



**GİRDAP ETKİLİ ÇARPMALI JETLERİN KANATÇIKLI
YÜZEYLERDEKİ ISI GEÇİŞİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL
İNCELENMESİ**

Fatih DEMİR

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih DEMİR

15/10/2024

GİRDAP ETKİLİ ÇARPMALI JETLERİN KANATÇIKLI YÜZEYLERDEKİ ISI GEÇİŞİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Fatih DEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Mevcut tezde yüksek ve üniform ısı transferi istenen elektronik elemanlar için farklı çarpmalı jetler ile çarpma plakalarının ısı transferi ve akış alanı üzerine etkileri incelenmiştir. İlk olarak, düz plakaya çarptırılan dairesel jet sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet durumları için düşük lüle-plaka mesafesinde deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır. Sonuçlarda, sınırlandırılmış jet durumundaki ortalama Nusselt sayısının, sınırlandırılmamış jet durumuna göre %20-%30 arasında düşüş gösterdiği görülmüştür. Lüle-plaka mesafesinin artmasıyla sınırlandırılmamış jet durumundaki basınç düşüşü azalmış, sınırlandırılmış jet durumundaki basınç düşüşü de artmıştır. İkinci olarak, dönen çarpmalı jette çarpma plakası üzerine tanımlanan üç farklı hesaplama alanı yüksekliklerinin ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Daha sonra Reynolds sayıları ve düşük lüle-plaka mesafeleri parametrik olarak çalışılmıştır. Sonuçlarda, hesaplama alanı yüksekliğinin düşük lüle-plaka mesafesinde ısı transferini etkilediği görülmüştür. Üniform ısı transferini olumsuz etkileyen eyer şeklindeki profil oluşumu görülmüştür. Üçüncü olarak, birleşik lülelerle üretilen hem dairesel hem helisel jetler lüle-plaka mesafeleri ($H/D = 0,1-3,2$), toplam debiler ($Q_t = 60-85$ L/dk), debi oranları ($Q^* = 0,176-0,823$), sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet durumları için düz veya kanatçıklı plakalara çarptırılarak deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır. Sonuçlarda, $Q^* = 0,823$ 'te lüle-plaka mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 1,6$ olduğu aralıkta ısı transferinin düz plaka üzerinde her yerde aynı dağılımı gösterebileceği görülmüştür. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler ile kanatçık boyları 2 ve 6 mm olan plakalarda $H/D = 3,2$ 'de düz plakaya göre ısı transferinde meydana gelen artışlar sırasıyla yaklaşık olarak %20 ve %57'dir. Son olarak, birleşik lüle ile düz plakanın ısı transferi ve akış alanına etkisi girdap numaraları ($S_g = 0,0-1,661$) ve debi oranları ($Q^* = 0,2$ ve $0,466$) için sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet durumlarında sayısal olarak çalışılmıştır. Sonuçlarda, artan debi oranının durma noktası ve ortalama Nusselt sayılarını azalttığı görülmüştür. Yüksek debi oranında artan girdap numarası, düşük debi oranına göre durma noktası ve ortalama Nusselt sayılarında büyük azalmalara neden olmuştur. Dönme yoğunluğunun artmasına rağmen, üniform ısı transferini olumsuz etkileyen eyer şeklindeki profil oluşumu görülmemiştir.

Bilim Kodu : 91412

Anahtar Kelimeler : Çarpmalı jet, dairesel jet, dönen jet, birleşik çarpmalı jet, düz plaka, kanatçıklı plaka, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, ısı transferi

Sayfa Adedi : 211

Danışman : Prof. Dr. Oğuz TURGUT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SWIRL IMPINGING JETS ON HEAT TRANSFER FROM FINNED SURFACES

(Ph. D. Thesis)

Fatih DEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

In this thesis, the effects of different impingement jets and impingement plates on heat transfer and flow field for electronic components where high and uniform heat transfer is required are investigated. Firstly, the circular jet impinging on a flat plate is studied experimentally and numerically for unconfined and confined jet cases at low nozzle-plate distance. The results show that the average Nusselt number in the confined jet case decreases by 20% to 30% compared to the unconfined jet case. As the nozzle-plate distance increases, the pressure drop in the unconfined jet case decreases while the pressure drop in the confined jet case increases. Secondly, the effects of three different computational domain heights defined on the impingement plate in the swirl impinging jet on heat transfer are investigated numerically. Then, Reynolds numbers and low nozzle-plate distances are studied parametrically. The results show that the computational domain height affects the heat transfer at low nozzle-plate distance. A saddle-shaped profile is observed, which negatively affects the uniform heat transfer. Thirdly, both circular and helical jets produced with combined nozzles are studied experimentally and numerically by impinging on flat or finned plates for nozzle-plate distances ($H/D = 0.1-3.2$), total flow rates ($Q_t = 60-85$ L/min), flow rate ratios ($Q^* = 0.176-0.823$), unconfined and confined jet cases. The results show that the heat transfer can show the same distribution everywhere on the flat plate in the range where nozzle-plate distance is $0.8 \leq H/D \leq 1.6$ at $Q^* = 0.823$. The increase in heat transfer at $H/D = 3.2$ for coaxial circular and quadruple helical jets and plates with fin lengths of 2 and 6 mm is approximately 20% and 57% compared to the flat plate, respectively. Finally, the effect of the combined nozzle and flat plate on the heat transfer and flow field is studied numerically for swirl numbers ($S_g = 0.0-1.661$) and flow rate ratios ($Q^* = 0.2$ and 0.466) in unconfined and confined jet cases. The results show that increasing the flow rate ratio reduces the stagnation point and the average Nusselt numbers. The increasing swirl number at a high flow rate ratio causes large decreases in stagnation point and average Nusselt numbers compared to the low flow rate ratio. Despite the increase in swirl density, saddle-shaped profile is not observed that negatively affects uniform heat transfer.

Science Code : 91412

Key Words : Impinging jet, circular jet, swirl jet, combined impinging jet, flat plate, finned plate, computational fluid dynamics, heat transfer

Page Number : 211

Supervisor : Prof. Dr. Oğuz TURGUT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyip daima bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Oğuz TURGUT'a, zaman ve emek harcayarak çalışmalarına katkıda bulunan Tez İzleme Komitesi (TİK) üyelerim Sayın Doç. Dr. Kemal BİLEN ve Doç. Dr. Tamer ÇALIŞIR'a, ayrıca teknik desteklerinden dolayı teknik personel Sayın Yaşar GÜRAL'a teşekkürlerimi sunarım. Deneysel parçaların üretilmesini sağlayan Kılıç Grup Endüstri Makina San. ve Tic. A.Ş.'ye ve teknik desteklerinden dolayı Sayın Nuri, İsmail ve Abdullah KILIÇ'a teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan çalışma arkadaşlarıma da teşekkürü borç bilirim. Bu günlere gelmemi sağlayan, eğitim hayatım boyunca beni teşvik ve terbiye eden fedakâr aileme, bu zorlu süreçte gösterdikleri sabır ve destek için eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim.

Hazırlamış olduğum bu doktora tezi Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından FDK-2022-7402 proje kodu ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesi ve BAP birimi personeline teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Çarpmalı ve Serbest Jetlerle İlgili Temel Bilgileri.....	5
2.2. Literatür Araştırması	10
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
3.1. Deney Düzenegi ve Çalışma Şekli	31
3.2. Sıcaklık Ölçümleri ve Isı Akısından Bağımsızlık	44
3.3. Deney Setinin Kurulumu.....	47
3.4. Deneylerin Yapılışı ve Tekrarlanabilirlik	48
3.5. Ölçümler ile Hesaplamaların Yapılması.....	51
3.6. Belirsizlik Analizi.....	54
4. SAYISAL ÇALIŞMALAR	57
4.1. Dönen Çarpmalı Jetin Modellenmesi	57
4.1.1. Fiziksel ve matematiksel modellerin tanımlanması	57
4.1.2. Temel denklemler ve türbülans modelleri	58
4.1.3. Sınır şartları.....	61
4.1.4. Sayısal çözüm ve hücre sayısından bağımsızlık	62

	Sayfa
4.1.5. Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler	64
4.2. Birleşik Çarpmalı Jetlerin Modellenmesi.....	66
4.2.1. Fiziksel ve matematiksel modellerin tanımlanması	66
4.2.2. Sınır şartları.....	70
4.2.3. Sayısal çözüm ve hücre sayısından bağımsızlık	71
4.2.4. Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler	73
4.3. Farklı Girdap Numaralı Lülelerle Oluşturulan Birleşik Çarpmalı Jetlerin Modellenmesi	74
4.3.1. Fiziksel ve matematiksel modellerin tanımlanması	75
4.3.2. Sınır şartları.....	76
4.3.3. Sayısal çözüm ve hücre sayısından bağımsızlık	78
4.3.4. Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler	79
5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	81
5.1. Lüle Plaka Mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ Aralığı için Yapılan Çalışma Sonuçları	81
5.1.1. Dairesel lüle ve düz plakanın ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması.....	81
5.1.2. Eş eksenli dairese ve dörtlü helisel lülenin düz plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması	84
5.2. Lüle-Plaka Mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ Aralığı için Yapılan Çalışma Sonuçları	89
5.2.1. Eş eksenli dairese ve ikili helisel lülenin düz plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması	89
5.2.2. Eş eksenli dairese ve dörtlü helisel lülenin düz plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması	93
5.2.3. Eş eksenli birleşik lülelerin sınırlandırılmış jet durumunda düz plakadaki ısı transferlerinin karşılaştırılması.....	100
5.2.4. Eş eksenli dairese ve ikili helisel lüle ile kanatçık boyları 2 mm olan plakanın ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması	102
5.2.5. Eş eksenli dairese ve dörtlü helisel lülenin kanatçık boyları 2 mm olan plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması.....	106

Sayfa

5.2.6. Kanatçık boyları 2 mm olan plakada eş eksenli dairesel ve helisel lülelerin ısı transferi üzerine etkilerinin karşılaştırılması	113
5.2.7. Eş eksenli dairesel ve ikili helisel lülenin kanatçık boyları 6 mm olan plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması.....	115
5.2.8. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin kanatçık boyları 6 mm olan plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması.....	119
5.2.9. Kanatçık boyları 6 mm olan plakada eş eksenli dairesel ve helisel lülelerin ısı transferi üzerine etkilerinin karşılaştırılması	126
5.2.10. Eş eksenli dairesel ve helisel lülelerle tüm plakaların ısı transferi üzerine etkilerinin karşılaştırılması.....	128
6. SAYISAL ÇALIŞMA SONUÇLARI	133
6.1. Dönen Çarpmalı Jetle İlgili Sonuçlar	133
6.1.1. Türbülans modelleri ve hesaplama alanı yüksekliklerinin literatürle karşılaştırılması.....	133
6.1.2. Geometrik ve teorik girdap numarasının analizi.....	135
6.1.3. H/D 'nin Nu_x üzerine etkisi	136
6.1.4. Re 'nin Nu_x üzerine etkisi.....	138
6.1.5. H/D ve Re 'nin Nu üzerine etkisi	139
6.1.6. Teğetsel ve eksenel hızların incelenmesi	140
6.1.7. Hız alanı ve akım çizgilerinin incelenmesi	143
6.1.8. Re ve H/D 'nin basınç dağılımı üzerine etkisi	144
6.2. Bileşik Çarpma Jetlerde Lüle-Plaka Mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ Olduğu Aralıktaki Sayısal Çalışma Sonuçları	145
6.2.1. Isı transferiyle ilgili sonuçlar	145
6.2.2. Akış ve basınç alanıyla ilgili sonuçlar.....	147
6.3. Birleşik Çarpmalı Jetlerde Lüle-Plaka Mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ Olduğu Aralık İçin Sayısal Çalışma Sonuçları.....	157
6.3.1. Isı transferi ve akış alanıyla ilgili sonuçlar	158
6.3.2. Basınç alanıyla ilgili sonuçlar	165

Sayfa

6.4. Farklı Girdap Numaralı Lülelerle Oluşturulan Birleşik Çarpmalı Jetlerin Sayısal Sonuçları.....	167
6.4.1. Isı transferiyle ilgili sonuçlar	167
6.4.2. Akış alanıyla ilgili sonuçlar.....	174
6.4.3. Basınç alanıyla ilgili sonuçlar	179
7. DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALARIN KIYASLANMASI.....	183
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	187
KAYNAKLAR.....	193
EKLER.....	203
EK-1. Plaka ve Lülelerin Üretim Aşamasındaki Fotoğrafları.....	204
EK-2. Çarpma Plakasına Aktarılan Net Isı Akısı ile İlgili Örnek Hesaplama	205
EK-3. Belirsizlik Analizi ile İlgili Örnek Hesaplama	207
ÖZGEÇMİŞ	211

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Kompresörün özellikleri	34
Çizelge 3.2. Nem tutucunun özellikleri	35
Çizelge 3.3. Debimetrenin özellikleri	36
Çizelge 3.4. Isıl çiftlerin özellikleri	37
Çizelge 3.5. Birleşik lüle ve lüle tutucunun geometrik ölçüleri	41
Çizelge 3.6. Çarpma plakası ve engelleyici plakanın geometrik ölçüleri.....	43
Çizelge 4.1. Dönen çarpmalı jetin geometrik ölçüleri	57
Çizelge 4.2. Dönen çarpmalı jetin sınır şartları	62
Çizelge 4.3. Dönen çarpmalı jetin hücre sayısından bağımsızlığı	64
Çizelge 4.4. Birleşik çarpmalı jetin geometrik ölçüleri	67
Çizelge 4.5. Boyutsuz lüle-plaka mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ olduğu aralıkta çalışılan parametreler ve değerleri	68
Çizelge 4.6. Boyutsuz lüle-plaka mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ olduğu aralıkta çalışılan parametreler ve değerleri	68
Çizelge 4.7. Türbülans modeli sabitleri	70
Çizelge 4.8. Birleşik çarpmalı jetin sınır şartları	71
Çizelge 4.9. Birleşik çarpmalı jetlerin hücre sayısından bağımsızlığı.....	72
Çizelge 4.10. Farklı girdap numaralı birleşik çarpmalı jetin geometrik parametre değerleri.....	76
Çizelge 4.11. Farklı girdap numaralı lülelerle oluşturulan birleşik çarpmalı jetlerde çalışılan parametre değerleri	76
Çizelge 4.12. Farklı girdap numaralı lülelerle oluşturulan birleşik çarpmalı jetin sınır şartları.....	77
Çizelge 4.13. Farklı girdap numaralı lülelerle oluşturulan birleşik çarpmalı jetin hücre sayısından bağımsızlığı	78
Çizelge 5.1. Dairesel çarpmalı jette SM durumuna göre S durumundaki ısı transferi düşüşünün (λ) yüzde değerleri	83

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.2. Dairesel jette H/D 'ye bağlı olarak SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri.....	83
Çizelge 5.3. DDHJ'de SM durumuna göre S durumunda meydana gelen ısı transferi düşüşünün (λ) yüzde olarak değerleri	86
Çizelge 5.4. DDHJ için SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri.....	86
Çizelge 5.5. DİHJ'de SM ve S durumlarında $Q^* = 0,352$ için üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri	91
Çizelge 5.6. DİHJ için S durumunda farklı H/D ve Q^* 'lara göre üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri	93
Çizelge 5.7. DDHJ için farklı toplam debilerde SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri.....	98
Çizelge 5.8. DDHJ için S durumunda farklı H/D ve Q^* 'lara göre üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri	100
Çizelge 5.9. DİHJ ile DDHJ'nin S durumunda farklı H/D ve Q^* 'lara göre üniform ısı transferi değerlerinin (Ψ) yüzde olarak karşılaştırılması.....	102
Çizelge 5.10. DİHJ ile P2'nin SM ve S durumlarında farklı H/D ve Q^* 'lara göre üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri.....	106
Çizelge 5.11. DDHJ için farklı toplam hacimsel debilerde SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri.....	111
Çizelge 5.12. DDHJ'nin farklı debi oranlarında SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri	113
Çizelge 5.13. DİHJ, DÜHJ ve DDHJ'nin P2'deki üniform ısı transferlerinin (Ψ) değerleri	115
Çizelge 5.14. DİHJ için SM ve S durumlarında farklı H/D ve Q^* 'lara göre üniform ısı transferlerinin (Ψ) yüzde olarak değerleri	119
Çizelge 5.15. DDHJ ve P6'nın farklı Q_t 'lerde SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferlerinin (Ψ) yüzde olarak değerleri	123
Çizelge 5.16. DDHJ ile P6'nın farklı Q^* 'larda SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferlerinin (Ψ) yüzde olarak değerleri	126
Çizelge 5.17. DİHJ, DÜHJ ile DDHJ'nin P6'daki üniform ısı transferlerinin (Ψ) $Q^* = 0,352$ için yüzde olarak değerleri	128
Çizelge 6.1. DJ'de çarpma plakası üzerindeki akış hacmini dolduran akışkanın ortalama sıcaklığı (T_{ort} °C)	147

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.2. SM durumuna göre S durumundaki ısı transferi düşüşünün (λ) yüzde değerleri.....	169
Çizelge 6.3. Hacimsel debi oranındaki artışla ısı transferindeki yüzde düşüş değerleri.....	170
Çizelge 6.4. SM ve S durumlarında meydana gelen üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri.....	172



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tez kapsamında incelenen birleşik çarpmalı jetler	2
Şekil 2.1. Serbest jetin akış bölgeleri	5
Şekil 2.2. Dönen jetin akış bölgeleri	7
Şekil 2.3. Dönmeli jetlerin üretim yöntemleri (a) bükümlü bantlı lüle, (b) helisel kanallı lüle, (c) aerodinamik tasarımı lüle ve (d) motor tahrikli lüle	8
Şekil 2.4. Çarpmalı jetin akış bölgeleri: (a) eksenel simetrik akış, (b) dönmeli akış	10
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin fotoğrafları	31
Şekil 3.2. Deney sisteminin şematik çizimi	32
Şekil 3.3. Birleşik lülenin kesitli görünümü	33
Şekil 3.4. Deneyde kullanılan kompresörün fotoğrafı	33
Şekil 3.5. Deneyde kullanılan nem alıcının fotoğrafı	34
Şekil 3.6. Deneyde kullanılan hassas hız ayar vanasının fotoğrafı	35
Şekil 3.7. Deneyde kullanılan debimetrenin fotoğrafı	36
Şekil 3.8. K tipi ısı çift ve kaynak makinesinin fotoğrafı	37
Şekil 3.9. DC güç sağlayıcının fotoğrafı	37
Şekil 3.10. Veri kaydedicinin fotoğrafı	38
Şekil 3.11. Isıtıcının fotoğrafı	38
Şekil 3.12. Isıtıcının termal kamera ile çekilen görüntüleri (a) ve (b) ilk testlerinin, (c) son testinin	39
Şekil 3.13. Deneyde kullanılan birleşik lülelerin, lüle tutucunun ve engelleyici plakanın fotoğrafları (a)-(c) eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel, üçlü helisel, ikili helisel lülelerin alttan görünümü, (d) birleşik lülelerin önden görünümü, (e) lüle tutucu, (f) engelleyici plaka	40
Şekil 3.14. Birleşik lüle ve lüle tutucunun geometrik parametreleri (a) lüle ve lüle tutucunun kesitli görünümü, (b) birleşik lüle, (c)-(e) sırasıyla eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel, üçlü helisel, ikili helisel lülenin alttan görünümü	41

Şekil	Sayfa
Şekil 3.15. Deneyde kullanılan çarpma plakaları (a) düz çarpma plakası, (b) ve (c) kanatçık boyları 2 ve 6 mm olan çarpma plakaları, (d) çarpma plakasının alttan görünümü.....	42
Şekil 3.16. Çarpma ve engelleyici plakaların geometrik parametreleri (a) ve (b) çarpma plakasının önden ve üstten görünümü, (c) engelleyici plakanın önden görünümü.....	43
Şekil 3.17. Isıl çiftlerin çarpma plakasına yerleşimi.....	45
Şekil 3.18. Isı kayıpları ve ısı kayıpları için sıcaklık ölçüm yerlerinin şematik görünümü.....	45
Şekil 3.19. Düz plakada kanallara göre sıcaklık dağılımı (a) DJ ile SM durumu, (b) DİHJ ile S durumu.....	46
Şekil 3.20. Nu_o ve Nu 'nun farklı ısı akıları ile değişimi	47
Şekil 3.21. Çarpma plakası ve ısıtıcının yerleşim fotoğrafları.....	48
Şekil 3.22. Deneylerin tekrarlanabilirliği.....	51
Şekil 4.1. Dönen çarpmalı jet ve geometrik parametreleri	57
Şekil 4.2. Dönen çarpmalı jetin sınır şartları	62
Şekil 4.3. Dönen çarpmalı jetin ağ yapısı	63
Şekil 4.4. (a) Birleşik çarpmalı jetin üç boyutlu görünümü, (b) birleşik çarpmalı jetin geometrik parametreleri, (c) eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin alttan görünümü, (d) birleşik lülenin önden görünümü.....	67
Şekil 4.5. Birleşik çarpmalı jetin sınır şartları (a) sınırlandırılmamış jet durumu, (b) sınırlandırılmış jet durumu.....	71
Şekil 4.6. (a) Birleşik çarpmalı jetin örnek hücre ağ yapısı, (b) kanatçıkların hücre ağ yapısı.....	73
Şekil 4.7. Birleşik çarpmalı jet (a) $S_g = 0,0$ olan birleşik çarpmalı jetin üç boyutlu görünümü, (b) birleşik lülenin alttan görünümü, (c) birleşik lülenin girdap açısı, (d) $S_g = 1,661$ olan birleşik çarpmalı jetin görünümü ve geometrik parametreleri	75
Şekil 4.8. Farklı girdap numaralı birleşik çarpmalı jetin sınır şartları (a) sınırlandırılmamış jet durumu, (b) sınırlandırılmış jet durumu	77
Şekil 4.9. (a) Girdap numarası $S_g = 0,0$ ve (b) $S_g = 1,661$ olan birleşik çarpmalı jetlerin örnek hücre ağ yapısı	79

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Dairesel jet ile düz plakanın ısı transferi üzerine etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$, (c) Nu_r-H/D	81
Şekil 5.2. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler ile düz plakanın ısı transferine etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$ değişimi.....	84
Şekil 5.3. DDHJ ile düz plakanın SM ve S durumlarında Nu_r dağılımına etkileri (a) $H/D = 0,1$, (b) $H/D = 0,2$, (c) $H/D = 0,3$, (d) $H/D = 0,4$	88
Şekil 5.4. Deneysel değerlerin korelasyonla tahmin edilen Nu değerleriyle karşılaştırılması	89
Şekil 5.5. DİHJ ile düz plakanın ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$, (c) Nu_r-r^*	90
Şekil 5.6. DİHJ ile düz plakanın farklı Q^* 'lar için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	91
Şekil 5.7. DİHJ ile düz plakanın S durumunda farklı H/D 'lerde Q^* 'ın Nu_r üzerine etkisi (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$	92
Şekil 5.8. DDHJ ile düz plakanın ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$, (c) Nu_r-r^* değişimi.....	94
Şekil 5.9. DDHJ ile düz plakanın farklı Q^* 'lar için S durumunda ısı transferi üzerine etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$ değişimi	95
Şekil 5.10. DDHJ ile düz plakanın farklı Q_t 'ler için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	96
Şekil 5.11. DDHJ ile düz plakanın farklı Q_t ve H/D 'ler için radyal mesafe boyunca Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$ (c) $H/D = 2,4$ (d) $H/D = 3,2$	97
Şekil 5.12. DDHJ ile düz plakanın S durumunda farklı Q^* 'lar için Nu_r dağılımına etkileri (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$	99
Şekil 5.13. DİHJ ile DDHJ'nin düz çarpma plakasında farklı Q^* ve H/D 'lere bağlı olarak ısı transferlerinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	101
Şekil 5.14. DİHJ ile P2'nin farklı Q^* 'lar için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	103
Şekil 5.15. $Q^* = 0,352$ için DİHJ ile P2'nin SM ve S durumlarında Nu_r dağılımına etkileri.....	104
Şekil 5.16. DİHJ ile P2'nin SM ve S durumlarında farklı Q^* 'lar için Nu_r dağılımına etkileri (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$	105

Şekil	Sayfa
Şekil 5.17. DDHJ ile P2'nin farklı Q^* 'larda ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$ değişimi	107
Şekil 5.18. DDHJ ile P2'nin farklı Q_t 'lerde ısı transferine etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	108
Şekil 5.19. $Q^* = 0,352$ için DDHJ ile P2'nin SM ve S durumlarında Nu_r dağılımına etkileri.....	109
Şekil 5.20. DDHJ ile P2'nin farklı toplam hacimsel debilerde sabit hacimsel debi oranı $Q^* = 0,5$ için Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$	110
Şekil 5.21. DDHJ ile P2'nin farklı hacimsel debi oranlarında SM ve S durumları için Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$	112
Şekil 5.22. DİHJ, DÜHJ ve DDHJ'nin P2'de farklı Q^* 'lar için ısı transferlerinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	114
Şekil 5.23. DİHJ ile P6'nın farklı Q^* 'lar için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	116
Şekil 5.24. DİHJ ile P6'nın farklı Q^* 'larda Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$	118
Şekil 5.25. DDHJ ile P6'nın farklı Q^* 'lar için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	120
Şekil 5.26. DDHJ ile P6'nın farklı toplam hacimsel debiler için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	121
Şekil 5.27. DDHJ ile P6'nın farklı toplam hacimsel debilerde sabit hacimsel debi oranı $Q^* = 0,5$ için Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$	122
Şekil 5.28. DDHJ ile P6'nın farklı hacimsel debi oranlarında SM ve S durumları için Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$	125
Şekil 5.29. DİHJ, DÜHJ ve DDHJ'nin P6'da ısı transferlerinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	127
Şekil 5.30. DİHJ'nin P0, P2 ve P6'daki ısı transferlerinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	129
Şekil 5.31. DDHJ'nin P0, P2 ve P6'daki ısı transferlerinin karşılaştırılması, (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	130

Şekil	Sayfa
Şekil 5.32. DDHJ'nin P0, P2 ve P6'da farklı toplam hacimsel debilerdeki ısı transferleri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	131
Şekil 6.1. Türbülans modellerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (a) a yüksekliği, (b) $2a$ yüksekliği.....	134
Şekil 6.2. a , $2a$ ve $3a$ hesaplama alanı yüksekliklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	135
Şekil 6.3. Re ve H/D 'ye bağlı olarak S_m ve S_g 'nin değişimi	136
Şekil 6.4. Farklı H/D 'lerde Nu_x 'in x/D boyunca değişimi (a) $Re = 8\ 100$, (b) $Re = 2\ 100$, (c) $Re = 4\ 100$, (d) $Re = 6\ 100$	137
Şekil 6.5. Farklı Re 'lerde Nu_x 'in x/D boyunca değişimi (a) $H/D = 1$, (b) $H/D = 0,25$, (c) $H/D = 0,75$, (d) $H/D = 0,5$	139
Şekil 6.6. Farklı H/D ve Re 'lerde x/D boyunca Nu 'nun değişimi	140
Şekil 6.7. Farklı y mesafelerindeki teğetsel hızın dağılımı (a) $H/D = 1$, (c) $H/D = 0,25$ ve eksenel hızın dağılımı (b) $H/D = 1$, (d) $H/D = 0,25$	141
Şekil 6.8. Lüle çıkış kesitindeki teğetsel hız vektörleri $Re = 8\ 100$ için (a) ve (b) $H/D = 1$ ve $0,25$, $Re = 2\ 100$ için (c) ve (d) $H/D = 1$ ve $0,25$	142
Şekil 6.9. Akım çizgileri ve hız konturları $Re = 8\ 100$ için (a) ve (b) $H/D = 1$ ve $0,25$, $Re = 2\ 100$ için (c) ve (d) $H/D = 1$ ve $0,25$	143
Şekil 6.10. x/D boyunca basınç dağılımı (a) $Re = 8\ 100$, (b) $Re = 2\ 100$, (c) $H/D = 1$, (d) $H/D = 0,25$	144
Şekil 6.11. DJ için farklı H/D 'lerde SM ve S durumlarında çarpma plakasında oluşan sıcaklık konturları	146
Şekil 6.12. DDHJ için farklı H/D 'lerde SM ve S durumlarında çarpma plakasında oluşan sıcaklık konturları	146
Şekil 6.13. DJ ve DDHJ için SM ve S durumlarında çarpma plakası üzerinde meydana gelen basınç düşüşü.....	148
Şekil 6.14. DDHJ'nin $Q^* = 0,352$ 'de plaka üzerindeki belli radyal mesafeler için radyal yöndeki hız dağılımı (a) ve (c) SM durumu, (b) ve (d) S durumu	149
Şekil 6.15. Farklı H/D 'ler için SM ve S durumlarında çarpma plakası üzerinde meydana gelen basınç dağılımları (a) DJ, (b) DDHJ	151
Şekil 6.16. DDHJ için farklı boyutsuz mesafelerde SM ve S durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri	152
Şekil 6.17. DJ'de farklı H/D 'ler için SM ve S durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri	154

Şekil	Sayfa
Şekil 6.18. S durumunda DDHJ için akım çizgileri, hız ve çarpma plakasının sıcaklık konturları	155
Şekil 6.19. SM durumunda DDHJ için akım çizgileri, hız konturları ve çarpma plakasının sıcaklık konturu.....	157
Şekil 6.20. DİHJ’de farklı H/D ’ler için SM ve S durumlarında P2’de oluşan sıcaklık konturları	159
Şekil 6.21. DİHJ ile P2’nin farklı H/D ’lerde SM ve S durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri	160
Şekil 6.22. DDHJ için farklı H/D ’lerde SM ve S durumlarında P6’da oluşan sıcaklık konturları	162
Şekil 6.23. DDHJ ile P6’nın farklı H/D ’lerde SM ve S durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri	164
Şekil 6.24. P2 üzerinde farklı H ’lerde meydana gelen basınç düşüşü	166
Şekil 6.25. P6 üzerinde farklı H ’lerde meydana gelen basınç düşüşü	166
Şekil 6.26. Farklı girdap numaralı DDHL’nin SM ve S durumlarında Nu_o ’a etkisi (a) $Q^* = 0,2$, (b) $Q^* = 0,466$ ve Nu ’ya etkisi (c) $Q^* = 0,2$, (d) $Q^* = 0,466$	168
Şekil 6.27. Farklı girdap numaralı DDHL’nin Nu_r dağılımına etkisi SM durumunda (a) $Q^* = 0,2$, (c) $Q^* = 0,466$ ve S durumunda (b) $Q^* = 0,2$, (d) $Q^* = 0,466$	171
Şekil 6.28. Farklı girdap numaralı DDHL için SM ve S durumlarındaki sıcaklık konturları	173
Şekil 6.29. $S_g = 0,0$ olan DDHL için plaka üzerindeki belli radyal mesafelerde radyal yöndeki hız dağılımı: SM durumunda (a) $Q^* = 0,2$, (c) $Q^* = 0,466$, S durumunda (b) $Q^* = 0,2$, (d) $Q^* = 0,466$	175
Şekil 6.30. $S_g = 1,661$ olan DDHL için plaka üzerindeki belli radyal mesafelerde radyal yöndeki hız dağılımı: SM durumunda (a) $Q^* = 0,2$, (c) $Q^* = 0,466$, S durumunda (b) $Q^* = 0,2$, (d) $Q^* = 0,466$	176
Şekil 6.31. Farklı girdap numaralı DDHL’nin SM ve S durumlarında $Q^* = 0,2$ ’deki hız konturları ve akım çizgileri	178
Şekil 6.32. Farklı girdap numaralı DDHL’nin SM ve S durumlarında $Q^*=0,466$ ’daki hız konturları ve akım çizgileri	178
Şekil 6.33. Farklı girdap numaralı eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin SM ve S durumlarında basınç düşüşüne etkisi (a) $Q^* = 0,2$, (b) $Q^* = 0,466$	180

Şekil	Sayfa
Şekil 6.34. Farklı girdap numaralı DDHL'nin SM ve S durumlarında radyal mesafe boyunca basınç dağılımı: (a) $Q^* = 0,2$, (b) $Q^* = 0,466$	181
Şekil 7.1. DJ ile P0'da deneysel ve sayısal çalışmanın farklı H/D 'ler için Nu_r dağılımının karşılaştırılması (a) SM durumu, (b) S durumu	183
Şekil 7.2. DDHJ ile P0'da deneysel ve sayısal çalışmanın farklı H/D 'ler için T_r dağılımının karşılaştırılması (a) SM durumu, (b) S durumu	184
Şekil 7.3. DİHJ ile P2'de deneysel ve sayısal çalışmanın farklı H/D 'lerde ısı transferinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	185
Şekil 7.4. DDHJ ile P6'da deneysel ve sayısal çalışmanın farklı H/D 'lerde ısı transferinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$	186

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_1	Dairesel lülenin kesit alanı (m^2)
A_2	Helisel giriş 2'nin kesit alanı (m^2)
A_p	Isıtıcı ve çarpma plakasının yüzey alanı (m^2)
D	Birleşik lülelerin çapı (mm)
D_1	Dairesel lülenin çapı (mm)
D_2	Lüle tutucudan helisel kısımlara giriş için açılan deliğin çapı (mm)
D_3	Çarpma plakasının çapı (mm)
D_3	Çarpma plakasının çapı (mm)
D_4	Engelleyici plakanın çapı (mm)
e	Helisel kanalların genişliği (mm)
H	Lüle-plaka mesafesi (mm)
h	Ortalama ısı taşınım katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)
H/D	Boyutsuz lüle-plaka mesafesi (-)
h_o	Durma noktası ısı taşınım katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)
h_r	Yerel ısı taşınım katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)
k	Isıl iletkenlik katsayısı ($W/m \cdot K$)
k_b	Bakırın ısı iletkenlik katsayısı ($W/m \cdot K$)
k_y	Taş yünü ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
Nu	Ortalama Nusselt sayısı (-)
Nu_o	Durma noktası Nusselt sayısı (-)
Nu_r	Yerel Nusselt sayısı (-)
P	Isıtıcıya verilen güç (W)
P_a	Atmosferik basınç (Pa)
P_m	Çarpma plakası üzerindeki ortalama basınç (Pa)
P_p	Çarpma plakası üzerindeki yerel basınç (Pa)
q	Çarpma plakasına aktarılan net ısıl güç (W)
q''	Çarpma plakasına sağlanan net ısı akısı (W/m^2)

Simgeler**Açıklamalar**

Q^*	Hacimsel debi oranı (-)
q_a	Alt yüzeyden iletimle olan ısı kaybı (W)
Q_d	Dairesel kısmın hacimsel debisi (L/dk)
Q_h	Helisel kısmın toplam hacimsel debisi (L/dk)
Q_t	Toplam hacimsel debi (L/dk)
q_y	Yan yüzeyden iletimle olan ısı kaybı (W)
r	Radyal mesafe (mm)
r^*	Boyutsuz radyal mesafe (-)
r_d	Helisel kanalın dış yarıçapı (mm)
r_i	Helisel kanalın iç yarıçapı (mm)
S	Girdap numarası (-)
S_g	Geometrik girdap numarası (-)
S_m	Teorik girdap numarası (-)
T	Çarpma plakasının ortalama sıcaklığı (°C)
$T_ç$	Çevre sıcaklığı (°C)
T_j	Dönen çarpmalı jette havanın lüleye giriş sıcaklığı (°C)
T_o	Durma noktası sıcaklığı (°C)
T_{ort}	Çarpma plakası üzerindeki akış hacmini dolduran akışkanın ortalama sıcaklığı (°C)
T_r	Çarpma plakasındaki yerel sıcaklık (°C)
T_x	Dönen çarpmalı jette plaka üzerinde oluşan yerel sıcaklık (°C)
U_r	Çarpma plakası üzerinde radyal yöndeki hız (m/s)
V	Eksenel hız (m/s)
v_1	Dairesel kısma tanımlanan havanın hızı(m/s)
v_2	Helisel kısma tanımlanan havanın hızı (m/s)
V_t	Teğetsel hız (m/s)
x/D	boyutsuz x-ekseni mesafesi (-)
z/D	boyutsuz z-ekseni mesafesi (-)
λ	Sınırlandırılmamış jet durumuna göre sınırlandırılmış jet durumunda meydana gelen ısı transferi düşüşü (-)

Simgeler **Ψ** **Açıklamalar**

Üniform ısı transferi (-)

Kısaltmalar**Açıklamalar****DDHJ**

Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler

DDHL

Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüle

DİHJ

Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler

DJ

Dairesel jet

DÜHJ

Eş eksenli dairesel ve üçlü helisel jetler

P0

Düz çarpma plakası

P2

Kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakası

P6

Kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakası

S

Sınırlandırılmış jet

SM

Sınırlandırılmamış jet

1. GİRİŞ

Günümüzde soğutma, birçok sektör için hayati öneme sahiptir. Elektronik cihazlar, güneş panelleri, türbin kanatları ve veri merkezleri gibi sistemlerin performansını ve ömrünü korumak için etkin soğutma gereklidir; aşırı ısınma, cihazların arızalanmasına yol açabilir. Endüstriyel alanda metal işleme, cam üretimi ve plastik kalıplama gibi süreçlerde soğutma, ürün kalitesini ve verimliliğini artırır. Teknoloji ilerledikçe ve yüksek performanslı güvenilir sistemlere olan talep arttıkça, etkili soğutma çözümlerinin önemi de artmakta ve bu alanda yeniliklere ve gelişmelere teşvik etmektedir.

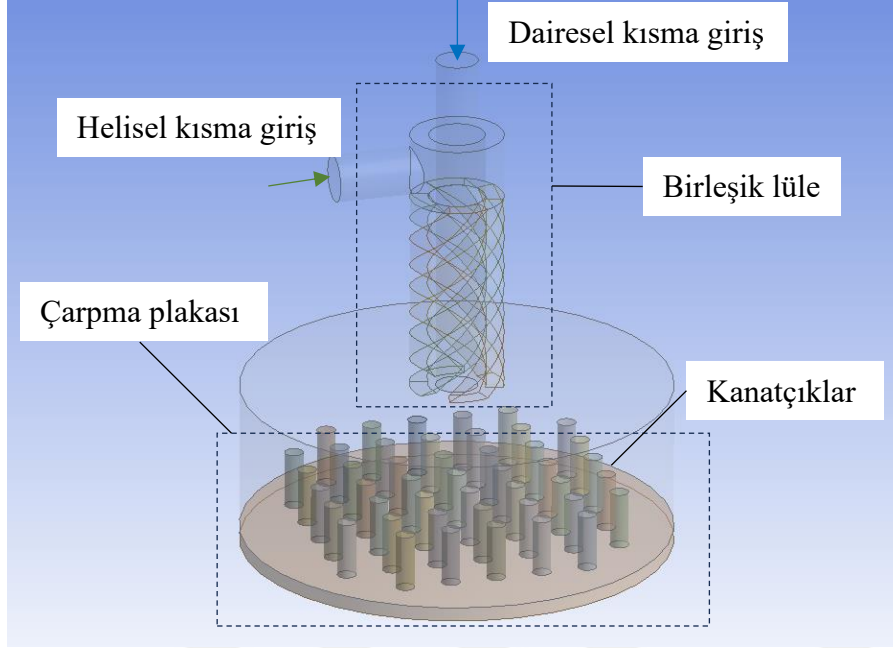
Çarpmalı jetler, yüksek ısı akısının uzaklaştırılması ve üniform ısı transferi sağlamak için umut verici soğutma tekniklerinden birisidir. Endüstride elektronik ekipmanların [1, 2] türbin kanatlarının soğutulması [3, 4] uçuş güvenliği için kanatlardaki buzun çözülmesi [5], gıdaların [6], tekstil ürünlerinin [7, 8] ve kâğıtların kurutulması, camın ve metallerin [9, 10] temperlenmesi gibi çeşitli uygulama alanlarına sahiptirler. Geniş uygulama alanları ve endüstride duyulan ihtiyaçtan dolayı, çarpmalı jetler araştırmacıların odaklandıkları konular arasında yer almaktadır.

Lüle geometrisi veya hava akışının lülede yönlendirilmesine bağlı olarak üretilen jetlerin soğutulmak istenen yüzeye püskürtülmesiyle oluşturulan farklı çarpmalı jet tipleri literatürde mevcuttur. Bu çarpmalı jetler aksel simetrik çarpmalı jetler [11-15] (dairese, yarıklı vb.), sadece dönen çarpmalı jetler [16-21], halkalı çarpmalı jetler [22, 23], eş aksenli hem dairese hem halkalı çarpmalı jetler [24, 25], eş aksenli hem dairese hem dönen çarpmalı jetler [26-29] olarak sınıflandırılabilir. Bu çarpmalı jetler hem birbirlerinden hem de çarpma plakasının bulunmadığı kendi serbest jet durumlarından farklı akış dinamiğine sahiptirler. Bahsedilen çarpmalı jetlerin akış alanı, ısı transferi ve türbülans yoğunlukları lüle geometrine, çoklu lüle kullanımına, lülenin çarpma plakasına göre konumuna (dik ya da açılı konumlandırılması), lüle-plaka mesafesine, çarpma plakası geometrisine, debi miktarına, farklı soğutma akışkanlarına, jetin sınırlandırılmasına ve dönen akışlar için dönme yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak değişir.

Çarpmalı jetlerin en önemli avantajlarından birisi; dar bir yüzey alanından yüksek ısı akısını uzaklaştırabilme ve üniform ısı transferi sağlayabilme olanağına sahip olmalarıdır.

Elektronik kartlar ve bilgisayar işlemcileri gibi yüksek ısı akısı üreten ve üniform ısı transferi istenen elektronik elemanların soğutulması çarpmalı jet teknolojisiyle de mümkündür.

Şekil 1.1’de bu tez kapsamında incelenen birleşik çarpmalı jetler gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Tez kapsamında incelenen birleşik çarpmalı jetler

Mevcut tez kapsamında farklı çarpmalı jetler ile farklı çarpma plakalarının ısı transferi ve akış alanı üzerine etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Düşük lüle-plaka mesafesinde eksenel simetrik (dairesel) jet, düşük lüle-plaka mesafesinde dönen çarpmalı jet, birleşik çarpmalı jetler ve farklı girdap numaralı birleşik çarpmalı jetler çalışılmıştır. Çalışılan parametreler çalışmadan çalışmaya farklılık göstermekle birlikte genel olarak boyutsuz-lüle plaka mesafesi (H/D), toplam hacimsel debi (Q_t), hacimsel debi oranı (Q^*), lüle geometrisi, çarpma plakası geometrisi, sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış jet durumlarıdır.

Mevcut tez kapsamında ilk olarak, literatürde çalışma ve sonuçları itibariyle az bulunan düz plakaya çarptırılan dairesel jet, sınırlandırılmamış jet ve sınırlandırılmış jet durumları için düşük lüle-plaka mesafesinde deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır. Toplam hacimsel debi 85 L/dk’da sabit tutulmuştur. $H/D = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$ olarak seçilmiştir. Çarpma plakasına paralel olacak şekilde bir engelleyici plaka eklenerek sınırlandırılmış jet durumu meydana getirilmiştir. Sınırlandırılmamış jet ve sınırlandırılmış jet durumlarının düşük lüle-plaka

mesafesi için sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak sunulmuş ve literatüre katkıda bulunulmuştur.

İkinci olarak, dönen çarpmalı jet ile düz plakanın ısı transferi ve akış alanı düşük lüle-plaka mesafesinde sayısal olarak çalışılmıştır. Daha önce düşük-lüle mesafesi için dönen çarpmalı jette literatürde çalışılmayan çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanı yüksekliğinin ısı transferi üzerine etkisi literatürle [16] karşılaştırılarak incelenmiştir. Üç farklı hesaplama alanı yüksekliğinin ikisi altı farklı türbülans modeliyle çalışılmış olup, üçüncüsü ise hesaplama alanı yüksekliğinin yeterli olup olmadığını test etmek için kullanılmıştır. Daha sonra farklı Reynolds sayıları ($Re = 2,1 \times 10^3, 4,1 \times 10^3, 6,1 \times 10^3, 8,1 \times 10^3$) ve boyutsuz düşük lüle-plaka mesafeleri ($H/D = 0,25, 0,5, 0,75, 1,0$) için ısı transferi ve akış alanı parametrik olarak çalışılmıştır.

Üçüncü olarak, birleşik lülelerle üretilen hem dairesel hem helisel jete (dönen jete) sahip olan birleşik çarpmalı jetler farklı çarpma plakaları, lüle-plaka mesafeleri, toplam hacimsel debi miktarları, hacimsel debi oranları ve sınırlandırılmış jet durumları için deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır. Birleşik çarpmalı jetler üç farklı birleşik lüleden üretilmiştir. Bunlar: *i*) eş eksenli dairesel ve ikili helisel lüle, *ii*) eş eksenli dairesel ve üçlü helisel lüle, *iii*) eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüledir. Çarpma plakası olarak bir adet düz, iki adet farklı kanatçık boylarına sahip pim-kanatçıklı çarpma plakası kullanılmıştır. İki farklı lüle-plaka mesafe aralığı ($0,1 \leq H/D \leq 0,4$ ve $0,8 \leq H/D \leq 3,2$) için çalışma yapılmıştır. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,176, 0,235, 0,352, 0,5, 0,588, 0,823$ olarak seçilmiştir. Toplam hacimsel debi miktarı $Q_t = 85, 80, 70, 60$ L/dk olarak belirlenmiştir. Çalışma birleşik çarpmalı jet ile düz plakanın deneysel ve sayısal olarak düşük lüle-plaka mesafesinde sınırlandırılmamış jet ve sınırlandırılmış jet durumunu kapsamıyla özgündür. Diğer taraftan birleşik çarpmalı jetler ile kanatçıklı plakaların sınırlandırılmamış jet ve sınırlandırılmış jet durumunu için ısı transferi ve akış alanının deneysel ve sayısal olarak araştırılması çalışmanın diğer bir özgün yönüdür.

Son olarak, farklı girdap numaralı birleşik lüleler ile düz plakanın ısı transferi ve akış alanına etkisi farklı geometrik girdap numaraları ($S_g = 0,0, 0,275, 0,551, 0,828, 1,661$) ve hacimsel debi oranları ($Q^* = 0,2$ ve $0,466$) için sınırlandırılmamış jet ve sınırlandırılmış jet durumunda sayısal olarak çalışılmıştır. Boyutsuz lüle-plaka mesafesi $H/D = 1$ 'de, toplam hacimsel debi miktarı $Q_t = 75$ L/dk'da sabit tutulmuştur. Birleşik çarpmalı jette girdap

numarası ve hacimsel debi oranının ısı transferi ve akış alanına üzerine etkisinin araştırılması çalışmanın özgün yönünü oluşturur.

Çalışmaların neticesinde üniform ısı transferi sağlayabilen birleşik çarpmalı jetlerin hem düz plaka hem de kanatçıklı plaka ile olan konfigürasyonları gerekli düzenlemelerden sonra elektronik elemanların soğutulması için tavsiye edilebilir olduğu görülmüştür.



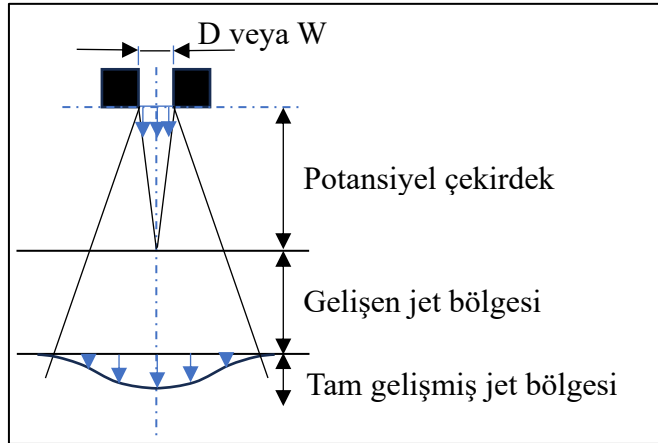
2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde çarpmalı jetler ve çarpmalı jetlerin anlaşılmasına yardımcı olan serbest jetlerle ilgili temel bilgiler ve literatür araştırması verilmiştir.

2.1. Çarpmalı ve Serbest Jetlerle İlgili Temel Bilgileri

Eksenel simetrik jetlerin serbest akış yapısı

Eksenel serbest jet (daireysel veya yarıklı jet), akışkanda herhangi bir döndürme olmadan lüle aracılığıyla durgun bir ortam akışkanına püskürtülen jeti ifade eder. Lüleden çıkan jet durgun çevredeki ortam akışkanı sürükleyerek içine alır. Bu durum jetle çevre akışkanının karışmasına neden olur. Serbest jet lüleden uzaklaştıkça radyal yönde genişleme gösterir. Bu akış karakteristiği, jetin sahip olduğu momentumunu ve enerjisini viskoz kayıplara bağlı olarak kaybedene kadar devam eder. Şekil 2.1’de eksenel serbest jetin temel akış bölgeleri görülmektedir. Serbest jet bölgeleri potansiyel çekirdek bölgesi, gelişen jet bölgesi ve gelişmiş jet bölgesi olarak üçe ayrılır [30].



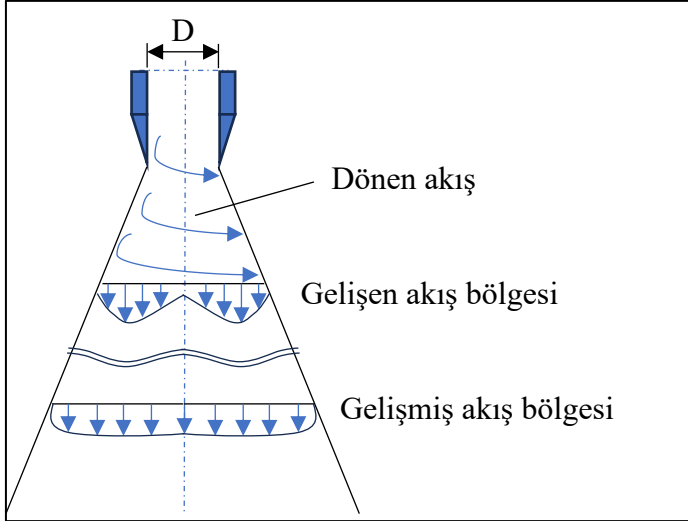
Şekil 2.1. Serbest jetin akış bölgeleri

Lüleden çıkan serbest jet ortam akışkanıyla sürtünmesi sonucunda konik şekilli ve potansiyel çekirdeğe sahip hız profilini oluşturur. Çekirdek bölgesindeki akışın viskoz etkileri ihmal edilmesinden dolayı bu bölge potansiyel çekirdek bölgesi olarak adlandırılır. Potansiyel çekirdek bölgesindeki jetin hızı, lüle çıkışındaki jetin hızına eşittir. Jetin lüleden uzaklaşmasıyla serbest jet genişlemeye, potansiyel çekirdek bölgesi daralmaya başlar. Potansiyel çekirdeğin uzunluğu lüle çıkış hızının profiline ve türbülans yoğunluğuna bağlı

olarak değişlik gösterir. Eksenel simetrik jetlerde potansiyel çekirdeğin uzunluğu lüle çıkışından $6-7D$ lüle çapı kadar mesafeye uzadığı görülürken, yarıklı jetlerde $4,7-7,7W$ yarıklı genişliğinde olduğu bildirilmiştir [31]. Ayrıca farklı çalışmalarda potansiyel çekirdeğin uzunluğunun $2,5-8D$ lüle çapı kadar bir mesafeye eşit olduğu ifade edilmiştir [32, 33]. Diğer yandan jet hızının, jet çıkış hızının $0,95$ katı olduğu nokta da potansiyel çekirdek uzunluğunun bitişı olarak kabul edilmiş [34] ve bu uzunluğun $6D$ lüle çapı kadar olduğu ifade edilmektedir [35]. Daha sonraki çalışmalarda da bu değer kabul görmüştür [36]. Gelişen jet bölgesi, jet sınırında büyük kesme gerilmelerinin eksenel hız profilini bozmasıyla karakterize edilir. Bu bölgede kesme gerilmelerine bağlı olarak türbülans üretimi ve ilave akışkan sürüklenmesi meydana gelir. Gelişme bölgesinden sonra hız profili tamamen gelişir. Tam gelişmiş olarak adlandırılan bu bölgede hız profilinin bir Gauss hız dağılımına uyduğu görülmüştür [37]. Bu bölgede jetin lineer olarak genişlediği ve eksenel hızın da lineer olarak azaldığı görülmüştür [38].

Dönen jetlerin serbest akış yapısı

Dönen serbest jetin akış yapısı Şekil 2.2’de görüldüğü gibidir. Dönen serbest bir jette, teğetsel akış bileşenin varlığı hem radyal hem eksenel basınç gradyanlarının oluşmasına neden olur. Jet, lüle çıkışından uzaklaştıkça hem eksenel hem teğetsel kuvvetini kaybeder. Dönme etkisinin yaklaşık olarak lüle çıkışından $10D$ lüle çapı kadar mesafede etkisini kaybettiği ve dönme olmayan serbest jete benzediği ifade edilmektedir [39]. Bu nedenle dönen jetin dikkate değer akış özellikleri $10D$ lüle çapından küçük mesafelerde ortaya çıkar. Lüle çapının $10D$ ’ye kadar olan bölgesinde dönmede meydana gelen küçük bir değişiklik, jet yakın alanı ve karıştırma bölgesindeki akış davranışını önemli ölçüde değiştirebilir [40].



Şekil 2.2. Dönen jetin akış bölgeleri

Teğetsel momentumun aksenal momentuma göre belirli bir eşik değerini aşması durumunda, akışta girdap kırılması (bozulması) olarak bilinen bir özellik ortaya çıkar. Dönen jetlerde bozulma, serbest jet benzeri bir aksenal hız profilinin, ekseni üzerinde yerel bir minimuma sahip çevrinti benzeri bir hız profiline geçişi ile karakterize edilir. Bu, akış aşağısında oldukça türbülanslı bir ters akış bölgesini ve onu takip eden bir durgunluk noktasına yol açar. Jet merkezindeki bu aksenal hızın düşmesine, dönen akış tarafından üretilen ters basınç gradyanlarının sebep olduğu ifade edilmektedir [41].

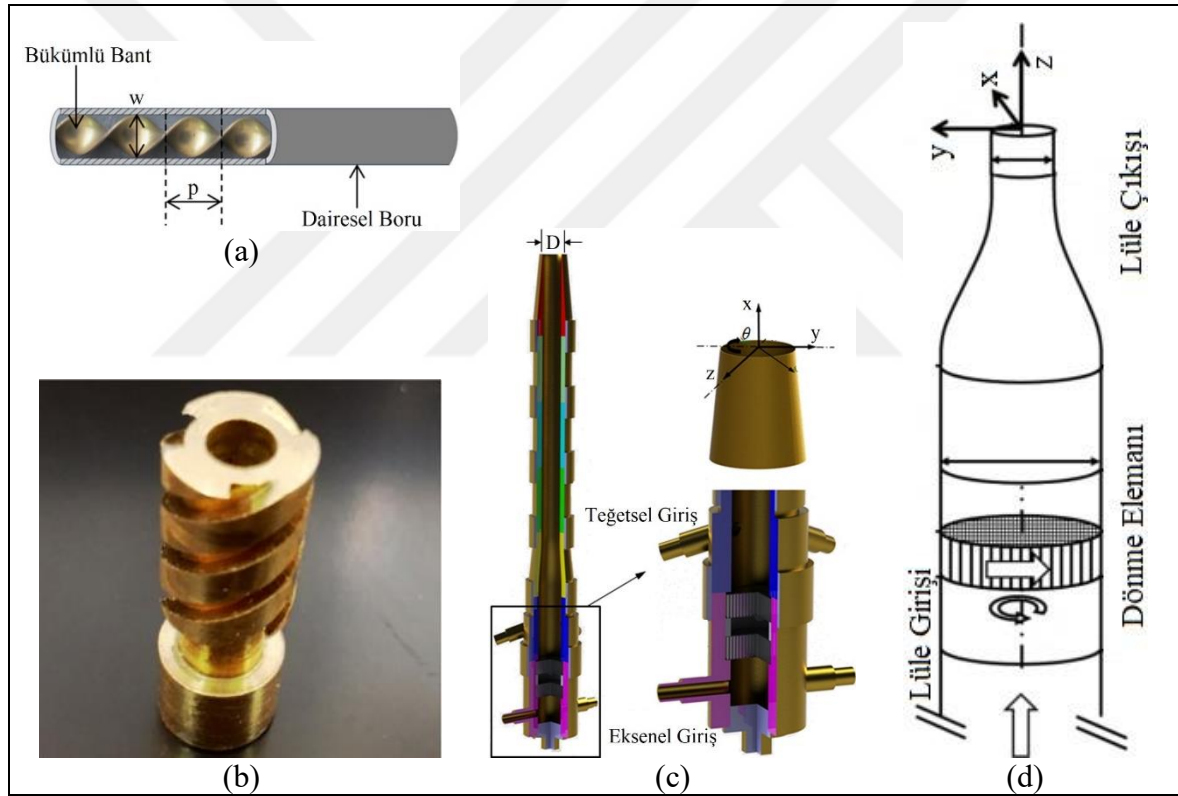
Dönen jetin üretim teknikleri

Dönme veya teğetsel akış bileşeni oluşturmak için literatürde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler geometrik, aerodinamik (eksenel simetrik jete teğetsel hız bileşeni uygulanarak) ve mekanik olmak üzere üç ana gruba ayrılmıştır [42]. Şekil 2.3'te dönme üretimi için bahsedilen yöntemlerden bazıları gösterilmiştir.

Geometrik olarak akışkanın döndürülmesi genellikle lüleye helisel kanallar açılarak [26, 28] ya da lüle içine bükümlü bantlar [18] yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca geometrik yöntemde hareketli üreticilere [43] ve de lüle çıkışına kılavuz kanatlar [44] yerleştirilerek döndürme işlemi yapıldığı da görülmüştür. Geometrik yöntemde jetin dönme ölçüsü, lüle çapları ve lüle girdap açısıyla karakterize edilir.

Aerodinamik olarak oluşturulan dönme yönteminde, lüle içinde herhangi bir yardımcı eleman kullanılmaz [21, 45]. Bunun yerine eksenel ve teğetsel akışlar, lülenin veya boru duvarının çevresine yerleştirilmiş bir dizi bağlantı noktası veya yarık yoluyla lüleye ayrı ayrı girerler. Ortaya çıkan akış daha sonra doğrudan lüle içinde karışır. Böylece lüle çıkışında teğetsel hız bileşenine sahip dönen jet elde edilir. Eksenel ve teğetsel bağlantılardan gelen toplam kütle akış hızlarının nispi oranı, dönme derecesini belirler.

Mekanik olarak oluşturulan dönen jet akışkanın dönen bir petek veya dönen bir borudan geçirilmesiyle oluşturulur [46]. Dönme genellikle bir elektrik motoru ile sağlanır. Motorun saniyedeki devir sayısıyla dönme yoğunluğu kontrol edilir.



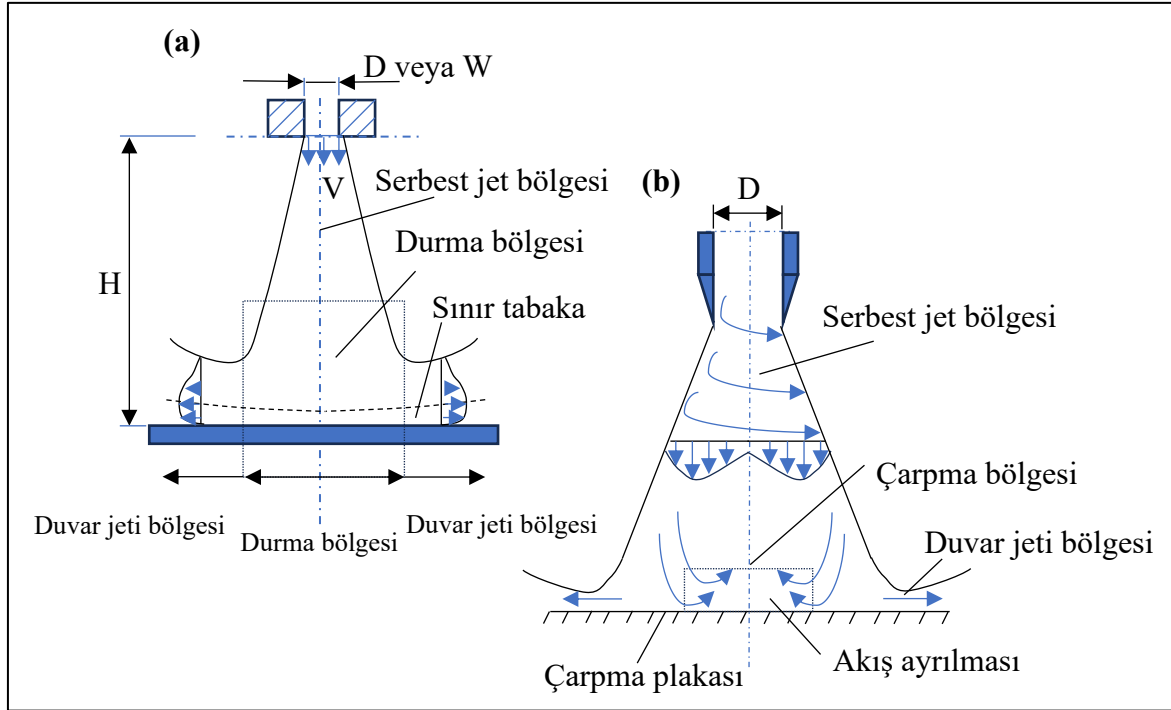
Şekil 2.3. Dönmeli jetlerin üretim yöntemleri (a) bükümlü bantlı lüle [47], (b) helisel kanallı lüle [28], (c) aerodinamik tasarımı lüle [45] ve (d) motor tahrikli lüle [46]

Dönme yoğunluğunun literatürde girdap numarasıyla veya debi oranıyla ifade edildiği görülmektedir. Dönme yoğunluğunu ölçmek için kullanılan bir cihaz bulunmamaktadır. Bu durum dönmeli akışların yorumlanmasını zorlaştırır. Örneğin, literatürde [39, 48] dairesele bir lüleden çıkan jetin girdap bozulması için kritik girdap numarasının 0,48 ile 0,94 arasında değiştiği görülmüştür. Ortaya çıkan bu farklılığın, dönmenin oluşturulduğu üretim tekniğine ve girdap numarasına bağlı olduğu ifade edilmektedir [49]. Literatürde girdap numarasının

hesaplanması için farklı yöntemler olduğu görülmüştür. Bunlardan üç tanesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar geometrik girdap numarası [23, 28], teğetsel momentumun eksenel momentuma oranı [39, 41, 47] ve lüle çıkış düzlemindeki teğetsel hızın eksenel hıza oranıdır [40, 45].

Çarpmalı jetlerin genel yapısı ve akış dinamiği

Çarpmalı jetin genel akış yapısı Şekil 2.4'te görüldüğü gibidir. Şekil 2.4(a) ve (b)'de sırasıyla eksenel simetrik çarpmalı jetin ve dönen çarpmalı jetin akış yapısı görülmektedir. Çarpan eksenel simetrik jetin akış yapısı üçe ayrılabilir [30]: Bunlar serbest jet bölgesi, çarpma (durgunluk) bölgesi ve duvar jeti bölgesidir. Serbest jet bölgesinde, lüleden çıkan jet ile ortamın kesme tahrikli etkileşimi kütle, momentum ve enerjinin sürüklenmesine neden olur. Net etkiler sonucunda jetin yüzeye çarpmadan önce sıcaklığının değiştiği, toplam kütsel akış debisinin arttığı, jetin yayıldığı ve jette üniform olmayan radyal bir hız dağılımının meydana geldiği belirtilmektedir [30]. Çarpma bölgesi ise akışın durduğu ve jetin radyal yöne dönerek duvar jeti bölgesine geçiş yaptığı bölgedir. Çarpma bölgesinde sınır tabaka kalınlığı yaklaşık olarak sabit kalmaktadır [50]. Çarpma bölgesi 1-2D lüle çapı kadar bir genişliğe sahiptir [51]. Duvar jeti bölgesi ise, çarpma bölgesinden sonra çarpma plakası üzerinde dışa doğru radyal yönde bir yığın akışı ile karakterize edilir. Duvar jeti bölgesi, türbülans seviyesi ve ısı transferinde güçlü bir etkiye sahiptir. Yerel radyal hız, çarpma yüzeyinin yakınında hızla maksimuma yükselir. Daha sonra duvardan artan mesafe ve artan radyal mesafeyle azalır. Bu bölgede jet akışı, ortam akışkanıyla önemli bir etkileşim içindedir. Literatür çalışması türbülanslı çarpan jetlerin akış özellikleri üzerine deneysel ve sayısal çalışma olduğunu göstermiştir [52].



Şekil 2.4. Çarpmalı jetin akış bölgeleri: (a) eksenel simetrik akış, (b) dönmeli akış

Dönen çarpmalı jet akışı düz bir yüzeye çarptığında meydana gelen akış, eksenel simetrik çarpmalı jete ve serbest dönen çarpmalı jete kıyasla daha fazla karmaşıktır [49]. Akışın türbülanslı olması, dönen akışla oluşabilecek devridaimin çarpma yüzeyiyle etkileşimi hem ortalama hem de dalgalanan bileşenlerin çözülmesini zorlaştırabilir. Bunlar basınç dağılımlarını, duvar kesme gerilmelerini ve çarpma yüzeyindeki ısı transferi dağılımlarını ve ayrıca jet yayılımını etkilerler. Devridaim bölgesi sadece akışın dönme yoğunluğuna değil, aynı zamanda kütle akış hızına ve lüle-plaka mesafesine de bağlıdır.

2.2. Literatür Araştırması

Literatür araştırması düşük lüle-plaka mesafesinde çalışılan düz çarpmalı jetler, dönen çarpmalı jetler, aynı anda üretilen hem dairesel hem de dönen çarpmalı jetler (birleşik çarpmalı jetler) ve kanatçıklı çarpma plakası ile çalışılan çarpmalı jetler olmak üzere dört başlık altında sunulmuştur.

Düşük lüle-plaka mesafesinde çalışılan eksenel simetrik çarpmalı jetler

Colucci ve Viskanta [8] hiperbolik geometriye sahip lülenin ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini sınırlandırılmış çarpmalı jetlerde araştırmışlardır. Çalışma akışkanı olarak hava

kullanılmıştır. Sınırlandırılmış jet koşullarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısına ve lüle-plaka mesafesine, sınırlandırılmamış jet durumuna göre daha duyarlı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca yüksek lüle-plaka mesafeleri için ($H/D > 6$) yerel Nusselt sayısının lüle geometrisinden bağımsız olduğu, daha düşük mesafeler ($H/D < 1$) için ise Nusselt sayısının iki tane en yüksek tepe noktası yaptığı belirtilmiştir. Hiperbolik tip lülelerin geleneksel dairesel tiplere göre daha yüksek ısı transferi performansı sunduğu gösterilmiştir.

Gardon ve Akfırat [11] lüle çapının yaklaşık dört katından daha büyük lüle-plaka mesafesi için yaptıkları çalışmalarında maksimum ısı transferinin jetin durma noktasında meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Düşük lüle-plaka mesafesinde ise durma noktasında en düşük ısı transferinin meydana geldiği belirtilmiştir. Çarpma plakası üzerinde artan radyal mesafede ısı transferinin iki farklı tepe değerinin meydana geldiği görülmüştür. En yüksek ısı transferinin olduğu birinci tepe değerinin sebebinin düşük lüle-plaka mesafelerinde ($H/D = 0,25$) akışın ivmelenmesinden kaynaklı olduğu belirtilmiştir. İkinci tepe noktasının ise yayılan duvar jetinin laminar akıştan türbülanslı akışa geçtiği nokta olduğu ifade edilmiştir.

Pamadi ve Belov [14] dairesel çarpmalı jet için düşük lüle-plaka mesafesinde çalışma yapmışlardır. Isı transferinde çarpma plakası üzerinde durma noktasının çevresinde iki tepe noktasının meydana geldiği belirtilmiştir. Dış kısımdaki yüksek ısı transferi tepe noktasının duvar sınır tabakası akışındaki geçiş nedeniyle olduğu ve içteki yüksek ısı transferi tepe noktasının ise jetteki tek düze olmayan türbülans nedeniyle ortaya çıktığı ifade edilmiştir.

Lytle ve Webb [15] lüle çapından daha küçük lüle-plaka mesafesi için çarpmalı hava jetinin yerel ısı transfer özelliklerini kızılötesi termal görüntüleme tekniği kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Durma noktasındaki Nusselt sayısının lüle-plaka mesafesiyle ilişkisini ortaya koyan bir korelasyon sunulmuştur. Çarpan jetler için Nusselt sayısının Reynolds sayısı (Re) bağlantısı $Re^{1/2}$ olarak ifade edilmiştir. Lüle-plaka arasındaki akışkanın hızlanmasının ve artan yerel türbülansın düşük lüle-plaka mesafelerinde önemli ölçüde yerel ısı transferini artırdığı görülmüştür. Düşük lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,25$ için yerel ısı transferinde iç ve dış kısımlarda tepe noktası meydana geldiği ve durma noktasında ise en düşük (minimum) bir ısı transferi olduğu belirtilmiştir. Dış tepe noktasındaki yerel Nusselt sayısının, daha yüksek lüle-plaka mesafeleri ve daha yüksek Reynolds sayıları için radyal olarak dışa doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir.

Baydar [53] tek ve çift jet durumundaki çarpmalı jetleri hem laminar hem de türbülanslı koşullar altında incelemişlerdir. $Re \geq 2,7 \times 10^3$ için lüle-plaka mesafesi $H/D = 2$ 'ye kadar olan mesafede, çarpma plakası üzerinde atmosfer altı basınç bölgesinin oluştuğu belirtilmiştir. Ayrıca atmosfer altı bölge ile tepe ısı transfer katsayıları arasında bir ilişki olduğu ifade edilmiştir.

Baydar ve Özmen [54] çarpan sınırlandırılmış bir jetin akış alanını araştırmak için deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Çarpma bölgesindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve basınç dağılımları $Re = 3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$ ve $H/D = 0,2-6$ için incelenmiştir. Çalışılan Re aralığında $H/D \leq 2$ için çarpma plakası üzerinde atmosfer altı basınç bölgesinin oluştuğu ve artan H/D değeri için atmosfer altı basınç bölgesinin durma noktasından radyal olarak dışarı doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir. Standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak elde edilen sayısal sonuçların $H/D \leq 1$ dışında deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Choo ve Kim [55] sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpmalı jetlerin ısı transferi performansını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarını hava ve su için deneysel olarak yapmışlardır. Çalışmada $H/D \leq 1$ durumları dikkate alınmıştır. Sınırlandırılmış jetin ısı performansının sabit bir pompalama gücü koşulu altında sınırlandırılmamış jetinkine benzer olduğu, ancak sınırlandırılmış jetin ısı performansının sabit bir akış hızı altında sınırlandırılmamış jetin ısı performansından %20-30 daha düşük olduğu ifade edilmiştir.

Choo ve Kim [56] çarpmalı hava jetinin ısı transferini sabit pompalama gücü koşulları altında $H/D \leq 1$ için deneysel olarak incelemişlerdir. Nusselt sayısının sabit pompalama gücü koşulları altında H/D 'den bağımsız olduğu ve sabit akış hızı koşulları altında ise H/D 'nin azalmasıyla Nusselt sayısının arttığı ifade edilmiştir.

Choo ve vd. [57] düz bir plaka yüzeyine çarpan daldırılmış jetin ısı transferi ve akış alanını hava ve su akışkanı için $H/D = 0,1-40$ aralığında deneysel olarak çalışmışlardır. Jet sapma bölgesinde ($H/D \leq 0,6$) Nusselt sayısı ve durma basıncının H/D 'nin azalmasıyla büyük ölçüde arttığı, potansiyel çekirdek bölgesinde ($0,6 < H/D \leq 7$) H/D 'nin Nusselt sayısı ve basınç üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu ve serbest jet bölgesinde ($7 < H/D \leq 40$) Nusselt sayısı ve basıncın H/D 'deki artış ile monoton bir şekilde azaldığı belirtilmiştir.

Gulati ve vd. [58] lüle şeklinin jet ısı transferine etkisini farklı $Re = 5 \times 10^3 - 50 \times 10^3$ ve $H/D = 0,5-12$ için deneysel olarak çalışmışlardır. Dairesel, kare ve dikdörtgen kesitli lüle geometrileri kullanılmış olup, lüle geometrisinin ortalama Nusselt sayısı üzerinde etkili olmadığı ifade edilmiştir.

Choo ve vd. [59] eğimli ($0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$) çarpan yarıklı hava jetinin ısı transferi üzerine etkisini $H/D \leq 1$ ve $H/D \geq 1$ için deneysel olarak araştırmışlardır. $H/D \leq 1$ için ısı transferinin $H/D \geq 1$ 'den önemli ölçüde farklı olduğu belirtilmiştir. Sabit akış hızında $H/D \leq 1$ için durma noktasındaki Nusselt sayısı ve ortalama Nusselt sayısının eğim açısı arttıkça arttığı ifade edilmiştir. $H/D \geq 1$ durumunda ise durma noktası ve ortalama Nusselt sayılarının duvar jetinin momentum kaybından dolayı eğim açısı arttıkça azaldığı belirtilmiştir. Sabit pompalama gücü koşullarında $H/D \leq 1$ ve $H/D \geq 1$ için durma noktası ve ortalama Nusselt sayıları eğim açısından bağımsız olduğu ifade edilmiştir.

Kuraan ve vd. [60] düz bir plaka yüzeyine çarptırılan su jetinin ısı transferini ve hidrodinamiğini deneysel olarak $H/D = 0,08-1$ için incelemişlerdir. $H/D \leq 0,4$ için normalize edilmiş durgunluk Nusselt sayısı ve hidrolik sıçrama çapının H/D 'nin azalmasıyla büyük ölçüde arttığı ifade edilmiştir. $0,4 < H/D \leq 1$ için ise jetin ortalama hızı sabit olduğundan normalize edilmiş durgunluk Nusselt sayısı ve hidrolik sıçrama çapı üzerinde H/D etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirtilmiştir.

