanmadan önceki jet uzunluğu ( $L_0$ ), kararsızlığın bir göstergesi olan rahatsızlık dalga boyu ( $\lambda$ ) ve damlacık çapı ( $D$ ) değerleridir.

Şekil 1.3’de 0-A arasındaki bölge, akış hızının çok düşük olduğu damlama akışını göstermektedir. Bu bölgede damlacık oluşumu hemen atomizer çıkışında başlar ve hız belirli bir değere ulaşına kadar herhangi bir silindirik jet meydana gelmez. Damlama akışında, yerçekimi ile yüzey gerilimi kuvvetleri arasındaki dengenin bozulduğu anda damlacık oluşumu gerçekleşir. Grafikte A-C arasındaki bölge, atomizer gerisindeki akışın laminar olduğu ve  $L_0$  ile  $u_0$  arasındaki değişimin doğrusal olduğu iki ayrı akış rejimini göstermektedir. Rayleigh (1879)’un bu bölgedeki akışla ilgili yaptığı çalışmaların ardından, bu bölgedeki akış “Rayleigh” ismiyle adlandırılmaktadır. Rayleigh bölgesinin A-B arasındaki ilk kısmında, hava direncinin kopmaya bir etkisi

olmayıp, akışın kendi içindeki rahatsızlıkların büyümesiyle ayrılma oluşur. Akışın kendi içindeki rahatsızlıklar arasında, jet içerisindeki hız profiline atomizer çıkışındaki parabolik şekilden, serbest akıştaki sabit hız profiline geçişi (hız profiline toparlanması), atomizer gerisindeki kavitasyon ve yüzey pürüzlülüğü gibi faktörler sayılabilir. Bu bölgenin B-C bölgesinde ise yüzey gerilmesi ile direnç kuvvetleri damlacık oluşumunda eş baskın rol oynar. C-D arasındaki bölge türbülansa geçiş bölgesini göstermekte olup, direnç kuvvetlerinin artan etkisiyle jet boyunca sinüs eğrisi şeklinde rahatsızlık dalgaları oluşumuyla ayrılma mesafesi azalmaya başlar. D noktasından sonraki bölgede, atomizer gerisindeki akış türbülanslıdır. Bu bölgede etkili olan rahatsızlık kaynaklarından hangisinin ayrılmaya sebep olan etkiler arasında baskın rolü oynadığı, kesin olarak ortaya konulamamıştır. Bu bölgede yapılan deneysel çalışmalara göre ayrılma uzunluğu önce artmaya sonra azalmaya başlamaktadır. E noktasından sonraki bölge “tam gelişmiş sprej” şeklinde isimlendirilmektedir (Balık 2010).

Sprej akışlarında, akış rejimini tayin etmek için, parçalanma mekanizmalarına göre farklı bölgelerin belirtildiği grafikler kullanılmaktadır. Silindirik sprej jetleri için bu tür bir grafik Şekil 1.4’te verilmektedir (Lefebvre 1989). Kullanılan akışkan ve atomizer belli olduğunda, bu grafiği düşey ekseninde verilen Ohnesorge sayısı sabit olup, bu değere karşılık gelen yatay bir doğru üzerinde, farklı akış rejimlerinin sınırlarını gösteren Reynolds sayıları elde edilebilir.



**Şekil 1.4.** Silindirik spray jetleri için farklı akış rejimi bölgeleri (Lefebvre 1989)

Düşük jet hızlarında parçalanmayı başlatan etki, akışın bünyesinden veya dış kaynaklardan doğan rahatsızlıklardır. Eğer bu rahatsızlıkların dalga boyu belirli bir değerden ( $\lambda_{\min}$ ) küçük olursa, yüzey gerilme kuvvetleri rahatsızlığı sönmüleyerek ortadan kalkmasını sağlar.  $\lambda_{\min}$  değerinden büyük dalga boylarındaki rahatsızlıklar ise, akışkan jeti boyunca yüzey gerilimi kuvvetleri tarafından kararsızlığın artmasına ve sonunda jetin kopmasına yol açar.

Jet akışlarıyla ilgili en eski çalışmalardan birinde Lord Rayleigh (1879), düşük hızlı silindirik bir jetin viskoz olmayan akışını teorik olarak incelemiştir. Bu akış rejimi bölgesinde kopma öncesinde sıvı jet yüzeylerinde boğumlar şeklinde görülen “kapiler” ya da “varikoz” akış yapıları, “Rayleigh akış yapıları” şeklinde de adlandırılmaktadır. Bu bölgede parçalanmadan önceki jet uzunluğu, akışkan hızı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Rayleigh, pertürbasyon metodunu kullanarak, sonsuz uzunluktaki silindirik bir jet akışının kararlılık analizini yapmış ve minimum rahatsızlık dalga boyunu,

$$\lambda_{\min} = \pi d_0 \quad (1.10)$$

şeklinde elde etmiştir. Bu sonuca göre düşük hızlı jetlerde, akışkan jetinin çevre uzunluğundan daha büyük dalga boylarındaki rahatsızlıkların büyüyerek, jetin

parçalanmasına neden olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, rahatsızlık dalga boyu değerlerinden özellikle bir tanesinin, parçalanmaya diğerlerinden daha yatkın olduğunu bulmuştur. “Optimum dalga boyu ( $\lambda_{opt}$ )” şeklinde adlandırılan bu değeri,

$$\lambda_{opt} = 4,51d_0 \quad (1.11)$$

şeklinde elde etmiş olup, bu değerinin karşılık geldiği damlacık çapını da,

$$D = 1,89d_0 \quad (1.12)$$

şeklinde hesaplamıştır. Buna göre Rayleigh bölgesinde oluşan damlacıkların, akış jeti çapının yaklaşık olarak iki katı büyüklüğü civarında olduğu ortaya çıkmaktadır. Rayleigh’in silindirik jet üzerindeki çalışmaları, basit kabuller altında (laminer, viskoz olmayan akış, direnç kuvvetlerinin ihmal edilmesi) yapıldığı halde, geniş kabul görmüştür. Daha sonrasında ise bu referans çalışma, Weber (1931) tarafından, viskoz akışlar için hava direnci etkileri de hesaba katılarak genişletilmiştir. Böylece farklı viskozite ve akış hızı değerleri için rahatsızlık dalga boyunun değişimi elde edilebilmiştir. Weber’in çalışması Haenlain (1932) tarafından viskozite değeri yüksek (0.85 Pa s) akışkanlarla yapılan deneysel çalışmalarla da desteklenmiş ve bu tür yüksek viskoziteli akışkan jetlerinde, optimum dalga boyunun 30-40 $d_0$  mertebelerine çıkabileceği gösterilmiştir.

### 1.3. Sprey Karakteristik Çapları ve SMD Korelasyonları

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

$$\overline{D}_{pq} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i^p}{\sum_{i=1}^n N_i D_i^q} \right)^{1/(p-q)} \quad (1.13)$$

$D_i$  : i. sınıfta bulunan ortalama damla çapı ( $\mu\text{m}$ )

$N_i$  : 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 spre y hacminin toplam spre y 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 spre y hacmi bakımından ifadesidir. Bazı damlalar toplam sıvı hacminin (veya kütlesinin) %50'sinden az, bazıları fazladır.

**Herdan apı ( $d_{43}$ ):** Bu ap yanma çalışmaları için uygundur.

$d_{v.1}$  : Sıvı spre y hacminin %10'undan küçük olanları hesaplar. Zira i uygulamalarda nozul sapma potansiyeli ölçümü için uygundur.

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

Homojenlik katsayısı ( $r$ ) aşağıdaki şekilde hesaplanır.



$$r = \frac{d_{V,5}}{d_{N,5}} \quad (1.14)$$

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

Su ve kerosen gibi düşük viskoziteli sıvılar için SMD'de basın faktörleri; 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.

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 irdelenmek 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 metodta ayrıntılı kısıtlamalarla entropi maksimizasyonu prensibi kullanılarak spreyn oluşumu tamamıyla rastgele modellenilebilir. Çoğu muhtemel damlacık çap dağılımı fiziksel kısıtlamalar altında entropi maksimizasyonuna uyar (Ashgriz 2011).

İkincisi analitik bir yaklaşım olan DPF (Discrete Probability 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 ( $\Gamma$ ) dağılımı ile temsil edilmiştir (Eggers and Villermaux 2008).

$$P_B \left( x = \frac{D}{\langle D \rangle} \right) = \frac{n^n}{\Gamma(n)} x^{n-1} e^{-nx} \quad (1.15)$$

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 1.2'de spray karakteristik çapı  $d_{32}$ 'nin çeşitli nozul tipleri, çalışma basınçları, hava-sıvı kütleli debi oranı (ALR), spray açısı, yoğunluk ve bağlı hız gibi parametreler için verilen korelasyonları özetlenmiştir.

**Çizelge 1.2.** 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)	$SMD = 1.58 \times 10^3 \left[ \frac{\sigma}{\rho_A V_A^2 d_0} \right]^{0.5} d_0 \left[ \frac{\sigma}{\mu_L V_A} \right]^{0.55} \left( \frac{\rho_L}{\rho_A} \right)^{-1} \left[ 1 + \frac{1}{AFR} \right]^{0.5} + 166 \left[ \frac{\mu_L}{\rho_L d_0 V_A} \right]^{1.1} \left[ \frac{\sigma}{\rho_A V_A^2 d_0} \right]^{0.2} d_0 \left( \frac{\rho_L}{\rho_A} \right)^{0.35} \left[ 1 + \frac{1}{AFR} \right]^{-0.49}$	Plain-jet airblast atomizer
4.	(Li and Tankin 1987)	$SMD = \left( \frac{6}{\pi} \right)^{1/3} \frac{\Gamma(2)}{\Gamma\left(\frac{5}{3}\right)} \left[ \frac{\dot{m}_L}{\rho_L \dot{v}} \right]$	
5.	(Lorenzetti 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)	$SMD = 0.585 \left( \frac{\sigma}{\rho_L U_R^2} \right)^{0.5} + 53 \left( \frac{\mu_L^2}{\sigma \rho_L} \right)^{0.2225} \left( \frac{Q_L}{Q_A} \right)^{1.5}$	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)	$D_{32} = 0.21 d_L (Oh)^{0.0622} \left( W_{eA} \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_L} \right)^{-0.4}$	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

Çizelge 1.2. (devam)

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
	<b>Yazar</b>	<b>Korelasyon</b>	<b>Kullanım aralığı</b>
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)]	$\frac{d_{32}}{d_0} = 13.62 We_{d_0}^{-0.12} Re_{d_0}^{-0.26} \alpha^{0.36} \beta^{0.39} \exp(-1.07\beta)$	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)]	$SMD(cm) = 10^{-4} \left\{ 1.103 y \left(\frac{GLR}{0.12}\right)^{-0.218} + 14.72 \left(\frac{GLR}{0.12}\right)^{-0.3952} \left(\frac{\mu_l}{0.2}\right)^{0.1571} \left(\frac{\sigma}{46}\right)^{0.8199} \right\}$	Air-assist ve airblast nozullarda

Çizelge 1.2. (devam)

2.	(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
	<b>Yazar</b>	<b>Korelasyon</b>	<b>Kullanım aralığı</b>
28	(Elkottb 1982)	$SMD(\mu m) = 3.08 \mu_L^{0.395} (\sigma \rho_L)^{0.727} \rho_A^{0.06} \Delta P_L^{-0.54}$	Basmçlı nozullarda
29	(Lal <i>et al.</i> 2010)	$SMD = A \frac{d_{out}^{0.12} \mu_i^{0.12}}{d_{in}^{-0.56} \mu_a} ALR^{-0.3} \quad (A=8.55 \times 10^{-4})$	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; $\mu$ : 0,003-0,025 kg/ms aralığında
31	(Lefebvre 1989)	$\frac{SMD}{\tau} = \left[ 1 + \frac{16850 Oh^{0.5}}{We (\rho_L / \rho_A)} \right] \left[ 1 + \frac{0.065}{(\dot{m}_A / \dot{m}_L)} \right]$ t: Başlangıç film kalınlığı t = D <sub>0</sub> h / D <sub>an</sub> D <sub>an</sub> : Gaz çıkış çapı, D <sub>0</sub> : Nozul çıkış çapı, We = $\rho_A U_{At}^2 / \sigma$	External-mixing air assist nozullarda
32	(Lefebvre 1989)	$SMD = 51 d_0 Re^{-0.39} We^{-0.18} \left( \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)^{0.29}$ 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

Literatürde sprey 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 dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılarda optimum parametreler Taguchi deney tasarım tekniği

kullanılarak belirlenmiştir. İlk aşamada ısı transferine etki eden parametreler; nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı ( $h/d$ ), kanat yüksekliği, kanat genişliği, kanatlar arası yatay mesafe, kanatlar arası düşey mesafe, sıvı debisi, hava debisi ve zaman olarak belirlenmiştir.  $L_{27}(3^{11})$  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 yapılmış ve 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

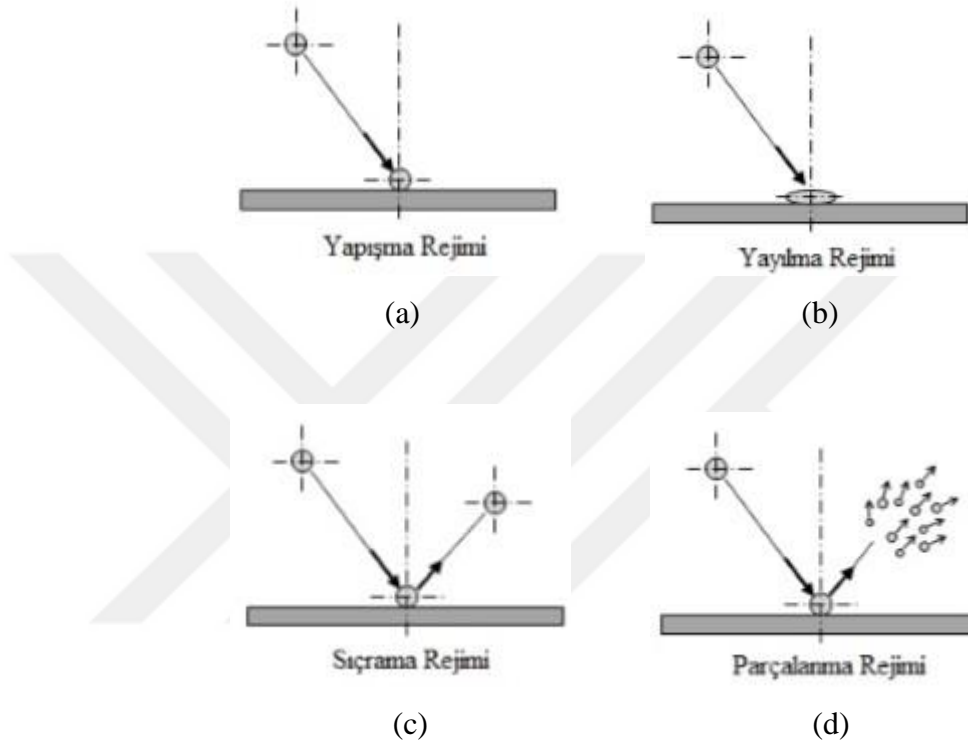
Teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler yüksek performansa sahip termal sistemlere olan ihtiyacı sürekli olarak gündemde tutmakta ve araştırmacı-mühendislerin ilgilerini ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalara yönlendirmektedir. Bugün dünyanın birçok üniversitesinde ve araştırma-geliştirme çalışmalarına önem veren büyük firmaların araştırma laboratuvarlarında sürdürülmekte olan ısı geçişi verimini yükseltmeye yönelik çalışmalara en genel anlamda iyileştirme, artırma veya kuvvetlendirme ismi verilmektedir. Literatürde damlacık ile yüzey arasındaki etkileşim, soğutma sürecinde ısı transfer mekanizmaları ve soğutma performansı ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir.

### 2.1. Damlacık Çarpma Rejimleri

Akışkanın damlacık formunu alma sürecinde yüzey gerilmesi oldukça önemlidir. Damlacık içerisindeki bir molekül, çevresinde bulunan moleküller tarafından eşit kuvvetle çekilir. Bu sayede bir denge hali sağlanır ancak sıvı-gaz ortak yüzeyini oluşturan sıvı molekülleri için bu denge halinden bahsetmek mümkün değildir. Damlacık yüzeyindeki moleküllerin her iki faza ait moleküllerce çevrelenmesi ve sıvı moleküllerin çekim kuvvetlerinin gaz moleküllerinkinden daha büyük olması nedeniyle, yüzeydeki moleküller içeriye doğru yönelir. Bu sayede damlacık hacmi küçülmeye başlar ve minimum alanda maksimum hacim hapsedilmeye çalışılır. Böylece damlacık küresel bir geometriye sahip yapı kazanma eğilimi gösterir.

Damlacık-yüzey arasındaki davranışı etkileyen parametreler; damlacığın çarpma hızı, şekli, çapı, açısı gibi kinematik özelliklerin yanında, damlacığın sıcaklığı, yüzey gerilmesi ve viskozitesi gibi termodinamik özellikleri de gösterilebilir. Bunlara ilaveten damlacığın çarptığı yüzeyin pürüzlülüğü, eğimi ve sıcaklığı da sayılabilir. Ancak Weber sayısını ( $We$ ) diğerlerinden ayrı değerlendirmek gerekir. Damlacığın atalet kuvvetlerinin yüzey gerilmesine oranı olarak ifade edilen Weber sayısı damlacık deformasyonu için temel parametre olarak düşünülebilir. Çarpma Weber sayısının

değerine göre damlacık ile yüzey arasındaki etkileşim değişiklik göstermektedir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi damlacığın yüzeye çarptıktan sonraki davranışı dört ana duruma göre sınıflandırılabilir (Yiğit 2009).



**Şekil 2.1.** Damlacığın çarpma rejimleri.

### 2.1.1. Yapışma rejimi

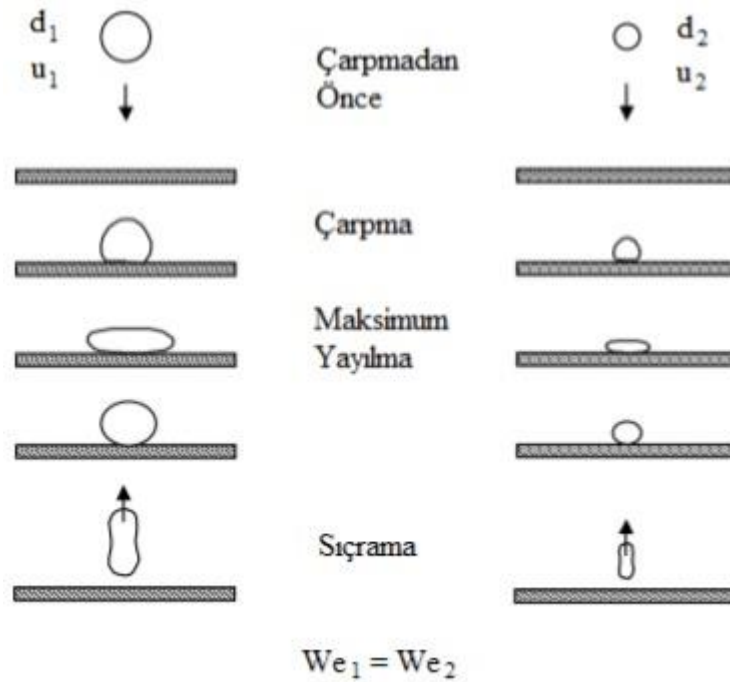
Damlacık, Weber sayısının ( $We \ll We_{cr}$ ) düşük olduğu durumlarda yüzeye çarptığında yapışma rejimi meydana gelir. Çarpma anında, damlacık yaklaşık olarak küresel geometriye sahip bir şekilde yüzeye yapışır (Yiğit 2009). Rodrigues and Mesler (1985), Jayaratne and Mason (1964) tarafından yürütülen deneysel çalışmalarda Weber sayısının 5'den küçük olduğu durumlarda yapışma rejiminin meydana geldiği tespit edilmiştir.



### 2.1.2. Sıçrama rejimi

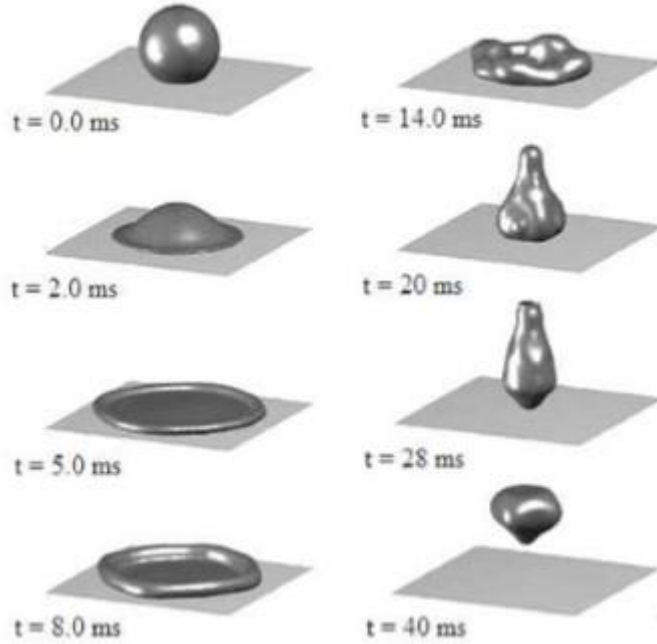
Sıçrama rejiminde, yüzeye çarpan damlacık hem plastik hem de elastik davranış gösterebilecek şekilde geri sıçrar. Küçük çarpma enerjilerinde, damlacık yüzey üzerinde kusursuz bir elastiklik gösterir. Yüzeyden yansıma açısı ve çarpma açısı değerleri birbirine oldukça yakın olur. Damlacığın çarpma Weber sayısı artarsa, bununla doğru orantılı bir şekilde çarpma enerjisi de artar. Bu sayede damlacık yüzey üzerinde plastik davranış gösterir ve yansıma açısı çarpma açısından büyük olur.

Weber sayısı, damlacığın yüzey üzerinde kinetik enerjisinin bir ölçüsü olarak düşünülebilir. Damlacığın kinetik enerjisi, çapının ve hızının bir fonksiyonudur. Şekil 2.2'de aynı çarpma Weber sayısına ve sıvı materyale sahip iki damlacık gösterilmektedir.  $d_2$  çapındaki küçük damlacık  $d_1$  çapındaki büyük damlacıktan daha yüksek hızla yüzeye çarpmaktadır. Farklı çap ve hızlara sahip olmalarına rağmen yüzeye aynı kinetik enerjiyle çarptıklarında her iki damlacığın da deformasyonu, yayılması ve sıçraması benzer biçimde olacaktır (Yiğit 2009).

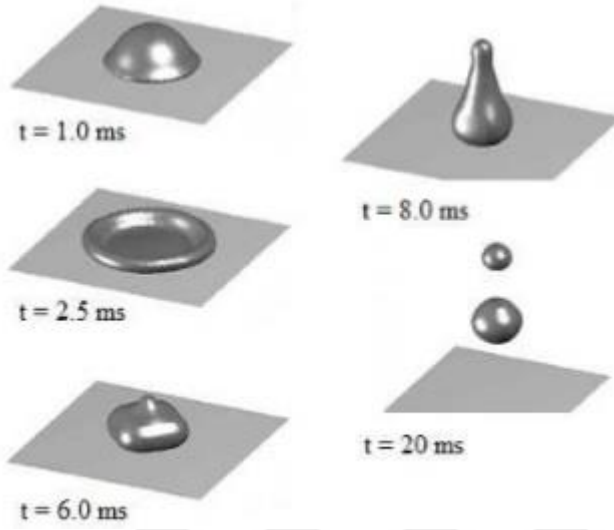


Şekil 2.2. Farklı çap ve hıza sahip iki damlacığın sıçrama rejimi (Yiğit 2009)

*Yang and Fan (2006)*, düz bir yüzey üzerine çarpan damlacığın davranışını film kaynama rejiminde 3 boyutlu olarak modellemişlerdir. Şekil 2.3’de 400°C sıcaklığındaki yüzey üzerinde 3.8 mm çapında bir su damlacığının sıçrayışı gösterilmektedir. Çarpma esnasında damlacık, sıcak yüzey üzerinde radyal yönde yayılır ve yaklaşık düz bir disk formunu alır. Damlacık maksimum yayılma açısına ulaştıktan sonra, merkeze doğru geri çekilmeye başlar. Bu durum, damlacık çevresindeki yüzey gerilmesinden dolayı meydana gelir. Daha sonra damlacık uzun ve dar bir kütle olarak yüzeyden sıçrar. Makino and Michiyoshi (1984), Chandra and Avedisian (1991), Wachters and Westerling (1996) yaptıkları deneysel çalışmalar göstermiştir ki, damlacığın üst ve alt kısmındaki hız farkından dolayı sıçrama safhasında şekli değişir. Şekil 2.4’de 200°C sıcaklığındaki paslanmaz çelik yüzey üzerinde 1.5mm çapındaki n-heptan damlacığının sıçrayışı gösterilmektedir.



**Şekil 2.3.** 400°C sıcaklığa sahip nikel yüzey üzerinde sıçrayan su damlacığı ( $We=60$ )



**Şekil 2.4.** 200°C sıcaklığa sahip yüzey üzerinde sıçrayan n-heptan damlacığı ( $We=45$ )

Damlacık çarpma Weber sayısı, parçalanmanın başlayacağı kritik Weber sayısından ( $We_{cr}$ ) küçük olduğu sürece damlacık parçalanmadan yüzeyden sıçrar.

### 2.1.3. Yayılma rejimi

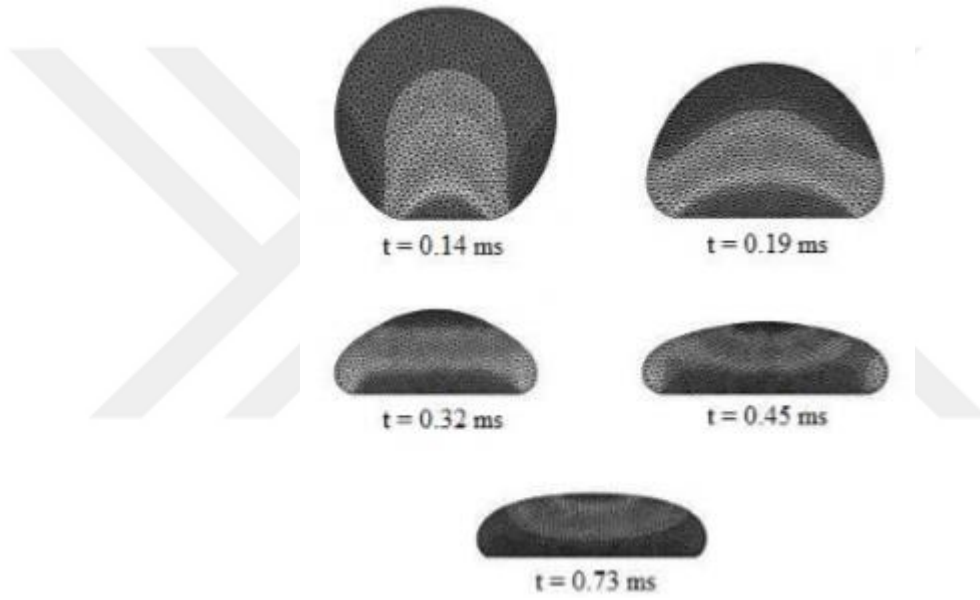
Damlacık, kritik Weber sayısından düşük ancak kritik Weber sayısına yakın değerlerde yüzeye çarparsa yüzey üzerinde yayılır ve sıvı filmi tabakası oluşturur. Stanton and Rutland (1998) yayımladıkları çalışmalarında yayılma rejiminin gerçekleşeceği Weber sayısı aralığını aşağıdaki denklem ile ifade etmiştir.

$$10 < We < 18^2 d_d \left(\frac{\rho_d}{\sigma_d}\right)^{\frac{1}{2}} v_d^{\frac{1}{4}} f_d^{\frac{3}{4}} \quad (2.1)$$

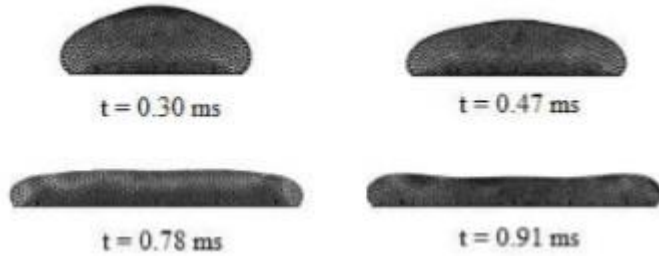
Burada  $d_d$ ,  $\rho_d$ ,  $\sigma_d$ ,  $v_d$  ve  $f_d$  sırasıyla damlacığın çapı, yoğunluğu, yüzey gerilmesi, kinematik viskozite ve frekansdır.

Damlacığın yüzey üzerinde sağladığı yayılma rejimi zamana bağlı olarak Şekil 2.5 ve 2.6'da gösterilmektedir. Yüzey üzerinde oluşacak sıvı filmi kalınlığı Weber sayısına bağlı olarak değişmektedir. Damlacığın yüzeye daha yüksek Weber sayısı ile çarptığı

durumda yüzey üzerinde daha fazla yayılmakta ve göreceli olarak ince bir sıvı filmi tabakası oluşturmaktadır. Yayılma rejimine etki eden parametrelerden bir diğeri de yüzey gerilmesidir. Düşük yüzey gerilmesine sahip damlacıklar yüzey üzerinde daha fazla yayılırlar. Mükemmel bir ıslatma için temas açısının ( $\theta$ ) sıfır derece olması gerekir. Temas açısı sıfır derece olduğunda damlacık yüzey üzerinde ince bir sıvı filmi tabakası oluşturur. Temas açısı  $90^\circ$ 'den küçük olduğunda damlacığın yüzeyi ıslattığı, büyük olduğunda ise ıslatmadığı kabul edilir.



Şekil 2.5. Yayılma rejimi örnek görüntüsü ( $Re=6.6$ ,  $We=2$ )



Şekil 2.6. Yayılma rejimi örnek görüntüsü ( $Re=10.0$ ,  $We=5.2$ )

#### 2.1.4. Parçalanma rejimi

Parçalanma rejimi; damlacığın yüzeye çarptığı andaki Weber sayısı kritik Weber sayısına eşit veya daha büyük olduğu zaman gerçekleşir. Damlacığın yüzeye çarpma anındaki Weber sayısı arttıkça parçalara ayrılan küçük damlacık sayısı da artar. Bunun nedeni, Weber sayısıyla birlikte çarpma enerjisinin ve damlacık deformasyonunun artmasıdır. Hatta *et al.* (1995), yaptıkları deneysel çalışmalar sonunda aşağıda yazılı durumlardan birinin gerçekleşmesi halinde damlacığın parçalanacağını ve gerçekleşecek fiziksel olayı ifade etmişlerdir.

1. Damlacık Weber sayısı kritik Weber sayısından çok az büyükse, sıçrama rejimi esnasında damlacık parçalanır fakat parçalanma sonrası parçalar birbirleriyle tekrar birleşirler.
2. Damlacık Weber sayısının kritik Weber sayısından aşırı büyük olduğu durumlarda, yüzey üzerinde yayılma rejimi esnasında damlacık parçalara ayrılır ve parçalar birbirlerinden uzaklaşarak dağılırlar.

Mundo *et al.* (1995), Yarin and Weiss (1995) yürüttükleri deneysel çalışmalarda damlacığın parçalanmasının başlayacağı kritik Weber sayısını belirlemek için aşağıdaki denklemi kullanmışlardır.

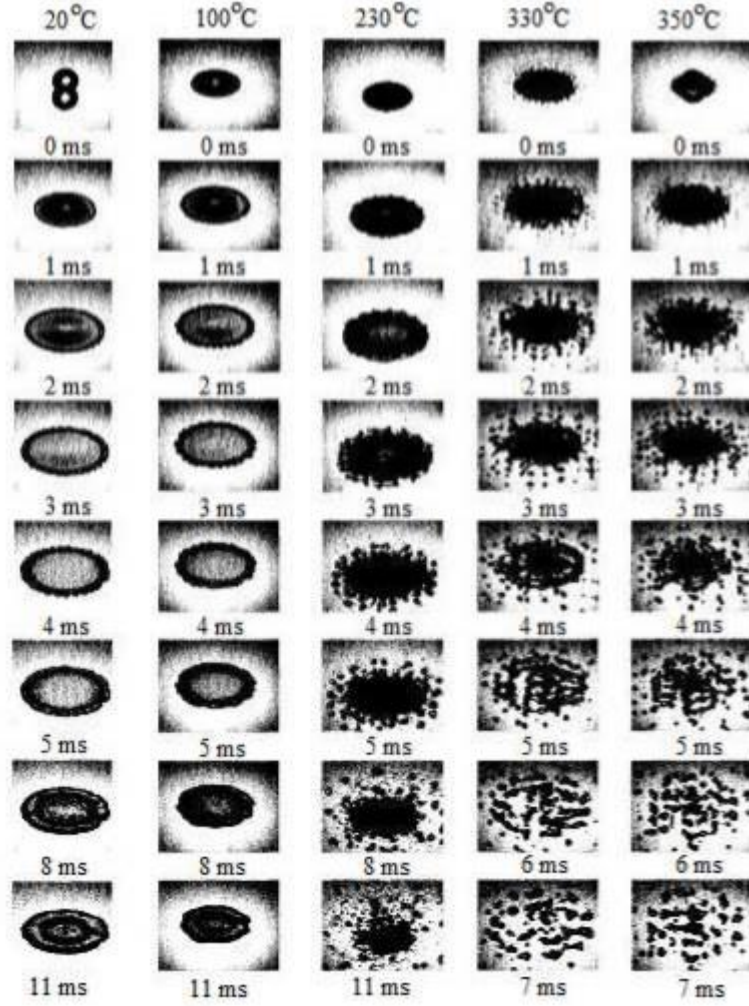
$$18.0^2 d_d \left(\frac{\rho_d}{\sigma_d}\right)^{\frac{1}{2}} v_d^{\frac{1}{4}} f_d^{\frac{3}{4}} < We \quad (2.2)$$

Wachters and Westerling (1996), yayımladıkları deneysel çalışmalarında 2 mm çapında ve 30° açıyla 400°C'deki parlatılmış altın yüzeye çarpan damlacıklar için kritik Weber sayısını yaklaşık olarak 80 bulmuşlardır. Hatta *et al.* (1995), çapları 300-700 µm arasında değişen su damlacıklarının 500°C'ye ısıtılmış krom-demir alaşımli nikel ve paslanmaz çelik üzerine çarpmasını inceledikleri araştırmalarında, kritik Weber sayısını krom-demir alaşımli nikel için 50, paslanmaz çelik içinse 45 olarak bulmuşlardır. Naber and Farrell (1993) Leidenfrost noktasının üzerindeki ve altındaki sıcaklıklarda

paslanmaz çelik üzerine çarpan 105-310 µm çapındaki damlacıklar üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada kritik Weber sayısını 24 olarak tespit etmişlerdir.

Naber and Farrell (1993), çalışmalarında yüzey sıcaklığının, damlacığın parçalanması üzerinde son derece etkili olabileceğini ifade etmişlerdir. Örneğin; çok düşük çarpma enerjilerinde dahi, eğer yüzeyin sıcaklığı damlacık oluşumunu sağlayan malzemenin kaynama sıcaklığından daha yüksekse, kaynama rejimi parçalanmayı başlatabilir. Bu durumda; sıcak yüzey üzerinde meydana gelecek hızlı sıvı kaynamasından dolayı damlacık boyunca akan gaz kabarcıklarının oluşumuyla birlikte çeşitli boyutlarda ikincil damlacık formları oluşabilir. Kaynama rejimine bağlı olarak damlacıkların boyutları değişim göstermektedir. Çekirdek kaynama rejiminde çok ince ikincil damlacıklar meydana gelirken, film kaynama rejiminde nispeten daha büyük damlacıklar meydana gelir (Yiğit 2009).

Su damlacığının paslanmaz çelik malzeme üzerindeki sıcaklığa ve zamana bağlı davranışı Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** Su damlacığının paslanmaz çelik malzeme üzerindeki parçalanma rejimi ( $We=74$ )

Wachters and Westerling (1996), Hatta et al. (1995), Naber and Farrell (1993) tarafından yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; damlacığın parçalanma olayının, çarpma anındaki Weber sayısı, yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, ısıl iletkenlik gibi malzeme ve yüzey özellikleriyle birlikte damlacığın çarpma açısına bağlı olduğu tespit edilmiştir.

## 2.2. Isı Transferi Kavram ve Tanımları

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 anılır. 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 ışıyım denir. Kanatlı bir hava ısı değiştiricisi dizayn ve analizi yapılırken bu üç ısı transferi mekanizması göz önüne alınır.

### 2.2.1. İletimle ısı transferi

İletim bir ortamdaki sıcaklık farkı nedeniyle enerji transferini gösterir ve fiziksel mekanizması rasgele atomik veya moleküler hareketliliklidir. Isı iletimi Fourier yasası ile tanımlanır. Sabit kesit alanına sahip bir cisimden bir boyutlu, kararlı ısı iletimi aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$q = -kA_c \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

### 2.2.2. Taşınım ile ısı transferi

Taşınım, kitle hareketi, sıcak ve soğuk akışkan elamanların makroskopik parçalarının karışması, soğutucu ortam içindeki ısı iletimi ve enerji depolamanın bir bileşimidir. Eğer taşınım olayı akışkan içindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu yoğunluk farklarından kaynaklanan kaldırma kuvvetleri ile ilişkili ise buna doğal (veya serbest) taşınım denir. Buna karşılık, akış bir fan, pompa veya atmosferik rüzgarlar gibi bir dış etki ile oluşuyorsa bu durumda zorlanmış taşınım söz konusudur. Sıcak bir nesneden soğutucu akışkana olan ısı transferi Newton'un Soğutma Yasası olarak bilinen aşağıdaki eşitlikte ilişkilendirilmektedir:

$$q_c = h_c A_s (T_s - T_m) \quad (2.4)$$



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. Isı alıcılarda bu özelliklerle birlikte kanatlar arasındaki boşluklar soğutma alanını belirlediği için kanatlar arasındaki boşlukta konvektif ısı transfer katsayısını etkilemektedir. Zorlanmış konveksiyonla ısı transferinde ısı transferi katsayısı akışı karıştıran ve vorteksler üreten yüzeyler boyunca akışkanın sahip olduğu lineer hıza oldukça bağlıdır. Çizelge 2.1’de konvektif ısı transfer katsayısının tipik değerleri görülmektedir.