Chatterjee ve Deviprasath [61] düşük H/D için sınırlandırılmış çarpmalı jeti laminar akış koşulları altında sayısal olarak çalışmışlardır. Durma noktasında meydana gelen en yüksek ısı transferinin girdap difüzyonu nedeniyle yukarı akış gelişiminin bir sonucu olarak ortaya çıktığı ifade edilmiştir.

Sagot ve vd. [62] sabit sıcaklıktaki bir çarpma plakası üzerine jet çarptırılmasının ısı transferine olan etkisini deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. SST $k-\omega$ modelinin deneysel sonuçlara daha yakın değerler verdiği belirtilmiştir.

Literatüre bakıldığında düşük lüle-plaka mesafesinde düz çarpmalı jetlerin sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet durumları altında deneysel ve sayısal çalışmalarının ve bunlara dayanılarak verilen sonuçların akış ve ısı transfer alanını anlamak için sınırlı olduğu söylenebilir. Lüle-plaka mesafesinin düşük olması nedeniyle deneysel çalışmalarda

akış alanını bozmadan akış bölgesinin araştırılmasının zor olduğu da bilinmektedir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak mevcut tez kapsamında düz plaka üzerine çarptırılan dairesel jet, düşük lüle-plaka mesafesinde ($H/D = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$) çarpma plakasına paralel bir engelleyici plakanın bulunması (sınırlandırılmış jet durumu) ve bulunmaması (sınırlandırılmamış jet durumu) durumuna bağlı olarak deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır. İki durumun için deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen ısı transferi, hız ve basınç alanlarındaki sonuçlar birbirleriyle kıyaslanarak verilmiştir.

Mevcut çalışmada hız konturlarının, akım çizgilerinin sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet durumları için incelenmiş olması mevcut çalışmanın, bu bölümde verilen literatürden farkını oluşturmaktadır. Bu çalışma ile dairesel çarpmalı jetlerin düşük-lüle plaka mesafesinde akış ve ısı transferi alanının anlaşılması için literatüre katkı sağlanmıştır.

Dönen çarpmalı jetler

Bir önceki başlıkta bahsedilen düz çarpmalı jetlerin elektronik ekipman ve işlemci gibi hem yüksek ısı transferi hem de üniform soğutma gerektiren bazı uygulamalar için uygun olmadığı söylenebilir. Bunun sebebi dairesel çarpmalı jetlerin durma bölgesinde etkin soğutma sağlarken, durma bölgesinin dışına doğru bu soğutma etkinliğini hızla kaybetmesiyle açıklanabilir. Bu ise elektronik ekipmanlarda arızalara neden olan ısıl gerilmelere yol açabilir. Bu nedenle araştırmacılar teğetsel (radyal) hız bileşeni ile akışkanı yüzeye yayarak, üniform soğutma ve yüksek ısı transferi açısından umut verici olan dönen çarpmalı jetlere yönelmişlerdir. Aşağıda dönen çarpmalı jetle ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar verilmiştir.

Nuntadusit ve vd. [2] dönen çarpan jetin (SIJ) akış ve ısı transferi alanlarını sabit lüle-plaka mesafesinde ($H = 4D$) deneysel olarak çalışmışlardır. Dönen jet bükülmüş bantların bir boru içine yerleştirilmesiyle üretilmiştir. Dönmenin çarpan yüzeyi üzerindeki etkileri bükülmüş bantların ∞ (düz şerit), 3,64, 2,27, 1,82 ve 1,52 bükülme oranlarında incelenmiştir. Çarpma bölgesinde ısı transferinin iki tepe noktası yaptığı görülmüştür. Jet çarpma bölgesindeki ısı transferi iyileşmesinin bükülmüş bant oranı 0,4'e karşılık gelen girdap numarası olduğu ifade edilmiştir.

Huang ve El-Genk [16] dönen çok kanallı çarpan jetlerin performansını aynı koşullarda aynı çapa sahip olan geleneksel (dairesel) çarpan jetin performansı ile birlikte araştırmak ve karşılaştırmak için ısı transferi ve akış görselleştirme deneyleri yapmışlardır. Dönmeyen çok kanallı jetlerin yerel ve ortalama ısı transferinin dairesel jetten daha iyi olduğu belirtilmiştir. Dönen çok kanallı çarpan jetlerin lüle-plaka mesafesi 50,8 mm ve akışın sağlandığı girdap açısının 15° olduğu durumda, dönmeyen çok kanallı jetler ve geleneksel jetlere göre Nusselt sayısının büyük artış gösterdiği ve daha düzgün dağılımlı olduğu ifade edilmiştir.

Demir ve vd. [17] düşük lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,25-1,00$ ve $Re = 2\ 100-8\ 100$ aralığında farklı modeller için dönen çarpmalı jeti sayısal olarak çalışmışlardır. Teorik girdap numarasının Re 'nin artmasıyla azaldığı ve lüle-plaka mesafesinin azalmasıyla arttığı belirtilmiştir. Ayrıca Reynolds sayısının 8 100'den 2 100'e azalmasıyla H/D 'nin ısı transferi üzerine etkisini ($H/D = 0,25$ hariç) kaybettiği ifade edilmiştir.

Amini ve vd. [19] dönmeli çarpan jetlerin zorlanmış taşınım ile gerçekleştirdikleri ısı transferini sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışma bükümlü bantların 3, 4, 5 ve 6 oranlarında, Reynolds sayısının 4×10^3 , 8×10^3 , 12×10^3 ve 16×10^3 değerlerinde, lüle-plaka mesafesinin 2, 4, 6, 8 değerleri için yapılmıştır. Lüle-plaka mesafesi $H/D = 6$ ve 8'de dönen jetlerin ısı aktarım hızının normal jetlere göre daha fazla olduğu ve daha yüksek Reynolds sayılarında ısı aktarım hızının momentumun artmasına bağlı olarak daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bir çift jet için yapılan hesaplama sonuçlarının bir jet yerine iki jet kullanılmasının aynı hava debisinde ısı transferini artırabileceği ifade edilmiştir.

Ahmed ve vd. [20] eksenel simetrik türbülanslı jetlerde giriş akış koşullarının, girdap ve düşük lüle-plaka mesafesinin jet gelişimi üzerine etkisini sayısal olarak farklı Reynolds ortalamalı türbülans modelleriyle çalışmışlardır. Dönmeyen çarpan jetlerin akış yönündeki gelişiminin genellikle lüle çıkış düzleminden aşağı yönde yaklaşık $y/D = 1$ 'e kadar serbest jet gibi davrandığı ifade edilmiştir. Aynı Reynolds sayısına sahip dönmeyen çarpan jete düşük girdap seviyelerinin eklenmesi, yani dönmenin eklenmesiyle merkez hattındaki hızın zayıfladığı belirtilmiştir. Ancak duvar kesme gerilmesi ve duvar jeti bölgesindeki türbülans kinetik enerjisinde önemli bir azalma olduğunu ifade etmişlerdir. Girdap numarası artırıldıkça duvar kayma gerilmesindeki azalmanın daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Girişteki türbülans yoğunluğunun artmasının merkez çarpma bölgesindeki girdap akışlarının türbülans özelliklerini önemli ölçüde etkilediği söylenmiştir. Araştırılan girdap sayıları

aralığında farklı giriş girdap profillerinin, dönmeyen jetlerle karşılaştırıldığında çarpma yüzeyindeki statik basınç davranışını büyük ölçüde değiştirmede ifade edilmiştir.

Ahmed ve vd. [21] çarpma yüzeyindeki taşınım ile ısı transferini deneysel olarak kızılötesi termografi kullanarak çalışmışlardır. Sayısal çalışma ANSYS Fluent paket programında SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak yapılmıştır. Girdap numarasının (0,0-1,05) ve çarpma mesafesinin ($H = 2D$ ve $6D$) ısı transferi üzerine etkilerini $Re = 35 \times 10^3$ 'te incelenmiştir. Düşük çarpma mesafesinde ($H = 2D$), yüzeye yakın (0,8 mm yukarı akış) yüksek jet türbülanslarının Nusselt sayısının tepe noktalarıyla ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Yüzey yakınında düşük türbülanslı kinetik enerjiye sahip herhangi bir bölge oluşmasının, yerel Nusselt sayısının düşüklüğüne neden olabileceğini ve aynı zamanda yüzeyde kararlı olmaları durumunda girdap kaynaklı devridaim bölgelerinin oluşmasına da sebep olabileceği belirtilmiştir. Diğer taraftan yüksek lüle-plaka mesafesinde ($H = 6D$), girdabın daha geniş jet yayılmasına neden olduğunu ve dolayısıyla türbülans seviyelerinin azaldığını ifade etmişlerdir. $H = 6D$ mesafesinde dönmeyen jetlerin daha yüksek Nusselt bölgeleri oluşturduğu belirtilmiştir.

Yang ve vd. [23] dönme hareketi olan ve olmayan çarpan halkasal jetin akış alanını deneysel olarak çalışmışlardır. Akış ve duvar basıncı verilerine dayanarak yeterince yüksek lüle-plaka mesafelerinde dönmeyen halkasal jetin basit yuvarlak çarpan jete benzer özellikler sergilediği belirtilmiştir. Dönen halkasal jete ise böyle bir durumun meydana gelmediği ifade edilmiştir. Düşük ve orta lüle-plaka mesafelerinde dönen halkasal jetin dönmeyen halkasal jete karşılaştırıldığında çarpma plakası üzerinde meydana getirdiği duvar basıncı ve ısı transferi dağılımının düzgün olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak orta lüle-plaka mesafelerinde bu durumun tam tersinin meydana geldiği görülmüştür.

Ahmed ve vd. [45] dönmenin çarpma yüzeyi ısı transferi üzerindeki etkisini sıkıştırılmaz ve türbülanslı ($Re = 11,6 \times 10^3 - 35 \times 10^3$) çarpan hava jetlerinde deneysel olarak çalışmışlardır. $Re = 35 \times 10^3$ 'te düşük-orta girdap numaralarının ($S_g = 0,27 - 0,45$) kullanılmasının, dönmeyen jete kıyasla $H \leq 4D$ aralığında ısı transferini çarpma bölgesinde arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca artırılan dönmenin yalnızca yakın alan çarpmasında ($H \leq 2D$) önemli ısı transferi artışına neden olacağını söylemişlerdir. Daha büyük lüle-plaka mesafesinin ($H \geq 4D$), Nusselt sayısında önemli bir azalmayla birlikte taşınım ile ısı transferi için zararlı olduğunu

ifade etmişlerdir. Düşük girdap numaralarının ısı transferi üniformluğunu, incelenen tüm çarpma mesafeleri için dönmeyen jetlere göre önemli ölçüde değiştirmedeği belirtilmiştir.

Kumar ve vd. [47] dönen bir hava jetinin çarptırıldığı düz bir yüzey üzerindeki yerel ısı transferini deneysel olarak çalışmışlardır. Büküm oranları 2, 3,2, 4,5 ve 7,5 olan bükülmüş bantlar (karşılık gelen girdap numaraları $S = 0,79, 0,49, 0,35, 0,21$) dönme etkisini oluşturmak için dairesel bir tüpe yerleştirilmiştir. Lüle-plaka mesafesi 1-4 ve $Re = 0,5 \times 10^3 - 3 \times 10^3$ aralığında seçilmiştir. Isı transfer hızı büküm oranı 2'den 4,5'e artmasıyla arttığı ve büküm oranının 4,5'ten 7,5'e artmasıyla azaldığı ifade edilmiştir. Isı transfer hızının 4,5 büküm oranında en yüksek, 7,5 büküm oranında ise en düşük olduğu görülmüştür.

Nozaki ve vd. [48] dönmeli çarpan jetin hız ve sıcaklıklarının eş zamanlı ölçümü için Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) ve Lazer Kaynaklı Floresans (LIF) tekniğini birleşik kullanarak deneysel çalışma yapmışlardır. Jetin radyal genişliğinin artırılan girdap yoğunluğuyla birlikte arttığı ve bu artışın en yüksek yerel ısı transfer katsayısına katkıda bulunduğu ifade edilmiştir. Durma bölgesinde ısıtılmış yüzeye yakın akışın yukarıya doğru ters akışlarla aralıklı olarak karıştığı ve sıcaklığın uzaysal dağılımlarının anlık hız vektörleriyle ilişkili olduğu belirtilmiştir. Girdap numarası ve lüle-plaka mesafesiyle ilişkili olan devridaim bölgelerinin dinamik davranışının, durgunluk bölgesindeki türbülanslı ısı transferini belirlediği ifade edilmiştir.

Ahmed ve vd. [63] $Re = 11\ 600$ 'de girdap numarası 0 ile 0,76 aralığında, lüle plaka mesafesi 0,5 lüle çapı olan sınırlandırılmış dönen çarpmalı jeti çalışmışlardır. Hem girdaplı (dönen) hem de girdapsız (dönmeyen) jetin çarpma plakası üzerinde devridaim bölgeleri oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek girdap yoğunluklarının durma noktası yakınında ikincil bir devridaim bölgesi oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca akışın sınırlandırılmasının çarpma yüzeyindeki basıncın negatif olmasına sebep olduğunu ileri sürmüşlerdir. Girdap yoğunluğunun ve akışın sınırlandırılmasının çarpma plakası üzerindeki ısı transferi davranışını büyük ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir.

Eiamsa-ard ve vd. [64] Reynolds sayısı ($5 \times 10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^4$), lüle-plaka mesafesi ($1 < H/D < 8$) ve dönme oluşturan bükülmüş bantların oranı gibi çeşitli parametrelerle dönen çarpmalı jeti çalışmışlardır. Çalışma sonuçlarında, azaltılan lüle-plaka mesafesinin ve artırılan Reynolds sayısının ısı transferini artırdığını ifade edilmiştir.

Alekseenko ve vd. [65] Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme tekniğini kullanarak türbülanslı dönen çarpmalı jeti deneysel olarak çalışmışlardır. $Re = 8\ 900$, lüle-plaka mesafesi lüle çapının üç katı ve girdap numarası 0,0-1,0 arasındadır. Girdap hızı arttıkça basınç yayılım büyüklüğünün azaldığını bildirmişlerdir. Dönen çarpmalı jetlerin dönmeyen jetlere göre daha büyük bir yayılma hızına sahip olduğunu ve eksenel hızda daha hızlı bir bozulmaya neden olduklarını ifade etmişlerdir.

Afroz ve Sharif [66] kararsızlıklara ve akış dalgalanmalarına neden olan halkasal jet düzeneği ile ısıtılmış yüzey üzerine çarptırılan türbülanslı dönen jetin ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Dönme hareketinin lüle-plaka mesafesi $H = 0,5$ 'te ısı transferini olumlu yönde etkilediğini ve dönmeyen halkasal jet çarpmasıyla karşılaştırıldığında ortalama Nusselt sayısında %8'e kadar bir artışa neden olduğu belirtilmiştir.

Lee ve vd. [67] düz bir plaka yüzeyine çarpan dönen jetin ısı transferini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. $Re = 23 \times 10^3$, boyutsuz lüle-plaka mesafesini $H/D = 2-10$ ve girdap numarasını $S_g = 0,0-0,77$ aralığında seçmişlerdir. Dönen jet akışının genellikle durma noktası bölgesinde etkili olduğunu görmüşlerdir. En yüksek ısı transferi $S_g = 0,21$ ve $H/D = 2$ 'de elde edilmiştir. Düşük lüle-plaka mesafesi $H/D = 2$ için dönen jet akışlarının ortalama Nusselt sayılarının tüm girdap numaralarında dönmeyen jet akışlarından daha büyük olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak yüksek lüle-plaka mesafesi $H/D > 10$ için dönen jet akışlarının ısı transferi üzerine etkisinin az olduğunu belirtmişlerdir.

Ianiro ve Cardone [68] dönen çarpmalı jette girdap numarasının düz bir plaka üzerindeki ısı transferi dağılımına etkisini deneysel olarak çalışmışlardır. Reynolds sayısı 28×10^3 'te sabit tutulmuş, girdap numarası S_g 'nin beş farklı değeri (0,0-0,2-0,4-0,6-0,8) ve lüle-plaka mesafesi lüle çapının 2, 4, 6, 8 ve 10 katı olarak seçilmiştir. Çok kanallı jetlerin, dairesel çarpan jetlere göre ısı transferinde genel bir iyileşmeye yol açtığı, dönme (girdap) hareketi ile ısı transfer hızının azaldığı ve ısı transferinin üniform olduğu gözlemlenmiştir.

Paolillo ve vd. [69] dairesel bir lüleden çıkan dönen çarpmalı jetin ısı transferini $H/D = 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14$, $Re = 20\ 800, 31\ 100, 41\ 500$ ve $S_g = 0, 0,078, 0,22, 0,37, 0,54$ için çalışmışlardır. Düşük lüle-plaka mesafelerinde ($1 \leq H/D \leq 4$) nispeten küçük çarpma plakası yüzeylerinde jete eklenen zayıf dönmelerin ($0 \leq S_g \leq 0,22$ aralığında) ısı transfer hızını, ısı transferi üniformluğunu bozmadan artırdığını bildirmişlerdir. Diğer taraftan orta derecede

dönen jetlerin ($0,37 \leq S_g \leq 0,54$ aralığında) yüksek lüle-plaka mesafelerinde ($6 \leq H/D \leq 14$) ısı transferi üniformluğunu bozduğunu ifade etmişlerdir.

Bilen ve vd. [70] dönen ve çok kanallı çarpan jetlerin performansını araştırmak ve sonuçları aynı çalışma için dönmeyen çok kanallı çarpan jet ve dairesel çarpan jet sonuçlarıyla karşılaştırmak için ısı transferi ve akış görselleştirme deneyleri yapmışlardır. Dönmeyen çok kanallı çarpan jetlerin dairesel ve dönen çok kanallı çarpan jetlerden daha yüksek yerel ve ortalama Nusselt sayısı gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca dönen çok kanallı çarpan jetlerin hem dönmeyen çok kanallı çarpan jet hem de dairesel çarpan jet ile karşılaştırıldığında ısı transferi üniformluğunu önemli oranda artırdığı ifade edilmiştir.

Ikhtlaq ve vd. [71] türbülanslı çarpan jetlerdeki hem yukarı hem de aşağı akış alanını $Re = 11,6 \times 10^3$, $24,6 \times 10^3$, 35×10^3 , girdap numarası 0,3 ve 0,74 ve $H/D = 2$ ve 4 için Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) tekniğini kullanarak çalışmışlardır. Düşük girdap numarasında (0,3) yukarı akış alanıyla ilgili olarak hem serbest jet hem de çarpan jetlerde girdap bozulmaları görülmediği bildirilmiştir. Bununla birlikte, yüksek girdap numarası için (0,74), yukarı akışta girdap bozulmasının $Re = 11,6 \times 10^3$ ve $24,6 \times 10^3$ 'te görüldüğü ancak $Re = 35 \times 10^3$ 'te görülmediği ifade edilmiştir. Ayrıca çarpma mesafesinin, girdap bozulmasının (devridaim balonunun) boyutunu, konumunu ve gücünü etkilediği belirtilmiştir.

Senda ve vd. [72] dönen yuvarlak çarpan jet için ısı transferi ve akış alanı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Isı transferi ölçümleri için ısıya duyarlı sıvı kristal levha kullanılmış ve $Re = 8$ 100 için girdap numarası 0, 0,22 ve 0,45 olduğu durumlarda durma bölgesinde lazer doppler hız ölçümü (LDV) yöntemiyle üç hız bileşenini ölçmüşlerdir. Çarpma plakası yakınında girdap nedeniyle oluşan devridaim akışının (yeniden sirkülasyon akışının) durgunluk bölgesindeki ısı transferini bozduğu ve artırılan girdap numarasının Nusselt sayısının daha düzgün dağılımına yol açtığı ifade edilmiştir.

Ahmed ve vd. [73] sıkıştırılamaz, türbülanslı, dönen bir hava jeti için girdabın (dönmenin) çarpma yüzey basıncı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Dönen akışı aerodinamik olarak üretmişlerdir. Düşük girdap numaralı akışlar için basınç katsayısının, durma noktasında en yüksek değer göstermesiyle dönmeyen jetler gibi bir davranış gösterdiği belirtilmiştir. Orta ile yüksek girdap numaraları için en yüksek basınç katsayısının, durma noktasından radyal olarak dışarı doğru kaydığı ve artırılan girdap numarası ile

nispeten daha düz hale geldiği ifade edilmiştir. Durma basıncının artırılan girdap numarasıyla doğrusal olmayan bir şekilde azaldığı görülmüştür. Girdap numarası 0,3'e kadar, basınç dağılımının Re 'den bağımsız olduğu belirtilmiştir.

Wen ve Jang [74] dönen jetlerin ısı transfer performansını aynı koşullar altında aynı çapa sahip geleneksel çarpan jetin performansı ile karşılaştırmak için ısı transferi ve akış görselleştirme deneyleri yapmışlardır. Deneyler sabit bir jet çapı ($D = 7$ mm) ve sabit ısı akısında gerçekleştirilmiştir. Reynolds sayısı 500 ile 27×10^3 arasında ve lüle-plaka mesafesi de $H/D = 3$ ile 16 aralığında değiştirilmiştir. Yerel ve ortalama ısı transferinin r/D , Re ve H/D 'nin güçlü bir fonksiyonu olduğu ancak durma noktasındaki Nusselt sayısının H/D 'ye gözle görülür bir bağımlılığı bulunmadığı ifade edilmiştir.

Bakırcı ve Bilen [75] çok kanallı dönen jet, çok kanallı jet ve geleneksel çarpan jet için sabit duvar sıcaklığı sınır koşulunda tutulan çarpma yüzeyindeki ısı transfer hızını deneysel olarak çalışmışlardır. Çok kanallı jetin yerel Nusselt sayılarının genellikle çok kanallı dönen jet ve geleneksel çarpan jetten daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Aynı girdap açısı için Reynolds sayısının artmasının tüm yüzeydeki ısı transfer hızını ve yüzeydeki eyer şekli ısı transfer dağılımını arttırdığı ifade edilmiştir. Düşük Reynolds sayısı ($Re = 1 \times 10^4$) ve en yüksek lüle-plaka mesafesinde $H/D = 14$, yüzeyde çok daha düzgün yerel ve ortalama ısı transferi dağılımının meydana geldiği ancak tüm yüzeydeki ısı transfer hızının azaldığı belirtilmiştir.

Yang ve vd. [76] dönen çarpmalı jetin meydana getirdiği ısı transferi ve akış alanını deneysel olarak çalışmışlardır. Isı transfer hızının, girdap açısının artmasıyla bir miktar arttığı belirtilmiştir. Döner çarpmalı jetin girdap açısının 45° , lüle-plaka mesafesinin $H/D = 2$ ve 4 olduğu durumda durma noktasındaki Nusselt sayısının geleneksel jetten sırasıyla %7,4 ve %11,4 daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Çarpma plakası üzerindeki yerel Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile doğrusal olmayan bir orantısal ilişkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca H/D 'nin artmasıyla döner akışın ısı transferi üzerindeki etkisinin zayıfladığı ve hatta kaybolduğu ifade edilmiştir.

Xu ve vd. [77] döner çarpan jeti RNG $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanarak sayısal olarak çalışmışlardır. Jette dönmeyi oluşturmak için vida kanallarına benzer bir lüle tasarlanmıştır. Tasarladıkları lülenin çoklu kanallara sahip lülelerden daha iyi ısı transferi üniformluğu sağladığı görülmüştür. Yerel Nusselt sayısının radyal üniformluğu girdap açısının 60° ve

lüle-plaka mesafesinin $H/D \leq 3,0$ olduğu durumda türbülanslı akış için meydana geldiği belirtilmiştir.

Abrantes ve Azevedo [78] düz bir plakaya çarpan dönen jet akışını deneysel olarak araştırmışlardır. Türbülanslı hız alanının eksenel, radyal ve çevresel bileşenleri hakkında ayrıntılı bilgi elde etmek için Anlık Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV) ve Lazer Doppler Hız Ölçümü (LDV) kullanmıştır. Çalışma $Re = 21 \times 10^3$ ve jet çapının 2 ve 0,25 katı jet-plaka mesafelerinde gerçekleştirilmiştir. Sabit ısı akısında yerel ısı transfer katsayısının zaman ortalamalı dağılımları elde edilmiştir. Girdap yoğunluğunun en yüksek değerinde ve daha büyük jet-plaka mesafeleri için çarpan yüzeyde girdaplı bir yapının ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu karmaşık devridaim yapının durma bölgesinin Nusselt sayısını önemli ölçüde etkilediği ifade edilmiştir. Radyal yönde Nusselt sayısı dağılımında zirvelerin meydana geldiği ve bunların çarpma plakasına yakın olarak ölçülen türbülans hızındaki zirvelerle bağlantılı olduğu belirtilmiştir.

Nanan ve vd. [79] bükülmüş bantların yerleştirildiği lülelerden çıkan dönmeli jetlerin çarpma plakasında meydana getirdiği ısı transferini incelemişlerdir. $Re = 4 \times 10^3 - 16 \times 10^3$, bükülmüş bantların bükülme oranı 3, 4, 5, 6 ve lüle-plaka mesafesi 2, 4, 6, 8 olarak alınmıştır. Yüksek Re için düşük lüle-plaka mesafesi ve yüksek büküm oranında meydana gelen yüksek ısı transferi yüksek momentum aktarım hızıyla ilişkilendirilmiştir. Düşük lüle-plaka mesafelerinde ($H/D = 2$ ve 4), dönmeli çarpan jetlerin geleneksel çarpan jetlere göre daha yüksek ısı transfer hızı sağlarken, büyük lüle-plaka mesafelerinde ($H/D = 6$ ve 8) tam tersi bir sonucun olduğu belirtilmiştir.

İkhlâq ve vd. [80] dönen ve dönmeyen jetlerin zamana bağlı gelişimini $Re = 11,6 \times 10^3$, $24,6 \times 10^3$ ve 35×10^3 değerleri için deneysel olarak çalışmışlardır. Girdap numarası 0,0-1,05 aralığında, lüle-plaka mesafesi $H/D = 2$, 4 ve 6 olarak alınmıştır. Dönmeden çarpan jetlerin büyük Reynolds sayılarında, düşük Reynolds sayısına sahip jetlerin aksine en yüksek Nusselt sayısının konumu tüm zaman adımları için sabit kaldığı belirtilmiştir. $H/D = 4$ için geçici karakteristiklerin $H/D = 2$ ve 6 ile karşılaştırıldığında daha belirgin olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca $H/D = 4$ için çarpmalı jetin ısı transferinin kararlı duruma ulaşmasının daha fazla zaman aldığı gözlemlenmiştir. Çarpma plakası üzerindeki ısı transfer dağılımının küçük zaman aralıklarında önemli ölçüde değiştiği ve de dönen jetlerde, çarpma plakası ısı transferinin durma ve duvar jet bölgesi için eş zamanlı olarak geliştiği ifade edilmiştir.

Singh ve vd. [81] dikey ve eğik olarak çarpan dönen jetlerin ısı transferini deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Dönen jetlerin yakın lüle-plaka mesafesinde geleneksel jetlere göre daha iyi ısı transfer hızına sahip olduğu belirtilmiştir. Artırılan lüle-plaka mesafesiyle dönmeli jetlerin ısı transferini önemli ölçüde azalttığı belirtilirken, çarpma plakası üzerinde yayılımlarının arttığı ifade edilmiştir. Silindirik çarpmalı jetlerin ise artırılan lüle-plaka mesafesiyle durma bölgesindeki ısı transferinin çok değişmediği belirtilmiştir. Bu durumu silindirik jetlerin çalışılan lüle-plaka mesafesi aralığında potansiyel çekirdek bölgesi içinde kalmasıyla ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Eğik olarak çarpan dönen jetlerin durma bölgesinde ısı transferini azalttığı belirtilmiştir.

Sharif [82] türbülanslı daldırılmış dönen jetin çarpmasıyla ısıtılmış bir düzlem dairesel yüzeyden olan ısı transferini sayısal olarak çalışmıştır. Hesaplama için ticari ANSYS Fluent yazılımı ve SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Dönmenin ısı transferi üzerinde olumsuz etki ettiği belirtilmiştir. Düşük ile orta aralıktaki girdap numarası için ($S_g \leq 0,77$) girdap numarasının 0'dan itibaren artmasıyla ortalama Nusselt sayısının düştüğü ifade edilmiştir. $S_g \geq 1$ olduğu durumda ise, ortalama Nusselt sayısının S_g 'nin artmasıyla arttığı ancak dönmeyen jet durumundakinden yine de az kaldığı belirtilmiştir. Ayrıca $S_g \leq 0,77$ olduğunda lüle-plaka mesafesinin artmasıyla ($2 \leq H \leq 10$) ortalama Nusselt sayısının arttığı ifade edilmiştir. $S_g \geq 1$ olduğunda ise H artınca ortalama Nusselt sayısının düştüğü görülmüştür.

Shuja ve vd. [83] adyabatik bir duvara sınırlandırılmış dönen çarpmalı jeti sayısal olarak çalışmışlardır. Farklı jet çıkış hız profillerinin akış alanına etkileri incelenmiştir. Girdap hızı artırıldıkça jet ekseninin radyal yöne doğru eğildiği ve hız profili sayısının azalmasının ısı transferinden dolayı entropi oluşumunu artırdığı belirtilmiştir.

Ikhtlaq ve vd. [84] ısıtılmış bir plakaya çarpan eksenel simetrik türbülanslı zayıf şekilde dönen ($S_g = 0,31$) jetleri, giriş koşulları ve lüle-plaka mesafesi etkilerini ($H/D = 2, 4$ ve 6) inceleyecek şekilde sayısal olarak çalışmışlardır. Lüle çıkış düzleminde $Re = 24,6 \times 10^3$ için üç azimut hız profili kullanılmıştır. Bunlar düzgün (UP), katı cisim dönüşü (SBR) ve parabolik profillerdir (PP). Duvar jeti bölgesinin başlangıcında yaygın olarak gözlemlenen ilk tepe noktası Nusselt sayısının yüksek seviyelerdeki türbülanslı kinetik enerjiyle ilişkili olduğu belirtilmiştir. Duvar jetinin başlangıç bölgesinin, jete dönme uygulanmasına karşı son derece hassas olduğu, zayıf girdap (dönme) ($S_g = 0,31$) uygulamasının bile akış

dinamiklerini minimum düzeyde de olsa değiştirdiği ve çarpma düzleminde devridaim bölgelerine yol açtığı ifade edilmiştir. Ayrıca lüle girişindeki akışkana yüksek seviyelerde türbülans uygulanmasının özellikle yüksek lüle-plaka mesafesinde ($H/D = 6$) ısı transferi dağılımını önemli ölçüde değiştirdiği belirtilmiştir.

Uddin ve vd. [85] düz bir yüzeye çeşitli yöntemler kullanılarak arpıtırılan türbülanslı jetin ısı transferini sayısal olarak çalışmışlardır. Lülenin çıkışındaki jet akışı kılavuz kanatlar tarafından girdap oluşumunu sağlayan teğetsel bir hareket bileşeninin uygulanması, ortalama akışın önceden belirlenmiş genlik ve frekansta zorla uyarılması ve girdap dökülmesinin meydana geldiği akışın karşısına bir silindirin yerleştirilmesi gibi üç yöntemle kontrol edilmiştir. Aktif uyarma frekans seçiminin ısı transferinin artması üzerinde önemli bir rol oynadığı ifade edilmiştir. Akışa eklemeler yapılarak jetin pasif uyarılmasının yüksek basınç düşüşlerine neden olduğu söylenmiştir. Jete girdap (dönme) eklenmesinin ısı transferi hızı üzerinde her zaman kayda değer bir artış sağlamayacağı belirtilmiştir.

Xu ve vd. [86] dairesel deliğin i duvarına açılan dörtlü helisel kanalla üretilen dönen çarpmalı jetin çarpma plakasındaki ısı transferi ve akış alanlarını deneysel olarak çalışmışlardır. Dönen jetin belli bir dönme açısına kadar ısı transferini artırabileceği ifade edilmiştir. Lüle-plaka mesafesi $H/D = 2$ ve 4'te, 45° girdap açısına sahip dönen jetin durma noktasındaki yerel Nusselt sayısının geleneksel dairesel jetinkinden sırasıyla %7,4 ve %11,4 daha yüksek olduğu belirtilmiştir. H/D 'nin artmasıyla dönen akışın ısı transferi üzerine etkisinin zayıfladığı hatta kaybolduğu gözlemlenmiştir.

Ahmed ve Al-Abdeli [87] $Re = 11,6 \times 10^3$ ve $24,6 \times 10^3$ için türbülanslı dönen çarpmalı jetlerin ısıtılmış yüzeydeki yüzey sıcaklığı dağılımlarını çözmek için sayısal modelleme ve deneysel kızılötesi termografi yöntemini kullanmışlardır. Plaka zerindeki üniform sıcaklığın girdap numarası ve H/D 'ye bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Güçlü girdap numaralarında (0,59 ve 0,74) düşük lüle-plaka mesafesi için ($H/D = 1$) nemli düzeyde üniform sıcaklık dağılımı meydana gelmediği grlmştir. Yüksek H/D ve girdap numaralarında tepe duvar kayma geriliminin azaldığı ve akış çarpmasının radyal olarak genişlediği ifade edilmiştir.

Wongcharee ve vd. [88] ısı transferini artırmak için dönmeli çarpan jetlere CuO/su nanoakışkanını uygulamışlardır. Dönen akış 1,43, 2,86 ve 4,28 büküm oranlarına sahip bükülmüş bantlar kullanılarak oluşturulmuştur. Lüle-plaka mesafesi $H/D = 2, 3, 4$, CuO'nun

hacimce sudaki konsantrasyonu %2, 3, 4 ve $Re = 1,6 \times 10^3$ ile $9,4 \times 10^3$ arasında seçilmiştir. Hacimce %2 ve 3 konsantrasyonlu nanoakışkanların baz akışkandan daha yüksek Nusselt sayıları verdiği, %4 konsantrasyonlu nanoakışkanların ise tam tersi sonuç verdiği belirtilmiştir. $H/D = 2$ 'de Nusselt sayısının büküm oranının azalmasıyla birlikte hafifçe arttığı, diğer taraftan $H/D = 3$ ve 4'te ise büküm oranının artmasıyla birlikte Nusselt sayısının da arttığı gözlemlenmiştir. Çalışılan parametrelerde en iyi ısı transferinin $H/D = 2$, büküm oranı 1,43 ve hacimce %2 nanoakışkan konsantrasyonunda meydana geldiği görülmüştür.

Illyas ve vd. [89] helisel uçlarla dönmesini sağladıkları düz bir yüzey üzerine çarpan jetin ısı transferi ve akış alanını deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışmada tekli, çiftli ve üçlü helisel uçlar kullanılmıştır. Durma bölgesinde üçlü heliselden ayrılan jetin eksenel hız bileşeninin, eksenel devridaim bölgelerinin varlığı nedeniyle tek ve çift helisellere göre daha düşük olduğu belirtilmiştir. Üçlü helisel teğetsel hız bileşeninin lüle-plaka mesafesi $H/D = 1, 2$ ve 3'te sırasıyla radyal mesafe $r/D = 0, 0,4, 0,8$ 'de tekli ve çiftli helisel jetlere göre daha büyük olduğu ifade edilmiştir. Girdap dağılımının jetin aşağı akışında duvar jet bölgesine yakın olan kısmında üçlü helisel için nispeten daha yoğun olduğu, bunun ise tek ve çift helisellerle karşılaştırıldığında daha fazla ortam havasını sürüklemeye neden olabileceği belirtilmiştir.

Xu ve vd. [90] dönen çarpmalı jetlerin sayısal olarak ısı transferi ve akış alanı çalışmışlardır. Isı transferi ve akış alanı üzerine jetin eğim açısı (45° - 90°), lüle-plaka mesafesi ($H/D = 2, 4, 6$) ve Reynolds sayısı (6×10^3 - 24×10^3) gibi parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Eğim açısının ve lüle-plaka mesafesinin girdapların boyutu, şekli ve konumu üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu, Reynolds sayısının ise girdaplar üzerinde çok az etkisinin olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca eğim açısının 45° 'nin üzerine çıkarılmasıyla yüzeydeki ortalama Nusselt sayısının sabit bir değerde kaldığı belirtilmiştir. Eğik koşullar altında dönen jet için hedef yüzeydeki ısı transfer katsayısının Reynolds sayısının artmasıyla arttığı, ancak $Re = 1,8 \times 10^4$ 'ten büyük olduğunda artan ısı transfer hızının giderek zayıfladığı gözlemlenmiştir.

Ahmed ve vd. [91] dairesel bir lüleyle oluşturulan çarpmalı dönen jetlerin ısıtılmış içbükey yüzeydeki akış dinamiği ve konvektif ısı transferini RANS yaklaşımı ile gerçekleştirilebilir (realizable) $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanarak sayısal olarak çalışmışlardır. Reynolds sayısı $11,6 \times 10^3$ - 35×10^3 aralığında, girdap numarası 0-2, 4 ve lüle-plaka mesafesi lüle çapının 0,5-8 katı olarak seçilmiştir. Düşük lüle-plaka mesafesinde ($H \leq 1$) ve yüksek girdap numaraları

için ($S_m \geq 1,2$) için hedef yüzeyinin yakınında iki tane ters yönde dönen devridaim bölgesinin görüldüğü, yüksek lüle-plaka mesafesinde ($H > 2$) ise bunların ana jet akımının içinde ve dışında oluştuğu belirtilmiştir. Yüksek bir ısı transfer bölgesinin yalnızca daha yüksek girdap sayılarında ($1 \leq S_m \leq 3$) düşük lüle-plaka mesafesinde meydana geldiği ifade edilmiştir. $S_m \geq 0,8$ 'de yüksek lüle-plaka mesafesinde kavisli yüzey boyunca daha düzgün bir ısı transferi dağılımı oluştuğu gözlemlenmiştir. En yüksek ısı transferi bölgelerinin güçlü türbülansla ilişkili olduğu söylenmiştir.

Ortega-Casanova ve Castillo-Sanchez [92] Burger girdabına göre dönen bir çarpmalı jetin ısıtılmış düz bir plaka üzerinde meydana getirdiği ısı transferini çalışmışlardır. Reynolds sayısı $2,3 \times 10^4$ 'te ve lüle-plaka mesafesi 4 jet yarıçapında sabit tutulmuştur. Boyutsuz girdap numarası S ve girdap çekirdeği sırasıyla 0,1-1,25 ve 0,05-0,8 arasında seçilmiştir. Durma noktasında dönen jetin yalnızca küçük bir bölgede düşük S ve girdap çekirdeği değerleri için daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Dönen jetlerin yüksek ve orta girdap numaralarında %20 oranında üniform ısı transferini iyileştirdiği ifade edilmiştir.

Wongcharee ve vd. [93] bükülmüş dört-loblu lülelerle üretilen dönmeli jetlerin plakaya çarptırılmasıyla gerçekleşen ısı transferini deneysel olarak çalışmışlardır. Karşılaştırma yapmak amacıyla dairesel bir lüle ve dönmeyen dört loblu bir lüle de kullanmışlardır. Tüm lülelerden gönderilen jetlerin Nusselt sayısını, Reynolds sayısının artmasıyla ve lüle-plaka mesafesinin azalmasıyla arttığı görülmüştür. Belirli bir Reynolds sayısında ve lüle-plaka mesafesinde bükülmüş dört-loblu lülenin dairesel lüleden daha iyi ısı transferi sağladığı belirtilmiştir. Dört loblu lülenin büküm oranlarının azalmasıyla plaka üzerinde meydana gelen radyal ısı transfer dağılımının iyileştiği fakat durma bölgesinde Nusselt sayısının azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, büküm oranları 2, 3, 4, ve 5 olan dört loblu lüle, dairesel lüleyle kıyasla sırasıyla yaklaşık olarak %27,7, 25,0, 21,6 ve 19,3 oranında daha yüksek ısı transferi hızları ürettiği gözlemlenmiştir.

Fenot ve vd. [94] sıcak jetleri parçacık görüntülüne hız ölçümü ve kızılötesi termografi yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Girdap etkisinin, ortam havasını jet içerisine sürükleyerek jetin etkinliğini değiştirdiği belirtilmiştir.

Yang ve vd. [95] farklı lülelerin akış ve ısı transferi alanlarını sayısal ve deneysel olarak çalışmışlardır. Girdap açısı $15-60^\circ$ arasında ve $Re = 6 \times 10^3 - 12 \times 10^3$ aralığında seçilmiştir.

Dişli kanallara sahip lülenin durma bölgesinde en yüksek Nusselt sayısına sahip olduğu ve $Re = 6 \times 10^3$ için diğer üç lüleden % 19,19 ile % 55,98'e kadar daha yüksek ısı transfer hızına sahip olduğu ifade edilmiştir. Helisel çubuk lülenin merkezi alan dışında en yüksek ısı transferini meydana getirdiği görülmüştür.

Huang ve vd. [96] aerodinamik olarak üretilen dönmeli çarpan jetlerin akış ve ısı transferi alanını sayısal olarak çalışmışlardır. $H/D = 2$ ve 6 , $Re = 2,3 \times 10^4$, girdap numarası 0 ve $0,45$ olarak seçilmiştir. Duvar yakınındaki girdabın (dönme) gücünün lüle-plaka mesafesinin artmasıyla azaldığı belirtilmiştir. Dönmenin hem akış hem de ısı transferi alanı üzerindeki etkisinin yüksek lüle-plaka mesafesinde daha belirgin olduğu ifade edilmiştir. Yüksek lüle-plaka mesafesinde jetin çarpma plakası boyunca daha geniş çarpma bölgesini kapsadığı gözlemlenmiştir. Üniform ısı transferinin Reynolds sayısına bağlı olduğu söylenmiştir.

Literatür [26, 41] dönen jetlerin üniform soğutmayı artırdığı konusunda neredeyse hemfikirdir, ancak [36, 42-44] ısı transfer hızının artırıp artıramayacağı konusunda hem fikir değildir. Diğer bir ifadeyle lüle-plaka mesafesinin, Reynolds sayısının ve girdap numarasının belirli aralıkları için ısı transferinin artabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca dönen jetin eksenel hıza ilaveten radyal hız bileşenine sahip olması ve çarpma plakasının da akışa dahil edilmesi, dönen jet akışını dairesel jetten daha karışık ve zor hale getirdiği söylenebilir. Bu durumlar göz önüne alındığında ısı transfer hızının ve üniform ısı transferinin artması, hem de akış alanının daha iyi anlaşılması için düşük lüle-plaka mesafesinde dönen çarpmalı jetlerin çalışılmasına ihtiyaç olduğu görülmüştür.

Mevcut tez kapsamında düşük lüle-plaka mesafesinde çarpmalı dönen jetle ilgili yapılan sayısal çalışmayla, çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanı yüksekliğinin ısı transferi sonuçları üzerine etkisi literatürle karşılaştırılarak sunulmuştur. Üç farklı hesaplama alanı yüksekliği için dönmeli çarpan jet altı farklı türbülans modeliyle çalışılmıştır. Uygun türbülans modeli ve düşük lüle-plaka mesafelerinde deneysel sonuçlarla iyi uyum gösteren hesaplama alanı yüksekliği belirlenmiştir. Belirlenen yükseklik dikkate alınarak farklı düşük lüle-plaka mesafelerinin ($H/D = 0,25, 0,5, 0,75, 1$) ve farklı Reynolds sayılarının ($Re = 2,1 \times 10^3, 4,1 \times 10^3, 6,1 \times 10^3, 8,1 \times 10^3$) ısı transferi ve akış alanı üzerine etkileri çalışılmıştır [17]. Bu çalışmayla düşük lüle-plaka mesafesinde hesaplama alanı yüksekliğinin ısı transferi üzerine etkisine dikkat çekilmiş ve dönmeli çarpan jetlerin düşük lüle-plaka mesafelerinde

ısı transferi ve akış alanı üzerine elde edilen sonuçları yorumlanarak literatüre katkıda bulunulmuştur.

Birleşik çarpmalı jetler

Son zamanlarda araştırmacılar tarafından üzerinde durulan bir diğer çarpmalı jet tipinin birleşik çarpmalı jetler olduğu görülmüştür. Lüle geometrisine bağlı olarak aynı anda üretilebilen dairesel ve dönen jetlerin (birleşik çarpmalı jetler) ısı transfer hızını ve üniformluğunu iyileştirmesi için iyi bir alternatif olduğu söylenebilir. Birleşik çarpmalı jetle ilgili literatür aşağıda verilmiştir.

Demir ve Turgut [26] düşük lüle-plaka mesafelerinde birleşik çarpmalı jetlerin ısı transferi ve akış alanını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Birleşik jetler *i*) dairesel ve dörtlü helisel lüle ve *ii*) dairesel ve ikili helisel lüleler ile oluşturulmuştur. Sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış jet durumlarında sabit toplam hacimsel debi ($Q_t = 85 \text{ L/dk}$) ve düşük lüle-plakası mesafeleri ($H/D = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$) için deneyler yapılmıştır. Farklı girdap yoğunlukları için hacimsel debi oranları ($Q^* = 0,176, 0,235, 0,352, 0,588, 0,823$) kullanılmıştır. Çalışmanın sayısal modellemesi ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Birleşik çarpma jetlerin sadece dönen jetlere göre düşük lüle-plaka mesafelerinde durgunluk bölgesinde meydana getirdiği düşük ısı transferini iyileştirme potansiyeli gösterdiği böylece ısı transferi üniformluğunu iyileştirdiği belirtilmiştir. Düşük lüle-plakası mesafesinde sınırlandırılmış jet durumunun, sınırlandırılmamış jet durumuna göre durma noktasındaki ve tüm plaka üzerindeki ısı transferini azalttığı ifade edilmiştir. H/D 'deki artışın sınırlandırılmış jet durumunda ısı transferini iyileştirdiği ancak sınırlandırılmamış jet durumunda düşüşe neden olduğu görülmüştür. Birleşik jetin sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış durumları için H/D ve Q^* 'ya bağlı olarak ısı transferi tahmini için korelasyonlar sunulmuştur. Hacimsel debi oranı ve lüle-plaka mesafesindeki artışın sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış jet durumları için ısı transferi üniformluğunu artırdığı gözlemlenmiştir. Sınırlandırılmamış jet durumunun ısı transferi üniformluğu açısından daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Engelleyici plakanın çalışılan tüm şartlarda çarpma plakası üzerinde negatif bir basınç alanı oluşturduğu görülmüştür.

Markal [27] farklı toplam debiler için eş eksenli dairesel ve dönen çarpmalı hava jetleriyle sınırlandırılmış durum altında ısı transferini araştırmak amacıyla deneysel bir çalışma

yapmıştır. Lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,5, 1,0, 1,5, 2,0$ ve toplam akış hızı 40, 50, 60 L/dk olarak seçilmiştir. Toplam akış hızındaki artışın hem ısı transfer hızını hem de ısı transferi üniformluğunu olumlu yönde etkilediği, lüle-plaka mesafesi artışının ise ısı transferini olumsuz etkilediği belirtilmiştir. $H/D = 0,5$ ve 60 L/dk için en iyi ısı transferinin gerçekleştiği görülmüştür.

Markal [28] eş eksenli dairesel ve dönen hava jetlerini sınırlandırılmış ve türbülanslı koşullar altında deneysel olarak çalışmıştır. Deneyler $1,33 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ sabit toplam akış hızı için farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde ($H/D = 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5$) ve boyutsuz akış hızlarında ($Q^* = 0,25, 0,50, 0,75$) yapılmıştır. Akış oranının çarpma yüzeyi boyunca ısı transferi düzgünlüğünü iyileştirdiği ve ortalama Nusselt sayısını artırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca ısı transferinin lüle-plaka mesafesinin azalmasıyla önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir. Basınç dağılımına bağlı olarak çarpma plakası üzerinde atmosfer altı basınç bölgeleri meydana geldiği görülmüştür.

Wannasi ve Monnoyer [29] dönen ve dönmeyen birleşmiş jet grubunun akış ve ısı transferini deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Dönme hareketinin lüle çıkışından kısa bir mesafede karıştırmayı etkileyebileceği ancak yoğunluğunu hızla kaybettiği için ısı transferine olan etkisinin azaldığı belirtilmiştir.

Chandra vd. [97] dairesel ve dönen jet üreten lüleyle çarpma plakası üzerindeki ısı transferini iyileştirmek için sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Lüle geometrisinde akışkan için üç teğetsel giriş ve bir de eksenel giriş vardır. $Re = 6 \times 10^3 - 15 \times 10^3$ ve lüle-plaka mesafesi $H/D = 1,5-4$ aralığında seçilmiştir. Dönen ve dairesel jetin akış hızlarının %50 ve $H/D = 1,5$ olduğu durumlarda en yüksek transferinin meydana geldiği ifade edilmiştir.

Dönen jetlerin girdap sayısına, lüle-plaka mesafesine ve dönme üretim yöntemine bağlı olarak çarpma plakası üzerindeki ısı transferi üniformluğunu bozduğu literatürde [16, 17] görülmüştür. Dönen jetlerin özellikle düşük-lüle plaka mesafelerinde durma bölgesindeki ısı transferini en düşük, daha sonra artan radyal yönde artırarak eyer şekline benzeyen bir ısı transferine yol açtığı görülmüştür. Mevcut tez kapsamında literatürde [27, 28] göz önüne alınarak birleşik lülede dönen jetlerle birlikte aynı anda üretilen dairesel jetin, dönen jet tarafından olumsuz etkilenen üniform ısı transferini iyileştirebileceği düşünülmüştür. Ayrıca literatürde birleşik çarpmalı jetlerin ısı transferi ve akış alanı çalışmalarının da az olması

nedeniyle tez kapsamında birleşik çarpmalı jetler sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır. Lüle-plaka mesafesinin düşük ($H/D = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$) ve yüksek ($H/D = 0,8, 1,6, 2,4, 3,2$) durumlarının, lüleye verilen toplam hava debisi miktarlarının ($Q_t = 85, 80, 70, 60$ L/dk), hacimsel debi oranlarının ($Q^* = 0,176, 0,235, 0,352, 0,588, 0,823$), düz çarpma plakasının ısı transferi ve akış alanı üzerine etkileri incelenerek özgün bir çalışma yapılmıştır. Birleşik lüleler hem doğrudan aksel jetin meydana getirildiği bir dairesel kısma bir de dönmeyi oluşturan ikili, üçlü ya da dördü helisel kısımlara sahiptir. Birleşik çarpmalı jet çalışmasının genelinde bahsedilen lülelerle *i*) eş aksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ), *ii*) eş aksenli dairesel ve üçlü helisel jetler (DÜHJ), *iii*) eş aksenli dairesel ve dördü helisel jetler (DDHJ)) oluşturularak düz çarpma plakasına çarptırılmıştır.

Diğer taraftan sayısal olarak yapılan ikinci bir çalışmayla da farklı girdap numaralarına ($S_g = 0,0, 0,275, 0,551, 0,828, 1,661$) sahip lülelerle oluşturulan çarpmalı jetlerin ısı transferi ve akış alanları araştırılmıştır. Çalışmada lüle-plaka mesafesi ($H/D = 1$) ve toplam hacimsel debi ($Q_t = 75$ L/dk) sabit tutulmuştur. Hacimsel debi oranları ($Q^* = 0,2, 0,466$) ve girdap numaralarının SM ve S durumları dikkate alınarak özgün ve kapsamlı bir çalışma yapılmıştır.

Kanatçıklı çarpma plakası ile çalışılan çarpmalı jetler

Literatürde düz jetlerin kanatçıklı plakaya çarptırılmasıyla ısı transferi ve akış alanını araştıran birçok yapılmış deneysel ve sayısal çalışmaya [98-108] ulaşmak mümkündür. Bu çalışmalar genellikle elektronik elemanların soğutulması için yapıldığı görülmüştür. Diğer taraftan birleşik çarpmalı jetlerin kanatçıklı bir yüzeye çarptırılarak ısı transfer hızının ve akış alanının araştırıldığı bir çalışmanın literatürde mevcut olmadığı görülmüştür. Bu tez kapsamında birleşik jetlerin kanatçıklı plakaya çarptırılarak çalışılmasıyla literatüre yeni bir katkıda bulunulmuş ve meydana gelen ısı transferi ile akış alanı araştırılmıştır. DİHJ, DÜHJ ve DDHJ'i oluşturan lüleler ve dairesel kesitli kanatçıklara sahip iki farklı çarpma plakası çalışmada kullanılmıştır. Çarpma plakasında çapı 2 mm, boyları ise 2 ve 6 mm olan kanatçıklar kullanılmıştır. Toplam hacimsel debi $Q_t = 85, 80, 60$ L/dk olarak seçilmiştir. Hacimsel debi oranı ($Q^* = 0,176, 0,235, 0,352, 0,588, 0,823$), lüle plaka mesafesi ($H/D = 0,8, 1,6, 2,4, 3,2$), SM ve S durumları dikkate alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir.

Mevcut çalışmanın özgün yönleri

Düşük lüle-plaka mesafesinde aksenel dairesel jet ile düz çarpma plakasının sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet durumları için hız konturları ve akım çizgilerinin birbirleriyle karşılaştırılarak verilmesi ve aynı zamanda ısı transferi üniformluğu ile ilgili verilen sonuçlar çalışmanın özgün bir yönüdür. Dönen çarpmalı jetlerde düşük-lüle plaka mesafesinde çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanı yüksekliğinin ısı transferi sonuçları üzerine etkisinin sayısal olarak araştırılması çalışmanın özgünlüğünün bir diğer yönünü oluşturur. Birleşik lüleler ile düz ve kanatçıklı plakaların ısı transferi ve akış alanı üzerine etkilerinin deneysel ve sayısal olarak sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet durumları için çalışılması ve sonuçların birbiriyle kıyaslanarak verilmesi bu çalışmanın diğer bir özgün yanını oluşturmaktadır. Ayrıca birleşik lülelerde girdap numarası ile debi oranının ısı transferi ve akış alanı üzerine etkilerinin sayısal olarak incelenmesi tezin bir diğer özgün yönüdür.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

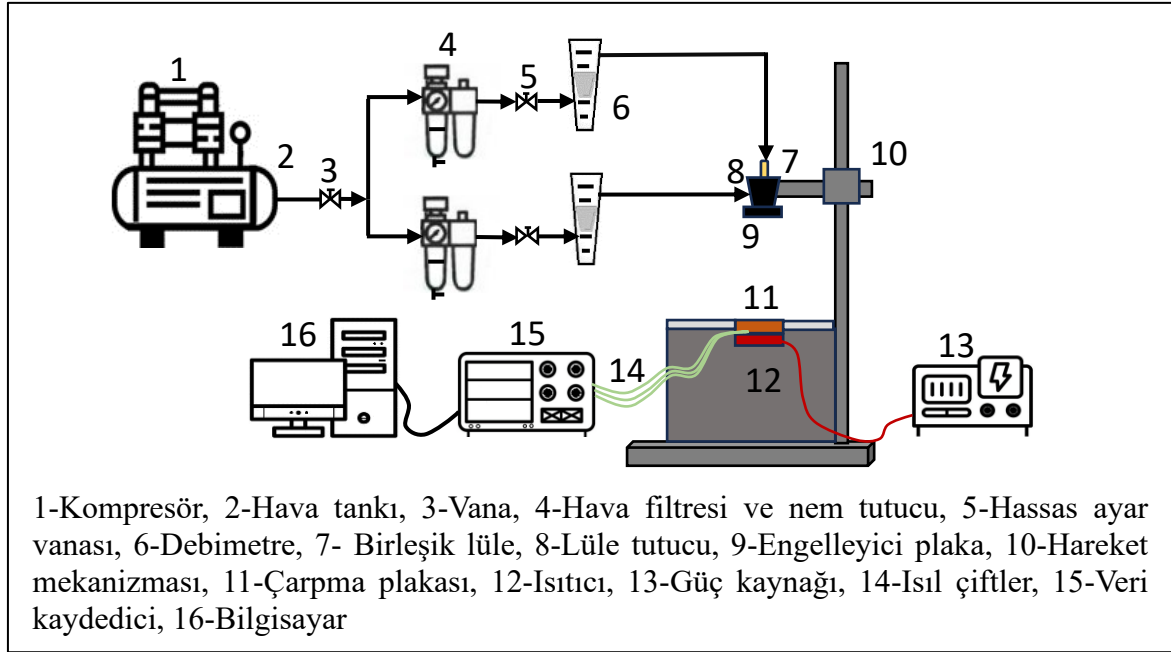
3.1. Deney Düzenegi ve Çalışma Şekli

Bu tez kapsamında kullanılan çarpmalı jet deney düzeneginin fotoğrafları Şekil 3.1’de verildiği gibidir.



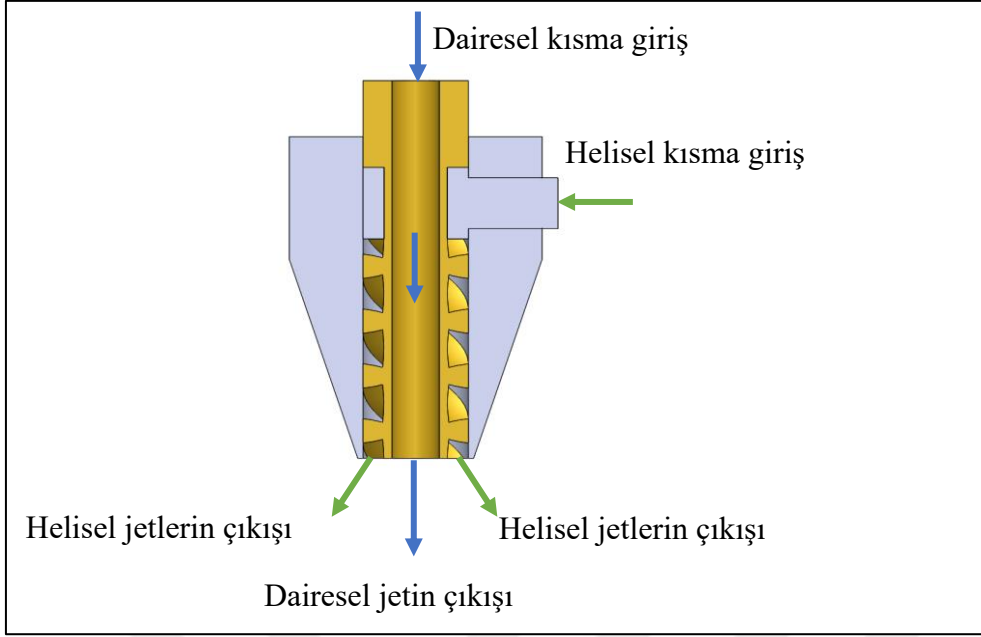
Şekil 3.1. Deney düzeneginin fotoğrafları

Deney düzeneginin daha iyi anlaşılması için ayrıntılı hali Şekil 3.2’de şematik olarak verilmiştir. Deney düzenegi kompresör, hava tankı, vana, hava filtresi ve nem tutucu, hassas ayar vanası, debimetre, birleşik lüle, lüle tutucu, engelleyici plaka, hareket mekanizması, çarpma plakası, ısıtıcı, güç kaynağı, ısıl çiftler, veri kaydedici ve bilgisayardan oluşmaktadır.



Şekil 3.2. Deney sisteminin şematik çizimi

Sistemin çalışması şu şekildedir: İlk olarak deney sistemine gerekli olan hava kompresör (1 nolu eleman) (Puma PT36/200-3M) tarafından ortamdan alınarak altında bulunan 200 L hacimli bir hava tankına (2 nolu eleman) basılır. Hava tankının üzerinde bulunan vananın (3 nolu eleman) açılmasıyla akışkan sisteme gönderilir. Tanktan çıkan hava iki ayrı hortum ve bağlantı elemanı ile iki ayrı kola ayrılmıştır. Her bir kol üzerinde havanın nem ve tozunun alınması için basınç regülatörüne sahip hava filtreleri (4 nolu eleman) (Osaka 3042 FRL) ve çalışılan şartlara göre akışkanın debisini ayarlamak için kullanılan hassas ayar vanaları (5 nolu eleman) ve debimetreler (6 nolu eleman) (LZT-6T) vardır. Akışkanın geldiği iki ayrı koldan birisi Şekil 3.3'te gösterilen birleşik lülenin (7 nolu eleman) dairesel kısmına diğeri ise lüle tutucu (8 nolu eleman) yardımıyla dönmeyi oluşturan helisel kısımların üst kısmına giriş yapar. Daha sonra birleşik lüle tarafından oluşturulan dairesel ve helisel jetler plaka yüzeyine çarptırılır. Çarpma plakasının (11 nolu eleman) altına yerleştirilen bir ısıtıcı (12 nolu eleman) ile sabit ısı akışı sağlanmıştır. Isıtıcıya elektrik enerjisi DC güç kaynağından (13 nolu eleman) (GW Instek GPS-3303) beslenmiştir. Çarpma plakasının altına yerleştirilen K-tipi ısı çiftleri (14 nolu eleman) ile okunan sıcaklıklar, veri kaydediciye (15 nolu eleman) (Agilent 34970A) oradan da bilgisayara (16 nolu eleman) aktararak okunmuş ve kaydedilmiştir. Hareket mekanizmasıyla (10 nolu eleman) lüle hareket ettirilerek çarpma plakasına olan mesafe ayarlanmıştır. Lüle tutucuya bağlanan ve çarpma plakasına paralel olan engelleyici plaka (9 nolu eleman) ile sınırlandırılmış jet durumu meydana getirilmiştir.



Şekil 3.3. Birleşik lülenin kesitli görünümü

Şekil 3.4’te deneyde kullanılan kompresörün fotoğrafı görülmektedir. Sisteme gerekli olan hava pistonlu kompresör tarafından sağlanır. Modeli Puma PT36/200-3M’dir. Kompresör vasıtasıyla hava, kompresörün altındaki hava tankına basılır. Hava tankının kullanım amacı akış için gerekli havanın sürekliliği ve kararlılığını garanti altına almaktır. Ayrıca sisteme gerekli olan hava, tankta biriktirildiği için kompresörün ihtiyaç anında çalışması sağlanmıştır.



Şekil 3.4. Deneyde kullanılan kompresörün fotoğrafı

Çizelge 3.1’de deneyde kullanılan kompresörün teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kompresörün özellikleri

Özellik	Değer
Maksimum çalışma basıncı (bar)	12
Hava emiş gücü (L/dk)	280
Depo hacmi (L)	200
Çalışma voltajı (V)	380
Motor gücü (hp)	3
Kütle (kg)	113

Şekil 3.5’te deneyde kullanılan nem ve toz tutucunun fotoğrafı verilmiştir. Nem tutucunun modeli Osaka 3042 FRL’dir. Basıncı hava nem tutucunun giriş kısmından geçtikten sonra hava filtresinin içine girer. Filtre havadaki büyük parçacıkları, tozları ve kirleri tutarken bu aşamada su buharı yoğunlaşarak su damlacıkları haline gelir. Filtrede yoğunlaşan su damlacıkları ve büyük partiküller, yerçekimi etkisiyle filtreden aşağı doğru iner ve filtre kabının alt kısmında toplanır. Filtre kabının altında bulunan bir tahliye vanasıyla biriken su ve kirler düzenli olarak boşaltılır. Filtrelenmiş hava basınç düzenleyicisine (regülatör) geçer. Basınç regülatörü deney sisteminde meydana gelebilecek basınç dalgalanmalarını önlenmek ve sistemi sabit bir basınçta tutmak için kullanılır.



Şekil 3.5. Deneyde kullanılan nem alıcının fotoğrafı

Çizelge 3.2’de deneyde kullanılan nem tutucunun özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 .Nem tutucunun özellikleri

Özellik	Değer
Hava girişi çapı (inç)	1/2
Çalışma basıncı aralığı (atm)	0,5-9,9
Su kapasitesi (ml)	80
Hava geçirgenliği (L/dk)	2200
Kütle (kg)	1

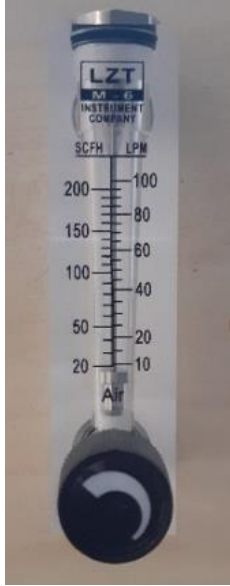
Deneyde kullanılan hassas hız ayar vanasının fotoğrafı Şekil 3.6’da verilmiştir. Vananın girişi ve çıkışı olmak üzere iki portu vardır. Hassas hız ayar vanalarının içinde genellikle bir iğne veya konik valf mekanizması bulunmaktadır. Bu mekanizma ile akışkanın geçiş yolu kısmen veya tamamen kapatılarak akış hızı kontrol edilir. Bu tür vanalar basınç ve akış değişikliklerine karşı hassas olduklarından, sistemdeki diğer bileşenlerin performansını artırır. Bu deney sisteminde kullanılan hassas hız vanaları debimetrenin hassas ayarlanabilmesi için kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Deneyde kullanılan hassas hız ayar vanasının fotoğrafı

Deneyde kullanılan debimetrenin fotoğrafı Şekil 3.7’de verilmiştir. Debimetrenin modeli LZT-6T’dir. Debimetreler sisteme dikey olarak bağlanmıştır. Akışkanın izlenmesini sağlayan şeffaf bir gövdeye sahiptir. Debimetre değişken alan prensibi (rotametre) ile çalışır. Bu prensibe göre debimetrenin içinde bir şamandıra ve konik bir boru bulunur. Akışkan giriş kısmından debimetreye girer ve konik boru içerisinden geçerken şamandırayı yukarı doğru iter. Şamandıra akışkanın debisine (hızına) bağlı olarak boru içinde belirli bir yüksekliğe

kadar çıkar. Şamandıra akış hızı arttıkça yükselir, azaldıkça aşağı iner. Şamandıranın üst kısmından akışkanın debisi okunur.



Şekil 3.7. Deneyde kullanılan debimetrenin fotoğrafı

Çizelge 3.3'te deneyde kullanılan debimetrenin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Debimetrenin özellikleri

Özellik	Değer
Malzeme	Polimetil metakrilat
Bağlantı tipi	1/4" dişi
Doğruluk	% ± 4
Çalışma basıncı (MPa)	0,6
Çalışma aralığı (L/dk)	10-100

Sıcaklık ölçümleri için K-tipi ısıl çiftler kullanılmıştır. Deneyde kullanılan ısıl çiftlerin ve ölçüm yapılan uçları birbirine kaynatan makinenin fotoğrafı Şekil 3.8'de verilmiştir. Isıl çiftler sıcaklık ölçümünde kullanılan bir sensör olarak ifade edilebilir. İki farklı metalin birleşiminden oluşurlar ve sıcaklık değişimine bağlı olarak Seebeck etkisi adı verilen bir fiziksel ilkeye dayanarak çalışırlar. Deneyde kullanılan ısıl çiftlerin tel çapı 0,127 mm'dir (AWG 36).



Şekil 3.8. K tipi ısı çift ve kaynak makinesinin fotoğrafı

Çizelge 3.4'te deneyde kullanılan ısı çiftlerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. Isıl çiftlerin özellikleri

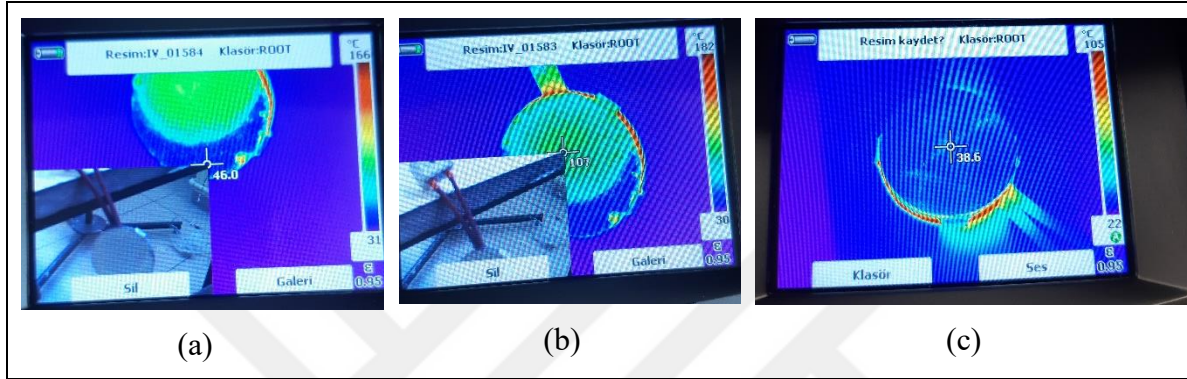
Özellik	Değer
Tipi	K
Malzeme	(+) Nikel-Krom / (-) Alaşımli Nikel
Çalışma sıcaklığı (°C)	-150' den +1100' e
100' de (°C) üretilen elektro manyetik kuvvet (V)	4,095
Tel kesiti (AWG)	36
Bir adet iletken telin çapı (mm)	0,127
Teflon (PTFE) kılıfın dayanım sıcaklığı (°C)	0' dan +200' e

Doğru akım (DC) güç sağlayıcının fotoğrafı Şekil 3.9'da verilmiştir. Deneyde kullanılan DC güç sağlayıcısı voltaj ve akımın istenen şekilde ayarlanarak, ısıtıcıdan sabit ısı akısı elde etmek için kullanılmıştır.



Şekil 3.9. DC güç sağlayıcının fotoğrafı

Kullanılan ısıtıcı DC güç kaynağına bağlanarak üniform ısı akısı sağlayıp sağlamadığı, deneylere başlamadan önce test edilmiştir. Şekil 3.12’de ısıtıcının termal kamerayla çekilen görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.12(a), (b) ve (c) sırasıyla ısıtıcının ilk ve son test görüntülerini gösterir. İlk denemelerde ısıtıcı yüzeyindeki galvaniz sacın yapısı bozulmuştur. Yüzeydeki bu sacın değişimi sağlanmış ve ısıtıcı Şekil 3.12(c)’de görüldüğü gibi istenen üniform ısı akısını sağlayacak hale gelmiştir.

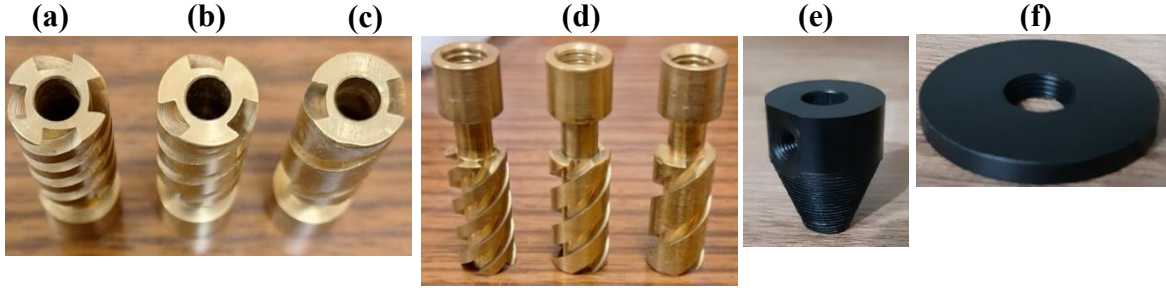


Şekil 3.12. Isıtıcının termal kamera ile çekilen görüntüleri (a) ve (b) ilk testlerinin, (c) son testinin

Deneyde kullanılan birleşik lülelerin, lüle tutucunun ve engelleyici plakanın fotoğrafları Şekil 3.13’te verilmiştir. Şekil 3.13(a)-(c)’de sırasıyla eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüle, eş eksenli dairesel ve üçlü helisel lüle, eş eksenli dairesel ve ikili helisel lülenin alttan görünümü görülmektedir. Şekil 3.13(d)’de birleşik lülelerin önden görünümü verilmiştir. Birleşik lüleler bilgisayar destekli numerik (CNC) takım tezgâhlarında pirinç malzemeden imal edilmiştir. İmalat esnasında alınan fotoğraflar Ek-1’de verilmiştir.

Birleşik lülenin dairesel kısmından dairesel jet (DJ) üretimi sağlanırken, helisel kısımlarından ise teğetsel hız bileşenine sahip helisel jetlerin (dönen jetlerin) üretimi sağlanmıştır. Diğer bir ifadeyle, durma bölgesi için yüksek ısı transfer hızı sağlayabilen dairesel jet ile ısı transferi üniformluğunu çarpma plakası boyunca artırabilen dönmeli jetlerin aynı anda üretilmesi birleşik lülelerle sağlanmıştır. Eş eksenli dairesel ve ikili helisel lüle, eş eksenli dairesel ve üçlü helisel lüle, eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülelerden sırasıyla eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ), eş eksenli dairesel ve üçlü helisel jetler (DÜHJ), eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) üretilmiştir. Daha sonra bir birleşik lüleden aynı anda üretilen bu jetlerin farklı toplam hacimsel debilerde (Q_t), farklı hacimsel debi oranlarında (Q^*), farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D),

sınırlandırılmamış jet (SM) veya sınırlandırılmış jet (S) durumları altında düz ya da kanatçıklı plakaya çarptırılarak ısı transferi ve akış alanlarına etkisi çalışılmıştır.