**Çizelge 2.1.** Isı transferi katsayısının tipik değerleri

Proses	$h$ [ $W/m^2.K$ ]
Doğal konveksiyon	
Gazlar	2-25
Sıvılar	50-1000
Zorlanmış konveksiyon	
Gazlar	25-250
Sıvılar	50-20000
Faz değişimi ile konveksiyon	
Kaynama veya yoğuşma	2500-100000

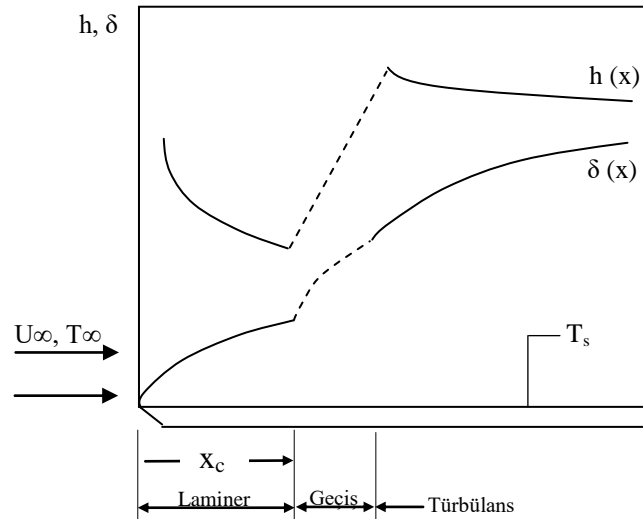
### 2.2.3. Işınım ile ısı transferi

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 bu radyasyonlar için alıcı konumundadır. Bu olay radyasyonun soğutulması olarak bilinir. Bu nedenle radyasyonun etkisinden bahsedilirken aşağıdaki eşitlikle verilen bir yüzey ve çevresi arasındaki net radyasyon ısı değişim miktarını dikkate almak gerekmektedir;

$$Q = \varepsilon A_s \sigma (T_y^4 - T_{\text{ç}}^4) \quad (2.4)$$

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

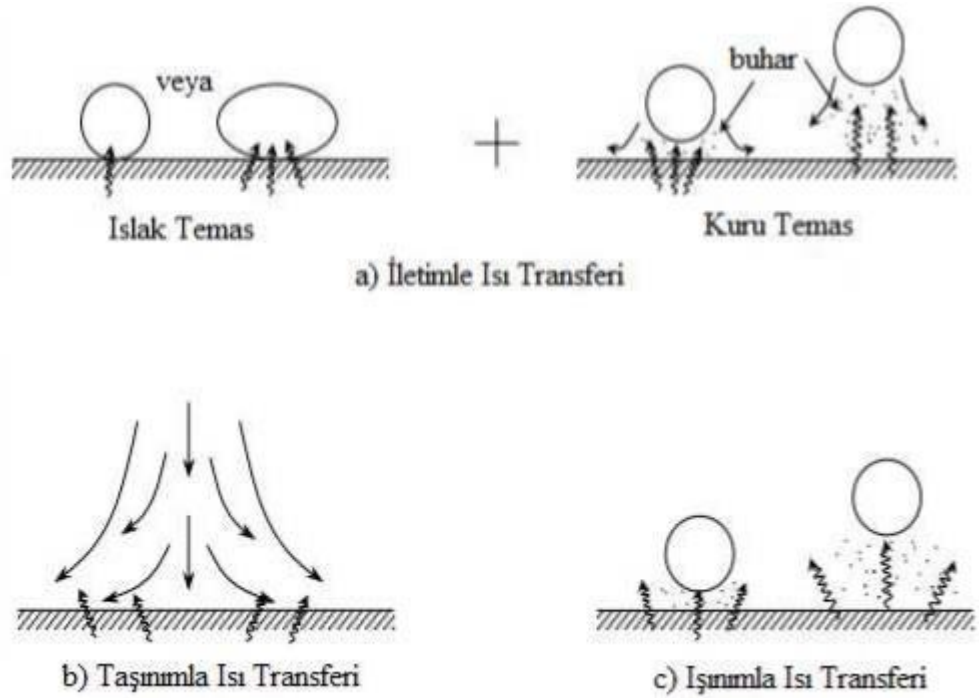
Isı transferi hızını artırma normal olarak ısı transfer katsayısını artırma ile ilgilidir. Örneğin yüzey alanı artırılmış veya işlem görmüş bir yüzey, düz ve pürüzsüz bir yüzeye göre daha yüksek ısı transferi katsayısı verir (Reay 1991). Isı taşınım katsayısını arttırmak için genellikle boru veya kanal içinde türbülans artırıcı yollar denir. Zira, akışkan ile kanal duvarı arasındaki ısı transferinde ısı sınır tabaka önem taşımaktadır. Sınır tabaka akış türü ile ilgili olup laminar akışta daha kalın, türbülanslı akışta daha incedir. Bu nedenle türbülanslı akışta ısı transferi laminar akışa göre daha iyidir. Sınır tabaka kalınlığı inceldikçe akışkan ile kanal/boru arasındaki ısı transferi daha iyi olmaktadır (Incropera 1996). Sınır tabaka kalınlığı  $\delta$  ile konvektif ısı transfer katsayısı arasındaki ilişki Şekil 2.8'de görülmektedir.



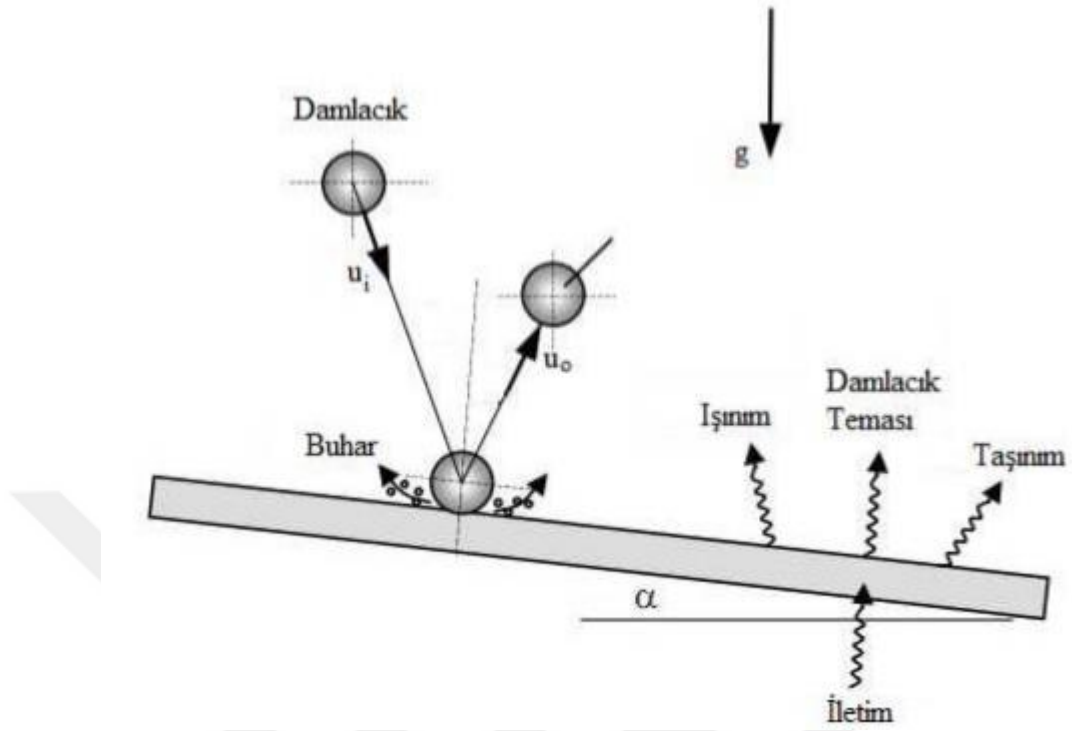
**Şekil 2.8.** Sabit sıcaklıkta bir düz levha üzerinde akış için hız sınır tabaka kalınlığı ve yerel ısı transfer katsayısının değişimi

### 2.3. Sprey Soğutmada Isı Transfer Mekanizmaları

Sprey soğutma prosesinde ısı transferi Şekil 2.9 ve 2.10'da gösterildiği gibi üç şekilde gerçekleşir: Damlacıkların yüzey ile etkileşimi neticesinde iletimle ısı geçişi, damlacıkları taşıyan havanın etkileşimiyle taşınım ile ısı geçişi ve yüzey üzerinden gerçekleşen ışınlama ile ısı geçiştir. Akışkanın damlacık formunu alma sürecinde yüzey gerilmesi oldukça önemlidir.



Şekil 2.9. Sprey soğutma prosesinde ısı transfer mekanizmaları



**Şekil 2.10.** Isı transfer mekanizması için örnek model

Yüzeyle çarpan damlacık ve yüzey arasında meydana gelen iletimle ısı transferi iki ayrı şekilde incelenebilir. Bunlardan biri, düşük yüzey sıcaklıklarında meydana gelen ıslak temaslı ısı transferi, diğeri ise yüksek yüzey sıcaklıklarında (Leidenfrost sıcaklığının üzerinde) meydana gelen kuru temaslı ısı transferidir.

Islak temaslı ısı transferinde damlacıklar Şekil 2.9(a)'da olduğu gibi doğrudan yüzeyle temas ederler. Bu temas esnasında damlacık ile yüzey arasında iletimle ısı transferi meydana gelir ve kısa bir süre sonra damlacık ya çekirdek kaynama ya da geçiş kaynama rejimine girer. Bu koşullar altında, çarpma Weber sayısı damlacığın parçalanma süreci üzerinde zayıf bir etkiye sahiptir. Islak soğutma prosesi, yüksek soğutma etkisinden dolayı yüzey sıcaklığında kayda değer bir düşüşe neden olur.

Kuru temaslı ısı transferi prosesinde, sıcak yüzey ile damlacık arasında önemli bir miktarda su buharı üretilir. Su buharı, göreceli olarak düşük termal iletkenliğe sahip oluşu için yüzeyle damlacık arasında bir izolasyon malzemesi gibi davranır. Bundan

dolayı soğutma etkinliğini düşürür. Bu durum göz önünde tutulduğu zaman kuru soğutma prosesinde, damlacığın çarpma hızı ve buna bağlı olarak Weber sayısı soğutma etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olur. Düşük hızlarda damlacıklar film tabakasının içerisinden geçemeyebilirler. Ancak yüksek hızlarda damlacıklar film tabakasının içerisinden geçebilir ve yüzeyle daha fazla temas sağlanır. Bu da, soğutma etkinliğini artırır.

#### 2.4. Atomizer (Nozul) Çeşitleri

Bir sıvı kütesinden sprej oluşturmak için kullanılan elemanlara atomizer (nozzle) adı verilmektedir. Oluşan sprejin içindeki damlacıkların belirli çap ve hız değerleri arasında olması, sprej açısının ve mesafesinin istenilen ölçüleri sağlaması, atomizerin ya da atomizasyon işleminin kalitesini göstermektedir.

Uygulamanın çeşidine göre birçok atomizer türü bulunmaktadır. Atomizerler, çeşitli özelliklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Oluşan sprejin şekline göre ya da spreji oluşturmak için kullanılan enerjinin çeşidine göre sınıflandırma yapılabilir. Enerji çeşidine göre en çok kullanılan atomizer sınıfları arasında basınçlı sıvı atomizerleri (pressure nozzles) ve pnömatik atomizerler gelmektedir.

##### 2.4.1. Basınçlı sıvı atomizerleri

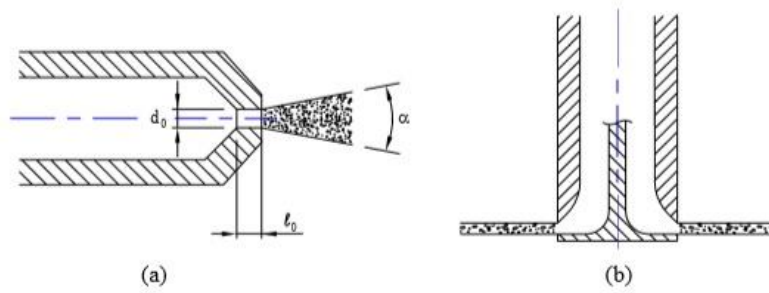
Spreji oluşturmak için sadece akışkana verilen kinetik enerjinin kullanıldığı atomizer türleri basınçlı sıvı atomizerleri şeklinde bilinmektedir. Basınçlı sıvı atomizerlerini karakterize eden önemli parametrelerden biri, akış katsayısıdır.

$$\text{Akış katsayısı} = \frac{\dot{m}}{\sqrt{\Delta P}} \quad (2.5)$$

Bu ifadede  $\Delta P$ , atomizerdeki basınç kaybını ve  $\dot{m}$ , akışkanın kütle debisini göstermektedir. Bu durumda boyutu  $[\text{kg}/(\text{s Pa}^{0.5})]$  olan akış katsayısı da, belirli bir sıvı

için atomizerin efektif akış alanı hakkında bilgi veren bir büyüklüktür. Akış katsayısı artırıldığında, aynı basınç farkında elde edilen debi değeri artmaktadır.

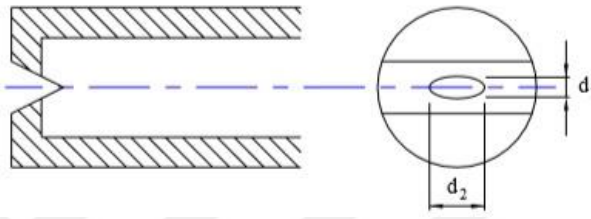
Çeşitli atomizer tasarımlarıyla ihtiyaca göre, silindirik jet, düzlemsel (flat) ya da konik spreylere elde edilebilir. Silindirik jet şeklinde bir spreylere oluşturan en basit atomizer: basınçlı akışkanın, Şekil 2.11a'daki gibi,  $d_0$  çıkış çapına ve  $l_0$  uzunluğuna sahip bir orifisten geçirildiği tasarımlardır. Bu tür spreylere, spreylere açısı ( $\alpha$ ) dar olup, spreylere merkezinde uzun bir mesafe boyunca gücünü kaybetmeyen bir jet oluşur. Özellikle yıkama amaçlı spreylere uygulamalarında avantaj sağlayan bu atomizer türünde, atomizasyon kalitesi düşüktür. Orifis uzunluğuna ya da  $l_0/d_0$  oranına bağlı olarak, oluşan jetin parçalanma mekanizması değişmektedir.



**Şekil 2.11.** Bazı basınçlı sıvı jet atomizer çeşitleri  
a) Silindirik jet, b) Düzlemsel jet (Lefebvre 1989)

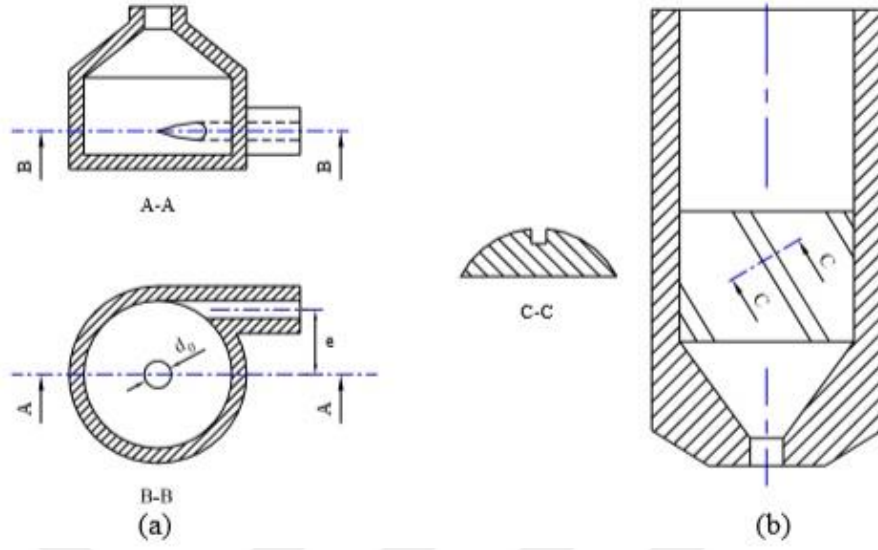
İçten yanmalı motorlarda kullanılan dizel yakıt enjektörleri de temelde silindirik jet ürettikleri halde, enjektör dışındaki çeşitli donanımlar ve özel akış şartları sayesinde, çok yüksek atomizasyon kalitesi elde edilmektedir. Bu uygulamadaki farklılıkları yaratan faktörler arasında, sadece sıkıştırma zamanı sonrasındaki kısa bir sürede püskürtmenin yapıldığı kesikli bir akış söz konusu olması, enjektör ucunu açıp kapatan iğne sayesinde akış kesit alanının değişken olması, akış debisinin çok düşük olması ve buna bağlı olarak enjektör ucunun çok küçük olması, akışkan basıncının çok yüksek olması (10-60 MPa), spreylere kapalı bir silindir içerisindeki yüksek karşı basınçlı bir ortama (3-4 MPa) doğru yapılması yer almaktadır.

Silindirik jet şeklindeki spreylerde düşük olan spray açısının artırılması için, düzlemsel spray atomizerleri kullanılabilir. Silindirik bir spray jetinin önüne uygun bir deflektör yerleştirilerek düzlemsel bir jet elde edilir (Şekil 3.7b). Ancak düzlemsel jet oluşturmak için en yaygın olarak kullanılan atomizer türü, silindirik çıkış ağzına dik doğrultuda, üçgen kesitli bir kanal açılarak oluşturulan bir orifistir. Kanal açma işleminden sonra atomizer çıkış ağzı Şekil 2.12’de görüldüğü gibi eliptik bir şekil almaktadır.



**Şekil 2.12.** Eliptik çıkış ağızlı düzlemsel jet atomizeri (Lefebvre 1989)

Harcanan enerji miktarını fazla değiştirmeden, daha iyi bir parçalanma ve daha küçük damlalar elde edilebilmesi için konik spray oluşturan atomizerler kullanılmaktadır. Konik spray atomizerlerinde, akışkanın, atomizer çıkış ağzından çıkarken, radyal ve teğetsel yönde hız bileşenlerine sahip olması sağlanır. Bunun için atomizer çıkışının gerisinde yer alan küçük bir hazneye girmeden önce, akışkana bir döngü hareketi kazandırılır. Bu nedenle bu tür atomizerler, döngülü atomizerler (swirl nozzles) adıyla bilinmektedir. Döngü hareketini kazandırmak için çeşitli tasarımlar mevcuttur. Akışkanın atomizere giriş ve çıkış doğrultularının farklı olduğu Şekil 2.13a’daki teğetsel girişli tip döngülü atomizerlerde,  $d_0$  çaplı atomizer çıkışından önce bir döngü haznesi yer almaktadır. Atomizer çıkışındaki hızın, teğetsel ve radyal bileşenlere de sahip olabilmesi için, akışkanın bu döngü haznesinin içerisine girişi, hazne ekseninden “e” mesafesi kadar uzaktan yapılmaktadır. Atomizerdeki akışkan giriş ve çıkış doğrultularının aynı olduğu, aksenal girişli tip döngülü atomizerlerde ise, basit bir silindirik jet orifisin gerisine, Şekil 2.13b’deki gibi, üzerinde helisel kanallar bulunan bir silindirik eleman yerleştirilmektedir.

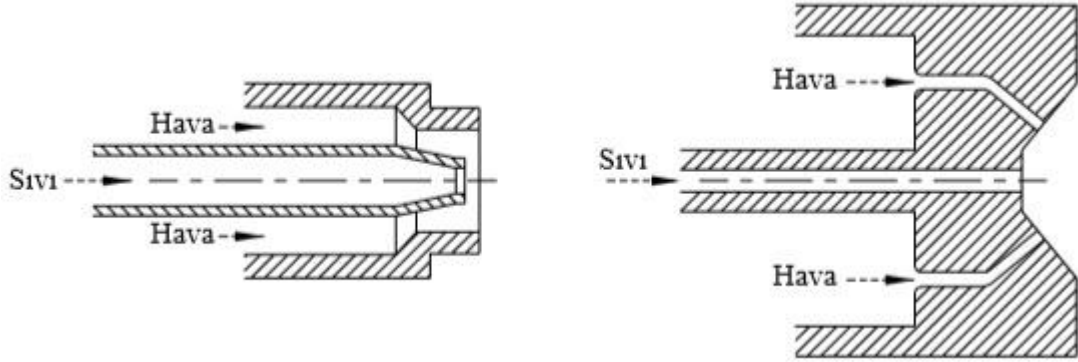


**Şekil 2.13.** Bazı döngülü atomizer çeşitleri  
a) Teğetsel girişli, b) Eksenel girişli (Lefebvre 1989)

#### 2.4.2. Pnömatik atomizerler

Sıvı kütlelerini parçalamak için, gaz fazındaki bir akışkanın kinetik enerjisinden yararlanan atomizelere pnömatik atomizer adı verilmektedir. Aynı zamanda “çift akışkanlı” adıyla da bilinen bu tip atomizerlerde, ikinci akışkan olarak genellikle hava kullanılır. Kompresör yardımıyla belirli bir basınca sıkıştırılan hava, sıvı kütlesi üzerine uygulandığında, yüzey üzerinde parçalanmayı hızlandıran yüksek kayma gerilmeleri oluşturur. Atomizer tasarımına bağlı olarak, iki akışkanın teması sırasında sıvı kütlesi; jet, film ya da damla şeklinde olabilir. Şekil 2.14’de pnömatik atomizer için iki örnek tasarım gösterilmektedir. Soldaki örnekte, orta kısmında sıvı jeti bulunan basit bir pnömatik atomizer tasarımı verilmektedir. Sıvı yakıt brülörleri gibi uygulamalarda, sıvıyı parçalamak için kullanılan hava, aynı zamanda yanma havası olarak da kullanılır. Alevin uçmaması için belirli bir hava hızının üzerine çıkılmadığından, daha düşük hava hızlarında ve daha büyük miktarlarda hava kullanılarak atomizasyon gerçekleştirilir. Bunun için bu tür yakıt brülörlerinde kompresör yerine fan kullanılmaktadır. Şekil 2.14’deki ikinci örnek tasarımda ise, hava jetleri belirli bir açıyla ve daha yüksek hızla sıvı jetini parçalayabilmektedir.





Şekil 2.14. Örnek pnömatrik atomizer tasarımları (Lefebvre 1989)

Sanayi devriminin geliştiği 19.yy'da ortaya çıkan bu tür atomizerlerin ilk örnekleri, sıvı yakıtlı buhar kazanlarında kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde ise özellikle yüksek viskoziteli akışkanların kullanıldığı birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Basıncılı sıvı atomizerlerine göre daha gelişmiş bir tasarıma sahip olan ve fan ya da kompresör gibi ilave ekipmanlar gerektiren pnömatrik atomizerlerin çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bunlar arasında, yüksek viskoziteli akışkanlara uygulanabilmeleri, atomizasyon kalitesinin sıvı debisine bağımlılığının fazla olmaması, akışkan debisinin düşük olması sayesinde kirlilikten kaynaklanan tıkanmaların daha az olması sayılabilir.

Pnömatrik atomizerlerde sıvı beslemesi; yerçekimi, emme ve sıvı basıncı adı verilen üç farklı şekilde yapılabilir. Sıvı kaynağının atomizerden daha yüksekte olduğu durumlarda, sıvı akışı yerçekimiyle kendiliğinden gerçekleşir. Kompresörden yüksek basınçla çıkan havanın, atomizerdeki karışım noktasında yarattığı emiş sayesinde, alt seviyeden sıvı emilebilmektedir. Bu iki yöntemde sağlanandan daha fazla miktarda sıvı beslemesi yapılabilmesi için, ayrıca bir sıvı pompasından da yararlanılabilir. Bu durumda sıvı ve hava miktarları ayrı ayrı bağımsız olarak yapılabilir. Pnömatrik atomizerlerde sıvı ile havanın kütleli debilerinin oranı önemli bir parametredir.

$$W = \frac{\dot{m}_{\text{hava}}}{\dot{m}_{\text{sıvı}}} \quad (2.6)$$

Akışkanların birbirleriyle atomizerin çıkış ucundan önce ve sonra temas etmelerine göre, pnömatrik atomizerler sırasıyla iç karışımli ve dış karışımli şeklinde adlandırılır. İç

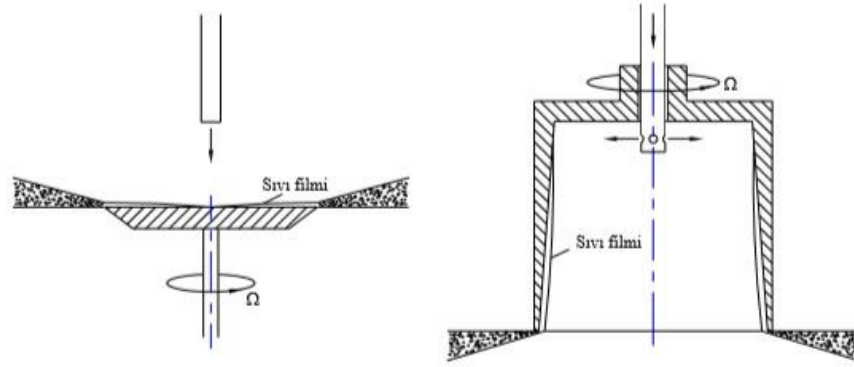
karışimli atomizerlerde akışkanlar çıkış orifisinin gerisindeki küçük bir karışım odasında karıştıkları için, bir akışkanın debisi diğerinden bağımsız olarak kontrol edilememektedir. Özellikle yüksek viskoziteli sıvılarda tercih edilen dış karışimli pnömatik atomizerlerde ise, karşı basınç oluşturan bir karışım odası bulunmadığı için, akışkan debileri bağımsız olarak ayarlanabilmektedir.

Karışım noktasında akışkanların birbirlerine göre olan akış doğrultularına göre pnömatik atomizerler: paralel, çapraz ya da döngülü akışlı şeklinde sınıflandırılabilirler. Havanın sıvı jeti üzerinde tek noktadan ya da birden fazla noktadan etki etmesine göre de, tekli ya da çoklu enjeksiyonlu pnömatik atomizerler şeklinde bir sınıflandırma yapılması mümkündür. Daha iyi parçalanma sağlamak için, sıvı jeti yerine halka kesitli bir sıvı filminin oluşturulduğu ve halkanın içinden ve/veya dışından hava jetinin uygulandığı çoklu enjeksiyon tasarımları da mevcuttur. Çeşitli tasarımlar sayesinde, pnömatik atomizerlerde de, basınçlı atomizerlerdeki gibi düzlemsel, konik ya da boş konik şekillerde sprey elde edilebilir.

### 2.4.3. Diğer atomizerler

Basınçlı sıvı jetleri ya da pnömatik atomizerler dışında çok farklı prensiplere göre sprey oluşturulabilen atomizer tasarımları mevcuttur. Bunların başlıcaları; dönel (rotary), kabarcıklı (effervescent), akustik, ultrasonik ve elektrostatik atomizerler şeklinde sıralanabilir.

Dönel atomizerler genellikle, sıvı haldeki polimer veya metal malzemelerden, çok küçük çaplı partiküllerin oluşturulduğu sprey kurutma işleminde veya soğutma ve nemlendirme gibi iklimlendirme işlemlerinde kullanılır. Burada sıvı, Şekil 2.15'de gösterildiği gibi  $\Omega$  açısal hızıyla hareket eden bir dönel elemanın üzerine tatbik edilir. Dönel elemanlar yatay bir disk ya da bardak gibi farklı şekillerde olabilir. Akışkan dönel elemanı terk edene kadar, yüzeyde bir sıvı filmi oluştuğu gözlenir.



**Şekil 2.15.** Dönel atomizer çeşitleri  
a) Yatay diskli, b) Bardaklı (Lefebvre 1989)

Kabarcıklı atomizerlerde, atomizer çıkışından önce sıvı içerisine belirli miktarda bir gaz enjekte edilir. Sıvı ile aynı basınçta yapılan enjeksiyon işlemi sırasında gazın sıvı içerisinde çözülmesi sağlanır. Karışım orifisten çıkarken, gaz kabarcıkları ani genişleyerek parçalanmayı artırır ve atomizasyon kalitesi yüksek bir sprej oluşur.

Akustik atomizerlerde, “rezonatör” adı verilen bir eleman yardımıyla atomizer çıkışında akustik titreşim dalgalarının yer aldığı bir alan meydana getirilir. Duyulabilir ses dalgaları aralığı olan 16 Hz- 20 kHz frekans bandında yaratılan akustik titreşimler, düşük hızlardaki sıvı filmlerinin parçalanmasını sağlar. Oluşan damlacıkların dar bir çap aralığında olması, bu atomizer türünün avantajıdır. Ancak elde edilen akış debileri genellikle küçük olmaktadır.

Ultrasonik atomizerlerde, 20 kHz değerinin üzerinde bir frekans ile titreşim yapan bir yüzey üzerindeki az miktardaki sıvı filmi çok küçük damlacıklara ayrılır. Bu yüksek titreşim frekansına rağmen, titreşim yapan yüzeyin genellikle çok küçük boyutta piezoelektrik malzemeden yapılması sayesinde, az miktarda enerji harcanır. Oluşan damlacıkların ortalama çapının 30-60  $\mu\text{m}$  mertebelerinde olması, çap aralığının dar olması ve sıvı hızlarının çok düşük olması büyük avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, ilaç endüstrisinde yüzey kaplama işlemi veya yarıiletken malzemelerin kullanıldığı işlemler gibi, yüksek viskoziteli akışkanların hassas miktarlarda kullanılması gerektiği durumlarda, bu atomizerler tercih edilmektedir.

Elektrostatik atomizerler, ince film kaplama, elektrostatik sprej boyama gibi işlemlerde tercih edilmektedir. Bu tür atomizerlerde, güçlü bir elektrik alan içerisinde giren sıvı kütlesi üzerinde oluşan elektriksel basınç, yüzey gerilimini yenerek çok küçük damlacıkların oluşmasını sağlamaktadır.

## 2.5. Sprej Görüntüleme Yöntemleri

Sprej teknolojisinde damlacık çapı sprej karakteristiklerini etkileyen parametrelerin başında gelmektedir. Damlacık çapının belirlenmesi amacıyla çeşitli sprej görüntüleme yöntemleri kullanılmaktadır. Sprej görüntüleme yöntemleri; optik sprej görüntüleme yöntemleri, elektriksel sprej görüntüleme yöntemleri ve diğer sprej görüntüleme yöntemleri olmak üzere üç ana başlıkta incelenir.

Damlacık çapının ve hız dağılımının belirlenmesinde kullanılan optik sprej görüntüleme yöntemi üç şekilde sağlanır. Bunlar;

- Yüksek Hızda Fotoğraflama
- Schlieren Tekniği
- Shadowraphy Tekniği şeklinde gruplandırılır.

Elektriksel sprej görüntüleme yöntemleri de benzer şekilde üçe ayrılmaktadır. Bunlar:

- Wicks Duckler Yöntemi
- Şarjlı Tel (Charged-Wire) Yöntemi
- Sıcak Tel (Hot-Wire) Yöntemi olarak ifade edilir.

Damlacık çapının belirlenmesinde yazılı gruplandırmaların dışında kalan metodlar diğer yöntemler grubunu oluşturmaktadır. Bunlar; suya duyarlı kağıt yöntemi, magnezyum oksit yöntemi ve silikon yüzey yöntemidir. Suya duyarlı kağıt yönteminde kart üzerine düşen sprej damlacıkları sarı renkteki kağıtta mavi izler bırakmasının ardından elde edilen görüntülerin işlenmesi yoluyla damlacık çapı tayin edilir. Magnezyum oksit

yönteminde 3 mm genişliğindeki bantların cam yüzeye yapışmasıyla oluşan MgO tabakasına püskürtülen damlacıkların 3 boyutlu izlerinin mikroskopta incelenmesi ve alınan görüntülerin işlenmesi ile boyut ölçümü yapılmaktadır. Silikon yüzey yönteminde silikon kaplı lamel cam yüzey üzerine damlalar püskürtülmesinin ardından elde edilen çapın %75'i damla çapını verir (Yeşildal 2014).



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Sprey Soğutma Prosesi

Sprey soğutma yüksek verimli ısı transfer metodu olarak mühendislik uygulamalarının geniş alanında kullanılmaktadır. Yıllar boyunca toplanan deneysel verilerin birçoğu ve yorumlayıcı modeller sprej soğutma prosesinin tüm evrelerinin çözümlenebilmesi adına geliştirici yönde katkı sağlamaktadır. Sprej soğutma prosesini oluşturan evreler; damlacık oluşumu, damlacık-hava etkileşimi, damlacık çap-hız dağılımı, etki ve yayılma mekanizması, damlacık-yüzey ısı transferidir. Sprej soğutmada damlacık oluşumunu yüzey gerilmesi, hava destekli nozullarda hava debisi ve sıvı damlaların çıkış hızı ( $u_0$ ) etkilemektedir. Atomizasyon sürecinde damlacık oluşumu, hız dağılımı, boyut (çap) dağılımı, ve üç boyutlu dağılım ile nitelendirilir.

Literatür araştırmasında, kanatçıklı ısı alıcılarda sprej damlacık çaplarını ve homojenliğini etkileyen hava ve sıvı debileri, sprejleme süresi, nozul ile ısı alıcı arası mesafenin sprej verimini etkileyen parametreler olduğu görülmüştür. Yine bu araştırmalar ışığında özellikle kanatçıklı yüzeylerde kanat yüksekliğinin, genişliğinin, kanat açısının ve kanatların birbirlerine göre diziliş şeklinin akışı ve akışın yapısal özelliklerini etkileyen temel parametreler olduğu tespit edilmiştir. Buna göre bu çalışmada öncelikle ısı transfer karakteristiklerini etkileyebilecek olduğu düşünülerek seçilen kontrol edilebilir parametreler ve bu parametrelerin deneylerde incelenen değerleri belirlenip Taguchi deney tasarımı kullanılarak optimizasyon deneyleri yapılmış ve optimum geometri elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise yapılan Taguchi analizi sonuçlarına göre Nusselt Sayısı üzerine en etkin parametreler belirlenerek Nu korelasyonu elde edilmiştir. Buna ek olarak parametrelerin Nusselt Sayısı üzerine etkilerini ifade eden grafikler çizilerek yorumlanmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise görüntü işleme ile sprej jet çapı ve sprej açısı belirlenerek bu parametrelere ait korelasyonlar elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalar ısı transferi ve akım karakteristiklerini belirlemek amacıyla iki aşamada yürütülmüştür. Her iki aşamada da Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan, bu doktora çalışması için özel olarak dizayn edilmiş deney düzeneği kullanılmıştır. Isı transferi karakteristikleri belirlenirken su/yağ banyosu yardımıyla sabit ısı akısı sağlanmış, akım karakteristikleri belirlenirken ise deney elemanları düzeneğe yerleştirilmiş, debiölçer ile hava ve su debileri tespit edilmiş ve Testo 875-2 model termal kamera kullanılarak spray gönderilmeden önce ve spray gönderiminin hemen sonrasında görüntüler alınarak analizler yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan materyal ve veri elde etme yöntemi detaylı olarak aşağıda sunulmuştur.

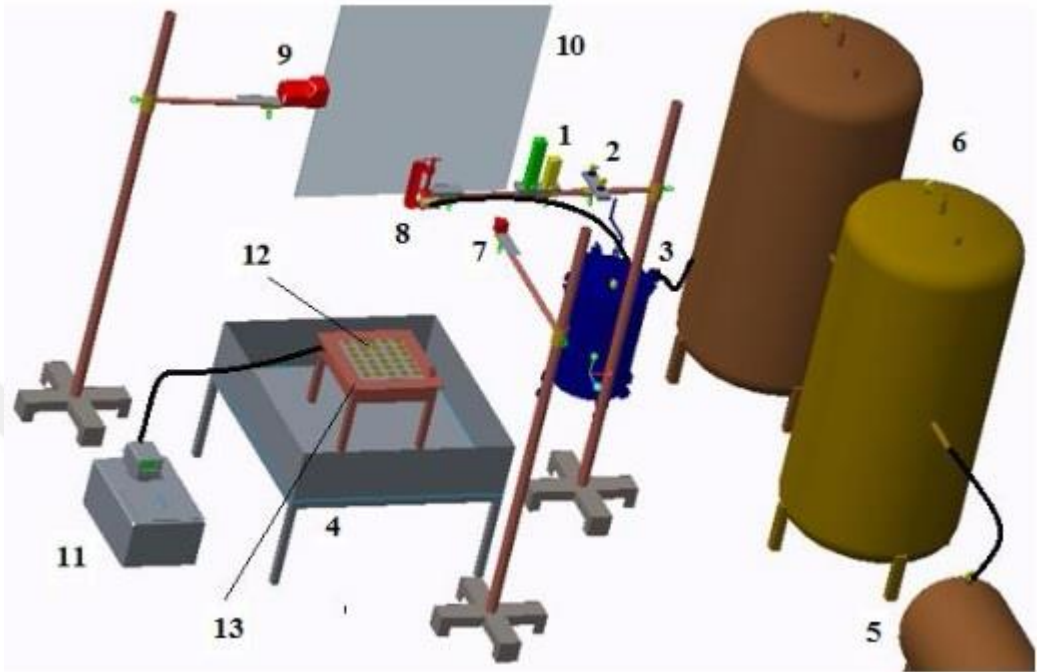
### 3.2. Deney Düzeneği

Çalışmada, 300x300mm boyutlarında test elemanı, test elemanının üst kısmına konuşlandırılmış h/d mesafesinin ayarlanabildiği, üzerine hava-su akışkanları için debiölçerlerin ve basınçölçerlerle birlikte 1.2 mm çaplı atomizerin monte edilebildiği deney düzeneği kullanılmıştır (Şekil 3.1). Sistemde akışkan olarak hava ve su tercih edilmiştir.

Dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılarda hava destekli spray soğutmanın hava (jet) soğutmaya ve basınçlı spray soğutmaya göre avantajları nozul çapı, damlacık hızı, çalışma sıvısı, soğuma süresi ve ısı akısı etkilerinin birlikte incelenmesiyle araştırılmıştır. Kurulan deney seti ile (Şekil 3.1) sprayin nozuldan çıkış hızı, damlacık çapı, spray damlacıklarının test bölgesindeki dağılımı, yüzeye temas miktarı gibi parametreleri CCD kamera ve stroboskop yardımıyla, sıcaklık dağılımları ise termal kamera yardımıyla elde edilmiştir. Görüntüler *Imagej* programında işlenerek spray parametreleri incelenmiştir.