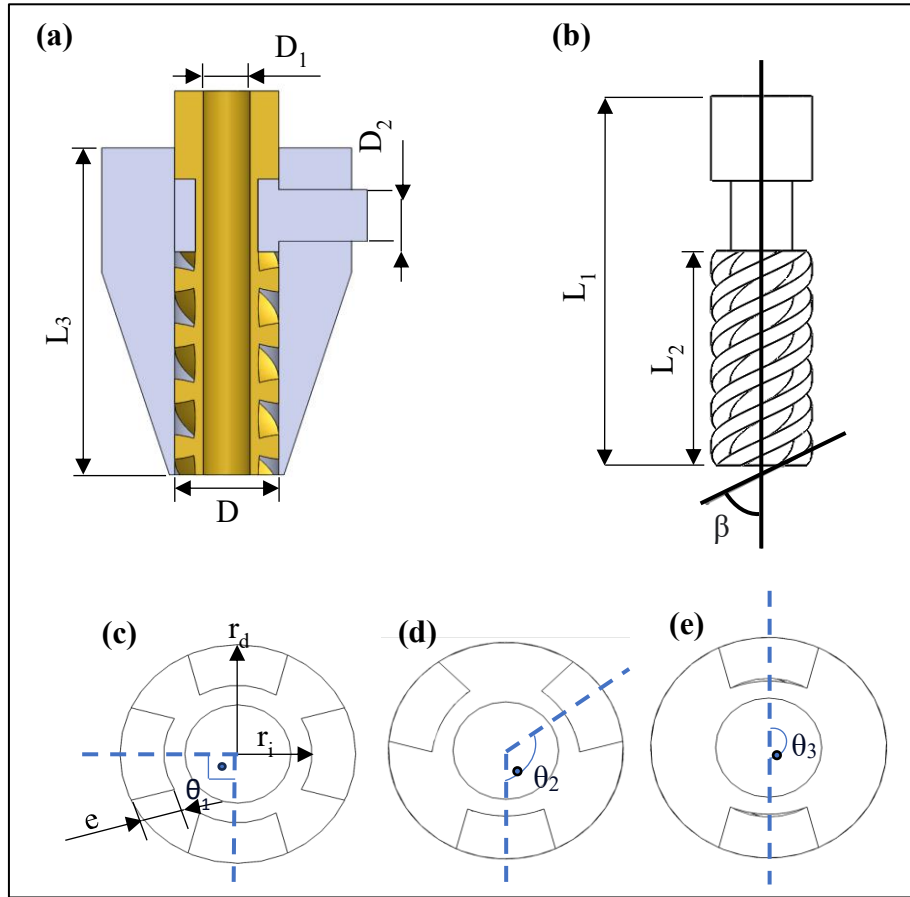


Şekil 3.13. Deneyde kullanılan birleşik lülelerin, lüle tutucunun ve engelleyici plakanın fotoğrafları (a)-(c) eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel, üçlü helisel, ikili helisel lülelerin alttan görünüşleri, (d) birleşik lülelerin önden görünümü, (e) lüle tutucu, (f) engelleyici plaka

Şekil 3.13(e)'de lüle tutucunun fotoğrafı verilmiştir. Birleşik lüleler bu tutucunun içine yerleştirilmiştir. Lüle tutucunun yan kısmına açılan delik ile helisel kısımlara hava girişi sağlanmıştır. Lüle tutucunun alt kısmına dış açılarak imal edilmiştir. Böylece dış açılan kısma Şekil 3.13(f)'de gösterilen engelleyici plakanın bağlanabilmesi sağlanmıştır. Çalışmadaki sınırlandırılmış jet durumu bu şekilde lüle tutucuya engelleyici plakanın bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Engelleyici plakanın çapı, çarpma plakalarıyla aynıdır. Ayrıca engelleyici plaka çarpma plakalarına paralel olacak şekilde lüle tutucuya bağlanmıştır. Engelleyici plakanın lüle tutucudan sökülmesiyle çalışmadaki sınırlandırılmamış jet durumu meydana getirilmiştir. Engelleyici plaka söküldükten sonra lüle tutucunun tekrar bir engelleyici plaka vazifesi görmemesi için (sınırlandırılmamış jet durumuna engel olmaması için) konik bir geometride imal edilmiştir. Engelleyici plakanın ve lüle tutucunun malzemesi Delrin'dir. Ticari olarak poliasetal ya da polioximetilen (POM) olarak bilinen bir termoplastiktir.

Birleşik lüle ve lüle tutucunun geometrik parametreleri Şekil 3.14'te verilmiştir. Hem dairesel hem de dönen jetleri oluşturan birleşik lülenin boyu L_1 'dir. Dönen jetleri oluşturan heliselerin sarıldığı silindirin yüksekliği L_2 'dir. Birleşik lülenin girdap açısı β 'dir. Dairesel lülenin çapı D_1 'dir. Lüle tutucudan helisel kısımlara giriş için açılan deliğin çapı D_2 'dir. Lüle tutucunun boyu L_3 'tür. Birleşik lülenin çapı D 'dir. Helisel kanalların genişliği e 'dir. Birleşik lülenin merkezinden helisel kanalların iç yarıçapı ve dış yarıçapı sırasıyla r_i ve r_d 'dir. Birleşik lülenin geometrik olarak hesaplanan girdap sayısı $S_g = 1,1$ 'dir. Helisellerin

birbirlerine göre konum açıları eş eksenli dairesel ve dörtlü, üçlü, ikili helisel lüleler için sırasıyla θ_1 , θ_2 , θ_3 'tür.



Şekil 3.14. Birleşik lüle ve lüle tutucunun geometrik parametreleri (a) lüle ve lüle tutucunun kesitli görünümü, (b) birleşik lüle, (c)-(e) sırasıyla eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel, üçlü helisel, ikili helisel lülenin alttan görünümü

Çizelge 3.5'te lülelerin ve lüle tutucunun geometrik ölçüleri verilmiştir.

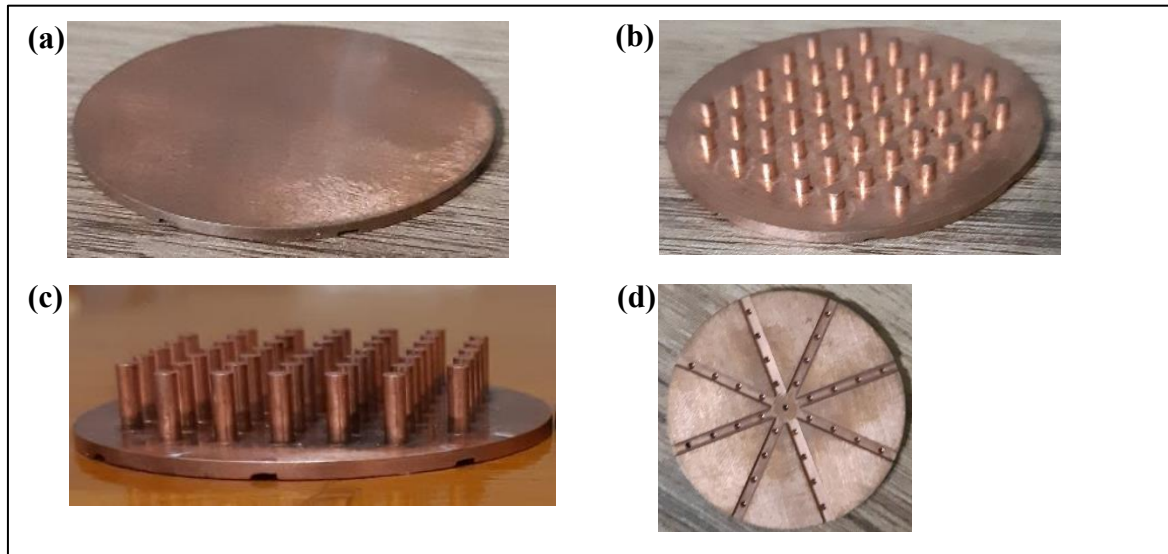
Çizelge 3.5. Birleşik lüle ve lüle tutucunun geometrik ölçüleri

Parametre	Değeri
Birleşik lülenin çapı (D)	10 mm
Dairesel lülenin çapı (D_1)	4,5 mm
Helisel lülelere giriş çapı (D_2)	5 mm
Birleşik lülenin boyu (L_1)	37 mm
Helisellerin sarıldığı silindirin boyu (L_2)	21,5 mm
Lüle tutucunun boyu (L_3)	31,5 mm
Girdap açısı (β)	52,97°

Çizelge 3.5. (devam) Birleşik lüle ve lüle tutucunun geometrik ölçüleri

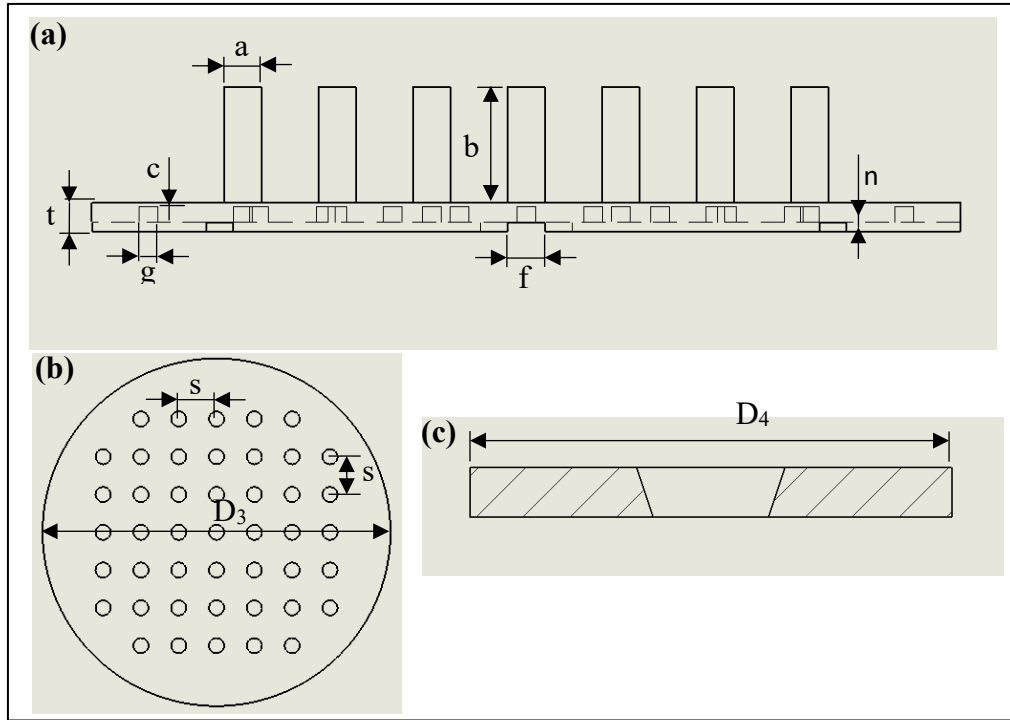
Parametre	Değeri
Helisel kanalların dış yarıçapı (r_d)	5 mm
Helisel kanalların iç yarıçapı (r_i)	3,14 mm
Helisel kanalların genişliği (e)	1,9 mm
Helisellerin birbirlerine göre konum açısı ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)	90°, 120°, 180°

Şekil 3.15'te tez çalışmasında kullanılan çarpma plakalarının fotoğrafları verilmiştir. Tüm çarpma plakaları ısı iletkenlik katsayısı ($k_b = 394 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) yüksek olan bakır malzemeden imal edilmiştir. Çarpma plakalarının çapları (D_3) ve et kalınlıkları (t) tüm plakalar için aynıdır. Şekil 3.15 (a)'da düz çarpma plakası (P0) gösterilmiştir. Şekil 3.15 (b) ve (c)'de sırasıyla kanatçık boyları 2 (P2) ve 6 mm (P6) olan çarpma plakaları gösterilmiştir. Kanatçıkların tüm plakalardaki çapları 2 mm olarak sabit tutulmuştur. Kanatçıklı plakalar üzerindeki kanatçık sayısı da kırk beş adet olarak sabittir. Şekil 3.15 (d)'de ise çarpma plakalarının alttan çekilen fotoğrafı görülmektedir. Plakaların et kalınlığı ($t = 1,5 \text{ mm}$), ısı direnci ve yanlardan olan ısı transferini en aza indirmek için düşüktür. Çarpma plakalarının altına ısı çiftleri yerleştirmek için boydan boya dört kanal açılmıştır. Ayrıca plakaların altına toplamda otuz üç delik açılmış olup bunların on yedi tanesi ısı çiftlerin yerleşimi için kullanılmıştır. Açılan kanallara ısı çiftlerin kabloları uzatılarak yatırılmıştır. Böylece çarpma plakasının ısıtıcıyla tam teması sağlanmıştır. Deliklere çarpma yüzeyinin sıcaklığını ölçmek için ısı çiftleri yerleştirilmiştir.



Şekil 3.15. Deneyde kullanılan çarpma plakaları (a) düz çarpma plakası, (b) ve (c) kanatçık boyları 2 ve 6 mm olan çarpma plakaları, (d) çarpma plakasının alttan görünümü

Çarpma plakası ve engelleyici plakanın geometrik parametreleri Şekil 3.16’da verilmiştir. t ve D_3 sırasıyla çarpma plakasının kalınlığı ve çapıdır. D_4 engelleyici plakanın çapıdır. a , b ve s sırasıyla kanatçık çapı, boyu ve kanatçıklar arası mesafedir. f ve n sırasıyla plakaların altına açılan kanalların genişliği ve yüksekliğidir. g ve c sırasıyla kanalların içine ısıl çiftleri yerleştirmek için açılan deliklerin çapı ve boyudur.



Şekil 3.16. Çarpma ve engelleyici plakaların geometrik parametreleri (a) ve (b) çarpma plakasının önden ve üstten görünümü, (c) engelleyici plakanın önden görünümü

Çizelge 3.6’da çarpma plakası ve engelleyici plakanın geometrik ölçüleri verilmiştir. $b = 0$ mm durumu düz çarpma plakası durumunu göstermektedir. Diğer kanatçıklı çarpma plakaları için ise $b = 2$ ve 6 mm’dir.

Çizelge 3.6. Çarpma plakası ve engelleyici plakanın geometrik ölçüleri

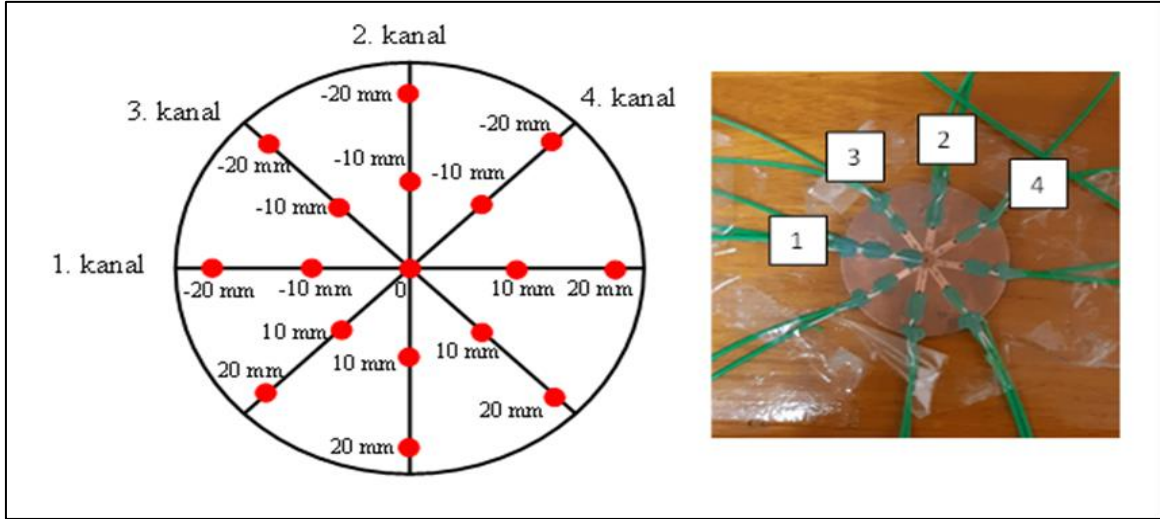
Parametre	Değeri (mm)
Çarpma plakasının kalınlığı (t)	1,5
Çarpma plakasının çapı (D_3)	46
Engelleyici plakanın çapı (D_4)	46
Kanatçık çapı (a)	2
Kanatçık boyu (b)	0, 2, 6

Çizelge 3.6. (devam) Çarpma plakası ve engelleyici plakanın geometrik ölçüleri

Parametre	Değeri (mm)
Kanatçıklar arası mesafe (s)	5
Kanal genişliği (f)	2
Kanal yüksekliği (n)	0,5
Delik çapı (g)	1
Delik boyu (c)	0,8

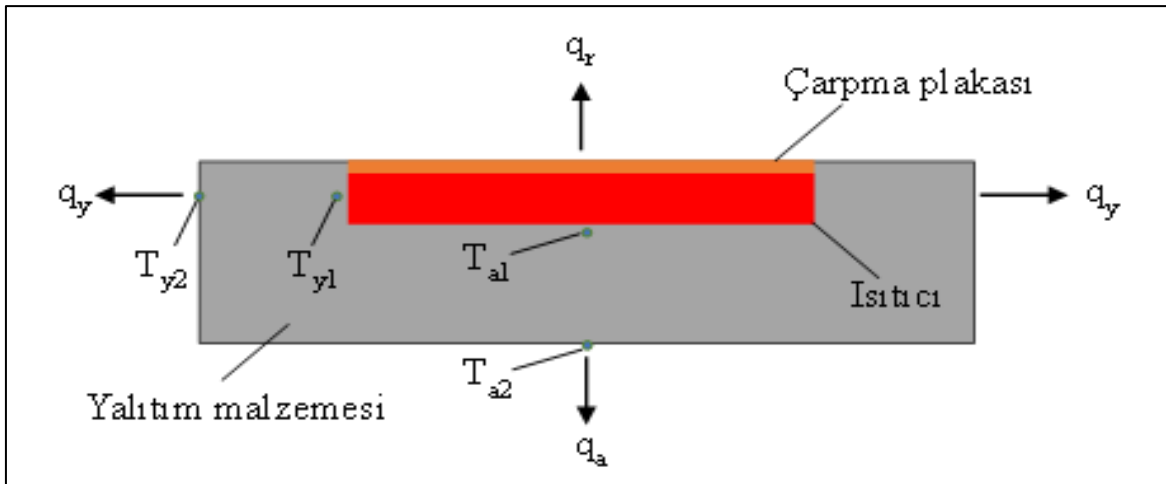
3.2. Sıcaklık Ölçümleri ve Isı Akısından Bağımsızlık

Şekil 3.17’de sıcaklık ölçümleri için kullanılan kalibre edilmiş K-tipi ısı çiftlerinin çarpma plakasına yerleşimleri verilmiştir. Tüm plakalar için konumlandırma bu şekilde yapılmıştır. Her bir plakanın altına boydan boya dört kanal açılmıştır. Şekil 3.17’de sol tarafta verilen şematik resimde görüldüğü gibi her bir ısı çiftinin birbirine olan uzaklığı 10 mm’dir. Durma noktasındaki sıcaklığı ölçmek için plakanın merkezine ($r = 0$ mm) bir adet ve her bir kanala ($r = -20$ mm, -10 mm, 10 mm, 20 mm) dört adet ısı çifti yerleştirilmiştir. Bir plakaya yerleştirilen toplam ısı çifti sayısı on yedidir. Şekil 3.17’de sağ tarafta verilen fotoğrafta görüldüğü üzere ısı çiftlerinin kabloları açılan kanallara yatırılmıştır. Bir ısı çiftinin, plakanın üst yüzeyine yani jetin çarptığı yüzeye olan uzaklığı 0,2 mm’dir. Bu yakınlık sebebiyle yüzey sıcaklıkları hassas olarak ölçülmüştür. Isı çiftleri açılan deliklere yeşil renkteki macunla yapıştırılmıştır. Plakanın yan yüzeyinden iletimle olan ısı kaybını belirlemek amacıyla plakanın yanına iki adet ve plakadan 6 mm uzaklığa yalıtım malzemesinin içine iki adet ısı çifti yerleştirilmiştir. Ayrıca alt yüzeyden iletimle olan ısı kaybını belirlemek amacıyla alta iki adet ve 9 mm uzaklığa iki adet ısı çifti yerleştirilmiştir. Bir de çevre sıcaklığını ölçmek için bir adet ısı çifti kullanılmıştır. Böylelikle sistemde ölçüm yapan toplam ısı çifti sayısı yirmi altıdır. Sıcaklıkların okunması için Agilent 34970A marka veri kaydedici kullanılmıştır.



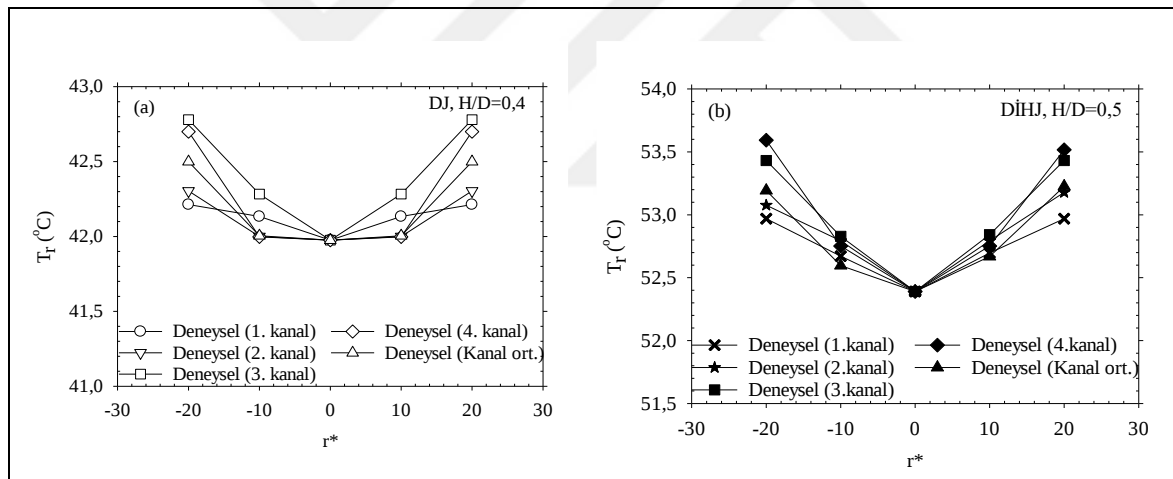
Şekil 3.17. Isıl çiftlerin çarpma plakasına yerleşimi

Şekil 3.18’de sistemde meydana gelen ısı kayıpları ve ısı kayıplarının hesaplanmasında kullanılan sıcaklık ölçüm yerleri gösterilmektedir. Çarpma plakasına ısıtıcıdan sağlanan net ısı güç, DC güç sağlayıcıdan sağlanan elektriksel güçten ısı kayıplar çıkarılarak hesaplanmıştır. Çarpma plakasının yüzeyinden ışıınım ile olan ısı transfer kaybı (q_r), çarpma plakası ve ısıtıcının yan yüzeylerinden iletim ile olan ısı transfer kaybı (q_y) ve ısıtıcının alt yüzeyinden iletimle olan ısı transfer kaybı (q_a) ısı kayıpların toplamını oluşturur. Isı transferi kayıplarının hesaplanmasında kullanılan sıcaklık değerleri, yalıtım malzemesine yerleştirilen ısı çiftleriyle ölçülmüştür. Isıl çiftlerin konumları Şekil 3.18’de yeşil nokta ile gösterilmiştir. T_{a1} ve T_{a2} sırasıyla ısıtıcının altına konulan yalıtım malzemesinin üst ve alt yüzey sıcaklıklarını, T_{y1} ve T_{y2} ise ısıtıcının yanına konulan yalıtım malzemesinin iç ve dış yüzeyi sıcaklıklarını gösterir.



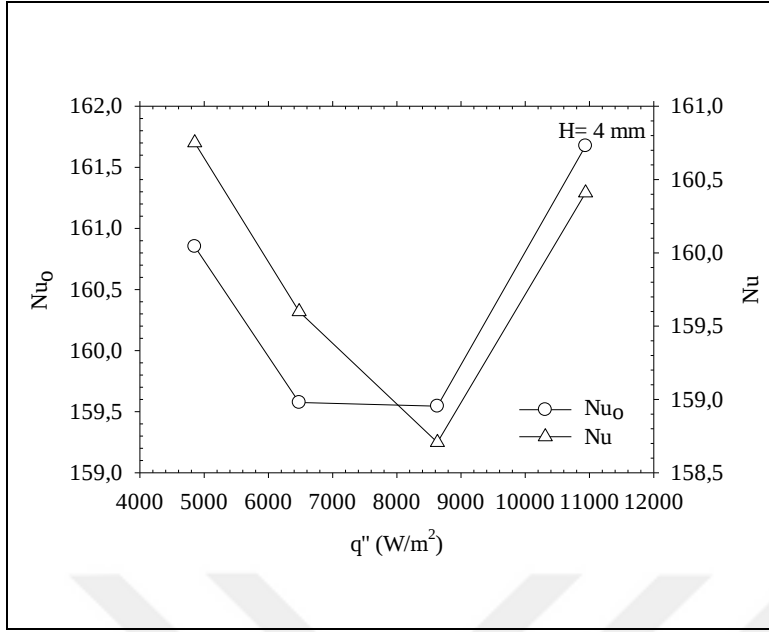
Şekil 3.18. Isı kayıpları ve ısı kayıpları için sıcaklık ölçüm yerlerinin şematik görünümü

Şekil 3.19’da dört kanaldaki sıcaklık dağılımı boyutsuz radyal mesafe (r^*) boyunca dairesel jet (DJ) ve eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) için toplam hacimsel debinin $Q_t = 85$ L/dk ve çarpma plakasına uygulanan ısı gücünün 17,96 W olması durumunda verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.19’da dört kanalın ortalama sıcaklığı (çarpma plakasının ortalama sıcaklığı) verilmiştir. Şekil 3.19(a)’da DJ ile düz plakada (P0) sınırlandırılmamış jet (SM) durumu için meydana gelen sıcaklık dağılımı boyutsuz lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,4$ için gösterilmiştir. Şekil 3.19(b)’de ise DİHJ’nin düz plakaya çarpmasıyla sınırlandırılmış jet (S) durumunda meydana gelen sıcaklık dağılımı hacimsel debiler oranı $Q^* = 0,352$ ve $H/D = 0,5$ için verilmiştir. DJ durumunda farklı kanallardan ölçülen sıcaklıklar birbirlerine göre en fazla %1,4 büyüklüğünde farklılık göstermişlerdir. Diğer taraftan DİHJ durumunda kanallardaki sıcaklıkların birbirlerine göre en fazla farklılığı %1,1’dir. Kanallara göre sıcaklıkların çok değişmemesinden dolayı ısı transferi hesaplamaları için birinci kanaldaki sıcaklıklar esas alınmıştır.



Şekil 3.19. Düz plakada kanallara göre sıcaklık dağılımı (a) DJ ile SM durumu, (b) DİHJ ile S durumu

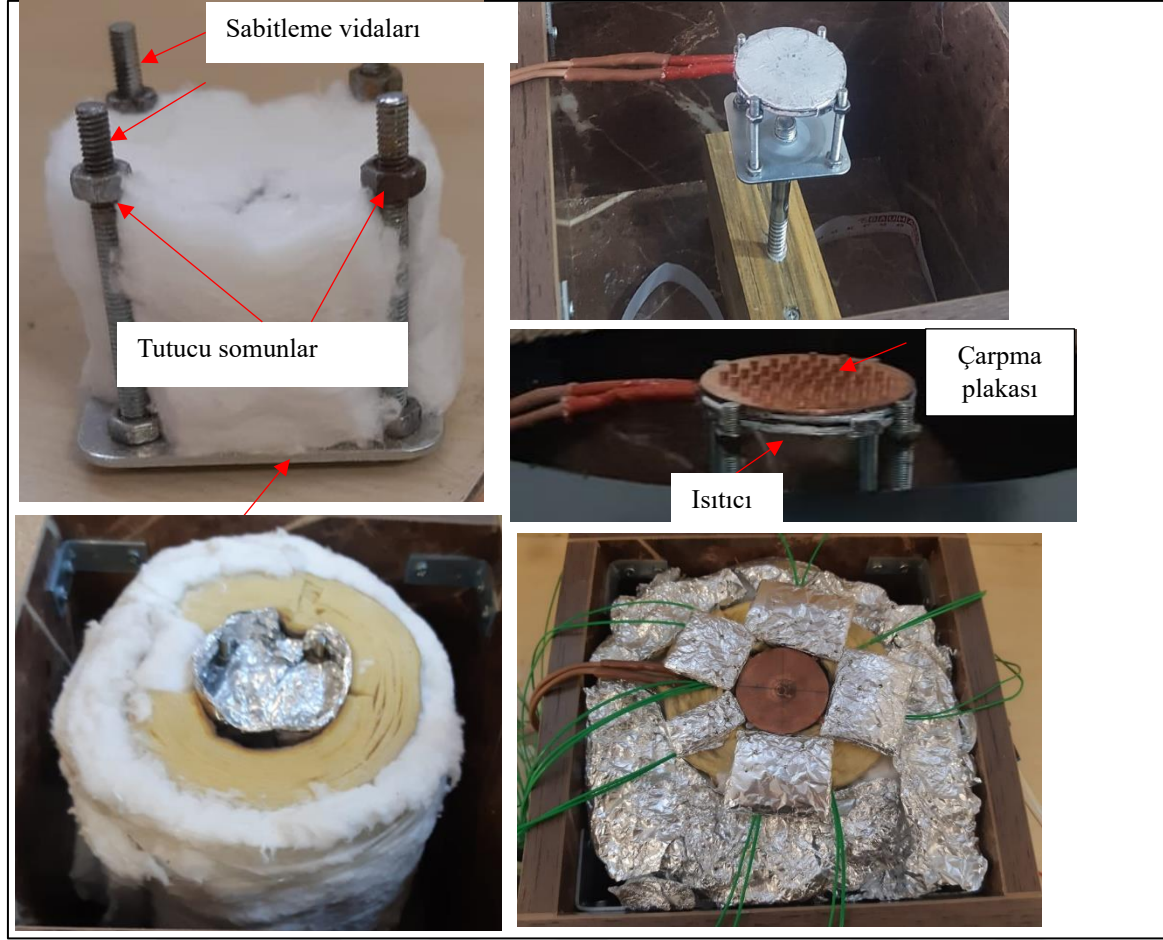
Şekil 3.20’de durma noktasındaki Nusselt sayısının (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısının (Nu) farklı ısı akıları ile değişimi boyutsuz lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,4$ için verilmiştir. Farklı ısı akıları için Nu_o ’da meydana gelen en yüksek fark %1,4; Nu ’da ise %1,3’tür. Bu durum göz önüne alındığında ısı akısı değişiminin Nu_o ve Nu üzerinde çok etkili olmadığı görülmüştür. Bu nedenle ısı transferinin ısı akısından bağımsız olduğu söylenebilir.



Şekil 3.20. Nu_o ve Nu 'nin farklı ısı akıları ile değişimi

3.3. Deney Setinin Kurulumu

Çarpma plakası ve ısıtıcının yerleşim fotoğrafları Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Isıtıcı, çarpma plakasının altında olacak şekilde her ikisi de bir alt tutucuya tutturulmuştur. Alt tutucu: somunlar, sabitleme vidaları ve taban plakasından oluşmaktadır. Sabitleme vidaları alt taban plakasına sabitlenerek, çarpma plakası ve ısıtıcının sağa sola kayması önlenmiş, belli bir konumda sabit duran somunlarla da aşağı yönde olabilecek hareket engellenmiştir. Ayrıca sabitleme vidaları ve somunlar vasıtasıyla ısıtıcı ve çarpma plakası birbirine sıkıca temas ettirilmiş olup aralarına ısıl macun sürülmüştür. Böylece ısıtıcı ile çarpma plakası arasındaki ısı transferi tam olarak sağlanmıştır. Alt tutucu, alt taban plakasının ortasına yerleştirilen vida ile tahtaya sabitlenmiştir. Daha sonra ısıtıcı ve çarpma plakası taş yünü ve cam yünüyle yatılarak sıcaklıkların ölçüldüğü test düzeneği kısmı oluşturulmuştur.



Şekil 3.21. Çarpma plakası ve ısıtıcının yerleşim fotoğrafları

3.4. Deneylerin Yapılışı ve Tekrarlanabilirlik

Yapılan deneylerde farklı birleşik lülelerden üretilen birleşik jetler ile düz ve kanatçıklı plakaların, farklı akış karakteristiği gösteren iki farklı lüle-plaka mesafesi ($0,1 \leq H/D \leq 0,4$ ve $0,8 \leq H/D \leq 3,2$) aralığında, farklı toplam hacimsel debiler ve hacimsel debi oranlarında, sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında ısı transferi üzerine olan etkileri incelenmiştir.

Lüle-plaka mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ olduğu aralık için yapılan deneysel çalışmalar

Eş eksenli dairesel ve ikili, dörtlü helisel (dönen) jetlerin SM ve S durumlarında düz plaka ile ısı transferi üzerine etkileri boyutsuz lüle-plaka mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ olduğu aralık için çalışılmıştır. Lüle-çarpma plaka mesafesi $H = 1, 2, 3, 4$ mm olarak seçilmiştir. Bu mesafeler boyutsuz olarak $H/D = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$ 'e karşılık gelmektedir. Toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutulmuştur. Dairesel ve helisel kısımlara ayrı ayrı gönderilen

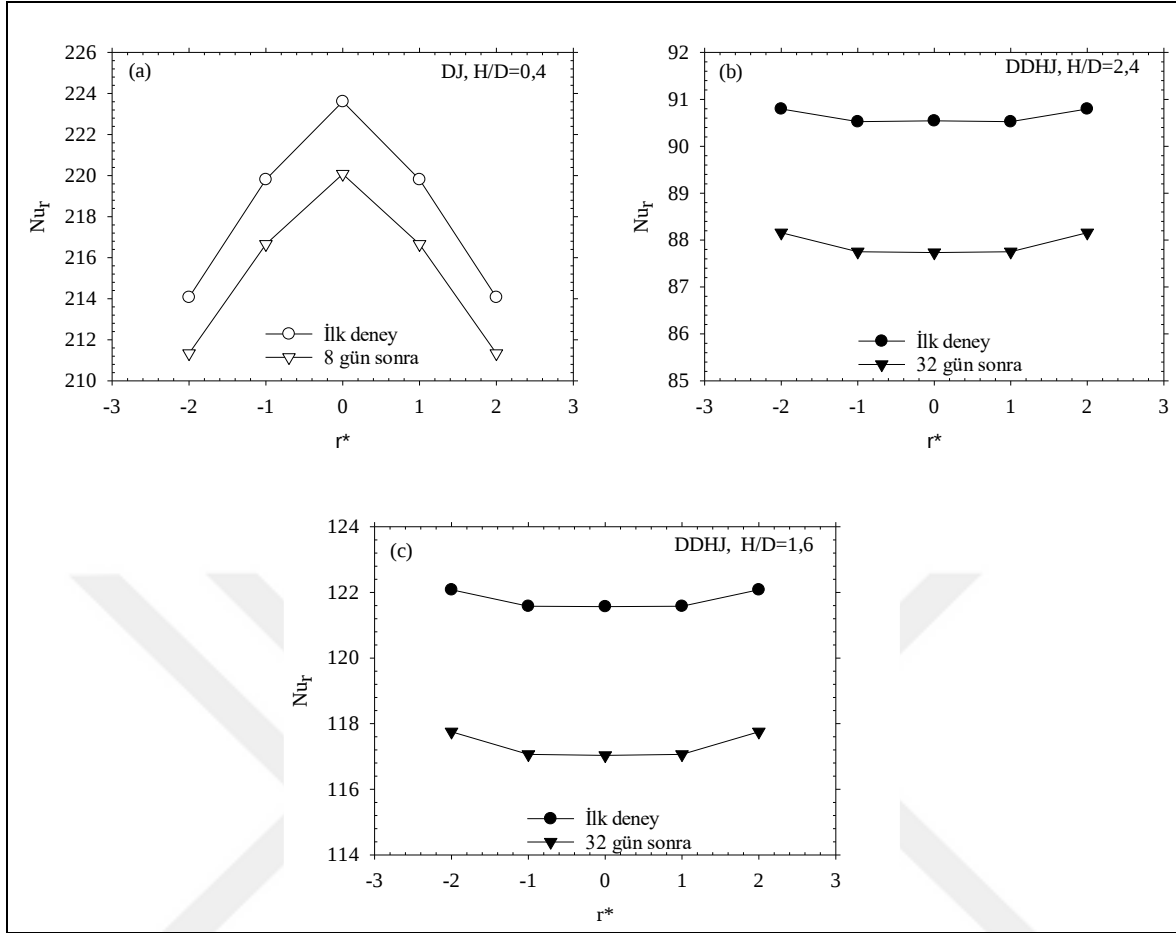
hacimsel debilerin, ısı transferine olan etkilerini incelemek için tanımlanan hacimsel debi oranı eş eksenli dairesel ve ikili helisel lüle için $Q^* = 0,176, 0,235, 0,352$ olarak seçilirken, eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüleye 0,588 ve 0,823 hacimsel debi oranları da eklenmiştir. Hacimsel debi oranının $Q^* = 0,0$ olduğu durum yalnız dairesel lüleden akışın olduğunu ifade etmektedir. Deneylerden elde edilen verilerle ısı transfer hızı ve üniformluğu değerlendirilmiştir. Sonuçlar SM ve S durumlarına, Q_t , Q^* ve H/D 'ye bağlı olarak durma, ortalama ve yerel Nusselt sayılarıyla verilmiştir.

Lüle-plaka mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ olduğu aralık için yapılan deneysel çalışmalar

Eş eksenli dairesel ve ikili, üçlü, dörtlü helisel (dönen) jetlerin sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları altında düz plaka (P0), kanatçık boyları 2 mm (P2) ve 6 mm (P6) olan çarpma plakaları ile ısı transferine etkileri boyutsuz lüle-plaka mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ olduğu aralık için çalışılmıştır. Lüle çıkışından çarpma plakasına olan mesafe $H = 8, 16, 24, 32$ mm olarak seçilmiştir. Bu mesafeler boyutsuz olarak $H/D = 0,8, 1,6, 2,4, 3,2$ 'ye karşılık gelmektedir. Toplam hacimsel debi $Q_t = 60, 70, 80, 85$ L/dk olarak seçilmiştir. Dairesel ve helisel kısımlardan ayrı ayrı gönderilen hacimsel debilerin ısı transferine olan etkilerini incelemek için tanımlanan hacimsel debi oranı (Q^*) eş eksenli dairesel ve ikili helisel lüle için $Q^* = 0,176, 0,235, 0,352$ olarak seçilirken, eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüleye 0,588, 0,764 ve 0,823 hacimsel debi oranları da eklenmiştir. Deneylerden elde edilen verilerle ısı transfer hızı ve üniformluğu değerlendirilmiştir. Sonuçlar SM ve S durumlarına, Q_t , Q^* ve H/D 'ye bağlı olarak durma, ortalama ve yerel Nusselt sayılarıyla verilmiştir.

Tüm deneyler kararlı durumda yapılmıştır. Sisteme giren hava yaklaşık 22°C 'dedir. Çarpma plakasına net olarak sağlanan ısı akısı voltaj dalgalanmalarına bağlı olarak $10\,685\text{ W/m}^2$ ile $10\,723\text{ W/m}^2$ arasında değişmiştir. Basınç regülatörüyle basınç 4 bar'da sabit tutularak sistemde meydana gelebilecek basınç dalgalanmaları önlenmiştir. Sistem çalıştırıldıktan sonra çalışılan parametrelere bağlı olarak yaklaşık 2 ile 8 saat arasında sistemin kararlı duruma gelmesi için beklenilmiştir. Kararlı duruma ulaşıldıktan sonra sıcaklık ölçümleri her 15 saniyede bir olarak yarım saat boyunca kaydedilmiştir. Tekrar deneyleriyle birlikte toplamda üç yüz (300) adet deney yapılmıştır. Yaklaşık olarak deneyler altı ayda tamamlanmıştır.

Deney sisteminin sürdürülebilirliği Şekil 3.22’de aynı deney durumunun farklı günlerdeki yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımı dikkate alınarak verilmiştir. Farklı deney durumları için yapılan deneyler belirli aralıklarla tekrarlanmıştır. Şekil 3.22(a)’da lüle plaka mesafesi $H/D = 0,4$ ve toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk için dairesel jetin düz plakaya çarptırılmasıyla sınırlandırılmamış jet durumunda meydana gelen Nu_r dağılımı sonuçları ilk deney ve sekiz gün sonra tekrarlanmış hali için verilmiştir. İlk deney ve sekiz gün sonra yapılan deneylerde Nu_r sayısının %1,3 ile %1,5 arasında farklılık gösterdiği görülmüştür. Şekil 3.22(b) ve (c)’de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin düz plakaya hacimsel debi oranı $Q^* = 0,823$ ’te çarptırılmasıyla sınırlandırılmış jet durumu için Nu_r dağılımları sırasıyla $H/D = 2,4$ ve $H/D = 1,6$ için verilmiştir. İlk deney ve otuz iki gün sonra yapılan deneylerde $H/D = 2,4$ için Nu_r değerlerinin %2,9 ile %3,4 arasında farklılık gösterdiği görülürken, $H/D = 1,6$ için sonuçların %3,5 ile %4 arasında farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu farklılıklar laboratuvar şartlarının farklı günlerde az da olsa değişiklik göstermesiyle açıklanabilir. Diğer taraftan Nu_r ’nin farklı günlerdeki bu değerleri belirsizlik analizindeki yüzde değerlerinden daha düşük kalmıştır. Ayrıca tekrarlanan deneylerin plaka üzerindeki Nu_r dağılımlarının ilk deneylerle aynı eğilimi gösterdiği görülmüştür. Böylece deney sonuçlarının tekrarlanabilirliği görülmüştür.



Şekil 3.22. Deneylerin tekrarlanabilirliği

3.5. Ölçümler ile Hesaplamaların Yapılması

Bu bölümde hesaplamalarda kullanılan eşitlikler verilmiştir. Doğru akım (DC) güç sağlayıcıdan ısıtıcıya verilen güç Eş. 3.1'den hesaplanmıştır:

$$P = VI \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte P (W) elektriksel gücü, V (V) uygulanan elektriksel voltajı, I (A) ise elektriksel akımı göstermektedir. Çarpma plakasına iletilen net ısıl güç, Eş. 3.2'deki enerji dengesi yazılarak hesaplanmıştır:

$$q = P - q_y - q_a - q_r \quad (3.2)$$

Burada q (W) çarpma plakasına transfer edilen birim zamandaki net ısı enerjisini, q_y (W) ısıtıcının yan yüzeyinden iletimle birim zamanda kaybolan ısı enerjisini, q_a (W) ısıtıcının alt

yüzeyinden iletimle birim zamanda kaybolan ısı enerjisini ifade eder. q_r (W) çarpma plakasının üst yüzeyinden ışınlama ile birim zamanda kaybolan ısı enerjisidir. Yapılan hesaplamalarda ışınlama ile kaybolan ısıya diğer kayıplara göre ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür ve bu nedenle hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Alt yüzeyden iletimle olan ısı kaybı Eş. 3.3'ten hesaplanmıştır:

$$q_a = k_y A_p (T_{a1} - T_{a2}) / L_a \quad (3.3)$$

Burada k_y (W/m·K) yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısını, A_p (m²) ısıtıcının yüzey alanını (aynı zamanda çarpma plakasının alanını), T_{a1} ve T_{a2} sırasıyla ısıtıcının altına konulan yalıtım malzemesinin üst ve alt yüzey sıcaklıklarını, L_a sıcaklıkların ölçüldüğü iki ısıl çift arasındaki mesafeyi göstermektedir. Yan yüzeyden iletimle olan ısı kaybı Eş. 3.4'ten hesaplanmıştır:

$$q_y = (T_{y1} - T_{y2}) / (\ln(r_2/r_1) / (2\pi L_y k_y)) \quad (3.4)$$

T_{y1} ve T_{y2} sırasıyla, yan yüzeye konulan yalıtım malzemesinin iç ve dış yüzeyindeki sıcaklıkları, L_y yan yüzeydeki yalıtım malzemesinin boyunu gösterir. r_2 ve r_1 sırasıyla çarpma plakasının merkezinden dıştaki ve içteki ısıl çifte olan mesafedir. Işıma ile olan ısı kaybı Eş. 3.5'ten hesaplanmıştır:

$$q_r = \sigma \varepsilon A_p (T^4 - T_c^4) \quad (3.5)$$

T (K) plaka üzerindeki ortalama sıcaklığı, T_c (K) çevre sıcaklığını, σ (W/m²·K⁴) Stefan Boltzman sabitini, ε malzemenin yayıcılık katsayısını göstermektedir. Stefan Boltzman sabiti ve ε 'nin değeri sırasıyla $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²·K⁴) ve $\varepsilon = 0,03$ 'tür (üretici firmadan alındı). Çarpma plakasına sağlanan net ısı akısı Eş. 3.6'dan hesaplanmıştır:

$$q'' = q / A_p \quad (3.6)$$

q'' (W/m²) net ısı akısıdır. Çarpma plakasına aktarılan net ısı akısı ile ilgili örnek hesaplama Ekler bölümünde verilmiştir (Bkz. Ek-2). Yerel ısı taşınım katsayısı h_r (W/m²·K) ve yerel Nusselt sayısı Nu_r Eş. 3.7 ve 3.8'den hesaplanmıştır:

$$h_r = q''/(T_r - T_\zeta) \quad (3.7)$$

$$Nu_r = h_r D/k \quad (3.8)$$

T_r (°C) plakadaki yerel sıcaklık, T_ζ (°C) çevre sıcaklığı, D (m) birleşik lülenin çapı, k (W/m·K) ortam sıcaklığındaki akışkanın ısı iletim katsayısıdır. Durma noktasındaki ısı taşınım katsayısı h_o (W/m²·K) ve durma noktasındaki Nusselt sayısı Nu_o Eş. 3.9 ve 3.10'dan hesaplanmıştır:

$$h_o = q''/(T_o - T_\zeta) \quad (3.9)$$

$$Nu_o = h_o D/k \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.9'da T_o (°C) durma noktasındaki ($r = 0$ mm) sıcaklıktır. Çarpma plakasındaki ortalama ısı transfer katsayısı h (W/m²·K) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) Eş. 3.11 ve 3.12'den hesaplanmıştır:

$$h = q''/(T - T_\zeta) \quad (3.11)$$

$$Nu = hD/k \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.11'de T (°C) plakanın ortalama sıcaklığıdır. Birleşik lüleye gönderilen toplam hacimsel debi Q_t (L/dk) Eş. 3.13'ten hesaplanmıştır:

$$Q_t = Q_d + Q_h \quad (3.13)$$

Burada Q_d (L/dk) birleşik lülenin dairesel kısmına gönderilen hacimsel debiyi, Q_h (L/dk) birleşik lülenin helisel kısımlarına gönderilen toplam hacimsel debiyi gösterir. Birleşik lülede, dairesel ve helisel kısımlara ayrı ayrı gönderilen hacimsel debilerin ısı transferine olan etkilerini kıyaslayabilmek için hacimsel debi oranı (Q^*) tanımlanmıştır. Q^* Eş. 3.14'ten hesaplanmıştır:

$$Q^* = Q_h/Q_t \quad (3.14)$$

Dönen jetlerde dönmenin yoğunluğunu gösteren geometrik girdap numarası Eş. 3.15'ten hesaplanmıştır [16, 17, 28]:

$$S_g = \frac{2}{3} \left[\frac{1-(r_i/r_d)^3}{1-(r_i/r_d)^2} \right] \tan \beta \quad (3.15)$$

Burada β ($^\circ$) girdap açısı, r_d ve r_i sırasıyla helisel kanalların dış ve iç yarıçaplarıdır. Çarpma plakası üzerindeki üniform ısı transferi (ψ), en yüksek Nusselt sayısı (Nu_y) ile en düşük Nusselt sayısının (Nu_d) meydana geldiği noktadaki değerler dikkate alınarak Eş. 3.16'dan yüzde olarak hesaplanmıştır [26, 109]. Isı transferi üniformluğu ile plaka üzerinde meydana gelen ısı transferi sapması ters orantılı olarak ilişkilidir. Yani ısı transferi sapmasının düşük olduğu yerde ısı transferi üniformluğu yüksektir. Üniform ısı transferiyle ilgili çizelgelerde düşük yüzde değerleri ısı transferi sapmasının düşük, diğer taraftan ise ısı transferi üniformluğunun yüksek olduğunu gösterirler.

$$\psi(\%) = [(Nu_y - Nu_d)/Nu_y] \times 100 \quad (3.16)$$

Aynı çalışma parametreleri altında sınırlandırılmamış jet (SM) durumuna göre, sınırlandırılmış jet (S) durumunda meydana gelen ısı transferi düşüşü (λ) ortalama Nusselt sayıları dikkate alınarak yüzde şeklinde Eş. 3.17'den yüzde olarak hesaplanmıştır:

$$\lambda(\%) = [(Nu_{SM} - Nu_S)/Nu_{SM}] \times 100 \quad (3.17)$$

3.6. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmada elde edilen ölçüm sonuçlarının güvenilirlik aralığını vermek amacıyla belirsizlik analizi yapılmıştır. Belirsizlik analizinde Kline ve McClintock [110] tarafından ortaya konulan yöntem dikkate alınmıştır. Hesaplanması istenen büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olarak kabul edilirse, R Eş. 3.18'deki gibi tanımlanır:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.18)$$

Her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik yani hata miktarı $w_1, w_2, w_3, \dots w_n$ olursa R büyüklüğüne etki eden toplam hata miktarı w_R , Eş 3.19'daki gibi yazılabilir.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

Bu çalışmada taşınım ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler için belirsizlik analizinde kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir. Isıtıcıya verilen güçte yapılan hata miktarı Eş. 3.20'den hesaplanır:

$$w_P = \left[\left(\frac{\partial P}{\partial V} w_V \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} w_I \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

Isıtıcıya verilen güçteki belirsizlik oranı $w_P/P = \%0,472-0,476$ arasındadır. İletimle ısı aktarımında alt yüzeyden, yan yüzeyden ve net ısı transferinde yapılan hata miktarı Eş. 3.21-3.23'ten hesaplanır. Yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı değeri tablodan okunduğu için hata miktarı $w_{ky} = 0$ alınmıştır. Plakanın alt ve yan yüzeylerinden iletimle kaybolan ısı transferinin hesaplanmasında yapılan hata miktarı sırasıyla $w_{qa} = 0,662-0,975$ W ve $w_{qy} = 0,462-0,677$ W'dir. Net ısı güç aktarımında yapılan hata oranı $w_q/q = \%4,72-6,69$ arasında olduğu hesaplanmıştır.

$$w_{qa} = \left[\left(\frac{\partial q_a}{\partial L_a} w_{L_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_a}{\partial T_{a1}} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial q_a}{\partial T_{a2}} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial q_a}{\partial A_p} w_{A_p} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

$$w_{qy} = \left[\left(\frac{\partial q_y}{\partial L_y} w_{L_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_y}{\partial T_{y1}} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial q_y}{\partial T_{y2}} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial q_y}{\partial r_1} w_{r_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_y}{\partial r_2} w_{r_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

$$w_q = \left[\left(\frac{\partial q}{\partial q} w_{q_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial q_a} w_{q_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial P} w_P \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

Yerel taşınım ısı aktarım katsayısında yapılan hata miktarı Eş. 3.24'ten hesaplanmıştır:

$$w_{h_r} = \left[\left(\frac{\partial h_r}{\partial q} w_q \right)^2 + \left(\frac{\partial h_r}{\partial T_r} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial h_r}{\partial T_c} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial h_r}{\partial A_p} w_{A_p} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.24)$$

Yerel taşınım ısı aktarım katsayısında yapılan hata oranının $w_{h_r}/h_r = \%4,94-9,90$ arasında olduğu bulunmuştur. Nu_r 'nin hesaplanmasında yapılan hata miktarı Eş. 3.25'ten hesaplanır. Havanın ısı iletim katsayısı değeri tablodan okunduğu için hata miktarı $w_k = 0$ alınmış olup Eş. 3.25'te gösterilmemiştir.

$$w_{Nu_r} = \left[\left(\frac{\partial Nu_r}{\partial h} w_{h_r} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu_r}{\partial D} w_D \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

Nu_r 'nin hesaplanmasında yapılan hata oranının $\%4,95-9,91$ arasında olduğu bulunmuştur. Belirsizlik analizi ile ilgili örnek hesaplama, Ek-3'te verilmiştir

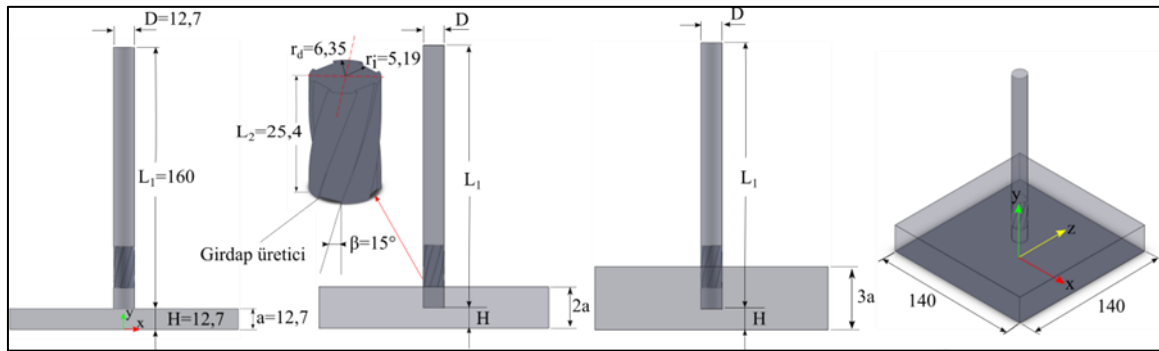
4. SAYISAL ÇALIŞMALAR

4.1. Dönen Çarpmalı Jetin Modellenmesi

Bu bölümde deneysel çalışma öncesinde yapılan dönen çarpmalı jetin sayısal çalışması sunulmuştur [17]. Analizler üç boyutlu, türbülanslı, sıkıştırılamaz ve kararlı durum için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ANSYS Fluent ticari yazılımı (versiyon 2020 R1) kullanılmıştır.

4.1.1. Fiziksel ve matematiksel modellerin tanımlanması

Şekil 4.1’de dönen çarpmalı jet ve geometrik parametreleri verilmiştir. Çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanı yükseklikleri a , $2a$, ve $3a$ ile gösterilmiştir. Lülenin çapı ve boyu sırasıyla D ve L_1 ’dir. Girdap üreticinin boyu L_2 , lüleden plakaya olan mesafe H ile verilmiştir. β , r_i ve r_d sırasıyla girdap açısını, girdap üreticisinin iç ve dış yarıçapını göstermektedir. Çarpma plakasının boyutları 140×140 mm²’dir. Dönen çarpmalı jetin geometrik ölçüleri Çizelge 4.1’de verildiği gibidir.



Şekil 4.1. Dönen çarpmalı jet ve geometrik parametreleri (boyutlar mm cinsindendir)

Çizelge 4.1. Dönen çarpmalı jetin geometrik ölçüleri

D (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	H (mm)	β (°)	r_i (mm)	r_d (mm)	a (mm)
12,7	160	25,4	12,7	15	5,19	6,35	12,7

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi dönen çarpmalı jette çarpma plakası üzerine tanımlanan üç farklı hesaplama alanı yüksekliği çalışılmıştır. Çalışılan geometride hesaplama alanı yükseklikleri $a = 12,7$ mm, $2a = 25,4$ mm ve $3a = 38,1$ mm olarak seçilirken diğer boyutlar sabit

tutulmuştur. Hesaplama alanı yüksekliğinin a ve $2a$ olduğu durumlar, BSL $k-\omega$, SST $k-\omega$, geçiş SST, gerçekleştirilebilir (realizable) $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, standart $k-\varepsilon$ türbülans modelleriyle çözülmüştür [111]. Böylece dönen çarpmalı jetin deneysel sonuçlarına [16] en yakın tahmin yapabilen türbülans modeli belirlenmiştir. Hesaplama alanı yüksekliğinin $2a$ olduğu durumun sonuçları $3a$ olan durumla kıyaslanarak $2a$ yüksekliğinin yeterli olup olmadığı gösterilmiştir. Dönen çarpmalı jette akış yapısı karmaşıktır. Lüle-plaka mesafesinin düşük olması ve çarpma plakasının varlığı nedeniyle akış daha da karmaşık hale gelmektedir. Buna dayanarak sunulan çalışmada düşük lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,25, 0,5, 0,75, 1$ ve $Re = 200, 400, 600, 800$ için parametrik bir çalışma yapılarak ısı transferi ve akış alanı araştırılmıştır.

4.1.2. Temel denklemler ve türbülans modelleri

Sayısal çalışmada korunum denklemlerine Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) yaklaşımı uygulanmıştır. Dönen jet tarafından oluşturulan karmaşık akış yapısının tahmininde deneysel sonuçlarla en iyi yakınlığı sağlamak için farklı türbülans modelleri kullanılmıştır. Hesaplama alanı yüksekliklerinin a ve $2a$ olduğu durumlar BSL $k-\omega$, SST $k-\omega$, geçiş SST, gerçekleştirilebilir $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$ ve standart $k-\varepsilon$ türbülans modelleriyle çözülmüştür. Sıkıştırılmaz, 3 boyutlu ve kararlı akış için süreklilik, Reynolds ortalama momentum ve enerji denklemleri Eş. 4.1-4.3'te verilmiştir [112]:

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4.1)$$

Momentum denklemi:

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}] \quad (4.2)$$

Enerji denklemi:

$$\rho c_p \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho c_p \overline{u'_i T'} \right] \quad (4.3)$$

Burada ρ , u , μ , T , k_t ve c_p sırasıyla yoğunluk, hız, dinamik viskozite, sıcaklık, ısı iletkenlik katsayısı ve özgül ısıyı ifade etmektedir. $\overline{\rho u'_i u'_j}$ terimi Reynolds kayma gerilmesidir. $\rho c_p \overline{u'_i T'}$ terimi ise türbülanslı ısı akısını gösterir. Reynolds kayma gerilmeleri ve türbülanslı ısı akısı bilinmediğinden türbülans modellerini çözmek için ek denklemlere ihtiyaç vardır. Türbülans gerilmesi, ortalama hız gradyanlarına dayanan doğrusal bir girdap viskozite modeliyle ifade edilir. Türbülans gerilmesi Eş. 4.4'ten hesaplanır:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = 2\mu_t \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (4.4)$$

Burada μ_t türbülanslı viskoziteyi (girdap viskozitesi) belirtir. $\overline{S_{ij}}$, Eş. 4.5'te verilmiştir:

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (4.5)$$

Türbülanslı ısı akısı Eş. 4.6'dan hesaplanır:

$$\rho c_p \overline{u'_i T'} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} \quad (4.6)$$

Pr_t türbülanslı Prandtl sayısıdır. Türbülans büyüklükleri kullanılan türbülans modelleri (standart $k-\varepsilon$ modeli [113], Yakhot ve Orszag'ın ortaya koyduğu bir istatistiksel tekniği içeren RNG $k-\varepsilon$ türbülans modeli [114], yayılım hızı ε için modifiye taşıma denklemi ve türbülans viskozitesinin alternatif formülasyonunu içeren gerçekleştirilebilir $k-\varepsilon$ türbülans modeli [111], $k-\omega$ ve $k-\varepsilon$ türbülans modellerinin birleşimi olan SST $k-\omega$ türbülans modeli [115], sınır tabakası dışındaki $k-\varepsilon$ modelinin serbest akış bağımsızlığının avantajlarını kullanmayı amaçlayan BSL $k-\omega$ türbülans modeli [116], duvar yakını çözümü için iyi sonuçlar veren Wilcox $k-\omega$ modeli [115] ve geçiş SST modeli [116]) için çözülmüştür. Dönen çarpmalı jette geliştirilmiş duvar işlemine sahip gerçekleştirilebilir $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle yapılan çözümlerin diğer türbülans modellerine göre deneysel çalışmayla [16] daha iyi uyumlu olduğu görülmüştür. Bundan dolayı mevcut çalışmaya gerçekleştirilebilir $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle devam edilmiş ve aşağıda bu türbülans modeli denklemleri verilmiştir. Türbülans viskozitesi (μ_t) Eş. 4.7'den hesaplanmıştır:

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (4.7)$$

Gerçekleştirilebilir k - ε türbülans modelinde C_μ , diğer k - ε türbülans modellerindeki gibi sabit değildir ve Eş. 4.8-4.14'ten hesaplanır:

$$C_\mu = 1/(A_o + A_s(kU^*/\varepsilon)) \quad (4.8)$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\omega}_{ij}\tilde{\omega}_{ij}} \quad (4.9)$$

$$\tilde{\omega}_{ij} = \omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (4.10)$$

$$\omega_{ij} = \overline{\omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (4.11)$$

$$A_s = \sqrt{6 \cos \varphi} \quad (4.12)$$

$$\varphi = 1/3 \cos^{-1} \sqrt{6} (S_{ij}S_{jk}S_{ki})/\tilde{S}^3 \quad (4.13)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (4.14)$$

Burada $\overline{\omega_{ij}}$ ortalama dönme tensör hızını gösterir. Türbülanslı girdap viskozitesindeki türbülans kinetik enerjisi (k) ve dağılma hızı (ε) Eş. 4.15-4.16'dan hesaplanır:

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (ku_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4.15)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (4.16)$$

S , C_1 ve G_k Eş. 4.17-4.20'den çözülür:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4.17)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (4.18)$$

$$\eta = Sk/\varepsilon \quad (4.19)$$

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (4.20)$$

Gerçekleştirilebilir k - ε türbülans modeli sabitlerinin değeri şu şekildedir [111]:

$$A_o = 4,04, C_2 = 1,9, \sigma_k = 1,0, \sigma_\varepsilon = 1,2.$$

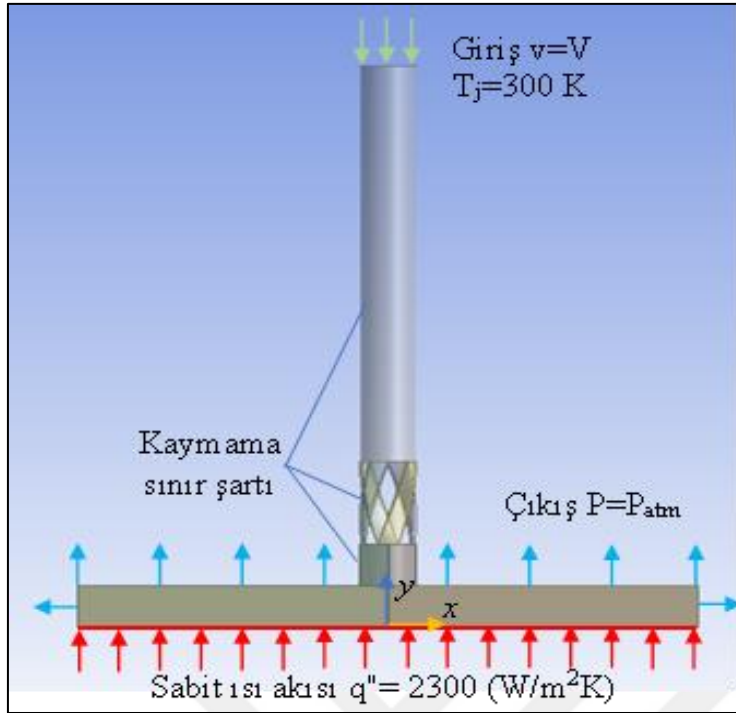
Viskoz alt katman bölgesinin dikkate alınabilmesi için gerçekleştirilebilir k - ε türbülans modelinde ince ağ yapısı kullanılarak geliştirilmiş duvar yaklaşımı kullanılmıştır. Geliştirilmiş duvar işlemi iki katmanlı bir yaklaşımdan oluşur. Yakın duvarda sınır tabakası viskozite etkili bir bölgeye ve tamamen türbülanslı bir bölgeye bölünür. Sınır tabakası bölgelerini belirlemek için duvar mesafesine göre hesaplanan Reynolds sayısı Eş. 4.21'deki gibi tanımlanır:

$$Re_y = (\rho y \sqrt{k}) / \mu \quad (4.21)$$

Burada y , çarpma duvarından olan dik mesafeyi temsil eder. $Re_y < 200$ viskoz etkin bölge, $Re_y > 200$ türbülanslı bölgedir. $Re_y > 200$ olması durumunda k - ε modelleri veya RSM kullanılır.

4.1.3. Sınır şartları

Şekil 4.2'de dönen çarpmalı jetin sınır şartları gösterilmiştir. Lüle, girdap üretici ve çarpma plakasını içeren tüm duvarlara kaymama sınır koşulu uygulanmıştır. Lüle girişine, Reynolds sayısına bağlı olarak hız giriş şartı tanımlanmıştır. Havanın giriş sıcaklığı 300 K'dir. Çıkış sınır koşulu atmosfer basıncıdır ($P = P_{atm}$). Çarpma plakasına sabit ısı akısı sınır şartı uygulanmış olup değeri 2300 W/m^2 'dir. y -yönünde yerçekimi etkileri dikkate alınmamıştır. Işıma etkileri ihmal edilmiştir. Türbülans yoğunluğu olarak literatürde çarpmalı jetler için kullanılan %5 değeri alınmıştır [10]. Girişlerde uygulanan kinetik enerji (k) ve özgül enerji dağılım hızı (ω) eşitlikleri sırasıyla şu şekildedir [117]: $k = 3/2 (VI)^2$ ve $\omega = (\rho k / \mu) / 10$.



Şekil 4.2. Dönen çarpmalı jetin sınır şartları

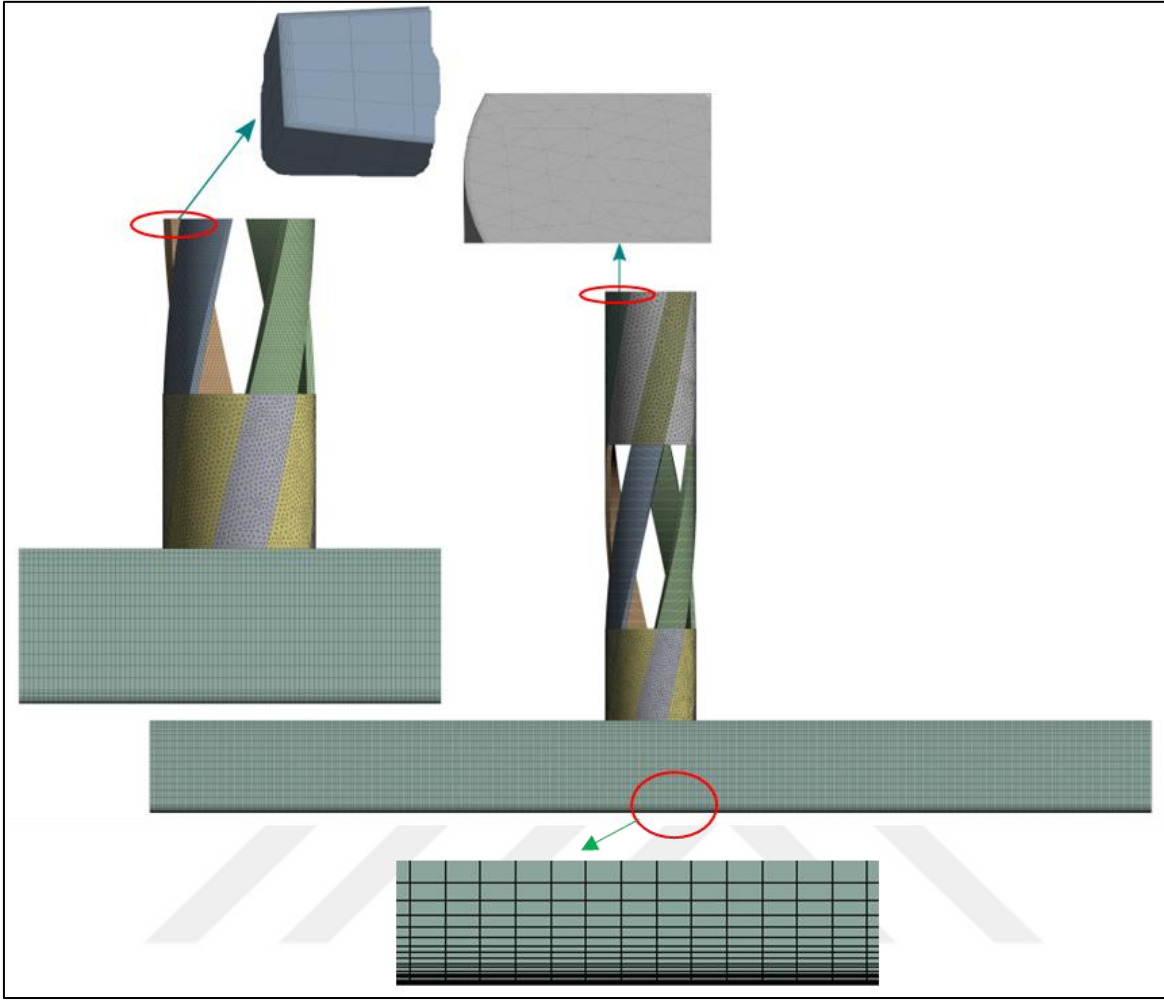
Çizelge 4.2’de dönen çarpmalı jetin sınır şartları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Dönen çarpmalı jetin sınır şartları

Yer	Sınır Şartı
Giriş	$u = 0, v = V = (\mu Re / \rho D), w = 0, T_j = 300 \text{ K}$
Çıkış	$P = P_{atm}$
Çarpma plakasının tabanı	$q'' = 2300 \text{ W/m}^2$

4.1.4. Sayısal çözüm ve hücre sayısından bağımsızlık

Şekil 4.3’te dönen çarpmalı jette kullanılan örnek ağ yapısı gösterilmiştir. Hücre yapısı geometriye uygun olarak yapılandırılmış ve yapılandırılmamış olarak seçilmiştir. Türbülanslı akışlarda viskoz sınır tabakanın dikkate alınması ve doğru şekilde ayrıklaştırılması önemlidir. Buna bağlı olarak ilk düğümün duvara boyutsuz uzanımı tüm durumlarda $y^+ < 1$ olarak tutulmuştur. Yani ilk katman kalınlığı 0,006 mm civarındadır. Literatürdeki bir çalışmada [21], ilk katman kalınlığının çözümde önemli bir rol oynadığı ve 0,1 mm’den fazla ve 1×10^{-4} mm’den az olduğu durumlarda türbülans modellerinin Nusselt sayısını zayıf bir şekilde tahmin ettiği belirtilmiştir. Sınır tabakadaki katman sayısı 20, büyüme oranı 1,2 olarak seçilmiştir.



Şekil 4.3. Dönen çarpmalı jetin ağ yapısı

Hesaplama alanı yükseklikleri için hücre sayısından bağımsızlık çalışmaları Çizelge 4.3'te gerçekleştirilebilir $k-\varepsilon$ türbülans modeli için verilmiştir. Diğer türbülans modellerinde de sonuçların aynı olduğu görülmüştür. Hücre sayısından bağımsızlık, en büyük hücre sayısındaki ortalama ve en yüksek taşınım ısı transfer katsayısı (h ve h_y) referans alınarak hesaplanmıştır. h ve h_y 'nin referansa göre değişimlerinin genel olarak %1'in altında kaldığı hücre sayılarıyla çözümlere devam edilmiştir. Modeller için uygun olan hücre sayıları Çizelge 4.3'te koyu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Dönen çarpmalı jetin hücre sayısından bağımsızlığı

Hesaplama alanı yüksekliği	Hücre sayısı	y^+	h	h_y	h % değişim	h_y % değişim
a	5 621 834	0,59	81,42	478,61	1,01	4,06
	9 819 163	0,56	80,26	455,18	0,42	1,03
	12 128 315	0,57	80,6	459,93	Ref.	Ref.
$2a$	2 791 053	0,57	84,6	455,79	6,76	1,52
	3 806 661	0,57	80,08	461,03	1,06	2,69
	8 312 842	0,56	79,45	452,97	0,26	0,89
	12 217 482	0,55	79,24	448,93	Ref.	Ref.
$3a$	3 472 476	0,56	79,72	453,01	0,86	0,75
	9 440 988	0,56	79,19	453,96	0,18	0,96
	12 485 333	0,55	79,04	449,64	Ref.	Ref.

4.1.5. Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler

Bu bölümde dönen çarpmalı jet hesaplamalarında kullanılan eşitlikler verilmiştir. Yerel ısı taşınım katsayısı h_x ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$) Eş. 4.22'den hesaplanmıştır:

$$h_x = q'' / (T_x - T_j) \quad (4.22)$$

Burada T_x ($^{\circ}\text{C}$) ve T_j ($^{\circ}\text{C}$) sırasıyla çarpma plakası üzerindeki yerel sıcaklık ve akışkanın lüleye giriş sıcaklığıdır. Yerel Nusselt sayısı (Nu_x) ve ortalama Nusselt (Nu) Eş. 4.23-4.24'ten hesaplanmıştır:

$$Nu_x = (h_x D) / k \quad (4.23)$$

$$Nu = \frac{2}{x^2} \int_0^x x Nu_x dx \quad (4.24)$$

D (mm) lülenin çapını, x durma noktasından ($x = 0$ mm) başlayarak x -ekseni boyunca olan yerel mesafeyi, k ($\text{W/m} \cdot \text{K}$) jetin giriş sıcaklığındaki havanın ısı iletim katsayısını gösterir. Reynolds sayısı Eş. 4.25'ten hesaplanmıştır:

$$Re = (\rho V D) / \mu \quad (4.25)$$

Burada ρ (kg/m³) akışkanın yoğunluğu, μ (kg/m·s) dinamik viskozite, V (m/s) akışkanın lüleye giriş hızıdır. Boyutsuz y^+ değeri Eş. 4.26'dan hesaplanır:

$$y^+ = (\rho U_\tau y) / \mu \quad (4.26)$$

Burada U_τ (m/s) sürtünme hızı, y birinci hücrenin merkezinden olan mesafedir. U_τ Eş. 4.27'den hesaplanmıştır.

$$U_\tau = \tau_\omega / \rho \quad (4.27)$$

Duvar kesme gerilmesi Eş. 4.28'den hesaplanır:

$$\tau_\omega = \mu (\partial u / \partial y)_{y=0} \quad (4.28)$$

Burada $(\partial u / \partial y)$ hız gradyanıdır. Girdap numarası dönen jetin dönüşünü karakterize eden boyutsuz bir sayıdır. Literatür incelendiğinde girdap numarası için farklı hesaplama yöntemleri olduğu görülür. Mevcut çalışmada girdap numarası iki farklı şekilde hesaplanmıştır. Birisi lülenin girdap açısı ve çapı gibi geometrik parametrelere dayanan geometrik girdap numarasıdır (S_g). Literatürdeki bazı çalışmalarda da [10, 28] daha önce bahsedilen bu hesaplama yöntemi kullanılmıştır (Bkz. Eş. 3.15).