Genel boyutlar	: 600x1200x1900mm yükseklik
Test kısmının boyutları	: 300x300mm
Maksimum hava hızı	: 20m/s

Nozul çapı : 1,2mm



**Şekil 3.1.** Sprey soğutma deney setinin şematik görünümü

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: Dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcı, 13: Reaktör



**Şekil 3.2.** Deney sisteminin görünüşü

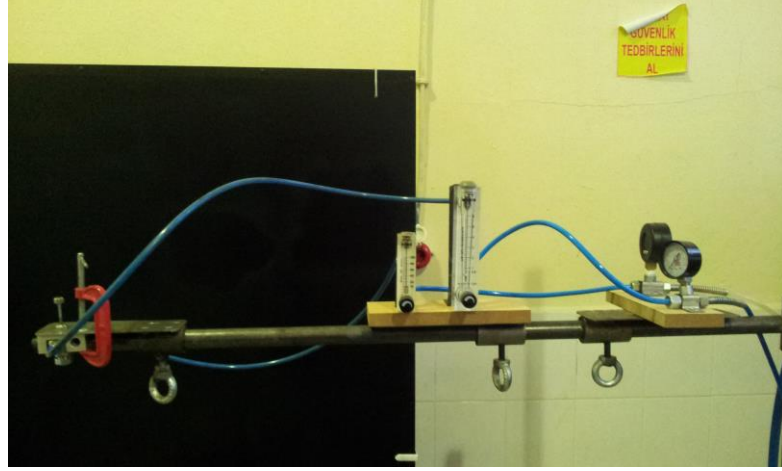


### 3.3. Test Bölgesi ve Kullanılan Cihazlar

Bölüm Laboratuvarında bulunan sistem spray soğutma verimliliğini etkileyen parametreleri inceleme amaçlı ve akış karakteristiklerini belirlemeye yönelik dizayn edilmiştir. Bu çalışmada sistemde hem akış hem de ısı transferi deneyleri yapılacağı için bir takım modifikasyonlar yapılmıştır. Spray bölgesinin yanına dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılarla nozul arasında farklı h/d mesafelerinde rahatlıkla çalışmasını sağlamak amacıyla yüksekliği ayarlanabilir düzenek yerleştirildi. Düzenek üzerinde hava ve su akışkanları için basınçölçerleri, debi ölçerleri ve nozulu kolaylıkla taşıyabilecek düzlem taban oluşturuldu. Üniform bir ısı kaynağı oluşturabilmek için test bölgesinin yanına kapalı sistem çalışan 15 litrelik su/yağ banyosu yerleştirildi. Isı kaynağının üzerine farklı konfigürasyonlara sahip daralan genişleyen geometride dizilmiş dikdörtgen kanatçıklı ısı değiştiriciler ile deneyler yapılmıştır.



**Şekil 3.3.** Basınç tankının görünüşü (40 litre)



Şekil 3.4. DXD-HS1 hava destekli nozul, debi ölçerler ve basınçölçerlerin görünüşü



Şekil 3.5. Framelink ve IMPERX ICL-B0620 CCD kameranın görünüşü



Şekil 3.6. Testo FC-875-2 model termal kameranın görünüşü



**Şekil 3.7.** PolyScience kapalı devre su/yağ banyosunun görünüşü (15 litre)

### 3.4. Test Elemanları

Elektronik endüstrisinde ısı değiştirici olarak kullanılacak malzemenin özelliklerini doğru seçmek, ısı alıcının üretilebilirliğini ve performansını etkileyen önemli bir parametredir. Özellikle bakır ve alüminyum en çok tercih edilen malzemelerdir. Bakırın ısı alıcı içerisindeki iletim direncini düşüren termal iletkenliği alüminyumun yaklaşık olarak iki katı değerlerindedir (Incropera 1996). Yinede bu durum toplam termal direncin yarıya inmesi anlamına gelmez. Alüminyum ile karşılaştırıldığında bakır toplam termal direnci yaklaşık olarak %30 değerinde düşürür. Hava hızının çok yüksek olduğu ve ısı kaynağı ebadının küçük olduğu uygulamalarda bakır en avantajlı malzeme olarak gözükmemektedir. Bununla birlikte alüminyum ile karşılaştırıldığında oldukça pahalı olması ve fiyatının günden güne sürekli değişmesi/dalgalanması, alüminyumdan yaklaşık olarak 3 kat daha ağır olması ve homojen olmayan bir malzeme olması nedeniyle işlenebilirliğinin daha zor olması bakırın ilk anda sayılabilecek dezavantajlarıdır. Birçok durumda, yukarıda sayılan termal avantajlarının dezavantajlarına ağır basmaması nedeniyle elektronik cihazlar için soğutucu üreten firmalar için alüminyum en yaygın ve uygun malzemedir (R-Theta 1998). Bu nedenle test elemanlarının tabanları (base) ve kanatlar alüminyum (Al 1050 O) malzemedен imal ettirilmiştir. Çalışmada 300x300mm alüminyum tabanlar ve 2 mm et kalınlığına

sahip dikdörtgen kanatçıklar elektrik iletimi ve ısı transferi sağlayan epoxy bağlayıcı ile yerleştirilmiştir. Ardından ısı alıcı yüzeyleri mat siyah renge boyanarak emisivite değeri  $\epsilon=0,98$  olarak alınmıştır.

Taban plaka her bir ısı alıcı geometri için farklı olmasına rağmen çalışmada test bölgesinde nozul merkezi ısı alıcı plakanın merkezine gelecek biçimde sabit bir şekilde yerleştirilmiştir. 27 farklı kanat konfigürasyonu için 27 adet taban malzeme, ayrıca doğrulama deneyleri için de 1 tane olmak üzere 28 adet taban malzeme kullanılmıştır.



**Şekil 3.8.** Test elemanlarının görünüşü

### **3.5. Sprey Soğutma Deney Yöntemi**

Bu çalışmada sprej karakteristiklerinin dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılarda soğutma üzerine etkileri, sprej soğutmanın avantajları ve parametrelerin etkileri Taguchi deney tasarımı ile belirlenmiştir. Parametrelerin incelenmesi için kullanılan yöntem aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır;

1. Yapılan araştırmalar neticesinde Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Laboratuvarı'nda sprej 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 su/yağ banyosu alındı ve bağlantıları yapıldı.
4. Sıcaklık ölçümleri için laboratuvarımızda mevcut olan termal kamera sisteme adapte edildi.
5. Sprej görüntüleri optik görüntü işleme yöntemleri ile analiz edildi.
6. Alınan görüntüler *Imagej* programında işlenerek makroskobik olarak sprej karakteristikleri belirlendi.
7. Taguchi  $L_{27}$  ( $3^{11}$ ) 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.

### **3.6. Deney Tasarım Teknikleri ve Taguchi Deney Tasarımı**

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 DoE metotlarının 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;

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 olmadığına 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 artıka yapılması gereken deney sayısının 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 kere, deneysel çalışmanın başlamadan bitmesine neden olur. Deneysel çalışmanın yapılabilirliğini sağlayabilmek için kesirli faktöriyel tasarım strateji 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 rasgeleleştirme 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 edilmeyebilir.

Taguchi metodu kullanılarak, hedef değere tam olarak ulaşmanın yanı sıra, 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 and Kuntay 2003). Bu metot; ürünlerin kalitesinin iyileşmesinde etkili olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha

iyi sonuç alma imkanını vermektedir (Ross 1989; Canıyılmaz and Kuntay 2003). Bunun yanında felsefe olarak, kalitenin tasarım ve proste sağlanmasını öngörmektedir (Genichi and Clausing 1990). Bu metot da 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. Öyle ise, 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,
- 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), Taguchi'nin 18 farklı ortogonal dizisi geliştirdiğinin belirtmektedir. Taguchi, ayrıca, bu dizilere faktörler ile bileşik etkilerin yerleşimini sağlamada esas alınacak lineer grafikler (linear graphs) ve üçlü çizelgeleri (triangular tables) da 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.

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 kullanılabilen çok (60'dan fazla) sayıda performans istatistiği geliştirildiğini belirtmektedir. “Daha büyük daha iyi” durumu için geliştirilen;

$$Z_B = -10\text{Log}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2}\right) \quad (3.1)$$

ve “daha küçük daha iyi” durumu için geliştirilen

$$Z_K = -10\text{Log}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2\right) \quad (3.2)$$

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 1983):

$$Y_i = \mu + X_i + e_i \quad (3.3)$$

Burada  $\mu$  performans değerinin genel ortalaması,  $X_i$   $i$ . deneydeki parametre-seviye kombinasyonunun sabit etkisi ve  $e_i$   $i$ . deneydeki rassal hatayı göstermektedir. Eşitlik (3.3) 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):

$$Y_i \pm \sqrt{F_{\alpha;1,DF_{MSe}} * MSe * \left( \frac{1+m}{N} + \frac{1}{n_r} \right)} \quad (3.4)$$

Burada  $F$  Çizelge değeri,  $\alpha$  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  $n_i$  doğrulama deneyindeki tekrar sayısını göstermektedir. Eğer deneysel sonuçlar yüzdeler (%) ise eşitlik (3.3) ve (3.4) hesaplanmadan önce aşağıdaki eşitlik yardımıyla yüzdeler omega dönüşümü yapılır. Daha sonra ilgilenilen değerler aynı eşitlik yardımıyla ters dönüşüm yapılarak belirlenir (Taguchi 1987):

$$\Omega(\text{db}) = -10 \text{Log} \left( \frac{1}{P} - 1 \right) \quad (3.5)$$

Burada  $\Omega(db)$  yüzdellik değerin omega dönüşümü ile bulunan desibel değeri,  $p$  deneysel olarak elde edilen ürünün yüzdellik 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 (Sahin 2004).

### 3.7. Deneysel Verilerin Karakteristik Hesaplamalarda Kullanılması

Damlacık çapı, sprej soğutmada ısı transferini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Küçük çaplara sahip damlacıkların büyük çaplı damlacıklara nazaran daha fazla yüzey alanına sahip olmaları nedeniyle ısı transferinin iyileşmesini sağlarlar. Buna karşılık damlacık çaplarının çok küçük olması halinde hava akışı ile sürüklenerek yüzeye ulaşamayacaklarının da göz önünde bulundurulması gerekir.

Isı transferinin iyileştirilmesine etki eden diğer parametreler damlacığın çarpma sıklığı (frekansı) ve açısı, yüzey eğimi, açısı, pürüzlülüğü ve malzemesidir. Soğutulan yüzey sıcaklığı Leidenfrost sıcaklığının altındaysa, damlacık frekansı arttığında ısı transferi etkinliği azalır. Bu etki yüzey sıcaklığı Leidenfrost sıcaklığının üzerine çıkarıldığı zaman azalır. Yatay düzlem üzerindeki damlacığın çarpma açısı (yüzey normaliyle damlacığın hareket doğrultusu arasındaki açı) arttığında Weber sayısının normal doğrultudaki bileşeni ve buna bağlı olarak ısı transferi etkinliği azalır. Aynı etki, yüzeye çarpma açısını arttıracak şekilde eğim verildiğinde de görülür. Bunlara ilaveten, yüzey pürüzlülüğünün artması da ısı transfer oranını arttırıcı yönde etki sağlar. Çünkü pürüzsüz yüzeyler ile kıyaslandığı zaman pürüzlü yüzeylerin kritik Weber sayısı çok daha küçük olduğundan, damlacıklar daha düşük Weber sayılarında da parçalanmaktadır.

Sonuç parametresi olarak incelenecek Nusselt sayısını hesaplamak için;

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.6)$$

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

Isı taşınım katsayısı;

$$h = \frac{q''}{(T_y - T_w)} \quad (3.7)$$

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

$$\dot{q} = \dot{m}(C_p \Delta T_{sub} + h_{fg}) \quad (3.8)$$

$$\dot{q}'' = \rho_l \dot{V}''(C_p \Delta T_{sub} + h_{fg}) \quad (3.9)$$

$$\Delta T_{sub} = (T_y - T_w) \quad (3.10)$$

$$Nu = \frac{\dot{q}''}{(T_y - T_w)} \left( \frac{D_h}{k} \right) \quad (3.11)$$

Burada  $D_h$  hidrolik çapı ( $4 \cdot \text{Alan}/\text{Çevre}$ ) ile hesaplanacaktır. Prandtl sayısı ise;

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.12)$$

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

$$Ja = \frac{c_p \Delta T_{sat}}{h_{fg}} \quad (3.13)$$

$$\Delta T_{\text{sat}} = (T_d - T_w) \quad (3.14)$$

$$Ja_{\text{aug}} = \frac{c_p \Delta T_{\text{sub}}}{h_{fg}} \quad (3.15)$$

Düzeltilmiş Ja sayısında sıcaklık farkındaki doyma sıcaklığı yerine yüzey sıcaklığı kullanılmıştır.

Nusselt sayısı böylece;

$$Nu = \left( \frac{\rho_l V^* D_h}{\mu} \right) \left( \frac{\mu c_p}{k} \right) \left( \frac{h_{fg}}{c_p (T_y - T_w)} \right) (Ja + 1) \quad (3.16)$$

ve değerler boyutsuz sayılar cinsinden yazılırsa;

$$Nu = Re * Pr \left( \frac{1}{Ja_{\text{aug}}} \right) (Ja + 1) \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilir.

Bunun yanında Nusselt sayısını hesaplamak için literatürde bazı korelasyonlar verilmiştir.

Metalik yüzeyler için (Mudawar and Valentine 1989);

$$Nu_{32} = 2,512 Re_{32}^{0,76} Pr_f^{0,56} \quad (3.18)$$

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

$$Nu = 3,4 * 10^{-5} \frac{Re^{1,51}}{Ja^{0,254}} \quad (3.19)$$

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

$$Nu_{d_{32}} = 4.70 Re_{d_{32}}^{0.61} Pr_f^{0.3} \quad (3.20)$$

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

$$Nu = 0,036 Re^{1,04} We^{0,28} Pr^{0,51} (3,02 + \epsilon^{1,53}) \quad (3.21)$$

Bu korelasyonda  $\epsilon$  değeri;

$$\epsilon = \frac{(T_y - T_f)}{T_{sat}} \quad (3.22)$$

ifadesi ile tanımlanmıştır.

(Ranz and Marshall 1952)'in Nusselt korelasyonu;

$$Nu = \frac{h_0 d}{k_g} = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr_d^{1/3} \quad (3.23)$$

$$q'' = 1,87 * 10^{-5} (T_y - T_w)^{5,55} \quad (3.24)$$

$$h = 0,098 T_{y_0} + 2,8 \quad (3.25)$$

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

Film buharlaşma için ısı akısı ifadesi;

$$q'' = 976 T_s - 45392 \quad (3.26)$$

Çekirdek kaynamada;

$$q'' = 6800T_s - 638890 \quad (3.27)$$

ilişkileri verilmiştir.

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

$$Q = m_{Al} C_p \Delta T \quad (3.28)$$

ile hesaplanmıştır. Burada  $\Delta T$ , yüzeyin spreymden önceki ve sonraki ortalama yüzey sıcaklıklarıdır. Hava destekli nozul ile gönderilen spreym için ısı transferi katsayısı ise spreym ısı transferi katsayısı olarak şu şekilde tanımlanmıştır:

$$h_{sp} = \frac{(Q - Q_{rad} - Q_{buh.})}{A_y (T_y - T_{sp})} \quad (3.29)$$

Buradan Nusselt sayısı ise;

$$Nu = \frac{h_{sp} D_h}{k} \quad (3.30)$$

ile hesaplanmıştır. Işınım ile ısı transferinin etkisi yüzeyin spreyleme süresindeki ortalama sıcaklığına göre hesaplanmıştır. Buharlaştırma ile atılan ısı ise yüzeydeki bağıl nemin değişimine göre çeşitli spreyleme zamanları için hesaplanmıştır. Bu değer 5 s, 10 s ve 15 s spreyleme süreleri için sırasıyla; %14.72, %16.92 ve %19.31 olarak elde edilmiştir.

### 3.8. Hesaplamalarda Kullanılan Boyutsuz Sayılar

Kararsız sıvı kütlelerinin parçalanmasında rol oynayan kuvvetler; atalet kuvvetleri, yüzey gerilimi ve viskoz kuvvetler şeklinde sıralanabilir. Bu nedenle bu tür akışları karakterize eden boyutsuz sayılar bu üç farklı kuvvetin farklı kombinasyonlarından oluşmaktadır. Herhangi bir zorlanmış akış problemini karakterize eden boyutsuz sayılar arasında ilk akla gelen, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak bilinen Reynolds sayısıdır.

$$Re = \frac{D_h U_{ort}}{\nu} \quad (3.31)$$

Eşitlikte akışkanın nozul kesitindeki ortalama hızı  $U_{ort}$  ve termofiziksel özellikleri akışkanın nozul çıkışındaki bölgesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Kararsız haldeki sıvı kütlelerinin hava ya da bir başka ortam içerisindeki serbest hareketinde, yüzey gerilimi önem kazanmaktadır. Atalet kuvvetlerinin yüzey gerilimi kuvvetlerine oranını gösteren Weber sayısı,

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma} \quad (3.32)$$

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.

$$Oh = \left( \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma d_0}} \right) \quad (3.33)$$

### 3.9. Sprey Bozulma Mesafesi ve Damlacık Çapı

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



$$\lambda = \sqrt{2}\pi d = 4,4d \quad (3.34)$$

$$D = 1,88d \quad (3.35)$$

$$\lambda_{min} = \pi d \quad (3.36)$$

Viskoz sıvılar için;

$$\lambda_{opt} = \sqrt{2}\pi d \left[ 1 + \frac{3\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma d}} \right]^{0,5} \quad (3.37)$$

Burada  $\lambda$ , Spreyin boyun yaptığı yerdeki dalga boyu;  $d$ , Orifis çapı;  $D$ , Sprey damlacık çapı;  $\sigma$ , Yüzey gerilmesi;  $\lambda_{opt}$ , Optimum dalga boyu olarak tanımlanmıştır.

$$We_{crit} = \frac{\rho D^2 V^2}{\sigma D} = \frac{\rho V^2 D_{max}}{\sigma} \quad (3.38)$$

Parçalanmaya başlama noktası değerleri;

Hinze'ye göre;

$$We_{crit} = 1,18 \quad (3.39)$$

(Sevik and Park 1973)'a göre;

$$We_{crit} = 1,04 \quad (3.40)$$

değerleri ile ifade edilir.

Türbülans akış alanında damla bozulması için;

$$We_{crit} = \frac{\rho A \dot{u}^2 D_{max}}{\sigma} \quad (3.41)$$

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

$$\lambda_{opt} = 4,51d \quad (3.42)$$

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

$$4,51d \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2 = \left(\frac{\pi}{6}\right) D^3 \quad (3.43)$$

$$D = 1,89d \quad (3.44)$$

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

$$C_D \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) (0,5 \rho A U_R^2) = \pi D \rho \quad (3.45)$$

$$C_D = C_{D_{basınç}} + C_{D_{sürtünme}} \quad (3.46)$$

Düzenlenirse;

$$(\rho A U_R^2 D)_{krit} = \frac{8}{C_D} \quad (3.47)$$

ifadesi elde edilir.

Böylece kritik Weber sayısı;

$$We_{crit} = \frac{8}{C_D} \quad (3.48)$$

ile ifade edilir.

Maksimum kararlı damla çapı;

$$D = \frac{8\sigma}{C_D \rho A U_R^2} \quad (3.49)$$

Damla ayrılması için kritik bağıl hız:

$$U_{Rcrit} = \left( \frac{8\sigma}{C_D \rho A D} \right)^{0,5} \quad (3.50)$$

(Lane 1951)'e göre;

$$U_{Rcrit} = \left( \frac{\sigma}{D} \right)^{0,5} \quad (3.51)$$

Bu ifade su için düzenlenirse bu değer damlacık çapına ( $\mu\text{m}$ ) bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$U_{Rcrit} = \frac{784}{\sqrt{D}} \quad (3.52)$$

Literatürdeki bazı bozulma mesafesi korelasyonları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Literatürdeki bazı bozulma mesafesi korelasyonları

Yazar	Bozulma mesafesi korelasyonu
(Sirotkin and 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)	$\frac{L_c}{d_L} = 0.095 \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{-0.36/Z} We_R^{-0.22/Z} Re_L^{0.68}$

Çizelge 3.1. (devam)

Lasheras <i>et al.</i> (1998)	$\frac{L_{pc}}{d_L} = \frac{6}{\sqrt{M}}$
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)	$L = 19.5d_0(We)^{0.5}(1 + Oh^3)^{0.85}$

### 3.10. Deneysel Belirsizlikler

Deneysel sonuçlardaki belirsizliği tahmin etmek için çok daha kesin bir yöntem Kline ve McClintock tarafından verilmiştir. Yapılacak bir deney sonucunda x bağımsız değişkenlerinin ölçülmesiyle hesaplanacak olan R bağılı değişkeni, aşağıdaki şekilde verilmiş olsun.

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Burada  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ; bağımsız değişkenleri R ise sonuç değişkenini göstermektedir.  $w_R$  sonuç değişkenindeki belirsizliği,  $w_1, w_2, \dots, w_n$  ise bağımsız değişkenlerdeki belirsizliği göstermek üzere aşağıdaki ilişki Kline ve McClintock tarafından verilmiştir.

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.53)$$

Kline and 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 bulunmuştur. Ayrıca ölçülen ve boyutsuz parametrelerin belirsizliklerine etki eden fiziksel parametrelerin her birisine ait hata katkıları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Ölçülen büyüklüklerdeki belirsizlikler

<b>Değişkenler</b>	<b>Belirsizlik (<math>W_R</math>)</b>
Alüminyumun kütlesi, m	0.09
Yüzey sıcaklığı, $T_y$ ; Akışkan sıcaklığı, $T_{sp}$	0.09
Özgül ısı, $C_{Al}$	0.1
Su debisi, $Q_l$	0.03
Hava debisi, $Q_a$	0.05
Nozul çapı, $d_0$	0.025
Yüzey gerilmesi, $\sigma$	0.001
Suyun termal iletkenliği, k, (tablodan)	0.01
Suyun yoğunluğu, $\rho$ , (tablodan)	0.002

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

### 4.1. Parametreler ve Taguchi Deney Planı

Yapılan literatür araştırmasında hava destekli nozulda sprej soğutma için dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılarda sprej damlacık çaplarını ve homojenliğini etkileyen hava ve sıvı debileri, sprejleme süresi, nozul ile ısı alıcı arası mesafenin sprej verimini etkileyen parametreler olduğu görülmüştür. Yine bu araştırmalar ışığında özellikle kanatçıklı yüzeylerde kanat yüksekliğinin, genişliğinin, kanat açısının ve kanatların birbirlerine göre diziliş şeklinin akışı ve akışın yapısal özelliklerini etkileyen temel parametreler olduğu tespit edilmiştir. Buna göre bu çalışmada öncelikle ısı transfer karakteristiklerini etkileyebilecek olduğu düşünülerek seçilen kontrol edilebilir parametreler ve bu parametrelerin deneylerde incelenen değerleri belirlenip Taguchi deney tasarımı kullanılarak optimizasyon deneyleri yapılmış ve optimum geometri elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise Nusselt Sayısı üzerine en etkin parametreler belirlenerek Nusselt korelasyonu elde edilmiştir. Buna ek olarak parametrelerin Nusselt Sayısı üzerine etkilerini ifade eden grafikler çizilerek yorumlanmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise görüntü işleme ile sprej jet çapı ve sprej açısı belirlenerek bu parametrelere ait korelasyonlar elde edilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında ısı transfer karakteristiklerini etkileyebilecek olduğu düşünülerek seçilen kontrol edilebilir parametreler ve bu parametrelerin deneylerde incelenen değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Çalışmada incelenen parametreler ve değerleri

Parametreler		Seviyeler		
		1	2	3
A	Nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı (h/d)	167	333	667
B	Kanat genişliği, b [mm]	15	30	45
C	Kanat açısı, $\alpha$ [derece]	15	30	45
D	Kanat yüksekliği, H [mm]	15	25	35
E	Kanatlar arası x doğrultusundaki mesafe, a [mm]	10	15	20
F	Kanatlar arası y doğrultusundaki mesafe, c [mm]	10	15	20
G	Dilimler arası y doğrultusundaki mesafe, e [mm]	10	15	20
H	Dilimler arası x doğrultusundaki mesafe, f [mm]	10	15	20
I	Hava debisi, $Q_a$ [m <sup>3</sup> /h]	2.1	2.9	3.6
J	Su debisi, $Q_1$ [m <sup>3</sup> /h]	0.012	0.021	0.03
K	Zaman, t [s]	5	10	15

Yukarıdaki çizelgeden de görüleceği gibi tüm parametreler 3 seviyeli olarak seçilmiş ve buna göre Çizelge 4.2’de verilen  $L_{27}(3^{11})$  ortogonal dizisi deney planı olarak seçilmiştir (Phadke 1989). Bu modelde 11 adet asıl etkinin yanı sıra parametreler arası bileşik etki de incelenebilmektedir.

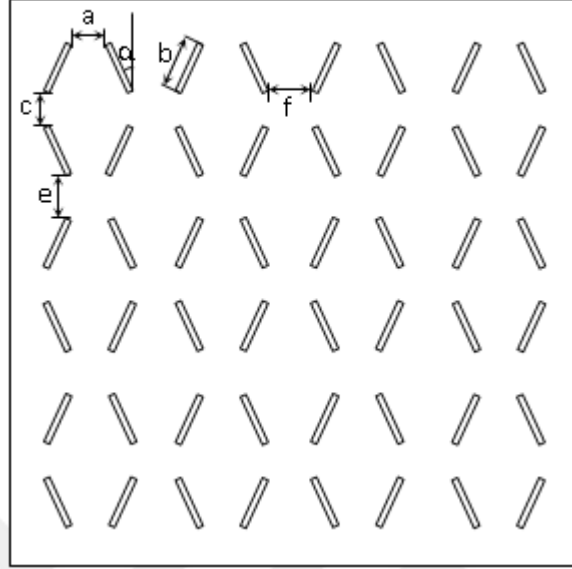
**Çizelge 4.2.** Seçilen  $L_{27}(3^{11})$  deney planı

Deney	Parametreler										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2

**Çizelge 4.2.** (devam)

<b>8</b>	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3
<b>9</b>	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1
<b>10</b>	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
<b>11</b>	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2
<b>12</b>	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3
<b>13</b>	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3
<b>14</b>	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1
<b>15</b>	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2
<b>16</b>	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2
<b>17</b>	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3
<b>18</b>	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1
<b>19</b>	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1
<b>20</b>	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2
<b>21</b>	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3
<b>22</b>	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3
<b>23</b>	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1
<b>24</b>	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2
<b>25</b>	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2
<b>26</b>	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3
<b>27</b>	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1





Şekil 4.1. Isı alıcı üzerinde incelenecek parametreler



Şekil 4.2. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre hazırlanan test elemanları

#### 4.2. Isı Transferi Analizi

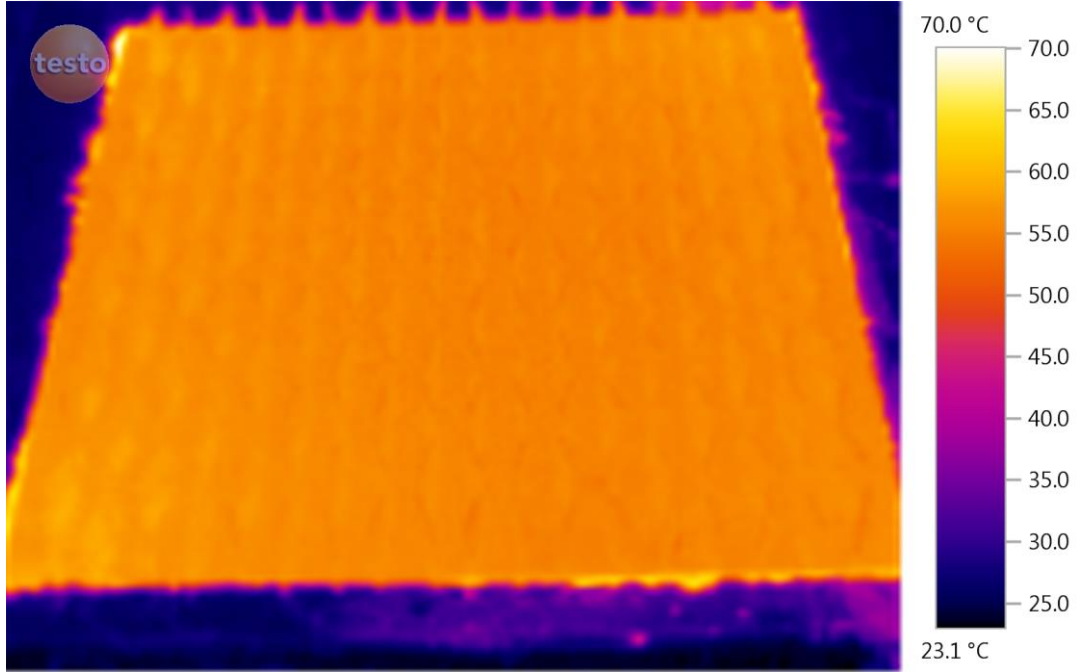
Taguchi deney planına göre deneyler yapılarak termal görüntüler elde edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.3’de sunulmuştur.

**Çizelge 4.3.** Isı transfer analizine göre elde edilen sonuçlar

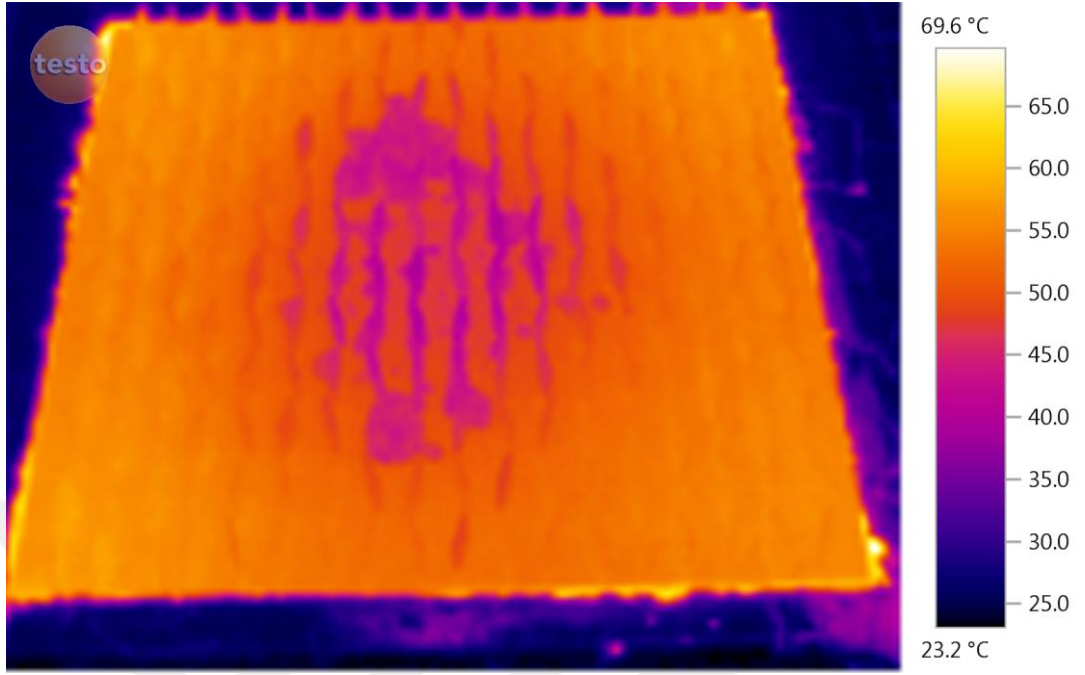
Deney No	Ty <sub>1</sub> (°C)	Ty <sub>2</sub> (°C)	T <sub>su</sub> (°C)	ΔT (°C)	$\dot{m}_{su}$ (kg/s)	m <sub>Al</sub> (kg)	Q (J)	Zaman (s)	Toplam Alan (m <sup>2</sup> )
1	55.8	51.4	23.3	4.4	0.00333333	2.3	8855.0	5	0.200
2	57.2	48.8	22.4	8.4	0.00583333	2.3	16905.0	10	0.161
3	58.0	46.1	22.7	11.9	0.00833333	2.3	23948.8	15	0.139
4	52.6	43.4	22.1	9.2	0.00583333	2.3	18515.0	15	0.186
5	57.3	51.4	20.3	5.9	0.00833333	2.3	11873.8	5	0.167
6	54.6	47.3	19.9	7.3	0.00333333	2.3	14691.3	10	0.167
7	58.1	48.5	19.4	9.6	0.00833333	2.3	19320.0	10	0.208
8	52.3	44.9	22.3	7.4	0.00333333	2.3	14892.5	15	0.208
9	59.5	50.5	22.0	9.0	0.00583333	2.3	18112.5	5	0.208
10	56.1	49.1	21.6	7.0	0.00833333	2.3	14087.5	5	0.233
11	53.4	43.6	21.5	9.8	0.00333333	2.3	19722.5	10	0.233
12	61.3	42.9	21.3	18.4	0.00583333	2.3	37030.0	15	0.223
13	59.2	47.2	19.2	12.0	0.00333333	2.3	24150.0	15	0.136
14	60.4	54.3	21.8	6.1	0.00583333	2.3	12276.3	5	0.136
15	57.1	47.5	20.5	9.6	0.00833333	2.3	19320.0	10	0.151
16	55.9	48.4	19.5	7.5	0.00583333	2.3	15093.8	10	0.184
17	52.8	43.0	20.8	9.8	0.00833333	2.3	19722.5	15	0.184
18	55.1	48.5	21.0	6.6	0.00333333	2.3	13282.5	5	0.184
19	57.7	48.7	20.8	9.0	0.00583333	2.3	18112.5	5	0.209
20	56.2	45.8	20.8	10.4	0.00833333	2.3	20930.0	10	0.175
21	57.1	47.1	20.8	10.0	0.00333333	2.3	20125.0	15	0.172
22	50.1	38.6	21.0	11.5	0.00833333	2.3	23143.8	15	0.224
23	53.2	45.6	20.2	7.6	0.00333333	2.3	15295.0	5	0.251
24	55.9	43.3	21.7	12.6	0.00583333	2.3	25357.5	10	0.251
25	57.8	48.3	21.0	9.5	0.00333333	2.3	19118.8	10	0.124
26	61.7	46.3	21.2	15.4	0.00583333	2.3	30992.5	15	0.135
27	56.3	50.2	22.4	6.1	0.00833333	2.3	12276.3	5	0.135

#### 4.2.1. Termal görüntüler

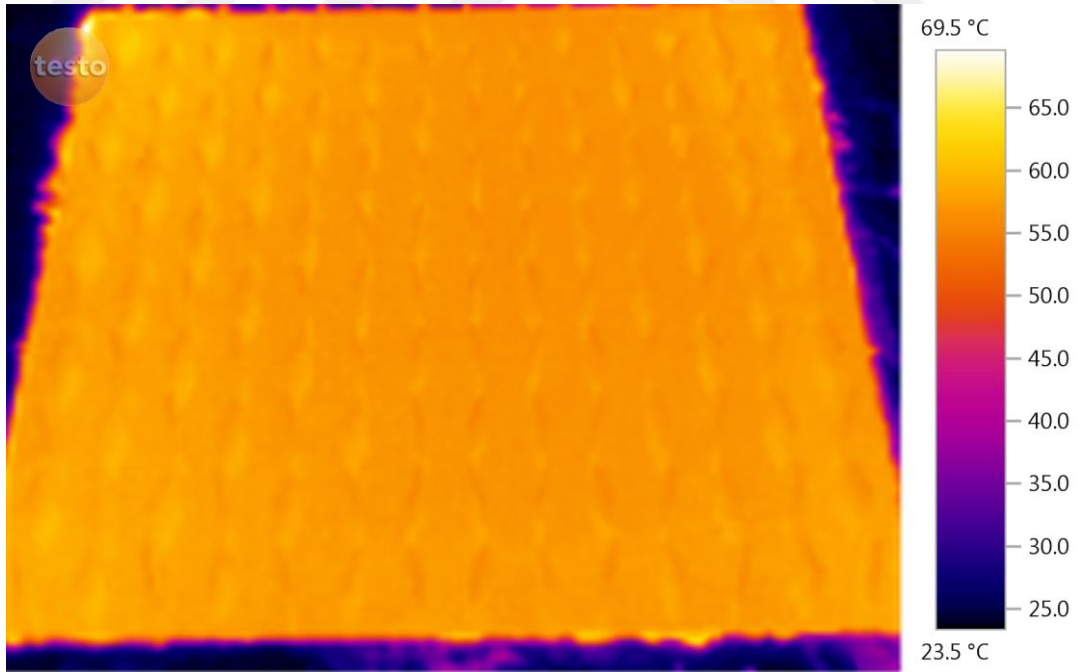
Taguchi deney planına uygun olarak 27 farklı ısı alıcı yüzey üzerine dikdörtgen geometriye sahip kanatçıklar elektrik iletimi ve ısı transferi sağlayan epoxy bağlayıcı ile yerleştirilmiştir. Ardından ısı alıcı yüzeyleri mat siyah renge boyanarak emisivite değeri  $\epsilon=0,98$  olarak alınmıştır. Testo 875-2 model termal kamera kullanılarak sprej gönderilmeden önce ve sprej gönderiminin hemen sonrasında görüntüler alınarak analizler yapılmıştır. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre elde edilen 27 farklı ısı alıcı geometrisi için elde edilen termal görüntüler aşağıda sunulmuştur.



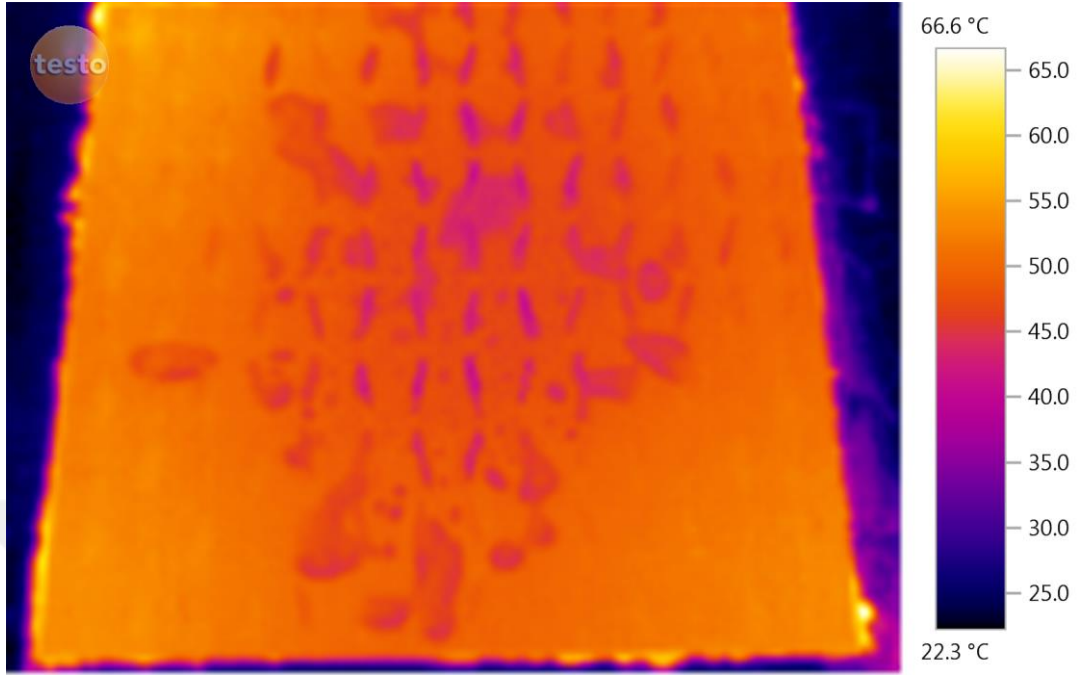
**Şekil 4.3.** Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 1. Deney için termal görüntü (sprej gönderilmeden önce)



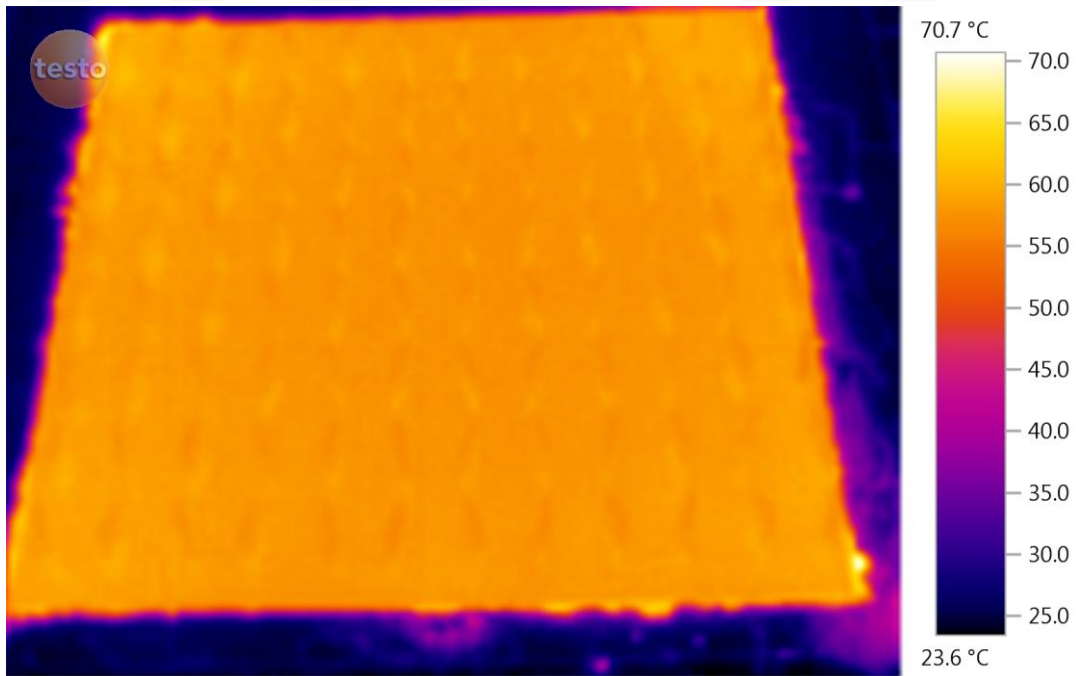
Şekil 4.4. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 1. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



Şekil 4.5. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 2. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

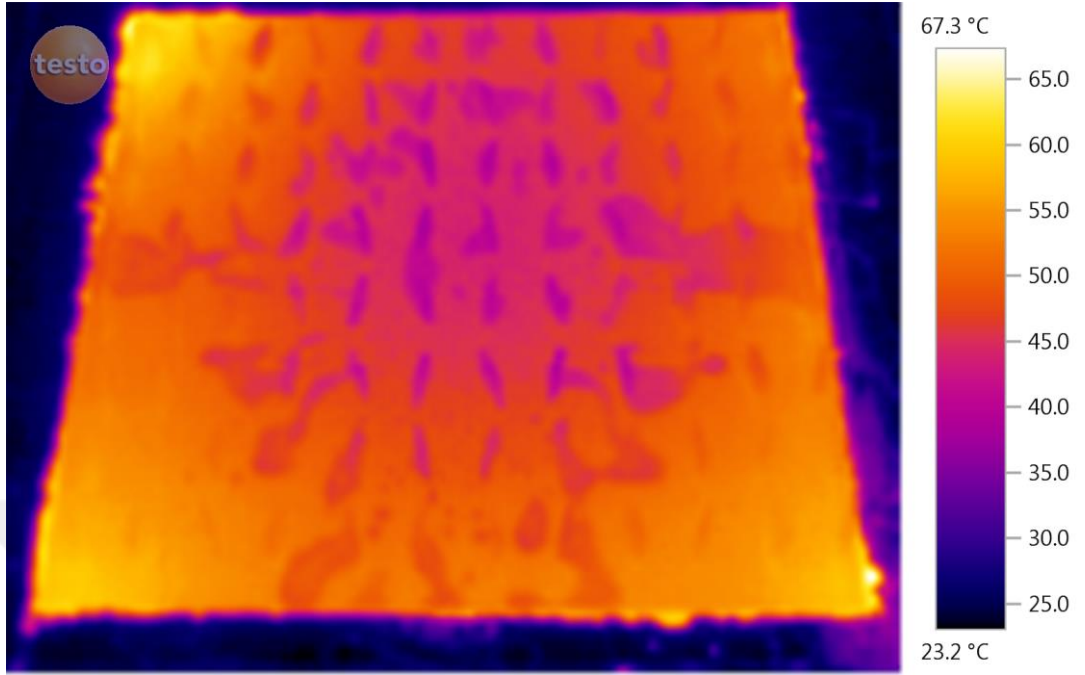


Şekil 4.6. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 2. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)

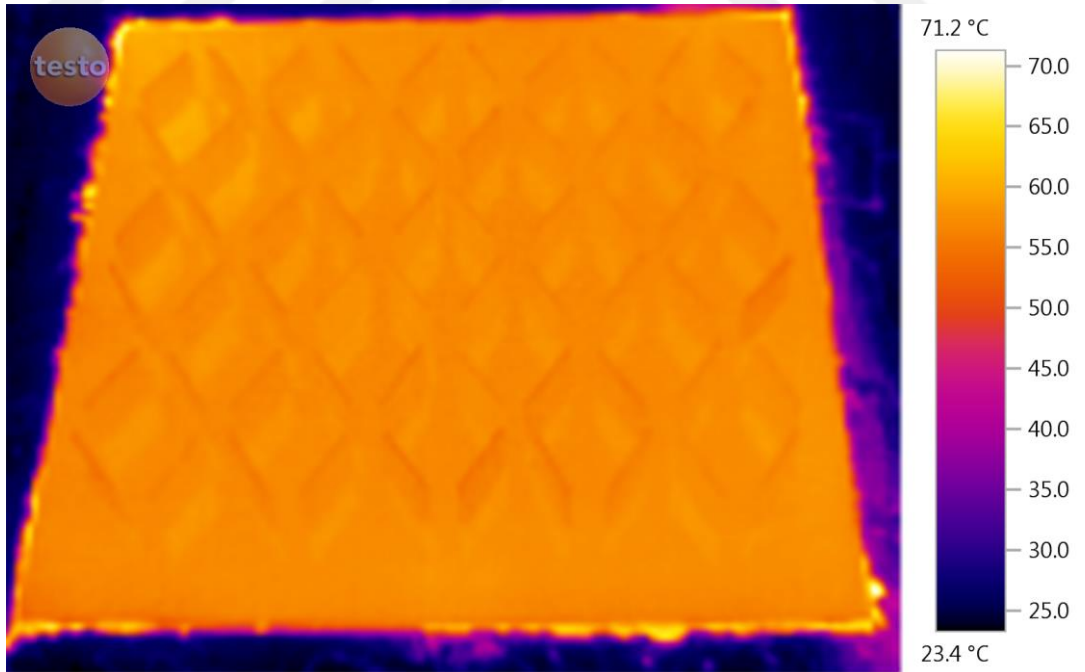


Şekil 4.7. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 3. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

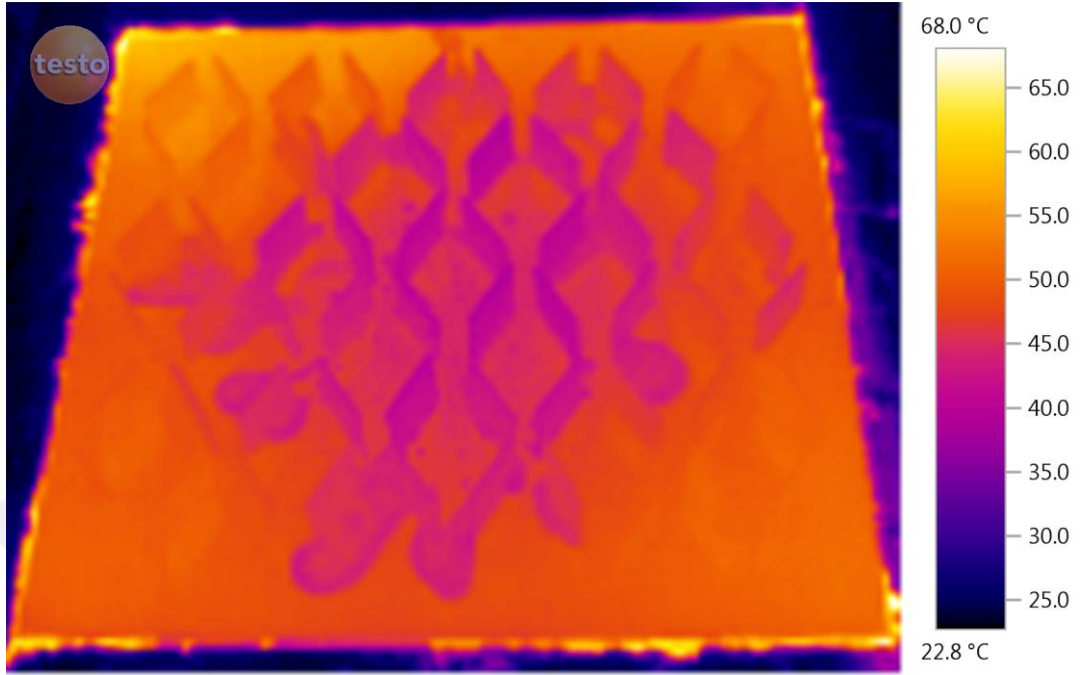




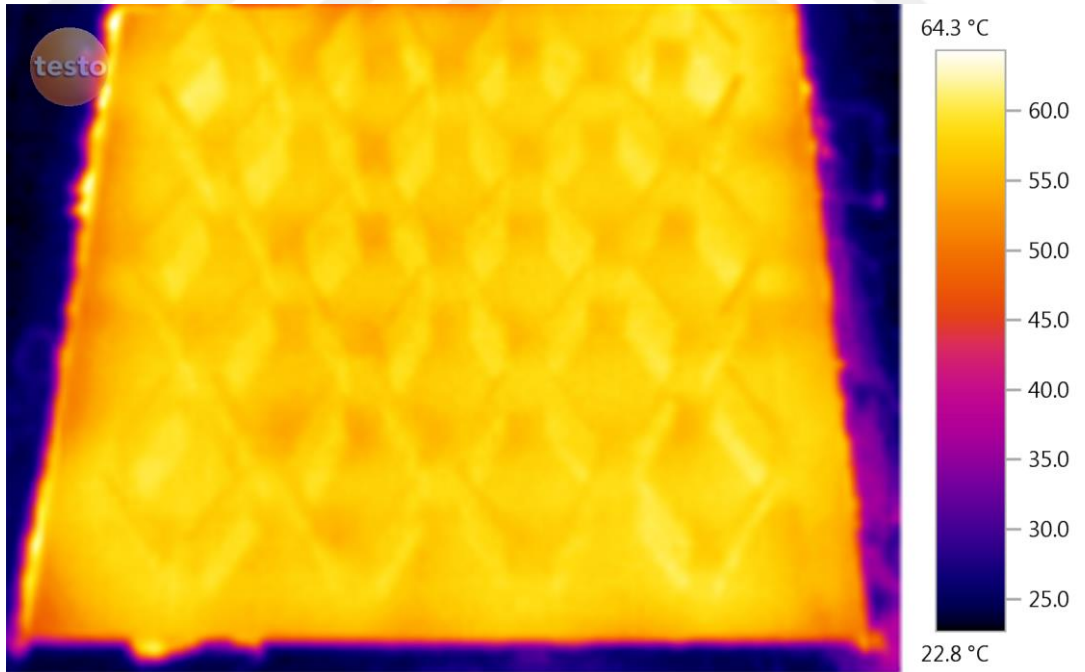
Şekil 4.8. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 3. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



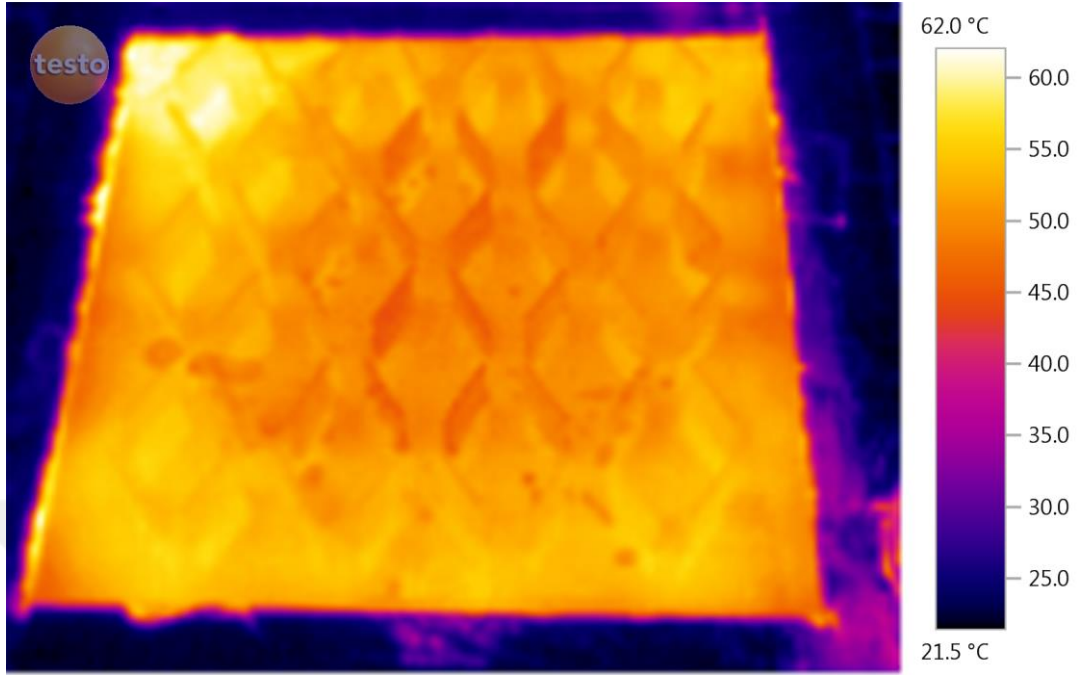
Şekil 4.9. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 4. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



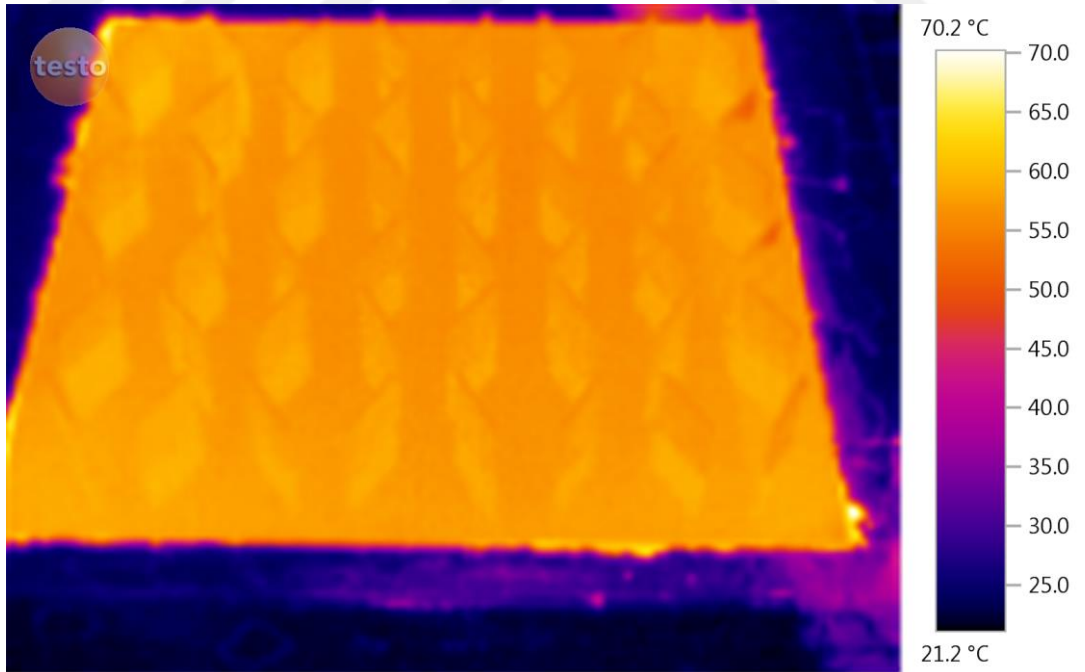
Şekil 4.10. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 4. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



Şekil 4.11. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 5. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

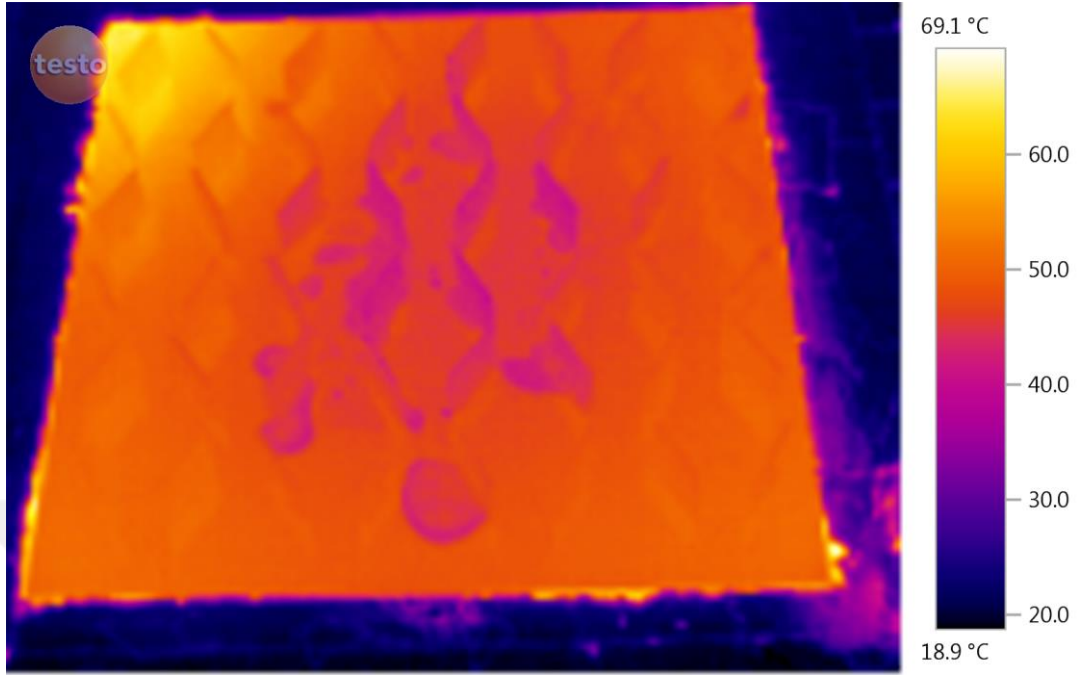


Şekil 4.12. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 5. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)

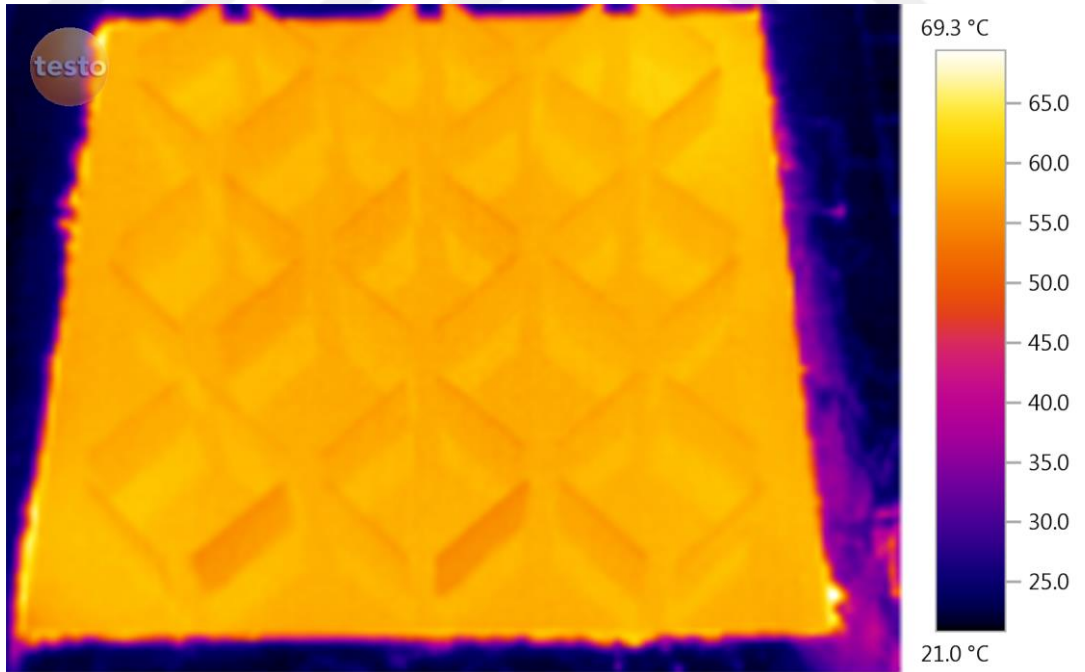


Şekil 4.13. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 6. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

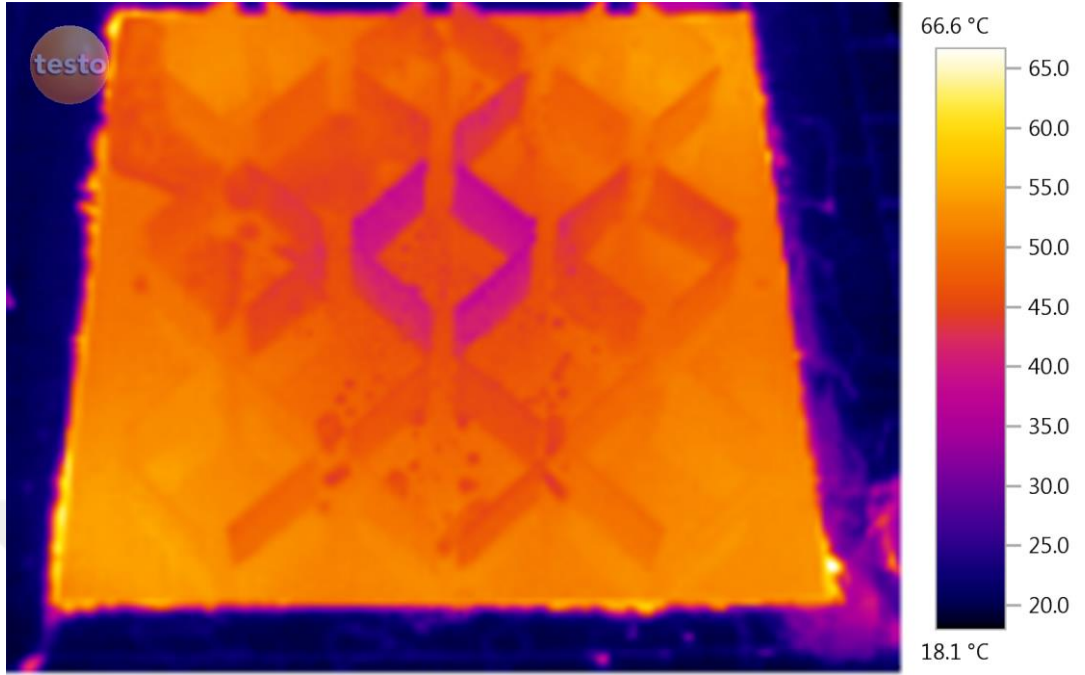




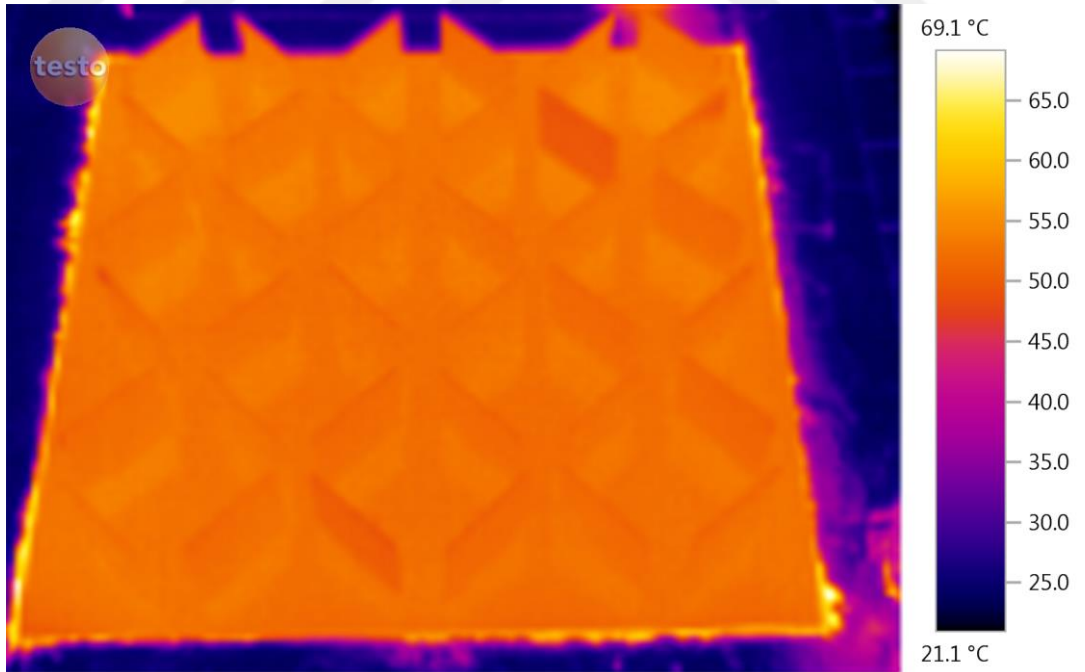
Şekil 4.14. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 6. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



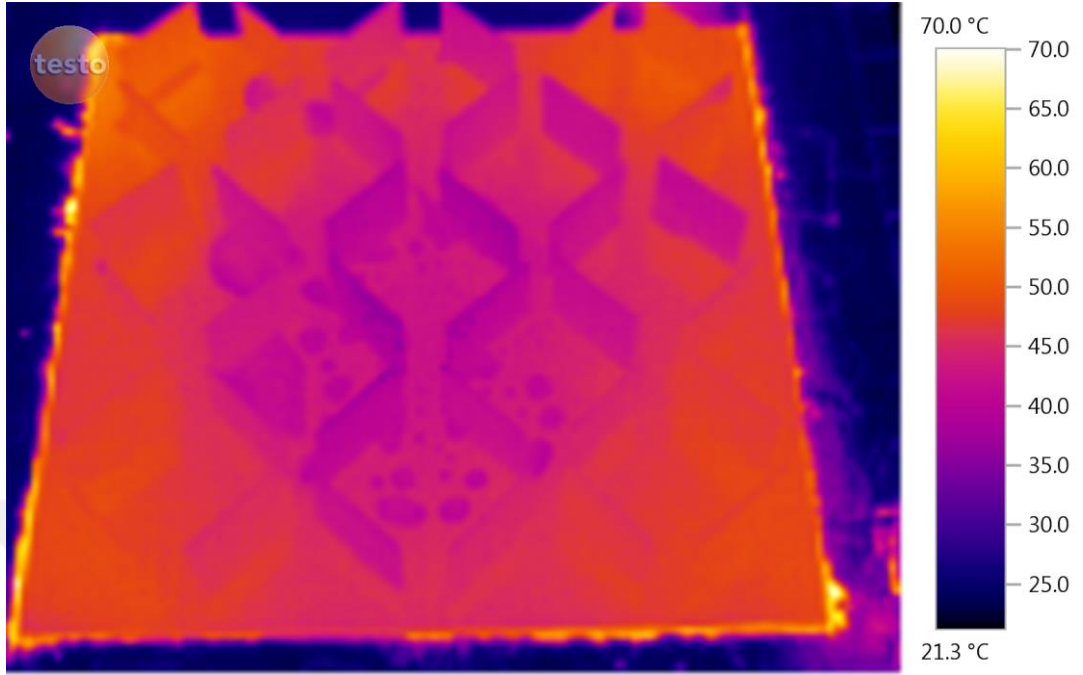
Şekil 4.15. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 7. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



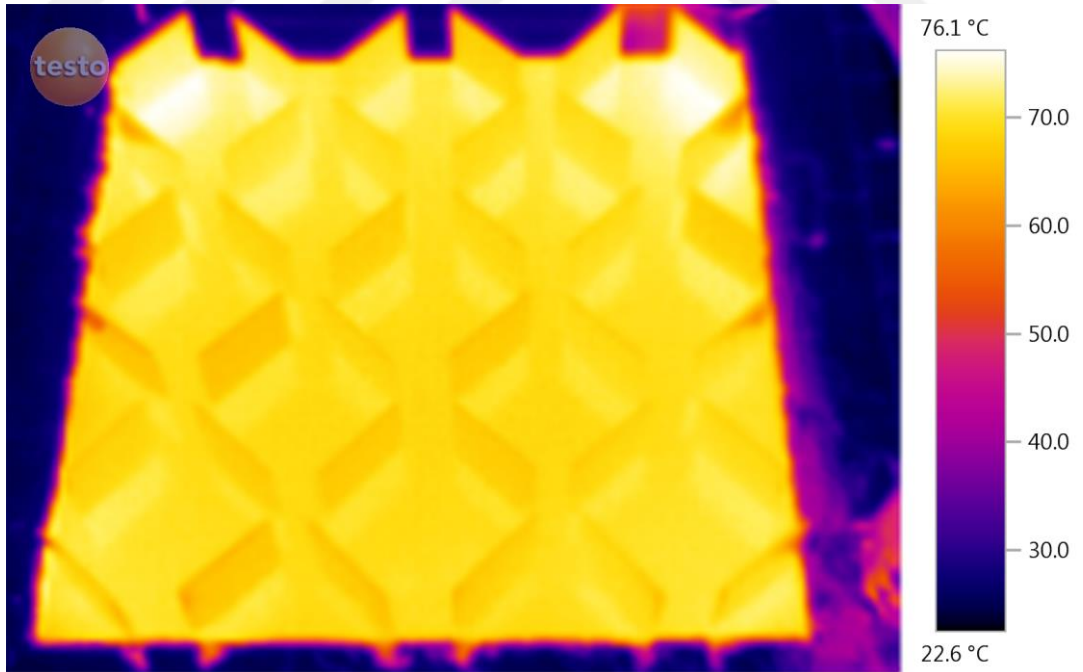
Şekil 4.16. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 7. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



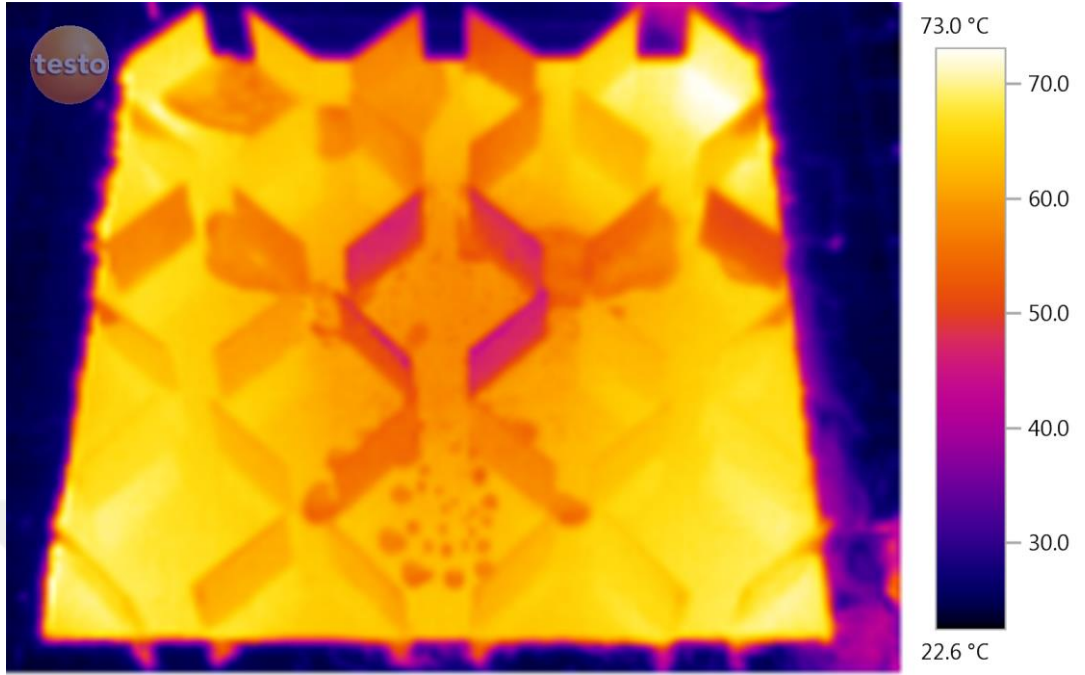
Şekil 4.17. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 8. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



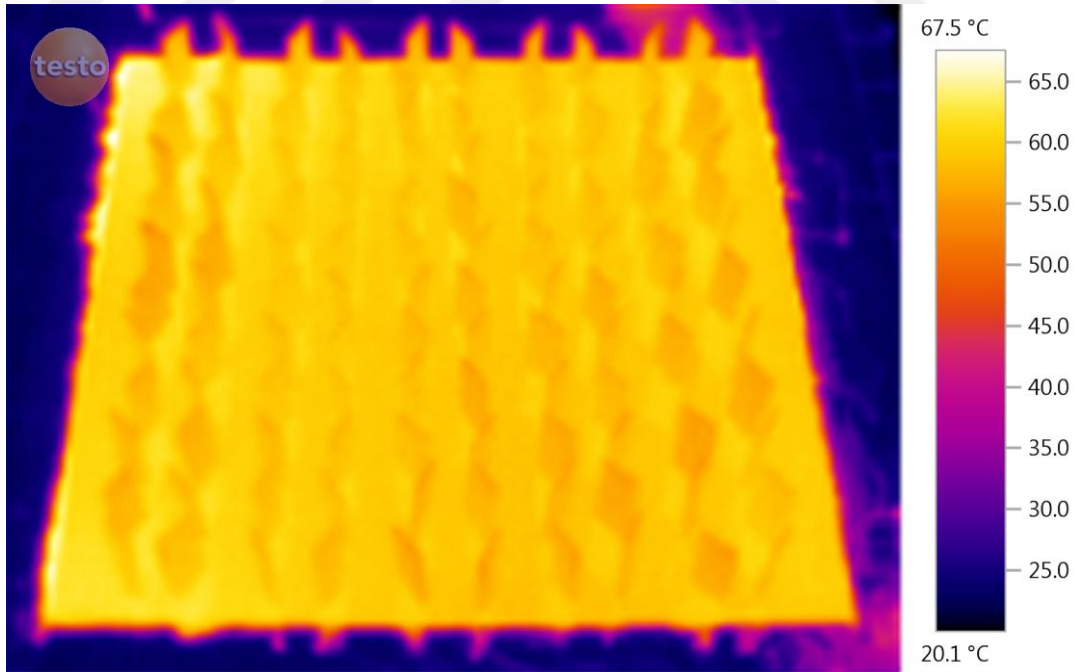
Şekil 4.18. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 8. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



Şekil 4.19. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 9. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

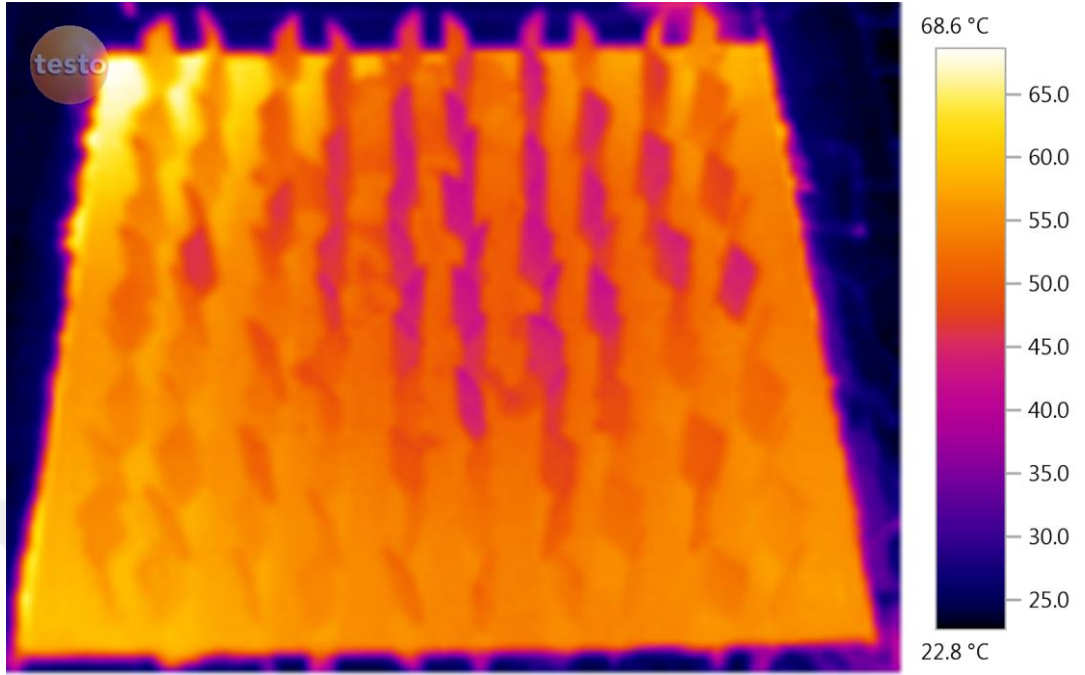


Şekil 4.20. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 9. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)

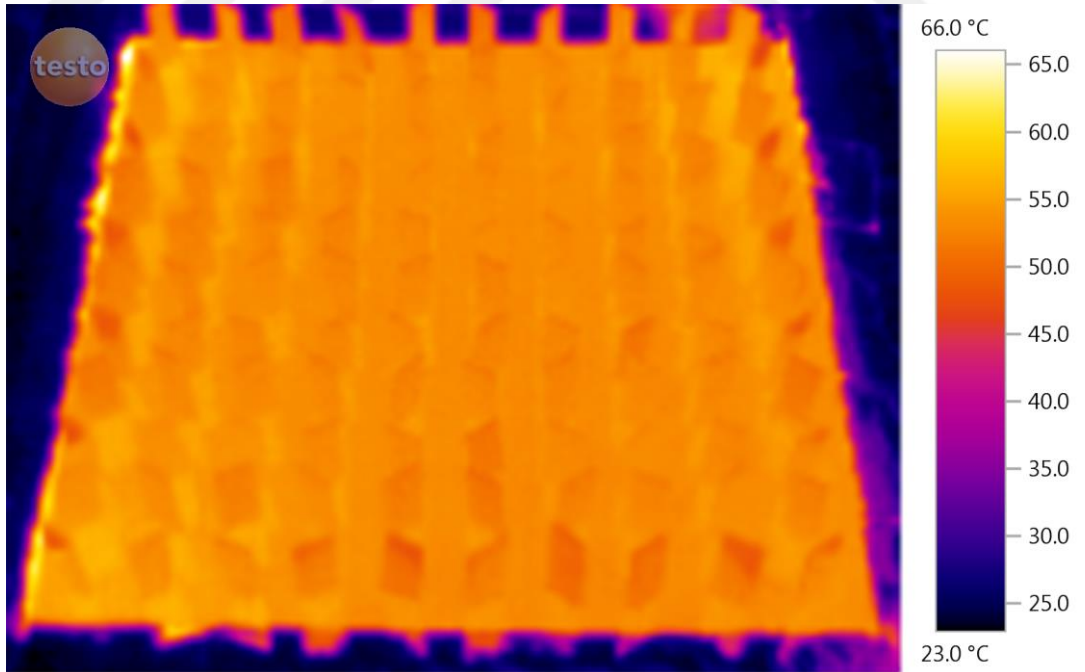


Şekil 4.21. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 10. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