Girdap numarasını hesaplamanın bir başka yöntemi de lüle çıkış düzlemindeki doğrusal (G_x) ve teğetsel momentumların aksenal akışlarıyla (G_θ) ilgilidir [76, 118]. Bu momentumların oranıyla hesaplanan teorik girdap numarası (S_m) Eş. 4.29'da verilmiştir:

$$S_m = \frac{G_\theta}{RG_x} = \frac{2\pi\rho \int_0^R uwr^2 dr}{2R\pi\rho \int_0^R (u^2 - \frac{1}{2}w^2)r dr} = \frac{\frac{1}{2}\pi\rho u_m w_m R^3}{\pi\rho u_m^2 R^2 (1 - \frac{G^2}{4})} \quad (4.29)$$

Burada R , lüle yarıçapını belirtir; u_m ve w_m , sırasıyla lüle çıkışındaki maksimum aksenal ve teğetsel hızlardır. G , lüle çıkışındaki maksimum teğetsel hızın aksenal hıza oranı olarak kabul edilir [20]:

$$G = w_m / u_m \quad (4.30)$$

S_m yukarıdaki eşitliklerden yeniden düzenlenirse, $G < 0,4$ olduğunda Eş. 4.31, $G > 0,4$ olduğunda ise Eş. 4.32 kullanılır.

$$S_m = (G/2)/(1 - (G/2)^2) \quad (4.31)$$

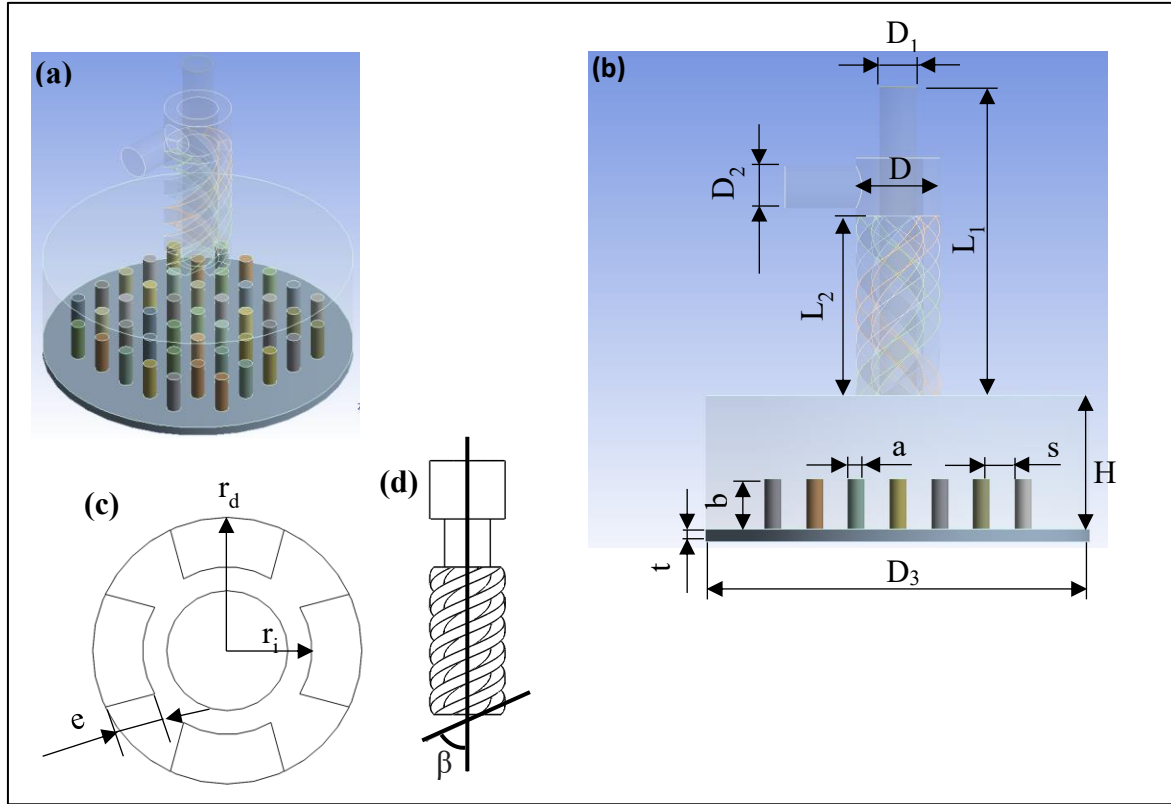
$$S_m = (G/2)/(1 - (G/2)) \quad (4.32)$$

4.2. Birleşik Çarpmalı Jetlerin Modellenmesi

Bu bölümde mevcut tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların sayısal modelleri sunulmuştur. Deneydeki sınır şartları sayısal çalışmalara uygulanmıştır. Yapılan sayısal çalışmalarla deney sisteminde incelenen ve incelenemeyen çalışmalar araştırılmıştır. Deneysel çalışmadaki gibi sayısal çalışmada da iki farklı akış özellikleri gösteren boyutsuz lüle-plaka mesafesi ($0,1 \leq H/D \leq 0,4$ ve $0,8 \leq H/D \leq 3,2$) aralığı ele alınmıştır. H/D 'nin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ olduğu aralıkta yapılan sayısal çalışmalarda; eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ), eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) için sınırlandırılmış jet (S) ve sınırlandırılmamış jet (SM) durumları düz plaka (P0) ve kanatçık boyları 2 ve 6 mm olan çarpma plakaları (P2, P6) için ayrı ayrı çözülürken, H/D 'nin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ olduğu aralıkta dairesel jet (DJ) ile DDHJ'nin SM ve S durumları P0 için çözülmüştür. Çarpma plakası üzerindeki taşınım ile ısı transferinin üç boyutlu hesaplamaları, ANSYS Fluent ticari yazılımı (versiyon 2020 R1) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki H/D durumu da kararlı, türbülanslı, sıkıştırılmaz ve üç boyutlu olarak çözülmüştür.

4.2.1. Fiziksel ve matematiksel modellerin tanımlanması

Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel çarpmalı jetlerin (DDHJ) üç boyutlu görünümü ve geometrik parametreleri Şekil 4.4'te verilmiştir. a ve b sırasıyla çarpma plakası üzerindeki kanatçıkların çapını ve boyunu, D birleşik lülenin çapını, D_1 dairesel lülenin çapını, D_2 helisel kısımlara akışkanın girdiği deliğin çapını, e helisel kanalın genişliğini, H lüle-plaka arasındaki mesafeyi, L_1 dairesel ve birleşik lülenin boyunu, L_2 helisellerin sarıldığı silindirin boyunu, D_3 çarpma plakasının çapını, r_d helisel kanalların dış yarıçapını, r_i helisel kanalların iç yarıçapını, s kanatçıklar arası mesafeyi, t çarpma plakasının kalınlığını, β lülenin girdap açısını gösterir. Birleşik çarpmalı jet eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel kanallara sahip lüle tarafından oluşturulmuştur. Geometrik ölçüler deneysel çalışmada verilen ölçüler ile aynıdır.



Şekil 4.4. (a) Birleşik çarpmalı jetin üç boyutlu görünümü, (b) birleşik çarpmalı jetin geometrik parametreleri, (c) eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin alttan görünümü, (d) birleşik lülenin önden görünümü

Çizelge 4.4'te birleşik çarpmalı jetin geometrik ölçüleri verilmiştir.

Çizelge 4.4. Birleşik çarpmalı jetin geometrik ölçüleri

Parametre	Değeri
Kanatçık çapı (a)	2 mm
Kanatçık boyu (b)	0, 2, 6 mm
Birleşik lülenin çapı (D)	10 mm
Dairesel lülenin çapı (D_1)	4,5 mm
Helisel lülelere giriş çapı (D_2)	5 mm
Helisel kanalın genişliği (e)	1,9 mm
Lüle-plaka arası mesafe (H)	1, 2, 3, 4, 5, 8, 16, 32 ,40 mm
Dairesel ve birleşik lülenin boyu (L_1)	37 mm
Helisellerin sarıldığı silindirin boyu (L_2)	21,5 mm
Çarpma plakasının çapı (D_3)	46 mm
Helisel kanalın dış yarıçapı (r_d)	5 mm
Helisel kanalın iç yarıçapı (r_i)	3,14 mm

Çizelge 4.4. (devam) Birleşik çarpmalı jetin geometrik ölçüleri

Parametre	Değeri
Kanatçıklar arası mesafe (s)	5 mm
Çarpma plakası kalınlığı (t)	1,5 mm
Girdap açısı (β)	52,97°

Çizelge 4.5'te boyutsuz lüle-plaka mesafenin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ olduğu aralıkta çalışılan parametreler ve değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. Boyutsuz lüle-plaka mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ olduğu aralıkta çalışılan parametreler ve değerleri

Parametre	Değeri
Kanatçık boyu (b)	0 mm
Boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D)	0,1-0,2-0,3-0,4
Hacimsel debi oranı (Q^*)	0,0-0,352

Çizelge 4.6'da boyutsuz lüle-plaka mesafenin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ olduğu aralıkta çalışılan parametreler ve değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.6. Boyutsuz lüle-plaka mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ olduğu aralıkta çalışılan parametreler ve değerleri

Parametre	Değeri
Kanatçık boyu (b)	2-6 mm
Boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D)	0,8-1,6-2,4-3,2
Hacimsel debi oranı (Q^*)	0,352

Korunum ve türbülans denklemleri

Sayısal çalışmada korunum denklemlerine Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) yaklaşımı uygulanmıştır. Sıkıştırılamaz, 3-boyutlu ve kararlı akış için süreklilik, Reynolds ortalama momentum ve enerji denklemleri Eş. 4.1-4.3'te verilen eşitliklerle aynı olduğu için burada tekrar verilmemiştir [112].

Farklı türbülans modelleri türbülans viskozitesini çözmek için farklı yaklaşımlar sunar. Bu bölümde deneysel çalışmaların modellenmesinde kayma gerilme taşınımı SST $k-\omega$ türbülans

modeli kullanılmıştır. Model iki denklemlili girdap viskozite modelidir. Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz türbülanslı akışları modellemek için hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde yaygın olarak kullanılır. Çarpmalı jetleri ve girdaplı soğutmaları çözmedeki yüksek performansı nedeniyle [90, 92] Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini kapatmak için bu türbülans modeli seçilmiştir. SST $k-\omega$ türbülans modeli mevcut çalışmadaki deneysel sonuçları tutarlı bir şekilde tahmin etmiştir. SST $k-\omega$ türbülans modelinin denklemleri aşağıda verilmiştir [119].

Türbülans kinetik enerji denklemi (k) Eş. 4.33'te verilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_j k})}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4.33)$$

Özgül dağılım hızı (ω) Eş. 4.34'te verilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_j \omega})}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4.34)$$

Burada bilinmeyenler Eş. 4.35-4,38'den hesaplanır:

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j} \quad (4.35)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2\overline{S_{ij}} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4.36)$$

$$F_1 = \tanh[(arg_1)^4] \quad (4.37)$$

$$arg_1 = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \rho \omega d}, \frac{500\nu}{\omega d^2} \right); \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right) \quad (4.38)$$

Türbülans viskozitesi Eş. 4.39-4.41'den hesaplanır:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} = \frac{\rho k}{\max(\omega; \Omega F_2 / a_1)} \quad (4.39)$$

$$F_2 = \tanh[(arg_2)^2] \quad (4.40)$$

$$arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \rho \omega d}; \frac{500\nu}{\omega d^2} \right) \quad (4.41)$$

F_1 model sabiti yeni tanımlanan ϕ , ϕ_1 ve ϕ_2 'den Eş. 4.42'deki gibi hesaplanır:

$$\phi = F_1 \phi_1 - (1 - F_1) \phi_2 \quad (4.42)$$

ϕ_1 orijinal modeldeki herhangi bir sabiti ($\sigma_{k1}, \dots$) temsil eder. ϕ_2 dönüştürülmüş k - ε modelindeki herhangi bir sabiti ($\sigma_{k2}, \dots$) ve ϕ yeni modelin ($\sigma_{k..}$) sabitidir. Sınır tabakanın iç kısmı Eş. 4.43'ten hesaplanır:

$$\gamma_1 = \beta_1 / \beta^* - (\sigma_{\omega 1} \kappa^2) / \sqrt{\beta^*} \quad (4.43)$$

Dönüştürülmüş k - ε modeli için γ_2 Eş. 4.44'ten hesaplanır:

$$\gamma_2 = \beta_2 / \beta^* - (\sigma_{\omega 2} \kappa^2) / \sqrt{\beta^*} \quad (4.44)$$

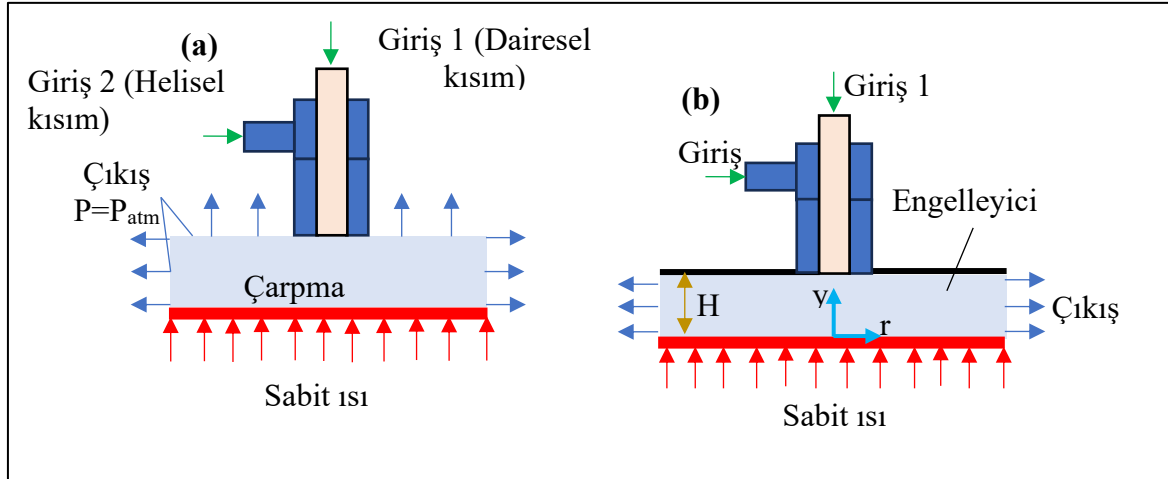
Çizelge 4.7'de SST k - ω türbülans modelinin sabitleri verilmiştir.

Çizelge 4.7. Türbülans modeli sabitleri

Sabit	σ_{k1}	$\sigma_{\omega 1}$	β_1	σ_{k2}	$\sigma_{\omega 2}$	β_2	a_1	κ	β^*
Değer	0,85	0,5	0,075	1,00	0,856	0,0828	0,31	0,41	0,09

4.2.2. Sınır şartları

Birleşik çarpmalı jetin sınır şartları Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Şekil 4.5(a) ve (b)'de sırasıyla sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet durumlarının sınır şartları verilmiştir. Birleşik lüle için hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ 'dir. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,0$ yalnız dairesel lüleden akışı ifade eder.



Şekil 4.5. Birleşik çarpmalı jetin sınır şartları (a) sınırlanmamış jet durumu, (b) sınırlanmış jet durumu

Çizelge 4.8’de birleşik çarpmalı jetin sınır şartları için değerleri verilmiştir. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için eş eksenli dairesel ve dördü helisel lülenin dairesel kısmından gönderilen havanın hızı $v_1 = 57,63$ m/s’dir. Giriş 2’den dördü helisel kısma gönderilen havanın hızı $u_2 = 22,27$ m/s’dir. Çıkış sınır şartı atmosfer basıncıdır. Giriş ve ortam akışkanının sıcaklığı 22°C ’dir. Türbülans yoğunluğu olarak literatürde çarpmalı jetler için kullanılan %5 değeri alınmıştır [10]. Girişlerde uygulanan kinetik enerji (k) ve özgül enerji dağılım hızı (ω) eşitlikleri sırasıyla şu şekildedir [117]: $k = 3/2 (VI)^2$ ve $\omega = (\rho k/\mu)/10$. Çarpma plakasının tabanından sabit ısı akısı uygulanmıştır. Engelleyici plakaya kaymama sınır şartı tanımlanmıştır. $Q^* = 0,0$ durumunda sadece Giriş1’den $v_1 = 89,07$ m/s hız uygulanmıştır. Hızlar toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk ve hacimsel debi oranı Q^* dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.8. Birleşik çarpmalı jetin sınır şartları

Yer	Sınır Şartı
Giriş 1	$u_1 = 0, v_1 = 57,63$ m/s, $w_1 = 0, T_1 = 22^\circ\text{C}$
Giriş 2	$u_2 = 22,37, v_2 = 0, w_2 = 0 T_2 = 22^\circ\text{C}$
Çıkış	$P = P_{atm}$
Çarpma plakasının tabanı	$q'' = 10\ 685\text{--}10\ 723$ W/m ²

4.2.3. Sayısal çözüm ve hücre sayısından bağımsızlık

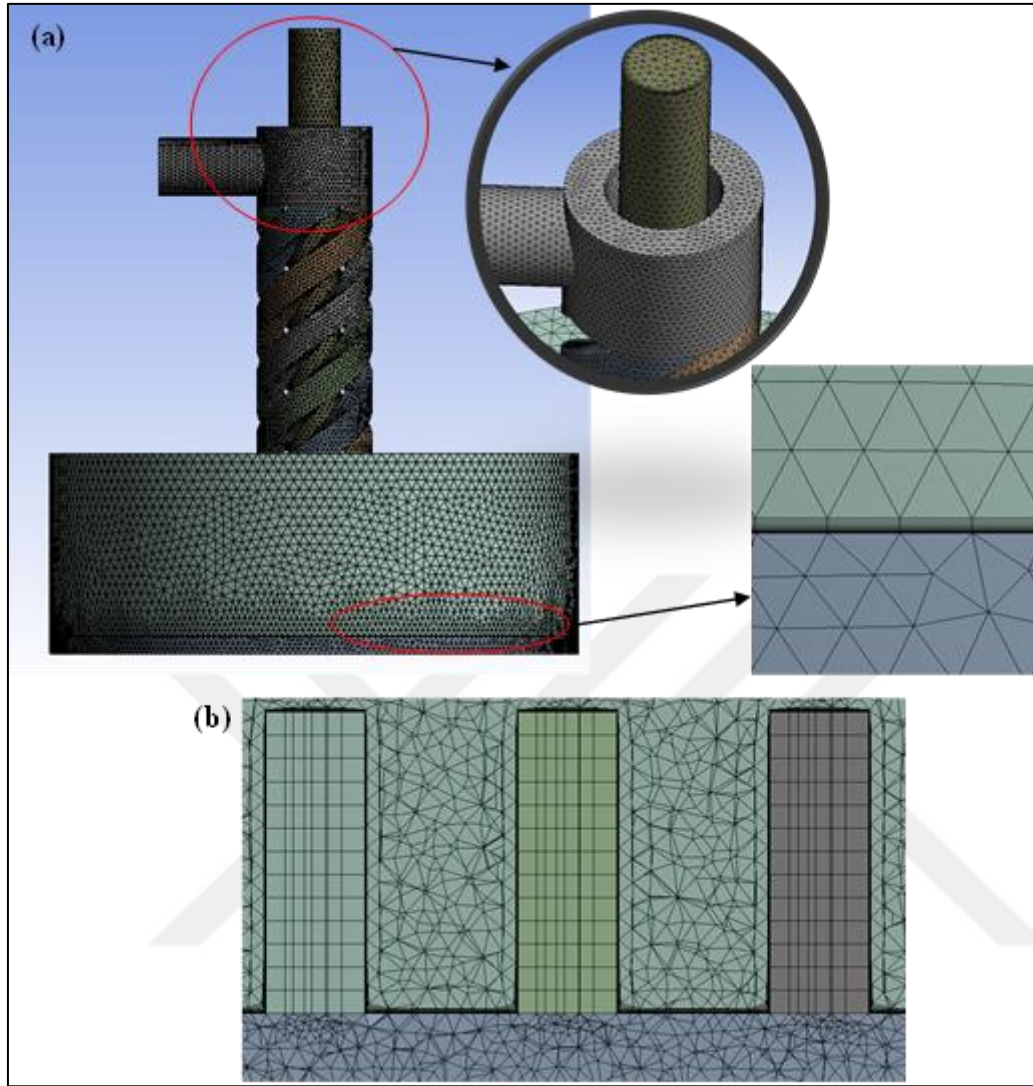
Çizelge 4.9’da boyutsuz lüle-plaka mesafesi $H/D = 3,2$ ’de eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile düz plaka (P0) ve kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakalarının (P2)

hücre sayısından bağımsızlık sonuçları ile $H/D = 0,4$ 'te eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile P0 için hücre sayısından bağımsızlık sonuçları verilmiştir. Hücre sayısından bağımsızlıkta çarpma plakası üzerinde oluşan en yüksek sıcaklık (T_H) ve en düşük sıcaklık (T_L) değerleri dikkate alınmıştır. En büyük hücre sayısı referans alınarak, ona göre sıcaklıkların yüzde değişimleri hesaplanmıştır. Değişimin yaklaşık %1 ve altı olan hücre sayılarıyla çalışmaya devam edilmiştir. Uygun hücre sayıları Çizelge 4.9'da koyu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Birleşik çarpmalı jetlerin hücre sayısından bağımsızlığı

Durum	Hücre sayısı	y^+	T_L	T_H	T_L % değişim	T_H % değişim
P0 $H/D = 0,4$ DDHJ	291 331	0,94	59,85	61,42	4,51	4,55
	565 927	0,98	58,32	59,80	2,01	1,87
	797 939	0,97	57,76	59,26	0,87	0,88
	1 462 018	0,98	57,26	58,75	Ref.	Ref.
P0 $H/D = 3,2$ DİHJ	496 866	0,78	66,18	68,67	8,22	8,48
	619 302	0,91	63,01	65,11	3,04	2,85
	1 057 835	0,80	61,80	63,95	1,06	1,02
	1 764 712	0,76	61,15	63,30	Ref.	Ref.
P2 $H/D = 3,2$ DİHJ	966 217	0,78	63,21	64,73	1,68	1,64
	1 381 711	0,79	62,70	64,23	0,8	0,85
	2 007 830	0,81	62,16	63,68	Ref.	Ref.

Şekil 4.6'da birleşik çarpmalı jette kullanılan örnek ağ yapısı verilmiştir. Hücreler geometriye uygun olarak yapılandırılmış ve yapılandırılmamış olarak kullanılmıştır. Türbülanslı akışlarda viskoz sınır tabakanın dikkate alınarak doğru şekilde ayrıklaştırılması önemlidir. Buna bağlı olarak ilk düğümün duvara boyutsuz uzanımı tüm durumlarda $y^+ < 1$ olarak tutulmuştur. Çalışmada duvardan ilk hücrenin uzaklığı y değeri $2,2 \times 10^{-3}$ ile $3,5 \times 10^{-3}$ mm arasındadır. Sınır tabakadaki katman sayısı 10, büyüme oranı 1,2 olarak tanımlanmıştır. Basınç-hız bağlantısı birleşik algoritma (coupled algorithms) kullanılarak ele alınmıştır. Korunum denklemleri ikinci dereceden (second-order upwind) şema kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Yakınsama kriterleri süreklilik, momentum, enerji ve türbülans denklemleri için 1×10^{-6} belirlenmiştir. Kalıntıların (rezidülerin) yakınsamasına ek olarak çarpma plakasının ısı transfer katsayısı ve lüledeki ortalama jet hızı gibi değişkenler de izlenmiş olup ve bu değişkenlerinde kararlı duruma gelmesi beklenilmiştir.



Şekil 4.6. (a) Birleşik çarpmalı jetin örnek hücre ağ yapısı, (b) kanatçıkların hücre ağ yapısı

4.2.4. Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler

Çarpma plakası üzerindeki basınç farkı (ΔP) Eş. 4.45'ten hesaplanmıştır:

$$\Delta P = P_m - P_a \quad (4.45)$$

P_m ve P_a (Pa) sırasıyla çarpma plakası üzerindeki ortalama ve atmosferik basınçtır. Birleşik lülenin dairesel ve helisel kısmına giren akışkan hızları Eş. 4.46-4.47'den hesaplanmıştır:

$$Q_d = A_1 v_1 \quad (4.46)$$

$$Q_h = A_2 v_2 \quad (4.47)$$

A_1 (m^2) dairesel lüenin kesit alanıdır. A_2 (m^2) helisel Giriş 2'nin kesit alanıdır. Yerel ısı taşınım katsayısı h_r ($W/m^2 \cdot K$) ve yerel Nusselt sayısı Nu_r Eş. 4.48-4.49'dan hesaplanmıştır:

$$h_r = q'' / (T_r - T_c) \quad (4.48)$$

$$Nu_r = h_r D / k \quad (4.49)$$

T_r ($^{\circ}C$) plakadaki yerel sıcaklık, D (m) birleşik lüenin çapı, k ($W/m \cdot K$) havanın giriş sıcaklığındaki ısı iletim katsayısıdır. Durma noktasındaki ısı taşınım katsayısı h_o ($W/m^2 \cdot K$) ve durma noktasındaki Nusselt sayısı Nu_o Eş. 4.50-4.51'den hesaplanmıştır:

$$h_o = q'' / (T_o - T_c) \quad (4.50)$$

$$Nu_o = h_o D / k \quad (4.51)$$

Burada T_o ($^{\circ}C$) durma noktasındaki ($r = 0$ mm) sıcaklıktır. Çarpma plakasındaki ortalama ısı transfer katsayısı h ($W/m^2 \cdot K$) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) Eş. 4.52-4.53'ten hesaplanır:

$$h = q'' / (T - T_c) \quad (4.52)$$

$$Nu = h D / k \quad (4.53)$$

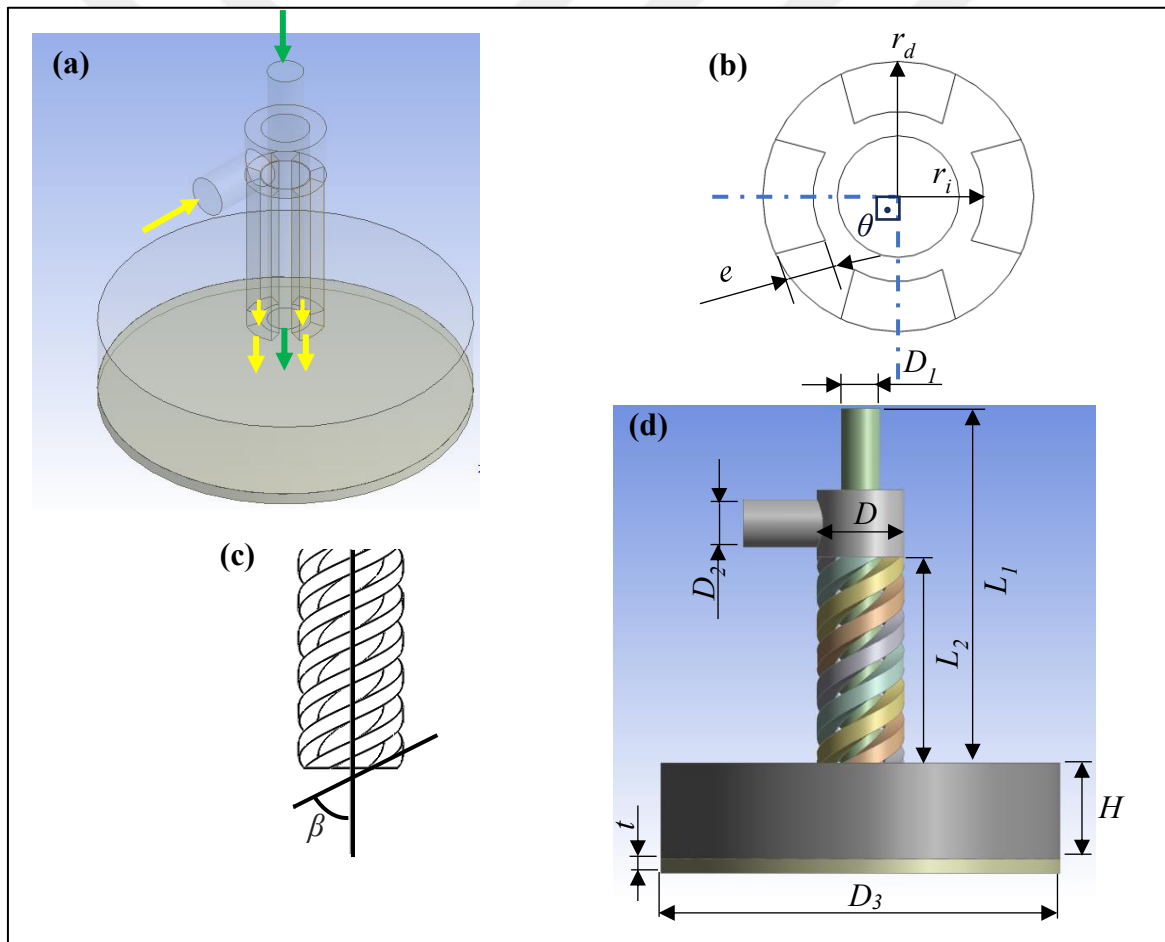
T ($^{\circ}C$) plakanın ortalama sıcaklığıdır.

4.3. Farklı Girdap Numaralı Lülelerle Oluşturulan Birleşik Çarpmalı Jetlerin Modellenmesi

Bu kısımda deneysel çalışmalarda inceleyemediğimiz farklı girdap numaralarının (S_g) ısı transferi ve akış alanı üzerine etkileri farklı hacimsel debi oranlarıyla araştırılmıştır. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüenin farklı girdap numaralarında oluşturulan çarpmalı jetleri kararlı, türbülanslı ve üç boyutlu durum altında incelenmiştir. Sayısal modelleme ANSYS Fluent (versiyon 2020 R1) ticari yazılımıyla yapılmıştır. Çözümler SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Fiziksel ve matematiksel modellerin tanımlanması

Şekil 4.7’de farklı girdap numaralı lülelerle oluşturulan birleşik çarpmalı jetlerin üç boyutlu görünümü ve geometrik parametreleri verilmiştir. D birleşik lülenin çapını, D_1 dairesel lülenin çapını, D_2 helisel lülelere akışkanın girdiği deliğin çapını, e helisel kanalın genişliğini temsil eder. H lüle-plaka arasındaki mesafeyi, L_1 dairesel ve birleşik lülenin boyunu, L_2 helisellerin sarıldığı silindirin boyunu ifade eder. D_3 çarpma plakasının çapını, r_d ve r_i sırasıyla helisel kanalların dış ve iç yarıçaplarıdır. t çarpma plakasının kalınlığını gösterir. β lülenin girdap açısını gösterir ve değerleri $0,0^\circ$ - $18,37^\circ$ - $33,64^\circ$ - 45° - $63,51^\circ$ ’dir. θ helisellerin birbirlerine göre konum açısıdır.



Şekil 4.7. Birleşik çarpmalı jet (a) $S_g = 0,0$ olan birleşik çarpmalı jetin üç boyutlu görünümü, (b) birleşik lülenin alttan görünümü, (c) birleşik lülenin girdap açısı, (d) $S_g = 1,661$ olan birleşik çarpmalı jetin görünümü ve geometrik parametreleri

Farklı girdap numaralı birleşik çarpmalı jetin geometrik parametre değerleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Farklı girdap numaralı birleşik çarpmalı jetin geometrik parametre değerleri

L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	D (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	r_i (mm)	r_d (mm)	e (mm)	θ (°)
37	21,5	31,5	10	4,5	5	3,14	5	1,9	90

Çizelge 4.11’de çalışılan parametreler ve değerleri verilmiştir. Farklı girdap numaralı (S_g) lülelerin ısı transferi ve akış alanı üzerine etkileri iki farklı hacimsel debi oranıyla ($Q^* = 0,2$ ve $0,466$) araştırılmıştır. Lüleden çarpma plakasına olan boyutsuz mesafe $H/D = 1$ ’de ve akışkanın toplam hacimsel debisi $Q_t = 75$ L/dk’da tüm durumlar için sabit tutulmuştur. Farklı girdap açıları (β), helisellerin sarıldığı silindir üzerindeki tur sayıları (adımlar) değiştirilerek elde edilmiştir. Girdap açılarının değişimine bağlı olarak farklı girdap numaralı ($S_g = 0,0$ - $0,275$ - $0,551$ - $0,828$ - $1,661$) dönen jetler oluşturulmuştur. Bu çalışmanın özgün yönü birleşik çarpmalı jetlerde, değişen girdap numaraları ve farklı hacimsel debi oranlarının ısı transferi ve akış alanı üzerine etkilerinin sınırlandırılmış jet (S) ve sınırlandırılmamış (SM) jet durumları için kıyaslanarak incelenmesidir. Sayısal model, deneysel çalışmada girdap numarası $S_g = 1,1$ olan eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetle de doğrulanmıştır.

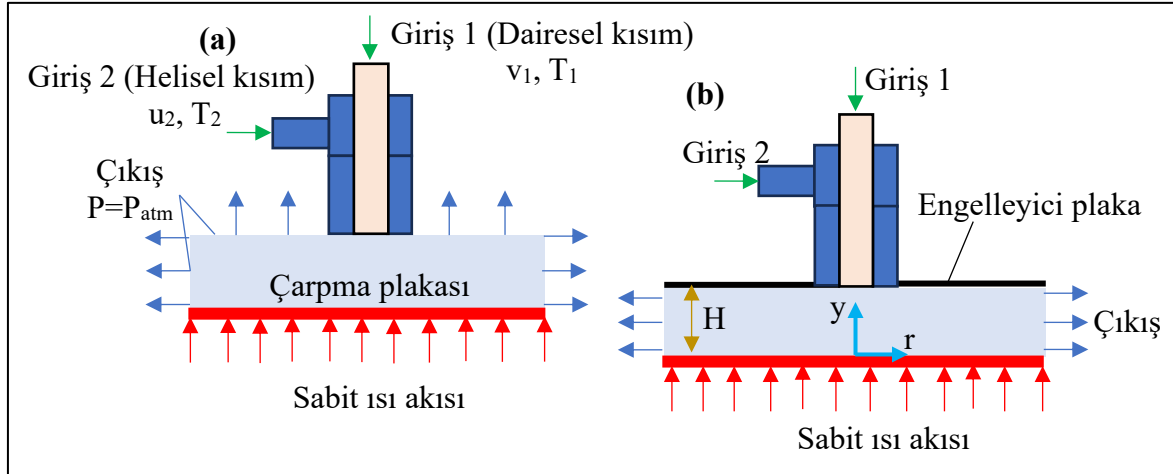
Çizelge 4.11. Farklı girdap numaralı lülelerle oluşturulan birleşik çarpmalı jetlerde çalışılan parametre değerleri

Parametre	Değeri
Boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D)	1
Hacimsel debi oranı (Q^*)	0,2, 0,466
Girdap numarası (S_g)	0,0, 0,275, 0,551, 0,828, 1,661

Sayısal modelin çözümünde kullanılan korunum ve türbülans denklemleri Bölüm 4.2.1 başlığı altında verilen denklemlerle aynı olduğu için burada tekrar verilmemiştir.

4.3.2. Sınır şartları

Farklı girdap numaralı birleşik çarpmalı jetin sınır şartları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekil 4.8(a) ve (b)’de sırasıyla sınırlandırılmamış jet ve sınırlandırılmış jet durumu gösterilmiştir. Birleşik lüle için hacimsel debi oranı $Q^* = 0,2$ ve $0,466$ olarak alınmıştır.



Şekil 4.8. Farklı girdap numaralı birleşik çarpmalı jetin sınır şartları (a) sınırlandırılmamış jet durumu, (b) sınırlandırılmış jet durumu

Çizelge 4.12’de farklı girdap numaralı birleşik lülelerle oluşturulan çarpmalı jetin sınır şartları verilmiştir. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,2$ için eş eksenli daireli ve dörtlü helisel lülenin daireli kısmından gönderilen havanın hızı $v_l = 68,11$ m/s’dir. Dörtlü helisel kısma Giriş 2’den gönderilen havanın hızı ise $u_2 = 12,73$ m/s’dir. $Q^* = 0,466$ için $v_l = 41,92$ m/s, $u_2 = 29,72$ m/s’dir. Türbülans yoğunluğu olarak literatürde çarpmalı jetler için kullanılan %5 değeri alınmıştır [10]. Girişlerde uygulanan kinetik enerji (k) ve özgül enerji dağılım hızı (ω) eşitlikleri sırasıyla şu şekildedir [117]: $k = 3/2 (VI)^2$ ve $\omega = (\rho k/\mu)/10$. Hızlar toplam hacimsel debi $Q_t = 75$ L/dk ve Q^* dikkate alınarak hesaplanmıştır. Havanın birleşik lüleye giriş sıcaklığı 24°C ’dir. Çıkış sınır şartı $P = P_{atm}$ ’dir. Çarpma plakasının tabanından $q'' = 10\,843$ W/m² sabit ısı akısı uygulanmıştır. Engelleyici plakaya kaymama sınır şartı uygulanmıştır.

Çizelge 4.12. Farklı girdap numaralı lülelerle oluşturulan birleşik çarpmalı jetin sınır şartları

Yer	Sınır Şartı ($Q^* = 0,2$)	Sınır Şartı ($Q^* = 0,466$)
Giriş 1	$u_l = 0, v_l = 68,11$ m/s, $w_l = 0, T_l = 24^\circ\text{C}$	$u_l = 0, v_l = 41,92$ m/s, $w_l = 0, T_l = 24^\circ\text{C}$
Giriş 2	$u_2 = 12,73$ m/s, $v_2 = 0, w_2 = 0, T_2 = 24^\circ\text{C}$	$u_2 = 29,72$ m/s, $v_2 = 0, w_2 = 0, T_2 = 24^\circ\text{C}$
Çıkış	$P = P_{atm}$	$P = P_{atm}$
Çarpma plakasının tabanı	$q'' = 10\,843$ W/m ²	$q'' = 10\,843$ W/m ²

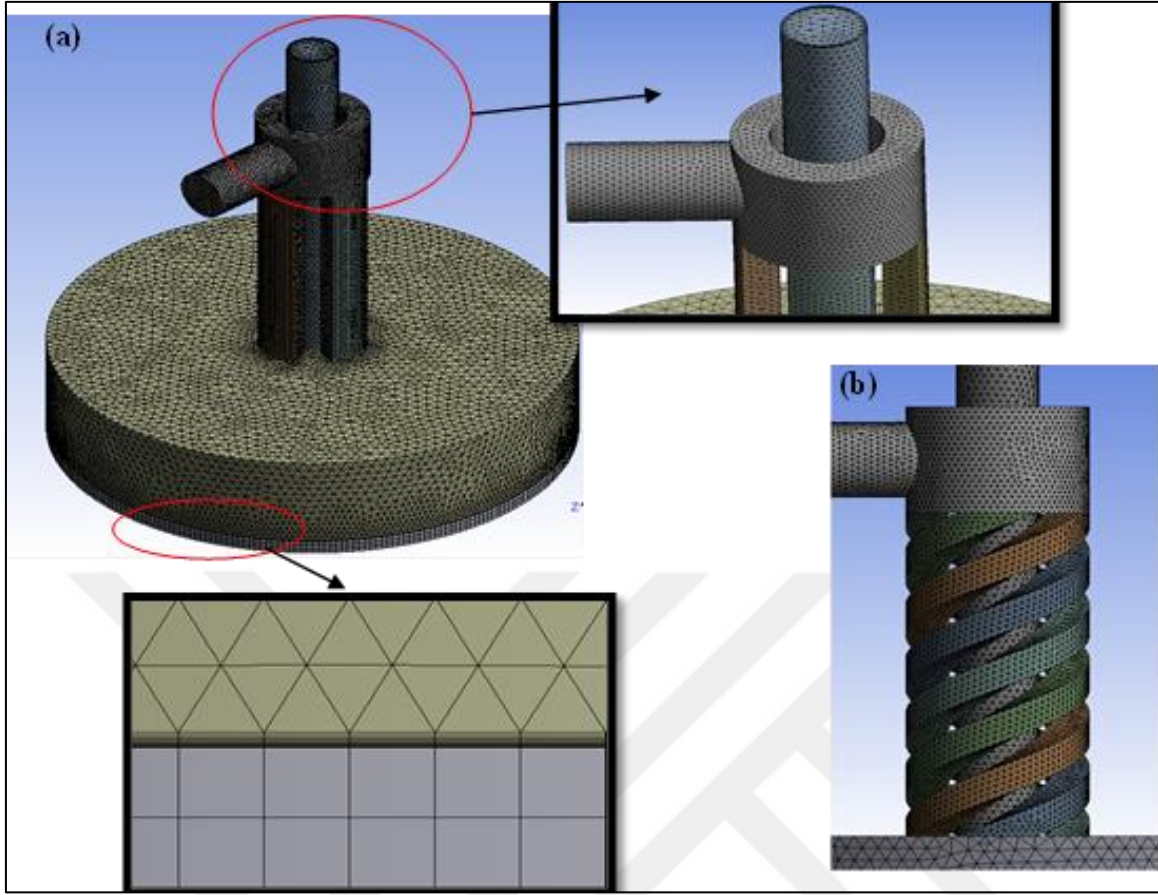
4.3.3. Sayısal çözüm ve hücre sayısından bağımsızlık

Farklı girdap numaralı birleşik lüleler oluşturulan çarpmalı jetin hücre sayısından bağımsızlığı Çizelge 4.13'te verilmiştir. Model için en uygun hücre sayısı çarpma plakası üzerinde oluşan en yüksek sıcaklık (T_H) ve en düşük sıcaklık (T_L) değerlerinin, en büyük hücre sayısındaki değerlere göre değişimi referans alınarak yüzde olarak hesaplanmıştır. Referans değerine göre sıcaklık değişimlerinin yaklaşık %1 ve altında olan 1 352 330 hücre sayısı ile çalışmaya devam edilmiş olup, Çizelge 4.13'te koyu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. Farklı girdap numaralı lülelerle oluşturulan birleşik çarpmalı jetin hücre sayısından bağımsızlığı

Hücre sayısı	y^+	T_L	T_H	T_L % değişim	T_H % değişim
478 458	0,88	57,35	57,26	2,9	2,9
707 956	0,85	56,69	57,68	1,7	2,1
1 352 330	0,86	56,12	58,25	0,7	1,2
1 830 780	0,86	55,73	58,97	Ref.	Ref.

Şekil 4.9'da farklı girdap numaralı lülelerle oluşturulan birleşik çarpmalı jette kullanılan örnek ağ yapısı gösterilmiştir. Hücre yapısı geometriye uygun olarak yapılandırılmış ve yapılandırılmamış olarak belirlenmiştir. Türbülanslı akışlarda viskoz sınır tabakanın dikkate alınması ve doğru şekilde ayrıklaştırılması önemlidir. Buna bağlı olarak ilk düğümün duvara boyutsuz uzanımı tüm durumlarda $y^+ < 1$ olarak tutulmuştur. Sınır tabakadaki katman sayısı 10, büyüme oranı 1,2 olarak tanımlanmıştır. Basınç-hız bağlantısı, birleşik algoritma (coupled algorithms) kullanılarak ele alınmıştır. Korunum denklemleri, ikinci dereceden (second-order upwind) şema kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Yakınsama kriterleri süreklilik, momentum, enerji ve türbülans denklemleri için 1×10^{-6} 'dır. Kalıntıların yakınsamasına ek olarak çarpma plakasının ısı transfer katsayısı ve lüledeki ortalama jet hızı gibi değişkenler de izlenmiş ve bu değişkenlerin de kararlı duruma gelmesi beklenilmiştir.



Şekil 4.9. (a) Girdap numarası $S_g = 0,0$ ve (b) $S_g = 1,661$ olan birleşik çarpmalı jetlerin örnek hücre ağ yapısı

4.3.4. Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler

Hesaplamalarda kullanılan denklemler önceki çalışmayla aynı olduğu için burada tekrar verilmemiştir (Bkz. Bölüm 4.2.4). Girdap numarası da Eş. 3.15'ten hesaplanır.



5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

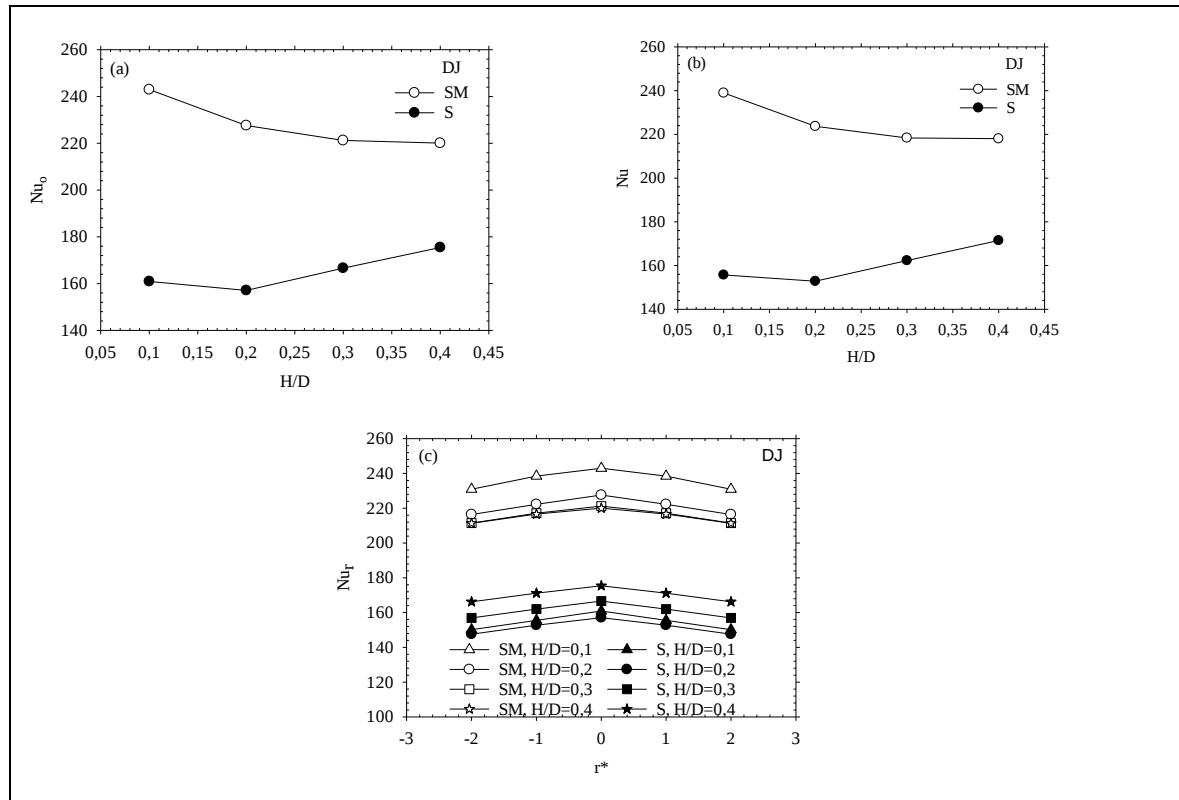
Bu bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Şekillerde verilen sembollerin dolu olanları sınırlandırılmış jet (S) durumunu, boş semboller ise sınırlandırılmamış jet (SM) durumunu göstermektedir.

5.1. Lüle Plaka Mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ Aralığı için Yapılan Çalışma Sonuçları

Bu bölümde boyutsuz lüle-plaka mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ olduğu aralıkta kırk sekiz (48) durum için yapılan deneysel çalışma sonuçları verilmiştir.

5.1.1. Dairesel lüle ve düz plakanın ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması

Şekil 5.1’de dairesel jet (DJ) ile düz plakanın ısı transferi üzerine etkileri gösterilmiştir. Şekil 5.1(a) ve (b) sırasıyla durma noktasındaki Nusselt sayısının (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısının (Nu) boyutsuz lüle-plaka mesafesi H/D ile değişimini gösterir. Dairesel jetin hacimsel debisi $Q_d = 85$ L/dk’da sabit tutulmuştur.



Şekil 5.1. Dairesel jet ile düz plakanın ısı transferi üzerine etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$, (c) Nu_r-H/D

Sınırlandırılmamış jet (SM) durumunda azalan boyutsuz lüle-plaka mesafesiyle (H/D) ısı transferi hem durma noktasında hem de ortalama olarak artış göstermiştir. Nu_o için bu artış literatürde yerel türbülansla önemli bir artışla beraber, lüle-plaka arasındaki mesafede akışkanın hızlanmasıyla açıklanmıştır [15]. Sayısal çalışmada literatüre benzer olarak H/D 'nin azalmasıyla lüle çıkışındaki hızın arttığı görülmüştür. Ayrıca Nu 'nun H/D ile gösterdiği değişimin sayısal çalışmada çarpma plakası üzerindeki basınç düşüşünün H/D ile gösterdiği değişimle benzer olduğu görülmüştür. Buna dayanarak SM durumunda H/D 'nin artmasıyla azalan Nu , sayısal çalışmada H/D 'nin artmasıyla çarpma plakası üzerindeki azalan basınç düşüşüyle ilişkilendirilebilir (Bkz. Şekil 6.13).

Sınırlandırılmış jet (S) durumunda artan H/D , Nu_o ve Nu 'nun artışına neden olduğu gibi, sayısal çalışmada da artan H/D çarpma plakası üzerindeki basınç düşüşünün artışına sebep olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 6.13). Bu, SM durumunda tam tersi olarak gerçekleşmiştir. S durumunda artan H/D ile ısı transferinde görülen artış, plaka üzerinde artan basınç düşüşü artışıyla ilişkilendirilebilir. Fakat SM durumunda olduğu gibi S durumundaki basınç artışı Nu ile birebir aynı trende sahip olmadığı görülmüştür. Bu ise S durumunda ısı transferi üzerine basınç düşüşünden başka engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak oluşan devridaim bölgeleri ve geri akış bölgeleri gibi etki eden baskın faktörlerle açıklanabilir (Bkz. Şekil 6.17).

Çarpan jetin S durumunda, çarpma plakasından ısıyı aldıktan sonra ortamdan kaçış alanı engelleyici plaka tarafından kısıtlanır. Ayrıca bu durum çarpma plakası ile engelleyici plaka arasındaki akışkanın sıcaklığını artırır (Bkz. Çizelge 6.1). Bu sebeple tüm H/D 'lerde S durumundaki ısı transferi SM durumuna göre düşüktür. H/D 'nin artmasıyla engelleyici plakanın etkisi azalmaya başlar ve S durumunda hem durma noktasında hem de plaka üzerindeki ortalama ısı transferinde genel olarak iyileşme meydana gelir. H/D 'nin 0,1'den 0,2'ye artmasına rağmen ısı transferinde biraz düşme görülmüştür. $H/D=0,1$ 'de $Nu = 155,71$ iken $H/D = 0,2$ 'de ise $Nu = 152,82$ 'dir. $H/D = 0,2$ 'deki bu düşüş, plaka üzerinde oluşan devridaim bölgesinin iç kısımda ısınmış akışkanı hapsederek döndürmesiyle açıklanabilir (Bkz. Şekil 6.17).

Çarpma plakası üzerindeki boyutsuz radyal mesafe boyunca ($r^* = 0$ 'dan $r^* = 2$ 'ye kadar) yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımı Şekil 5.1(c)'de gösterilmiştir. Durma noktasından ($r^* =$

0) artan radyal yönde ilerlendikçe ısı transferinin düştüğü görülmüştür. Isı transferindeki bu monoton düşüş ısı sınır tabakanın gelişmesi ve giderek artmasıyla açıklanabilir.

Çizelge 5.1’de sınırlandırılmamış jet (SM) durumuna göre sınırlandırılmış jet (S) durumunda meydana gelen ısı transferi düşüşünün (λ) yüzde değerleri verilmiştir (Bkz. Eş. 3.17). $H/D = 0,1$ ’de SM durumuna göre S durumunda %34,83’lük bir ısı transferi düşüşünün olduğu gözlenmiştir. H/D ’nin artmasıyla bu düşüşün azalmıştır. $H/D = 0,4$ ’te ısı transferindeki bu düşüş %21,37’dir. H/D mesafesinin artmasıyla engelleyici plakanın ısı transferi üzerine olan olumsuz etkisinin azaldığı sonucuna varılabilir.

Çizelge 5.1. Dairesel çarpmalı jette SM durumuna göre S durumundaki ısı transferi düşüşünün (λ) yüzde değerleri

H/D	0,1	0,2	0,3	0,4
λ	34,83	31,69	25,69	21,37

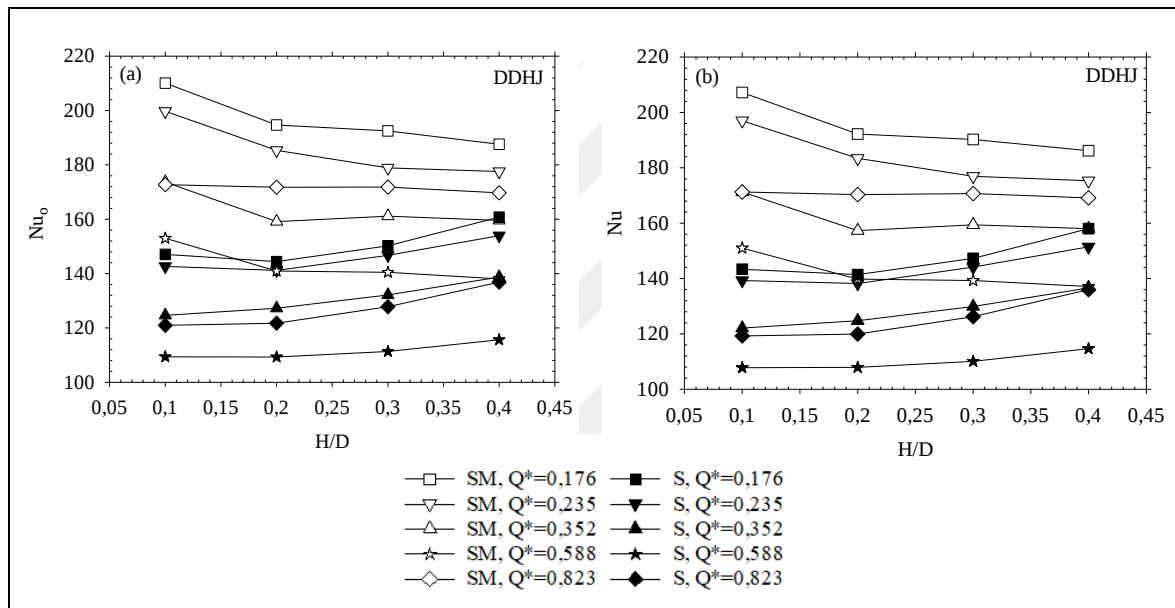
Çizelge 5.2’de çarpma plakası için hesaplanan üniform ısı transferi (Ψ) değerleri yüzde olarak verilmiştir. Isı transferi üniformluğu ısı transferinin en yüksek olduğu durma noktası ($r^* = 0$) ve ısı transferinin en düşük olduğu radyal mesafe ($r^* = 2$ plakanın uç kısmı) dikkate alınarak hesaplanmıştır (Bkz. Eş. 3.16). Isı transferi üniformluğu ile plaka üzerinde meydana gelen ısı transferi sapması ters orantılı olarak ilişkilidir. Yani ısı transferi sapmasının düşük olduğu yerde ısı transferi üniformluğu yüksektir. Çizelgelerdeki düşük yüzde değerleri ısı transferi sapmasının düşük olduğunu gösterirken, ısı transferi üniformluğunun ise yüksek olduğunu gösterir. H/D ’nin artmasıyla hem sınırlandırılmış jet (S) durumu hem de sınırlandırılmamış jet (SM) durum için ısı transferi üniformluğunun arttığı görülmüştür. Fakat SM durumunda üniform ısı transferinin S durumuna göre daha iyi olması, engelleyici plakanın üniform ısı transferini olumsuz etkilediğini gösterir. Dairesel jet ile düz çarpma plakasındaki en iyi üniform ısı transferinin SM durumunda $H/D = 0,4$ için meydana geldiği görülmüştür. Düşük lüle-plaka mesafesinde dairese jetin genel olarak SM durumunun, S durumuna göre daha üniform ısı transferi gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 5.2. Dairesel jette H/D ’ye bağlı olarak SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

H/D	0,1	0,2	0,3	0,4
SM	4,96	4,92	4,41	3,97
S	6,68	6,06	5,81	5,28

5.1.2. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin düz plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması

Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel (dönen) jetler (DDHJ) ile düz plakanın ısı transferine etkileri Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.2(a) ve (b) sırasıyla durma noktasındaki Nusselt sayısının (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısının (Nu), farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerine (H/D) ve farklı hacimsel debi oranlarına (Q^*) bağlı olarak değişimlerini gösterir. İçi boş semboller sınırlandırılmamış jet (SM) durumunu gösterirken içi dolu olan semboller sınırlandırılmış jet (S) durumunu gösterir.



Şekil 5.2. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler ile düz plakanın ısı transferine etkileri
(a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$ değişimi

$0,176 \leq Q^* \leq 0,588$ aralığında Q^* 'ın artmasıyla artan girdap (dönme) etkisinin SM ve S durumlarında ısı transferini azalttığı görülmüştür. En düşük ısı transferi hem SM hem de S durumunda $Q^* = 0,588$ 'de görülmüştür. Literatürdeki bazı sonuçlar [68, 120], artan girdap etkisinin (dönme etkisinin) üniform ısı transferini artırırken ısı transfer hızını azaltabileceğini ifade etmektedir. Nu_o ve Nu 'nun azalması, artan girdabın eksenel momentumu azaltmasına bağlanabilir. Ayrıca Q^* 'ın artmasıyla durma noktasındaki ısı transferinin azalması, toplam hacimsel debinin sabit tutulmasına bağlı olarak dairesel kısımdan gönderilen hava debisinin azalmasıyla da açıklanabilir.

Wannassi ve vd. [29] eksenel yön boyunca girdap yoğunluğunun hızla azalması nedeniyle birleşik girdap (dönme) hareketinin, ısı transferinden ziyade karışımı artırdığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte artan girdap açısıyla girdabın, bitişikteki geleneksel jetlerin meydana getirdiği ısı transferi hızını yine de artırabileceğini ifade etmişlerdir. Bu durumu merkezi jetin yoğunluğunu artıran, dönen jetteki yük kayıplarına atfetmişlerdir. Benzer bir sonuç Şekil 5.2’de görülmüştür. Girdabın (dönmenin) artmasına sebep olan artan hacimsel debi oranı ($Q^* = 0,176$ ’dan $Q^* = 0,588$ ’e) ısı transferini azaltırken, $Q^* = 0,823$ ’te ısı transfer hızını artırıcı etki yaptığı görülmüştür. Bu durum literatürdeki [29] gibi $Q^* = 0,823$ ’ün eksenel jetin yoğunluğuna katkı sağlaması ve karışımı artırarak ısı sınır tabakayı bozmasıyla açıklanabilir. $Q^* = 0,823$ ’ün SM durumunda diğer Q^* ’lara göre artan H/D ile ısı transfer hızında çok az azalma olmaması, $Q^* = 0,823$ ’ün sağladığı eksenel yoğunluk ve karışımın hemen hemen tüm H/D ’lerde devam ettiğini gösterir.

DDHJ’nin sınırlandırılmamış jet (SM) durumunda farklı H/D ile gösterdikleri ısı transferi değişimi dairesel jette açıklandığı gibi plaka üzerindeki basınç düşüşüyle ilişkilendirilebilir. H/D ’nin artmasıyla sayısal çalışmadan elde edilen basınç düşüşü ile deneysel çalışmadan elde edilen ortalama Nusselt sayısının aynı eğilimle bir düşüş gösterdiği görülmüştür (Bkz. Şekil 6.13). Bu durum H/D ’nin artmasıyla jetin yayılmasına bağlı olarak kinetik enerjisindeki düşüşle açıklanabilir. $H/D = 0,1$ ’den $0,2$ ’ye artarken bu etkinin daha fazla kendini gösterdiği ve $H/D = 0,2$ ’den sonra bu etkinin azaldığı görülmüştür.

Sınırlandırılmış jet (S) durumunda ise basınç düşüşü birebir SM durumundaki gibi Nu ile aynı şekilde değişmediği görülmüştür. Bu durum H/D ’nin değişmesiyle, Nu üzerine basınç düşüşüyle birlikte etki eden devridaim bölgeleri, geri akış bölgeleri ve engelleyici plakanın varlığı gibi sebeplerle açıklanabilir. H/D ’nin artmasıyla basınç düşüşündeki artışa (Bkz. Şekil 6.13) bağlı olarak ısı transferinde de artış olduğu söylenebilir. H/D ’nin artmasına bağlı olarak çarpma plakası ile engelleyici plaka arasında çıkış için açılan alanın artması, ısı transfer hızını olumlu etkilemiştir. Ayrıca artan H/D ’nin, çarpma plakası ve engelleyici plaka arasında oluşan devridaim bölgelerinin içerde sıcak akışkanı döndürerek ısı transferini düşürücü etkisini azaltması ve daha fazla dış ortam akışkanının içeri çekilmesini sağlamasıyla ısı transferi üzerinde olumlu etki yaptığı söylenebilir. Diğer taraftan artan H/D , duvar jetinin çıkışta meydana gelen geri akışla çarpışmasını azalttığı için ısı transferi hızının artışına sebep olmuştur (Bkz. Şekil 6.18).

Çizelge 5.3'te SM durumuna göre S durumunda meydana gelen ısı transferi düşüşü (λ), hacimsel debi oranı (Q^*) ve boyutsuz lüle-plaka mesafesine (H/D) bağlı olarak verilmiştir. Q^* 'lar sabitken artan H/D ile Nu 'daki düşüşün azaldığı görülmüştür. Bu ise artan H/D ile S durumunun SM durumuna benzediğini gösterir. Yani artan H/D ile engelleyici plakanın ısı transferi üzerine etkisinin azalmaya başladığı söylenebilir. H/D sabit iken Q^* 'ın artmasıyla $Q^* = 0,352$ 'ye kadar SM ve S durumları arasındaki Nu farkı azalmıştır. Fakat $Q^* = 0,588$ ve $Q^* = 0,823$ 'te H/D 'ler sabit iken bu farkın artmaya başladığı görülmüştür.

Çizelge 5.3. DDHJ'de SM durumuna göre S durumunda meydana gelen ısı transferi düşüşünün (λ) yüzde olarak değerleri

H/D	$Q^* = 0,176$	$Q^* = 0,235$	$Q^* = 0,352$	$Q^* = 0,588$	$Q^* = 0,823$
0,1	30,00	28,59	28,23	28,53	29,99
0,2	25,83	23,84	20,06	22,45	29,14
0,3	21,98	18,01	18,01	20,74	25,63
0,4	14,29	13,31	13,11	16,23	19,37

Çizelge 5.4'te eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) düz çarpma plakası ile sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ile hacimsel debi oranına (Q^*) bağlı olarak üniform ısı transferinin (Ψ) değerleri yüzde olarak verilmiştir. Isı transferi üniformluğu ile plaka üzerinde meydana gelen ısı transferi sapması ters orantılı olarak ilişkilidir. Yani ısı transferi sapmasının düşük olduğu yerde ısı transferi üniformluğu yüksektir. Çizelgelerdeki düşük yüzde değerleri ısı transferi sapmasının düşük olduğunu gösterirken, ısı transferi üniformluğunun ise yüksek olduğunu gösterir. Üniform ısı transferi durma noktası ($r^*=0$) ile radyal mesafe $r^* = 2$ (plakanın uç kısmı) dikkate alınarak yüzde olarak hesaplanmıştır (Bkz. Eş. 3.16).

Çizelge 5.4. DDHJ için SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

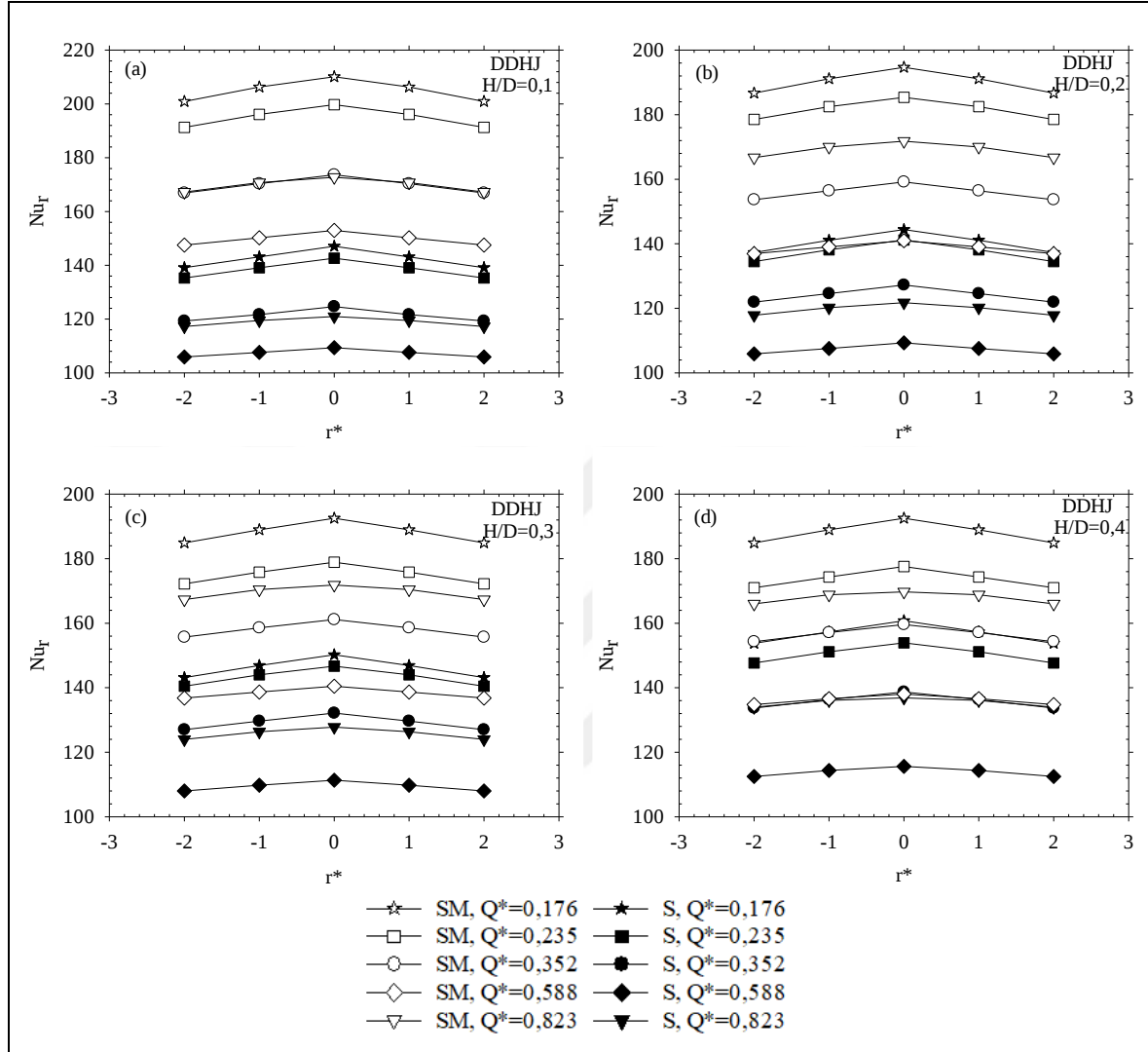
SM						S				
H/D	Q^*									
	0,176	0,235	0,352	0,588	0,823	0,176	0,235	0,352	0,588	0,823
0,1	4,36	4,21	3,89	3,59	3,17	5,41	5,14	4,30	3,16	3,08
0,2	4,10	3,68	3,45	2,82	2,96	4,92	4,74	4,18	3,11	3,19
0,3	3,95	3,74	3,37	2,60	2,62	4,70	4,25	3,88	2,98	2,99
0,4	3,54	3,70	3,32	2,38	2,18	4,34	4,05	3,61	2,72	2,10

H/D 'nin artmasıyla plaka üzerindeki ($r^* = 0$ ve $r^* = 2$) ısı transferi sapmasının hem SM hem de S durumu için azaldığı görülür. Çok düşük H/D 'lerin üniform ısı transferi için uygun olmadığı sonucuna varılabilir. Diğer taraftan S durumundaki ısı transferi sapmasının SM durumuna göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu duruma bağlı olarak engelleyici plakanın düşük H/D 'lerde ısı transferi hızını azalttığı gibi üniform ısı transferini de olumsuz etkilediği söylenebilir. H/D sabit iken Q^* 'ın artması SM ve S durumlarında üniform ısı transferini artırmıştır. Literatürde artırılan girdap (dönme) etkisinin üniform ısı transferini geliştirdiği bildirilmiştir [16, 28]. Plaka üzerinde ısı transferi sapması en yüksek olarak $H/D = 0,1$ 'de $Q^* = 0,176$ için S durumunda meydana geldiği görülmüştür. En düşük sapma ise $H/D = 0,4$ 'te $Q^* = 0,823$ 'te hem SM hem S durumlarında görüldüğü söylenebilir. Ayrıca S durumunda engelleyici plakanın üniform ısı transferini azaltma etkisinin artan H/D ile azaldığı görülmüştür.

Şekil 5.3'te eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) için boyutsuz lüle-plaka mesafesine (H/D) ve hacimsel debi oranına (Q^*) bağlı olarak çarpma plakası üzerindeki yerel Nusselt sayısının (Nu_r) dağılımı gösterilmiştir. Önceki çalışmalar [17, 75] yalnızca girdaplı (dönen) jetin üretilmesi durumunda eyer şekli (saddle profile) oluşumunun düşük H/D 'lerde daha belirgin hale geldiğini, bunun da çarpma plakası üzerindeki üniform ısı transferini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Eyer şeklindeki profil, durma noktasında düşük ısı transferi ile daha sonra radyal yönde meydana gelen bir tepe (pik) ısı transferi oluşumuyla ifade edilir.

DDHJ'nin Nu_r dağılımı sonuçlarında, düşük lüle-plaka mesafelerinde üniform ısı transferi için olumsuz etki yapan eyer oluşumu görülmemiştir. Bu durum birleşik lülenin, döndürme etkisi sağlarken aynı zamanda merkezi de dairesel jetle desteklemesiyle açıklanabilir. Bu düşük lüle-plaka mesafelerinde birleşik çarpmalı jetlerin, üniform ısı transferi için sunduğu en önemli avantajıdır. Şekil 5.3(a)'da SM durumunda $Q^* = 0,352$ ile $Q^* = 0,823$ 'ün radyal mesafe boyunca aynı ısı transferini gösterdiği görülmüştür. Fakat H/D 'nin artmasıyla $Q^* = 0,823$ 'teki ısı transferinin $Q^* = 0,352$ 'den fazla olduğu görülmüştür. Bu durum $Q^* = 0,823$ 'ün $Q^* = 0,352$ 'ye göre dış ortamdan daha fazla duran akışkanı jete dahil etmesi ve karıştırmayı artırmasıyla açıklanabilir. S durumunda neredeyse tüm H/D 'lerde $Q^* = 0,823$ ile $Q^* = 0,352$ hacimsel debi oranlarındaki ısı transferi, $Q^* = 0,352$ 'de biraz daha fazla olmakla beraber birbirlerine yakındır. Bu durum $Q^* = 0,823$ 'ün karıştırmayı artırmasına

rağmen dışarıdaki durgun akışkanı engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak SM durumuna göre jete daha az dahil etmesiyle açıklanabilir.