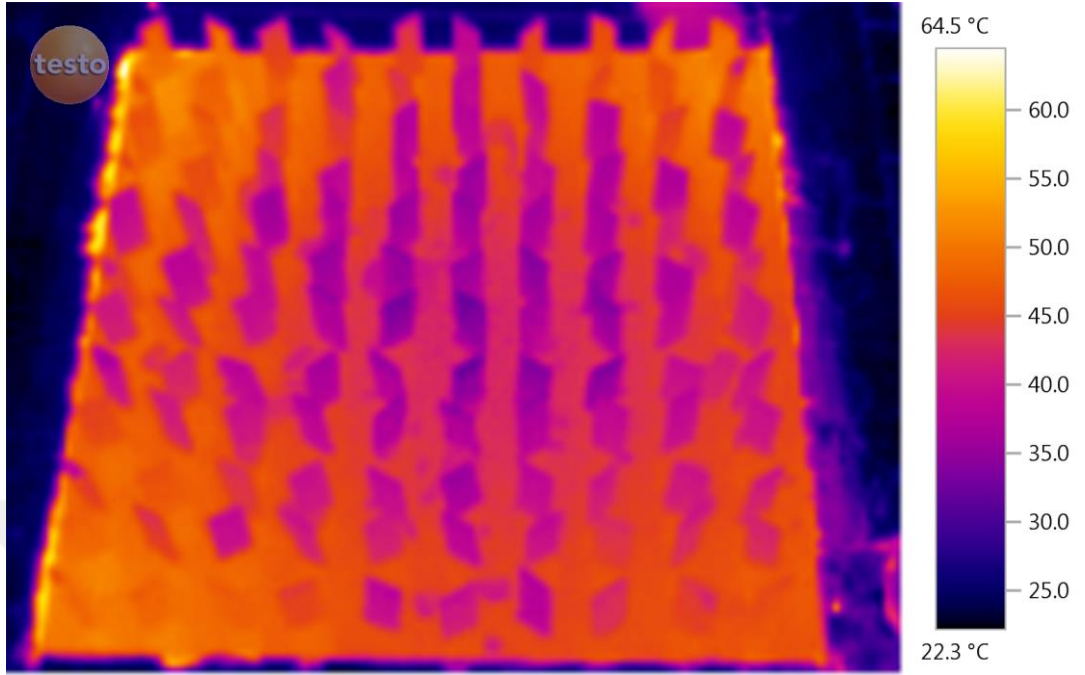




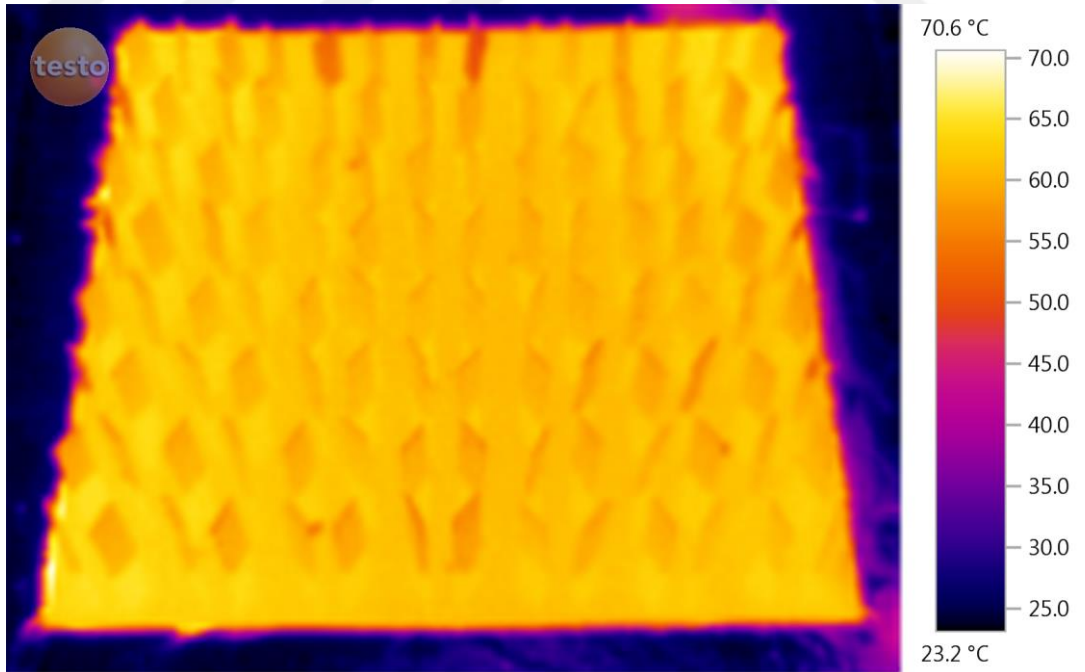
Şekil 4.22. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 10. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



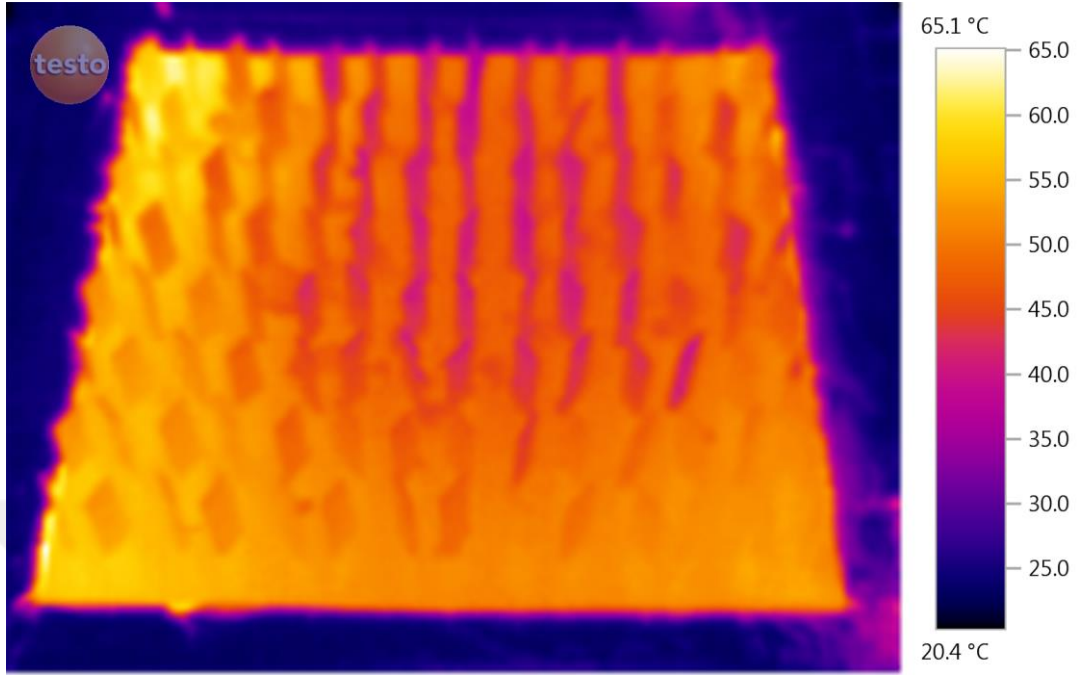
Şekil 4.23. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 11. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



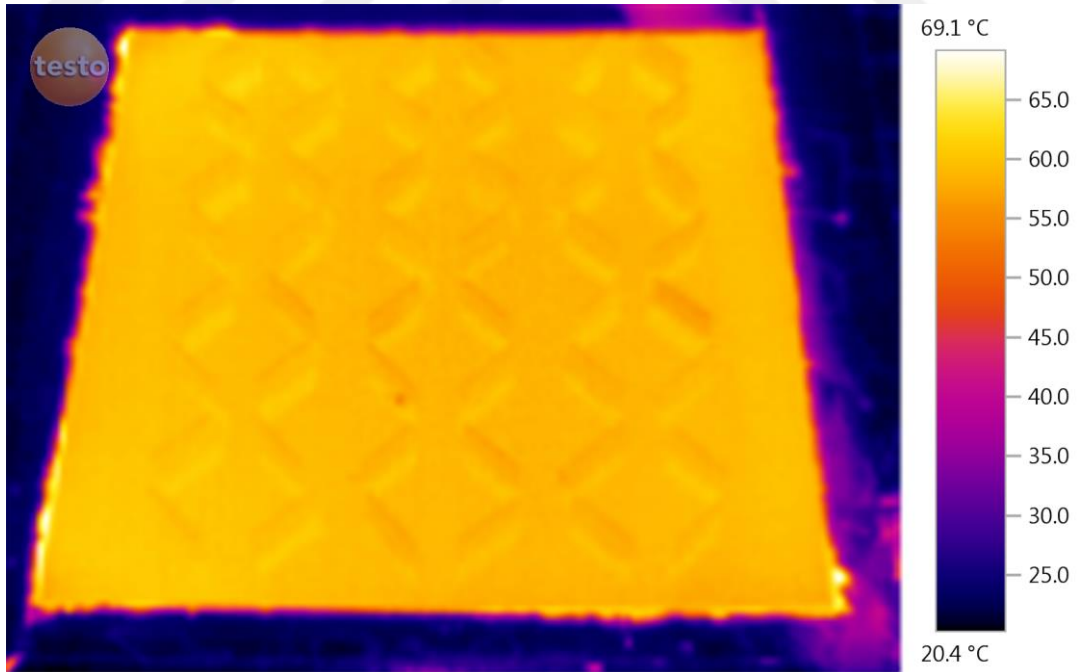
Şekil 4.24. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 11. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



Şekil 4.25. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 12. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

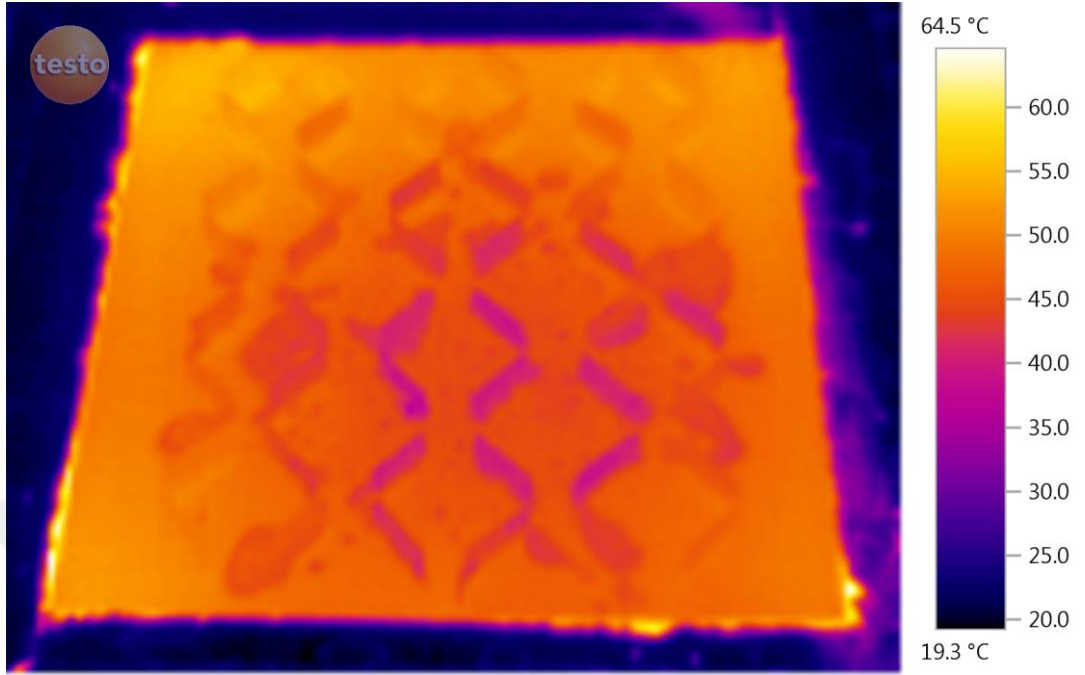


Şekil 4.26. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 12. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)

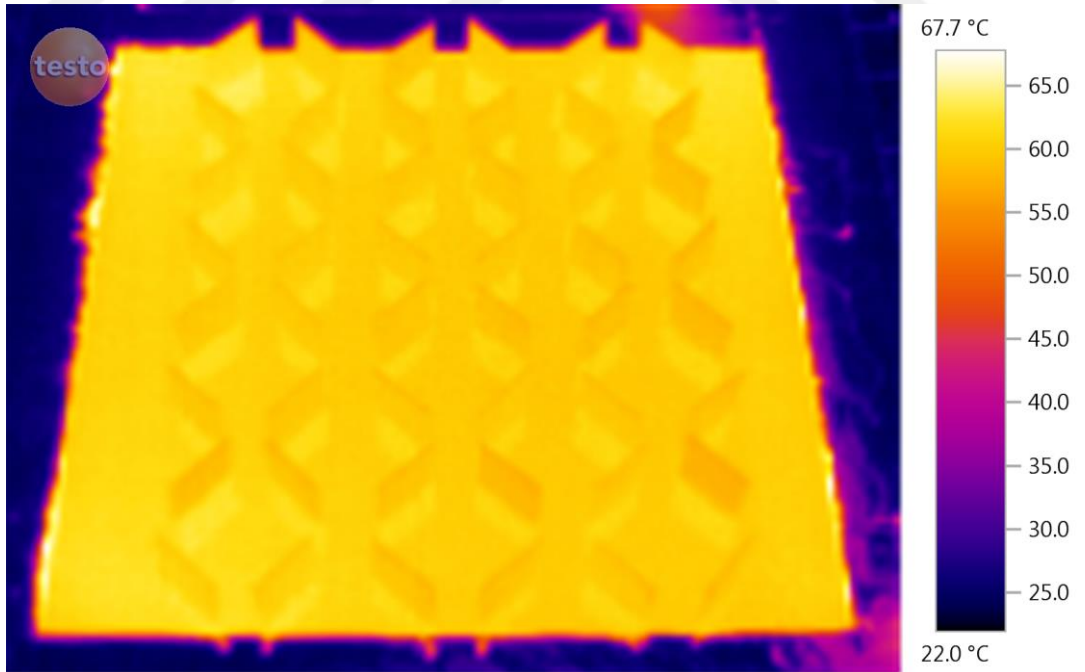


Şekil 4.27. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 13. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



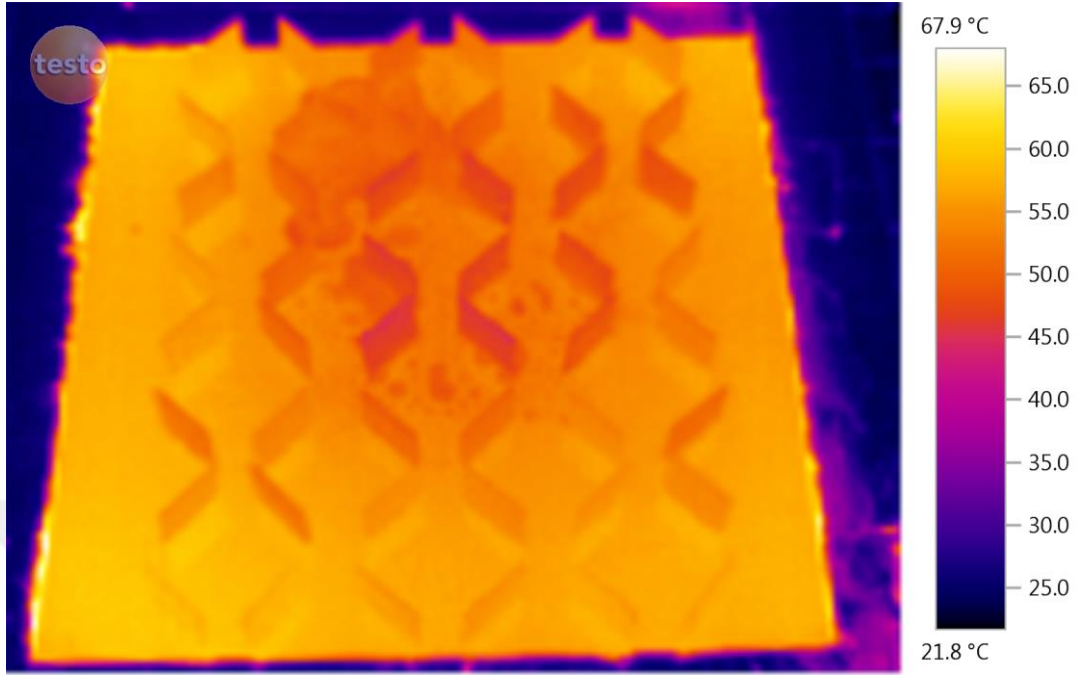


Şekil 4.28. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 13. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)

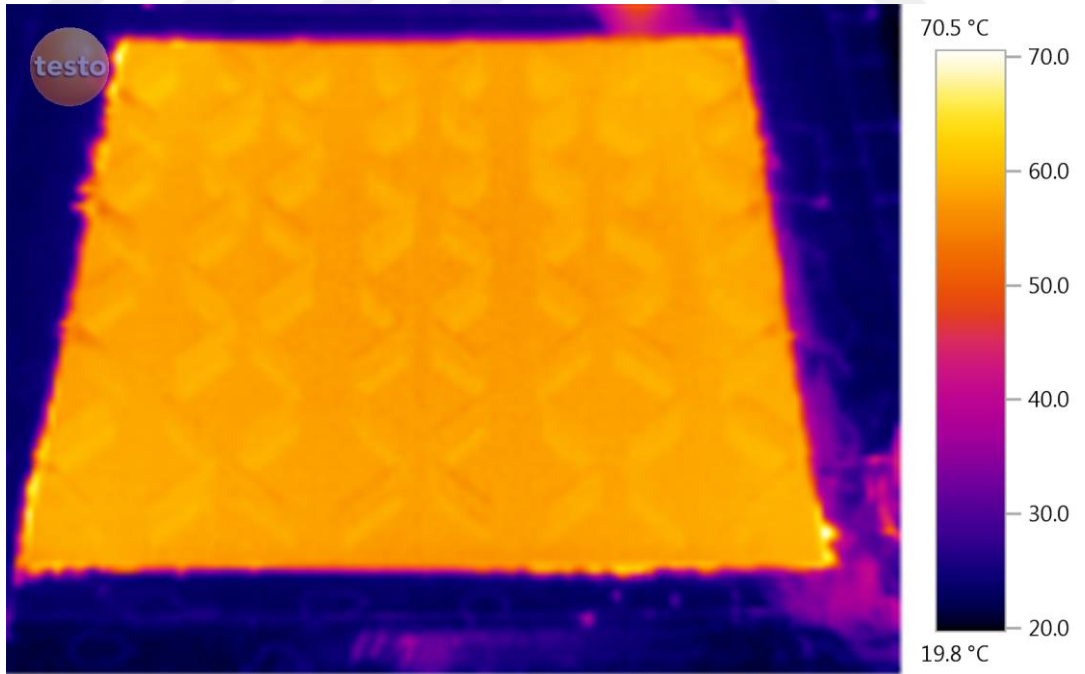


Şekil 4.29. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 14. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

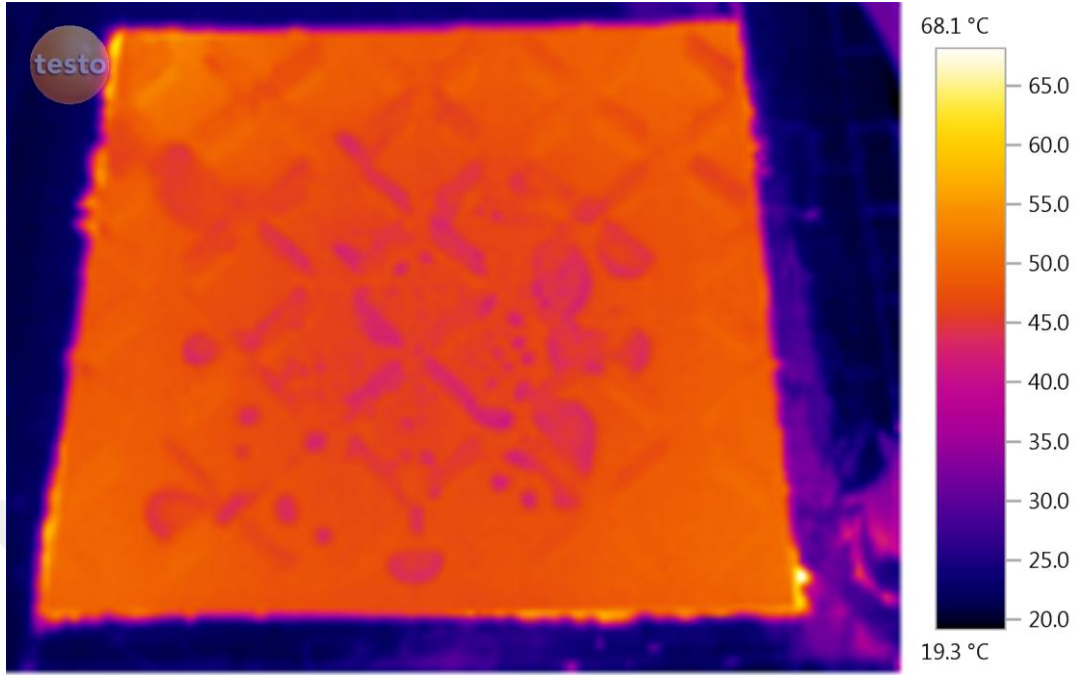




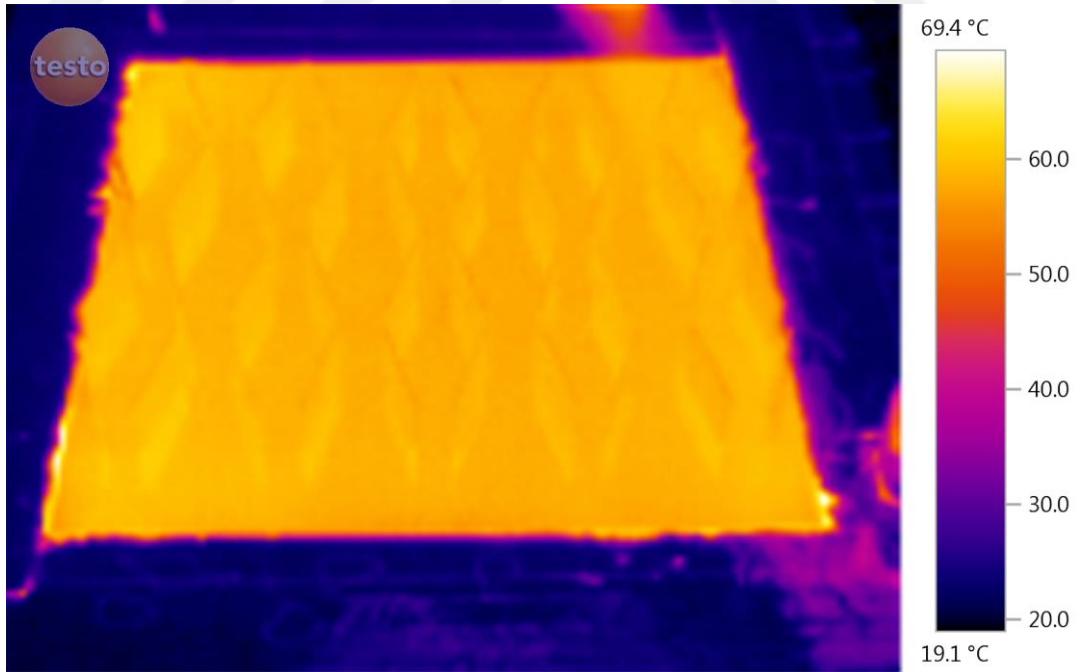
Şekil 4.30. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 14. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



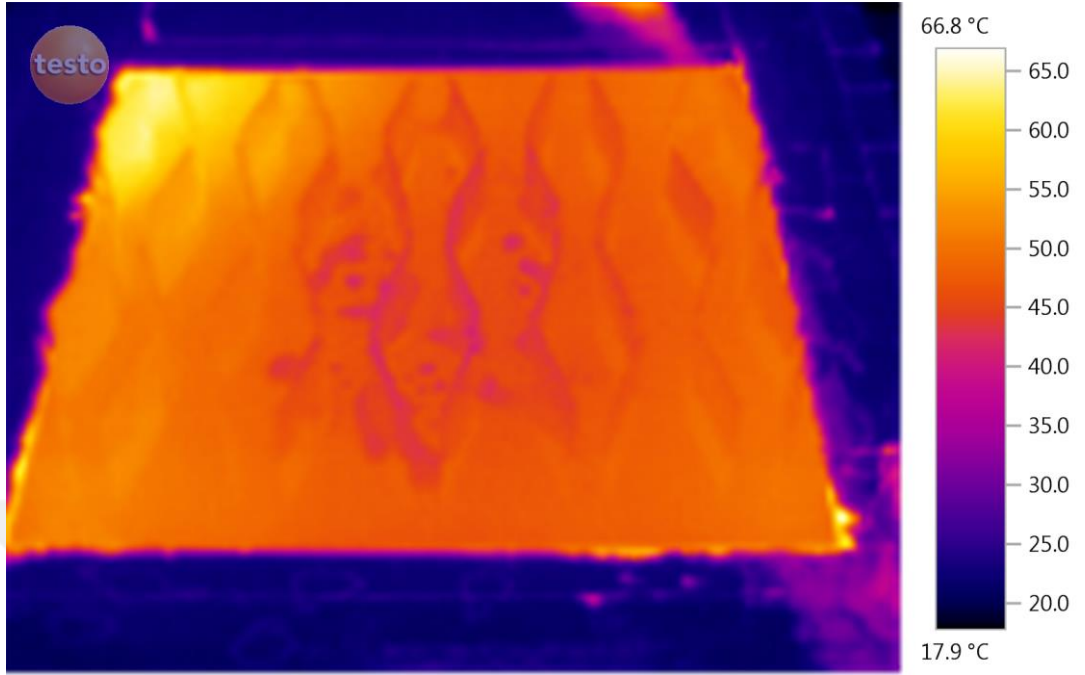
Şekil 4.31. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 15. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



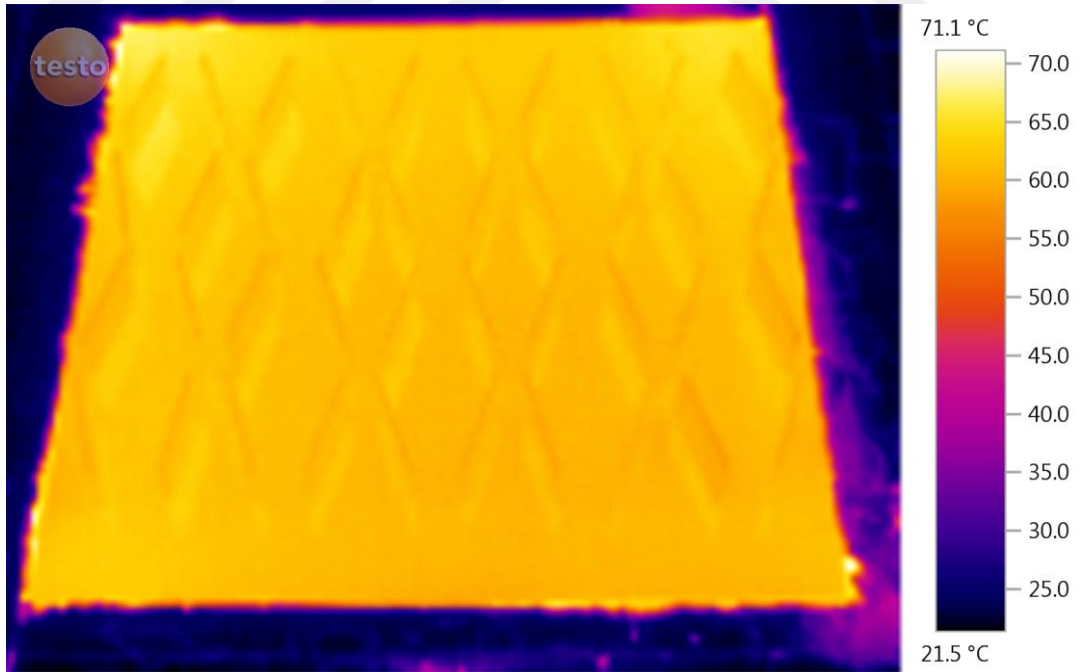
Şekil 4.32. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 15. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



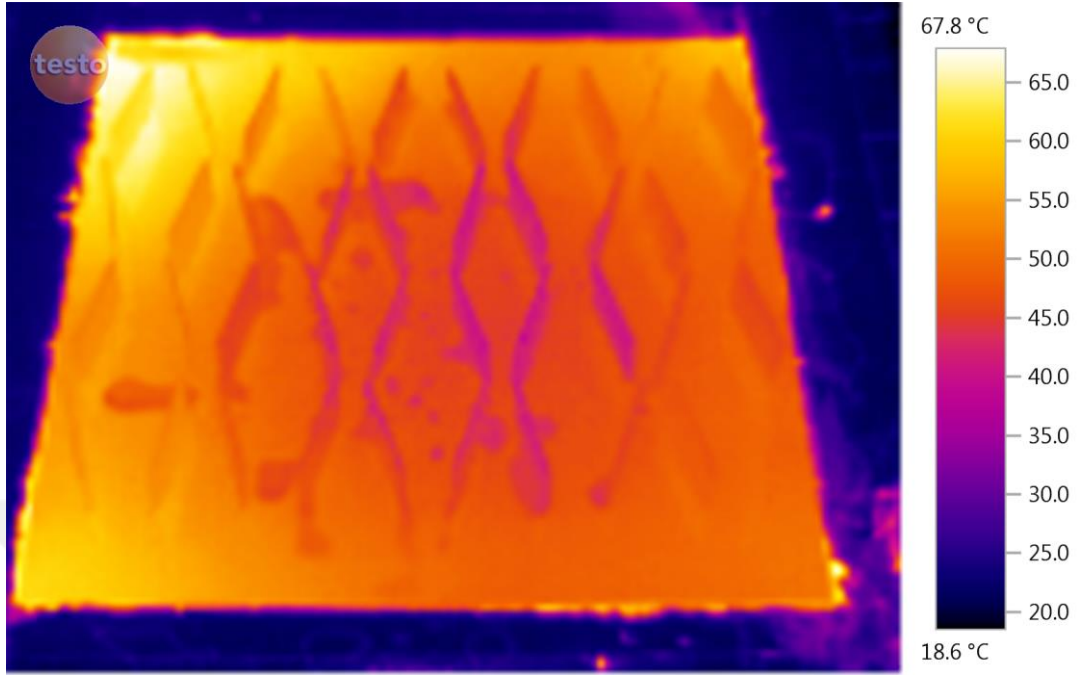
Şekil 4.33. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 16. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



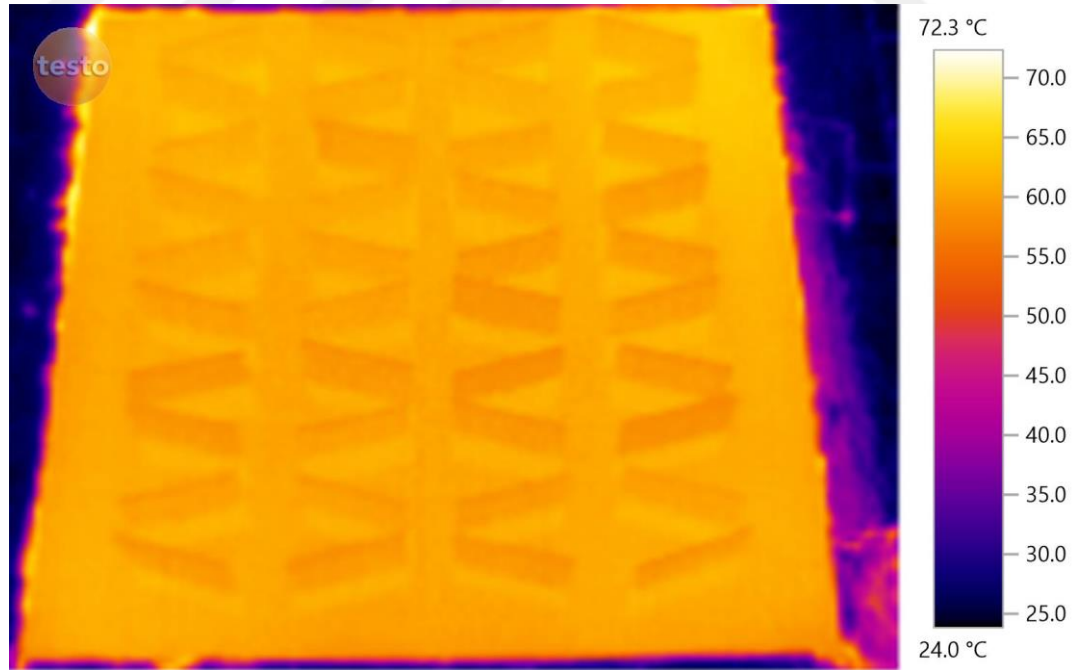
Şekil 4.34. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 16. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



Şekil 4.35. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 17. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

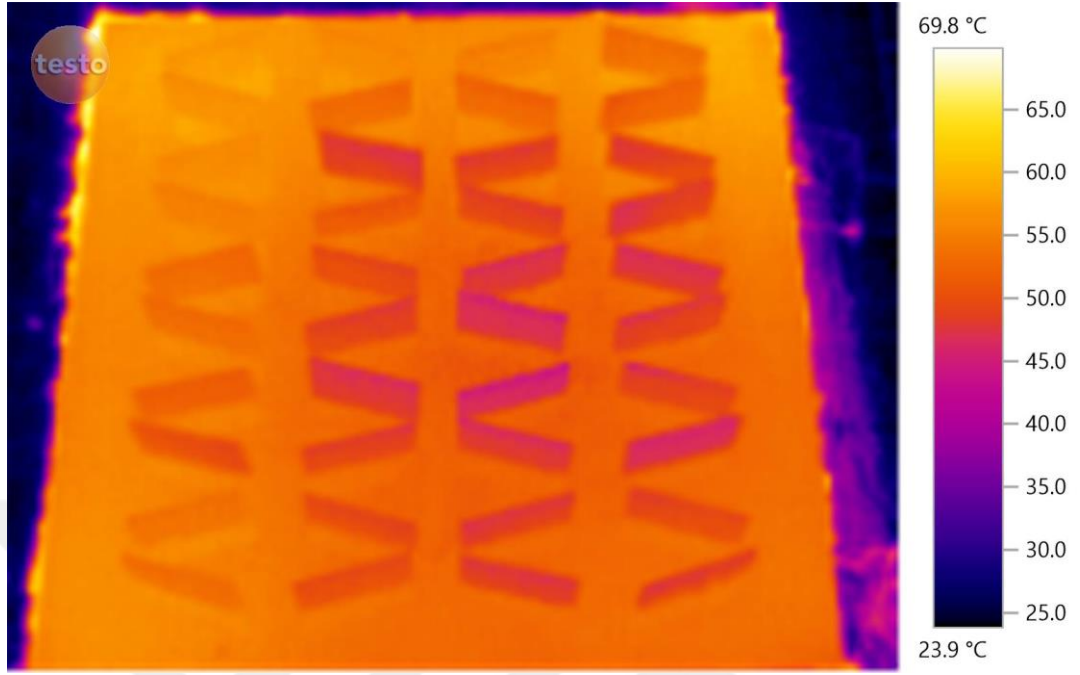


Şekil 4.36. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 17. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)

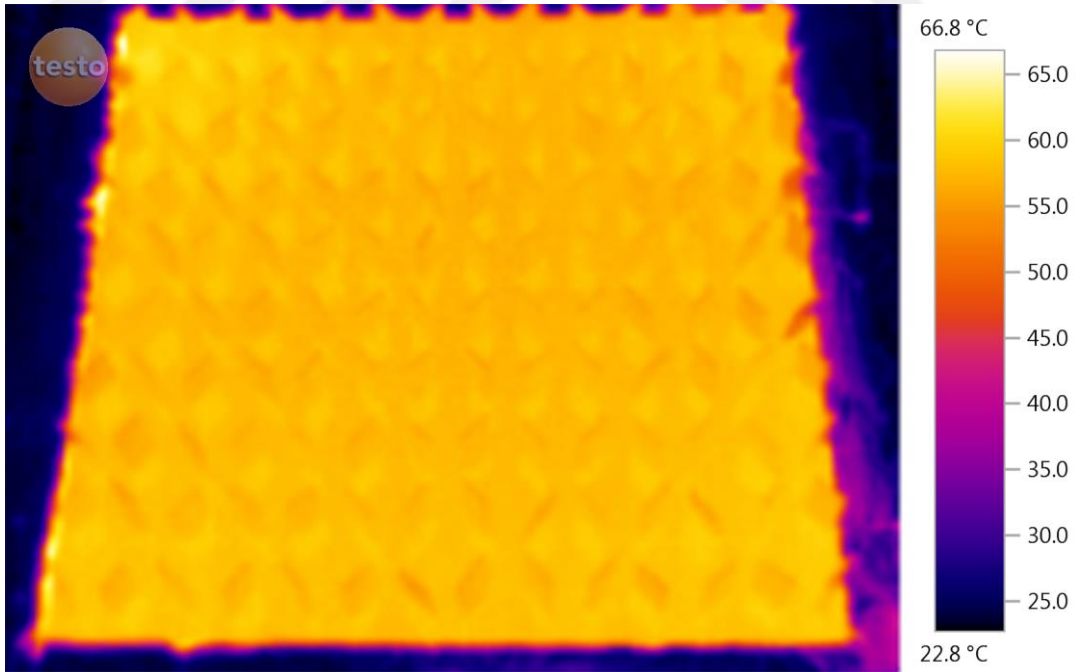


Şekil 4.37. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 18. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

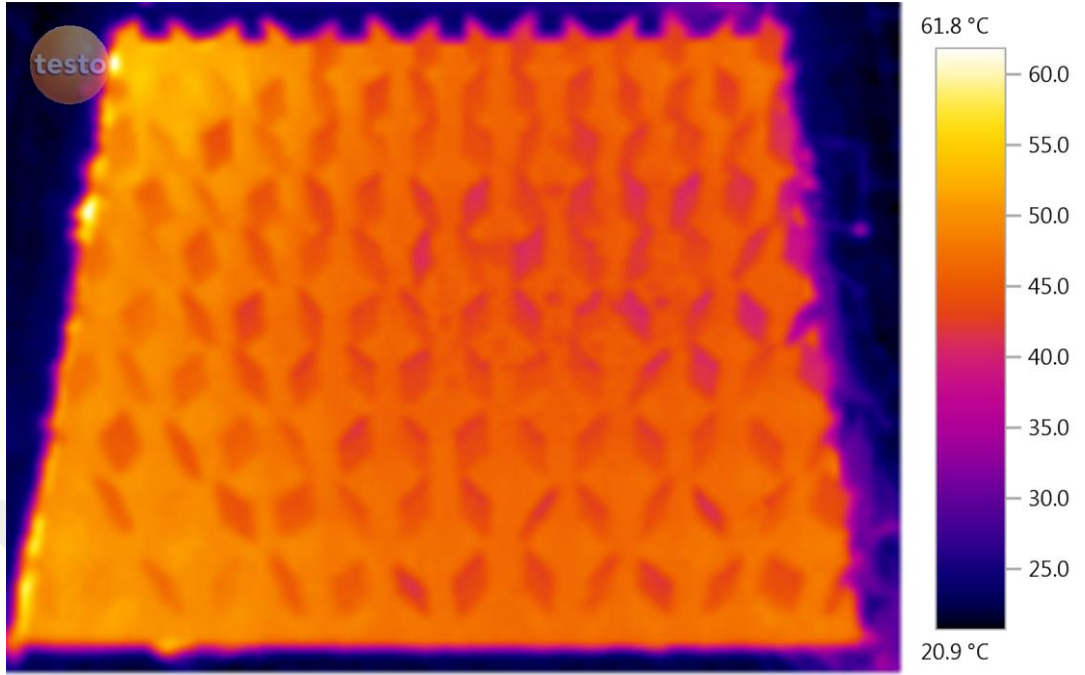




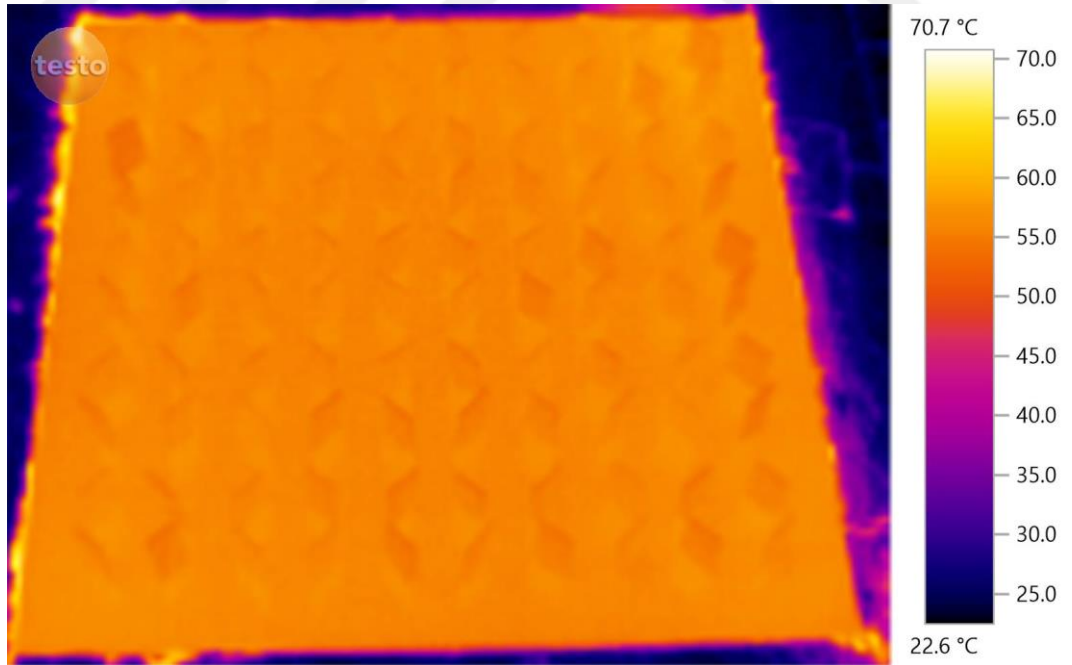
Şekil 4.38. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 18. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



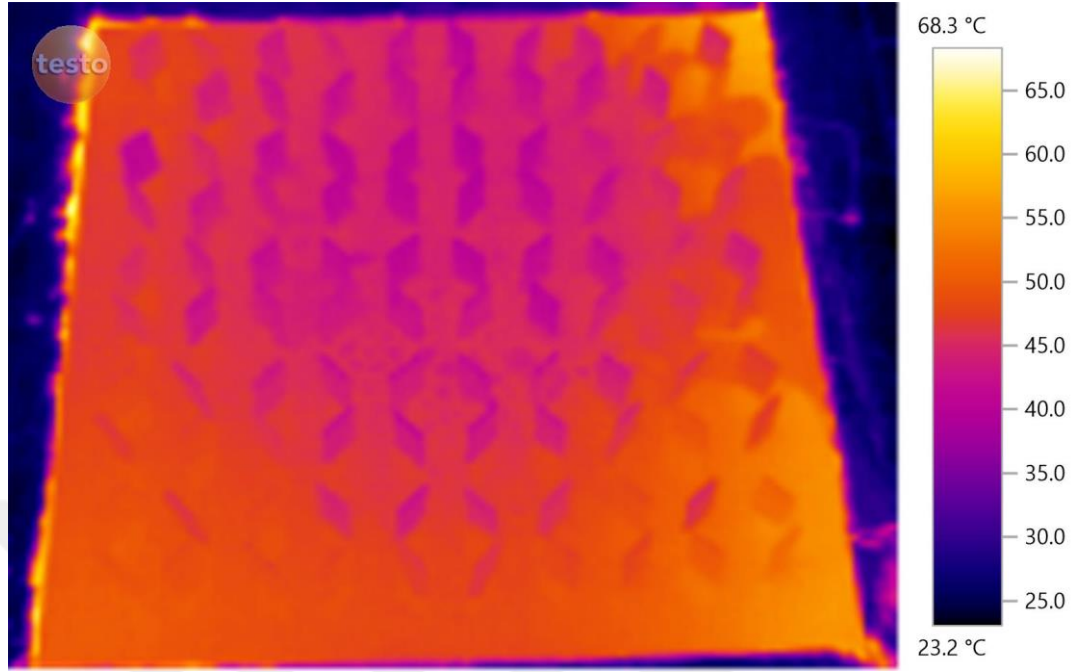
Şekil 4.39. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 19. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



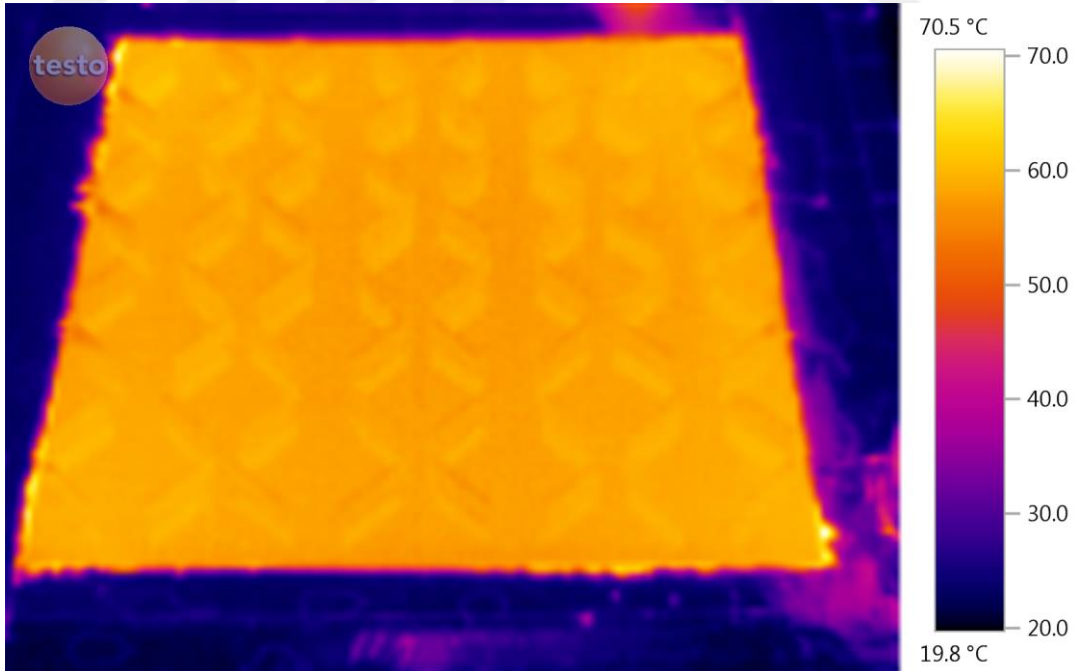
Şekil 4.40. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 19. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



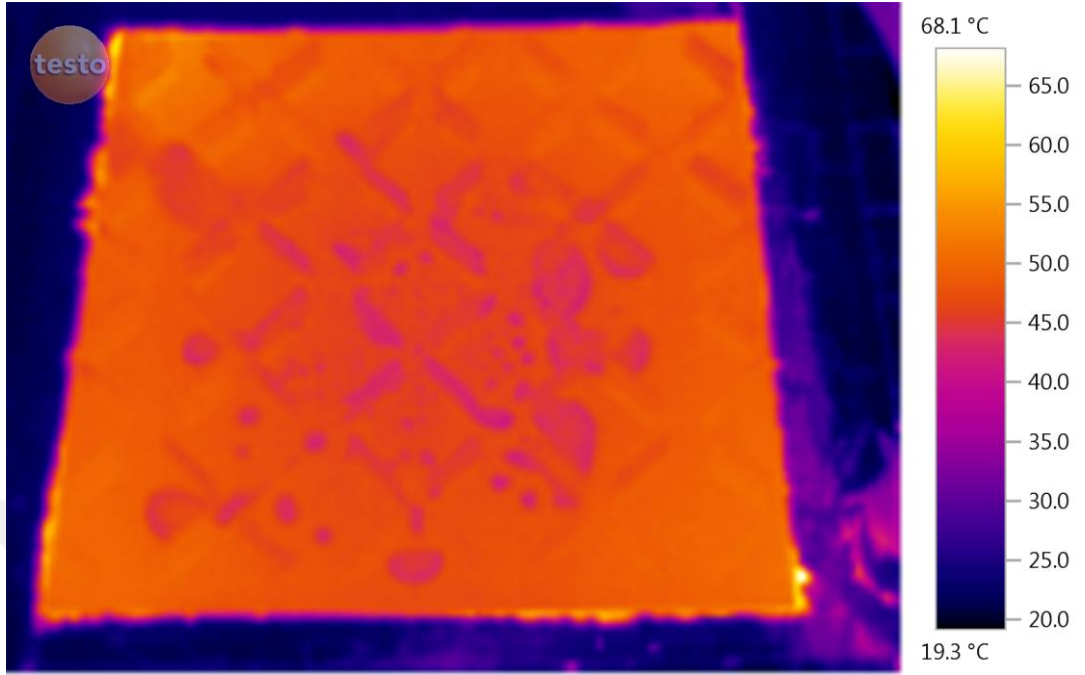
Şekil 4.41. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 20. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



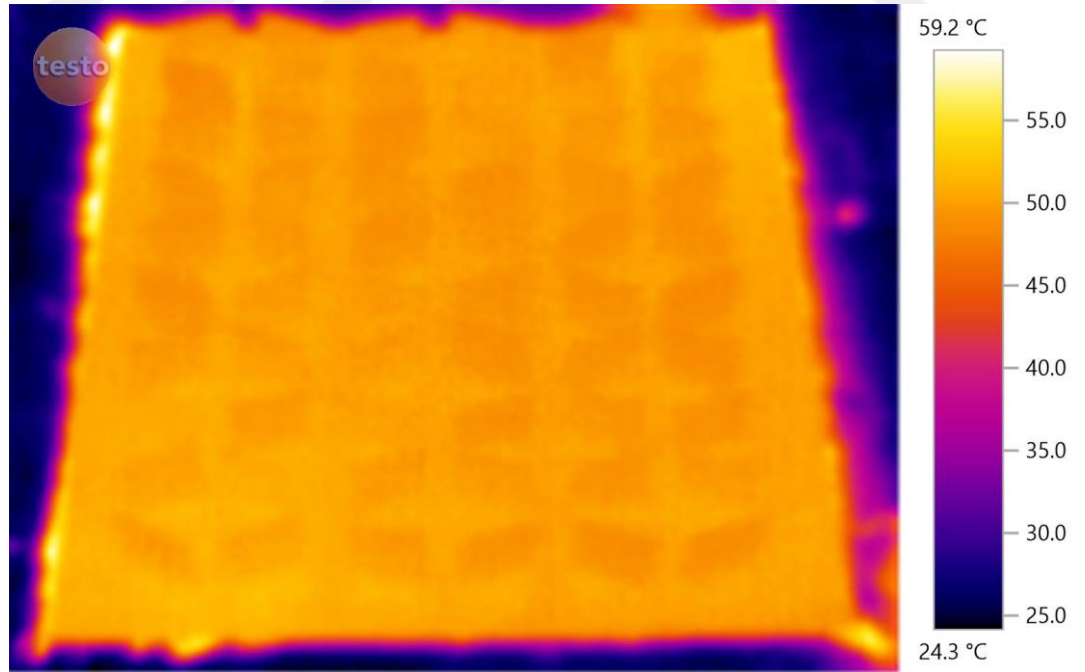
Şekil 4.42. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 20. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



Şekil 4.43. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 21. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

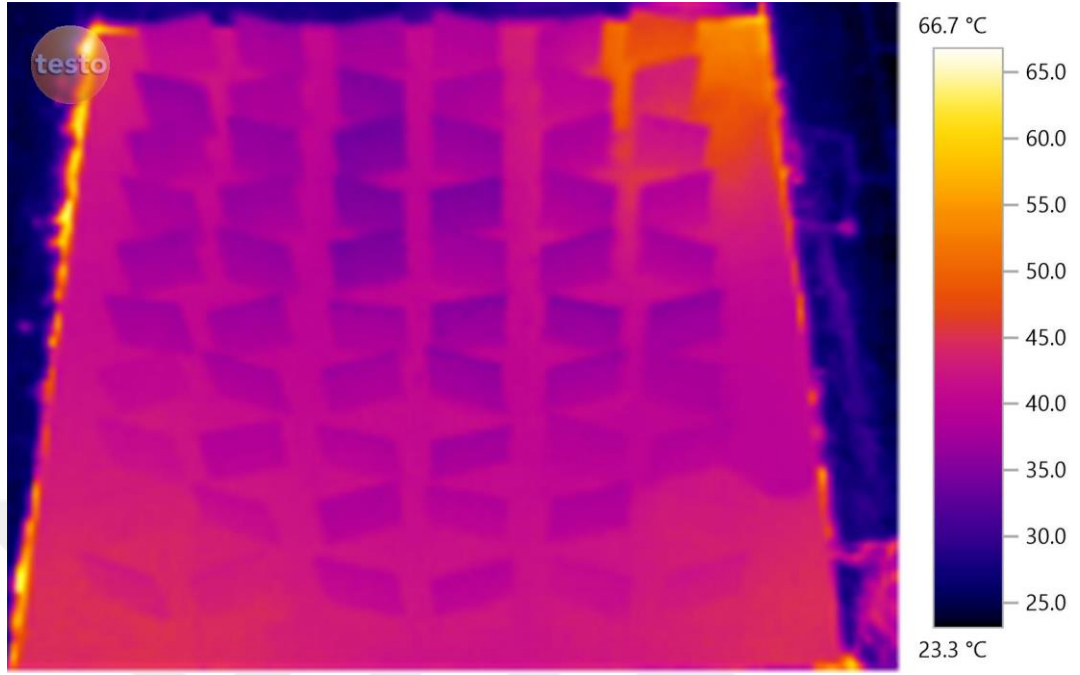


Şekil 4.44. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 21. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)

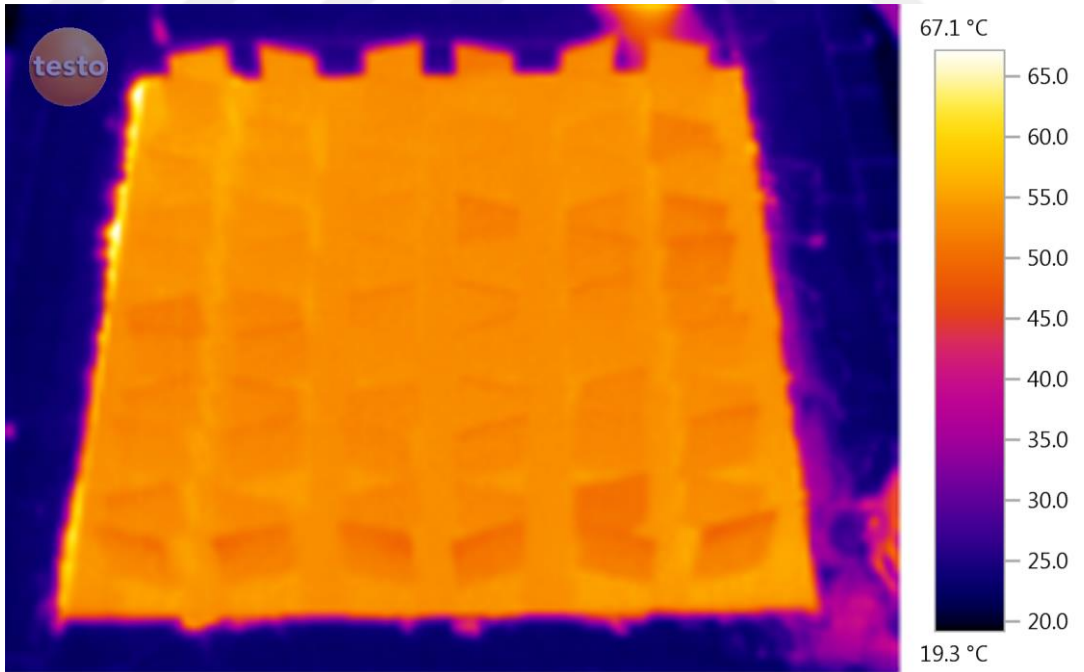


Şekil 4.45. Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 22. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

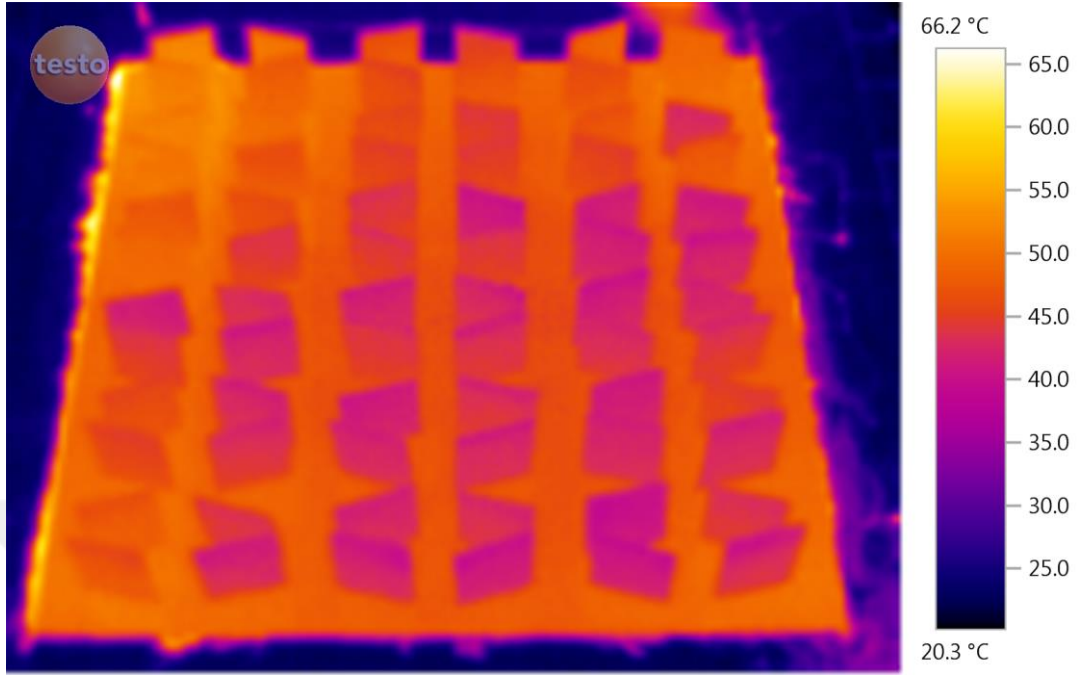




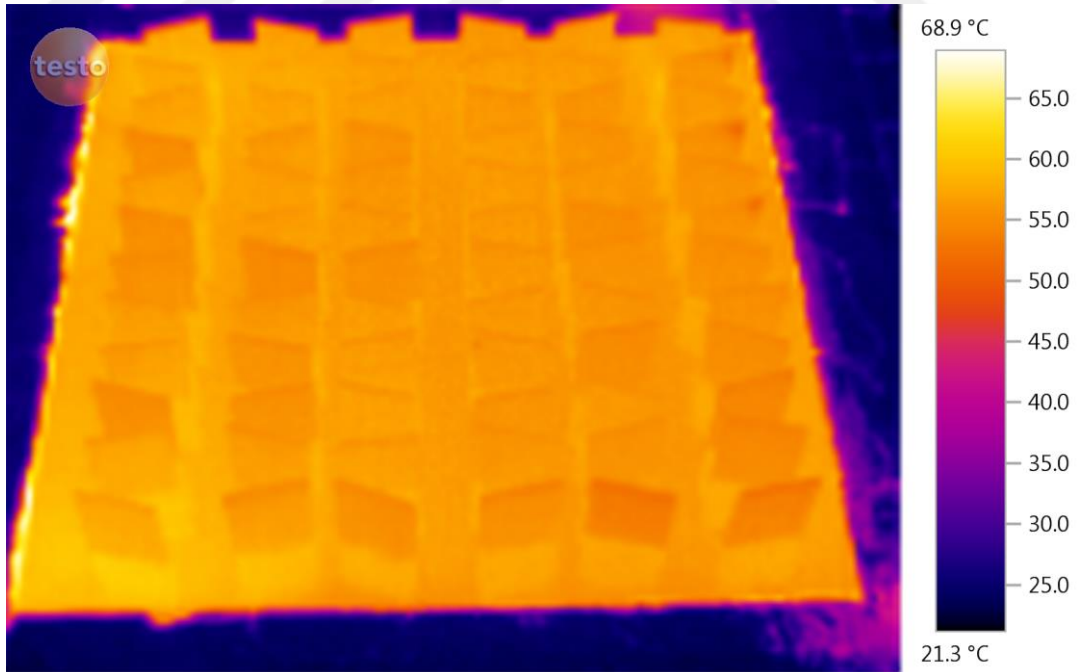
Şekil 4.46. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 22. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



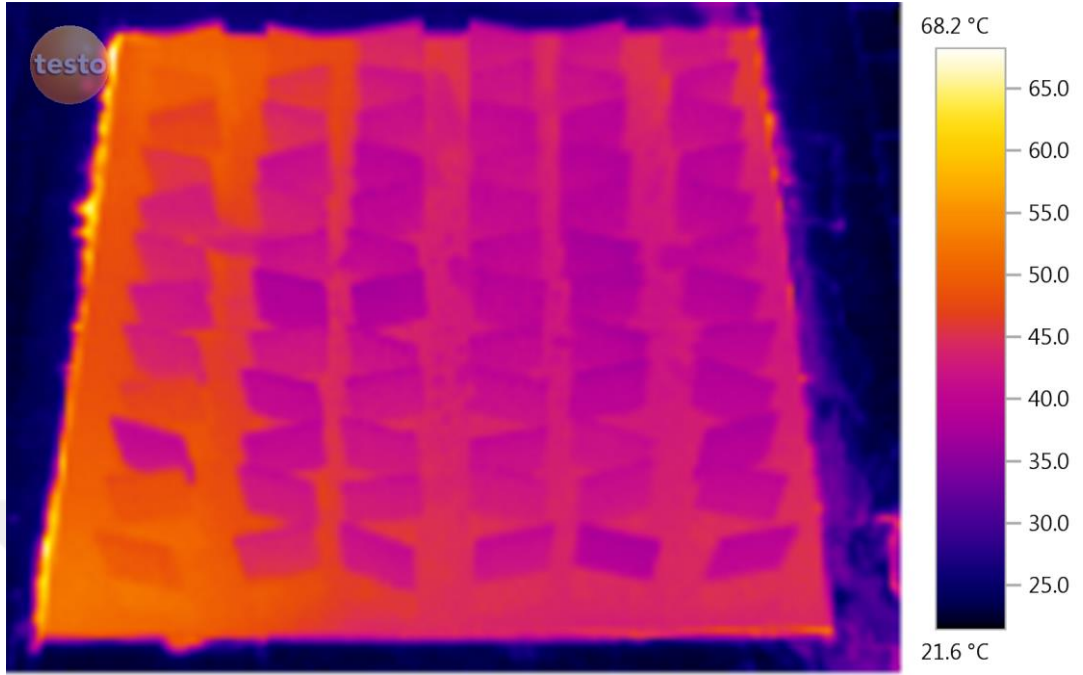
Şekil 4.47. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 23. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



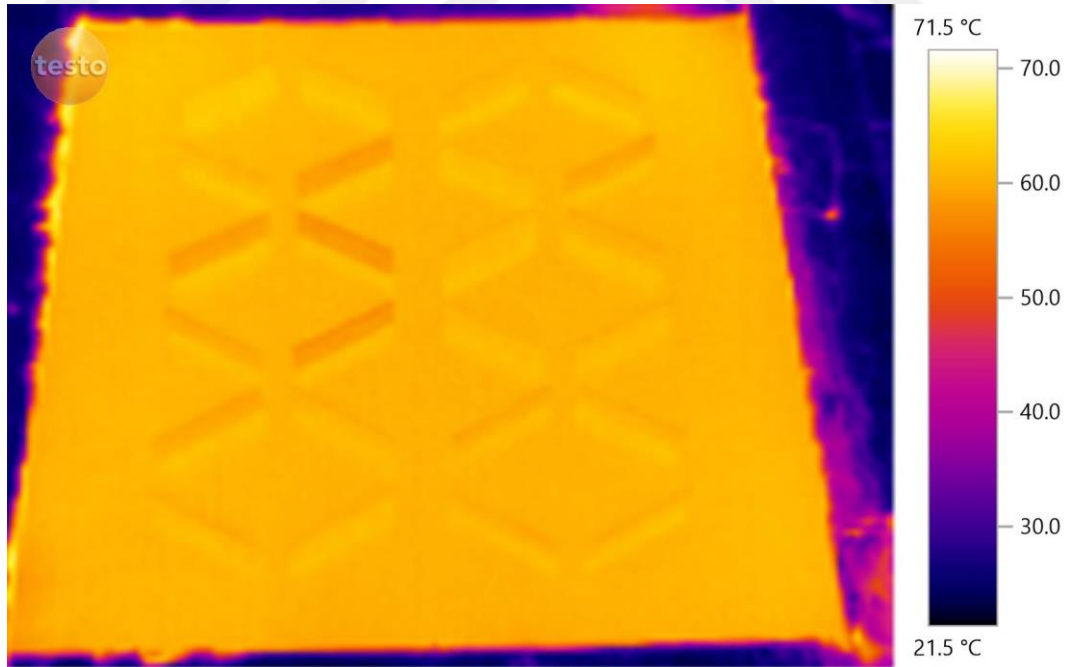
Şekil 4.48. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 23. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



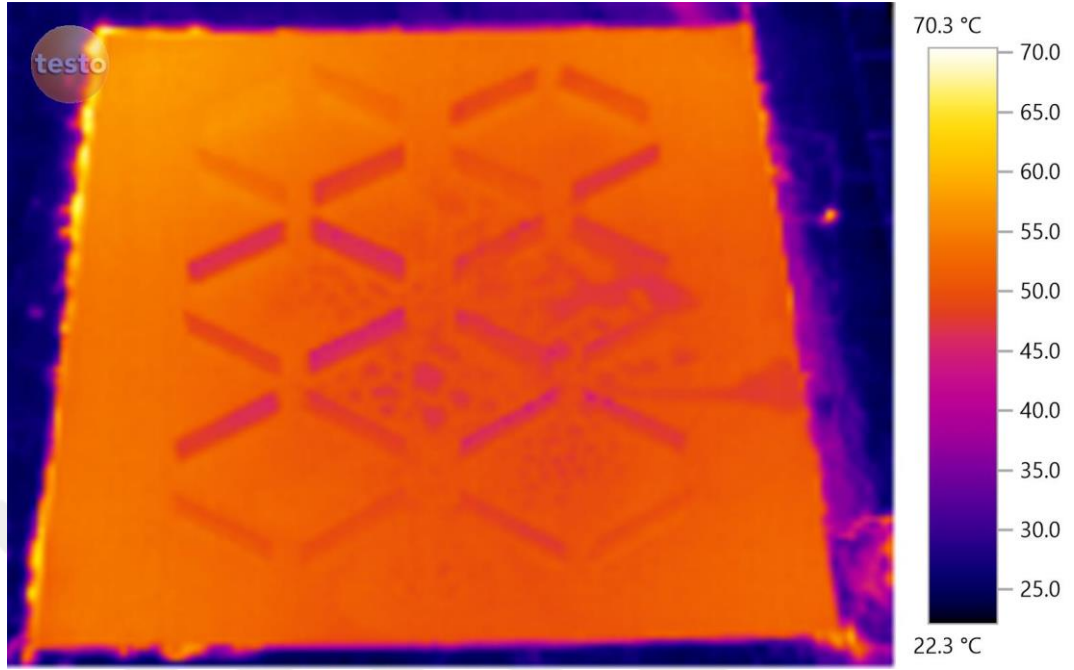
Şekil 4.49. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 24. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



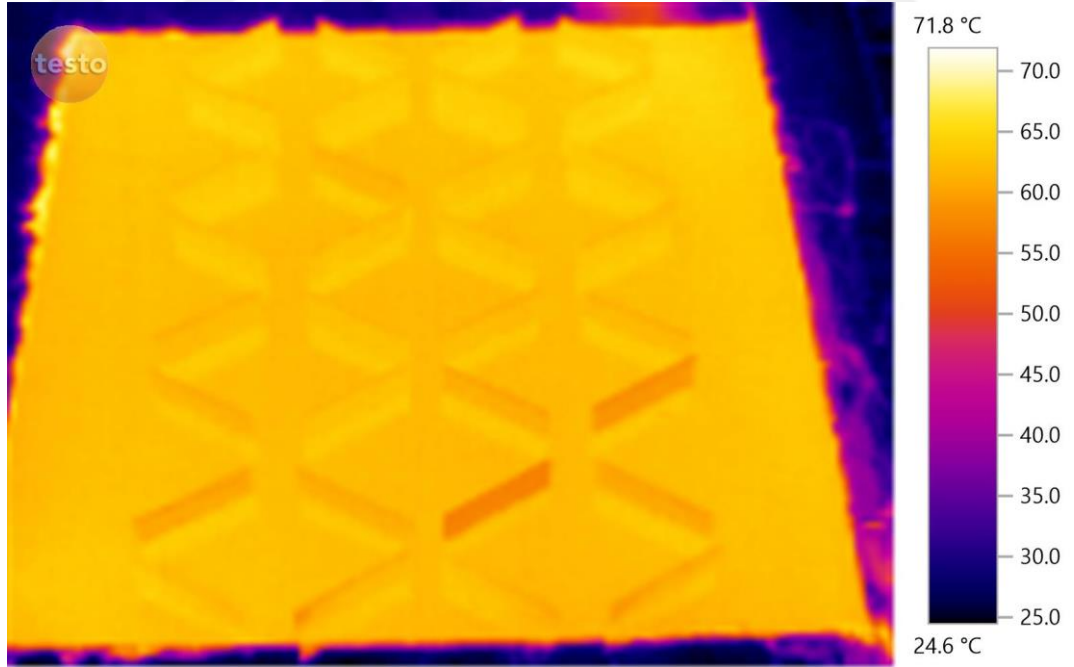
Şekil 4.50. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 24. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



Şekil 4.51. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 25. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

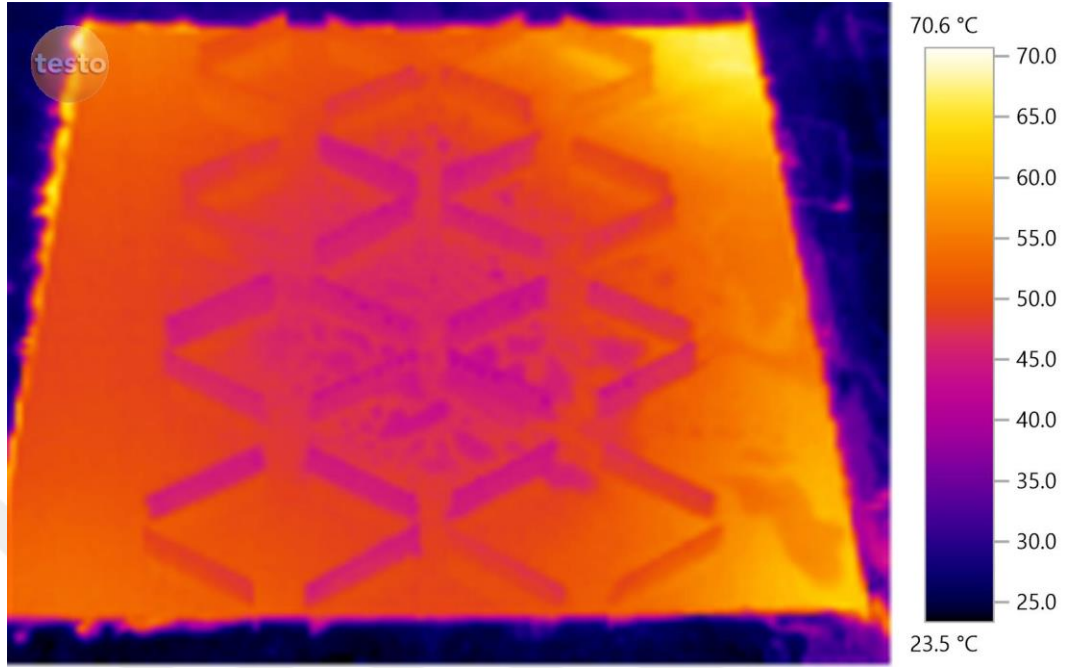


Şekil 4.52. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 25. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)

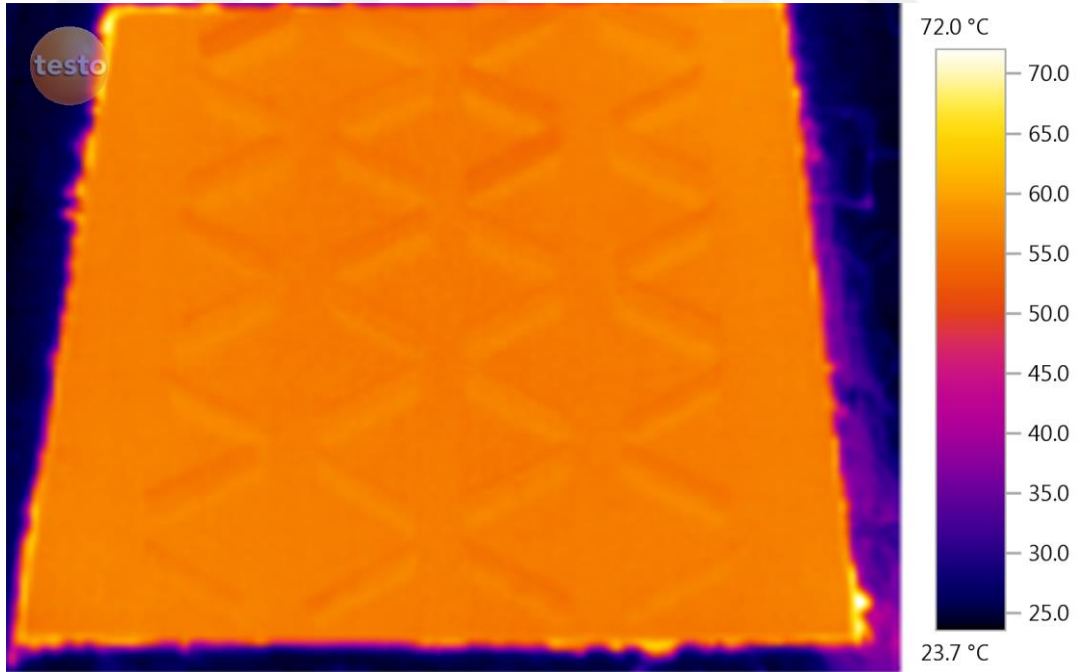


Şekil 4.53. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 26. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)

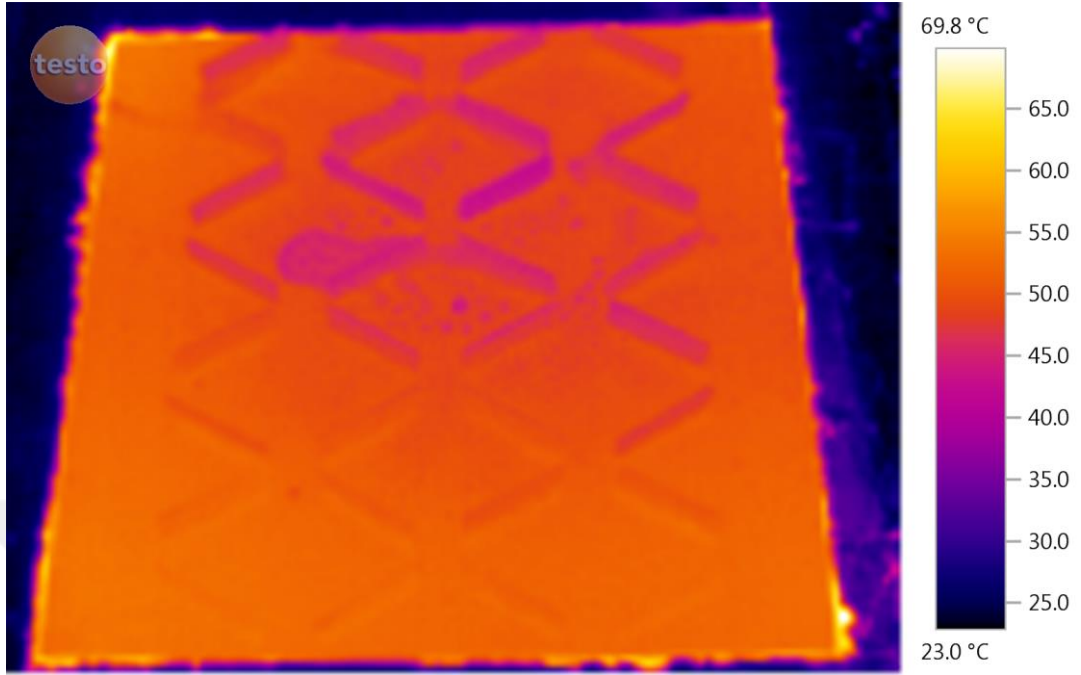




Şekil 4.54. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 26. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)



Şekil 4.55. Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>11</sup>) deney planına göre 27. Deney için termal görüntü (sprey gönderilmeden önce)



**Şekil 4.56.** Taguchi  $L_{27}(3^{11})$  deney planına göre 27. Deney için termal görüntü (sprey gönderildikten sonra)

### 4.3. Taguchi Analizi

Klasik deney tasarım metotlarından tam faktöriyel tasarım ile  $3^{11} = 177147$  adet deney yapmak yerine Taguchi deney tasarımı ile  $L_{27}(3^{11})$  deney planı kullanılarak sadece 27 adet deney numunesi ile 54 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 hesaplanmış ve bir genel optimum bulunmuştur. Nusselt sayıları için “daha büyük daha iyi” performans istatistikleri kullanılmıştır.