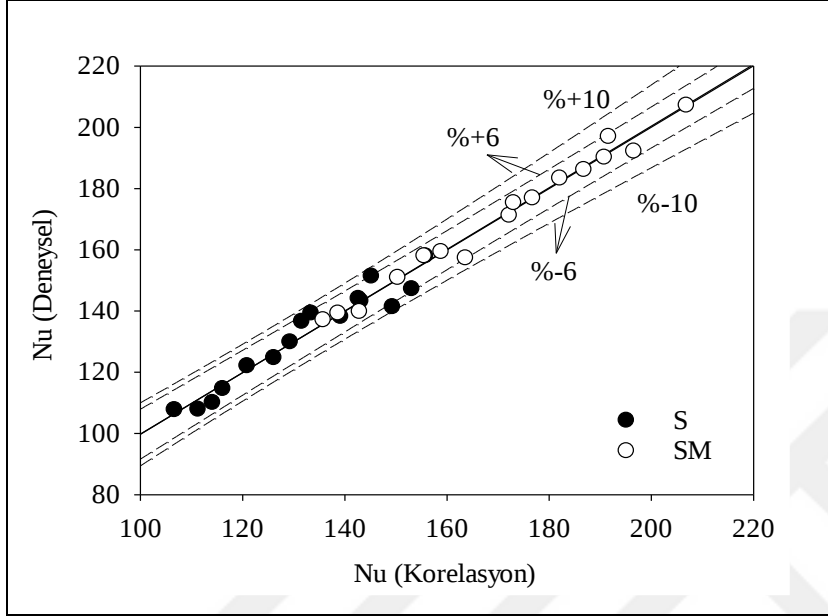
Şekil 5.3. DDHJ ile düz plakanın SM ve S durumlarında Nu_r dağılımına etkileri (a) $H/D = 0,1$, (b) $H/D = 0,2$, (c) $H/D = 0,3$, (d) $H/D = 0,4$

Şekil 5.4'te sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında eş eksenli dairesel ve dördütlü helisel jetler için korelasyonla tahmin edilen Nu değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması verilmiştir. Korelasyonlar boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ve hacimsel debi oranına (Q^*) bağlı olarak verilmiştir. $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ ve $0,176 \leq Q^* \leq 0,588$ koşulları için geçerli olup S ve SM durumları için sırasıyla Eş. 5.1 ve 5.2'de verilmiştir.

$$Nu = 107,9(H/D)^{0,6121}(Q^*)^{-0,2437} \quad (5.1)$$

$$Nu = 110,2(H/D)^{-0,7354}(Q^*)^{-0,2646} \quad (5.2)$$

S ve SM durumlarının korelasyonla tahmin edilen değerleri sırasıyla deneysel sonuçlardan $\pm\%10$ ve $\pm\%6$ aralığında sapma gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.4. Deneysel değerlerin korelasyonla tahmin edilen Nu değerleriyle karşılaştırılması

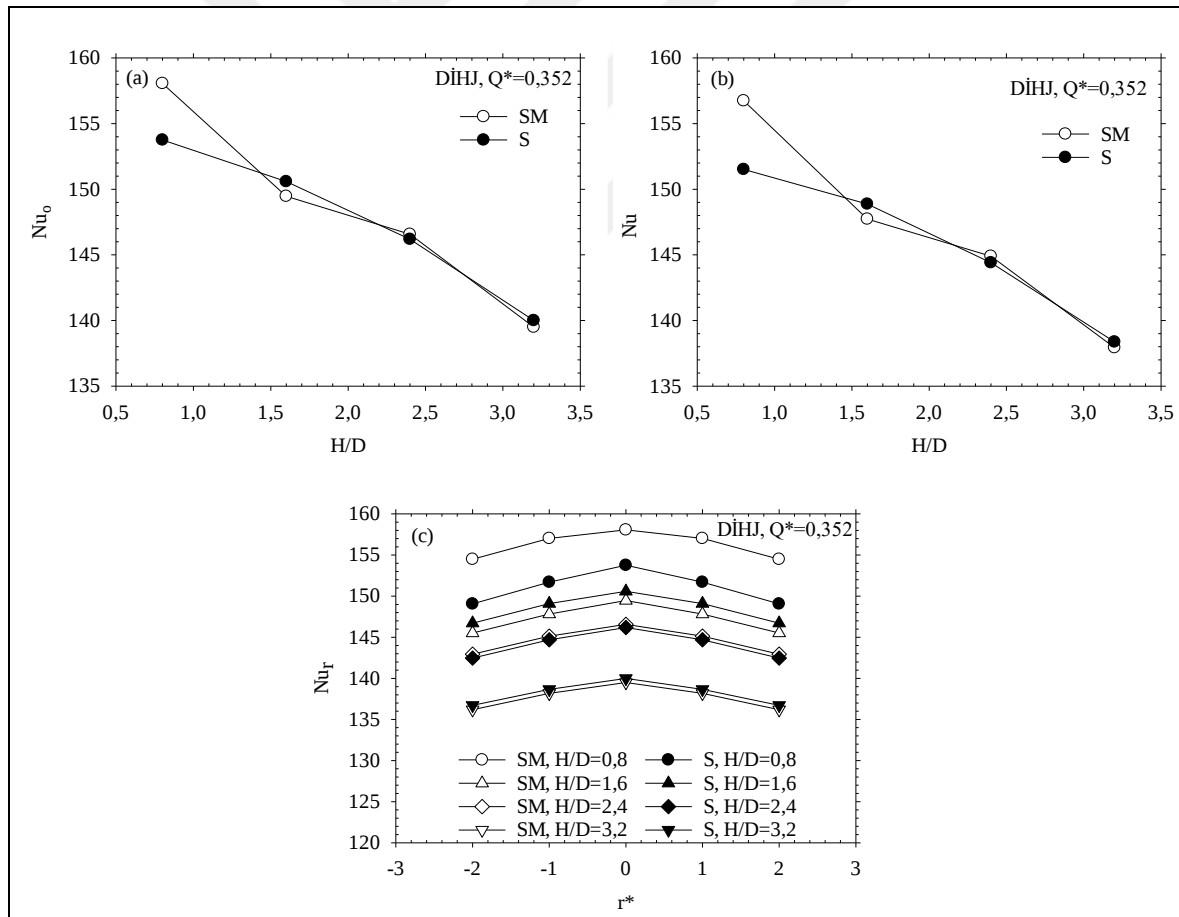
5.2. Lüle-Plaka Mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ Aralığı için Yapılan Çalışma Sonuçları

Bu bölümde boyutsuz lüle-plaka mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ olduğu aralıkta iki yüz yirmi (220) durum için yapılan deneysel çalışma sonuçları verilmiştir.

5.2.1. Eş eksenli dairesel ve ikili helisel lülenin düz plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması

Şekil 5.5'te eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile düz plakanın ısı transferine olan etkileri gösterilmiştir. DİHJ'in toplam hacimsel debisi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutulurken hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için durma noktasındaki Nusselt sayısının (Nu_o) ve çarpma plakasının ortalama Nusselt sayısının (Nu) boyutsuz lüle-plaka mesafesi H/D ile değişimi sırasıyla Şekil 5.5(a) ve (b)'de verilmiştir. Literatürde [121] sadece dönen çarpmalı jetlerin $H/D < 1$ olduğu durumda sınırlandırılmamış jet (SM) durumundaki ısı transferinin, sınırlandırılmış jet (S) durumundakinden büyük olduğu ve H/D 'nin artmasıyla hem SM hem de S için ısı transferinin azaldığı ifade edilmiştir. Benzer durum $H/D = 0,8$ 'de, SM

durumundaki Nu 'nun S durumundakinden büyük olmasıyla görülmüştür. S durumunda bulunan engelleyici plakanın, çarpan jetin kaçış alanını azaltması ile çarpma plakası üzerindeki akışkanın sıcaklığını artırmasının bir sonucu olan bu durum, mesafenin artmasıyla etkisini kaybettiği görülmüştür. Diğer bir ifadeyle yaklaşık $H/D \geq 1,4$ 'ten sonra, SM ve S durumlarındaki Nu hemen hemen aynı değerleri aldığı görülmüştür. Ayrıca yine literatürle benzer olarak SM ve S durumlarının her ikisinde de artan H/D ile ısı transferinin hem durma noktasında hem de ortalama olarak düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi olarak, artan H/D ile jetin daha fazla yayılması ve eksenel momentumun azalması gösterilebilir. Şekil 5.5(c)'de yerel Nusselt sayısının (Nu_r) radyal mesafe boyunca farklı H/D 'ler için dağılımı gösterilmiştir. $H/D = 0,8$ 'den sonra aynı H/D 'lerde SM ve S durumlarındaki Nu_r 'lerin dağılımının neredeyse aynı kaldığı görülmüştür. Yani $H/D = 0,8$ 'den sonra diğer H/D 'lerde engelleyici plakanın Nu_r üzerindeki etkisinin ortadan kalktığı görülmüştür.



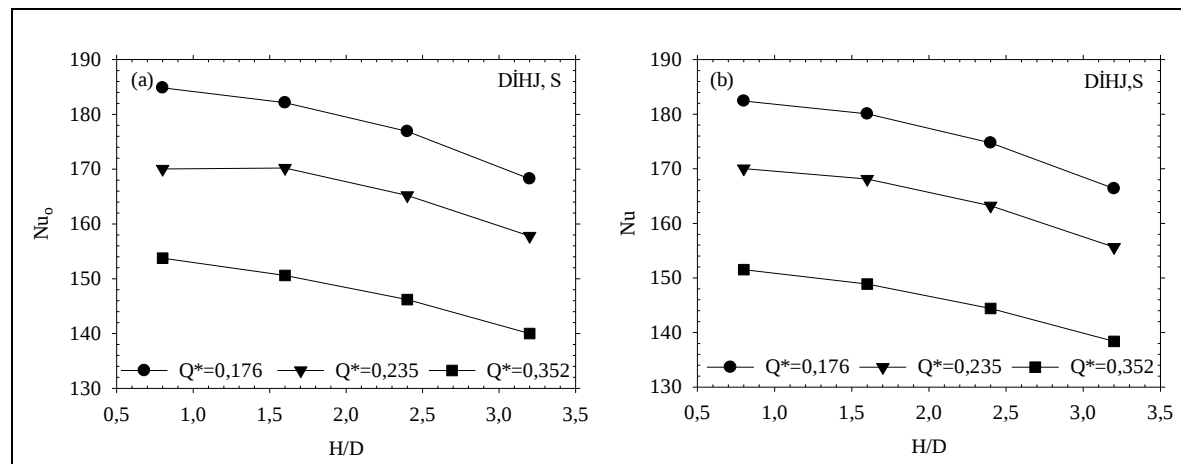
Şekil 5.5. DIHJ ile düz plakanın ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o - H/D , (b) Nu - H/D , (c) Nu_r - r^*

Çizelge 5.5'te DİHJ ile düz plakadaki ısı transferi üniformluğu (Ψ) yüzde olarak $Q^* = 0,352$ için SM ve S durumlarında, ısı transferinin en yüksek olduğu durma noktası ($r^* = 0$) ve ısı transferinin en düşük olduğu radyal mesafe ($r^* = 2$) dikkate alınarak gösterilmiştir. Boyutsuz lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,8$ 'den sonra SM ve S durumlarındaki ısı transferi üniformluğunun yaklaşık aynı kaldı görülmüştür. $H/D = 0,8$ 'de ise S durumundaki engelleyici plakanın üniformluğu SM durumuna göre azalttığı görülmüştür. SM durumunda $H/D = 0,8$ için ısı transferi sapmasının diğer H/D 'lere göre düşük olduğu ve sonra $H/D = 0,8$ 'den 1,6'ya kadar artmış ve daha sonra düşmeye başlamıştır. S durumunda H/D 'nin artmasıyla ısı transferi sapması azalmıştır.

Çizelge 5.5. DİHJ'de SM ve S durumlarında $Q^* = 0,352$ için üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

H/D	0,8	1,6	2,4	3,2
SM	2,25	2,64	2,46	2,37
S	3,05	2,57	2,54	2,34

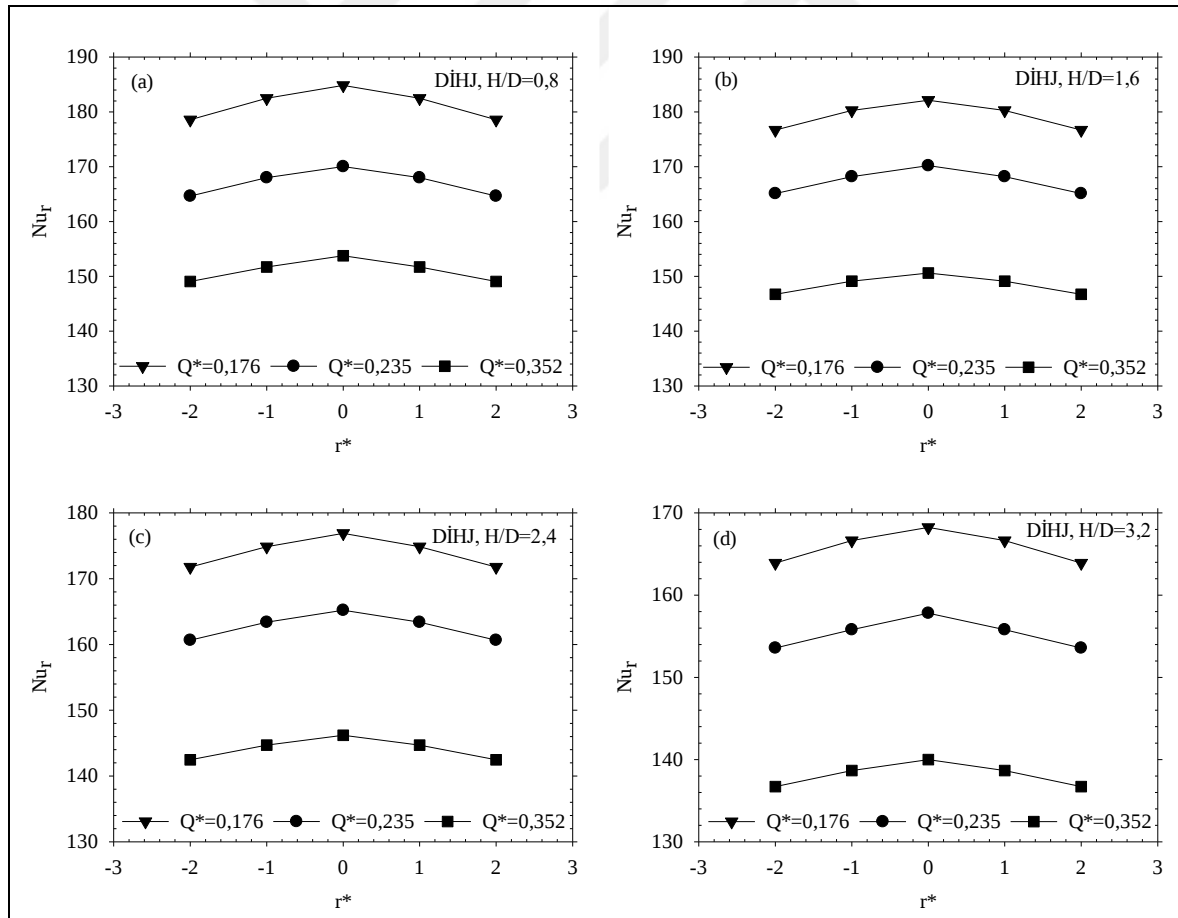
Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile sınırlandırılmış jet (S) durumunda farklı hacimsel debi oranlarının (Q^*) boyutsuz lüle-plaka mesafesiyle (H/D) ısı transferi üzerine etkileri Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Şekil 5.6(a) ve (b) sırasıyla durma noktası Nusselt sayısı (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısının (Nu) H/D ile değişimini gösterir. Jetin yayılma etkisini artıran Q^* 'ın artmasının hem Nu_o hem de Nu 'yu azalttığı görülmüştür. Nu_o [28] ve Nu [68] üzerine benzer sonuçlar literatürde mevcuttur.



Şekil 5.6. DİHJ ile düz plakanın farklı Q^* 'lar için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

$H/D = 0,8$ iken hacimsel debi oranı Q^* 'ın $0,176$ 'dan $0,352$ 'ye artması Nu 'da %17'lik bir düşüş meydana getirirken, $H/D = 3,2$ iken bu düşüşün %16,8 olduğu görülmüştür. $Q^* = 0,176$ iken $H/D = 0,8$ 'den $3,2$ 'ye artmasıyla Nu 'da %9'luk bir düşüş olurken, $Q^* = 0,352$ iken düşüşün yine %9 olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre çalışılan aralıklarda H/D 'nin ısı transferi üzerinde Q^* 'a göre daha etkili olduğu söylenebilir.

Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetlerin (DİHJ) sınırlandırılmış jet (S) durumunda farklı boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ve hacimsel debi oranlarında (Q^*) çarpma plakası üzerindeki yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımına etkileri Şekil 5.7'de gösterilmiştir. H/D sabit tutulduğunda, Q^* 'ın artmasıyla tüm H/D 'lerde ısı transferinin artan radyal mesafelerde düştüğü görülmüştür. Ayrıca Nu_r tüm H/D ve Q^* 'larda normal dağılım (Gauss dağılımı) şeklini göstermiştir. Diğer bir ifadeyle çalışılan parametreler altında simetrik dağılım bozulmamıştır.



Şekil 5.7. DİHJ ile düz plakanın S durumunda farklı H/D 'lerde Q^* 'ın Nu_r üzerine etkisi
(a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$

Çizelge 5.6’da DİHJ için H/D ve Q^* ’a bağlı olarak S durumunda meydana gelen üniform ısı transferi (Ψ) değerleri yüzde olarak verilmiştir. Üniform ısı transferi Nu ’nun değerinin en yüksek olduğu durma noktası ($r^* = 0$) ve en düşük olduğu radyal mesafe ($r^* = 2$) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Tüm Q^* ’larda artan H/D ile plaka üzerindeki ısı transferi sapmasının düştüğü görülmüştür. H/D ’nin sabit tutulması durumunda Q^* ’ın artmasıyla genel olarak üniform ısı transferinde iyileşme olduğu söylenebilir. Yalnızca dönen çarpmalı jetlerde ve birleşik çarpmalı jetlerde hem H/D hem de Q^* ’ın artmasının genel olarak üniform ısı transferini olumlu etkilediğini ifade eden çalışmalar literatürde mevcuttur [28, 67, 112]. Isı transferi sapmasının en fazla $H/D = 0,8$ ile $Q^* = 0,176$ ’da olduğu (%3,39), en düşük ise $H/D = 3,2$ ile $Q^* = 0,352$ ’de (%2,34) meydana geldiği görülmüştür.

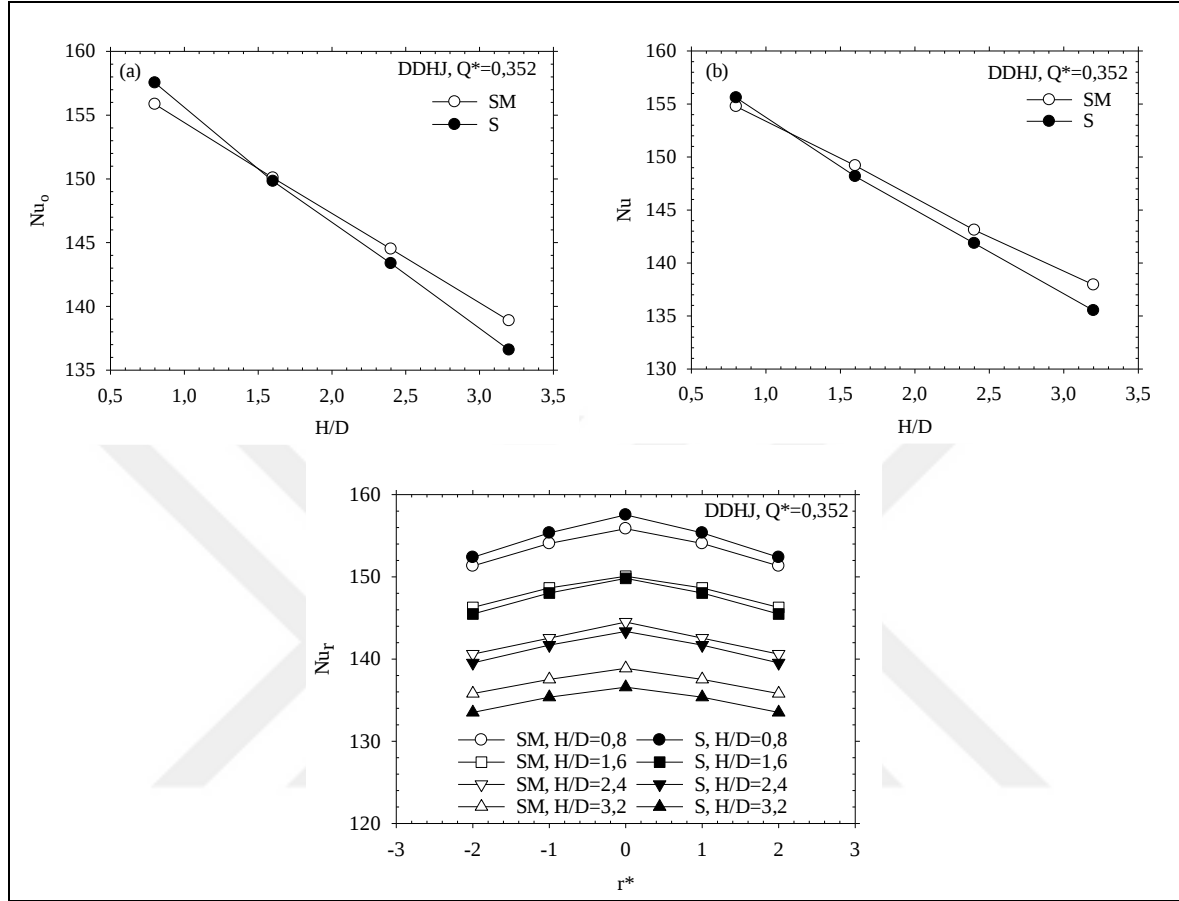
Çizelge 5.6. DİHJ için S durumunda farklı H/D ve Q^* ’lara göre üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

H/D	$Q^* = 0,176$	$Q^* = 0,235$	$Q^* = 0,352$
0,8	3,39	3,16	3,05
1,6	2,98	2,98	2,57
2,4	2,88	2,76	2,54
3,2	2,57	2,68	2,34

5.2.2. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin düz plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması

Şekil 5.8’de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile düz plakanın ısı transferine olan etkileri gösterilmiştir. DDHJ’nin toplam hacimsel debisi $Q_t = 85$ L/dk’da sabit tutulmuştur. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için durma noktasındaki Nusselt sayısının (Nu_o) ve çarpma plakasının ortalama Nusselt sayısının (Nu) boyutsuz lüle-plaka mesafesi H/D ile değişimi sırasıyla Şekil 5.8(a) ve (b)’de verilmiştir. Tüm H/D ’lerde sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları hemen hemen aynı Nu_o ve Nu değerlerini göstermiştir. H/D ’nin artmasıyla SM durumundaki ısı transferinin S durumuna göre biraz daha arttığı görülmüştür. Bu SM durumunda jetin çevredeki durgun akışkanı biraz daha fazla jete dahil etmesiyle açıklanabilir. Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jet sonuçlarıyla beraber düşünüldüğünde (Bkz. Şekil 5.5(a) ve (b)) helisel jetlerin sayısının artması, engelleyici plakanın etkisini öne çıkararak ısı transferinde SM’ye göre S’de $H/D = 1,2$ ’den sonra Nu ’da düşüşe sebep olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 5.8(b)). Ayrıca helisel jetlerin sayısının artmasıyla $Q^* = 0,352$ için Nu ’da SM ve S durumlarında sırasıyla en fazla %1 ve %2,5’luk

değişme olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre $Q^* = 0,352$ için helisel jetlerin sayılarının değişiminin ısı transferi hızı üzerinde çok etkili olmadığı söylenebilir.



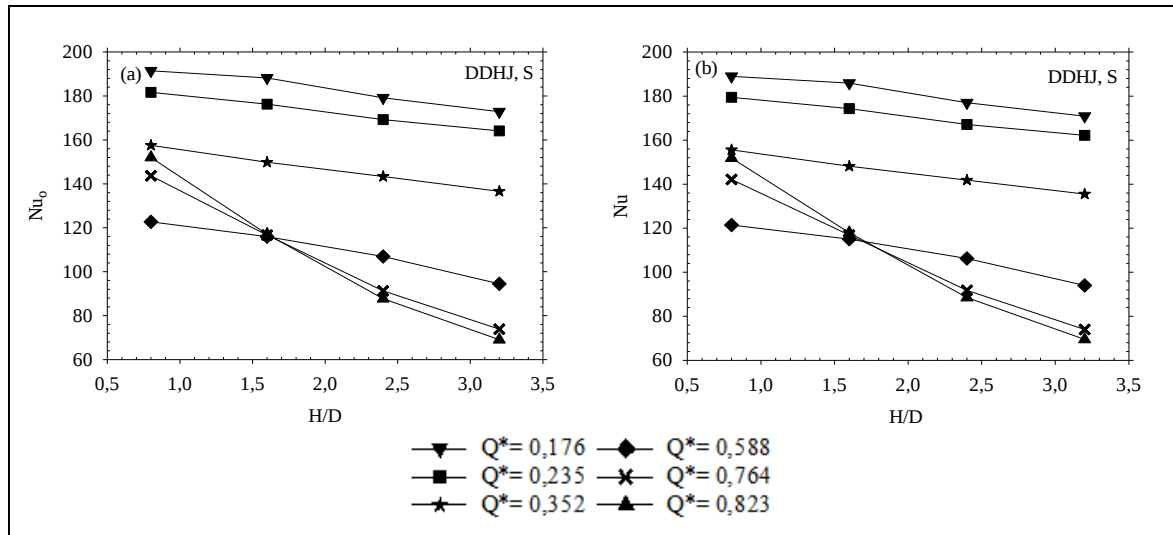
Şekil 5.8. DDHJ ile düz plakanın ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o - H/D , (b) Nu - H/D , (c) Nu_r - r^* değişimi

Şekil 5.8(c)'de yerel Nusselt sayısının (Nu_r) radyal mesafe boyunca farklı H/D 'ler için değişimi görülmektedir. SM ve S durumlarında, eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetlerde olduğu gibi DDHJ'de de simetrik dağılımın bozulmadığı görülmüştür. Diğer bir ifadeyle çalışan parametreler altında helisel jetlerin sayısı simetrikliği bozmamıştır. Ayrıca mesafenin artmasıyla ısı transferi düşmüştür. Literatürde bu duruma benzer sonuçlar mevcuttur [123].

Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile düz plakanın sınırlandırılmış jet (S) durumunda farklı hacimsel debi oranları (Q^*) ve boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) için ısı transferi üzerine etkileri Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Şekil 5.9(a) ve (b) sırasıyla durma noktası Nusselt sayısı (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısının (Nu) farklı Q^* ve farklı H/D 'ler için değişimlerini gösterir. Q^* 'ın 0,176'dan 0,588'e artmasıyla aynı H/D 'lerde hem Nu_o hem Nu 'nun azaldığı görülür. Nu_o [28] ve Nu [68] için benzer sonuçlar literatürde mevcuttur.

Birleşik girdap (dönme) hareketinde eksenel yön boyunca girdap yoğunluğunun hızla azalmasının ısı transferinden ziyade karışımı artırdığı belirtilmiştir [29]. Bununla birlikte artırılan girdap açısıyla girdabın bitişik geleneksel jetlerdeki ısı transferini yine de artırabileceği ifade edilmiştir. Bu durum da merkezi jetin yoğunluğunu artıran dönmedeki yük kayıplarıyla ilişkilendirilmiştir. Literatürdeki bu bilgi göz önüne alınarak, yüksek debi oranında helisel jetlerin çarpma plakası üzerinde yayılmak için yeterince yüksek hıza sahip olmasına rağmen, helisel jetlerin yeterince yüksek H/D 'ye sahip olmamasından dolayı dairesel jetin eksenel momentumuna kuvvet verdiği söylenebilir. Benzer durum hacimsel debi oranı $Q^* = 0,764$ ve $0,823$ 'ün $H/D = 0,8$ 'deki ısı transfer hızını artırmasıyla görülmüştür. Yüksek döndürme yoğunluklarının düşük lüle-plaka mesafelerinde ısı transferini geliştirdiği söylenebilir. Daha sonra H/D 'nin artmasıyla jetin yayılmasına bağlı olarak Nu_o ve Nu düşüş göstermiştir.

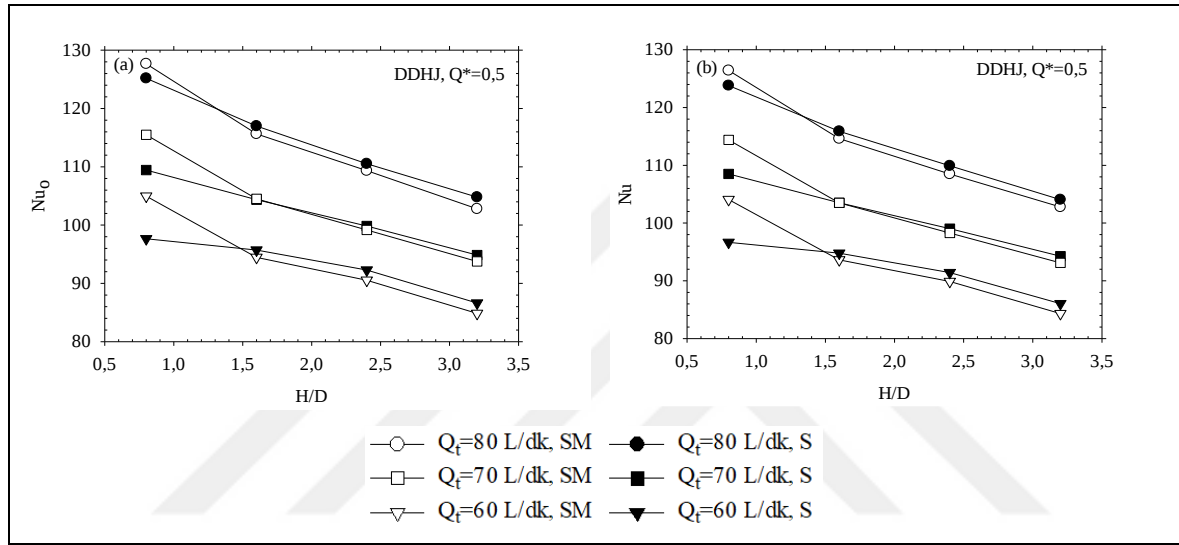
H/D 'nin $0,8$ 'den $3,2$ 'ye artmasıyla $Q^* = 0,176$ ve $Q^* = 0,588$ 'de sırasıyla Nu 'da %9,5 ve %22,5'luk bir düşüş görülürken, $Q^* = 0,764$ ve $0,823$ için bu düşüşün %48 ve %54 olduğu görülmüştür. Sonuçlar dikkate alındığında yüksek debi oranlarında ısı transferi değişim hızının H/D 'nin değişimine daha hassas olduğu söylenebilir.



Şekil 5.9. DDHJ ile düz plakanın farklı Q^* 'lar için S durumunda ısı transferi üzerine etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$ değişimi

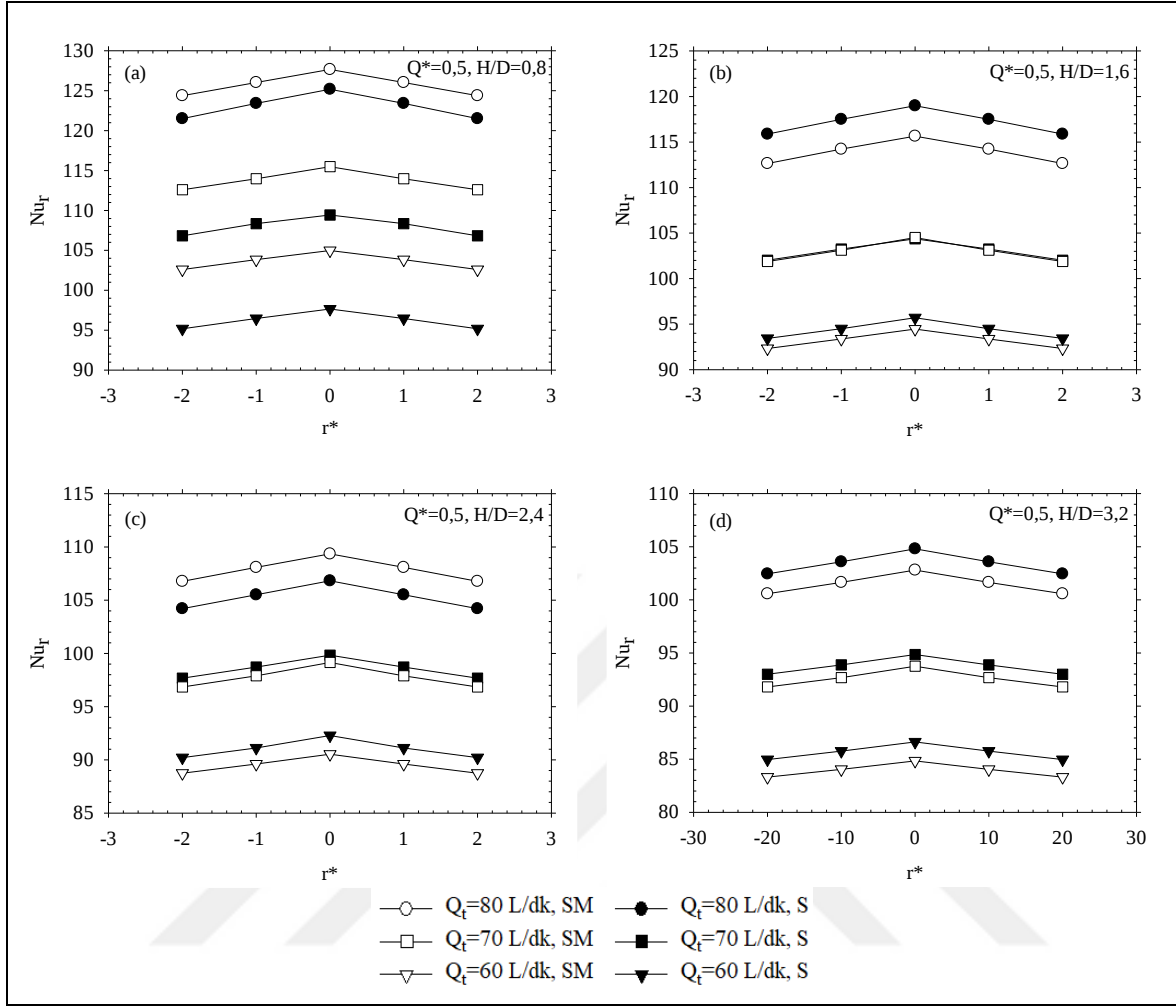
Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin düz plaka ile sabit hacimsel debi oranında ($Q^* = 0,5$), farklı toplam hacimsel debiler (Q_t) ve boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) için ısı transferine olan etkileri Şekil 5.10'da verilmiştir. Şekil 5.10(a) ve (b) sırasıyla durma noktası

Nusselt sayısını (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısını (Nu) göstermektedir. Sınırlandırılmamış jet (SM) durumu içi boş sembollerle, sınırlandırılmış jet (S) durumu ise içi dolu sembollerle verilmiştir. Toplam hacimsel debideki artışın hem Nu_o hem de Nu 'yu artırdığı görülmüştür. Literatürde de toplam hacimsel debinin artmasıyla ısı transferinin arttığını gösteren benzer sonuçlar mevcuttur [27]. $H/D = 0,8$ 'de SM durumundaki ısı transfer hızı S durumuna göre biraz daha yüksektir. $H/D = 1,6$ ve sonrasında SM ve S durumları hemen hemen aynı Nu_o ve Nu değerlerini göstermiştir.



Şekil 5.10. DDHJ ile düz plakanın farklı Q_t 'ler için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) düz plaka ile sabit hacimsel debi oranında ($Q^* = 0,5$), farklı toplam hacimsel debiler (Q_t) ve boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) için boyutsuz radyal mesafe (r^*) boyunca yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımına etkileri Şekil 5.11'de verilmiştir. H/D 'nin artmasıyla tüm toplam hacimsel debilerde, radyal mesafe boyunca ısı transferinin hem sınırlandırılmamış jet (SM) hem de sınırlandırılmış jet (S) durumları için düştüğü görülmüştür. H/D sabit iken tüm toplam hacimsel debilerde $r^* = 0$ 'da en yüksek ısı transferi görülürken, sonrasında artan radyal mesafeyle ısı transferi azalmıştır. Diğer bir ifadeyle Nu_r normal dağılım göstermiştir.



Şekil 5.11. DDHJ ile düz plakanın farklı Q_t ve H/D 'ler için radyal mesafe boyunca Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$ (c) $H/D = 2,4$ (d) $H/D = 3,2$

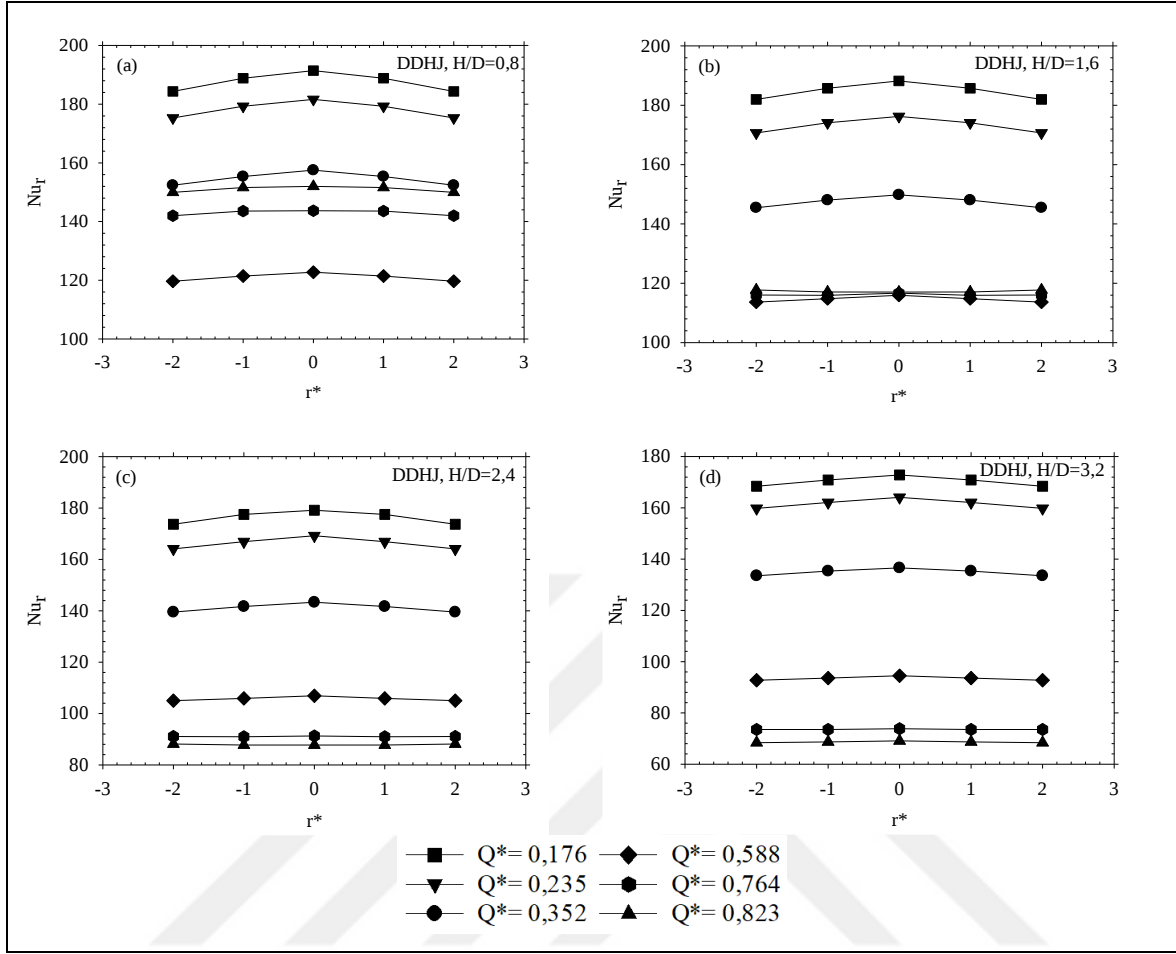
Çizelge 5.7'de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) düz plaka ile sabit hacimsel debi oranında ($Q^* = 0,5$) farklı toplam hacimsel debiler (Q_t) ile farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) için ısı transferi üniformluğu (Ψ) yüzde değerleri sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için verilmiştir. Her bir hacimsel debi oranında artan H/D ile genel olarak üniform ısı transferinin hem SM hem de S durumları için iyileştiği söylenebilir. SM durumunda $Q_t = 80$ ve 70 L/dk'da H/D 'nin $0,8$ 'den $1,6$ 'ya artmasıyla, ısı transferi sapmasının düşmesine yeterli olmadığı görülmüştür. SM durumunda, yüksek debilerde üniform ısı transferinin iyileşmesi için daha yüksek H/D mesafelerine ihtiyaç duyulduğu söylenebilir. Bu durum düşük H/D 'lerde, yüksek akış hızlarıyla çarpan jetin plaka üzerinden daha fazla geri yansıtılmasıyla açıklanabilir. Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetlerde de benzer durum görülmüştür (Bkz. Çizelge 5.5). S durumunda ise engelleyici plaka nedeniyle bahsedilen durumun yüksek akış hızlarında

ortaya çıkmadığı söylenebilir. En düşük ısı transferi sapmasının SM durumunda $Q_t = 60$ L/dk ve $H/D = 3,2$ 'de %1,79 olarak meydana geldiği görülmüştür. Sonuçlara göre, toplam hacimsel debinin azalmasının üniform ısı transferini olumlu etkileyeceği söylenebilir.

Çizelge 5.7. DDHJ için farklı toplam debilerde SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

SM durumunda				S durumunda		
H/D	Q_t (L/dk)					
	80	70	60	80	70	60
0,8	2,57	2,50	2,62	2,93	2,39	2,52
1,6	2,59	2,51	2,25	2,62	2,24	2,38
2,4	2,35	2,33	1,97	2,45	2,17	2,24
3,2	2,16	2,08	1,79	2,25	1,96	1,92

Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) sınırlandırılmış jet (S) durumunda farklı boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ve hacimsel debi oranlarında (Q^*), çarpma plakası üzerindeki yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımına etkileri Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Artan H/D ile ısı transfer hızının azaldığı görülmüştür. Bu durum jetin kinetik enerjisinin artan mesafeye bağlı olarak azalmasıyla açıklanabilir. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,764$ ve $0,823$ 'ün $H/D = 0,8$ 'de ısı transfer hızını artırdığı görülmüştür. Yüksek hacimsel debi oranlarında ($Q^* = 0,764$ ve $0,823$) helisel jetlerin teğetsel hızlarının çarpma plakası üzerinde yayılmak için yeterince yüksek olmasına rağmen, yeterince yüksek H/D 'ye sahip olmamalarından dolayı dairesel jetin eksenel momentumuna kuvvet vererek ısı transferini artırdıkları söylenebilir. H/D 'nin artmasıyla $Q^* = 0,764$ ve $0,823$ 'ün bu etkilerini kaybederek ısı transferini düşürücü etki yapmaya başladığı görülmüştür.



Şekil 5.12. DDHJ ile düz plakanın S durumunda farklı Q^* 'lar için Nu_r dağılımına etkileri (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$

Çizelge 5.8'de eş eksenli dairesel ve dörtlül helisel jetler (DDHJ) için boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ve hacimsel debi oranlarına (Q^*) bağılı olarak sınırlandırılmış jet (S) durumunda meydana gelen üniform ısı transferi (Ψ) değerleri yüzde olarak verilmiştir. Isı transferi üniformluğu ısı transferinin en yüksek olduğu durma noktası ($r^* = 0$) ve ısı transferinin en düşük olduğu radyal mesafe ($r^* = 2$) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Hacimsel debi oranının $0,176 \leq Q^* \leq 0,352$ olduğu aralıkta, H/D 'nin artmasıyla üniform ısı transferinin iyileştiği görülür. Diğer taraftan hacimsel debi oranının $0,588 \leq Q^* \leq 0,823$ olduğu aralıkta, $H/D = 2,4$ 'ten sonra üniform ısı transferi olumsuz etkilenmiştir. Yüksek dönme yoğunluğu meydana getiren hacimsel debi oranlarının ($0,588 \leq Q^*$) belirli bir lüle-plaka mesafesinden sonra ($H/D = 2,4$ 'ten sonra) üniform ısı transferini bozduğu sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca H/D sabit iken Q^* 'ın $0,764$ 'ten $0,823$ 'e artmasıyla ısı transferi sapmasının mutlak değerlerinin artması, artan dönme yoğunluğunun üniform ısı transferini her zaman azaltıcı yönde etkilemeyeceğini gösterir. En düşük ısı transferi sapması $H/D = 2,4$ 'te, $Q^* =$

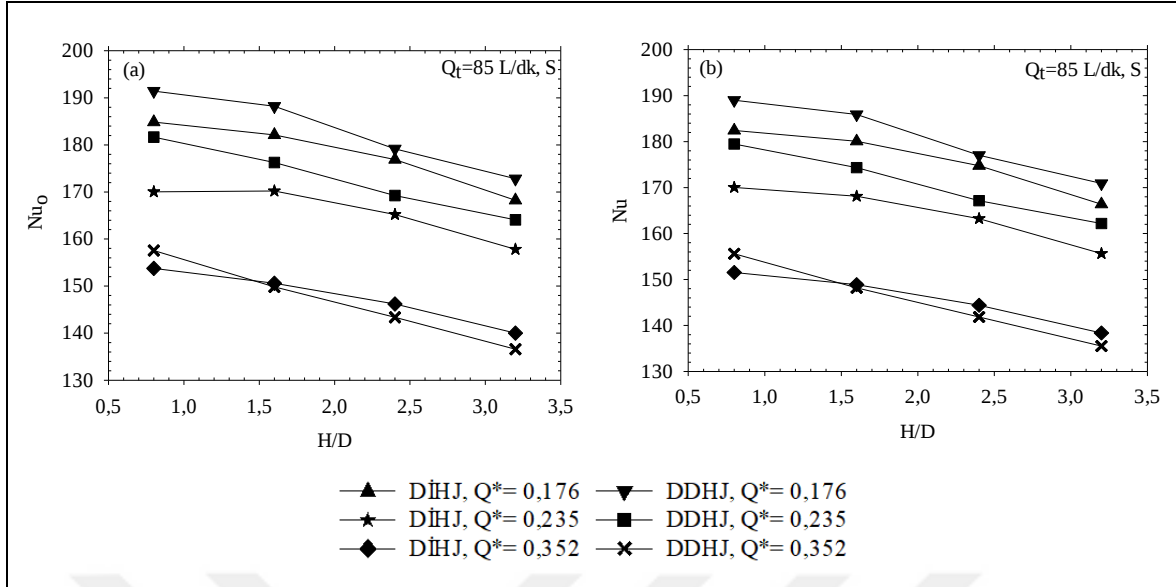
0,764 için %0,21 olarak görülmüştür. $Q^* = 0,823$ 'te negatif çıkan değerler, hacimsel debi oranının durma noktasındaki ($r^* = 0$) ısı transferini $r^* = 2$ 'deki (plakanın uç kısmı) ısı transferine göre fazla azaltmasının bir sonucudur. $Q^* = 0,823$ 'te, boyutsuz lüle-plaka mesafenin $0,8 \leq H/D \leq 1,6$ olduğu aralıkta ısı transferi sapmasının sıfır olabileceği bir H/D bulunur. Bu sonuca dayanarak yüksek hacimsel debi oranlarında, S durumu için düşük lüle-plaka mesafelerinde yüksek üniform ısı transferi elde edilebileceği söylenebilir.

Çizelge 5.8. DDHJ için S durumunda farklı H/D ve Q^* 'lara göre üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

H/D	$Q^* = 0,176$	$Q^* = 0,235$	$Q^* = 0,352$	$Q^* = 0,588$	$Q^* = 0,764$	$Q^* = 0,823$
0,8	3,69	3,48	3,27	2,52	1,18	1,33
1,6	3,31	3,16	2,89	1,97	0,52	-0,61
2,4	3,05	3,03	2,67	1,76	0,21	-0,48
3,2	2,54	2,61	2,25	1,86	0,41	1,01

5.2.3. Eş eksenli birleşik lülelerin sınırlandırılmış jet durumunda düz plakadaki ısı transferlerinin karşılaştırılması

Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ), sınırlandırılmış jet (S) durumunda farklı boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ve hacimsel debi oranlarında (Q^*) düz çarpma plakası üzerindeki durma noktası Nusselt sayısı (Nu_o) ile ortalama Nusselt sayısının (Nu) karşılaştırılması Şekil 5.13'te verilmiştir. Karşılaştırma toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutularak, hacimsel debi oranının $0,176 \leq Q^* \leq 0,352$ olduğu aralık için yapılmıştır. Şekil 5.13(a) ve (b)'de sırasıyla Nu_o ve Nu 'nun, Q^* ve H/D 'ye bağlı olarak değişimleri görülmektedir. DDHJ'nin genel olarak DİHJ'ye göre daha yüksek Nu_o ve Nu değerleri gösterdiği görülmüştür. Bu durum döndürme yoğunluğunu artıran helisel jetlerin sayısının ısı transferi üzerinde etkili olduğunu gösterir. DDHJ'nin ısı transferini DİHJ'ye göre artırması, hacimsel debi oranları $Q^* = 0,176$ ve $0,235$ 'in tüm H/D 'lerinde görülür. Bu durum $Q^* = 0,352$ 'nin lüle-plaka mesafesinin 1,6 olduğu değere kadar devam etmiş, fakat sonrasında ısı transferini düşürücü yönde etki yaptığı görülmüştür. DDHJ'nin ifade edilen aralıkta ısı transferini artırması plaka üzerinde DİHJ'ye göre daha fazla karıştırma sağlayarak ısı sınır tabakayı bozmasıyla açıklanabilir. Diğer taraftan belli bir hacimsel debi oranı ve H/D 'den sonra ısı transferini düşürücü etki yapması karıştırmaktan ziyade jetin yayılmasının daha ağır basmasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 5.13. DİHJ ile DDHJ'nin düz çarpma plakasında farklı Q^* ve H/D 'lere bağlı olarak ısı transferlerinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

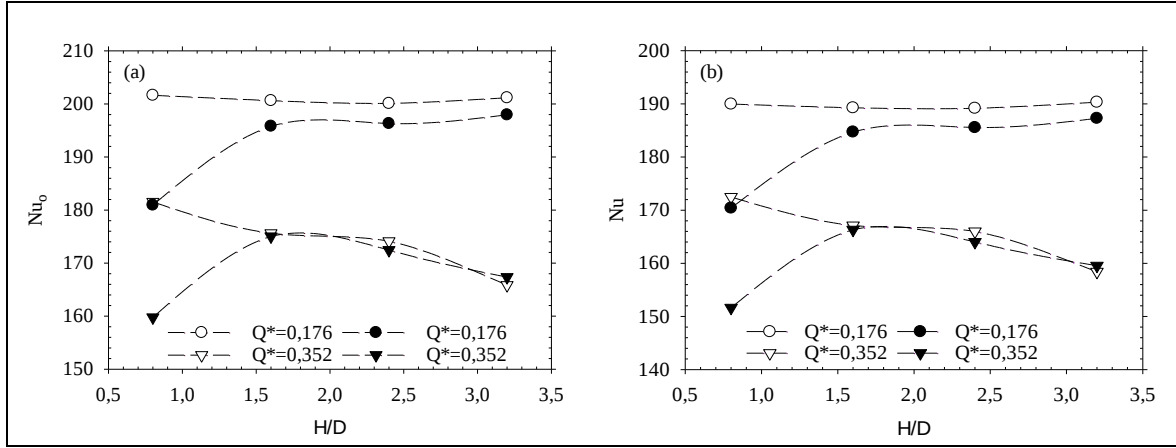
Çizelge 5.9'da Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) ve hacimsel debi oranları (Q^*) dikkate alınarak sınırlandırılmış jet (S) durumundaki üniform ısı transferlerinin (Ψ) yüzde olarak karşılaştırılması verilmiştir. Isı transferi üniformluğu ısı transferinin en yüksek olduğu durma noktası ($r^* = 0$) ve ısı transferinin en düşük olduğu radyal mesafe ($r^* = 2$) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Her iki birleşik lülenin meydana getirdiği üniform ısı transferinin H/D 'nin artmasıyla iyileştiği görülmüştür. Ayrıca her iki birleşik lülede tüm H/D 'lerde artan Q^* 'la ısı transferi sapması azalmıştır. DİHJ'nin DDHJ'ye göre üniform ısı transferinde genel olarak daha iyi olduğu görülmüştür. Çizelge 5.9 ile Şekil 5.13 beraber düşünüldüğünde DDHJ'nin DİHJ'ye göre daha iyi transferi sergilerken, üniform ısı transferinin çalışılan aralıklarda DİHJ'ye göre biraz daha zayıf kaldığı söylenebilir. Sonuçlara göre ısı transfer hızı ile üniform ısı transferi arasında çalışılan aralıklarda ters orantı olduğu söylenebilir. Yani artan helisel sayısı düşük debi oranında ($Q^* \leq 0,352$) ısı transferini artırırken, ısı transferi üniformluğunu olumsuz etkilemiştir. DDHJ'nin üniform ısı transferi, genel olarak DİHJ'ye göre düşük olmasına rağmen $Q^* = 0,352$ 'de $H/D = 3,2$ için %2,25'lik ısı transferi sapması gösterdiği görülmüştür. Bu durum artan Q^* ile DDHJ'de üniform ısı transferinin iyileşeceğini gösterebilir (Bkz. Çizelge 5.8). DİHJ'nin, $Q^* = 0,352$ 'de $H/D = 3,2$ için %2,34'lük ısı transferi sapması gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 5.9. DİHJ ile DDHJ'nin S durumunda farklı H/D ve Q^* 'lara göre üniform ısı transferi değerlerinin (Ψ) yüzde olarak karşılaştırılması

H/D	DİHJ			DDHJ		
	$Q^* = 0,176$	$Q^* = 0,235$	$Q^* = 0,352$	$Q^* = 0,176$	$Q^* = 0,235$	$Q^* = 0,352$
0,8	3,39	3,16	3,05	3,69	3,48	3,27
1,6	2,98	2,98	2,57	3,31	3,16	2,89
2,4	2,88	2,76	2,54	3,05	3,03	2,67
3,2	2,57	2,68	2,34	2,54	2,61	2,25

5.2.4. Eş eksenli dairesel ve ikili helisel lüle ile kanatçık boyları 2 mm olan plakanın ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması

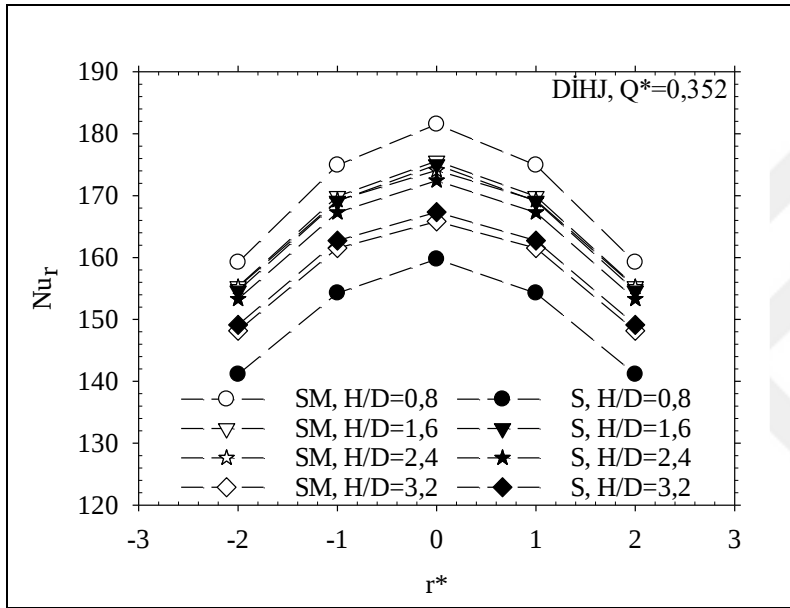
Şekil 5.14'te eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasının (P2) ısı transferine olan etkileri sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için gösterilmiştir. DİHJ'nin toplam hacimsel debisi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutulmuştur. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,176$ ve $0,352$ için durma noktasındaki Nusselt sayısının (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısının (Nu) boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ile değişimi sırasıyla Şekil 5.14(a) ve (b)'de verilmiştir. Şekildeki içi boş semboller SM durumunu, içi dolu semboller ise S durumunu göstermektedir. SM durumunda $Q^* = 0,176$ için tüm H/D 'lerde hem Nu_o hem de Nu hemen hemen aynı kalmıştır. $Q^* = 0,176$ 'da H/D 'nin değişiminin ısı transferi üzerine SM durumunda etkisi olmadığı söylenebilir. $Q^* = 0,176$ için S durumunun $H/D = 1,6$ ve sonrasında SM durumuyla aynı etkiyi gösterdiği yani H/D 'nin artmasıyla ısı transferinin hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür. S durumunda $0,8 \leq H/D < 1,6$ olduğu aralıkta ise H/D 'nin artmasıyla ısı transferinin hem durma noktasında hem de plaka üzerinde arttığı görülür. Bu durum engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak yüzeye çarpan ısınmış jetin ortamı terk etmek için yeterince alan bulamamasına bağlanabilir. Ayrıca engelleyici plakanın çarpma plakası üzerinde ısınmış akışkanı tutarak ısı transferinin azalmasına neden olduğu söylenebilir. H/D 'nin artmasıyla engelleyici plakanın ısı transferi üzerine etkisini kaybettiği ifade edilebilir.



Şekil 5.14. DİHJ ile P2'nin farklı Q^* 'lar için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

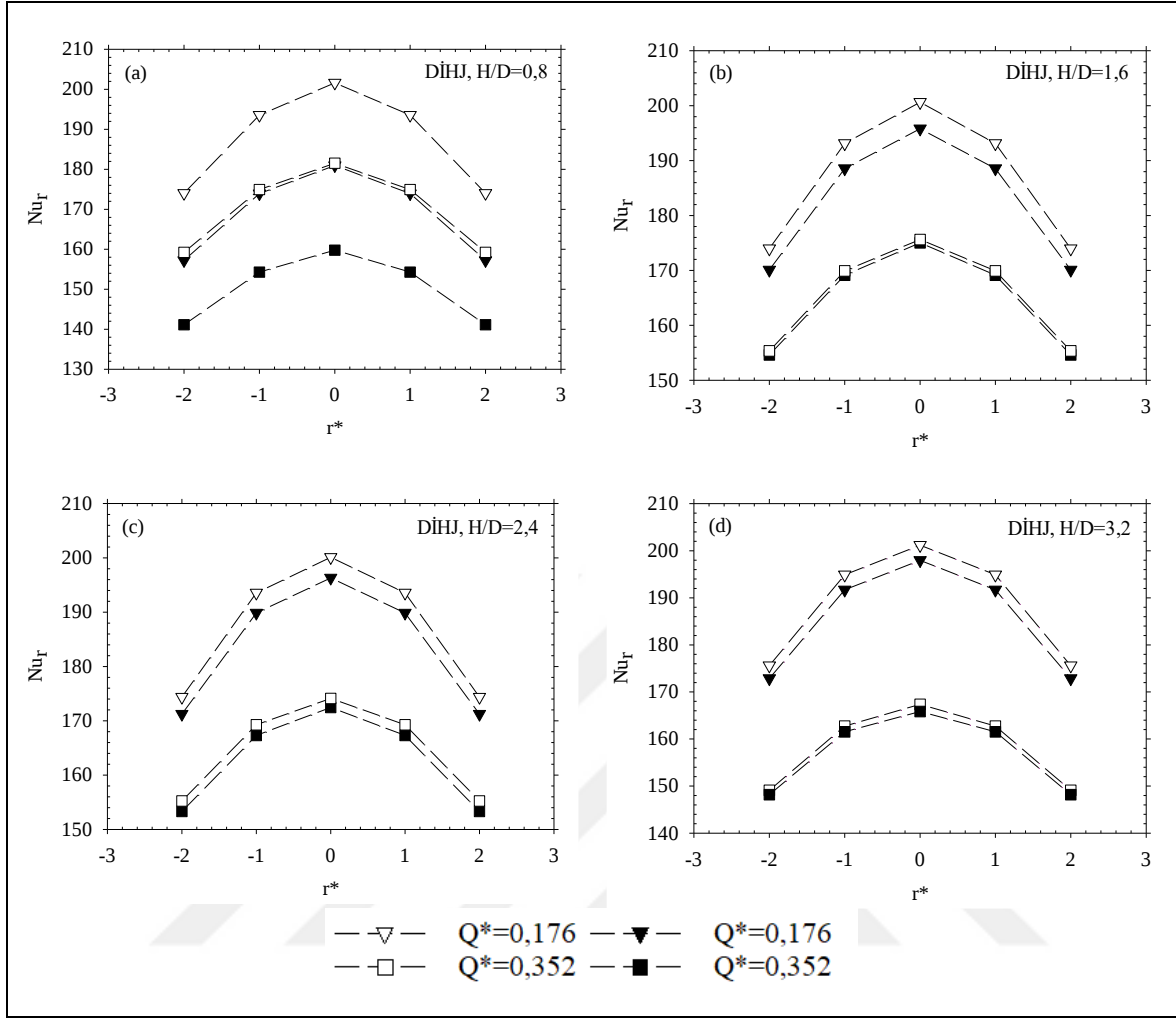
Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ 'deki ısı transferinin hem SM hem de S durumları için $Q^* = 0,176$ 'daki ısı transferinden daha düşük olduğu görülmüştür. Artan hacimsel debi oranı, jetin plaka üzerindeki yayılımını artırdığından dolayı hem Nu_o hem de Nu 'da düşüşe sebep olmuştur. Ayrıca durma noktasındaki Nusselt sayısının azalması, artan hacimsel debi oranıyla birleşik lülenin dairesel kısmından gönderilen akışkan miktarının azalmasına bağlanabilir. SM durumunda $Q^* = 0,352$ için H/D 'nin artmasıyla ısı transferi hem durma noktasında hem de ortalama olarak düşmüştür. Bu durum artan H/D 'ye bağlı olarak jetin aksel momentumunun azalmasıyla açıklanabilir. Ayrıca $Q^* = 0,352$ 'de artan lüle-plaka mesafesinin helisel jetlerin $Q^* = 0,176$ 'ya göre daha fazla dışa doğru savrulmasına olanak tanıyarak ısı transferinin düşmesine sebep olduğu söylenebilir. $Q^* = 0,352$ 'nin S durumu da $H/D = 1,6$ 'dan sonra engelleyici plakanın ısı transferi üzerindeki etkisini kaybetmesiyle SM durumunun ısı transferiyle aynı davranışı sergilediği görülmüştür. S durumunda $0,8 \leq H/D < 1,6$ olduğu aralıkta ise H/D 'nin artmasıyla ısı transferinin hem durma noktasında hem de plaka üzerinde artmıştır. Bu durum hacimsel debi oranı $Q^* = 0,176$ 'da görülen durumla aynıdır. Yani H/D 'nin bahsedilen aralıkta azalmasıyla ısı transferinin azalması, engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak yüzeye çarpmış jetin (ısınmış jet) ortamdan hızlıca uzaklaşmak için yeterince alan bulamaması ve engelleyici plakanın çarpma plakası üzerinde örtü vazifesi görerek ısınan akışkanı hapsedmesiyle ilişkilendirilebilir. Diğer taraftan kanatların varlığı da ısınan jetin kaçışını zorlaştırır. $H/D = 0,8$ 'de SM durumuna göre S durumunda $Q^* = 0,176$ ve $0,352$ için Nu 'da meydana gelen ısı transferi düşüşü sırasıyla %10,3 ve %12,1'dir.

Şekil 5.15'te eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasının (P2) hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ 'de sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımı gösterilmiştir. $H/D = 0,8$ 'de engelleyici plakaya bağlı olarak tüm radyal mesafe boyunca S durumundaki ısı transferinin SM durumuna göre düşük olduğu görülmüştür. Diğer mesafelerde engelleyici plakanın etkisi ortadan kalktığı için SM ve S durumlarındaki ısı transferleri radyal mesafe boyunca her bir H/D için hemen hemen aynıdır.



Şekil 5.15. $Q^* = 0,352$ için DİHJ ile P2'nin SM ve S durumlarında Nu_r dağılımına etkileri

Şekil 5.16'da eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasının (P2) hacimsel debi oranı $Q^* = 0,176$ ve $0,352$ için farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki Nu_r dağılımları verilmiştir. $H/D = 0,8$ hariç $Q^* = 0,176$ 'daki Nu_r dağılımının $Q^* = 0,352$ 'de meydana gelenden hem SM hem S durumları için fazla olduğu görülmüştür. $H/D = 0,8$ 'de engelleyici plakanın ısı transferi üzerinde daha fazla etkili olmasından dolayı tüm radyal mesafe boyunca S durumundaki ısı transferinin SM durumuna göre diğer H/D 'lerdekinden daha düşük olduğu görülmüştür. $H/D = 0,8$ 'de engelleyici plakanın ısınmış çarpan jeti hapsetmesi ve çarpan jetin ortamdan hızlıca uzaklaşması için gerekli kaçış alanını azaltmasına bağlı olarak S ile SM durumlarında meydana gelen Nu_r dağılımlarının arasındaki fark diğer H/D 'lere göre açılmıştır.



Şekil 5.16. DİHJ ile P2'nin SM ve S durumlarında farklı Q^* 'lar için Nu_r dağılımına etkileri
(a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$

Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jet (DİHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasının (P2) farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) ve hacimsel debi oranları (Q^*) dikkate alınarak sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki üniform ısı transferleri (Ψ) yüzde olarak Çizelge 5.10'da verilmiştir. Isı transferi üniformluğu değerlendirilirken ısı transferinin en yüksek olduğu durma noktasındaki ($r^* = 0$) Nu 'nun ve ısı transferinin en düşük olduğu radyal mesafedeki ($r^* = 2$) Nu 'nun değerleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.10. DİHJ ile P2'nin SM ve S durumlarında farklı H/D ve Q^* 'lara göre üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

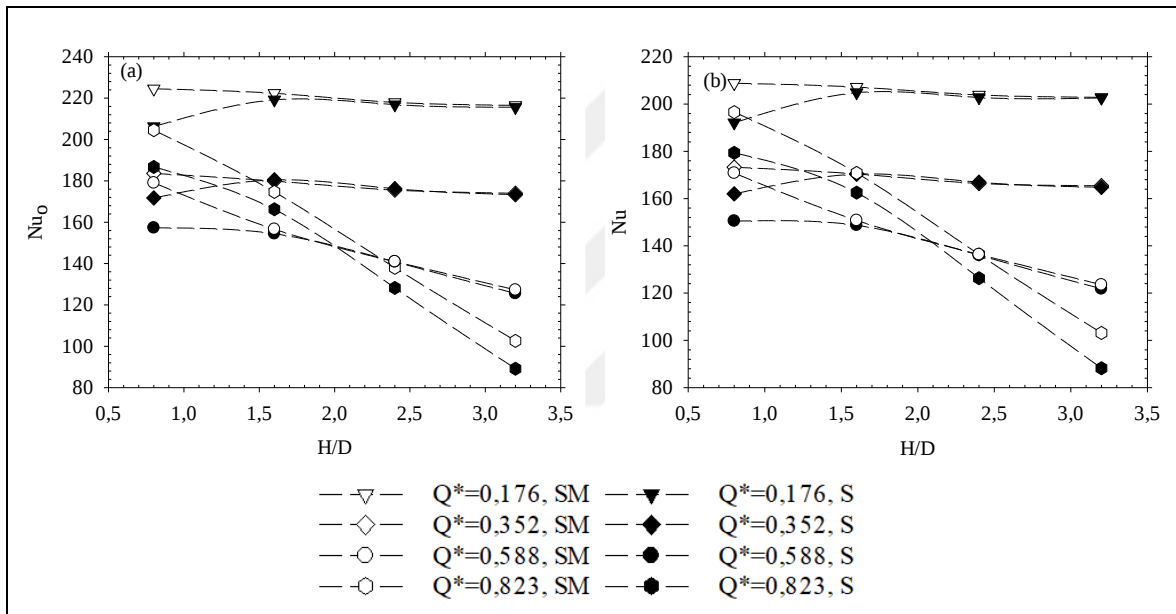
H/D	SM		S	
	$Q^* = 0,176$	$Q^* = 0,352$	$Q^* = 0,176$	$Q^* = 0,352$
0,8	13,68	12,30	13,12	11,67
1,6	13,28	11,54	13,13	11,65
2,4	12,86	10,83	12,77	11,09
3,2	12,71	10,65	12,66	10,90

Sonuçlar H/D 'nin artmasıyla plaka üzerindeki ısı transferi sapmasının hem SM hem de S durumları için azaldığını gösterir. H/D 'nin artmasının, üniform ısı transferini çalışılan lüle-plaka mesafesi aralığında olumlu etkilediği söylenebilir. Diğer taraftan $Q^* = 0,176$ 'nın $H/D = 0,8$ hariç, aynı H/D 'nin hem SM hem de S durumlarında meydana gelen ısı transferi üniformluğunun hemen hemen aynı olduğu görülür. Benzer durum $Q^* = 0,352$ 'de de vardır. Bu durum engelleyici plakanın üniform ısı transferi üzerine etkisinin H/D 'nin artmasıyla ortadan kalktığını gösterir. $Q^* = 0,352$ 'de jetin çarpma plakası üzerinde daha fazla yayılmasına bağlı olarak ısı transferi üniformluğunun tüm H/D 'lerde $Q^* = 0,176$ 'dan daha iyi olduğu söylenebilir. En iyi üniform ısı transferinin %10,65 olarak $Q^* = 0,352$ 'de $H/D = 3,2$ için meydana geldiği görülmüştür.

5.2.5. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin kanatçık boyları 2 mm olan plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması

Şekil 5.17'de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasının (P2) ısı transferine olan etkileri sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için gösterilmiştir. DDHJ'nin toplam hacimsel debisi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutulmuştur. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,176, 0,352, 0,588,$ ve $0,823$ için durma noktasındaki Nusselt sayısının (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısının (Nu) boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ile değişimi sırasıyla Şekil 5.17(a) ve (b)'de verilmiştir. Literatürde eksenel yön boyunca girdap yoğunluğunun hızla azalması nedeniyle birleşik girdap (dönme) hareketinin ısı transferinden ziyade karışımı artırdığı belirtilmiştir [29]. Bununla birlikte artan girdap açısıyla girdabın bitişik geleneksel jetlerdeki ısı transferini yine de artırabileceği ifade edilmiştir. Bu durum da merkezi jetin yoğunluğunu artıran dönmedeki yük kayıplarıyla açıklanmıştır. Yani helisel jetlerin çarpma plakası üzerinde yayılmak için yeterince yüksek teğetsel hıza sahip olmalarına rağmen, yeterince yüksek H/D 'yi

bulamamalarına bağlı olarak dairesel jetin aksenal momentumuna kuvvet verdikleri söylenebilir. Benzer durum hacimsel debi oranı $Q^* = 0,588$ 'in SM durumu ile 0,823'ün hem SM hem S durumları için $H/D = 0,8$ 'de ısı transferi hızını artırmasıyla görülür. Yüksek debi oranlarının düşük mesafede çarpma plakası üzerindeki karışmayı artırarak ısı transferini geliştirdiği de söylenebilir. Daha sonra H/D 'nin artmasıyla jetin yayılmasına bağlı olarak tüm hacimsel debi oranlarında Nu_o ve Nu 'da azalma meydana gelmiştir. $Q^* = 0,176$ ve 0,352 için $H/D = 1,6$ 'dan sonra hem SM hem S durumunda ısı transferinde meydana gelen düşüş trendi birbirine benzemektedir. Q^* 'in artmasıyla ısı transferindeki düşüşün büyüklüğü de artmıştır.

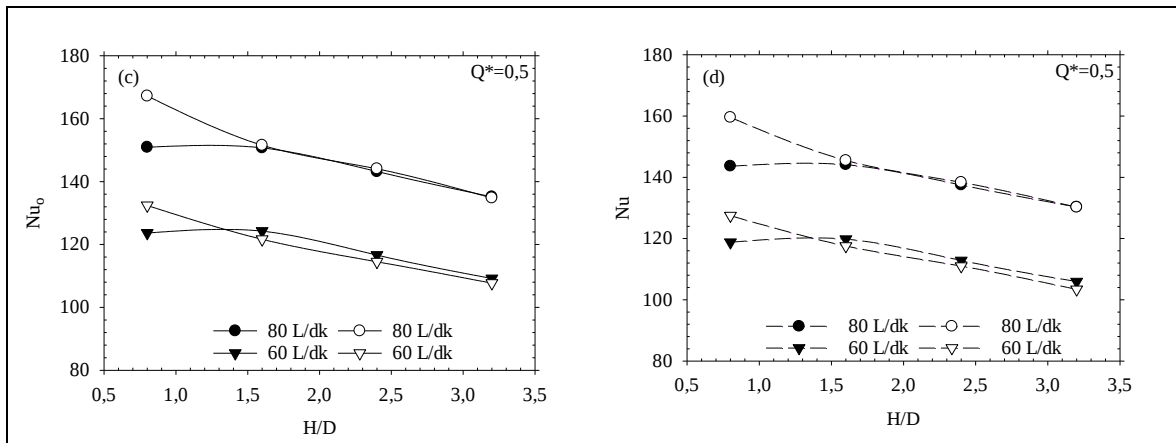


Şekil 5.17. DDHJ ile P2'nin farklı Q^* 'larda ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$ değişimi

$Q^* = 0,823$ hariç $H/D \geq 1,6$ için diğer hacimsel debi oranlarının SM ve S durumları aynı ısı transfer hızını göstermiştir. $H/D \geq 1,6$ için $Q^* = 0,176$ 'dan $Q^* = 0,588$ 'e kadar engelleyici plakanın ısı transferi üzerinde etkisinin olmadığı söylenebilir. Fakat $Q^* = 0,823$ 'te $1,6 \leq H/D \leq 3,2$ lüle-plaka mesafesi aralığında SM durumunun ısı transferinin S durumundan büyük olduğu görülmüştür. Bu durum S durumunda engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak durgun soğuk akışkanın, SM durumuna göre daha az sürüklenerek jete dahil edilmesiyle açıklanabilir. SM durumuna göre çarpan jete daha az durgun ortam akışkanın dahil edilmesi S durumundaki ısı transferinin düşüklüğüne neden olabilir. Ayrıca yüksek debi oranlarında durgun ortam akışkanın jete daha fazla dahil edildiği söylenebilir.

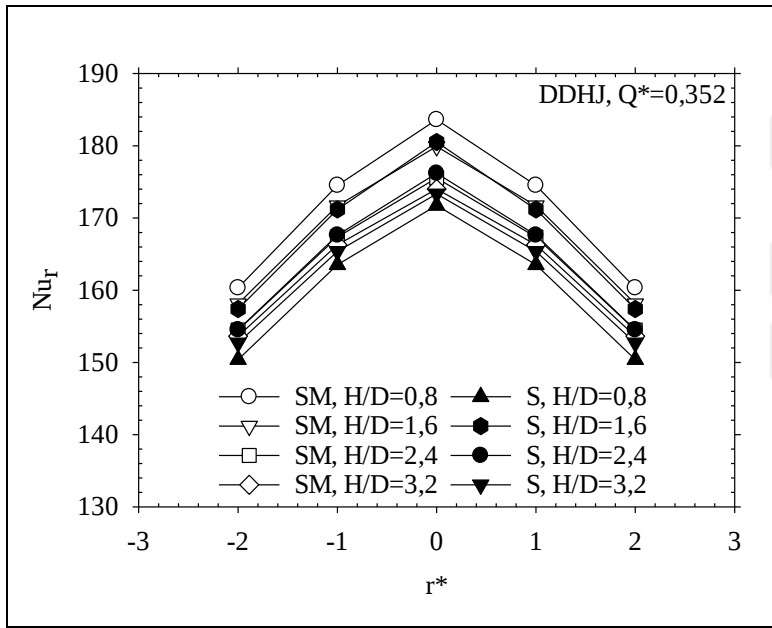
$H/D = 0,8$ 'de tüm hacimsel debi oranlarının SM durumundaki ısı transferinin S durumundan daha büyük olması engelleyici plaka ve kanatçıkların varlığına bağlı olarak çarpan jetin kaçış alanının kısıtlanması ve ısınan jetin çarpma plakası üzerinde hapsolmesiyle açıklanabilir. S durumunda $H/D = 0,8$ 'den 1,6'ya kadar lüle-plaka mesafesinin artmasıyla, hacimsel debi oranı $Q^* = 0,176$ 'dan 0,352'ye kadar ısı transferi artış göstermiştir. Bu durum çarpan ısınmış jetin ortamdaki kaçış alanının artmasıyla açıklanabilir. H/D 'nin 0,8'den 1,6'ya artmasıyla $Q^* = 0,588$ ve 0,823'te ısı transferinde düşüş görülmüştür. Bu durum yüksek hacimsel debi oranında artan lüle-plaka mesafesiyle ısı transferinin düşmesine sebep olan eksenel momentumdaki düşüşün, kaçış mesafesinin artmasıyla meydana gelen ısı transferi artışına baskın olmasıyla açıklanabilir. Sonuçlar dikkate alındığında ısı transferinin, yüksek hacimsel debi oranlarında H/D 'nin değişimine daha fazla bağlı olduğu söylenebilir.

Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin sabit hacimsel debi oranında ($Q^* = 0,5$) farklı toplam hacimsel debiler (Q_t) ve boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakası (P2) ile ısı transferine olan etkileri Şekil 5.18'de verilmiştir. Şekil 5.18(a) ve (b) sırasıyla durma noktası Nusselt sayısını (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısını (Nu) göstermektedir. Sınırlandırılmamış jet (SM) durumu içi boş sembollerle, sınırlandırılmış jet (S) durumu ise içi dolu sembollerle gösterilmiştir. Toplam hacimsel debinin artması hem SM hem de S durumunda her iki Nusselt sayısını da artırmıştır. $H/D = 0,8$ 'de SM durumundaki ısı transfer hızının S durumuna göre biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum engelleyici plakanın, çarpan jetin kaçış alanını kısıtlaması ve ısınan jeti çarpma plakası üzerinde hapsetmesiyle açıklanabilir. Ayrıca $H/D = 1,6$ ve sonrasında SM ve S durumları hemen hemen aynı Nu_o ve Nu değerlerini göstermiştir.



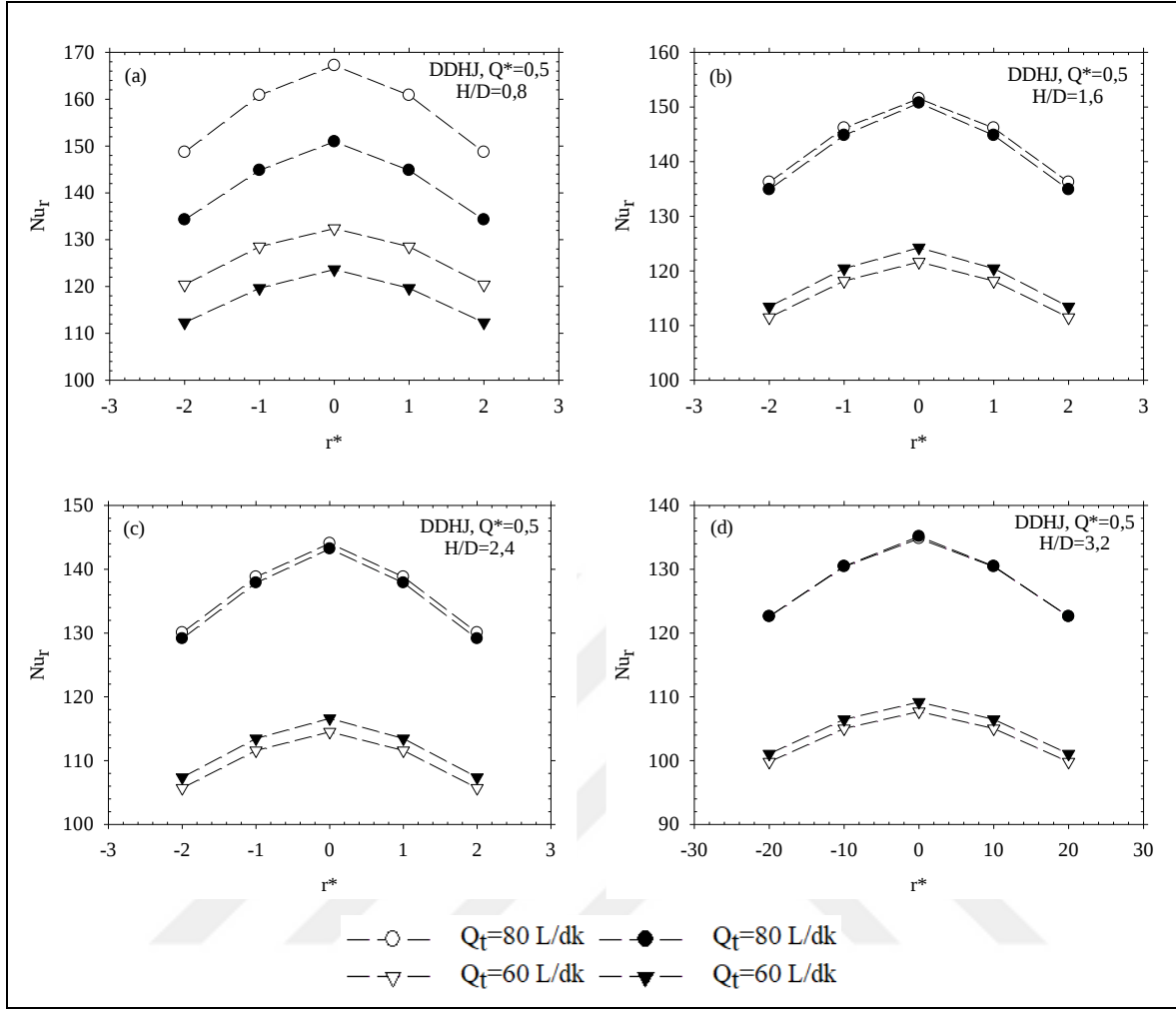
Şekil 5.18. DDHJ ile P2'nin farklı Q_t 'lerde ısı transferine etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

Şekil 5.19’da eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasının (P2) hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ ’de sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımı gösterilmiştir. $H/D = 0,8$ ’de engelleyici plakaya bağlı olarak tüm radyal mesafeler boyunca S durumundaki ısı transferinin SM durumuna göre düşük olduğu görülmüştür. Diğer mesafelerde engelleyici plakanın etkisi ortadan kalktığı için SM ve S durumlarındaki ısı transferlerinin radyal mesafe boyunca her bir H/D için hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. H/D ’nin artmasıyla eksenel momentumun düşmesine bağlı olarak plaka üzerindeki Nu_r dağılımı da düşmüştür.



Şekil 5.19. $Q^* = 0,352$ için DDHJ ile P2’nin SM ve S durumlarında Nu_r dağılımına etkileri

Şekil 5.20’de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasının (P2) farklı toplam hacimsel debilerde, hacimsel debi oranı $Q^* = 0,5$ ’te sabit iken çarpma plakası üzerindeki boyutsuz radyal mesafe boyunca elde edilen yerel Nusselt sayısı (Nu_r) değişimi gösterilmiştir. Engelleyici plakanın ısınmış çarpan jeti hapsedmesi ve çarpan jetin ortamdaki hızla uzaklaşması için gerekli kaçış alanını bulamamasına bağlı olarak S ile SM durumlarında meydana gelen Nu_r dağılımlarının arasındaki farkın $H/D = 0,8$ ’de diğer H/D ’lere göre büyük olduğu görülmüştür. $H/D = 1,6$ ’dan sonra engelleyici plakanın bu etkisinin her iki toplam debi için ortadan kalktığı görülmüştür. Bu durumun neticesi olarak her bir toplam debinin SM ve S durumlarındaki Nu_r dağılımları üst üste gelmiştir. H/D sabit iken toplam debinin azalması Nu_r ’nin azalmasına neden olmuştur.



Şekil 5.20. DDHJ ile P2'nin farklı toplam hacimsel debilerde sabit hacimsel debi oranı $Q^* = 0,5$ için Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$

Çizelge 5.11'de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) sabit hacimsel debi oranında ($Q^* = 0,5$) farklı toplam hacimsel debiler (Q_t) ve farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) için üniform ısı transferi (Ψ) değerleri yüzde olarak sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için verilmiştir. Her bir toplam hacimsel debide artan H/D ile üniform ısı transferinin hem SM hem de S durumları için iyileştiği görülmüştür. Toplam hacimsel debi $Q_t = 80$ L/dk'da meydana gelen ısı transferi sapması hem SM hem S durumunda $Q_t = 60$ L/dk'da meydana gelen ısı transferi sapmasından daha fazla olduğu görülmüştür. Artan toplam debinin ısı transferi hızını iyileştirmesine rağmen ısı transferi sapmasını artırdığı görülmüştür. Bu durumun bir sebebi yüksek Q_t 'de çarpan jetin, çarpma plakası üzerinden düşük Q_t 'ye göre daha fazla geri yansıtılmasıyla açıklanabilir. Bir diğer neden olarak yüksek Q_t 'de birleşik lülenin dairesel kısımdan çıkan jetin eksenel momentumunun, helisel kısımlardan çıkan jetlerin eksenel momentumuna göre daha fazla

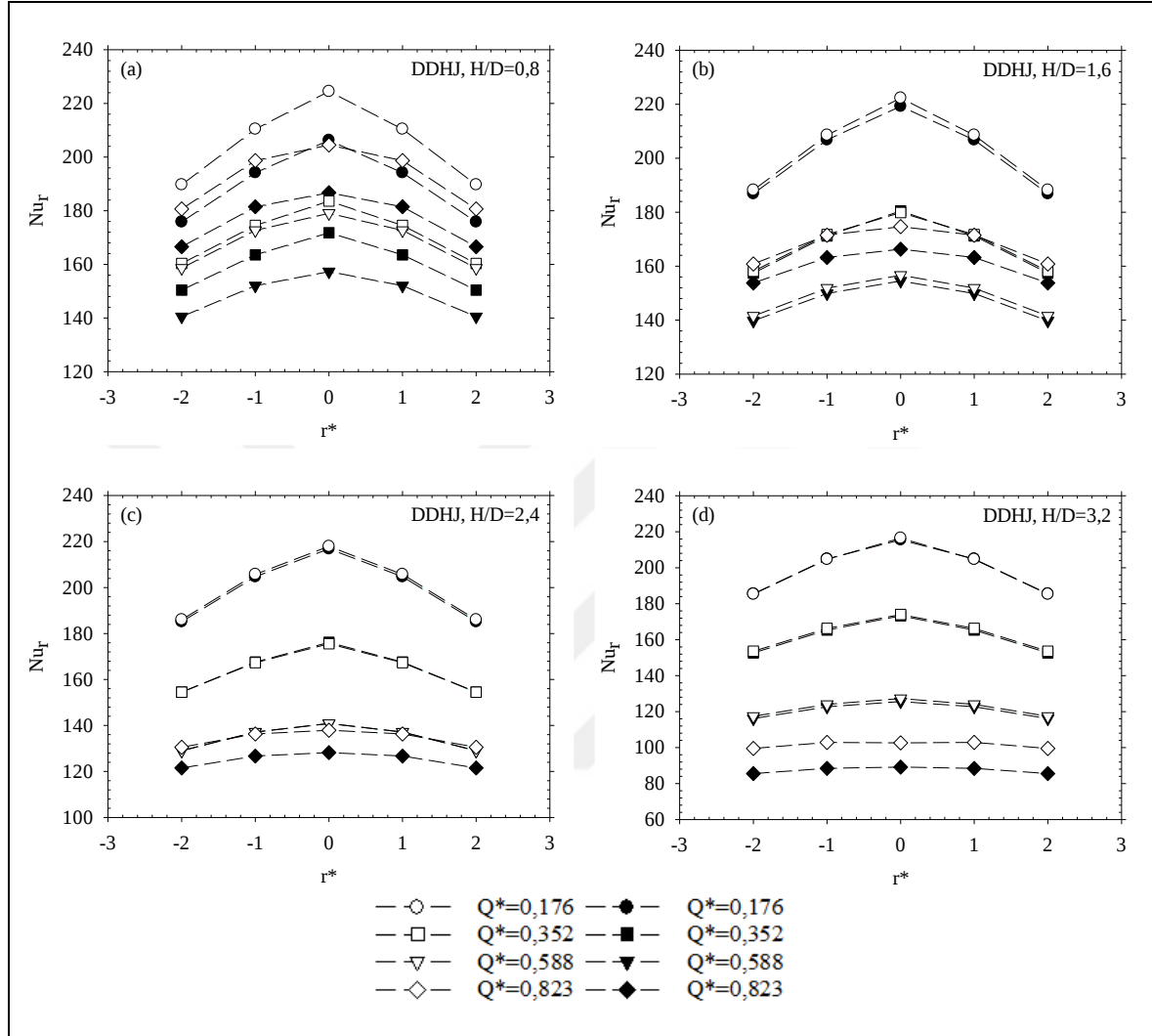
olmasından dolayı $r^* = 0$ ve $r^* = 2$ 'nin birbirlerine göre sapmalarını artırmasıyla açıklanabilir. Hem yüksek ısı transferi hem de düşük üniform ısı transferi için yüksek toplam debiler yüksek lüle-plaka mesafelerinde tercih edilebilir. Her iki toplam debi için tüm H/D 'lerde SM durumundaki üniform ısı transferinin S durumuna göre daha iyi olduğu görülmüştür. Böylece engelleyici plakanın üniform ısı transferini olumsuz etkilediği sonucuna ulaşılabilir. En iyi üniform ısı transferinin $Q_t = 60$ L/dk'da $H/D = 3,2$ için SM durumunda %7,33 olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre toplam akış hızının azalması ve H/D 'nin artmasının üniform ısı transferini olumlu etkilediği söylenebilir.

Çizelge 5.11. DDHJ için farklı toplam hacimsel debilerde SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

H/D	SM		S	
	$Q_t = 80$ (L/dk)	$Q_t = 60$ (L/dk)	$Q_t = 80$ (L/dk)	$Q_t = 60$ (L/dk)
0,8	11,09	9,10	11,04	9,18
1,6	10,11	8,36	10,50	8,69
2,4	9,71	7,68	9,83	7,93
3,2	9,05	7,33	9,29	7,44

Şekil 5.21'de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasının (P2), farklı hacimsel debi oranları (Q^*) ile farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki boyutsuz radyal mesafe boyunca (r^*) yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımı gösterilmiştir. Toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutulmuştur. Şekil 5.21'de SM durumu içi boş sembollerle S durumu ise içi dolu sembollerle gösterilmiştir. Engelleyici plakanın ısınmış çarpan jeti hapsedmesi ve çarpan jetin ortamdan hızlıca uzaklaşmak için yeterli kaçış alanı bulamamasına bağlı olarak S ile SM durumlarında meydana gelen Nu_r dağılımlarının arasındaki farkın boyutsuz lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,8$ 'de diğer H/D 'lere göre büyük olduğu görülmüştür. $H/D = 1,6$ 'dan sonra engelleyici plakanın bu etkisi tüm debi oranlarında ortadan kalkmıştır. Bu durumun neticesi olarak her bir hacimsel debi oranının ($Q^* = 0,823$ hariç) SM ve S durumlarındaki Nu_r dağılımları üst üste gelmiştir. Yüksek debi oranında ($Q^* = 0,823$) SM ve S durumlarındaki Nu_r dağılımının $H/D = 1,6$ 'dan 3,2'ye kadar üst üste gelmemesi engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak durgun akışkanın S durumunda SM durumuna göre daha az sürüklenmesiyle açıklanabilir. Çarpan jete daha az durgun ortam

akışkanın dahil edilmesi SM durumuna göre S durumundaki ısı transferinin düşüklüğüne sebep olduğu söylenebilir.



Şekil 5.21. DDHJ ile P2'nin farklı hacimsel debi oranlarında SM ve S durumları için Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$

Yüksek debi oranı $Q^* = 0,823$ 'ün SM ve S durumlarındaki Nu_r farkının $H/D = 0,8$ 'den 1,6'ya artarken yaklaşık olarak %8,6'dan %4,8'e azaldığı, fakat $H/D = 1,6$ 'dan sonra bu farkın arttığı görülmüştür. Bu fark yaklaşık olarak $H/D = 1,6$ 'dan 3,2'ye %4,8'den %14'e kadar artmıştır. Bu durum artan H/D ile helisel jetlerden yüksek debi oranına bağlı olarak çıkan yüksek hızlı jetlerin, diğer debi oranlarına göre daha fazla etrafa yayılmaları ve daha fazla aksenal momentum düşüşüne maruz kalmalarıyla açıklanabilir.

Diğer taraftan $Q^* = 0,823$ 'teki Nu_r dağılımının $Q^* = 0,588$ 'den, $H/D = 1,6$ 'ya kadar yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum $Q^* = 0,823$ 'ün, $H/D = 1,6$ 'ya kadar çarpma plakası üzerindeki karışımı artırarak ısı transferini artırmasıyla ilişkilendirilebilir.

Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jet (DDHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasının (P2) farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) ve hacimsel debi oranları (Q^*) dikkate alınarak sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumundaki üniform ısı transferi (Ψ) değerleri yüzde olarak Çizelge 5.12'de verilmiştir. Isı transferi üniformluğu ısı transferinin en yüksek olduğu durma noktasındaki ($r^* = 0$) Nu ile ısı transferinin en düşük olduğu radyal mesafedeki ($r^* = 2$) Nu 'nun değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Sonuçlar H/D 'nin artmasıyla plaka üzerindeki ısı transferi sapmasının hem SM hem de S durumu için azaldığını göstermiştir. H/D 'deki artışın üniform ısı transferini çalışılan lüle-plaka mesafesi aralığında olumlu etkilediği söylenebilir. Diğer taraftan H/D sabit iken, Q^* 'ın artması üniform ısı transferini hem SM hem de S durumunda artırmıştır. En iyi üniform ısı transferi SM durumunda %3,03 olarak $Q^* = 0,823$ 'te $H/D = 3,2$ için meydana geldiği görülmüştür.

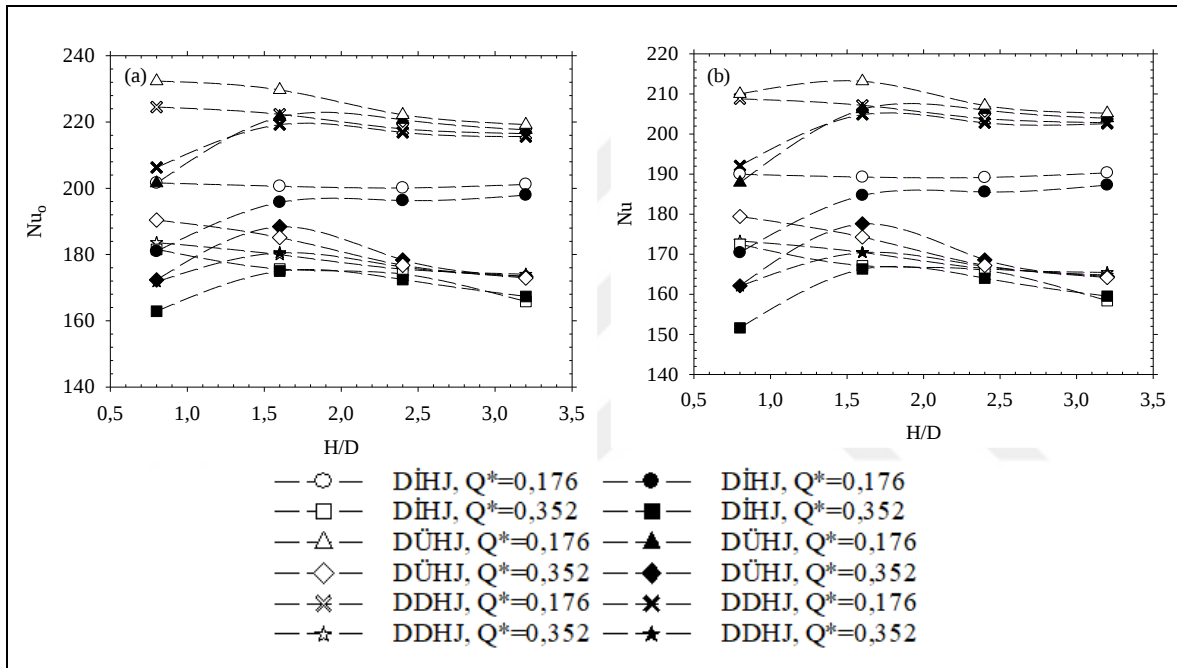
Çizelge 5.12. DDHJ'nin farklı debi oranlarında SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

SM					S			
H/D	Q^*							
	0,176	0,352	0,588	0,823	0,176	0,352	0,588	0,823
0,8	15,49	12,68	11,43	11,65	14,73	12,43	10,67	10,82
1,6	15,34	12,10	9,63	7,95	14,75	12,80	9,54	7,53
2,4	14,62	12,00	8,43	5,35	14,61	12,31	8,37	5,21
3,2	14,39	11,71	7,73	3,03	13,95	11,90	7,53	4,08

5.2.6. Kanatçık boyları 2 mm olan plakada eş eksenli dairesel ve helisel lülelerin ısı transferi üzerine etkilerinin karşılaştırılması

Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ), üçlü helisel jetler (DÜHJ), dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında farklı boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ve hacimsel debi oranlarındaki (Q^*) ısı transferlerinin karşılaştırılması Şekil 5.22'de gösterilmiştir. Karşılaştırma toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit iken hacimsel debi oranları $Q^* = 0,176$ ve 0,352 için yapılmıştır. Şekil 5.22(a)

ve (b)'de sırasıyla durma noktası Nusselt sayısı (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) verilmiştir. Dönme yoğunluğunu artıran helisel jetlerin sayısının ısı transferi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Aynı debi oranlarında DÜHJ'nin DDHJ'den ısı transferinin hem SM hem S durumunda $H/D \leq 1,6$ aralığı için biraz daha iyi olduğu görülmüştür. Fakat $H/D = 1,6$ 'dan sonra ısı transferi büyüklüklerinin hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Bu $H/D = 1,6$ 'ya kadar DÜHJ'nin karışmayı diğer lülelere göre daha fazla artırarak ısı transferini geliştirmesiyle açıklanabilir. $H/D = 1,6$ 'dan sonra bu etkisini kaybettiği söylenebilir. DİHJ'nin DÜHJ ve DDHJ'ye göre ısı transferinin daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.22. DİHJ, DÜHJ ve DDHJ'nin P2'de farklı Q^* 'lar için ısı transferlerinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

Çizelge 5.13'te eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ), üçlü helisel jetler (DÜHJ), dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) farklı boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ve hacimsel debi oranları (Q^*) dikkate alınarak sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında üniform ısı transferinin (Ψ) karşılaştırılması yüzde olarak verilmiştir. Isı transferi üniformluğu, ısı transferinin en yüksek olduğu durma noktasındaki ($r^* = 0$) Nu ile ısı transferinin en düşük olduğu radyal mesafedeki ($r^* = 2$) Nu 'nun değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Her üç birleşik lülenin oluşturduğu üniform ısı transferinin genel olarak H/D 'nin artmasıyla hem SM hem de S durumunda iyileştiği söylenebilir. Ayrıca yine her üç birleşik lülenin H/D sabit iken artan Q^* 'la ısı transferi sapmasını azalttığı görülmüştür.

Çizelge 5.13. DİHJ, DÜHJ ve DDHJ'nin P2'deki üniform ısı transferlerinin (Ψ) değerleri

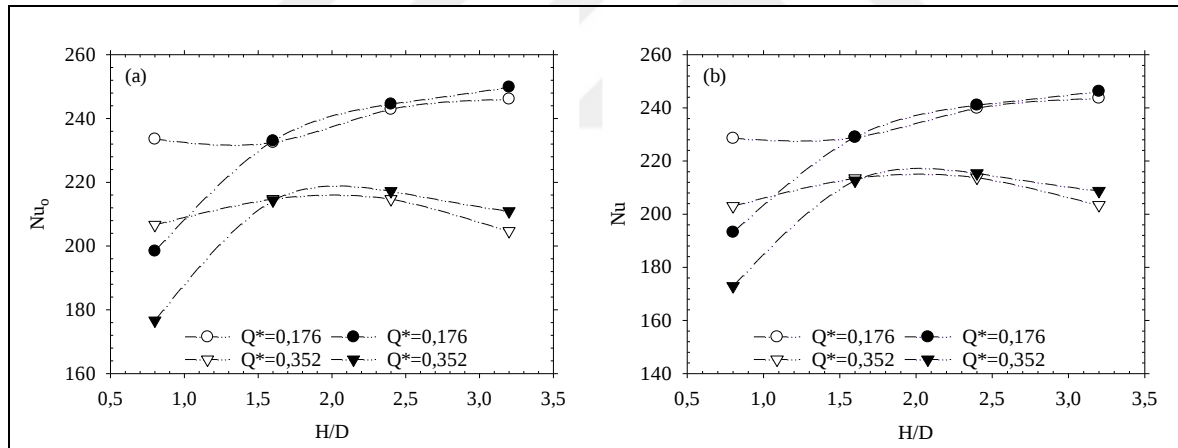
H/D	SM						S					
	$Q^* = 0,176$			$Q^* = 0,352$			$Q^* = 0,176$			$Q^* = 0,352$		
	DİHJ	DÜHJ	DDHJ	DİHJ	DÜHJ	DDHJ	DİHJ	DÜHJ	DDHJ	DİHJ	DÜHJ	DDHJ
0,8	13,68	15,79	15,49	12,3	12,75	12,68	13,12	14,08	14,73	11,67	12,37	12,43
1,6	13,28	14,92	15,34	11,54	12,46	12,10	13,13	14,60	14,75	11,65	12,40	12,80
2,4	12,86	14,22	14,62	10,83	11,49	12,00	12,77	14,16	14,61	11,09	11,56	12,31
3,2	12,71	13,53	14,39	10,65	10,81	11,71	12,66	13,42	13,95	10,9	10,80	11,90

DİHJ'nin üniform ısı transferinin düşük debi oranında ($Q^* \leq 0,352$) DÜHJ ve DDHJ'ye göre daha iyi olduğu görülmüştür. Çizelge 5.13 ve Şekil 5.22 beraber düşünüldüğünde DÜHJ, DİHJ'ye göre daha iyi transferi sergilerken, üniform ısı transferinin çalışılan aralıklarda DİHJ'ye göre daha zayıf kaldığı görülmüştür. Sonuçlara göre ısı transfer hızı ile üniform ısı transferi arasında çalışılan aralıklarda ters orantı olduğu söylenebilir. Diğer bir ifadeyle, artan helisel sayısının çalışılan parametreler için ($Q^* \leq 0,352$ ve $0,8 \leq H/D \leq 3,2$) ısı transferini artırırken üniform ısı transferini azalttığı görülmüştür. $Q^*=0,176$ için $0,8 \leq H/D \leq 1,6$ aralığında birleşik lülelerin tümünün S durumundaki ısı transferi üniformluğunun SM durumundan daha iyi olduğu görülmüştür. Bu durum geri yansımak isteyen jetin engelleyici plaka tarafından çarpma plakası üzerine geri çevrilerek yayılmaya zorlanmasıyla açıklanabilir. $1,6 < H/D \leq 3,2$ aralığında ise engelleyici plakanın artan H/D'ye bağlı olarak bu etkisini kaybetmesiyle, S ve SM durumlarının birbirlerine yakın ısı transferi üniformluğu sergilediği söylenebilir. En düşük ısı transferi sapmasının DİHJ'de SM durumu için $Q^* = 0,352$ 'de $H/D = 3,2$ için %10,65 olarak meydana geldiği görülmüştür.

5.2.7. Eş eksenli dairesel ve ikili helisel lülenin kanatçık boyları 6 mm olan plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması

Şekil 5.23'te eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasının (P6) ısı transferine olan etkileri sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için gösterilmiştir. DİHJ'nin toplam hacimsel debisi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutulmuştur. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,176$ ile 0,352 için durma noktasındaki Nusselt sayısının (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısının (Nu) boyutsuz lüle-plaka mesafesi H/D ile değişimi sırasıyla Şekil 5.23(a) ve (b)'de verilmiştir. Şekil 5.23'te içi boş semboller SM durumunu, içi dolu semboller ise S durumunu gösterir. Her iki debi oranında S durumu için $H/D = 0,8$ 'deki ısı transferi diğer H/D 'lerdeki ısı transferinden ve SM

durumundaki H/D 'lerden düşük olduğu görülmüştür. Bu durum engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak yüzeye çarpan ısınmış jetin ortamı terk etmek için yeterince alan bulamamasına ve engelleyici plakanın çarpma plakası üzerinde ısınmış akışkanı tutarak ısı transferini azaltmasıyla açıklanabilir. Ayrıca plaka üzerindeki artan kanatçık boyları da çarpan jetin ortamdan uzaklaşmasına ve basınç düşüşüne sebep olmasıyla S durumunda $H/D = 0,8$ 'deki ısı transferinin düşük olmasına katkıda bulunduğu söylenebilir. Diğer taraftan SM durumunun $H/D = 0,8$ 'de düz plakadaki ısı transferi değerlerinin diğer H/D 'lere göre en yüksek değerini aldığı görülürken, S durumundaki gibi yine burada da artan kanatçık boylarının ısı transferini olumsuz etkileyerek $H/D = 0,8$ 'de ısı transferinin düşmesine sebep olduğu söylenebilir. Literatürde engelleyici plakanın çarpma plakasına çok yakın konumlandırılmasıyla, devridaim yapan ısınmış havanın, lüleden püsküren jete sürüklenerek etkili bir şekilde ısı transferini azaltabileceği ifade edilmiştir [100]. Ayrıca $H/D=0,8$ 'de meydana gelen düşük ısı transferine kanatçıkların çarpan jetin ortam uzaklaşmasını zorlaştırılmasıyla da sebep olduğu söylenebilir.



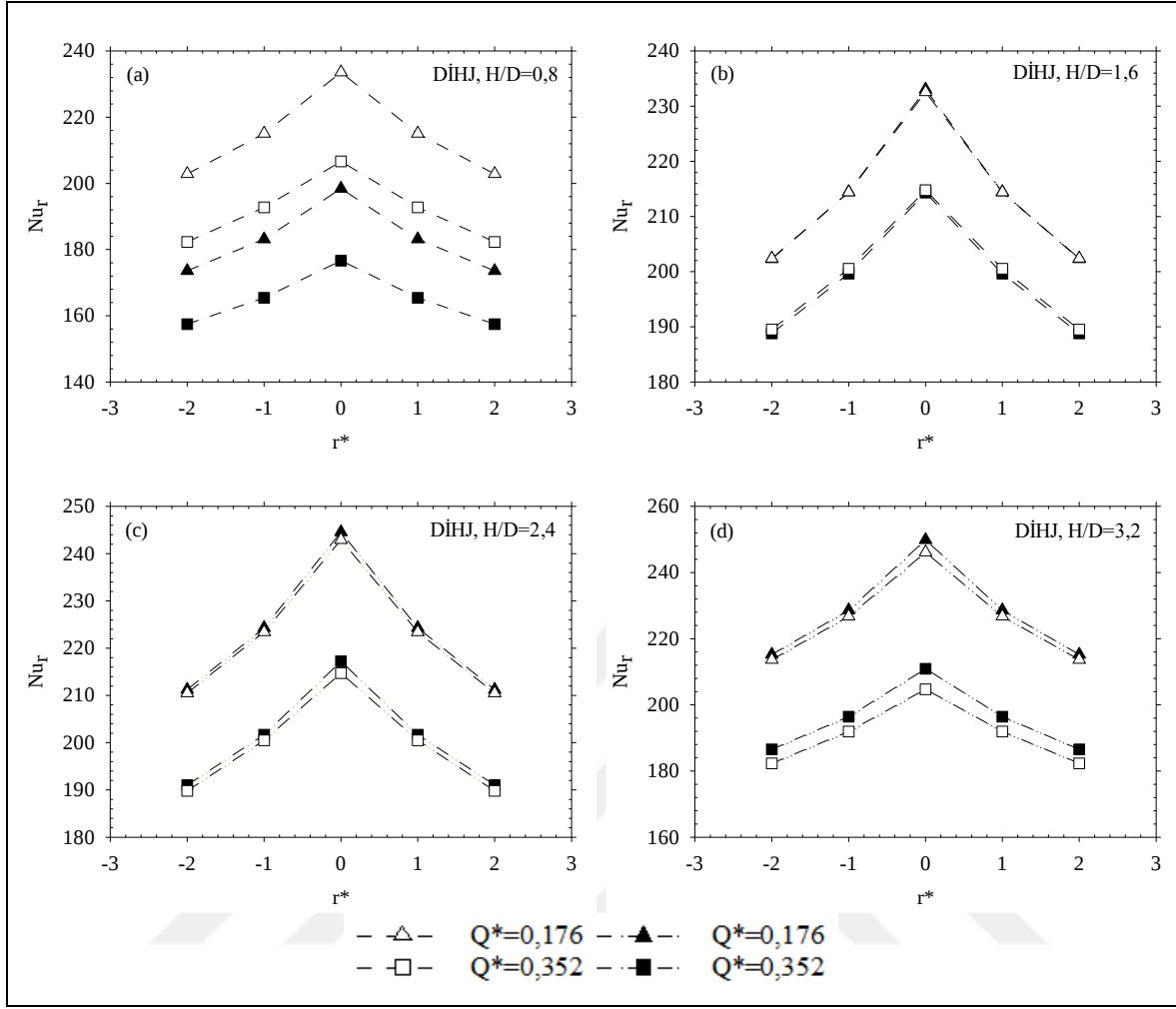
Şekil 5.23. DİHJ ile P6'nın farklı Q^* 'lar için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_0-H/D , (b) $Nu-H/D$

$Q^* = 0,176$ 'da H/D 'nin artmasıyla SM durumundaki ısı transferinin kanatçıkların olumsuz etkisinin ortadan kalkmasıyla arttığı ve $H/D = 3,2$ 'den sonra da belirli bir mesafeye kadar artacağı söylenebilir. Diğer taraftan $Q^* = 0,176$ 'nın S durumu da SM durumuyla benzerdir. Yani $H/D = 0,8$ 'den $3,2$ 'ye artmasıyla engelleyici plaka ve kanatçıkların ısı transferini azaltıcı etkisinin kaybolmaya başladığı söylenebilir.

S durumunda $Q^* = 0,352$ 'de de $H/D = 0,8$ 'den $1,6$ 'ya artmasıyla ısı transferi artarken, $1,6$ 'dan sonra ısı transferinin düşüşe geçmesi, artan hacimsel debi oranıyla jetin yayılması

ve eksenel momentumunun azalmasıyla açıklanabilir. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ 'deki ısı transferinin hem SM hem de S durumu için $Q^* = 0,176$ 'daki ısı transferinden daha düşük olduğu görülmüştür. Artan debi oranı jetin plaka üzerindeki yayılımını artırdığından dolayı hem Nu_o hem de Nu 'da düşüşe sebep olmuştur. Ayrıca durma noktasındaki Nusselt sayısının azalması, artan debi oranıyla birleşik lülenin dairesel kısmından gönderilen akışkanın miktarının azalmasına bağlanabilir. En yüksek Nu 'nun, $Q^* = 0,176$ 'da $H/D = 3,2$ için meydana geldiği ve değerinin de 249,8 olduğu görülmüştür.

Şekil 5.24'te eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasının (P6) hacimsel debi oranları $Q^* = 0,176$ ve $0,352$ için farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımı gösterilmiştir. $H/D = 0,8$ hariç $Q^* = 0,176$ 'da radyal mesafe boyunca meydana gelen Nu_r dağılımının $Q^* = 0,352$ 'de meydana gelenden hem SM hem S durumları için fazla olduğu görülmüştür. $H/D = 0,8$ 'de engelleyici plakanın ısınmış çarpan jeti hapsedmesi ve çarpan jetin ortamdan hızlıca uzaklaşması için gerekli kaçış alanını bulamamasına bağlı olarak S ile SM durumlarında meydana gelen Nu_r dağılımlarının arasındaki farkın diğer H/D 'lere göre büyük olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle $H/D = 0,8$ hariç, diğer H/D 'lerde Nu_r dağılımları SM ve S durumlarında hemen hemen aynı dağılımı göstermişlerdir.



Şekil 5.24. DİHJ ile P6'nın farklı Q^* 'larda Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$

Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasının (P6) farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) ve hacimsel debi oranları (Q^*) dikkate alınarak sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumundaki üniform ısı transferi (Ψ) değerleri yüzde olarak Çizelge 5.14'te verilmiştir. Isı transferi üniformluğu ısı transferinin en yüksek olduğu durma noktasındaki ($r^* = 0$) Nu ile ısı transferinin en düşük olduğu radyal mesafedeki ($r^* = 2$) Nu 'nun değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre $Q^* = 0,352$ 'nin tüm H/D 'lerdeki ısı transferi üniformluğu hem SM hem de S durumu için $Q^* = 0,176$ 'dan daha iyi olduğu görülmüştür. SM durumundaki en düşük ısı transferi sapmasının %10,93 olarak $Q^* = 0,352$ 'de $H/D = 3,2$ için meydana geldiği görülürken, S durumunda ise %10,86 olarak $Q^* = 0,352$ 'de $H/D = 0,8$ için meydana geldiği görülmüştür. S durumunda $H/D = 0,8$ 'de engelleyici plakanın her iki debi oranında çarpan jeti plaka üzerinde yaymaya zorladığı söylenebilir. Bu duruma bağlı olarak $H/D = 0,8$ 'deki

ısı transferi üniformluğunun diğer H/D 'lerden daha iyi olduğu görülmüştür. H/D 'nin 0,8'den itibaren artmasıyla engelleyici plakanın bu etkisinin zayıflamasına bağlı olarak ısı transferi sapmasının arttığı söylenebilir. S durumunda her iki debi oranı için ısı transferi sapmasındaki değişimin engelleyici plaka etkisi ve ısı transferi sapmasını azaltan H/D artışı arasındaki dengeyle meydana geldiği sonucuna varılabilir.

SM durumunda $Q^* = 0,176$ 'da H/D 'lerin değişimine bağlı olarak ısı transferi üniformluğu için belli bir artış veya azalışın tam olarak bahsetmek zordur. Bu durum lüle-plaka mesafesinin değişimine bağlı olarak jetin kanatçıklara çarpma yerlerinin değişmesi ve jetin kanatçıklar arasına olan nüfuz miktarının farklılık göstermesiyle açıklanabilir.

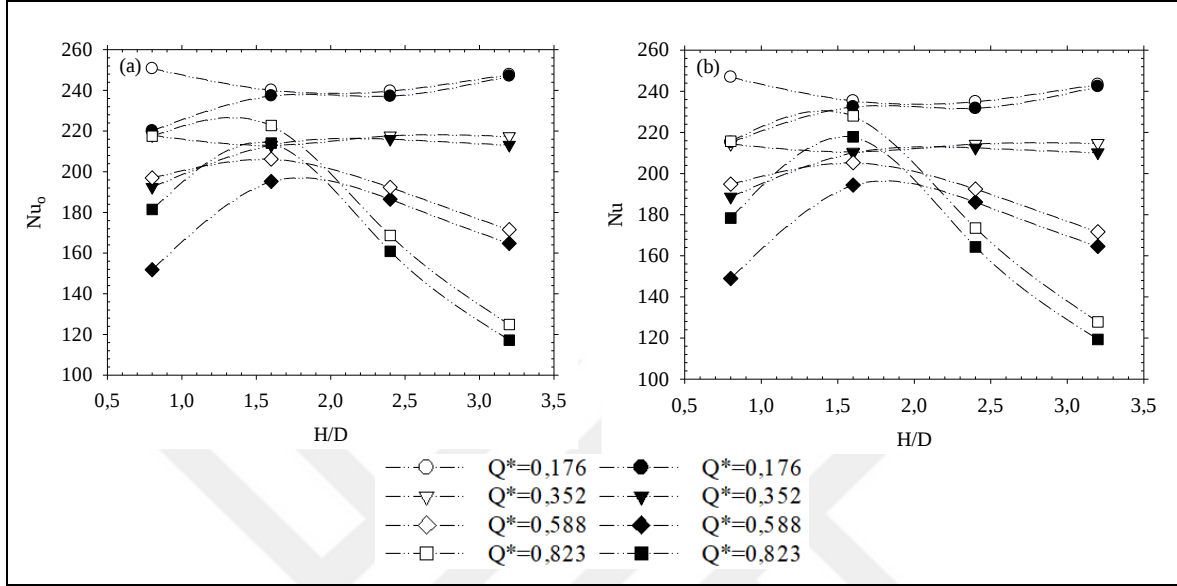
Çizelge 5.14. DİHJ için SM ve S durumlarında farklı H/D ve Q^* 'lara göre üniform ısı transferlerinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

SM			S	
H/D	$Q^* = 0,176$	$Q^* = 0,352$	$Q^* = 0,176$	$Q^* = 0,352$
0,8	13,14	11,79	12,52	10,86
1,6	13,00	11,77	13,19	11,91
2,4	13,35	11,60	13,63	12,05
3,2	13,18	10,93	13,85	11,55

5.2.8. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin kanatçık boyları 6 mm olan plakayla ısı transferi üzerine etkilerinin araştırılması

Şekil 5.25'te eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasının (P6) ısı transferine olan etkileri sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için gösterilmiştir. DDHJ'nin toplam hacimsel debisi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutulmuştur. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,176, 0,352, 0,588, 0,823$ için durma noktasındaki Nusselt sayısının (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısının (Nu) boyutsuz lüle-plaka mesafesi H/D ile değişimi sırasıyla Şekil 5.25(a) ve (b)'de verilmiştir. Literatürde eksenel yön boyunca girdap yoğunluğunun hızla azalması nedeniyle birleşik girdap (dönme) hareketinin ısı transferinden ziyade karışımı artırdığı belirtilmiştir [29]. Bununla birlikte artan girdap açısıyla girdabın bitişik geleneksel jetlerdeki ısı transferini yine de artırabileceği ifade edilmiştir. Bu durum da merkezi jetin yoğunluğunu artıran dönmedeki yük kayıplarıyla ilişkilendirilmiştir. Benzer durum hacimsel debi oranı $Q^* = 0,588$ 'in SM durumunda $H/D = 0,8$ 'de ve $0,823$ 'ün hem SM hem S durumları için $H/D = 0,8$ ile $1,6$ 'da ısı transferi hızlarının

kendilerinden düşük debi oranlarından fazla olmasıyla görülmüştür. Diğer taraftan yüksek debi oranlarının düşük mesafede çarpma plakası üzerindeki karışmayı artırarak ısı transferini geliştirdiği de söylenebilir.

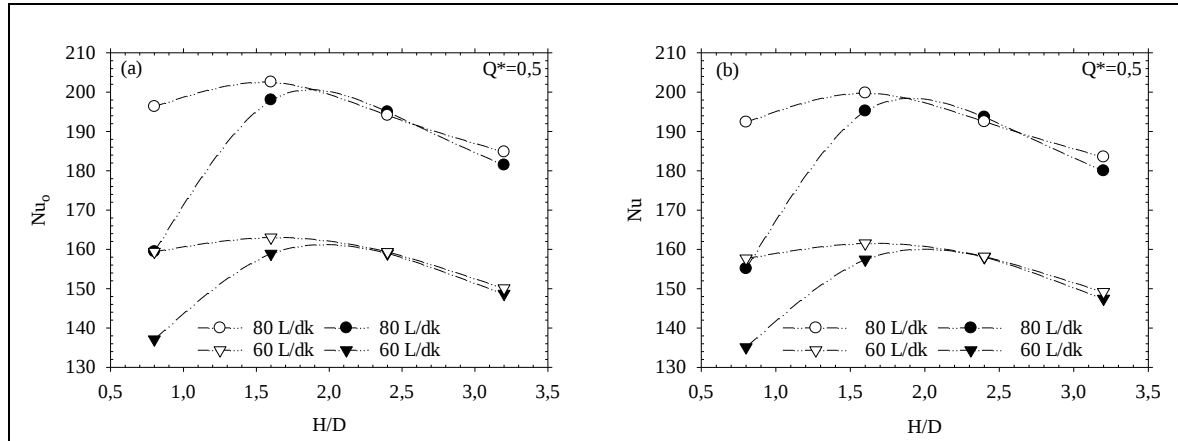


Şekil 5.25. DDHJ ile P6'nın farklı Q^* 'lar için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

$Q^* = 0,588$ ve $0,828$ 'de lüle-plaka mesafesinin $1,6$ 'dan itibaren artmasıyla eksenel momentumun azalmasına bağlı olarak diğer debi oranlarına göre Nu_o ve Nu 'nun düştüğü söylenebilir. Bu durum artan H/D ile ısı transferini azaltıcı etki yapan engelleyici plaka ve kanatçık boylarının etkisinin azalmasına rağmen, bunlar üzerine ısı transferini düşürücü etki yapan jetin eksenel momentumunun azalmasının daha baskın olmasıyla açıklanabilir.

$Q^* = 0,176$ ve $0,352$ 'nin ayrı ayrı SM ve S durumlarının ısı transferlerinin $H/D = 1,6, 2,4, 3,2$ 'de hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür. Bu durum artan H/D ile engelleyici plaka ve kanatçıkların ısı transferini düşüren etkilerinin azalması ile eksenel momentumun azalmasına bağlı olarak ortaya çıkan bir ısı transferi dengesinin sonucu olduğu söylenebilir. $Q^* = 0,588$ ve $0,823$ 'te $1,6 \leq H/D \leq 3,2$ lüle-plaka mesafesi aralığında SM durumundaki ısı transferinin S durumundakinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durum engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak durgun akışkanın S durumunda SM durumuna göre daha az sürüklenerek jete dahil edilmesiyle açıklanabilir. Yani SM durumuna göre çarpan jete daha az durgun ortam akışkanın dahil edilmesi S durumundaki ısı transferinin düşüklüğüne neden olduğu söylenebilir.

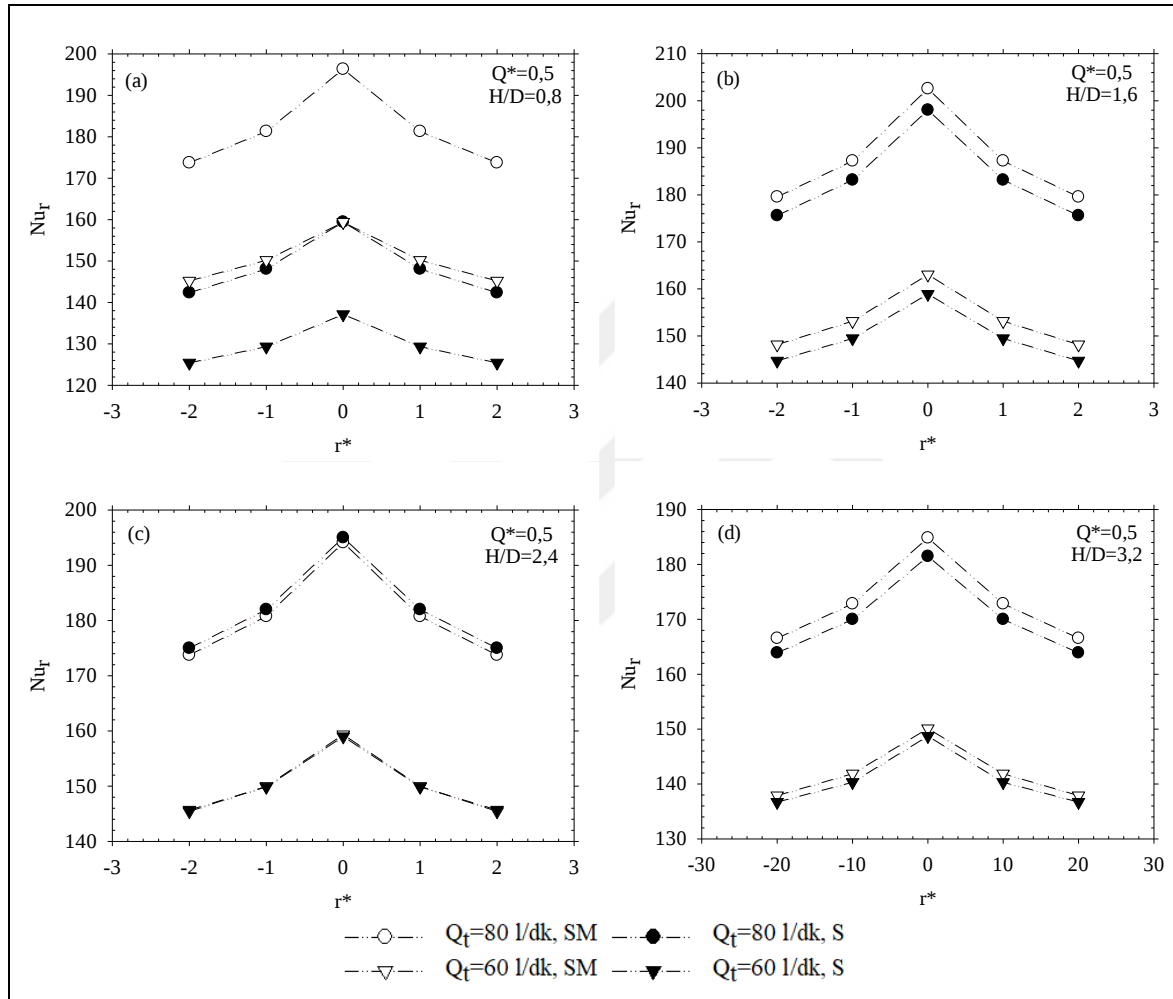
Şekil 5.26’da eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin sabit hacimsel debi oranında ($Q^* = 0,5$) farklı toplam hacimsel debiler (Q_t) ve boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakası (P6) ile ısı transferine etkileri verilmiştir. Şekil 5.26(a) ve (b) sırasıyla durma noktası Nusselt sayısını (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısını (Nu) göstermektedir. Şekil 5.26’da içi boş semboller sınırlandırılmamış jet (SM) durumunu, içi dolu semboller ise sınırlandırılmış jet (S) durumunu göstermektedir. Toplam hacimsel debinin artması hem SM hem de S durumunda her iki Nusselt sayısını da artırmıştır. $H/D = 0,8$ ’de SM durumundaki ısı transferi hızı, S durumuna göre daha yüksektir. Bu durum engelleyici plaka ve kanatçıkların çarpan jetin kaçış alanını kısıtlaması ve de engelleyici plaka ve kanatçıklar tarafından ısınan jetin hapsedilmesiyle açıklanabilir. Toplam hacimsel debi $Q_t = 80$ L/dk’da düşük lüle-plaka mesafesinde ($H/D = 0,8$) SM ve S durumları arasındaki ısı transferi farkının, $Q_t = 60$ L/dk’dakine göre daha fazla olduğu görülmüştür. S durumunda engelleyici plaka ve kanatçıkların düşük lüle-plaka mesafesinde ısı transferini düşürücü etkilerinin, yüksek toplam debilerde ($Q_t = 80$ L/dk) daha fazla kendilerini göstermeleriyle açıklanabilir. Ayrıca SM ve S durumları $H/D = 1,6$ ve sonrasında engelleyici plaka ve kanatçıkların ısı transferini düşürücü etkisinin ortadan kalkmasıyla hemen hemen aynı Nu_o ve Nu değerlerini göstermişlerdir.



Şekil 5.26. DDHJ ile P6’nın farklı toplam hacimsel debiler için ısı transferine olan etkileri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

Şekil 5.27’de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasının (P6) farklı toplam hacimsel debilerde (Q_t), hacimsel debi oranı $Q^* = 0,5$ ’te sabit tutularak çarpma plakası üzerindeki boyutsuz radyal mesafe (r^*) boyunca yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımı gösterilmiştir. Engelleyici plakanın ısınmış çarpan jeti hapsedmesi ve hem de çarpan jetin ortamdan hızlıca uzaklaşmasına kanatçıklarla birlikte

engel olmasına bağılı olarak S ile SM durumlarında meydana gelen Nu_r dağılımlarının arasındaki farkın boyutsuz lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,8$ 'de diğer H/D 'lere göre büyük olduğu söylenebilir. $H/D = 0,8$ 'den sonra bu etkilerin azalmasıyla her bir toplam hacimsel debinin, SM ve S durumlarındaki Nu_r dağılımlarının birbirlerine yaklaştığı görülmüştür. H/D sabit iken toplam hacimsel debinin azalması Nu_r 'nin azalmasına neden olmuştur.



Şekil 5.27. DDHJ ile P6'nın farklı toplam hacimsel debilerde sabit hacimsel debi oranı $Q^* = 0,5$ için Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$

Çizelge 5.15'te eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasının (P6), farklı toplam hacimsel debiler (Q_t) ile farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) için boyutsuz radyal mesafe (r^*) boyunca meydana getirdikleri üniform ısı transferi (Ψ) değerleri yüzde olarak sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için verilmiştir. Hacimsel debi oranı $Q^*=0,5$ 'te sabit tutulmuştur. Artan H/D ile üniform ısı transferi genel olarak hem SM hem de S durumları

için iyileştiği söylenebilir. SM durumunda $Q_t = 80$ L/dk için $H/D = 0,8$ 'de meydana gelen ısı transferi sapması $H/D = 1,6$ 'dan daha büyüktür. Bu durum çarpma plakasına yüksek hızla çarpan jetin geri yansıtılmasından kaynaklı olabilir. S durumunda ise $H/D = 0,8$ 'de meydana gelen ısı transferi sapması $H/D = 1,6$ 'da meydana gelenden daha düşüktür. Bu durum engelleyici plakanın geri yansıyan jeti çarpma plakasına doğru geri yönlendirmesiyle açıklanabilir. Literatürde de engelleyici plakanın çarpma plakasından yansıyan akışı geri yönlendirebileceği belirtilmiştir [13].

Çizelge 5.15. DDHJ ve P6'nın farklı Q_t 'lerde SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferlerinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

SM			S	
H/D	$Q_t = 80$ (L/dk)	$Q_t = 60$ (L/dk)	$Q_t = 80$ (L/dk)	$Q_t = 60$ (L/dk)
0,8	11,51	8,91	10,71	8,52
1,6	11,35	9,11	11,33	8,92
2,4	10,49	8,72	10,26	8,36
3,2	9,88	8,13	9,69	8,07

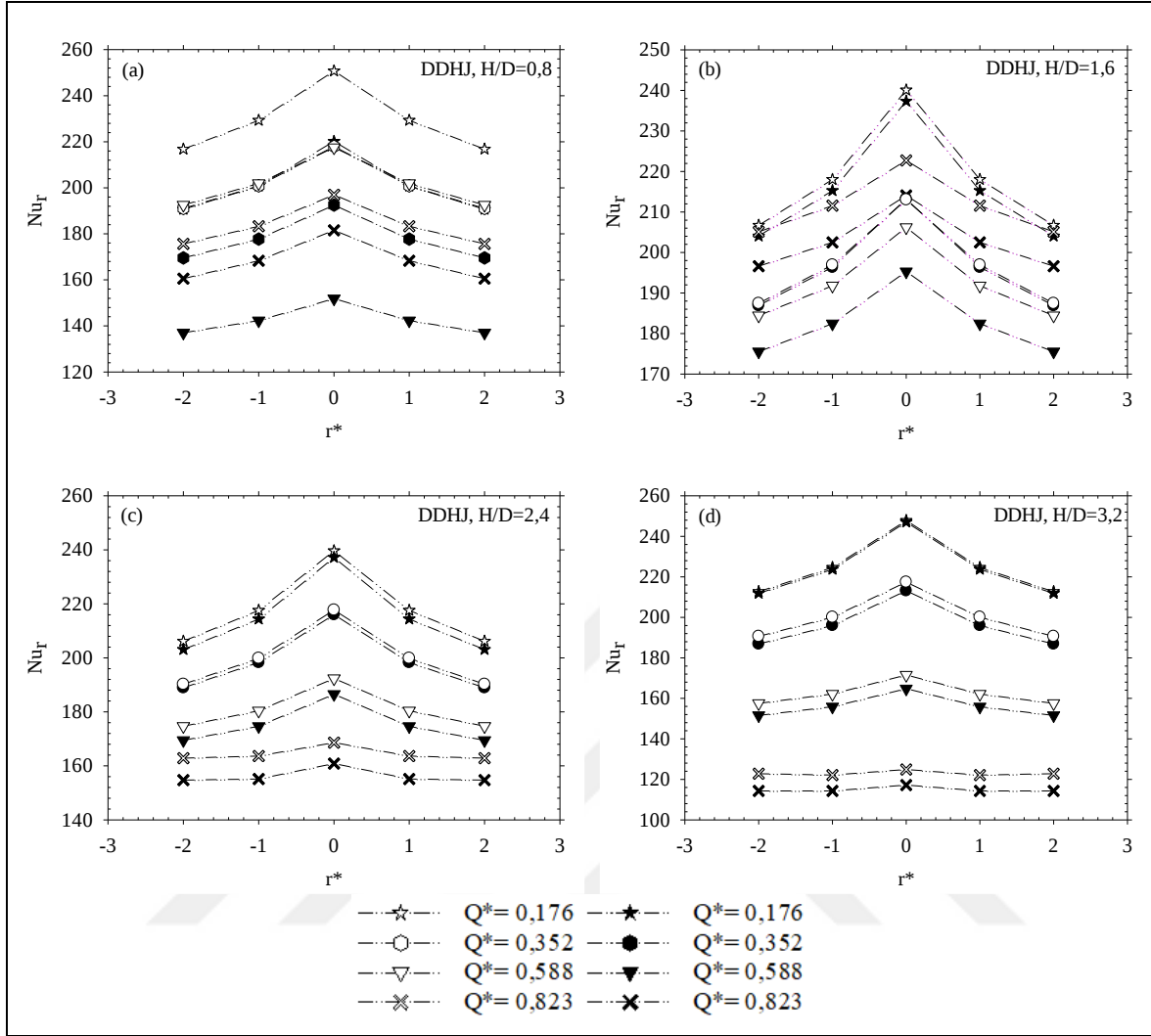
SM durumunda $Q_t = 60$ L/dk için $H/D = 0,8$ 'de jet hızının nispeten $Q_t = 80$ L/dk'ya göre düşük olmasından dolayı jetin çarpma plakası üzerinden geri yansımalarının az olduğu söylenebilir. Bu durumun sonucu olarak yani jetin kanatçıklar arasına daha iyi nüfuz etmesiyle $H/D = 0,8$ 'in $1,6$ 'dan daha üniform ısı transferi gösterdiği düşünülmektedir. Hem SM hem S durumlarında $H/D = 1,6$ 'da çarpan jetin kanatçıklar arasına tam girememesiyle $H/D = 1,6$ 'da ısı transferi sapmasının yüksek olduğu söylenebilir. H/D 'nin artmasıyla jetin çarpma plakası üzerinde yayılmasına bağlı olarak ısı transferi sapmasının da düştüğü söylenebilir.

Toplam hacimsel debi $Q_t = 80$ L/dk'da meydana gelen ısı transferi sapmasının hem SM hem S durumunda $Q_t = 60$ L/dk'da meydana gelen ısı transferi sapmasından daha fazla olduğu görülmüştür. Artan toplam hacimsel debinin ısı transferi hızını iyileştirmesine rağmen ısı transferi sapmasını artırdığı görülmüştür. Bu durumun bir sebebi, yüksek Q_t 'de çarpan jetin çarpma plakası üzerinden düşük Q_t 'ye göre daha fazla geri yansıtılmasıyla açıklanabilir. Bir diğer neden olarak, yüksek Q_t 'de birleşik lülenin merkezindeki dairesel kısımdan çıkan jetin eksenel momentumunun helisel kısımlardan çıkan jetlerin eksenel momentumuna göre daha fazla olmasıyla açıklanabilir. Hem yüksek ısı transferi hem de üniform ısı transferi için

yüksek toplam debiler yüksek lüle-plaka mesafelerinde tercih edilebilir. En iyi üniform ısı transferinin $Q_t = 60$ L/dk'da $H/D = 3,2$ için S durumunda %8,07 olarak meydana geldiği görülmüştür. Sonuçlara göre toplam akış hızının azalmasıyla ve H/D 'nin artmasıyla üniform ısı transferinin olumlu etkileneceği söylenebilir. S durumunda $H/D = 0,8$ ' de engelleyici plakanın her iki toplam debide çarpan jeti plaka üzerinde yaymaya zorladığı söylenebilir. Bu duruma bağlı olarak $H/D = 0,8$ 'deki ısı transferi üniformluğunun diğer H/D 'lerden daha iyi olduğu görülmüştür. H/D 'nin 0,8'den itibaren artmasıyla engelleyici plakanın bu etkisinin zayıflamasına bağlı olarak ısı transferi sapmasının arttığı söylenebilir. Her iki toplam debi için S durumundaki ısı transferi sapması değişimin engelleyici plaka etkisi ve ısı transferi sapmasını azaltan H/D artışı arasındaki dengeyle meydana geldiği sonucuna varılabilir.

SM durumunda $Q_t = 60$ L/dk'da H/D 'nin 0,8'den itibaren artışına bağlı olarak ısı transferi üniformluğunda önce bir azalış daha sonra bir artış meydana geldiği görülmüştür. Bu durum lüle-plaka mesafesinin değişimine bağlı olarak jetin kanatçıklara çarpma yerlerinin değişmesi ve jetin kanatçıklar arasına olan nüfuz miktarının farklılık göstermesiyle açıklanabilir.

Şekil 5.28'de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasının (P6) farklı hacimsel debi oranları (Q^*) için farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımı boyutsuz radyal mesafe (r^*) boyunca gösterilmiştir. Toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutulmuştur. Şekil 5.28'de SM durumu içi boş sembollerle, S durumu ise içi dolu sembollerle gösterilmiştir. Engelleyici plakanın ısınmış çarpan jeti hapsedmesi ve kanatçıklarla birlikte çarpan jetin ortamdaki hızlıca uzaklaşmasına engel olmasıyla, S ile SM durumlarında meydana gelen Nu_r dağılımlarının arasındaki farkın boyutsuz lüle-plaka mesafesi $H/D = 0,8$ 'de diğer H/D 'lere göre büyük olduğu söylenebilir. Diğer bir ifadeyle bu durum S durumundaki ısı transferinin SM durumundan daha düşük olmasına sebep olmuştur. $H/D = 0,8$ 'den sonra bu etkilerin azalmasıyla, tüm hacimsel debi oranlarının SM ve S durumlarındaki Nu_r dağılımlarının birbirlerine yaklaştığı görülmüştür. $0 \leq r^* \leq 1$ aralığında $1 \leq r^* \leq 2$ aralığına göre ısı transferinde daha keskin bir düşüş olduğu görülmüştür. Bu durum çarpan jetin kanatçıklar arasına tam olarak girememesiyle açıklanabilir. Artan Q^* ve H/D ile genel olarak bu durumun ortadan kalktığı söylenebilir. Ayrıca artan Q^* ve H/D ile Nu_r dağılımlarının üniformluğunun arttığı görülmüştür.



Şekil 5.28. DDHJ ile P6'nın farklı hacimsel debi oranlarında SM ve S durumları için Nu_r dağılımı (a) $H/D = 0,8$, (b) $H/D = 1,6$, (c) $H/D = 2,4$, (d) $H/D = 3,2$

Çizelge 5.16'da eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasının (P6), farklı hacimsel debi oranları (Q^*) ile farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) için üniform ısı transferi değerleri (Ψ) yüzde olarak sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için verilmiştir. Toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutulmuştur. $Q^* = 0,588$ ve $0,823$ hacimsel debi oranlarında artan H/D ile üniform ısı transferinin genel olarak hem SM hem de S durumları için iyileştiği görülmüştür. Bu durum artan mesafe ve hacimsel debi oranıyla jetin çarpma plakası üzerinde yayılma alanının artmasıyla açıklanabilir. Diğer taraftan hacimsel debi oranının artması da jetin yayılmasına sebep olan teğetsel hızı artırmıştır. En iyi üniform ısı transferi SM durumunda $H/D = 3,2$ 'de $Q^* = 0,823$ 'te %1,67 olarak görülmüştür. $Q^* = 0,823$ 'te SM durumunun üniform ısı transferinin S durumuna göre biraz daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun nedeni

S durumunda bulunan engelleyici plakanın çevredeki soğuk ortam akışkanının çarpan jete dahil edilmesini kısmen engellemesiyle açıklanabilir.

Çizelge 5.16. DDHJ ile P6'nın farklı Q^* 'larda SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferlerinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

SM					S			
H/D	Q^*							
	0,176	0,352	0,588	0,823	0,176	0,352	0,588	0,823
0,8	13,53	12,33	10,85	11,46	13,40	11,93	9,75	11,55
1,6	13,89	12,01	10,56	7,91	14,02	12,34	10,11	8,16
2,4	13,96	12,63	9,18	3,41	14,36	12,55	9,15	3,81
3,2	14,15	12,32	8,18	1,67	14,24	12,33	8,03	2,46

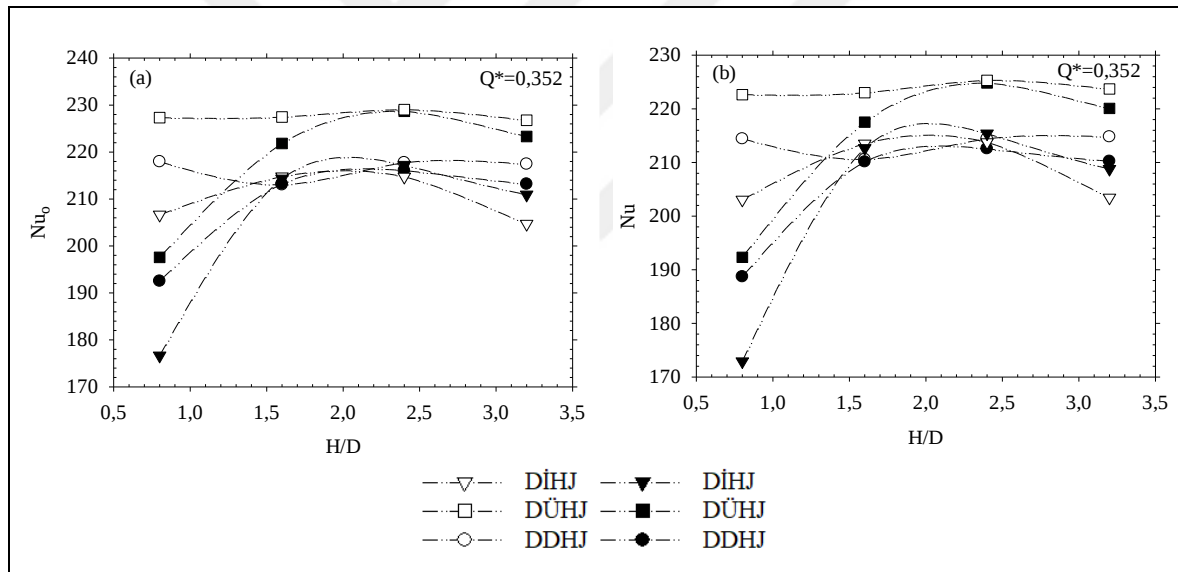
$0,176 \leq Q^* \leq 0,588$ aralığındaki hacimsel debi oranlarının $H/D = 0,8$ 'de SM durumlarında meydana gelen ısı transferi sapmalarının S durumlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu SM durumundaki jetin çarpma plakası üzerindeki düşük basınç alanına dağılmak istemesiyle açıklanabilir. Diğer bir ifadeyle jetin kanatçıklar arasındaki alan darlığına bağlı olarak artan basınca karşılık düşük basınç bölgesine yayılmak istemesidir. Ayrıca $H/D = 0,8$ 'de geri yansıyan jetin, S durumunda kanatçıklar arasına nüfuzunun engelleyici plaka tarafından sağlandığı sonucuna da varılabilir. Mesafenin artmasıyla genel olarak engelleyici plakanın bu etkisinin ortadan kalktığı görülmüştür. $Q^*=0,176, 0,352$ ve $0,588$ için engelleyici plakanın bu etkisinin ortadan kalkmasıyla $H/D=1,6$ 'da ısı transferi sapmasının arttığı söylenebilir. Diğer bir ifadeyle artan H/D ve Q^* 'ın ısı transferi sapmasını azaltan etkisinin görüldüğü lüle-plaka mesafesine kadar bu artış devam ve sonrasında azalmıştır.

Sonuçlara göre hacimsel debi oranı ve H/D 'nin artmasıyla üniform ısı transferinin olumlu etkileneceği söylenebilir.

5.2.9. Kanatçık boyları 6 mm olan plakada eş eksenli dairesel ve helisel lülelerin ısı transferi üzerine etkilerinin karşılaştırılması

Kanatçık boylarının 6 mm (P6) olması durumunda eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ), üçlü helisel jetler (DÜHJ), dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında farklı boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ve

hacimsel debi oranlarındaki (Q^*) ısı transferlerinin karşılaştırılması Şekil 5.29'da gösterilmiştir. Karşılaştırma toplam hacimsel debi $Q_t = 85 \text{ L/dk}$ 'da sabit tutularak, hacimsel debi oranı $Q^* = 0,176$ ve $0,352$ için yapılmıştır. Şekil 5.29(a) ve (b)'de sırasıyla durma noktası Nusselt sayısı (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) verilmiştir. Aynı hacimsel debi oranlarında DÜHJ'nin, DİHJ ve DDHJ'ye göre hem SM hem de S durumunda daha yüksek Nu_o ve Nu değerleri gösterdiği görülmüştür. Bu durum dönme yoğunluğunu artıran helisel jetlerin sayısının ısı transferi üzerinde etkili olduğunu gösterir. DÜHJ'nin çalışılan aralıkta ısı transferini artırması, plaka üzerinde DİHJ ve DDHJ'ye göre daha fazla karıştırma sağlayarak ısıl sınır tabakayı bozmasıyla açıklanabilir. Ayrıca DDHJ'nin ısı transferinin DÜHJ'den düşük olması, artan helisel jet sayısının belirli bir sayıya kadar ısı transferini artırabileceğini gösterir. Bu durum artan dönme yoğunluğunun eksenel momentumu azaltmasıyla açıklanabilir.



Şekil 5.29. DİHJ, DÜHJ ve DDHJ'nin P6'da ısı transferlerinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ), üçlü helisel jetler (DÜHJ), dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) farklı boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ve hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ dikkate alınarak sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak karşılaştırılması Çizelge 5.17'de verilmiştir. Isı transferi üniformluğu ısı transferinin en yüksek olduğu durma noktasındaki ($r^* = 0$) Nu ve ısı transferinin en düşük olduğu radyal mesafedeki ($r^* = 2$) Nu 'nun değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.17 ile Şekil 5.29 beraber düşünüldüğünde DÜHJ ve DDHJ'nin,

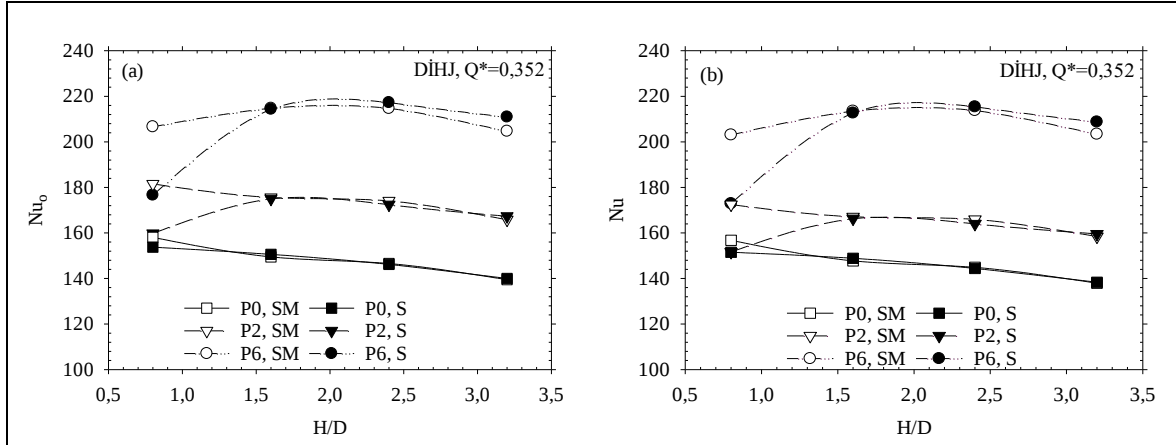
DİHJ'ye göre daha iyi ısı transferi gösterirlerken, üniform ısı transferinin çalışılan H/D ve Q^* 'da DİHJ'ye göre biraz daha zayıf kaldığı söylenebilir. En iyi üniform ısı transferinin DİHJ'de SM durumunda %10,93 olarak $H/D = 3,2$ için, S durumunda ise %10,86 olarak $H/D = 0,8$ 'de meydana geldiği görülmüştür. Her üç birleşik lülenin oluşturduğu üniform ısı transferinin genel olarak H/D 'nin artmasıyla hem SM hem de S durumunda iyileştiği söylenebilir.