Isı geçişi deneylerinden verilerin elde edilmesi ve elde edilen verilerin hesaplarda kullanılması Bölüm 3’te anlatılmıştı. Veriler kullanılarak Nusselt sayısı hesaplanmıştır. Bu büyüklüklere ait sonuçlar analiz edilmiştir. Deneylerden elde edilen verilerle

bulunan Nusselt sayılarının deney planındaki karşılıkları ve Anova tabloları Çizelge 4.4’da verilmiştir. Çizelge 4.5 ve 4.6’da ise Nusselt sayısı için varyans analizi sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Hesaplanan karakteristik büyüklükler ve bunlara ait S/N değerleri

Deney No	Parametreler											Nusselt		S/N oranı
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	1	2	
1	200/1.2	15	15	15	10	10	10	10	2.1	0.012	5	118.91	102.29	40.801
2	200/1.2	15	15	15	15	15	15	15	2.9	0.021	10	136.65	133.16	42.598
3	200/1.2	15	15	15	20	20	20	20	3.6	0.030	15	148.96	150.09	43.494
4	200/1.2	30	30	25	10	10	10	15	2.9	0.021	15	95.13	92.51	39.443
5	200/1.2	30	30	25	15	15	15	20	3.6	0.030	5	147.88	147.88	43.398
6	200/1.2	30	30	25	20	20	20	10	2.1	0.012	10	110.43	118.95	41.173
7	200/1.2	45	45	35	10	10	10	20	3.6	0.030	10	109.84	169.85	42.308
8	200/1.2	45	45	35	15	15	15	10	2.1	0.012	15	64.61	71.30	36.613
9	200/1.2	45	45	35	20	20	20	15	2.9	0.021	5	204.79	131.67	43.897
10	400/1.2	15	30	35	10	15	20	10	2.9	0.030	5	136.04	133.07	42.576
11	400/1.2	15	30	35	15	20	10	15	3.6	0.012	10	113.15	105.36	40.752
12	400/1.2	15	30	35	20	10	15	20	2.1	0.021	15	121.33	78.67	39.403
13	400/1.2	30	45	15	10	15	20	15	3.6	0.012	15	125.12	123.04	41.873
14	400/1.2	30	45	15	15	20	10	20	2.1	0.021	5	186.39	196.69	45.636
15	400/1.2	30	45	15	20	10	15	10	2.9	0.030	10	155.75	143.79	43.488
16	400/1.2	45	15	25	10	15	20	20	2.1	0.021	10	99.42	138.65	41.158
17	400/1.2	45	15	25	15	20	10	10	2.9	0.030	15	97.73	95.77	39.712
18	400/1.2	45	15	25	20	10	15	15	3.6	0.012	5	190.29	178.45	45.300
19	800/1.2	15	45	25	10	20	15	10	3.6	0.021	5	202.09	196.53	45.988
20	800/1.2	15	45	25	15	10	20	15	2.1	0.030	10	156.42	152.17	43.765
21	800/1.2	15	45	25	20	15	10	20	2.9	0.012	15	91.35	87.38	39.017
22	800/1.2	30	15	35	10	20	15	15	2.1	0.030	15	88.16	89.33	38.962
23	800/1.2	30	15	35	15	10	20	20	2.9	0.012	5	152.42	165.79	44.010
24	800/1.2	30	15	35	20	15	10	10	3.6	0.021	10	131.66	129.10	42.303
25	800/1.2	45	30	15	10	20	15	20	2.9	0.012	10	166.94	162.98	44.346
26	800/1.2	45	30	15	15	10	20	10	3.6	0.021	15	163.43	159.33	44.155
27	800/1.2	45	30	15	20	15	10	15	2.1	0.030	5	224.54	234.44	47.209

**Çizelge 4.5.** Parametrelerin Nusselt üzerine katkı yüzdeleri (ANOVA-Mean Analysis)

Source	Pool	DF	S	V	F	S'	rho
A		2	7192.8526	3596.4263	10.6134	6515.1408	7.88
B		2	2986.6157	1493.3079	4.4069	2308.9039	2.79
C		2	1477.8597	738.9299	2.1807	800.1479	0.97
D		2	11741.3166	5870.6583	17.3249	11063.6048	13.38
E		2	2278.5931	1139.2966	3.3622	1600.8813	1.94
F		2	1310.7228	655.3614	1.9340	633.0111	0.77
G		2	978.5608	489.2804	1.4439	300.8490	0.36
H		2	1829.4394	914.7197	2.6994	1151.7277	1.39
I		2	3919.0058	1959.5029	5.7827	3241.2940	3.92
J		2	4306.0093	2153.0046	6.3537	3628.2975	4.39
K		2	34179.7170	17089.8585	50.4340	33502.0052	40.51
L	(e)	2	713.4537	356.7268			
M	(e)	2	3005.3966	1502.6983			
e1							
e2	(e)	27	6785.6823	251.3216			
(e)	UnPool	31	10504.5327	338.8559		17959.3623	21.71
Total	Auto	53	82705.2256	1560.4760			

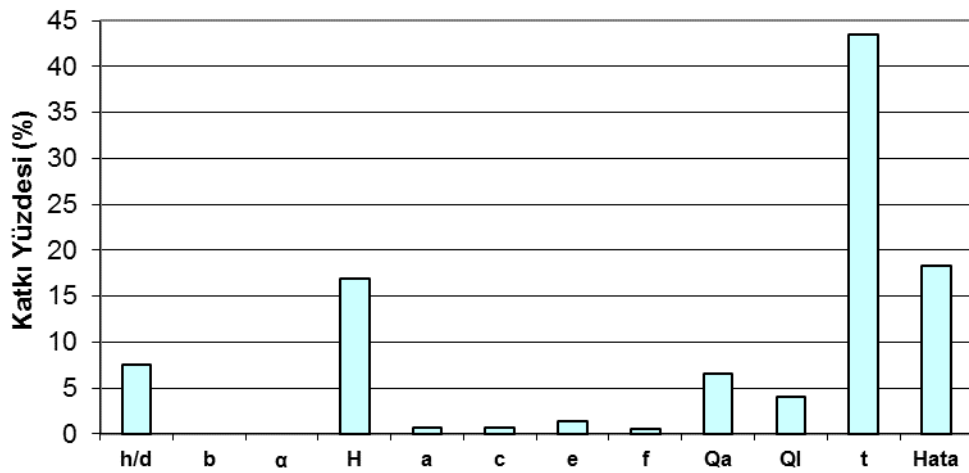
**Çizelge 4.6.** Nusselt için yapılan varyans analizi sonuçları

Değişkenlik kaynağı		Serbestlik derecesi SD <sub>i</sub>	Kareler toplamı SS <sub>i</sub>	Kareler ortalaması MS <sub>i</sub>	Test istatistiği F
A	Nozul-yüzey mesafesinin nozul çapına oranı, h/d	2	14,5238	7,2619	6,3519
B	Kanat genişliği, b	2	2,3251	1,1626	
C	Kanat açısı, $\alpha$	2	1,2958	0,6479	
D	Kanat yüksekliği, H	2	29,6048	14,8024	12,9475
E	Kanatlar arası x doğrultusundaki mesafe, a [mm]	2	3,4430	1,7215	1,5058
F	Kanatlar arası y doğrultusundaki mesafe, c [mm]	2	3,2896	1,6448	1,4387
G	Dilimler arası y doğrultusundaki mesafe, e [mm]	2	4,5972	2,2986	2,0105
H	Dilimler arası x doğrultusundaki mesafe, f [mm]	2	3,1664	1,5832	1,3848
I	Hava debisi, Q <sub>a</sub> [m <sup>3</sup> /h]	2	12,9481	6,4740	5,6628
J	Su debisi, Q <sub>l</sub> [m <sup>3</sup> /h]	2	8,7443	4,3722	3,8243
K	Zaman, (t)	2	72,6828	36,3414	31,7874
Hata		8	9,1461	1,1433	
Toplam		26	162,1462	6,2364	



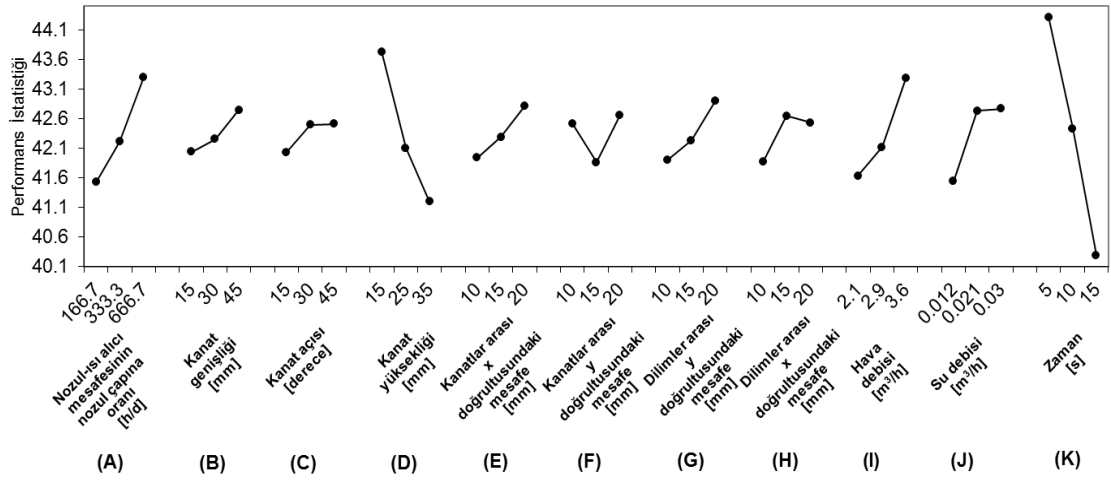
Her bir parametrenin seçilen performans karakteristiğine etkilerinin katkı yüzdeleri Şekil 4.57'de görülmektedir. Katkı yüzdeleri ilgili parametrenin performans istatistiği üzerindeki etkisini göstermektedir ve aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$KY = \frac{\text{Kareler Toplamı} - (\text{Serbestlik Derecesi} * \text{Toplam hata})}{\text{Kareler toplamı}} \quad (4.1)$$



Şekil 4.57. Parametrelerin Nusselt üzerine katkı yüzdeleri

Her parametrenin optimizasyon kriteri üzerine etkisi hesaplanmış ve grafikler Şekil 4.58'de verilmiştir. Grafiklerin sırası parametrelerin performans istatistiğine etki derecesine göre belirlenmiştir. Her grafikteki maksimum noktanın sayısal değeri ilgili parametrenin en iyi değerini, minimum noktanın sayısal değeri ise ilgili parametrenin en kötü değerini göstermektedir. Grafiklerde bütün parametrelere ait maksimum noktalar, o parametrenin yapılan deneysel çalışmada seçilen seviye aralığında en optimum seviyesini göstermektedir.



**Şekil 4.58.** Parametrelerin Nusselt sayısı üzerine etkileri

Yukarıda verilen varyans analiz tabloları ve performans istatistiği grafiklerine göre optimum çalışma şartları Çizelge 4.7'deki gibi belirlenmiştir. Optimum çalışma şartları belirlenirken sonuç değişkeni üzerine parametrelerin etkinlikleri (katkı yüzdeleri) de dikkate alınmıştır. Çalışmanın özelliğine bağlı olarak öncelik amacına göre ısı geçişi miktarının maksimum yapılması söz konusu olmuştur. Bu amaca yönelik, öncelik sırası da göz önünde bulundurularak tüm parametreler birlikte değerlendirilmiş ve belirlenen optimum şartlar yine Çizelge 4.7'de “**Genel**” başlığı altında verilmiştir. Literatür araştırıldığında yüzeydeki sıcaklık gradyeninin bir ölçüsü olan Nusselt sayısının değişik parametrelere göre sunulmakta olduğu görülebilir. Çalışmada değişik kanat geometrilerinin söz konusu olduğu zorlanmış taşınım akış problemlerinde Nusselt sayısı hesaplanmış ve optimizasyon yapılmıştır.

Optimum şartlara karşılık gelen kombinasyonların performans değerleri Eşitlik 3.3 yardımıyla tahmin edilmiş ve Çizelge 4.7'de “**Tahmin**” sütununda verilmiştir. Bu tahminlerin %5 hata düzeyindeki güven aralıkları da hesaplanmış ve yine Çizelge 4.7'de “**Güven Aralığı**” sütununda verilmiştir. Ayrıca bu tahminlerin doğruluğunu test edebilmek için belirlenen optimum şartlarında doğrulama deneyleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.7'de “**Deneysel**” sütununda verilmiştir. Doğrulama deneylerinde

elde edilen performans değerleri hesaplanan güven aralığı içinde olduğu için deneysel sonuçların %5 hata seviyesinde kabul edilebilir olduğu söylenebilir.

**Çizelge 4.7.** Nusselt sayısına göre yapılan optimizasyon ve optimum değerler

		Parametreler										Performans Değeri				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Nusselt Sayısı			
		h/d	b	$\alpha$	H	a	c	e	f	$Q_{air}$	$Q_{liq}$	T	Tahmin	Güven Aralığı	Gerçek	
Nusselt Sayısı	Optimum seviye	3 <sup>•</sup>	3 <sup>□</sup>	3 <sup>♦</sup>	1 <sup>+</sup>	3 <sup>◊</sup>	3 <sup>▲</sup>	3 <sup>■</sup>	2 <sup>⊙</sup>	3 <sup>△</sup>	2 <sup>°</sup>	1 <sup>*</sup>	347.4517	304.8301	-	332.9729
	Optimum Değer	667	45	45	15	20	20	20	15	3.6	0.021	5		390.0733		

\*: 1. derecede etkin    +: 2. derecede etkin    •: 3. derecede etkin    °: 4. derecede etkin    △: 5. derecede etkin  
□: 6. derecede etkin    ◊: 7. derecede etkin    ⊙: 8. derecede etkin    ⊙: 9. Derecede etkin    ▲: 10. Derecede etkin  
■: 11. derecede etkin

Nusselt sayısına parametrelerin etkisi sırasıyla spreyleme zamanı (t), kanat yüksekliği (H), nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı (h/d), su debisi ( $Q_l$ ), hava debisi ( $Q_a$ ), kanat genişliği (b), kanatlar arası x doğrultusundaki mesafe (a), dilimler arası x doğrultusundaki mesafe (f), kanat açısı ( $\alpha$ ), kanatlar arası y doğrultusundaki mesafe (c) ve dilimler arası y doğrultusundaki mesafedir (e).

Şekil 4.57'den de görülebileceği gibi Nusselt sayısı üzerinde en etkili parametrenin spreyleme zamanı olduğu tespit edilmiştir. Yüzey geometrisine bağlı olarak 234.4 ile Nusselt sayısının en yüksek değeri spreyleme zamanının 5 s olduğu durumda hesaplanmıştır. Nusselt sayısı hesaplamaları yapılırken ortalama taşınım katsayısı toplam kanatçıklı yüzey alanına göre belirlenmiştir.

Nusselt sayısı üzerine ikinci etkili parametrenin kanat yüksekliği olduğu belirlenmiştir. Kanat yüksekliğinin 15 mm olduğu durumda yüzey geometrisine bağlı olarak 234.4 ile Nusselt sayısının en yüksek değeri hesaplanmıştır. Nusselt sayısı hesaplamaları yapılırken ortalama ısı taşınım katsayısı toplam ısı geçişi alanına göre belirlenmiştir. Eşitlikte kanatlardan gelen ısı geçişi yüzey alanı da dikkate alındığı ve kanat yüksekliğinin artması durumunda ısı geçişi alanı da artacağı için ısı taşınım katsayısı da azalmıştır.

Nusselt sayısına etki eden üçüncü parametre nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı ( $h/d$ ) olmuştur. ( $h/d$ ) oranının maksimum olduğu noktada (667), yüzey geometrisine bağlı olarak Nusselt sayısının 234.4 ile en yüksek değeri hesaplanmıştır.

Nusselt sayısına etki eden dördüncü ve beşinci parametreler sırasıyla su debisi ( $Q_1$ ) ve hava debisidir ( $Q_a$ ). Hava debisi atomizasyon ve damlacık çap dağılımı açısından önem arz etmektedir. Hava debisinin artmasıyla daha homojen ve etkin bir soğutma meydana gelmektedir. 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 artış damlacık yoğunluğundan kaynaklanan taşınım ile ısı transferinin iyileşmesinden kaynaklanmaktadır.

Hava ve su debilerinin ardından Nusselt sayısını etkileyen parametre kanatlar arası  $x$  doğrultusundaki mesafedir. Tüm kesit alanı dikkate alındığında, akış birinci sırada lüle-difüzör, difüzör-lüle yapısını çıktıktan sonra ikinci sıradaki aynı yapıya girmeden önce bir mesafeye ihtiyaç duymaktadır. Mesafenin 20 mm olması durumunda Nusselt sayısı artmıştır. Yine dilimler arası  $x$  doğrultusundaki mesafe diğer geometrik uzaklıklar arasında etkisi olduğu görülebilen mesafedir. Bu mesafenin 15 mm olduğu durum en optimum değeri sağlamaktadır. Sprej soğutma uygulamalı bu tür sistemlerde akışkan baklava dilimi şeklinde düzenlenmiş kanatlarda lüle-difüzör yapı arasında sürekli basınç farkları olacaktır. Akışkan her zaman alçak basıncın olduğu noktaları tercih edeceği için kanatlar arası mesafenin büyük olması doğaldır.

Dilimler arası  $y$  doğrultusundaki mesafenin ( $e$ ) büyümesi ile ısı geçişi miktarı da artmaktadır. Isı geçişi çalışmalarında dilimler arası  $y$  doğrultusundaki mesafe önemli bir parametredir. Bu çalışmada ısı geçişine etki ettiği düşünülerek seçilen on bir parametre ve bu parametrelerin seviyeleri dilimler arası  $y$  doğrultusundaki mesafenin seçilen değerinden daha etkili olmuştur. Bu nedenle etkisi en az olan parametre dilimler arası  $y$  doğrultusundaki mesafe olarak gözükmektedir.

Varyans analizleri yapılırken test istatistiği (F) ve katkı yüzdesi (rho) çok düşük olan parametreler ile deney planında kullanılmayan 12. ve 13. Parametreler deneysel hatanın hesaplanmasında kullanılmıştır. Örneğin Çizelge 4.5’de 12. ve 13. Parametreler; Çizelge 4.6’da kanat genişliği (b) ve kanat açısı ( $\alpha$ ) katkı yüzdesi çok düşük olduğu için hata terimi içerisine katılmış, böylelikle hata teriminin serbestlik derecesi 8’e yükselmiştir.

#### 4.4. Nusselt Korelasyonu

Dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılar için yapılan Taguchi analizine göre Nusselt sayısına parametrelerin etkisi sırasıyla spreyleme zamanı (t), kanat yüksekliği (H), nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı (h/d), su debisi ( $Q_l$ ), hava debisi ( $Q_a$ ), kanat genişliği (b) olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak spreyn homojenliğini ve damlacık boyutunu etkileyen hava-sıvı debi oranı (ALR) için 6 farklı değer, spreyleme zamanı (t), kanat yüksekliği (H), nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı (h/d) ve kanat genişliği (b) içinse 3 farklı değer belirlenmiştir. Korelasyondaki a, c, e, f ve  $\alpha$  değerleri içinse Taguchi ile elde edilen optimum değerler ısı alıcı uzunluğuna oranlanarak boyutsuzlaştırılmış ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Toplam 72 deney sonucunda nonlinear regresyon analizi yapılarak Nusselt korelasyonu elde edilmiştir. Şekil 4.59’da spreyleme zamanının, Şekil 4.60’da kanat yüksekliğinin, Şekil 4.61’de kanat genişliğinin, Şekil 4.62’de ise h/d mesafesinin ALR’ye bağlı olarak Nu sayısı üzerine etkisi gösterilmiştir.

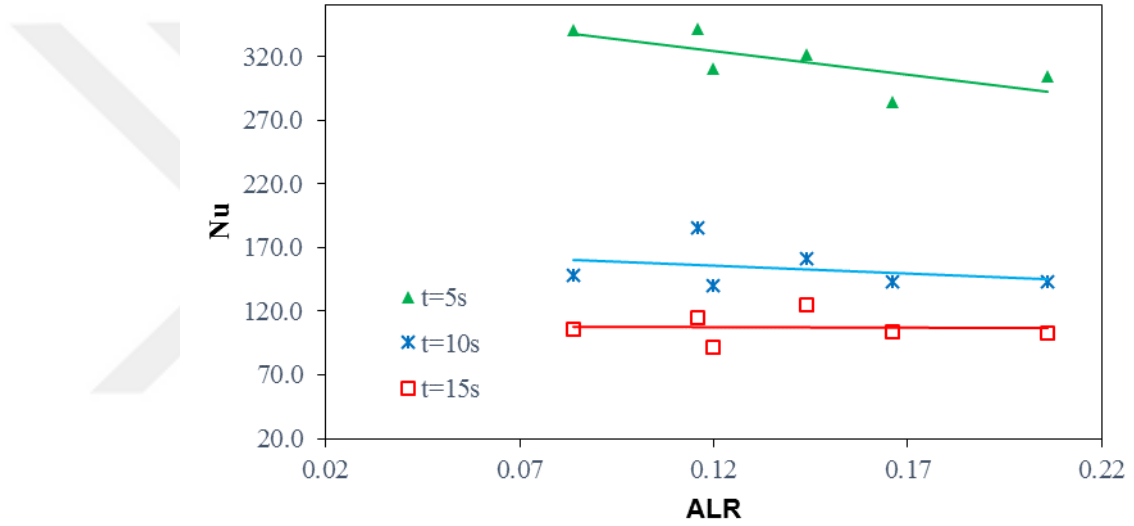
Dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılarda Taguchi ile bulduğumuz optimum ısı alıcı geometrisinde belirlenen şartlar için yapılan deneyler sonucunda Nusselt korelasyonu  $R=0.9735$  değerinde aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Nu = 1,761 \left(\frac{h}{d}\right)^{0,423} \left(\frac{b}{l}\right)^{0,524} \left(\frac{\alpha}{\alpha_{ref}}\right)^{-65,1} \left(\frac{H}{l}\right)^{-0,62}$$

$\downarrow$

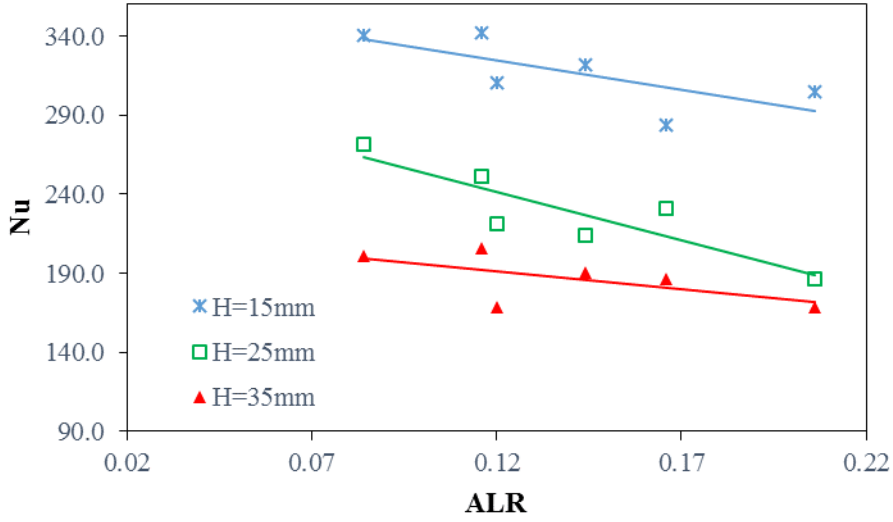
$$(devam) \left(\frac{a}{l}\right)^{-3,05} \left(\frac{c}{l}\right)^{-3,04} \left(\frac{e}{l}\right)^{-3,04} \left(\frac{f}{l}\right)^{-16,8} (ALR)^{-0,161} \left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^{-1,01} \quad (4.2)$$

Taguchi deney tasarımı ile bulunan optimum ısıyalıcıda korelasyon için yapılan deneylere göre ALR-Nusselt değişimleri; spreyleme zamanı (t), kanat yüksekliği (H), nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranına (h/d) ve kanat genişliğine (b) göre çizilmiştir.



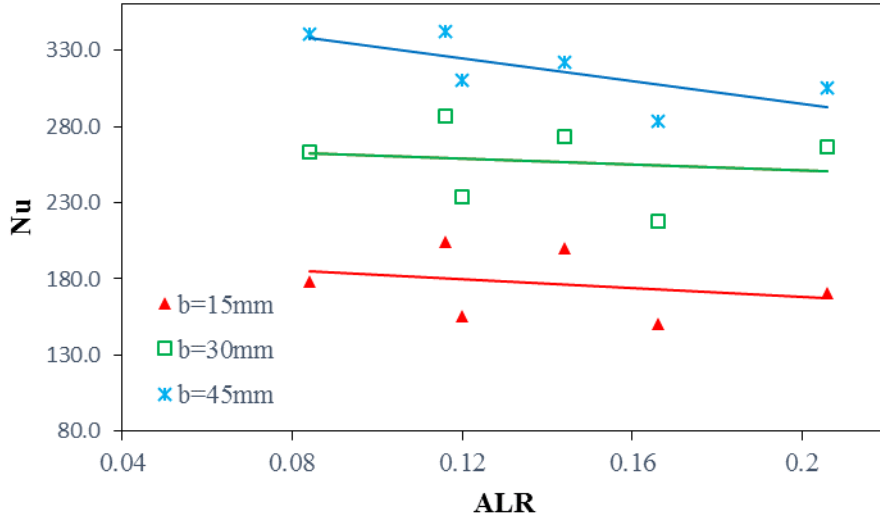
**Şekil 4.59.** Spreyleme zamanının Nusselt sayısı üzerine etkileri

Şekil 4.59'da spreyleme zamanına bağlı olarak ALR-Nusselt değişimi verilmiştir. En yüksek Nusselt değerleri 5 s spreyleme süresi için bulunmuştur. Nusselt sayısı ALR ile azalma eğilimindedir. Her bir spreyleme zamanına ait belirlenen altı farklı ALR değerinin en yüksek ve en düşük değerlerine karşılık gelen Nusselt sayıları incelendiğinde 5s spreyleme süresi için %10.46, 10s spreyleme süresi için %3.45 ve 15s spreyleme süresi için %2.92 azalma tespit edilmiştir. Spreyleme zamanlarına ait ALR değerlerine karşılık gelen maksimum Nusselt sayıları karşılaştırıldığında 5s-10s aralığında %56.56, 10s-15s aralığında %28.26, 5s-15s aralığında ise %68.84 değerinde azalma gözlenmiştir.



**Şekil 4.60.** Kanat yüksekliğinin Nusselt sayısı üzerine etkileri

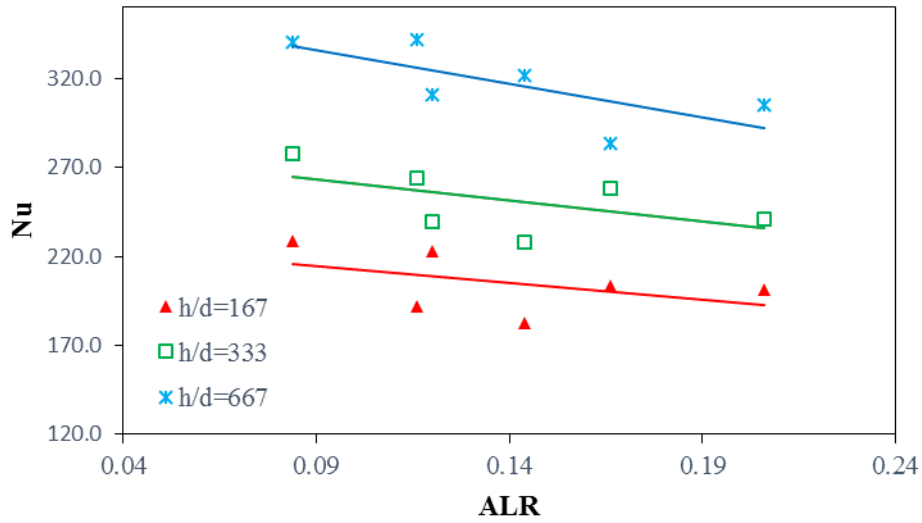
Şekil 4.60'da ALR-Nusselt değişimi kanat yüksekliğine göre çizilmiştir. En yüksek Nusselt değerleri 15 mm kanat yüksekliğinde bulunmuştur. Kanat yüksekliği arttıkça belirlenen ALR değerleri için Nusselt sayısı azalmıştır. Her bir kanat yüksekliğine ait belirlenen altı farklı ALR değerinin en yüksek ve en düşük değerlerine karşılık gelen Nusselt sayıları incelendiğinde 15 mm kanat yüksekliği için %10.46, 25 mm kanat yüksekliği için %31.41 ve 35 mm kanat yüksekliği için %16.24 azalma tespit edilmiştir. Kanat yüksekliklerine ait ALR değerlerine karşılık gelen maksimum Nusselt sayıları karşılaştırıldığında 15 mm-25 mm aralığında %20.15, 25 mm-35 mm aralığında %25.96, 15 mm-35 mm aralığında ise %40.88 değerinde azalma gözlenmiştir.



**Şekil 4.61.** Kanat genişliğinin Nusselt sayısı üzerine etkileri

Şekil 4.61’de ALR- Nusselt değişimi kanat genişliğine göre sunulmuştur. Nusselt sayısının en yüksek değerleri 45 mm kanat genişliği için bulunmuştur. ALR arttıkça Nu sayısının bütün kanat genişliklerinde azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Kanat genişliği azaldıkça Nusselt sayısı azalmaktadır. Her bir kanat genişliğine ait belirlenen altı farklı ALR değerinin en yüksek ve en düşük değerlerine karşılık gelen Nusselt sayıları incelendiğinde 45 mm kanat genişliği için %10.46, 30 mm kanat genişliği için %6.12 ve 15 mm kanat genişliği için %4.53 azalma tespit edilmiştir. Kanat genişliklerine ait ALR değerlerine karşılık gelen maksimum Nusselt sayıları karşılaştırıldığında 30 mm-45 mm aralığında %22.79, 15 mm-30 mm aralığında %32.06, 15 mm-45 mm aralığında ise %47.55 değerinde azalma gözlenmiştir.





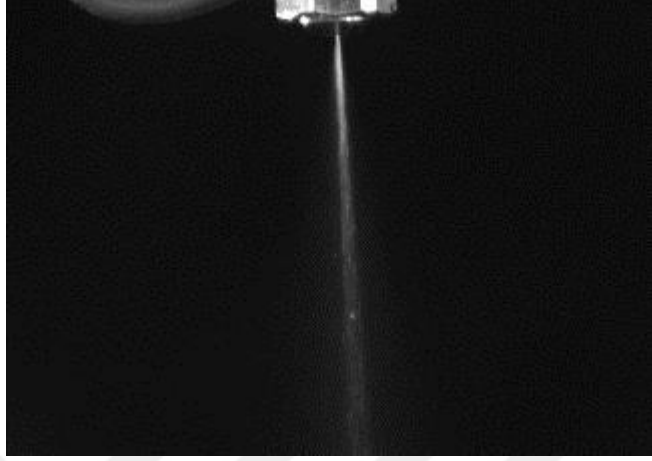
**Şekil 4.62.** h/d mesafesinin Nusselt sayısı üzerine etkileri

Şekil 4.62’de nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranına bağlı olarak ALR-Nusselt değişimi verilmiştir. Nusselt sayısının en yüksek değerleri nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranının (h/d=667) olduğu durumda hesaplanmıştır. Nusselt sayısı ALR ile azalma eğilimindedir. (h/d) oranı arttıkça Nusselt sayısı artmaktadır. Her bir (h/d) oranı için belirlenen altı farklı ALR değerinin en yüksek ve en düşük değerlerine karşılık gelen Nusselt sayıları incelendiğinde (h/d) oranının (667) olduğu durumda %10.46, (333) olduğu durumda %13.28 ve (167) olduğu durumda %11.97 azalma tespit edilmiştir. (h/d) oranlarına ait ALR değerlerine karşılık gelen maksimum Nusselt sayıları karşılaştırıldığında (333-667) aralığında %18.41, (167-333) aralığında %17.60, (167-667) aralığında ise %32.77 değerinde azalma gözlenmiştir.

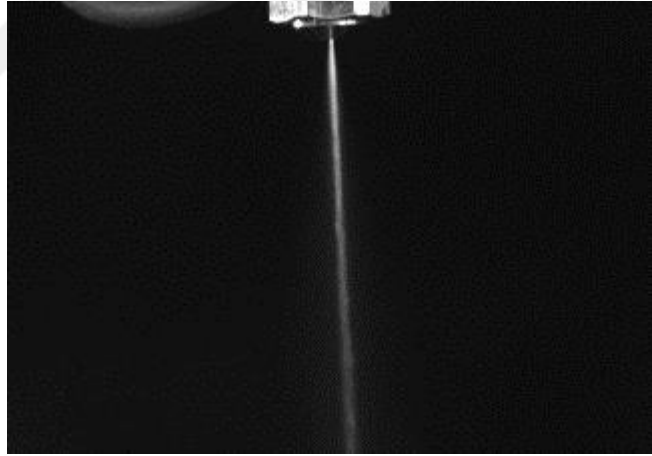
#### 4.5. Sprey Görüntüleri ve Akış Analizi

Sprey görüntüleri 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 4.10’da verilmiştir.

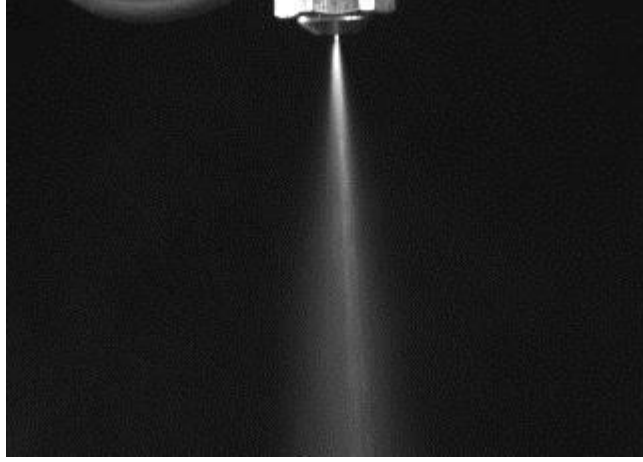
DXD-HS1 hava destekli nozul ile yapılan akış deneyi görüntüleri aşağıda verilmiştir.



**Şekil 4.63.** ALR=0,12 için sprej görüntüsü  
( $Q_a=2,1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_l=0,35 \text{ L/dk}$ ,  $P_a=0,3 \text{ bar}$ ,  $P_l=1,3 \text{ bar}$ )



**Şekil 4.64.** ALR=0,084 için sprej görüntüsü  
( $Q_a=2,1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_l=0,5 \text{ l/dk}$ ,  $P_a=0,3 \text{ bar}$ ,  $P_l=2,6 \text{ bar}$ )



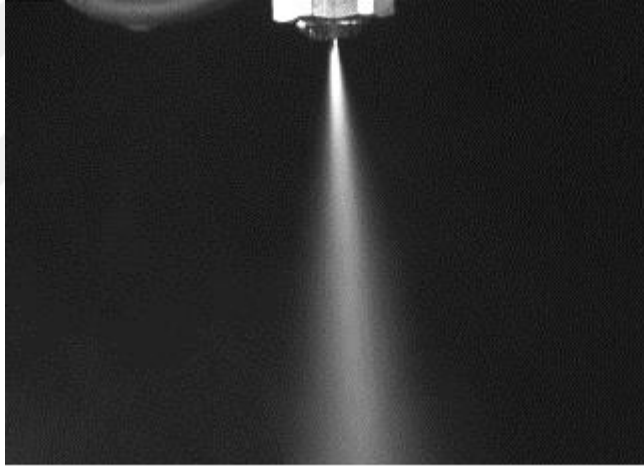
**Şekil 4.65.** ALR=0,116 için sprej görüntüsü  
( $Q_a=2,9 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_l=0,5 \text{ l/dk}$ ,  $P_a=1,1 \text{ bar}$ ,  $P_l=2,6 \text{ bar}$ )



**Şekil 4.66.** ALR=0,166 için sprej görüntüsü  
( $Q_a=2,9 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_l=0,35 \text{ l/dk}$ ,  $P_a=1,1 \text{ bar}$ ,  $P_l=1,3 \text{ bar}$ )

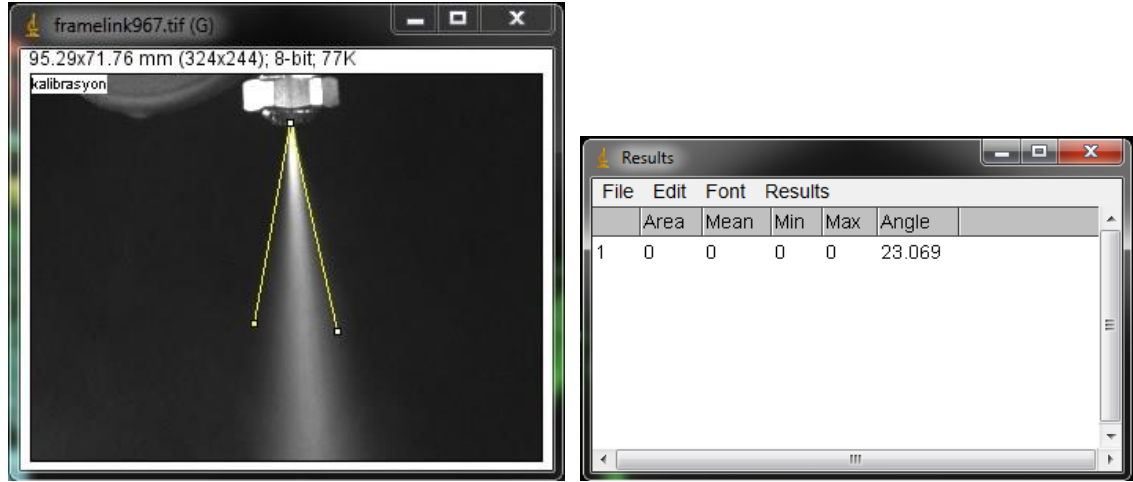


**Şekil 4.67.** ALR=0,206 için sprej görüntüsü  
( $Q_a=3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_l=0,35 \text{ l/dk}$ ,  $P_a=2,1 \text{ bar}$ ,  $P_l=1,3 \text{ bar}$ )



**Şekil 4.68.** ALR=0,144 için sprej görüntüsü  
( $Q_a=3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_l=0,5 \text{ l/dk}$ ,  $P_a=2,1 \text{ bar}$ ,  $P_l=2,6 \text{ bar}$ )

Şekil 4.69'da Image-J Programında görüntü işleme analizi için bir örnek verilmiştir. Program yardımıyla jet kalınlığı ve sprej açısı görüntü işleme ile belirlenmiştir.