Çizelge 5.17. DİHJ, DÜHJ ile DDHJ'nin P6'daki üniform ısı transferlerinin (Ψ) $Q^* = 0,352$ için yüzde olarak değerleri

H/D	SM			S		
	DİHJ	DÜHJ	DDHJ	DİHJ	DÜHJ	DDHJ
0,8	11,79	12,96	12,33	10,86	12,51	11,93
1,6	11,77	13,16	12,01	11,91	12,83	12,34
2,4	11,60	12,32	12,63	12,05	12,49	12,55
3,2	10,93	12,11	12,32	11,55	12,12	12,33

5.2.10. Eş eksenli dairesel ve helisel lülelerle tüm plakaların ısı transferi üzerine etkilerinin karşılaştırılması

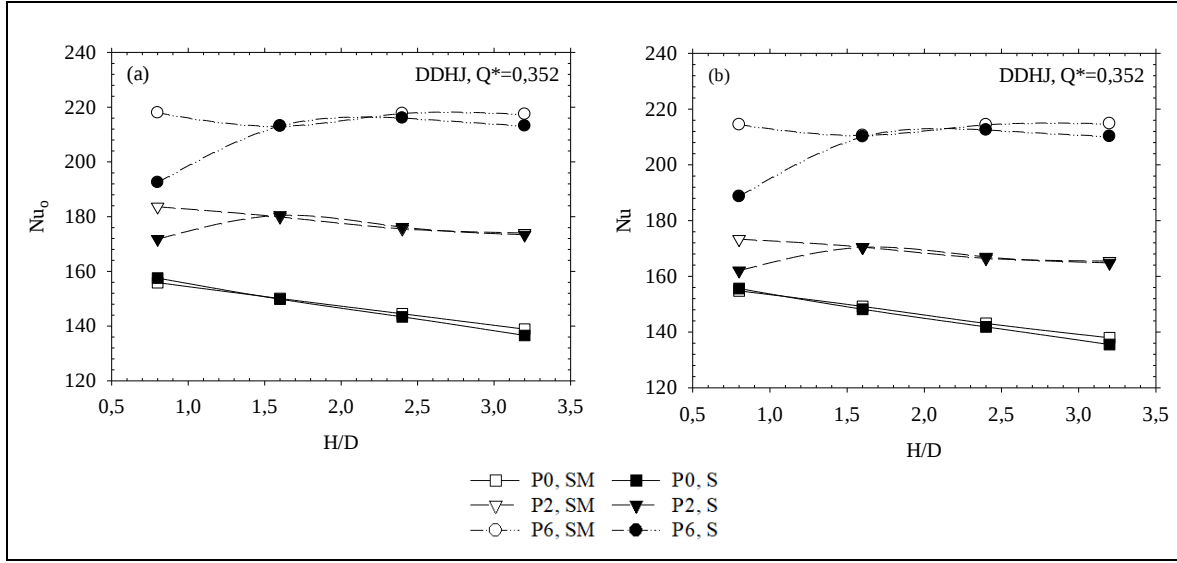
Şekil 5.30'da eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetlerin (DİHJ), düz çarpma plakası (P0) ve kanatçık boyları 2 mm (P2) ve 6 mm (P6) olan çarpma plakalarındaki ısı transferlerinin karşılaştırılması sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için verilmiştir. Karşılaştırma toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutularak yapılmıştır. Şekil 5.30(a) ve (b)'de sırasıyla durma noktası Nusselt sayısı (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) gösterilmiştir.



Şekil 5.30. DİHJ'nin P0, P2 ve P6'daki ısı transferlerinin karşılaştırılması (a) Nu_0-H/D , (b) $Nu-H/D$

En yüksek ısı transferi hem SM hem de S durumu için P6'da görülmüştür. Kanatçık boyunun artması ısı transferinde artışa sebep olmuştur. S durumunda bulunan engelleyici plaka $H/D = 0,8$ 'de çarpan jetin ortamdan kaçış alanını azaltması ve çarpma plakası üzerinde ısınmış jeti tutmasıyla tüm plakalarda ısı transferinin SM durumuna göre düşük olmasına neden olduğu söylenebilir. Kanatçık boylarının artmasıyla da $H/D = 0,8$ 'de SM ve S durumlarındaki ısı transferi hızlarının arasındaki farkın arttığı görülmüştür. Yine bu durum da artan kanatçık boylarının, ısınmış jetin ortamı terk etmesine daha fazla engel olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca artan kanatçık boylarıyla çarpan jet kanatçıklar arasında daha fazla basınç kaybına uğrar. Bu durum radyal yöndeki jet hızının azalmasına ve buna bağlı olarak da ısı transferinin düşmesine neden olabilir. Artan H/D ile SM ve S durumlarında meydana gelen ısı transferi düşüşü jetin eksenel momentumunun azalmasıyla açıklanabilir. $H/D = 3,2$ 'de P0'a göre P2 ve P6'da sırasıyla meydana gelen ısı transferi artışı yaklaşık olarak %15 ve %49'dur.

Şekil 5.31'de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ), düz çarpma plakası (P0) ve kanatçık boyları 2 mm (P2) ve 6 mm (P6) olan çarpma plakalarındaki ısı transferlerinin karşılaştırılması sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için gösterilmiştir. Karşılaştırma toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk'da sabit tutularak yapılmıştır. Şekil 5.31(a) ve (b)'de sırasıyla durma noktası Nusselt sayısı (Nu_0) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) gösterilmiştir.

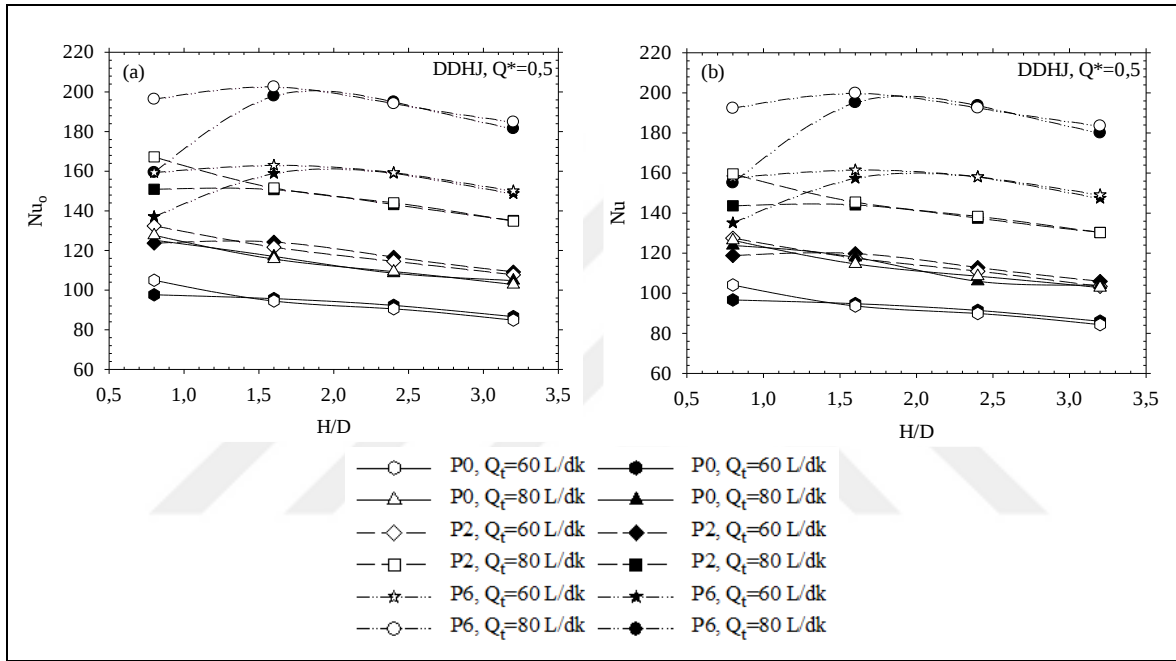


Şekil 5.31. DDHJ'nin P0, P2 ve P6'daki ısı transferlerinin karşılaştırılması, (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

En yüksek ısı transferi hem SM hem de S durumu için kanatçık boyları 6 mm (P6) olan çarpma plakasında görülmüştür. Kanatçık boyunun artması ısı transferinde artışa sebep olmuştur. S durumunda bulunan engelleyici plaka $H/D = 0,8$ 'de, çarpan jetin ortamdan kaçış alanını kanatçıklarla birlikte azaltmasıyla P2 ve P6'da ısı transferinin SM durumuna göre düşük olmasına neden olduğu söylenebilir. P0'da ise $H/D=0,8$ için SM ve S durumlarının Nu 'larının benzer değerleri aldığı görülmüştür. Bu, P0'da engelleyici plakanın ısı transferini düşürücü etkisinin zayıf olduğunu gösterir. Kanatçık boylarının artmasıyla da (2 mm'den 6 mm'ye), $H/D = 0,8$ 'de SM ve S durumlarındaki ısı transferi hızlarının arasındaki farkın arttığı görülmüştür. Yine bu durum da artan kanatçık boylarının ısınmış jetin ortamı terk etmesine daha fazla engel olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca artan kanatçık boylarıyla kanatçıklar arasında jetin daha fazla basınç düşüşüne maruz kalmasına bağlı olarak radyal yöndeki jet hızının azalmasıyla da ısı transferinin düştüğü söylenebilir.

Artan H/D ile SM ve S durumlarında meydana gelen ısı transferi düşüşü jetin eksenel momentumunun azalmasıyla açıklanabilir. $H/D = 3,2$ 'de P0'a göre P2 ve P6'da meydana gelen ısı transferi artışı yaklaşık olarak %20 ve %57'dir. Şekil 5.30 ve 5.31 beraber düşünüldüğünde DDHJ'nin P0'a göre P2 ve P6'da meydana getirdiği ısı transferinin DİHJ'nin P2 ve P6'da meydana getirdiği ısı transferinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum artan helisel sayısının $Q^*=0,352$ 'de ısı transferini iyileştirdiğini göstermektedir.

Şekil 5.32’de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) düz çarpma plakası (P0) ve kanatçık boyları 2 mm (P2) ve 6 mm (P6) olan çarpma plakalarındaki ısı transferlerinin karşılaştırılması sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında, farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) sabit hacimsel debi oranı $Q^* = 0,5$ için gösterilmiştir. Karşılaştırma farklı toplam hacimsel debiler ($Q_t = 80$ ve 60 L/dk) için yapılmıştır. Şekil 5.32(a) ve (b)’de sırasıyla durma noktası Nusselt sayısı (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) gösterilmiştir.



Şekil 5.32. DDHJ’nin P0, P2 ve P6’da farklı toplam hacimsel debilerdeki ısı transferleri (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

Toplam hacimsel debinin artmasıyla tüm çarpma plakalarındaki ısı transferinin hem SM hem S durumları için arttığı görülmüştür. En yüksek ısı transferi P6’da meydana gelmiştir. $H/D = 0,8$ ’de SM durumundaki ısı transferinin S durumuna göre daha yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum engelleyici plaka ve kanatçıkların çarpan jetin kaçış alanını kısıtlamaları ve de ısınan jeti hapsedmeleriyle açıklanabilir. Ayrıca $H/D = 0,8$ ’de görülen bu etkilerin $H/D = 1,6$ ve sonrasında azalmasıyla her bir toplam hacimsel debinin SM ve S durumları hemen hemen aynı Nu_o ve Nu değerlerini göstermiştir.



6. SAYISAL ÇALIŞMA SONUÇLARI

6.1. Dönen Çarpmalı Jetle İlgili Sonuçlar

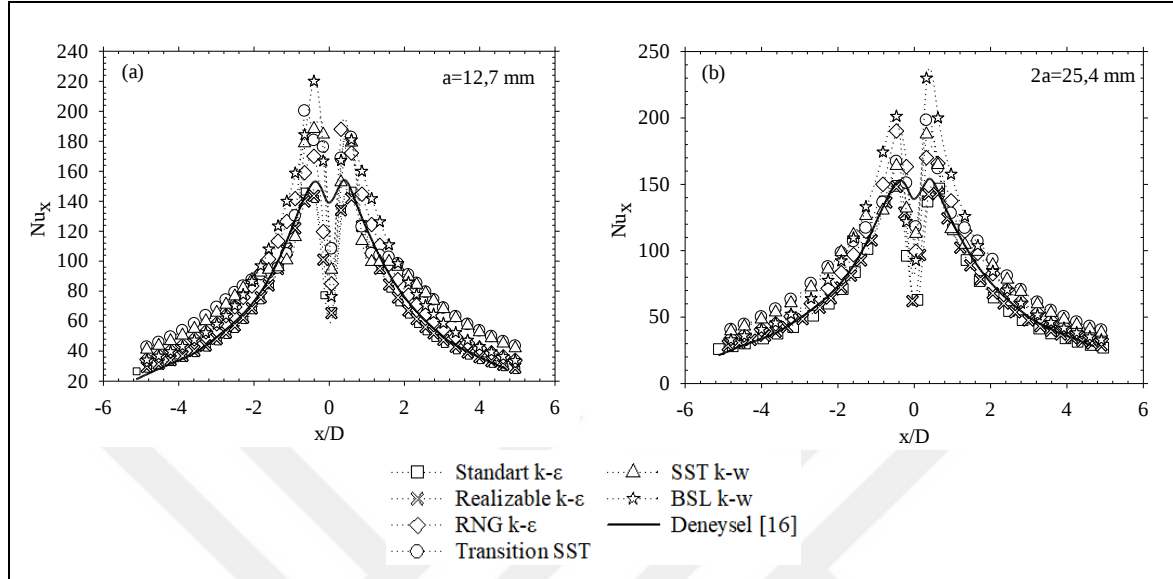
Bu bölümde deneysel çalışma öncesinde sayısal olarak yapılan dönen (girdap) çarpmalı jetin sonuçları verilmiştir. Çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanının yüksekliği literatürdeki deneysel sonuçlara göre belirlendikten sonra [16], Reynolds sayısı ($Re = 8\ 100$, $6\ 100$, $4\ 100$, $2\ 100$) ve düşük lüle-plaka mesafesi ($H/D = 1,00$, $0,75$, $0,50$, $0,25$) gibi parametrelerin akış alanı ve ısı transferi üzerine etkileri sunulmuştur.

6.1.1. Türbülans modelleri ve hesaplama alanı yüksekliklerinin literatürle karşılaştırılması

Şekil 6.1(a) ve (b)'de sırasıyla çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanı yüksekliklerinin $a = 12,7\text{ mm}$ ve $2a = 25,4\text{ mm}$ olduğu durumlardan elde edilen yerel Nusselt sayısının (Nu_x) deneysel sonuçlarla [16] karşılaştırılması gösterilmiştir. RNG $k-\epsilon$, geçiş (transition) SST, SST $k-\omega$ ve BSL $k-\omega$ türbülans modelleri her iki yükseklikte de farklı eğilimler sergilediği ve duvar jeti bölgesi boyunca ısı transferini doğru tahmin edemedikleri görülmüştür. Ayrıca bu türbülans modellerinin deneysel sonuçta görülen tepe noktasından önce ve sonra oluşan simetriyi yakalayamadıkları görülmüştür. Diğer türbülans modellerinin aksine gerçekleştirilebilir ve standart $k-\epsilon$ türbülans modellerinin, a ve $2a$ yükseklikleri için benzer eğilimin yanında, $x/D \leq -0,6$ ve $x/D \geq 0,6$ aralıklarında deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

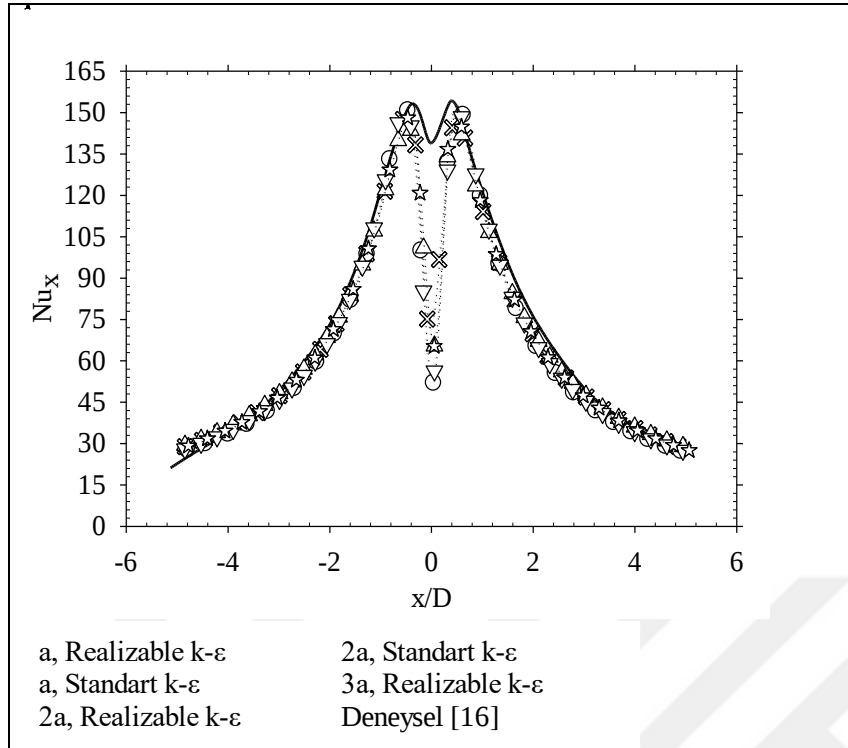
Literatürde türbülans modellerinin durma bölgesindeki ısı transferi ve akış dinamiklerini her zaman tam olarak tahmin edemediği belirtilmiştir [49, 66, 76, 124]. Durma bölgesinde türbülans modellerinin başarısızlığı akışkan hızının anlık olarak bu bölgede sıfır olması ile laminar rejim durumunun oluşmasına bağlanabilir. Sudipta ve vd. [125] dönen çarpmalı jetin sayısal modelini doğrularken, $r/D > 1$ mesafesinde deneysel verilerden önemli sapma gözlemlemişlerdir. Literatürdeki diğer çalışmalar bu tutarsızlıkları güçlü akış geçişlerine, yoğun akış dalgalanmalarına ve çarpma bölgesindeki akış sınırlarının yakalanmasındaki güçlüklerle bağlamışlardır [73, 90]. Dönen çarpmalı jetlerde durma bölgesindeki çözümü iyileştirmek için önerilen belli bir türbülans modelinin bulunmadığı söylenebilir. Bu nedenlerden dolayı mevcut çalışmada durma noktasının deneysel sonuçlarla tutarlılığı göz

önüne alınsa da çoğunlukla $x/D \leq -0,6$ ve $x/D \geq 0,6$ olduğu aralıklar deneysel sonuçlarla tutarlılıkta dikkate alınmıştır.



Şekil 6.1. Türbülans modellerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (a) a yüksekliği, (b) $2a$ yüksekliği

Şekil 6.2’de a , $2a$ ve $3a$ yüksekliklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 6.2’de görüldüğü gibi düşük lüle-plaka mesafelerinde çalışılan dönen jetlerin çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanı yüksekliğine ve türbülans modellerine karşı duyarlı olduğu görülmüştür. Yerel Nusselt sayısı göz önüne alındığında bu çalışmada gerçekleştirilebilir veya standart $k-\epsilon$ türbülans modellerinin kullanımının uygun olduğu görülmüştür. Ancak gerçekleştirilebilir $k-\epsilon$ modelinin $2a$ yüksekliğinde hem durma noktasını hem de duvar jetini, standart $k-\epsilon$ modelinden biraz daha iyi çözdüğü görülmüştür. Buna bağlı olarak mevcut çalışma gerçekleştirilebilir $k-\epsilon$ türbülans modeliyle yapılmıştır.



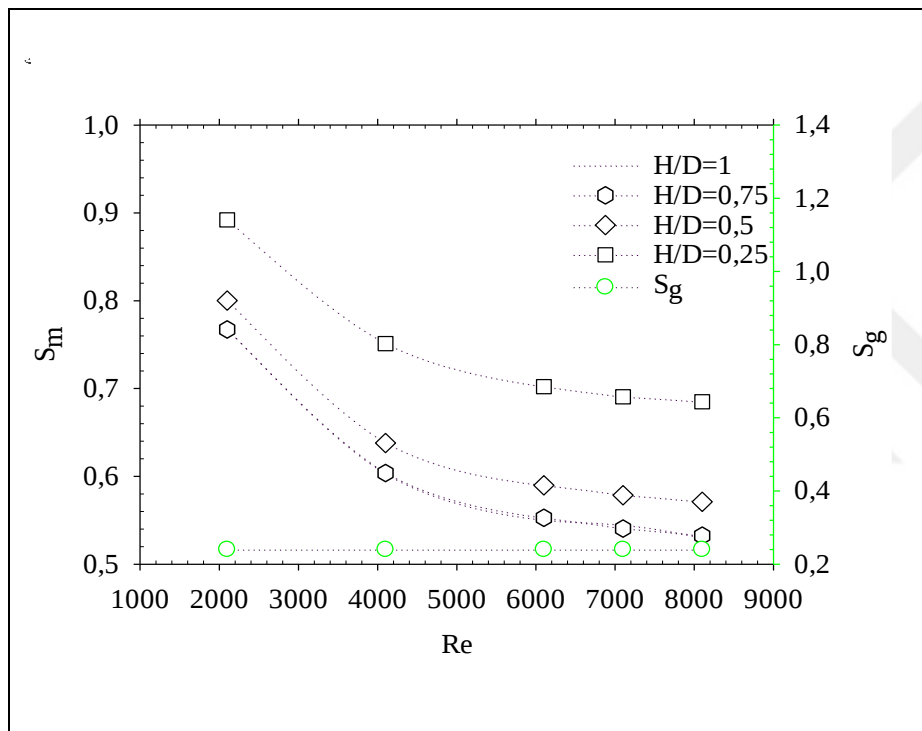
Şekil 6.2. a , $2a$ ve $3a$ hesaplama alanı yüksekliklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

$2a=25,4$ mm hesaplama alanı yüksekliğinin sayısal sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında yeterli olup olmadığını anlayabilmek için bir üçüncü yükseklik ($3a=38,1$ mm) daha çalışılmıştır. Çarpma plakası üzerine tanımlanan $3a$ hesaplama alanı yüksekliğinin gerçekleştirilebilir $k-\epsilon$ türbülans modeli ile çözümünün $2a$ yüksekliği ile aynı sonucu verdiği görülmüştür. Bu $2a$ yüksekliğinin yeterli olduğunu göstermiştir. Bu nedenle çalışmanın geri kalanına $2a$ yüksekliği ile devam edilmiştir.

6.1.2. Geometrik ve teorik girdap numarasının analizi

Reynolds sayısı (Re) ve boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H/D) ile geometrik girdap numarası (S_g) ve teorik girdap numarasının (S_m) değişimi Şekil 6.3'te verilmiştir. Girdap üreticinin geometrisi tüm Re ve H/D 'ler için aynı olduğundan geometrik girdap numarası $S_g = 0,24$ 'te sabittir. S_m 'nin, H/D sabit iken artan Re ile azaldığı görülmüştür. Benzer bir durum literatürde de mevcuttur [126]. Bu durum Re 'nin artmasıyla eksenel momentumun artmasının bir sonucu olabilir. Aynı Reynolds sayılarında S_m , $H/D = 1$ ve $0,75$ 'te hemen hemen aynı kalırken, $H/D = 0,75$ 'ten $0,25$ 'e azalırken arttığı görülmüştür. Bu durumun daha büyük mesafelere ($H/D = 0,75$ ve 1) kıyasla lüle çıkışındaki jetin çarpma plakasının etkisiyle daha fazla yayılmaya zorlanmasından kaynaklandığı söylenebilir. Aynı Re 'ler için lüle çıkışında

verilen teğetsel hız vektörleri de bu durumu destekler (Bkz. Şekil 6.8). Artan H/D ile çarpma plakasının lüle çıkışındaki teğetsel hız üzerine etkisinin azaldığı görülmüştür. Aynı Re 'lerde $H/D = 0,75$ ve 1 için aynı S_m değerleri meydana geldiği görülmüştür. Diğer mesafelere kıyasla $H/D = 0,25$ 'te, S_m 'nin dikkate değer bir artış gösterdiği görülür. Tüm H/D 'lerde $Re = 2 \cdot 100$ 'den $4 \cdot 100$ 'e artarken S_m 'nin azalma hızı, $Re = 4 \cdot 100$ 'den $8 \cdot 100$ 'e artarken ki durumdan daha büyük olduğu görülmüştür. $H/D = 1$ ve $0,75$ 'te artan Re ile S_m değeri S_g 'ye yaklaşma eğilimindedir. S_m 'deki artış lüle çıkışındaki teğetsel hızın eksenel hıza oranının arttığı bir göstergesidir.

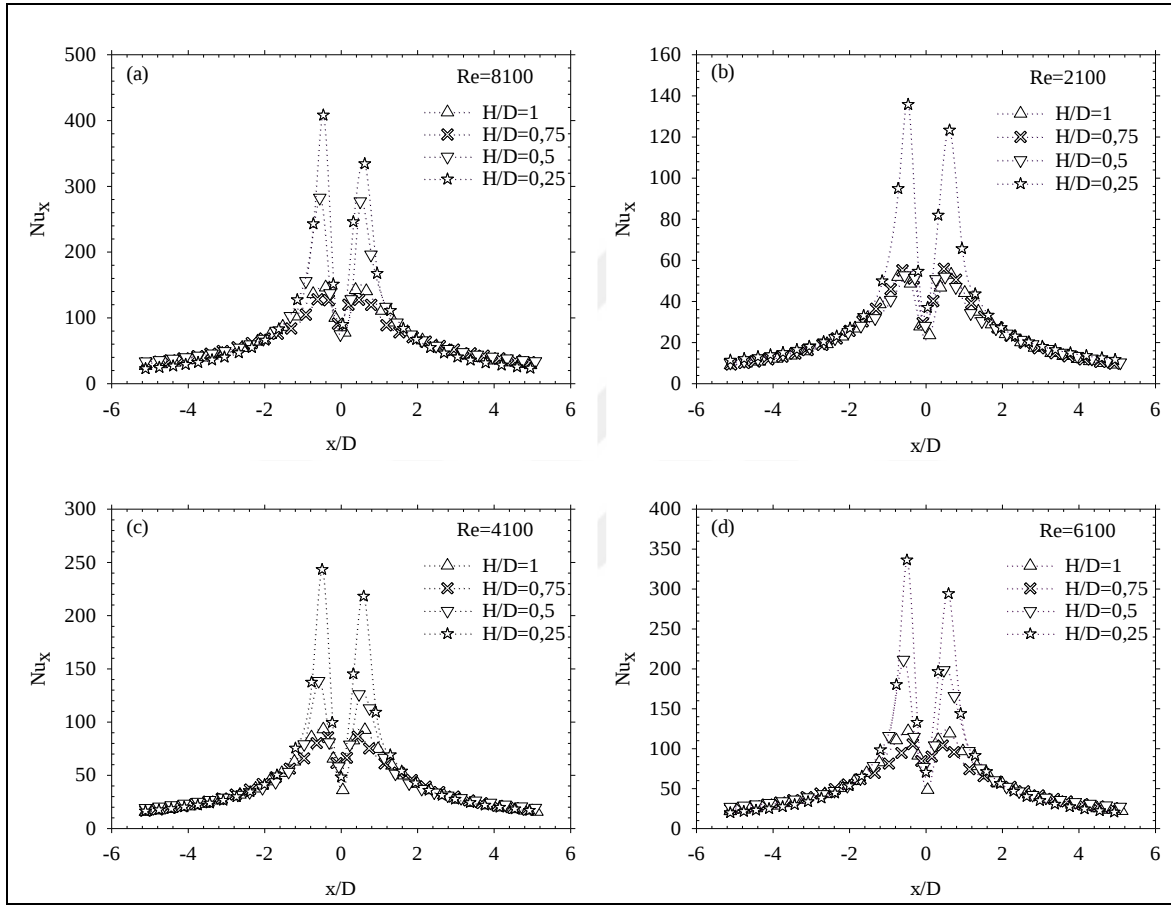


Şekil 6.3. Re ve H/D 'ye bağlı olarak S_m ve S_g 'nin değişimi

6.1.3. H/D 'nin Nu_x üzerine etkisi

Farklı H/D 'lerde çarpma plakası üzerindeki yerel Nusselt sayısının (Nu_x) x -ekseni boyunca değişimi Şekil 6.4'te verilmiştir. Şekil 6.4(a), (b), (c) ve (d)'de sırasıyla $Re = 8,1 \times 10^3$, $2,1 \times 10^3$, $4,1 \times 10^3$, $6,1 \times 10^3$ için boyutsuz x/D boyunca Nu_x dağılımı verilmiştir. Nu_x 'te eyer şeklinde bir dağılım gözlemlenmiştir. Dağılımın yaklaşık olarak durma noktasına göre simetrik olduğu görülmüştür. Eyer şeklinde Nu_x değeri yaklaşık durma noktasında en düşük değeri aldıktan sonra artan x mesafesiyle en yüksek değere ulaşır. Sonra duvar jeti bölgesinde gelişen ısı sınır tabakaya bağlı olarak Nu_x 'de monoton bir azalma başlar. Durma bölgesinde

meydana gelen devridaimler ısınmış akışkanın çarpma plakası üzerinden uzaklaşmasını zorlaştırır. Bu ise durma bölgesindeki yerel ısı transferini düşürerek eyer şeklinin oluşmasına neden olduğu söylenebilir. $Re = 8\ 100$ ile $2\ 100$ için tüm boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) durma noktasında ($x = 0$) en düşük Nu_x meydana gelmiştir. Literatürde durma bölgesinin yakınındaki ısı transferinin dönen jetler için devridaim bölgeleri tarafından karakterize edildiği belirtilmiştir [16, 19, 48].



Şekil 6.4. Farklı H/D 'lerde Nu_x 'in x/D boyunca değişimi (a) $Re = 8\ 100$, (b) $Re = 2\ 100$, (c) $Re = 4\ 100$, (d) $Re = 6\ 100$

Durma noktasında meydana gelen düşük ısı transferi girdap üreticinin geometrisiyle de ilişkilendirilebilir. Borudan akan hava öncelikle girdap üreticiye çarpar, bu durum jetin merkezindeki hızın sıfıra düşmesine neden olur. Daha sonra akışkan girdap üreticinin yuvalarından akmaya zorlanır. Hava yuvalardan çıkıp lüle içinde karışır. Bu durum jetin merkezindeki hızın dış kısımlardan daha düşük olmasına neden olduğu için durma noktasındaki ısı transferinin düşük olmasına yol açabilir.

$Re = 8\ 100$ 'de H/D 'nin artmasıyla Nu_x 'in azaldığı görülmüştür. Bu durum jetin yayılmasına bağlı olarak kinetik enerjisinin azalmasıyla açıklanmıştır [54]. Diğer taraftan $H/D = 0,25$ ve $0,50$ 'deki ısı transferinin diğer H/D 'lere göre dikkate değer derecede yüksek olduğu görülmüştür. Yani, $H/D = 1,00$ 'den $0,25$ ve $0,50$ 'ye değiştirilmesiyle Nu_x 'in tepe değerlerinin sırasıyla yaklaşık olarak %184 ve %91 arttığı görülmüştür. H/D 'nin azalmasıyla durma noktası ve tepe noktasındaki ısı transferlerinin birbirlerine göre sapmaları artmıştır. Bu durum düşük lüle-plaka mesafelerinde jetin merkez hızının gelişme için yeterli zaman bulamamasıyla açıklanabilir.

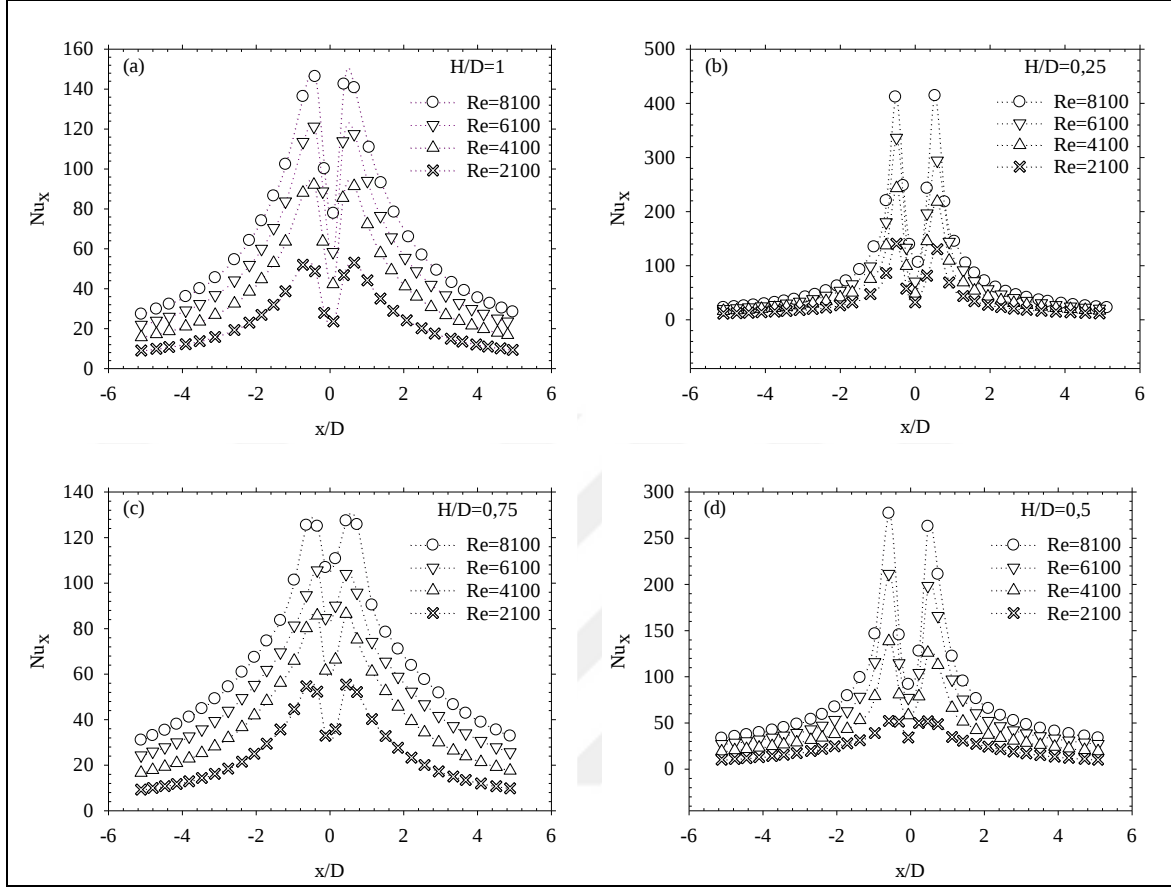
$Re = 2\ 100$ 'de, H/D değişiminin ısı transferi üzerine etkisini ($H/D = 0,25$ hariç) kaybettiği görülmüştür. $Re = 6\ 100$ ve $4\ 100$ için verilen sonuçlarda da durum benzerdir (Bkz. Şekil 6.4(c), (d)). Bu durum düşük lüle-plaka mesafelerinde çalışılan dönen çarpmalı jetlerde, yüksek H/D 'lerin ısı transferi üzerindeki etkisinin Re 'nin azalmasıyla azaldığını gösterir. Azalan Re ile $H/D = 0,25$ 'in ısı transferi üzerindeki etkisi devam ederken, diğerleri bu etkiyi kaybederek neredeyse aynı ısı transferini gerçekleştirdikleri görülmüştür. Ayrıca Reynolds sayısının azalmasıyla ısı transferinde de düşüş olmuştur. Nu_x için en yüksek tepe noktalarının $Re = 8\ 100$ 'de, $H/D = 0,25$ için meydana geldiği görülmüştür.

6.1.4. Re 'nin Nu_x üzerine etkisi

Reynolds sayılarının (Re) yerel Nusselt sayısı (Nu_x) dağılımına etkisi Şekil 6.5'te verilmiştir. Şekil 6.5(a), (b), (c) ve (d)'de sırasıyla $H/D = 1, 0,25, 0,75$, ve $0,5$ için Nu_x dağılımı gösterilmiştir. Şekil 6.5'te artan Re ile Nu_x 'in arttığı görülmüştür. Bu durum dönen çarpmalı jetin eksenel momentumunun artmasıyla açıklanabilir. Ayrıca artan Re ile artan x -yönündeki ısı transferi artmıştır. $H/D = 1,00$ 'de Nu_x için $x/D = 0,53$ 'te oluşan tepe noktasının Re arttıkça hemen hemen aynı yerde sabit kaldığı görülmüştür. $H/D = 0,25$ 'te ise tepe noktasının artan Re ile $x/D = 0,50$ 'de hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür. Sonuçlara göre tepe noktası konumunun Re 'den bağımsız olduğu ve azalan H/D ile de durma noktasına doğru kaydığı görülmüştür.

$H/D = 0,25$ 'te tüm Reynolds sayılarında oluşan tepe noktaları $H/D = 1,00$ 'le karşılaştırıldığında daha keskin olduğu görülmüştür. Bu keskinliğe geçişin $H/D = 0,75$ ve $H/D = 0,50$ 'de de kademeli olarak meydana geldiği görülmektedir (Bkz. Şekil 6.5(c) ve (d)).

Ayrıca durma noktasındaki Nu_x ile tepe değeri arasındaki sapma değeri Re 'nin artmasıyla artmıştır. Bu duruma benzer bir durum literatürde de mevcuttur [77].

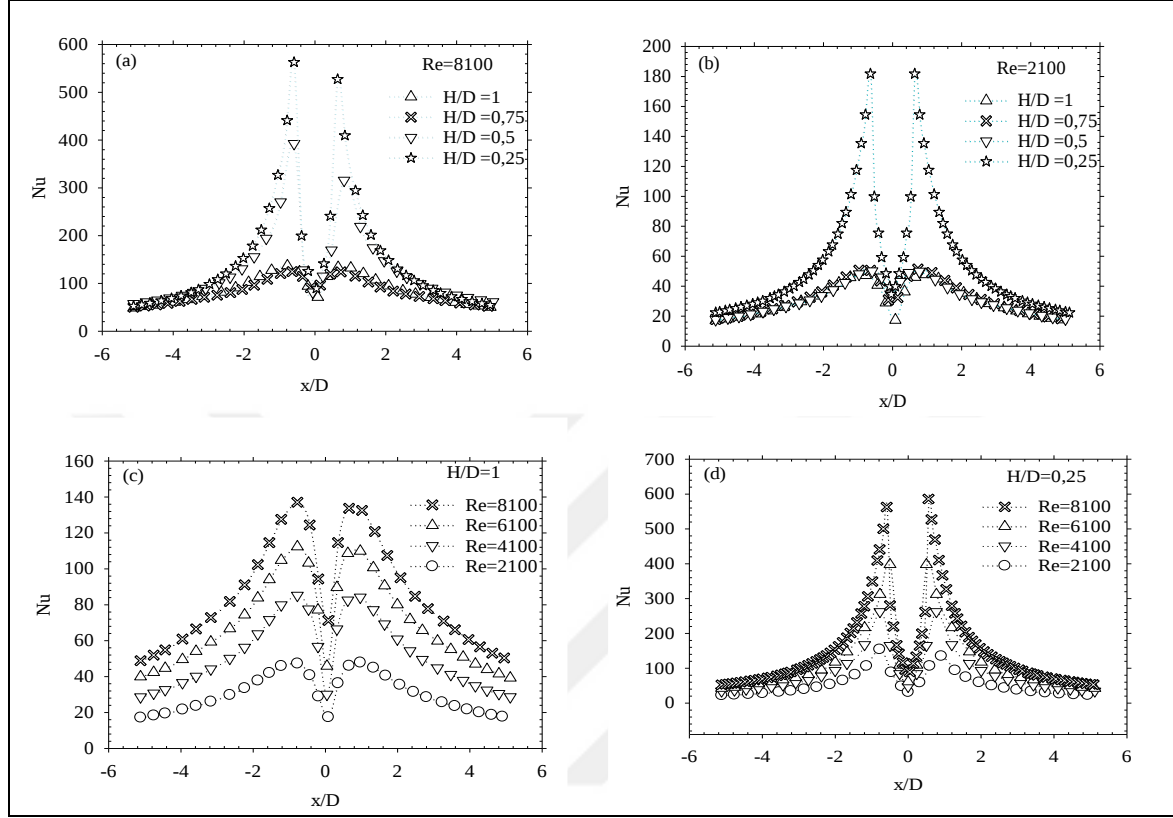


Şekil 6.5. Farklı Re 'lerde Nu_x 'in x/D boyunca değişimi (a) $H/D = 1$, (b) $H/D = 0,25$, (c) $H/D = 0,75$, (d) $H/D = 0,5$

6.1.5. H/D ve Re 'nin Nu üzerine etkisi

Boyutsuz lüle-plaka mesafelerinin (H/D) ve Reynolds sayılarının (Re) ortalama Nusselt sayısı (Nu) üzerine boyutsuz mesafe x/D boyunca etkileri Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Şekil 6.6(a) ve (b)'de sırasıyla $Re = 8\ 100$ ve $2\ 100$ için Nu farklı H/D 'ler için gösterilmiştir. Şekil 6.6(c) ve (d)'de sırasıyla $H/D = 1$ ve $0,25$ için farklı Re 'lerde Nu 'nun boyutsuz x/D boyunca değişimi verilmiştir. Şekil 6.6(a)'da görüldüğü gibi $Re = 8\ 100$ için $H/D = 1,00$ ve $0,75$ 'teki Nu 'ların birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Ancak H/D 'nin azalmasıyla $H/D = 0,50$ ve $H/D = 0,25$ 'te keskin bir artış meydana gelmiştir. Diğer taraftan Şekil 6.6(b)'de bu keskin artışın sadece $H/D = 0,25$ 'te olduğu ve diğer H/D 'lerin ise aynı ısı transferini gösterdiği görülmüştür. Bu durum azalan Re ile H/D 'nin Nu 'nun üzerine etkisinin azaldığını gösterir. $Re = 8\ 100$ 'de $H/D = 0,50$ ve $0,25$ için Nu 'nun yüksek olmasına rağmen ısı transferi

üniformluğunun daha zayıf olduğu görülmüştür. Bu durum artan H/D 'nin ısı transferi üniformluğunu olumlu etkilediğini gösterir.



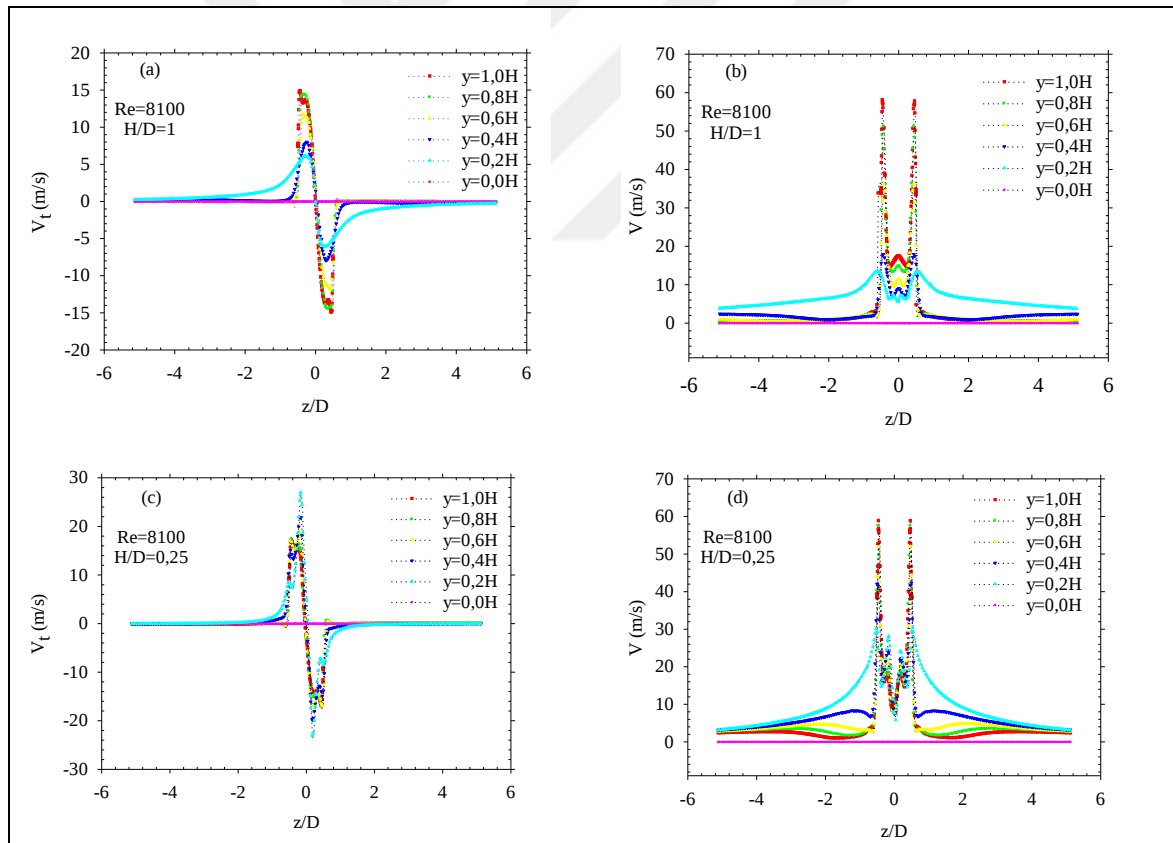
Şekil 6.6. Farklı H/D ve Re 'lerde x/D boyunca Nu 'nun değişimi

Şekil 6.6(c) ve (d)'de Re 'nin artmasıyla ortalama Nusselt sayısının arttığı görülmüştür. Diğer taraftan azalan H/D ile de Nu değeri artmıştır. Her iki durumda eksenel momentumun artmasıyla açıklanabilir.

6.1.6. Teğetsel ve eksenel hızların incelenmesi

Şekil 6.7'de çarpma plakasından lüle çıkışına kadar olan farklı y mesafelerindeki ($y = 0,0H, 0,2H, 0,4H, 0,6H, 0,8H, 1,0H$) eksenel ve teğetsel hız dağılımı gösterilmiştir. Burada $H = 12,7$ mm'dir. $y = 0,0H$ değeri çarpma plakasının üst yüzeyindeki ($y = 0$ mm) değere karşılık gelirken, $y = 1,0H$ değeri ise lüle çıkışındaki ($y = H = 12,7$ mm) değere karşılık gelir. Şekil 6.7(b) ve (d)'de $Re = 8100$ için sırasıyla $H/D = 1,00$ ve $H/D = 0,25$ 'te z/D boyunca farklı kesitlerdeki eksenel hızın dağılımı gösterilmiştir. Literatürde serbest jetler için çekirdek potansiyel bölgesi uzunluğu, jetin lüleden çıkış çapının altı katı kadar olduğu mesafe olarak ifade edilmiştir [34]. Dönen çarpmalı jette böyle bir potansiyel bölge oluşumu görülmemiştir.

Serbest jet durumunda meydana gelen jet profilinin dönen çarpmalı jette oluşmaması düşük lüle-plaka mesafesi, çarpma plakasının varlığı ve girdap üreticisinin geometrisiyle açıklanabilir. Şekil 6.7(b)'de çarpma plakasına yaklaşıldıkça düşey hızın kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Bu jetin çevredeki durgun akışkanı sürüklemesine bağlı olarak hızının düşmesine ve çarpma plakasının varlığına bağlı olarak durma bölgesinde yığılan akışkanın arkadan gelen akışkanı yavaşlatmasıyla açıklanabilir. Şekil 6.7(d) görüldüğü gibi $H/D = 0,25$ 'teki çarpma plakasına yakın düşey eksenel hızların genelinin, $H/D = 1$ 'dekine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum düşük lüle-plaka mesafesinden dolayı jetin çevredeki durgun akışkanla daha az sürtünmesine bağlı olarak daha az eksenel momentum kaybetmesiyle açıklanabilir. $-0,5 < z/D < 0,5$ aralığında $H/D = 0,25$ 'te $H/D = 1$ 'e göre birçok hız tepe noktasının meydana geldiği görülmüştür. Bu düşük lüle plaka mesafesinde jetin daha fazla karışmasıyla açıklanabilir.

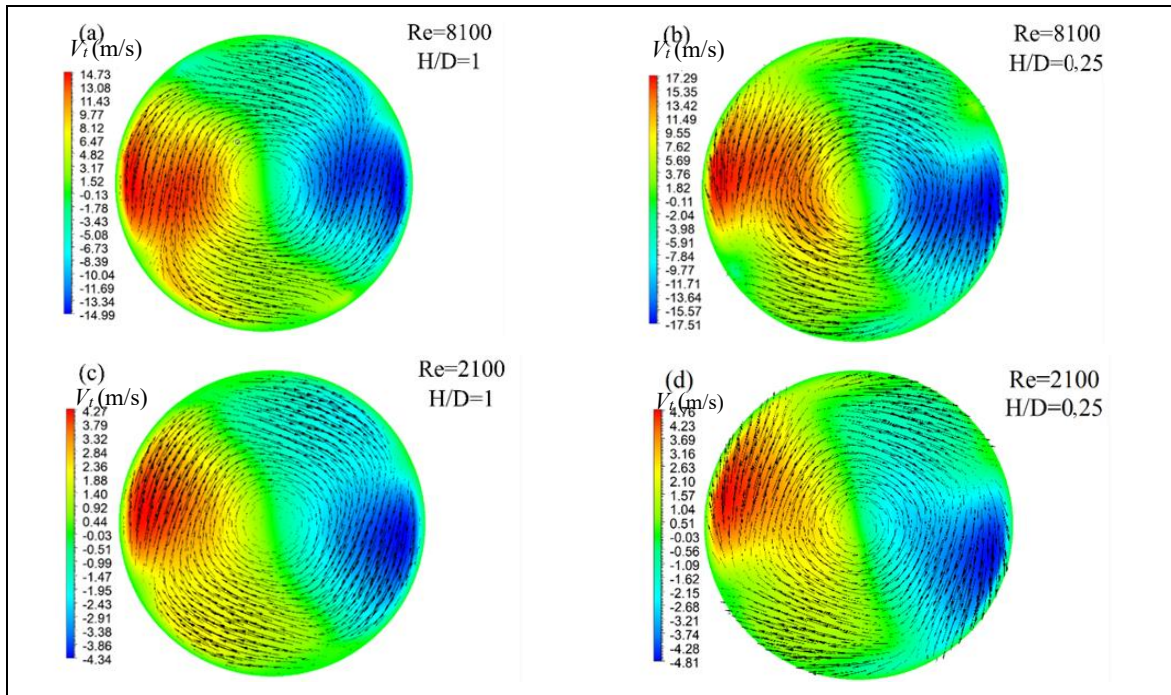


Şekil 6.7. Farklı y mesafelerindeki teğetsel hızın dağılımı (a) $H/D = 1$, (c) $H/D = 0,25$ ve eksenel hızın dağılımı (b) $H/D = 1$, (d) $H/D = 0,25$

Şekil 6.7(a) ve (c)'de $Re = 8100$ için sırasıyla $H/D = 1$ ve $H/D = 0,25$ 'te z/D boyunca farklı kesitlerdeki teğetsel hızlar gösterilmiştir. Şekil 6.7(a)'da teğetsel hızın plakaya yaklaştıkça kademeli olarak azaldığı ve tepe noktasının durma noktasına doğru kaydığı ($z/D = 0,4$ 'ten

0,2'ye) görülmüştür. Şekil 6.7(c)'de $H/D = 0,25$ 'te farklı kesitlerdeki teğetsel hızlar gösterilmiştir. $H/D = 0,25$ 'te, $H/D = 1$ 'e göre tüm mesafelerdeki teğetsel hız artış göstermiştir. Ayrıca daha yüksek teğetsel hızların plakaya yakın mesafelerde ($y = 0,6H$ 'dan $0,0H$ 'ye) meydana geldiği görülmüştür.

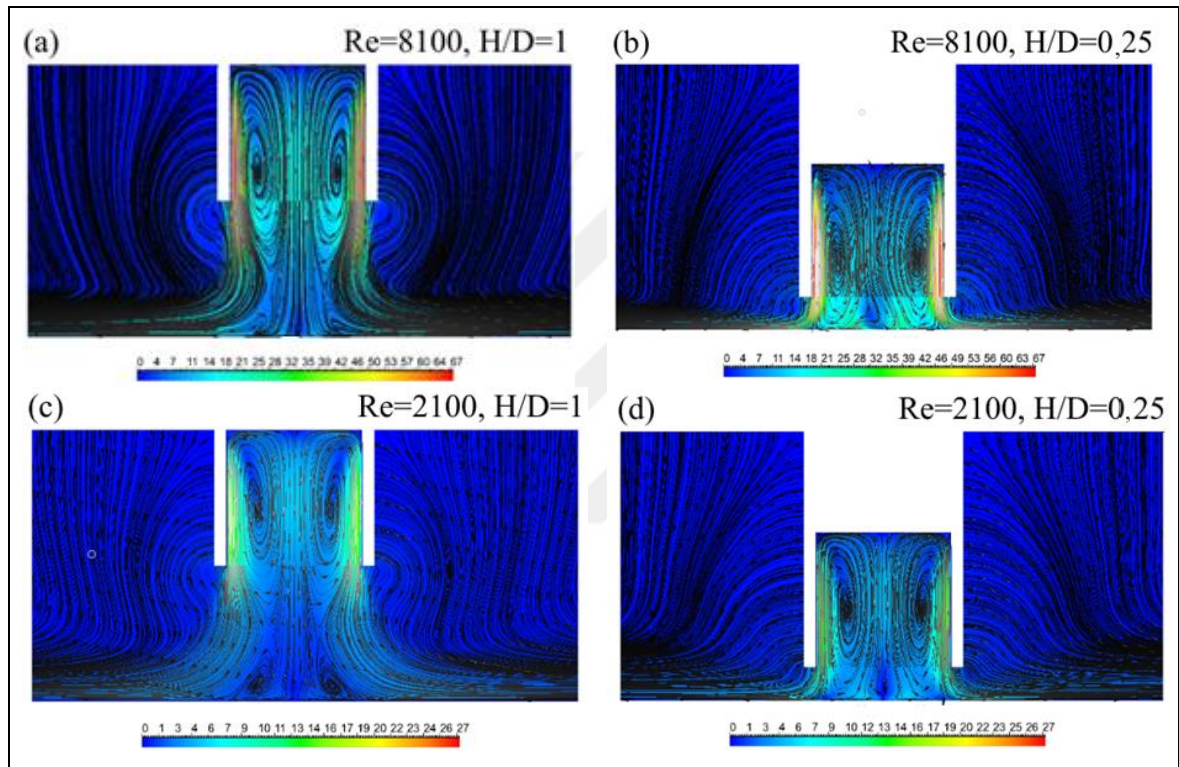
Şekil 6.8'de lülenin çıkış kesitindeki teğetsel hız dağılımı verilmiştir. Literatürde devridaim bölgesine kanıt olarak ortalama teğetsel hızın negatif değerlerinin varlığı gösterilmiştir [10]. Ayrıca teğetsel hızın negatif değerlerinin jetin dış bölgeden iç bölgeye doğru sürüklenmesinin işareti olduğu da belirtilmiştir. Şekil 6.8'deki durumun literatürle benzer olduğu görülmüştür. Şekil 6.8(a) ve (c)'de lüle çıkışındaki jet dış bölgelerden iç bölgelere doğru çekilmiştir. Ayrıca bu durum Reynolds sayısı (Re) azaldıkça zayıflamıştır. Şekil 6.8(b) ve (d)'de H/D azaldıkça, lüle çıkış kesitindeki jet dışarıya doğru yönelmiştir. Bu lüle çıkışındaki jetin çarpma plakasına çok yakın olmasından dolayı ($H/D = 0,25$), dışa doğru yönlendirilmesiyle açıklanabilir. Düşük H/D ve Re 'de yüksek girdap numarasının meydana gelmesi jetin dışa doğru savrulmasını destekler (Bkz. Şekil 6.3). Aynı zamanda $H/D = 1$ 'de Re 'nin artmasıyla ısı transferi tepe noktalarının durma noktasına yaklaşması (Bkz. Şekil 6.5(a)), Şekil 6.8(a)'da görülen jetin merkeze doğru sürüklenmesiyle ilişkilendirilebilir.



Şekil 6.8. Lüle çıkış kesitindeki teğetsel hız vektörleri $Re = 8\ 100$ için (a) ve (b) $H/D = 1$ ve $0,25$, $Re = 2\ 100$ için (c) ve (d) $H/D = 1$ ve $0,25$

6.1.7. Hız alanı ve akım çizgilerinin incelenmesi

Şekil 6.9’da $Re = 8\ 100$ ve $2\ 100$ için $H/D = 1$ ve $0,25$ ’teki hız konturları ve akım çizgileri gösterilmiştir. Tüm durumlar için girdap üreticiden çıkan jetin lüle içinde duran akışkanla karıştığı ve onu sürüklediği görülmüştür. Bu durumun girdap üreticinin çıkışından lüle çıkışına uzanan saat yönü ve saat yönünün tersine devridaim bölgeleri oluşmasına neden olduğu söylenebilir.

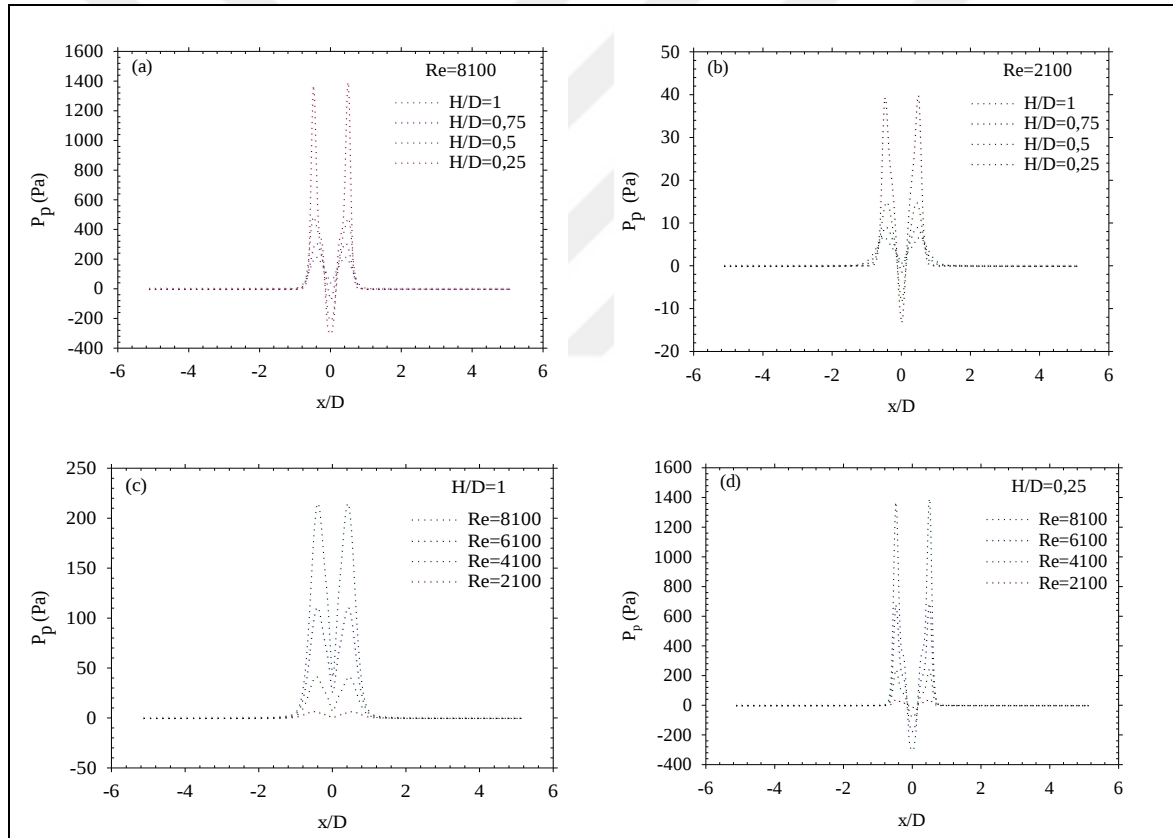


Şekil 6.9. Akım çizgileri ve hız konturları $Re = 8\ 100$ için (a) ve (b) $H/D = 1$ ve $0,25$, $Re = 2\ 100$ için (c) ve (d) $H/D = 1$ ve $0,25$

Şekil 6.9(a) ve (c)’de çarpma plakası üzerinde ikinci bir devridaim bölgesinin oluştuğu görülmüştür. H/D ’nin artmasının devridaim bölgelerinin oluşumunu desteklediği söylenebilir. Re ’nin artmasıyla devridaim bölgelerinin plakaya doğru baskılandığı görülmüştür. Ayrıca durma bölgesinden lülenin içine doğru ters akış oluşmuştur. Bu çarpma etkisiyle geri yansıyan jetin lüle içindeki devridaim bölgesine çekilmesiyle açıklanabilir. Şekil 6.9(b) ve (d)’de görüldüğü gibi $H/D = 0,25$ ’te çarpma plakası üzerinde ikinci bir devridaim bölgesi oluşmamıştır.

6.1.8. Re ve H/D 'nin basınç dağılımı üzerine etkisi

Şekil 6.10'da çarpma plakası üzerindeki basınç dağılımı boyutsuz x/D boyunca Reynolds sayısı (Re) ve lüle-plaka mesafesine (H/D) bağlı olarak gösterilmiştir. Durma noktasındaki yerel basıncın genel olarak düşük olduğu görülmüştür. Bu durumun merkezdeki kinetik enerjinin düşük olmasının bir sonucu olduğu söylenebilir. Diğer bir ifadeyle teğetsel hızın aksenal hızı yaymasına ve lüle içinde oluşan devridaim bölgesinin çarpan jeti lüle içerisine doğru çekmesine bağlı olarak çarpan jetin kinetik enerjisinin azalmasının bir sonucudur. Diğer taraftan basınçta tepe noktalarının oluştuğu görülmüştür. Bu tepe noktaları literatürde akışın karıştığı yerler olarak ifade edilmiştir [127].



Şekil 6.10. x/D boyunca basınç dağılımı (a) $Re = 8\ 100$, (b) $Re = 2\ 100$, (c) $H/D = 1$, (d) $H/D = 0,25$

Çarpma plakası üzerinde atmosfer altı basınç (subatmosferik) bölgeleri oluşmuştur. Literatürde negatif basınç bölgelerinin devridaim bölgeleri ve ısı transferinde oluşan tepe noktalarıyla bağlantısı olduğu belirtilmiştir [128]. Ayrıca ısı transferindeki tepe noktalarının devridaim bölgelerinin ön ve arkalarında meydana geldiği ifade edilmiştir [53]. Mevcut

çalışmada da yüksek ısı transferi tepe noktalarının basıncın tepe noktalarıyla ilişkili olduğu görülmüştür.

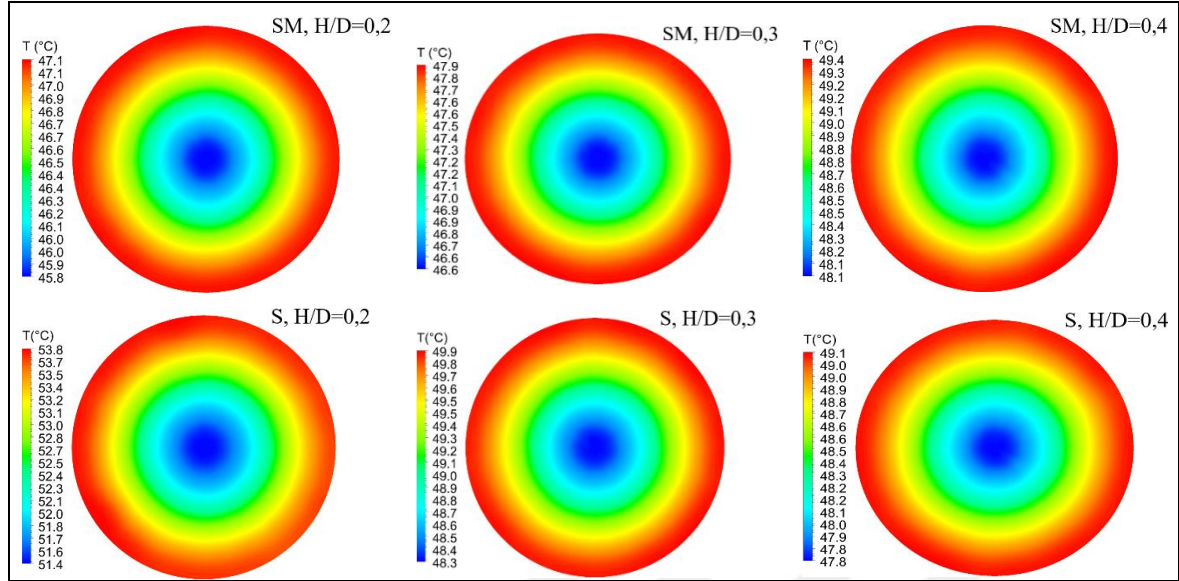
Şekil 6.10(a) ve (b)'de her iki Re 'de H/D 'nin artmasıyla durma noktasındaki ve tepe noktalarındaki basıncın azaldığı görülmüştür. Şekil 6.10(c) ve (d)'de her iki H/D 'de Re azaldıkça basınç azalmıştır. Diğer taraftan $H/D = 1$ 'de herhangi bir Re 'de negatif basınç görülmemiştir. $H/D = 0,25$ 'te Re 'nin artmasıyla, basıncın tepe değerlerinin ve durma noktasındaki basıncın arttığı görülmüştür.

6.2. Bileşik Çarpma Jetlerde Lüle-Plaka Mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ Olduğu Aralıktaki Sayısal Çalışma Sonuçları

Lüle-plaka mesafesinin $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ olduğu aralık için yapılan sayısal çalışma sonuçları bu kısımda verilmiştir.

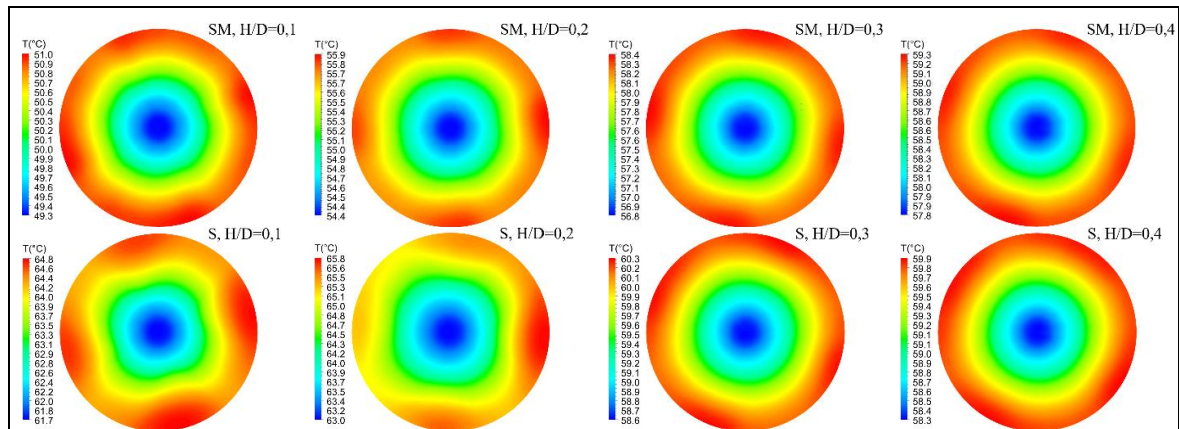
6.2.1. Isı transferiyle ilgili sonuçlar

Dairesel jet (DJ) ile düz çarpma plakasında farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için oluşan sıcaklık konturları Şekil 6.11'de verilmiştir. SM durumunda H/D 'nin artmasıyla çarpma plakası üzerindeki sıcaklıkta artış görülürken S durumunda plaka üzerindeki sıcaklıkta düşüş görülmüştür. Bu durum deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla tutarlıdır. $H/D = 0,4$ 'te, SM ve S durumlarında çarpma plakası üzerindeki sıcaklık dağılımlarının benzer olduğu görülmüştür. Yani engelleyici plakanın belirgin bir farka yol açmadığı söylenebilir. SM ve S durumlarının her ikisinde de en düşük sıcaklığın, basıncın en yüksek olduğu durma noktasında olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 6.15(a)). H/D sabit iken durma noktasından radyal yönde mesafenin artmasıyla SM durumundaki yerel basıncın azalmasına bağlı olarak sıcaklığın da azaldığı söylenebilir. S durumunda ise yerel basıncın yanında engelleyici plakanın, H/D ve radyal mesafeye bağlı olarak plaka üzerindeki sıcaklıkta daha baskın rol oynadığı söylenebilir.



Şekil 6.11. DJ için farklı H/D 'lerde SM ve S durumlarında çarpma plakasında oluşan sıcaklık konturları

Şekil 6.12'de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) için farklı H/D 'lerde sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için çarpma plakasında oluşan sıcaklık konturları gösterilmiştir. Hem SM hem de S durumlarında DDHJ'nin çarpma plakası üzerindeki sıcaklık dağılımına geometrik olarak yansıdığı ve çarpı şeklini oluşturduğu görülmüştür. Bu etkinin $H/D = 0,4$ 'te jetin yayılmasından dolayı azaldığı söylenebilir. H/D artarken S durumunda sıcaklığın genelde düşmesine rağmen $H/D = 0,2$ 'de artması, devridaim bölgesinin içerde sıcak akışkanın hapsederek döndürmesiyle (Bkz. Şekil 6.16) ve geri akış alanlarının ısınmış akışkanın çıkışına engel olmasıyla açıklanabilir (Bkz. Şekil 6.18).



Şekil 6.12. DDHJ için farklı H/D 'lerde SM ve S durumlarında çarpma plakasında oluşan sıcaklık konturları

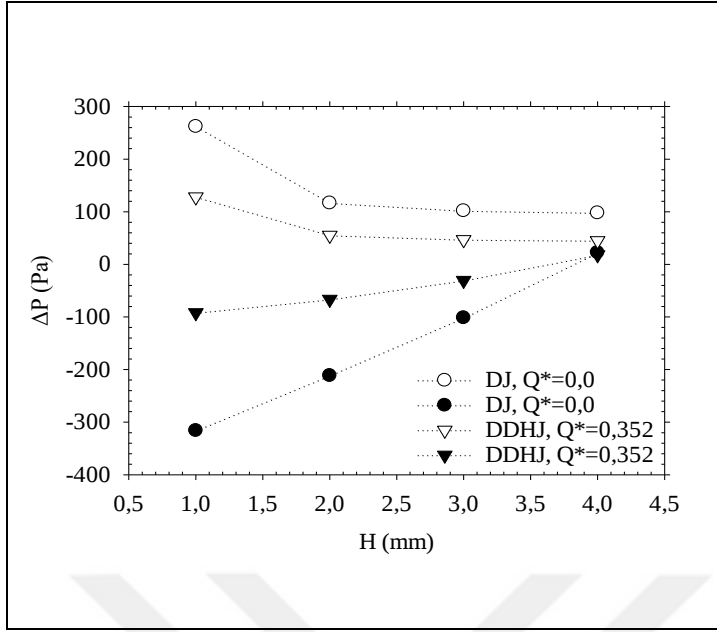
Çizelge 6.1’de dairesel jet (DJ) durumunda çarpma plakası üzerindeki akış hacmini dolduran akışkanın ortalama sıcaklığı (T_{ort}) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için verilmiştir. S durumunda engelleyici plakadan dolayı T_{ort} ’un SM durumuna göre yüksek olduğu görülmüştür. H/D ’nin artmasıyla T_{ort} değeri düşmüştür. T_{ort} ’un S durumunda yüksek olması, S durumundaki ısı transferinin SM durumuna göre düşük olmasına neden olduğu söylenebilir.

Çizelge 6.1. DJ’de çarpma plakası üzerindeki akış hacmini dolduran akışkanın ortalama sıcaklığı (T_{ort} °C)

H/D	0,1	0,2	0,3	0,4
SM	24,60	23,50	23,24	23,26
S	31,04	29,16	25,58	23,50

6.2.2. Akış ve basınç alanıyla ilgili sonuçlar

Dairesel jet (DJ), eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında çarpma plakası üzerindeki basınç düşüşlerinin lüle-plaka mesafelerine (H) göre değişimleri Şekil 6.13’te verilmiştir. $Q^* = 0,0$ değeri DJ’nin hacimsel debi oranını gösterirken, $Q^* = 0,352$ değeri ise DDHJ’nin hacimsel debi oranını göstermektedir. İçi boş semboller SM durumunu, içi dolu semboller ise S durumunu göstermektedir. Ortalama basınç düşüşü (ΔP) SM durumunda pozitif iken, S durumunda negatiftir. H arttıkça hem SM hem de S durumunun sıfıra yaklaştığı görülür. SM durumunda basınç düşüşü azalırken S durumunda ise artmıştır. S durumunda engelleyici plakanın varlığı plaka üzerinde atmosfer altı basınç bölgelerinin oluşmasına sebep olmuştur. S durumunda H ’nin artmasıyla basınç düşüşünün artmasına bağlı olarak engelleyici plakanın bu etkisinin ortadan kalkmaya başladığı söylenebilir. SM durumunda ise H ’nin artmasıyla basınç düşüşünün azalması, eksenel momentumun azalmasıyla açıklanabilir. Hem SM hem de S durumunda DJ’deki basınç düşüşü DDHJ’ye göre daha fazladır. Bu durum dairesel jette dönme etkisi olmadığından eksenel momentumun fazla olmasıyla açıklanabilir.