Şekil 4.69. ALR= 0,144 için Image-J’de görüntü analizi

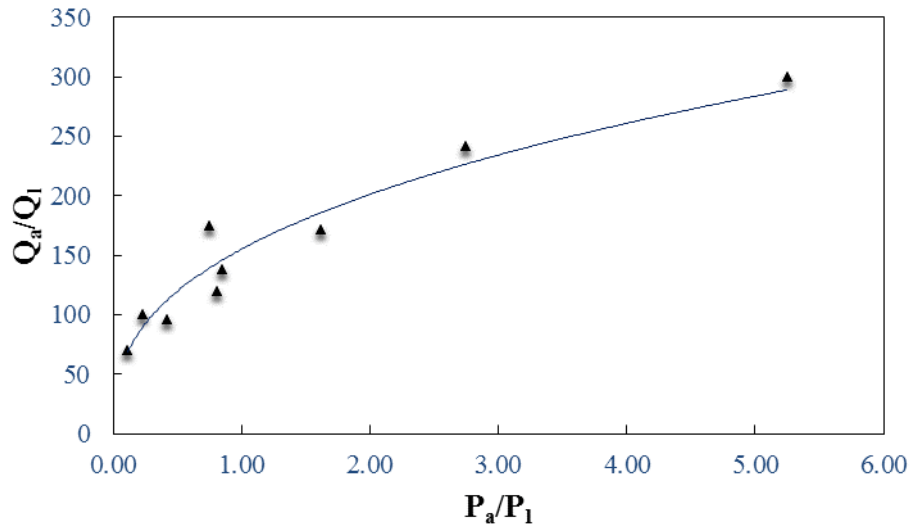
Çizelge 4.8. Sprey akış analizinde incelenen parametreler ve değerleri

$P_a$ (bar)	$P_1$ (bar)	$Q_A$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_L$ (mL/dk)	ALR	$t_{jet}^*$ (m)	$Re_{jet}$	$\Delta P$ (Pa)	SMD (Batarseh)	SMD (Lef.)
0,3	0,4	2,1	200	0,210	0,00148	31477	4329	125	355
1,1	1,3	2,9	350	0,166	0,00173	33557	13257	131	269
2,1	2,6	3,6	500	0,144	0,00167	33075	27056	133	253
1,1	1,3	2,9	350	0,166	0,00173	33557	13257	131	269
2,1	2,6	3,6	500	0,144	0,00167	33075	27056	133	253
0,3	0,4	2,1	200	0,210	0,00148	31477	4329	125	355
2,1	2,6	3,6	500	0,144	0,00167	33075	27056	133	253
0,3	0,4	2,1	200	0,210	0,00148	31477	4329	125	355
1,1	1,3	2,9	350	0,166	0,00173	33557	13257	131	269
1,1	2,6	2,9	500	0,116	0,00153	31909	27056	223	416
2,1	0,4	3,6	200	0,360	0,00187	34645	4329	38	108
0,3	1,3	2,1	350	0,120	0,00162	32665	13257	284	526
2,1	0,4	3,6	200	0,360	0,00187	34645	4329	38	108
0,3	1,3	2,1	350	0,120	0,00162	32665	13257	284	526
1,1	2,6	2,9	500	0,116	0,00153	31909	27056	223	416
0,3	1,3	2,1	350	0,120	0,00162	32665	13257	284	526
1,1	2,6	2,9	500	0,116	0,00153	31909	27056	223	416
2,1	0,4	3,6	200	0,360	0,00187	34645	4329	38	108
2,1	1,3	3,6	350	0,206	0,00188	34721	13257	80	166
0,3	2,6	2,1	500	0,084	0,00167	33075	27056	493	705
1,1	0,4	2,9	200	0,290	0,00178	33951	4329	60	165
0,3	2,6	2,1	500	0,084	0,00167	33075	27056	493	705
1,1	0,4	2,9	200	0,290	0,00178	33951	4329	60	165

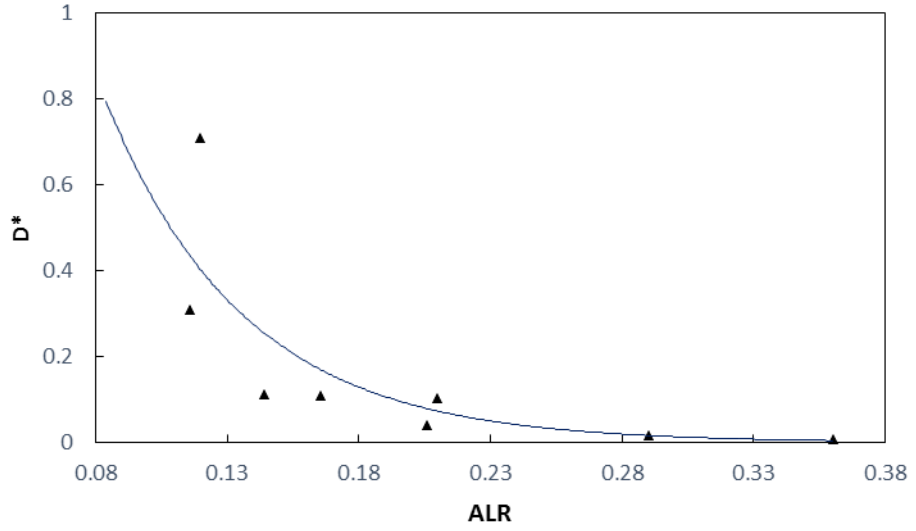
**Çizelge 4.8.** (devam)

2,1	1,3	3,6	350	0,206	0,00188	34721	13257	80	166
1,1	0,4	2,9	200	0,290	0,00178	33951	4329	60	165
2,1	1,3	3,6	350	0,206	0,00188	34721	13257	80	166
0,3	2,6	2,1	500	0,084	0,00167	33075	27056	493	705

Deneyleerde kullanılan  $d_0=1.2$  mm çapında DXD-HS1 hava destekli tam koni nozul için Çizelge 4.10'a göre çizilen grafikler aşağıdadır:

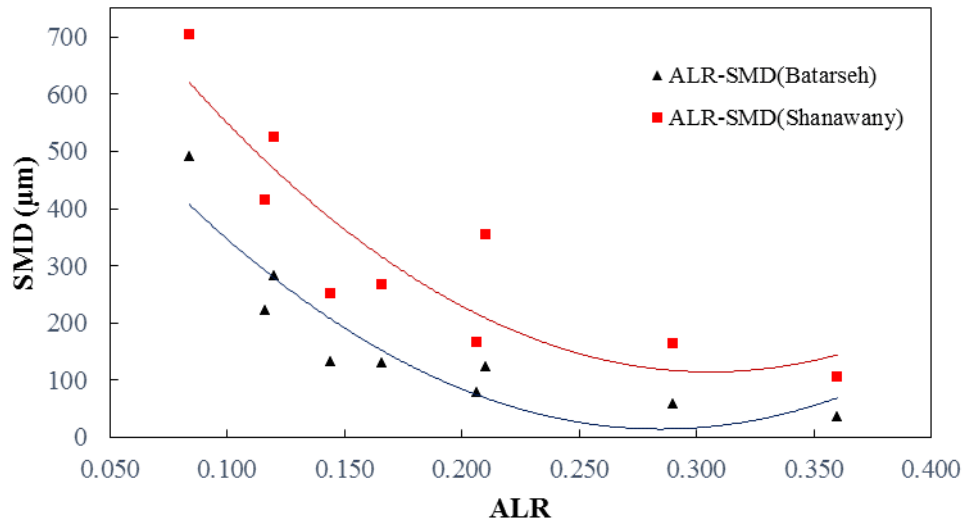
**Şekil 4.70.** Basınç-hacimsel debi oranlarının değişim grafiği

Şekil 4.70'de çizilen grafikte hava/su basınç oranı arttıkça yine hava/su hacimsel debileri de artmaktadır. Bu artış yüksek basınç oranlarında daha belirgin olarak görülmektedir.



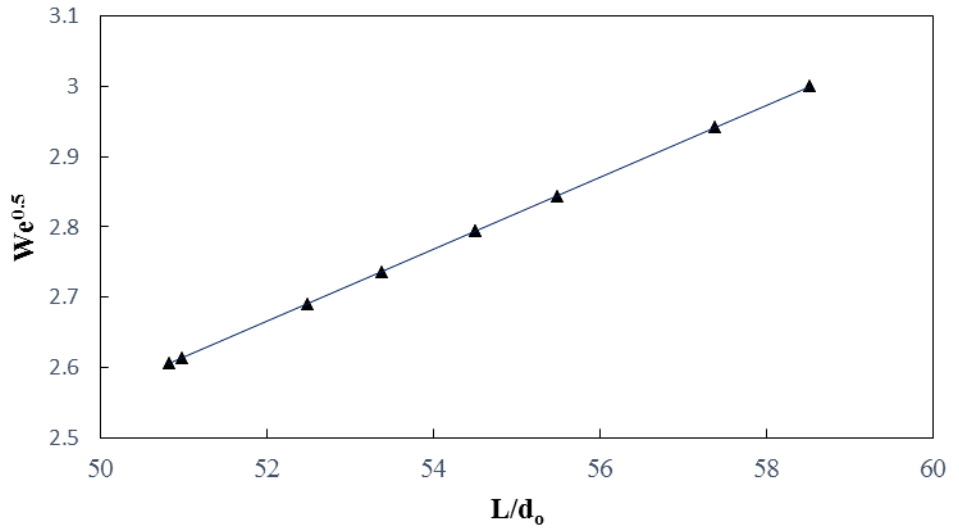
Şekil 4.71. ALR-Boyutsuz damla çapı (D\*) grafiği

Şekil 4.71’de ALR ile boyutsuz damla çapı değişimi verilmiştir. Boyutsuz damla çapı ifadesi  $D^* = \frac{SMD * P_l}{d_0 * P_a}$  ile hesaplanmıştır. ALR arttıkça boyutsuz damla çapının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.72. Batarseh ve Shanawany SMD korelasyonları ile ALR-SMD değişimi

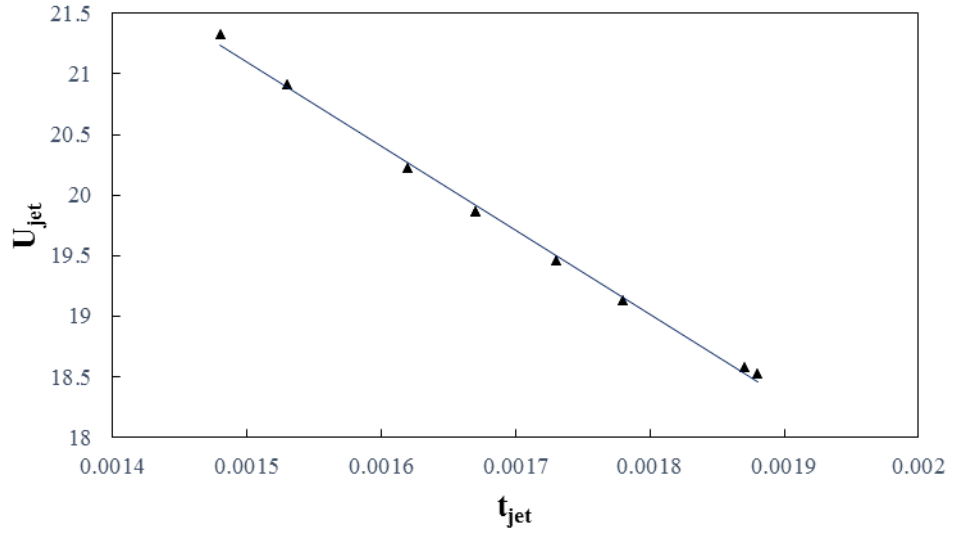
Şekil 4.72'de belirlenen su ve hava debileri için ALR-SMD değişimleri Batarseh ve Shanawany'nin korelasyonları ile çizilmiştir. ALR arttıkça SMD'nin azaldığı görülmektedir. Damlacık çapının, maksimum ve minimum ALR değerleri arasında Batarseh korelasyonu için %91.6, Shanawany korelasyonu için %85.7 azaldığı hesaplanmıştır. Bu korelasyonlar Çizelge 1.2'de (11 ve 12. korelasyonlar) verilmiştir. Şekil 4.72'deki grafikler eğimlere göre değerlendirildiğinde yapılan çalışmanın literatürle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.73.  $L/d_0 - We^{0.5}$  grafiği

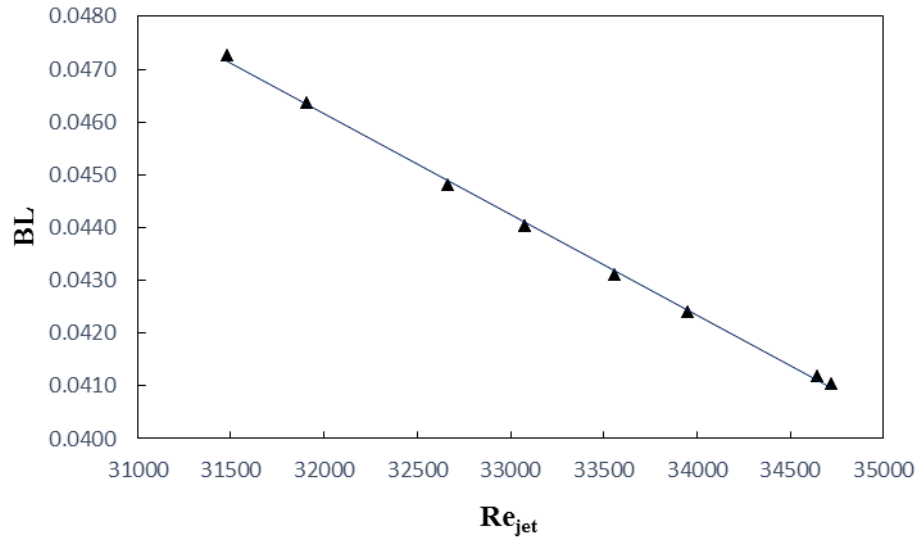
Şekil 4.73'de bozulma mesafesi nozul çapına bölünerek boyutsuz  $L/d_0 - We^{0.5}$  grafiği verilmiştir. Bozulma mesafesi  $We$  sayısının karekökü ile lineer olarak artmaktadır. Maksimum ve minimum bozulma mesafesi değerleri arasında artış %13.73 olarak hesaplanmıştır.





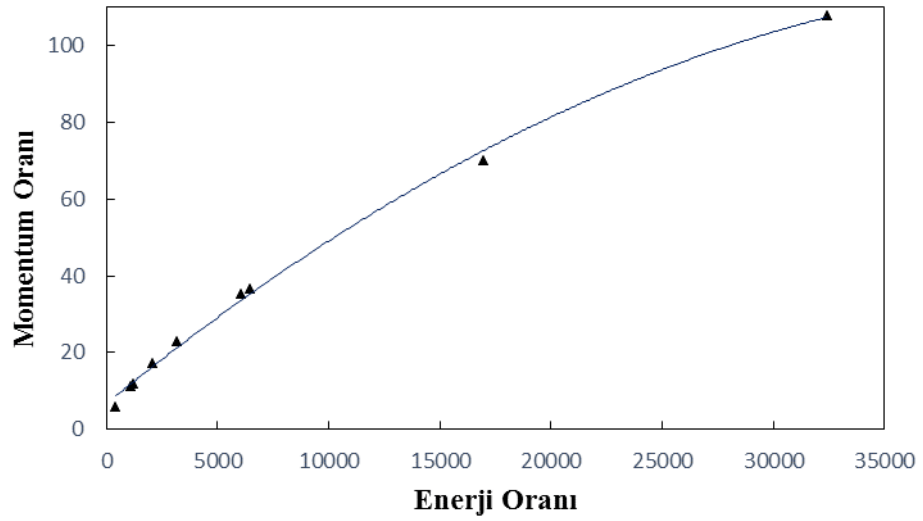
**Şekil 4.74.** Jet kalınlığı ile jet hızının değişimi

Şekil 4.74'de jet kalınlığı arttıkça jet hızının azaldığı görülmektedir.



**Şekil 4.75.** Re sayısı ile jet bozulma mesafesinin değişimi

Şekil 4.75'de  $Re$  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 %13'lük bir azalma gözlenmiştir.



Şekil 4.76. Sprey Enerji-Momentum oranları grafiği

Şekil 4.76'da enerji-momentum oranları grafiği verilmiştir. Sprey enerji oranının momentum oranları ile artış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Çalışmada bunlara ek olarak akış korelasyonları da çıkarılmıştır. DXD-HS1 hava destekli nozulda çeşitli ALR oranlarında elde edilen deneysel bulgular ile sprej açısı ( $\theta$ ) ve jet kalınlığı ( $t_{jet}$ ) için korelasyonlar elde edilmiştir.

Sprej açısı için ALR, We sayısı, hava-sıvı basınç oranı ve Pr sayısına bağlı olarak aşağıdaki korelasyon elde edilmiştir ( $R=0,8055$ ).

$$\left(\frac{\theta}{\theta_{rsf}}\right) = 0,8708(ALR)^{-0,7781}(We)^{0,6918}\left(\frac{P_a}{P_l}\right)^{0,3643}(Pr)^{-1,1471} \quad (4.3)$$

Jet kalınlığı için de ALR, We, hava-sıvı basınç oranı ve Pr sayısına bağlı olarak aşağıdaki korelasyon elde edildi ( $R=0,8752$ )

$$\left(\frac{t_{jet}^*}{d}\right) = 0,8676(ALR)^{-0,001}(We)^{-0,8486}\left(\frac{P_a}{P_l}\right)^{0,0002}(Pr)^{1,1389} \quad (4.4)$$

## 5. SONUÇ

Daralan genişleyen geometriye sahip dikdörtgen kanatlardan oluşan bir ısı değiştirici için spray soğutma uygulamasıyla ısı transferi ve akış karakteristiklerini belirlemeye yönelik deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneyle sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- ✓ Taguchi deney tasarımı ile  $L_{27}(3^{11})$  deney planı kullanılarak parametrelerin optimizasyon kriterine etkilerini gözlemleyebilmek için Nusselt sayısına ait performans değerleri hesaplanmış ve optimum ısı alıcı geometrisi elde edilmiştir.
- ✓ Optimum sonuçlar; 15 mm kanat yüksekliği, 45 mm kanat genişliği, 45° kanat açısı, 20 mm kanatlar arası x doğrultusundaki mesafe, 20 mm kanatlar arası y doğrultusundaki mesafe, 20 mm dilimler arası x doğrultusundaki mesafe, 15 mm dilimler arası y doğrultusundaki mesafe, (667) nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı, 3.6 m<sup>3</sup>/h hava debisi, 21 · 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/h su debisi ve 5 s spreyleme zamanı olarak tespit edilmiştir.
- ✓ Nusselt sayısına parametrelerin etkisi önem sırasıyla; spreyleme zamanı (t), kanat yüksekliği (H), nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı (h/d), su debisi (Q<sub>1</sub>), hava debisi (Q<sub>a</sub>), kanat genişliği (b), kanatlar arası x doğrultusundaki mesafe (a), dilimler arası x doğrultusundaki mesafe (f), kanat açısı (α), kanatlar arası y doğrultusundaki mesafe (c) ve dilimler arası y doğrultusundaki mesafedir (e).
- ✓ Nusselt sayısı üzerinde en etkili parametrenin spreyleme zamanı olduğu tespit edilmiştir. Yüzey geometrisine bağlı olarak Nusselt sayısının en yüksek değeri 234.4 ile spray zamanının 5 s olduğu durumda hesaplanmıştır. Bu durum optimum soğutma yükünün elde edilmesinde ilave spray işlemine gerek olmadığını göstermektedir.
- ✓ Nusselt sayısı üzerine ikinci etkili parametrenin kanat yüksekliği olduğu belirlenmiştir. Kanat yüksekliğinin 15 mm olduğu durumda yüzey geometrisine bağlı olarak 234.4 ile Nusselt sayısının en yüksek değeri hesaplanmıştır. Nusselt sayısı hesaplamaları yapılırken ortalama ısı taşınım katsayısı toplam ısı geçişi alanına göre belirlenmiştir. Eşitlikte kanatlardan gelen ısı geçişi yüzey alanı da dikkate alındığı ve

kanat yüksekliğinin artması durumunda ısı geçişi alanı da artacağı için ısı taşınım katsayısı da azalmıştır.

✓ Nusselt sayısına etki eden üçüncü parametre nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı ( $h/d$ ) olmuştur. ( $h/d$ ) oranının maksimum olduğu noktada (667), yüzey geometrisine bağlı olarak Nusselt sayısının 234.4 ile en yüksek değeri hesaplanmıştır.

✓ Taguchi analizi ile elde edilen optimum geometriye sahip ısı alıcı için Nusselt sayısı üzerine en etkin parametreler olarak belirlenen spreyleme zamanı ( $t$ ), kanat yüksekliği ( $H$ ), nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranı ( $h/d$ ) ve kanat genişliğinin ( $b$ ) çeşitli değerlerinde Nusselt sayısı-ALR değişimleri incelenmiştir.

✓ En yüksek Nusselt değerleri 5 s spreyleme süresi için bulunmuştur. Nusselt sayısı ALR ile azalma eğilimindedir. Her bir spreyleme zamanına ait belirlenen altı farklı ALR değerinin en yüksek ve en düşük değerlerine karşılık gelen Nusselt sayıları incelendiğinde 5s spreyleme süresi için %10.46, 10 s spreyleme süresi için %3.45 ve 15 s spreyleme süresi için %2.92 azalma tespit edilmiştir. Spreyleme zamanlarına ait ALR değerlerine karşılık gelen maksimum Nusselt sayıları karşılaştırıldığında 5s-10s aralığında %56.56, 10s-15s aralığında %28.26, 5s-15s aralığında ise %68.84 değerinde azalma gözlenmiştir.

✓ En yüksek Nusselt değerleri 15 mm kanat yüksekliğinde bulunmuştur. Kanat yüksekliği arttıkça belirlenen ALR değerleri için Nusselt sayısı azalmıştır. Her bir kanat yüksekliğine ait belirlenen altı farklı ALR değerinin en yüksek ve en düşük değerlerine karşılık gelen Nusselt sayıları incelendiğinde 15 mm kanat yüksekliği için %10.46, 25 mm kanat yüksekliği için %31.41 ve 35 mm kanat yüksekliği için %16.24 azalma tespit edilmiştir. Kanat yüksekliklerine ait ALR değerlerine karşılık gelen maksimum Nusselt sayıları karşılaştırıldığında 15 mm-25 mm aralığında %20.15, 25 mm-35 mm aralığında %25.96, 15 mm-35 mm aralığında ise %40.88 değerinde azalma gözlenmiştir.

✓ Nusselt sayısının en yüksek değerleri nozul-ısı alıcı mesafesinin nozul çapına oranının ( $h/d$ ), (667) olduğu durumda hesaplanmıştır. Nusselt sayısı ALR ile azalma eğilimindedir. ( $h/d$ ) oranı arttıkça Nusselt sayısı artmaktadır. Her bir ( $h/d$ ) oranı için belirlenen altı farklı ALR değerinin en yüksek ve en düşük değerlerine karşılık gelen Nusselt sayıları incelendiğinde ( $h/d$ ) oranının (667) olduğu durumda %10.46, (333) olduğu durumda %13.28 ve (167) olduğu durumda %11.97 azalma tespit edilmiştir. ( $h/d$ ) oranlarına ait ALR değerlerine karşılık gelen maksimum Nusselt sayıları

karşılaştırıldığında (333)-(667) aralığında %18.41, (167)-(333) aralığında %17.60, (167)-(667) aralığında ise %32.77 değerinde azalma gözlenmiştir.

✓ Nusselt sayısının en yüksek değerleri 45 mm kanat genişliği için bulunmuştur. ALR arttıkça Nu sayısının bütün kanat genişliklerinde azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Kanat genişliği azaldıkça Nusselt sayısı azalmaktadır. Her bir kanat genişliğine ait belirlenen altı farklı ALR değerinin en yüksek ve en düşük değerlerine karşılık gelen Nusselt sayıları incelendiğinde 45 mm kanat genişliği için %10.46, 30 mm kanat genişliği için %6.12 ve 15 mm kanat genişliği için %4.53 azalma tespit edilmiştir. Kanat genişliklerine ait ALR değerlerine karşılık gelen maksimum Nusselt sayıları karşılaştırıldığında 30 mm-45 mm aralığında %22.79, 15 mm-30 mm aralığında %32.06, 15 mm-45 mm aralığında ise %47.55 değerinde azalma gözlenmiştir.

✓ Tüm ALR değerlerinde sıvı debisi arttıkça Nusselt sayısı artış göstermiştir. Bu durum sıvı debisinin artmasının taşınım ile ısı transferini iyileştirdiğini göstermiştir.

Taguchi deney tasarımı ile elde edilen optimum ısı alıcı geometrisinde yapılan deneylerle Nusselt sayısı, sprej açısı ve jet çapı korelasyonları aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Nu = 1,761 \left(\frac{h}{d}\right)^{0,423} \left(\frac{b}{l}\right)^{0,524} \left(\frac{\alpha}{\alpha_{ref}}\right)^{-65,1} \left(\frac{H}{l}\right)^{-0,62}$$

$$(devam) \left(\frac{a}{l}\right)^{-3,05} \left(\frac{c}{l}\right)^{-3,04} \left(\frac{e}{l}\right)^{-3,04} \left(\frac{f}{l}\right)^{-16,8} (ALR)^{-0,161} \left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^{-1,01} \quad (5.1)$$

$$\left(\frac{\theta}{\theta_{ref}}\right) = 0,8708 (ALR)^{-0,7781} (We)^{0,6918} \left(\frac{P_a}{P_l}\right)^{0,3643} (Pr)^{-1,1471} \quad (5.2)$$

$$\left(\frac{t_{jet}^*}{d}\right) = 0,8676 (ALR)^{-0,001} (We)^{-0,8486} \left(\frac{P_a}{P_l}\right)^{0,0002} (Pr)^{1,1389} \quad (5.3)$$

Dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcılar için sprej soğutma ile akış karakteristiklerini belirlemeye yönelik deneyler yapılmış elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- ✓ Hava/su basınç oranı arttıkça hava/su hacimsel debileri oranı doğru orantılı şekilde artmıştır.
- ✓ ALR arttıkça SMD azalmıştır. SMD'nin, Weber sayısı ile de ters orantılı olduğu belirtilmiştir. Bu durum atomizasyonda havanın etkisini göstermektedir. Damlacık çapının, maksimum ve minimum ALR değerleri arasında Feras korelasyonu için %91.6, Shanawany korelasyonu için %85.7 azaldığı hesaplanmıştır. Korelasyonlara ait grafiklerdeki eğimlerin birbiriyle uyumlu oluşu çalışmamızın literatürle uyumlu olduğunu göstermiştir.
- ✓ Jet Reynolds sayısı arttıkça bozulma mesafesi azalmıştır. Reynolds sayısının minimum ve maksimum değerleri arasında bozulma mesafesinde %13'lük bir fark gözlenmiştir.
- ✓ Bozulma mesafesi Weber sayısının karekökü ile lineer olarak artmıştır. Maksimum ve minimum bozulma mesafesi değerleri arasında artış %13.73 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ ALR arttıkça SMD'ye benzer şekilde boyutsuz damla çapı da azalmıştır.
- ✓ Sprey enerji ve momentum oranları hesaplanmış, enerjinin momentumla arttığı görülmüştür.

Çalışma sonunda bundan sonra yapılacak araştırmalar için belirlenen öneriler aşağıdaki şekilde maddelendirilmiştir:

- Sprey akış karakteristiklerini belirlemeye yönelik çalışmalar oldukça kompleks çalışmalardır. Bu nedenle 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 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., Verkrusse, 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.
- Amjadi, S., 2014. Hava Destekli Flat Fan Nozulda Sprey Karakteristiklerinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Erzurum.
- Ang, K.M., Yeo, L.Y., Friend, J.R., Hung, Y.M., & Tan, M.K., 2015. Nozzleless Spray Cooling Using Surface Acoustic Waves. *Journal of Aerosol Science*(79), 48–60.
- 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.
- Balık, G., 2010. Newton Tipi Olmayan Akışkanların Kullanıldığı Sprey Akışlarının Deneysel ve Teorik İncelenmesi. *Doktora Tezi*. İstanbul.
- 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.
- Bonilla, C.F., Perry, C.W., 1941. Heat Transmission to Boiling Binary Liquid Mixtures. *Transactions of American Society of Chemical Engineers*(37), 685-705.
- Cabrera, E., Gonzalez, J.E., 2003. Heat Flux Correlation for Spray Cooling in The Nucleate Boiling Regime. *Exp. Heat Transfer*(16), 19-44.
- Cader, T., Westra, L.J., Eden, R.C., 2004. Spray Cooling Thermal Management for Increased Device Reliability. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*(4/4), 605-613.
- Canıyılmaz, 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).
- Chandra, S., Di Marzo, M., Qiao, Y.M., Terterini, P., 1996. Effect of Liquid-Solid Contact Angle on Droplet Evaporation. *Fire Safety Journal*(27), 141-148.
- 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.
- Chang, Y.W., Yao, S.C., 2000. Studies of Water Mist Cooling on Heated Metal Surfaces. *Proceedings of NHTC'00, 34th National Heat Transfer Conference, 1, New York*, 682-690.
- 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.
- Chen, R.H., Chow, L.C., Navedo, J.E., 2002. Effects of Spray Characteristics on Critical Heat Flux in Sub-Cooled Water Spray Cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(45), 4033-4043.
- Chen, S., Liu, J., Liu, X., & Hou, Y., 2015. An Experimental Comparison of Heat Transfer Characteristic Between R-134-a and R-22 in Spray Cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*(66), 206-212.
- 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.
- Cheng, W., Zhang, W., Shao, S., Jiang, L., & Hong, D., 2015. Effect of Inclination Angle on Plug-Chip Spray Cooling in Integrated Enclosure. *Applied Thermal Engineering* (91), 202-209.
- Cheng, W.L., Zhang, W.W., Jiang, L.J., Yang, S.L., Hu, L., & Chen, H., 2015. Experimental Investigation of Large Area Spray Cooling With Compact Chamber In The Non-Boiling Regime. *Applied Thermal Engineering* (80), 160-167.
- 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*.
- Chow, L.C., Sehmbey, M.S., Pais, M.R., 1997. High Heat Flux Spray Cooling. *Ann. Rev. Heat Transfer*(8), 291-318.
- Chung, I., & Presser, C., 2001. Fluid Property effects on sheet disintegration of simplex pressure swirl atomizer. *J.Propul.Power*, 17(1), 212-216.
- Cichelli, M.T., Bonilla, C.F., 1946. Heat Transfer to Liquid Boiling Under Pressure. *American Inst. of Chemical Engineers*, 42(2), 755-787.
- 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.
- Durst, F., 2008. *An Introduction to The Theory of Fluid Flows*. Springer. Fluid Mechanics.
- Eggers, J., & Villermaux, E., 2008. *Physics of liquid jets*. IOP Publishing.
- Elkothb, 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.
- Ghodbane, M., Holman, J.P., 1991. Experimental Study of Spray Cooling With Freon-113. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(4/5), 1163-1174.
- 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.
- Halvorson, P., Carson, R., Jeter, S., Abdel-Khalik, S.I., 1994. Critical Heat Flux Limits for A Heated Surface Impacted by A Stream of Liquid Droplets. *Journal of Heat Transfer*(116), 679-684.
- Healy, W.M., Halvorson, P.J., Hartley, G.J., Abdelkhalik, S.I., 1998. A Critical Heat Flux Correlation for Droplet Impact Cooling at Low Weber Number and Various Ambient Pressures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(41), 975-978.
- Hosch, J., & Walters, J., 1977. High spatial resolution schlieren photography. *Appl. Opt.*(16), 473-485.
- Hou, Y., Liu, J., Su, X., Qian, Y., Liu, L., & Liu, X., 2015. Experimental Study on The Characteristics of A Closed Loop R134-a Spray Cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*(61), 194–200.
- 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>.
- Issa, R.J., Yao, S.C., 2005. A Numerical Model for The Mist Dynamics and Heat Transfer at Various Ambient Pressures. *ASME Journal of Fluid Engineering*(127), 631-639.
- Jayarathne, O.W., Mason, B.J., 1964. The coalescence and bouncing of water drops at an air/water interface, *Proceedings of the Royal Society of London A*(280), 545-565.
- 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.
- Kendall, G.E., Rohsenow, W.M., 1978. Heat Transfer to Impacting Drops and Post Critical Heat Flux Dispersed Flow. *Heat Transfer Lab. Massachusetts Inst. of Technology, Technical Report 85694*(100), Cambridge.
- Kheirabadi, A.C., & Groulx, D., 2016. Cooling of Server Electronics: A Design Review of Existing Technology. *Applied Thermal Engineering*(105), 622–638.

- 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.
- Labergue, A., Gradeck, M., & Lemoine, F., 2015. Comparative Study of The Cooling of A Hot Temperature Surface Using Sprays and Liquid Jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(81), 889–900.
- 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, J., Xue, R., Chen, L., Liu, X., & Hou, Y., 2016. Influence of Chamber Pressure on Heat Transfer Characteristics of a Closed Loop R134-a Spray Cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*(75), 89 – 95.
- 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.
- Mesler, R., Mailen, G., 1977. Nucleate Boiling in Thin Liquid Films. *AIChE Journal*, 23(6), 954-957.
- 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 1 st 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.
- Nirmalan, N.V., Weaver, J.A., Hylton, L.D., 1998. An Experimental Study of Turbine Vane Heat Transfer With Water-Air Cooling. *J. Turbomach*120(1), 50-62.
- Ohkubo, H., Nishio, S., 1992. Study of Transient Characteristics of Mist Cooling Heat Transfer From A Horizontal Upward-Facing Surface. *Heat Transfer-Japanese Research*, 21(6), 543-555.

- 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.
- Ortiz, L., Gonzalez, J.E., 1999. Experiment on Steady-State High Heat Fluxes Using Spray Cooling. *Exp. Heat Transfer*, 12(3), 215-233.
- 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.
- Pasandideh-Fard, M., Qiao, Y.M., Chandra, S., Mostaghini, J., 1995. Capillary Effects During Droplet Impact on a Solid Surface. *Physics of Fluids*(8/2), 650-659.
- 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.
- Pedersen, C.O., 1970. An Experimental Study of The Dynamic Behavior and Heat Transfer Characteristics of Water Droplets Impinging Upon a Heated Surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 13(2), 369-381.
- 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., Halder, K., Jha, J.M., Chakraborty, S., Sarkar, I., Pal, S.K., & Chakraborty, S., 2015. Heat Transfer Enhancement Using Air-Atomized Spray Cooling With Water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid. *International Journal of Thermal Science*(96), 85-93.
- 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.
- Rodriguez, F., Mesler, R., 1985. Some drops don't splash, *Journal of Colloid and Interface Science*, 106(2), 347-352.
- 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.
- Sawyer, M., Jeter, S., Abdel-Khalik, S.I., 1997. A Critical Heat Flux Correlation for Droplet Impact Cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(9), 2123-2131.
- Schwardskopf, J., Sovar, G., Cader, T., Okamoto, K., Li, BQ., Ramaprian, B., 2004. Effect of Spray Angle in Spray Cooling Thermal Management, *ASME Heat Transfer/Fluid Engineering Summer Conference*, Charlotte, NC, (4), 23-432.
- Sehmbey, M.S., Chow, L.C., Hahn, O.J., Pais, M.R., 1995. Spray Cooling of Power Electronics at Cryogenic Temperatures. *AIAA J. Thermophys Heat Transfer*(9), 123-128.
- 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.
- Senda, J., Yamada, K., Fujimoto, H., Miki, H., 1988. The Heat Transfer Characteristics of A Small Droplet Impinging Upon A Hot Surface. *JSME Int. J.* 11(31), 105-111.
- 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.
- Sözbir, N., Chang, Y.W., Yao, S.C., 2003. Heat Transfer of Impacting Water Mist on High Temperature Metal Surface. *ASME Journal of Heat Transfer*(125), 70-74.
- Sözbir, N., Yao, S.C., 2002. Investigation of Water Mist Cooling for Glass Tempering System. *ASME Int. 6th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA*, Istanbul, Turkey.
- Sözbir, N., Yao, S.C., 2004. Experimental Investigation of Water Mist Cooling for Glass Tempering. *Atomization and Sprays*, 14(3), 191-210.
- 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. Basınçlı 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.
- Webb, B.W., Ma, C.F., 1995. Single-Phase Liquid Jet Impingement. *Adv. Heat Transfer*(26), 105-217.
- 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.
- Xishi, W., Guangxuan, L., Weiching, F., Dobashi, R., 2004. Experimental Study on Cooling a Hot Solid Surface With Water Mist, *Journal of Fire Science*, 22(5), 355-366.
- 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, G., Fan, L.S., 2006. 3-D Modeling of The Dynamics and Heat Transfer Characteristics of Sub-Cooled Droplet Impact on A Surface With Film Boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(49), 4231-4249.
- Yang, J., Chow, L., & Pais, M., 1996, August. Nucleate Boiling Heat Transfer in Spray Cooling. *Journal of Heat Transfer*(118), 668-671.
- Yang, J., Pais, M.R., Chow, L.C., 1993. Critical Heat Flux Limits in Secondary Gas Atomized Liquid Spray Cooling. *Exp. Heat Transfer*(6i), 55-67.
- Yeşildal, F., 2014. Sprey Soğutmada Isı ve Akış Karakteristiklerinin Belirlenmesi. *Doktora Tezi*. Erzurum.
- 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.
- Yiğit, C., 2009. Sıcak Yüzeylerin Sprey İle Soğutulmasının Sayısal İncelenmesi. *Doktora Tezi*. Sakarya.
- Zhang, W., & Wang, Z., 2015. Heat Transfer Enhancement of Spray Cooling in Straight-Grooved Surfaces in The Non-Boiling Regime. *Experimental Thermal and Fluid Science*(69), 38-44.
- Zhang, Z., Li, J., & Jiang, P., 2013. Experimental investigation of spray cooling on flat and enhanced surfaces. *Applied Thermal Engineering*(51), 102-111.

## ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında İzmir’de doğdu. İlk, Orta ve Lise Öğrenimini İzmir’de tamamladı. 2002 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2006 yılında bölüm birinciliği ile mezun oldu. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2006-2009 yılları arasında özel sektörde Araçlarda LPG Dönüşüm ve Doğalgaz İç Tesisat alanıyla ilgili sorumlu mühendis olarak çalıştı.

2009 yılından itibaren Yüzüncü Yıl Üniversitesi Erciş Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü’nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.