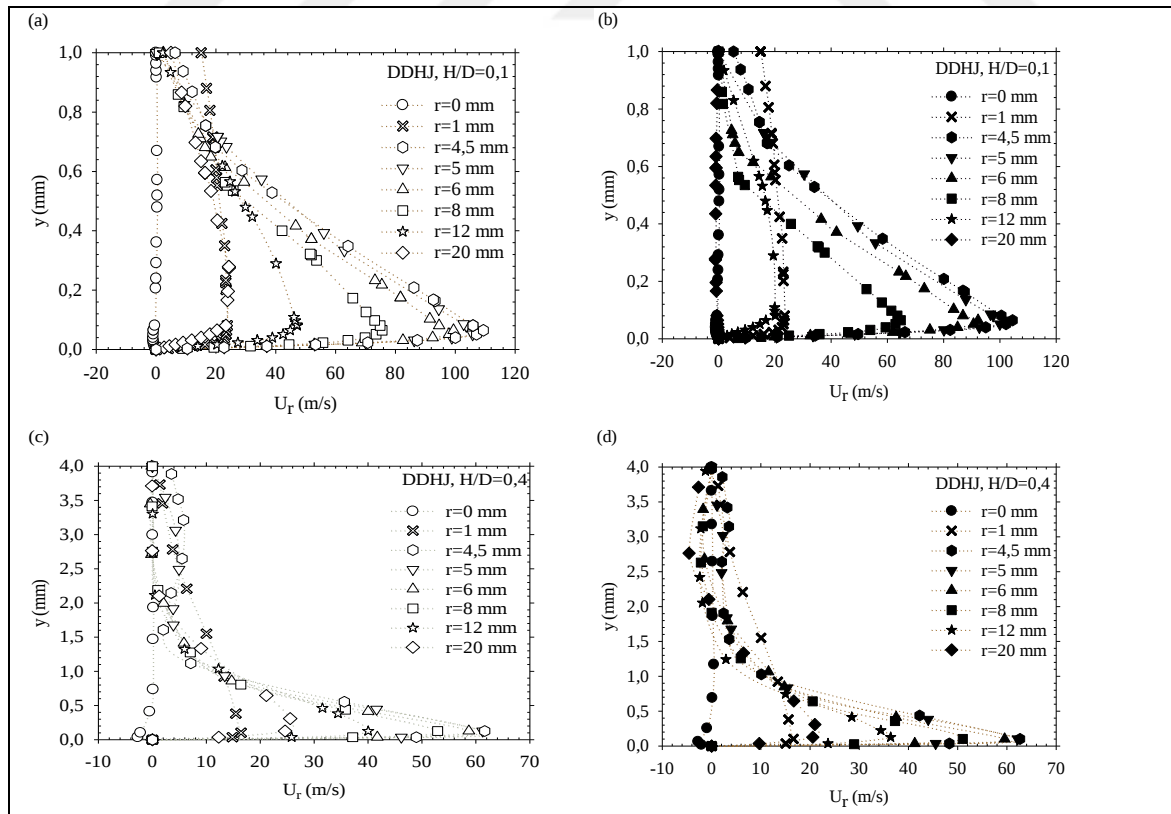
Şekil 6.13. DJ ve DDHJ için SM ve S durumlarında çarpma plakası üzerinde meydana gelen basınç düşüşü

H/D 'ye bağlı olarak ısı transferi ile basınç düşüşü birbiriyle ilişkilendirilebilir. SM durumundaki basınç düşüşü ile deneysel verilerden hesaplanan ısı transferi aynı eğilimi göstermiştir (Bkz. Şekil 5.1 ve 5.2). SM durumunda H/D 'nin artmasıyla plaka üzerindeki basınç düşüşünün ve ısı transferinin azaldığı görülmüştür. Bu durum artan H/D ile jetin yayılmasının sonucu olarak kinetik enerjisinin azalmasıyla açıklanmıştır [129]. Şekil 5.1 ve 5.2'deki deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü gibi, $H/D = 0,2-0,4$ arasında ısı transferindeki yakın düşüş, basınç düşüşünün yakınlığıyla ilişkilendirilebilir.

S durumunda H/D 'nin artmasıyla basınç düşüşü artış göstermiştir. S durumunda H/D 'nin artmasıyla birlikte basınç düşüşünün artması, deneysel çalışmada ısı transferinde meydana gelen artışla ilişkilendirilebilir (Bkz. Şekil 5.1 ve 5.2). S durumundaki basınç düşüşü ve ısı transferi SM durumundaki ile tam olarak aynı eğilimi göstermemiştir. Bu durumun S durumunda basınç düşüşünün yanı sıra engelleyici plaka, geri akış ve devridaim bölgeleri gibi diğer baskın faktörlerin etkili olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Şekil 6.14'te eş eksenli dairesel ve dörtlül helisel jetlerin (DDHJ) oluşturduğu duvar jetinde, belli radyal mesafeler için H yüksekliği boyunca farklı y mesafelerinde radyal yöndeki hız dağılımları verilmiştir. $H/D = 0,1$ 'de $y = 0,0$ mm çarpma plakasının üstünü, $y = H = 1$ mm birleşik lülenin çıkışını ifade ederken, $H/D = 0,4$ 'te $y = 0,0$ mm çarpma plakasının üstünü, y

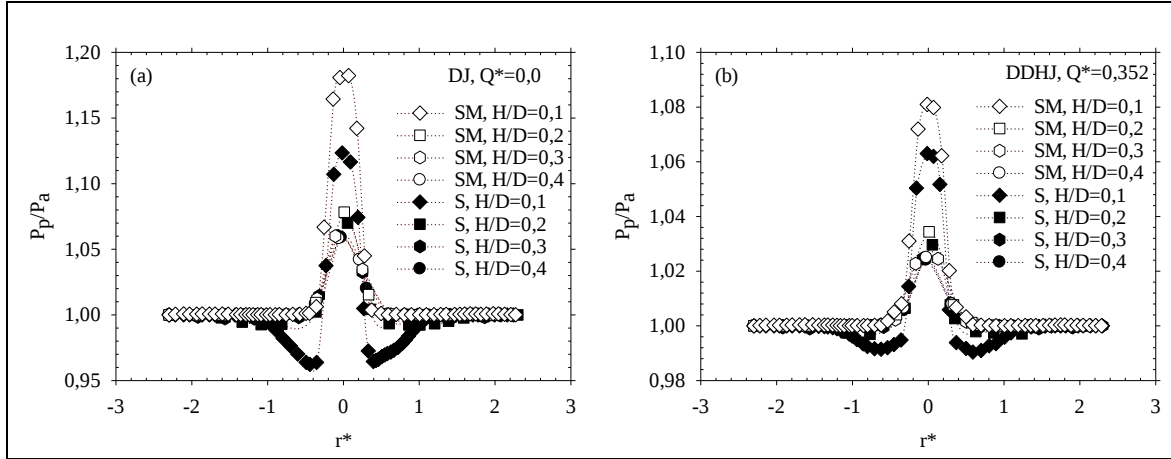
$= H = 4$ mm birleşik lülenin çıkışını ifade eder. İçi boş semboller sınırlandırılmamış jet (SM) durumunu, içi dolu semboller ise sınırlandırılmış jet (S) durumunu gösterir. Çarpmalı jet bölgesi bir durgunluk ve bir de duvar jeti bölgesi tarafından karakterize edilir. Duvar jeti bölgesi, durma noktasında hızı sıfır olan yüksek basınçlı jetin radyal yöne dönerek hızlandığı ve daha sonra yavaşladığı bölge olarak tanımlanır. Literatürde dairesel jetlerin hızının lüle-plaka mesafesinin $0 < H/D < 12$ olduğu aralıkta durma bölgesinden yaklaşık bir jet çapında maksimuma ulaştığı belirtilmiştir [130]. Şekil 6.14'te DDHJ için benzer bir durum görülmüştür. Duvar jeti bölgesindeki maksimum hız dairesel lülenin (D_I) çapı olan $r = 4,5$ mm'de meydana gelmiştir. Buna dayanarak helisel jetlerin maksimum hızın oluştuğu mesafeyi etkilemediği söylenebilir. $H/D = 0,1$ 'de radyal yöndeki U_r hızı, tüm radyal mesafelerde $H/D = 0,4$ 'ten yüksektir. Lüle-plakası mesafesinin azalması radyal yöndeki hızı artırmıştır. $H/D = 0,1$ 'de SM durumundaki U_r 'nin, S durumundakinden biraz daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 6.14(a) ve (b)). Bu, S durumunda engelleyici plakanın radyal yöndeki hızı azaltmasıyla açıklanabilir. $H/D = 0,4$ 'te ise engelleyici plakanın etkisi ortadan kalktığı için U_r üzerine düşürücü etki yapmadığı söylenebilir (Şekil 6.14 (c), (d)). Bu nedenle $H/D = 0,4$ 'te SM ve S durumlarında meydana gelen hızlar hemen hemen aynıdır.



Şekil 6.14. DDHJ'nin $Q^* = 0,352$ 'de plaka üzerindeki belli radyal mesafeler için radyal yöndeki hız dağılımı (a) ve (c) SM durumu, (b) ve (d) S durumu

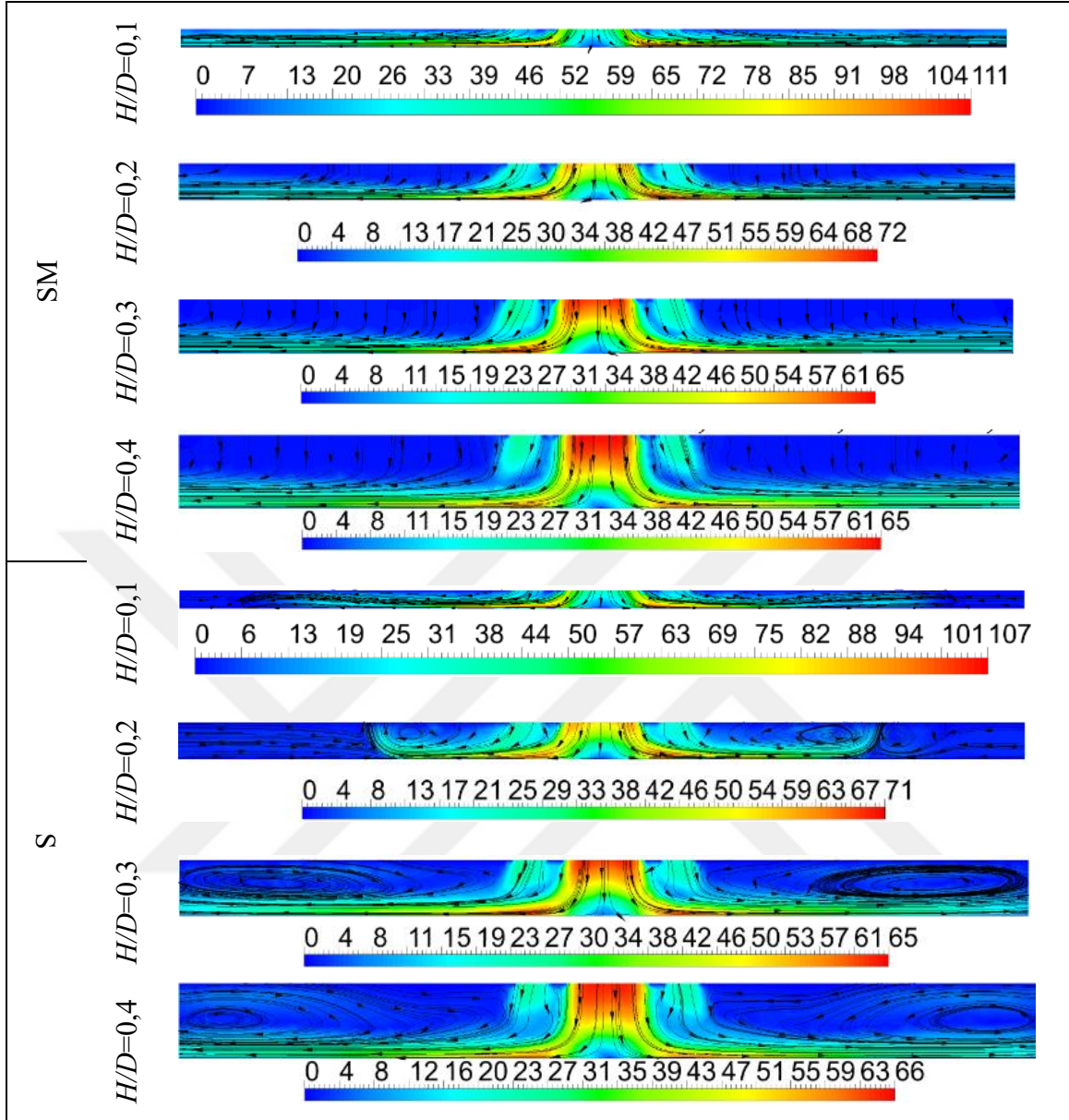
Duvar jetinin ortalama hız profili çarpma plakasından maksimum hız noktasına kadar uzanan bir sınır tabaka şekli sergiler ve daha sonra maksimum hızdan serbest akış akışına kadar serbest jet akış şekli ile birleşir [131]. DDHJ’de hem SM hem de S durumları için $H/D = 0,1$ ’deki en yüksek radyal hız $r = 4,5$ mm’de meydana gelirken çarpma plakasından yüksekliğinin $y = 0,07$ mm olduğu görülmüştür. $H/D = 0,4$ ’te ise yine aynı radyal mesafede $H = 0,11$ mm yüksekliğinde meydana gelmiştir. Sonuçlar lüle-plaka mesafesinin artmasıyla birlikte duvar jeti hızının azalmasına bağlı olarak sınır tabakası yüksekliğinin arttığını göstermiştir. Sınır tabakası yüksekliğinin aynı lüle-plaka mesafesinde hem SM hem de S durumu için değişmediği görülmüştür. Engelleyici plakanın sınır tabakası yüksekliğini etkilemediği söylenebilir.

Boyutsuz radyal mesafe (r^*) boyunca P_p/P_a (çarpma plakası üzerindeki yerel basınç/atmosferik basınç) farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) ve sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için Şekil 6.15’te verilmiştir. Şekil 6.15(a) çarpma plakası üzerindeki dairesel jetin (DJ) oluşturduğu basınç dağılımını, (b) ise eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlerin (DDHJ) oluşturduğu basınç dağılımını göstermektedir. DJ ve DDHJ’lerde H/D arttıkça durma noktasındaki basınç azalmıştır. Bu durum H/D ’nin artmasıyla, jetin yayılmasına ve jetin merkezindeki kinetik enerjinin düşmesiyle açıklanabilir. Ayrıca DDHJ’de dairesel kısımdan gönderilen akışkan miktarının azalmasının da buna sebep olabileceği söylenebilir. Aynı H/D ’de helisel jetlerin eksenel jeti daha fazla yaymaya çalışması nedeniyle DDHJ’nin durma noktasında oluşturduğu basınç, DJ’ye göre daha düşük olduğu söylenebilir. Literatürde S durumunda plaka üzerinde atmosfer altı basınç bölgelerinin oluşumu, devridaim bölgelerinin oluşuma kanıt olarak gösterilmiştir [128]. Mevcut çalışmada S durumunda oluşan devridaim bölgeleri Şekil 6.16 ve 6.17’de gösterilmiştir. H/D arttıkça atmosfer altı basınç bölgeleri etkisini kaybetmeye başlamıştır. Engelleyici plakanın bulunmamasından dolayı SM durumunda atmosfer altı basınç gözlenmemiştir. Literatürde S durumunda oluşan atmosfer altı basınç bölgelerinin SM durumuna göre durma noktasında daha düşük basınca sebep olduğu belirtilmiştir [132]. Benzer bir durum $H/D = 0,1$ ve $0,2$ ’de de meydana gelmiştir. H/D arttıkça atmosfer altı basınç bölgelerinin oluşumuna sebep olan engelleyici plakanın bu etkisi azalmaya başlamıştır. Ayrıca SM durumu için H/D ’nin değişiminin, radyal yöndeki basınç değişimi üzerinde daha az etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 6.15. Farklı H/D 'ler için SM ve S durumlarında çarpma plakası üzerinde meydana gelen basınç dağılımları (a) DJ, (b) DDHJ

$Q^* = 0,352$ hacimsel debi oranında eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) için hız konturları ve akım çizgileri Şekil 6.16'da verilmiştir. Engelleyici plakanın devridaim oluşumuna neden olduğu literatürde ifade edilmiştir [65]. Mevcut çalışmada da benzer bir durum görülmüştür. Sınırlandırılmış jet (S) durumunda ($H/D = 0,1$ hariç) devridaim bölgeleri gözlemlenmiştir. $H/D = 0,1$ 'de devridaim bölgesinin görülmemesi, düşük lüle-plaka mesafesine bağlanabilir. S durumunda $H/D = 0,1$ için çarpma plakasının üzerinde radyal yönde 10 mm'den sonra jetin yukarıya doğru yöneldiği ve çarpma plakasıyla bağlantısının zayıfladığı görülmüştür. Çarpan jetin plaka üzerinde bu şekilde yansımalarının atmosfer altı basınç bölgelerinin oluşumuna katkı sağladığı söylenebilir. $H/D = 0,1$ ve $0,2$ 'de çıkıştan ortam akışkanının girdiği görülmüştür. Diğer taraftan dışarıdan giren ortam akışkanı, $H/D = 0,1$ 'de çıkmak isteyen duvar jetiyle çarpışmaktadır. S durumundaki ısı transferinin sınırlandırılmamış jet (SM) durumuna göre daha düşük olması, plaka üzerindeki geri akış nedeniyle çıkışa doğru hareket eden akışın kısıtlanmasıyla da açıklanabilir. Ayrıca H/D arttıkça devridaim bölgelerinin boyutunun arttığı ve durma noktasından çıkışa doğru hareket ettikleri görülmüştür.



Şekil 6.16. DDHJ için farklı boyutsuz mesafelerde SM ve S durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri

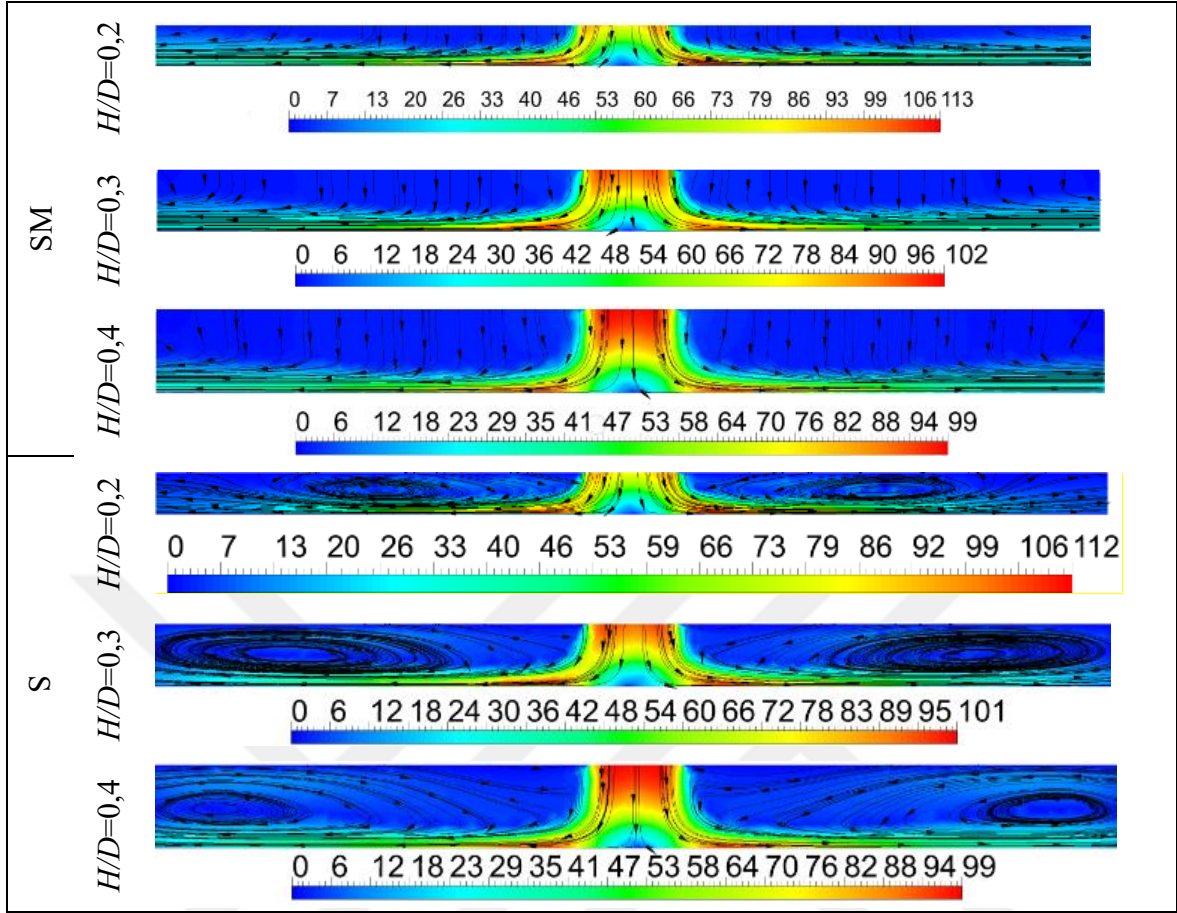
$H/D = 0,2$ 'de dışarıdan giren ortam akışkanını iç devridaim bölgesinin yanında ikinci bir devridaim bölgesi oluşturmuştur. İkinci devridaim bölgesinin gelişimi, birinci devridaim bölgesini içeriye hapsederek ısınmış akışkanın iç tarafta dönmesine yol açtığı söylenebilir. Başka bir ifadeyle ikinci devridaim bölgesi çarpan jetin çıkışını zorlaştırmıştır. Bu nedenle $0,0 \leq Q^* \leq 0,352$ aralığı için ısınan jetin kaçış alanının artmasına rağmen ($H/D = 0,1$ 'den $0,2$ 'ye), $H/D = 0,2$ 'deki ısı transferinin $H/D = 0,1$ 'den biraz daha düşük veya aynı olarak kaldığı görülmüştür (Bkz. Şekil 5.1(a), (b) ve 5.2(a), (b)). Dönme etkisi ve H/D 'nin artmasıyla bu etkinin kaybolmuştur (Bkz. Şekil 5.2). Diğer taraftan S durumunda $H/D = 0,3$

ve 0,4'te oluşan devridaim bölgesinin çevredeki akışkanı çarpan jete dahil ettiği söylenebilir. Bu ısınan jetin sıcaklığını düşüreceği için ısı transferini olumlu etkilemiştir.

Fairweather ve Hargrave [10] bu devridaim bölgelerinin oluşumunu akışkanın dış bölgelerden jetin iç bölgelerine doğru sürüklenmesiyle ilişkilendirmişlerdir. Başka bir ifadeyle jet lüleden ayrıldıktan sonra çevre ortamdan akışkanı çeken negatif bir basınç alanı oluşturur. Sınırlandırılmış jet (S) durumunda meydana gelen devridaim bölgesinin, çarpma plakası ile engelleyici plaka arasındaki durgun akışkanın jetin merkezine doğru çekilmesiyle oluştuğu söylenebilir. Sınırlandırılmamış jet (SM) durumunda devridaim bölgesi görülmemiştir. SM durumunda çevredeki akışkan çekilerek duvar jetinin içine dahil edilmiştir. Bu durumun ısı transferini olumlu yönde etkileyebileceği söylenebilir.

Hız konturu sonuçlarına göre H/D 'nin azalmasıyla jetin hızının arttığı görülmüştür. Bu artışın $H/D = 0,1$ 'de daha belirgin olduğu görülmekte ve SM durumundakinin S durumuna göre biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum engelleyici plakanın varlığıyla açıklanabilir. $H/D = 0,2$ 'den sonra hem SM hem S durumlarındaki hızların neredeyse aynı kaldığı görülmüştür. Bu $H/D = 0,2$ 'den sonra engelleyici plakanın etkisini kaybetmesiyle açıklanabilir.

Şekil 6.17'de dairesel jet (DJ) için farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için hız konturları ve akım çizgileri gösterilmiştir. S durumundaki devridaim bölgeleri DDHJ'de olduğu gibi engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak oluşmuştur. S durumunda $H/D = 0,2$ 'de oluşan devridaim bölgesinin iç tarafta hapsolarak ısınmış akışkanı döndürdüğü görülmüştür. H/D 'nin artmasıyla çıkış alanının rahatlamasına bağlı olarak dış ortam akışkanının ısınmış jete dahil edildiği söylenebilir. Ayrıca artan H/D ile devridaim bölgeleri çıkışa doğru hareket ettiği ve boyutlarının genişlediği görülmüştür. Bu durum artan H/D ile negatif basınç alanının azalmasıyla açıklanabilir. Literatürde de artan Reynolds sayısı ve H/D ile devridaim bölgelerinin çıkışa doğru kaydığı ifade edilmiştir [133].

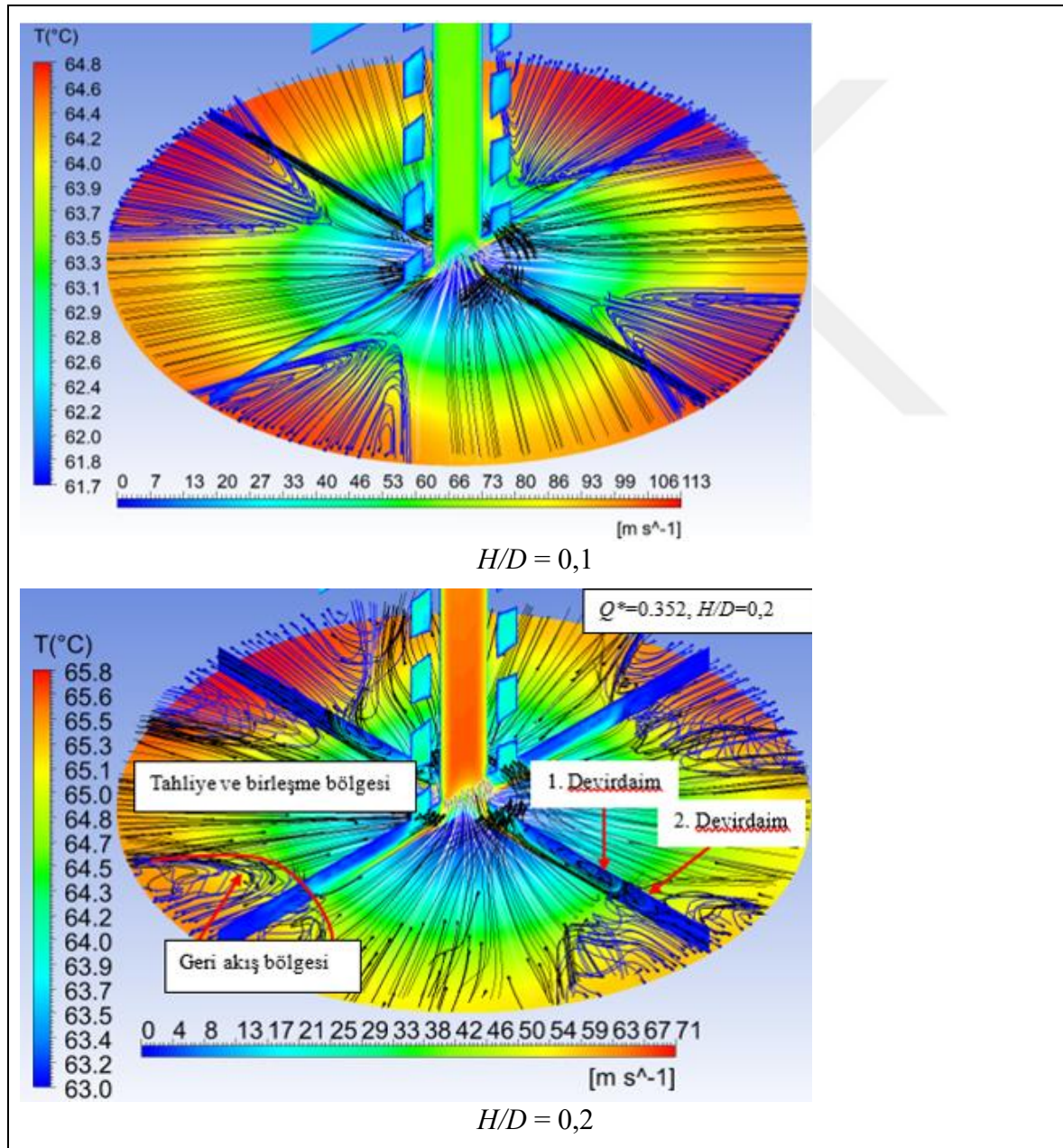


Şekil 6.17. DJ’de farklı H/D ’ler için SM ve S durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri

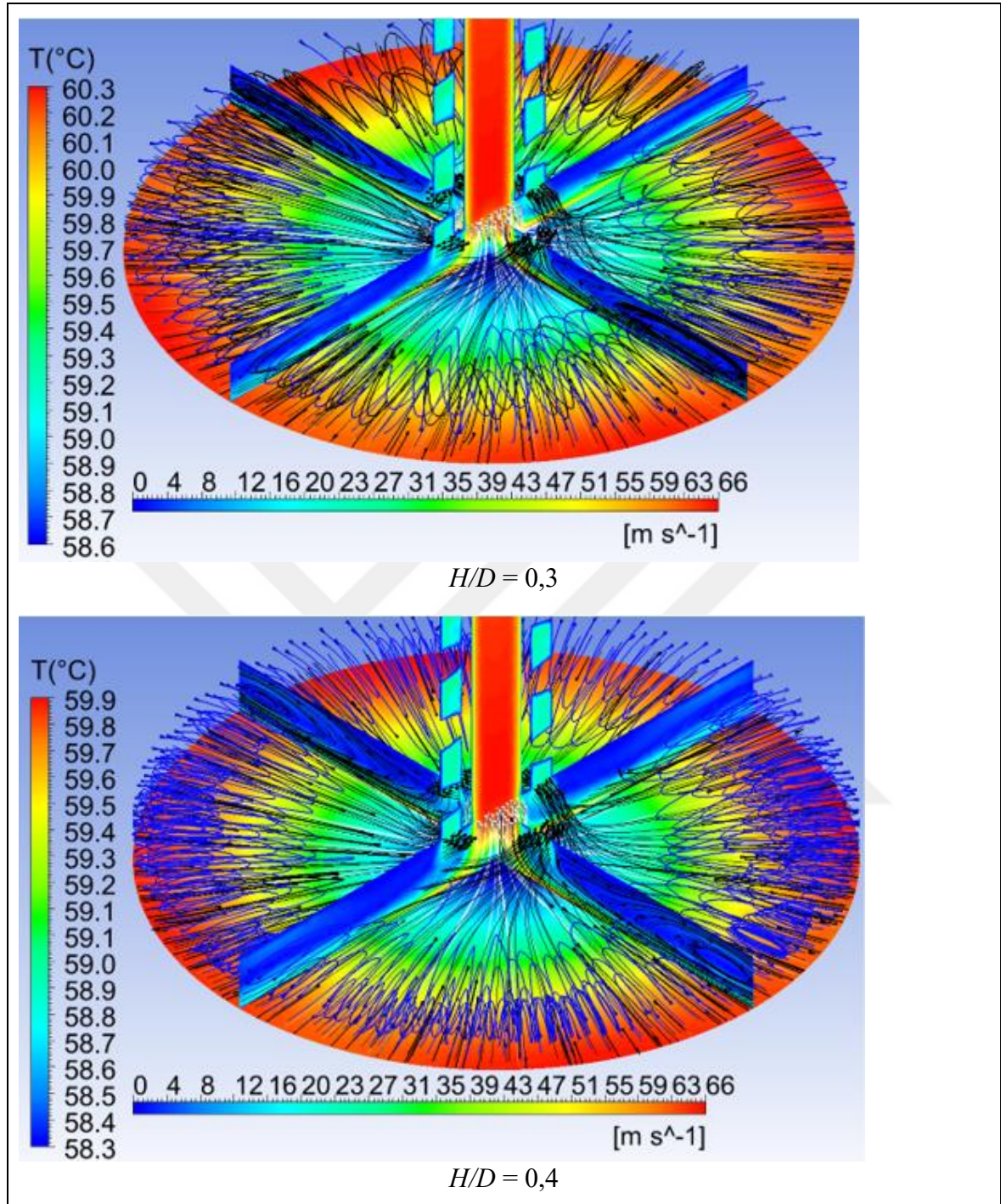
SM durumunda devridaim bölgesi görülmemiştir. Dış ortamdaki akışkan tüm H/D ’lerde duvar jetine dahil edilmiştir. Devridaim bölgesinin oluşmaması, çarpma plakası üzerinde negatif basınç alanının oluşmamasıyla ilişkilendirilebilir. Artan H/D ile DJ’nin hem SM hem S durumları için hızının azaldığı görülmüştür.

Şekil 6.18’de eş eksenli dairesel ve helisel jetler (DDHJ) için sınırlandırılmış jet (S) durumundaki hız konturları, akım çizgileri ve sıcaklık konturları hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için gösterilmiştir. $H/D = 0,1$ ve $0,2$ ’de dörtlü helisel jetlerin çıkış yerlerine doğru dört ayrı geri akış bölgesinin oluştuğu görülmüştür. Bu durum engelleyici plaka ve girdaplı (dönen) jet tarafından radyal yöndeki momentumun azalmasına atfedilebilir. Ayrıca dairesel kısımdan çıkan dairesel jetin radyal yönde hareket ederken dönen jet tarafından tahliye bölgesine yönlendirildiği görülmüştür. Geri akışı tetikleyen diğer bir nedenin ise S durumunda plaka üzerinde oluşan negatif basınç alanlarının olduğu söylenebilir (Bkz. Şekil 6.13). Geri akış bölgeleri arasında dairesel ve helisel jetlerin tahliye olduğu ve birleştiği dört bölge oluşmuştur. Bu tahliye bölgelerindeki sıcaklıkların geri akış bölgesine göre biraz daha

düşük olduğu görülmüştür ($H/D = 0,1$ ve $0,2$). Literatürde de buna benzer bir durum mevcuttur [76]. Çarpan jetin geri akış ve düşük çıkış alanından dolayı ortamı terk etmekte zorlandığı söylenebilir. $H/D = 0,2$ 'deki birinci devridaim bölgesinin içerdeki sıcak akışkanı döndürdüğü görülmüştür. $H/D = 0,3$ ve $0,4$ 'ün, $0,1$ ve $0,2$ 'den mesafece daha büyük olmasından dolayı buralarda oluşan geri akış ve devridaim bölgelerinin, çarpan jetin çarpma plakası üzerinden ayrılmasına $H/D = 0,1$ ve $0,2$ kadar engel olmadığı söylenebilir. $H/D = 0,3$ ve $0,4$ 'te çarpan jetin çarpma plakası üzerinden tüm radyal yönlerde tahliye olduğu görülmüştür.

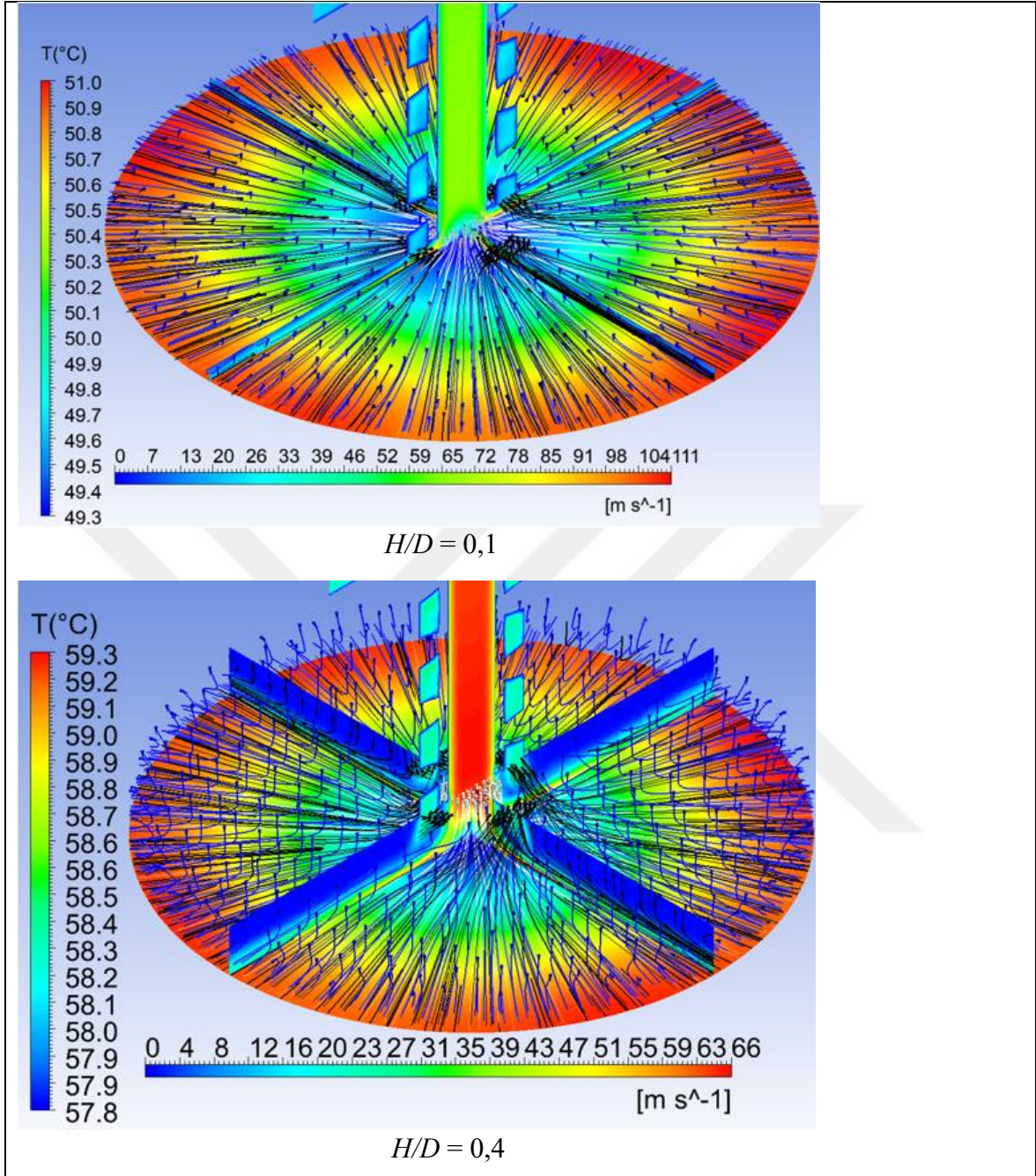


Şekil 6.18. S durumunda DDHJ için akım çizgileri, hız ve çarpma plakasının sıcaklık konturları



Şekil 6.18. (devam) S durumunda DDHJ için akım çizgileri, hız ve çarpma plakasının sıcaklık konturları

Şekil 6.19’da eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) için sınırlandırılmamış jet (SM) durumundaki hız konturları, akım çizgileri ve sıcaklık konturları hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için gösterilmiştir. SM durumunda geri akış bölgeleri ve devridaim bölgeleri oluşmamıştır. Ortamdaki durgun akışkanın duvar jetine dahil edildiği görülmüştür.



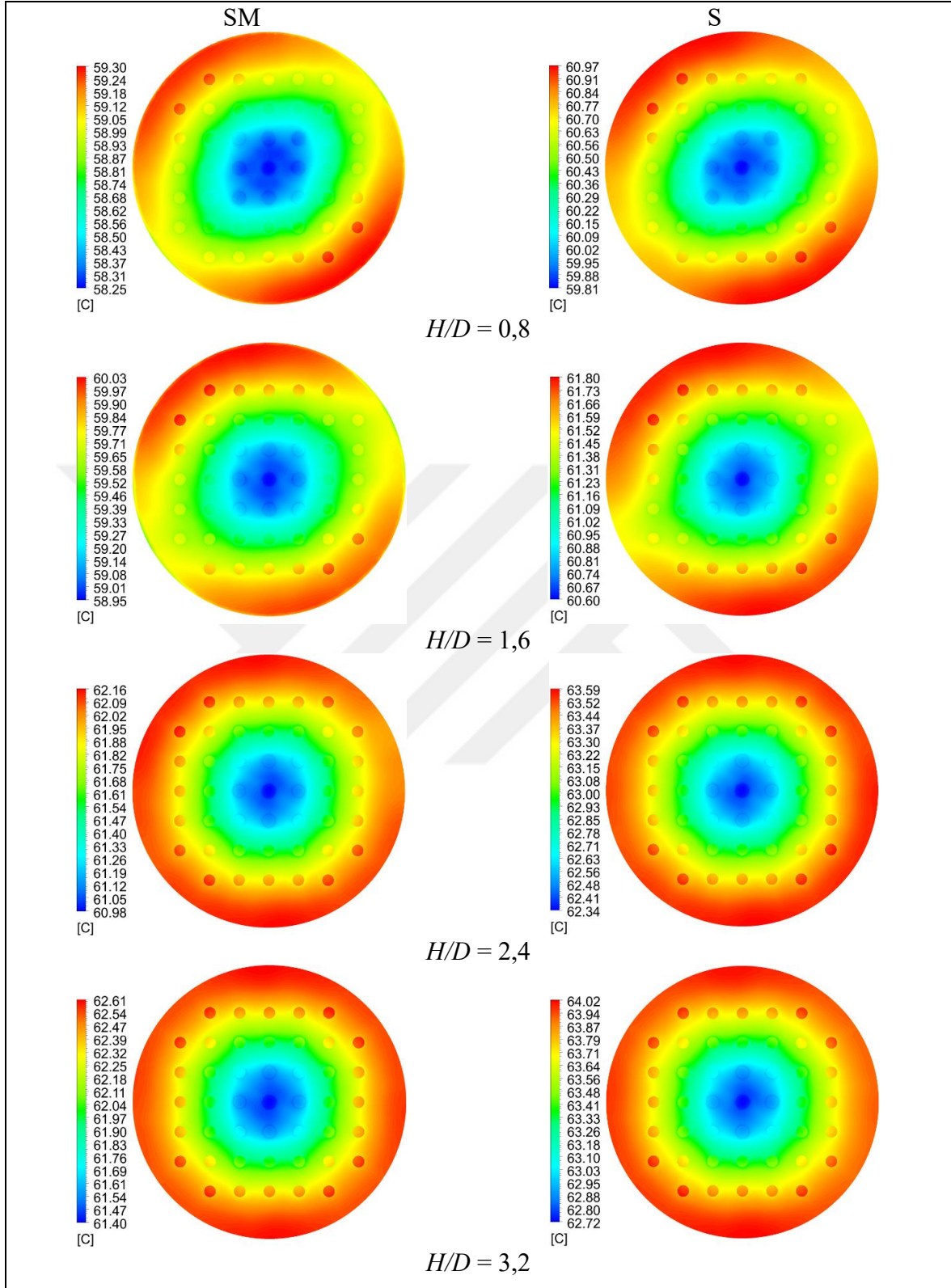
Şekil 6.19. SM durumunda DDHJ için akım çizgileri, hız konturları ve çarpma plakasının sıcaklık konturu

6.3. Birleşik Çarpmalı Jetlerde Lüle-Plaka Mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ Olduğu Aralık İçin Sayısal Çalışma Sonuçları

Lüle-plaka mesafesinin $0,8 \leq H/D \leq 3,2$ olduğu aralık için yapılan sayısal çalışma sonuçları bu kısımda verilmiştir.

6.3.1. Isı transferi ve akış alanıyla ilgili sonuçlar

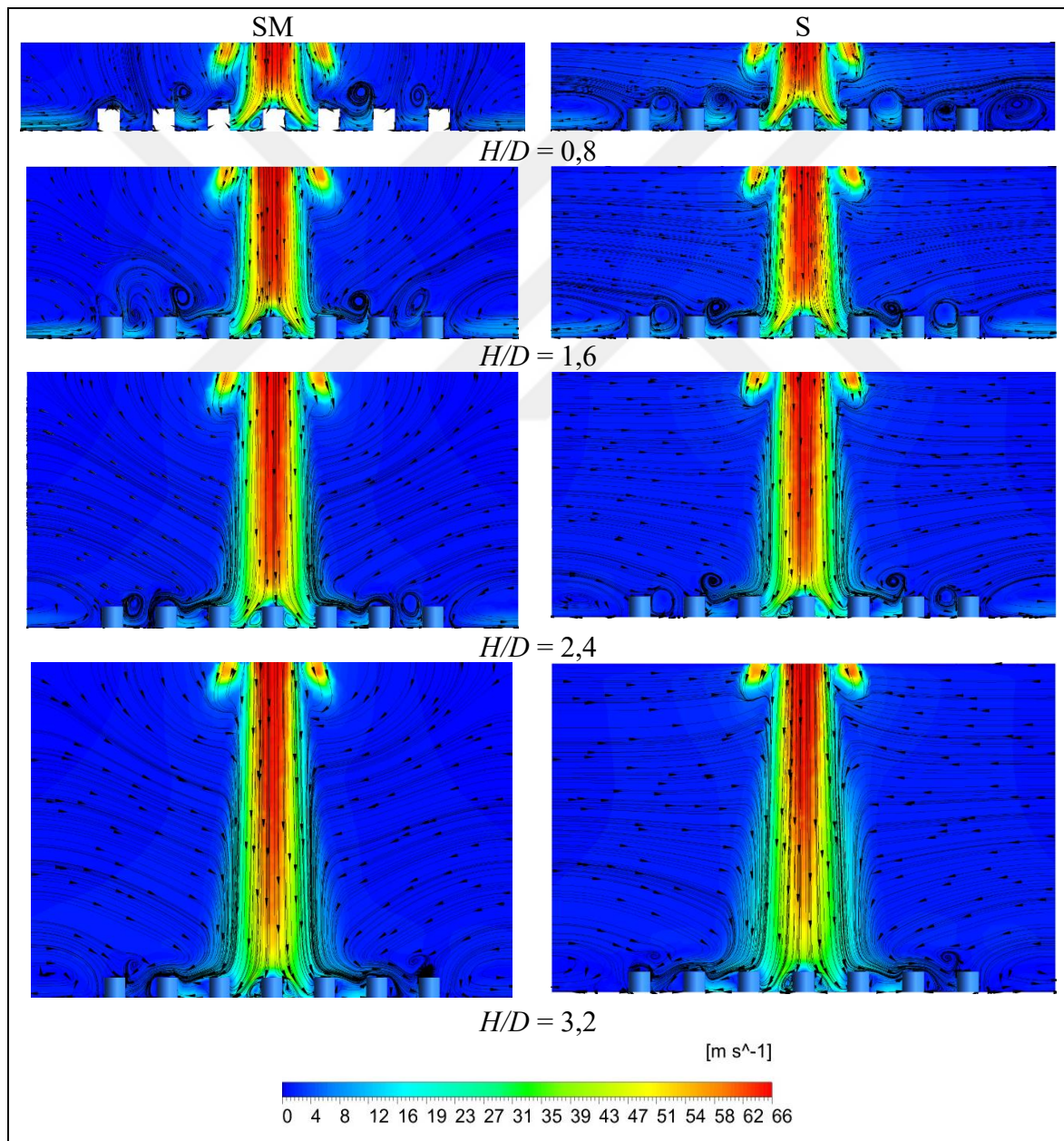
Şekil 6.20’de eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) için farklı H/D ’lerde sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında, hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasında (P2) oluşan sıcaklık konturları gösterilmiştir. Şekildeki sol sütun SM durumundaki sıcaklık konturlarını, sağdaki sütun ise S durumundaki sıcaklık konturlarını gösterir. Hem SM hem de S durumlarında DİHJ’nin çarpma plakası üzerindeki sıcaklık dağılımına geometrik olarak yansıdığı görülmüştür. Düşük mesafelerde elips şekline benzeyen sıcaklık dağılımı artan mesafeyle daire şekline benzediği görülmüştür. Artan H/D ile birleşik lülenin sıcaklık dağılımında meydana getirdiği geometrik etkinin ortadan kalktığı söylenebilir. $H/D = 0,8$ ’den 1,6’ya kadar SM durumunda meydana gelen eliptik şekilli sıcaklık dağılımının S durumuna göre biraz daha büyük alana sahip olduğu görülmüştür. Bu durum S durumundaki engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak durgun ortam akışkanının jete dahil edilememesiyle açıklanabilir. Ayrıca bu durumun üniform ısı transferini de olumsuz etkileyeceği söylenebilir. $H/D = 1,6$ ’dan sonra engelleyici plakanın bu etkisinin neredeyse kaybolduğu görülmüştür. S durumunda meydana gelen sıcaklıkların SM durumuna göre biraz daha fazla olması da engelleyici plakanın varlığının bir sonucu olduğu söylenebilir. Yani ortamdan uzaklaşacak akışkanın kaçış alanının azalması ve durgun ortamdaki soğuk akışkanın çarpan jete kısıtlı olarak dahil edilmesiyle açıklanabilir. Hem SM hem de S durumunda H/D ’nin artmasıyla plaka üzerinde meydana gelen sıcaklıkların jetin kinetik enerjisinin azalmasına bağlı olarak arttığı söylenebilir.



Şekil 6.20. DİHJ’de farklı H/D ’ler için SM ve S durumlarında P2’de oluşan sıcaklık konturları

Şekil 6.21’de eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasında (P2) farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) sınırlandırılmamış

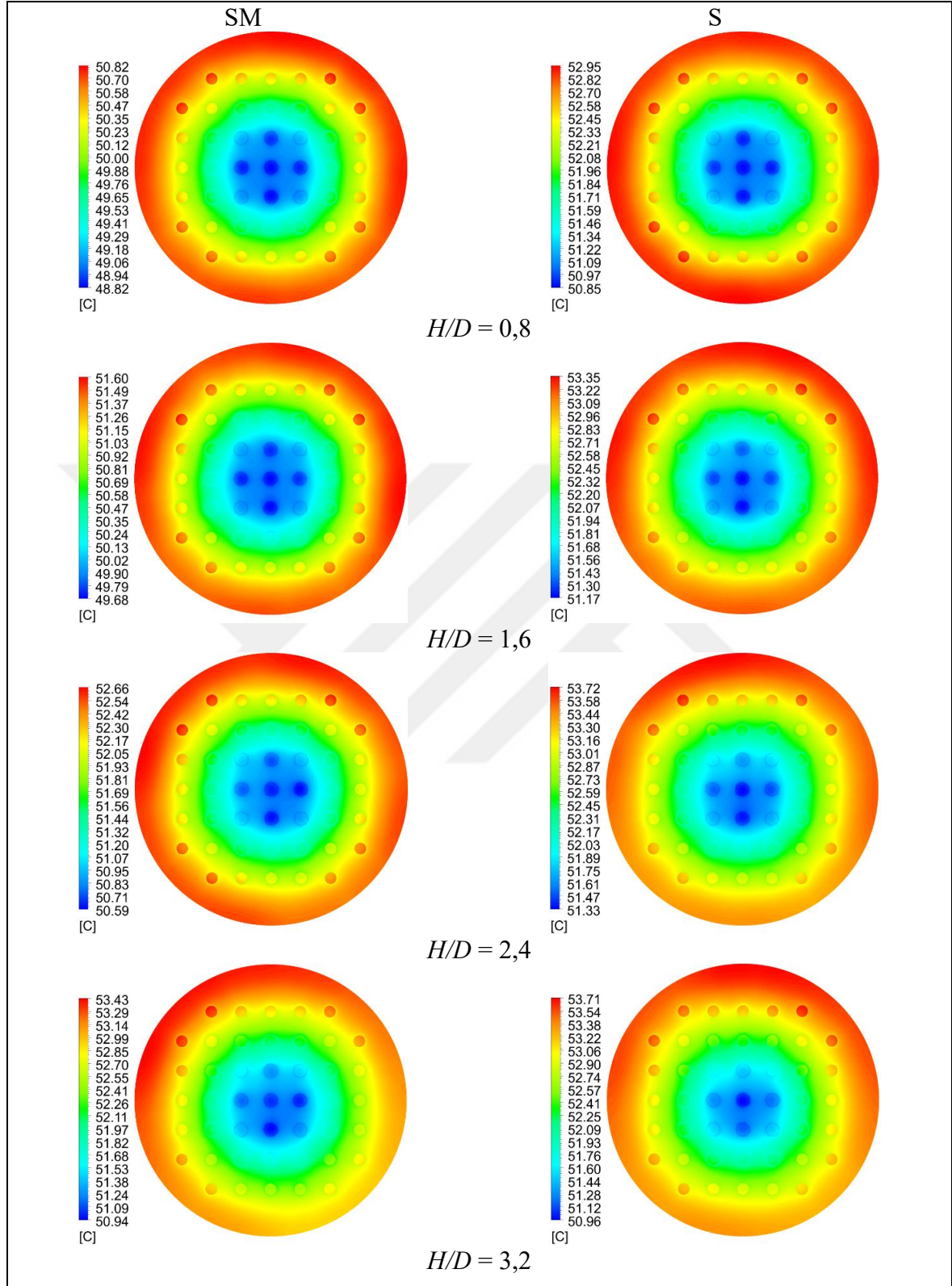
jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri debi oranı $Q^*=0,352$ için gösterilmiştir. Şeklin sol kolunu SM durumundaki sağ kolunu ise S durumundaki hız konturlarını ve akım çizgilerini göstermektedir. Şekil 6.21’de hem SM durumunda hem S durumunda devridaim bölgelerinin meydana geldiği görülmüştür. Devridaim bölgelerinin oluşmasında kanatçıkların etkili olduğu söylenebilir. Diğer bir ifadeyle dar mesafeli kanatçık arasına giren jet, diğer kanatçığa çarparak yukarıya doğru yönelir. Kanatçıkların arasından çıkarken lüleden çıkan jet tarafından oluşturulan düşük basınç bölgesine doğru çekilmesiyle devridaim bölgelerinin meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 6.21. DİHJ ile P2'nin farklı H/D 'lerde SM ve S durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri

$H/D = 3,2$ 'de devridaim bölgelerinin zayıfladığı görülmüştür. Bu durum artan H/D ile lüleden çıkan jetin çarpma plakasına doğru hızının azalmasıyla açıklanabilir. Engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak S durumundaki akım çizgilerinin çarpma plakasına paralel olduğu görülmüştür. S durumunda durgun ortam akışkanı sadece çıkış alanından (H/D aralığı kadar açıklıktan) jete dahil edilir. SM durumunda ise durgun ortam akışkanı artan çıkış alanından (H/D aralığı ve lülenin yan kısımları) çarpan jete dahil edildiği görülmüştür.

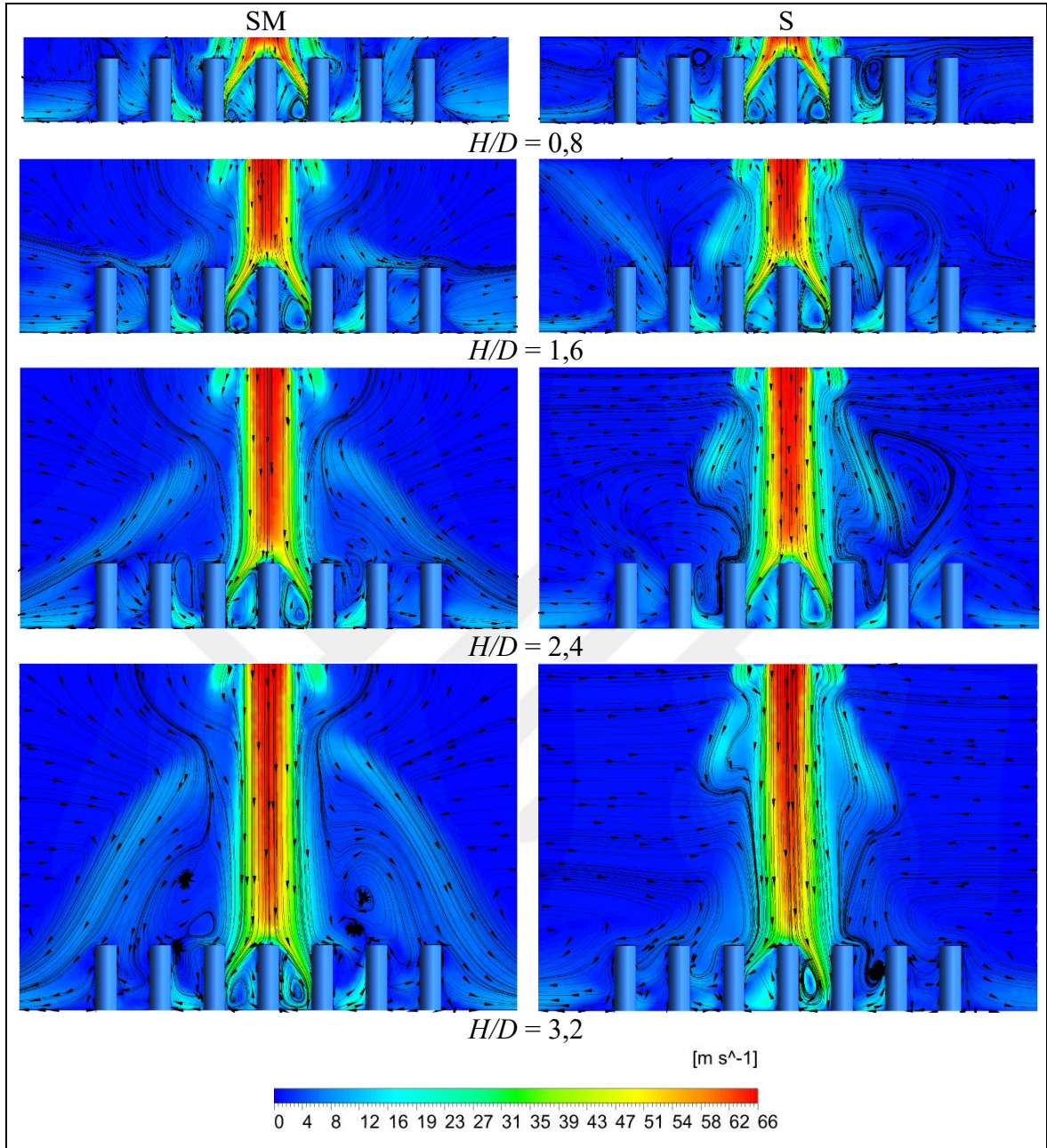
Şekil 6.22'de eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) için farklı H/D 'lerde sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ için kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasında (P6) oluşan sıcaklık konturları gösterilmiştir. Şeklin sol kolonu SM durumundaki, sağ kolonu ise S durumundaki sıcaklık konturlarını göstermektedir. Hem SM hem de S durumlarında eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüle geometrisinin çarpma plakası üzerindeki sıcaklık dağılımına geometrik olarak yansıdığı görülmüştür. Düşük mesafelerde sekizgen şekline benzeyen sıcaklık dağılımının lüle-plaka mesafenin artmasıyla daire şekline döndüğü görülmüştür. Diğer bir ifadeyle birleşik lülenin sıcaklık dağılımında meydana getirdiği geometrik etkinin artan lüle-plaka mesafeyle etkisini kaybettiği söylenebilir. S durumunda meydana gelen sıcaklıkların SM durumuna göre biraz daha fazla olması da engelleyici plakanın varlığının bir sonucu olduğu söylenebilir. Yani ortamdaki uzaklaşacak akışkanın kaçış alanının azalması ve durgun ortamdaki soğuk akışkanın çarpan jete dahil edilmesinin kısıtlanmasıyla açıklanabilir. Hem SM hem de S durumunda H/D 'nin artmasıyla plaka üzerinde meydana gelen sıcaklıkların jetin kinetik enerjisinin azalmasına bağlı olarak arttığı söylenebilir.



Şekil 6.22. DDHJ için farklı H/D 'lerde SM ve S durumlarında P6'da oluşan sıcaklık konturları

Şekil 6.23'te eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasında (P6) farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D)

sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri gösterilmiştir. Şeklin sol kolonu SM durumundaki, sağ kolonu ise S durumundaki hız konturlarını ve akım çizgilerini göstermektedir. Şekil 6.23'te hem SM durumunda hem de S durumunda devridaim bölgelerinin meydana geldiği görülmektedir. $H/D = 0,8$ 'de S durumunda lüle çıkışına yakın yerlerde devridaim bölgelerinin meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgeler SM durumunda görülmemiştir. Yakın lüle-plaka mesafesindeki devridaim bölgelerinin oluşumunda H/D 'nin, çarpma plakası yüzey geometrisinin, engelleyici plakanın ve kanatçık boyunun etkisi olduğu sonucuna varılabilir. Artan kanatçık boyuyla düşük lüle-plaka mesafesinde plakaya çarpan jet SM durumunda devridaim bölgesi oluşmadan doğrudan çıkışa yönelir. H/D 'nin 0,8'den 2,4'e kadar artmasıyla S durumundaki devridaim bölgelerinin kanatçıklar arasından yukarıya doğru genişlediği görülmüştür. Bu durum lüleden çıkan jetin oluşturduğu negatif basınç alanıyla, çarpan jeti yukarı doğru emmesinin bir sonucu olabilir. $H/D = 3,2$ 'de ise yukarıya doğru emmenin zayıflamasıyla ve jetin kanatçıklar arasına giriş açısına bağlı olarak devridaimin kanatçıklar arasında meydana geldiği söylenebilir. Devridaim bölgelerinin oluşumunun ve yerlerinin jetin kanatçık arasına giriş ve çıkış açısına, H/D 'ye, çarpma plakasının geometrisine, kanatçık boyuna, lüle geometrisine, engelleyici plakaya ve akış hızına bağlı olarak değiştiği söylenebilir. SM durumunda da devridaim bölgelerinin oluşumu ve yerlerinin bağlı olduğu sebepler S durumuyla aynı olmakla birlikte sadece SM durumunda engelleyici plakanın etkisi ortadan kalkmıştır.



Şekil 6.23. DDHJ ile P6'nın farklı H/D 'lerde SM ve S durumlarındaki hız konturları ve akım çizgileri

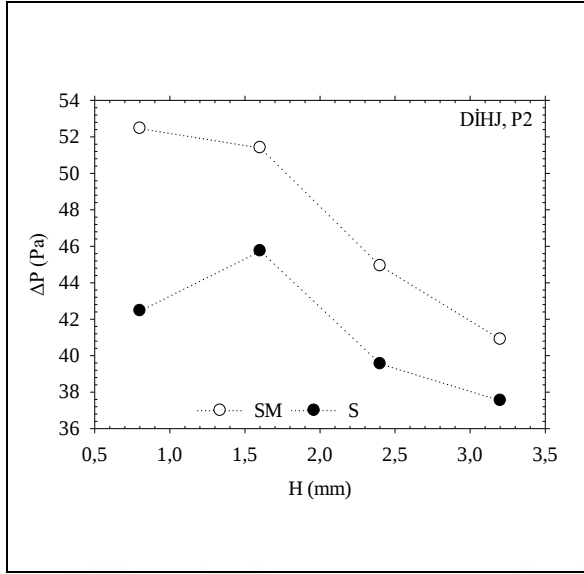
H/D 'nin artmasıyla SM durumunda helisel kısımdan çıkan helisel jetin, S durumuna göre çarpma plakası üzerinde daha fazla geniş alana yayıldığı görülmüştür. Bu, SM durumunda engelleyici plakanın bulunmamasına bağlı olarak durgun akışkanın çarpan jete dahil edilerek çarpma plakası üzerindeki yayılma alanının artmasıyla açıklanabilir. S durumunda engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak çevredeki durgun akışkan daha kısıtlı bir şekilde çarpan jete dahil edilmiştir. Bu ise jetin çarpma plakası üzerinde yayılmasının SM durumuna göre daha az olmasına neden olmuştur. Ayrıca SM durumunda çıkıştan çarpan jete dahil

edilen durgun akışkanın yayılan jeti kısıtlama etkisinin de S durumundakine göre daha düşük olduğu söylenebilir.

Şekil 6.21’de verilen DİHJ ile P2’nin hız konturları ve akım çizgileri Şekil 6.23’le karşılaştırıldığında oluşan devridaim bölgeleri ve konumları üzerinde döndürme yoğunluğunu artıran helisel kısımların sayısının da önemli olduğu söylenebilir. Şekil 6.23’te DDHJ ile P6’ da meydana gelen devridaimlerin Şekil 6.22’deki DİHJ ile P2’de meydana gelenlere göre boyutlarının büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca Şekil 6.23’te devridaimlerin çarpma plakasından yüksekte lüle çıkışına doğru konumlandıkları da görülmüştür. Bu durum DDHJ’de döndürme yoğunluğunu artıran helisel kısımların DİHJ’den fazla olmasıyla açıklanabilir. Diğer bir ifadeyle fazla dönme yoğunluğu, lüle çıkışında devridaimlerin oluşumuna sebep olan daha büyük negatif basınç alanları meydana getirir. Bu durumun ise DDHJ’nin etrafında DİHJ’ye göre devridaimlerin uzamasına ve lüle çıkışına doğru konumlanmasına sebep olduğu söylenebilir.

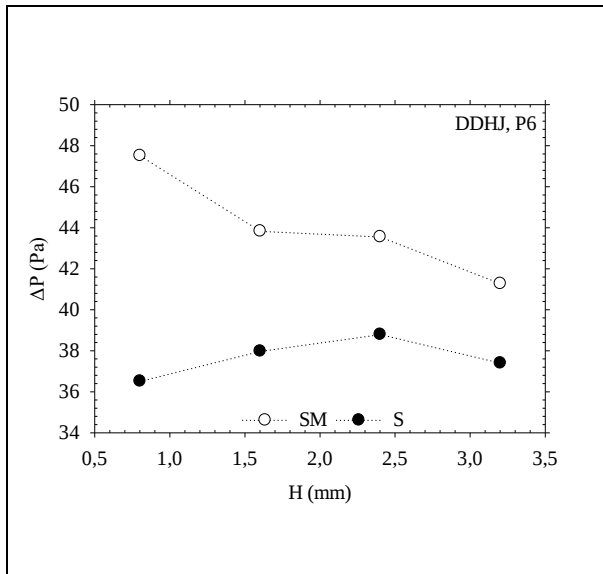
6.3.2. Basınç alanıyla ilgili sonuçlar

Şekil 6.24’te eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasında (P2), lüle-plaka mesafelerinde (H) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında meydana gelen ortalama basınç düşüşü (ΔP) gösterilmiştir. Ortalama basınç düşüşü toplam hacimsel debi $Q_t = 85$ L/dk’da, hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ ’de sabit tutularak elde edilmiştir. H ’nin artmasıyla SM durumunda basınç düşüşünün azaldığı görülmüştür. Bu durum artan H ile jetin çarpma plakası üzerinde yayılmasıyla kinetik enerjisinin azalması ve eksenel momentumunun düşmesiyle açıklanabilir. S durumunda ise $H = 8$ mm’den 16 mm’ye artarken basınç düşüşünün de arttığı görülmüştür. Bu durum engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak $H = 8$ mm’de çarpma plakası üzerinde meydana gelen devridaim bölgeleriyle ilişkilendirilebilir (Bkz. Şekil 6.21). Diğer bir ifadeyle plakanın hemen bitişiğindeki devridaim bölgelerinin basınç düşüşünü azaltıcı etki yaptığı yani eksenel yönde plakaya dik olarak gelen jeti devridaime dahil ederek eksenel momentumu azalttığı söylenebilir. H ’nin 8 mm’den 16 mm’ye artmasıyla devridaim bölgelerinin çarpma plakası üzerinden yukarı yönde hareket etmesi ve de devridaimlerin çarpan jeti döndürme etkilerinin zayıflamasıyla S durumundaki basınç düşüşünün arttığı söylenebilir. S durumunda $H = 16$ mm’den 32 mm’ye artarken SM durumunda olduğu gibi jetin kinetik enerjisinin azalmasına bağlı olarak basınç düşüşü azalmıştır.



Şekil 6.24. P2 üzerinde farklı H 'lerde meydana gelen basınç düşüşü

Şekil 6.25'te eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile kanatçık boyları 6 mm olan çarpma plakasında (P6), farklı lüle-plaka mesafelerinde (H) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında meydana gelen ortalama basınç düşüşü (ΔP) gösterilmiştir. Ortalama basınç düşüşü toplam hacimsel debi $Q_t = 85 \text{ L/dk}$ 'da hacimsel debi oranı $Q^* = 0,352$ 'de sabit tutularak elde edilmiştir. H 'nin artmasıyla SM durumunda basınç düşüşünün azaldığı görülmüştür. Bu durum H 'deki artışla jetin çarpma plakası üzerinde yayılmasıyla kinetik enerjisinin azalması ve eksenel momentumunun düşmesiyle açıklanabilir.



Şekil 6.25. P6 üzerinde farklı H 'lerde meydana gelen basınç düşüşü

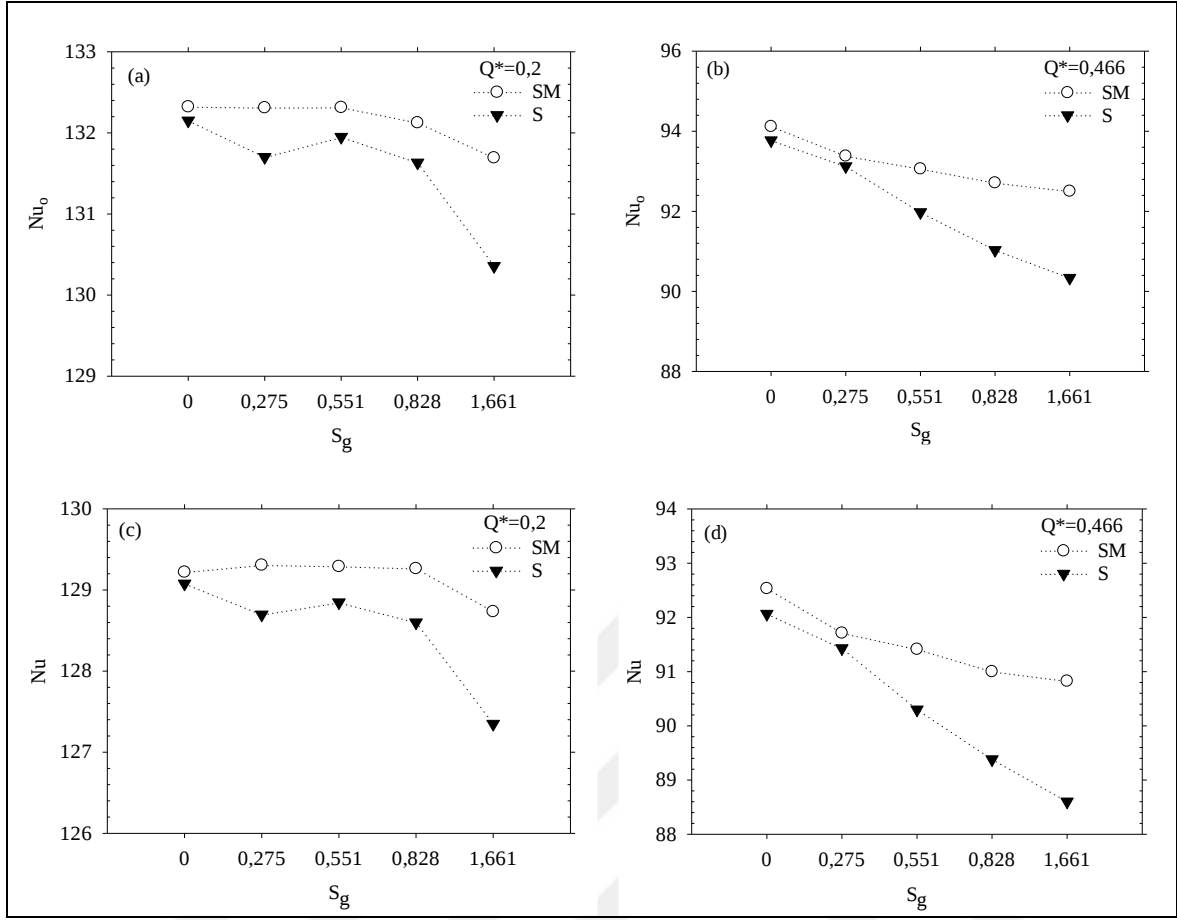
S durumunda ise $H = 8$ mm'den 24 mm'ye artarken basınç düşüşünün de arttığı görülmüştür. Bu durum engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak çarpma plakası üzerinde meydana gelen devridaim bölgeleriyle ilişkilendirilebilir (Bkz. Şekil 6.23). Diğer bir ifadeyle plakanın hemen bitişiğindeki devridaim bölgelerinin basınç düşüşünü azaltıcı etki yaptığı yani eksenel yönde plakaya dik olarak gelen jeti devridaime dahil ederek eksenel momentumunu azalttığı söylenebilir. Ayrıca kanatçıkların boyunun ve döndürme yoğunluğunu artıran helisel sayısının artmasının bu basınç düşüşü üzerine etkili olduğu Şekil 6.24'te verilen sonuçlarla kıyaslanarak söylenebilir. H 'nin 24 mm'ye kadar artmasıyla devridaim bölgelerinin çarpma plakası üzerinden yukarı yönde hareket etmesi ve de devridaimlerin çarpan jeti döndürme etkilerinin zayıflamasıyla S durumundaki basınç düşüşünün arttığı söylenebilir. $H = 32$ mm'de ise SM durumunda olduğu gibi S durumunda da jetin kinetik enerjisinin azalmasına bağlı olarak basınç düşüşü de azalmıştır.

6.4. Farklı Girdap Numaralı Lülelerle Oluşturulan Birleşik Çarpmalı Jetlerin Sayısal Sonuçları

Farklı girdap numaralı lülelerle oluşturulan birleşik çarpmalı jetlerin sayısal sonuçları bu kısımda verilmiştir.

6.4.1. Isı transferiyle ilgili sonuçlar

Farklı girdap numaralı (S_g) eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin (DDHL) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış (S) jet durumunda durma noktasındaki Nusselt sayısı (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısına (Nu) etkileri Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Şekil 6.26'da SM durumu içi boş sembollerle gösterilirken S durumu ise içi dolu sembollerle gösterilmiştir. Toplam hacimsel debi $Q_t = 75$ L/dk'da sabit iken, hacimsel debi oranının artması ($Q^* = 0,2$ 'den $0,466$ 'ya) helisel kısma gönderilen akışkanın hacimsel debisinin arttığını gösterirken, dairesel kısma gönderilen akışkanın hacimsel debisinin azaldığı anlamına gelir. Literatürde debi oranının [25] ve girdap numarasının [21, 68] hem ısı transferi büyüklüğü hem de üniform ısı transferi üzerine etkili olduğu ifade edilmiştir. Dönme ve jetin yayılma etkisini artıran hacimsel debi oranının artması ($Q^* = 0,2$ 'den $0,466$ 'ya) hem SM ve hem de S durumunda Nu_o ve Nu 'nun her ikisinin de düşüşüne sebep olduğu görülmüştür. Debi oranı artışının karışımı artırarak ısı transferini iyileştirmesinden ziyade jetin plaka üzerinde yayılmasında daha etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 6.26. Farklı girdap numaralı DDHL'nin SM ve S durumlarında Nu_o 'a etkisi (a) $Q^* = 0,2$, (b) $Q^* = 0,466$ ve Nu 'ya etkisi (c) $Q^* = 0,2$, (d) $Q^* = 0,466$

Girdap numarasının (S_g), $Q^* = 0,2$ 'de artmasının SM durumunda Nu_o ve Nu 'da büyük bir düşüşe sebep olmadığı görülmüştür. S durumunda ise düşüşün özellikle $S_g = 1,661$ 'de biraz daha fazla olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 6.26(a), (c)). S_g 'nin $Q^* = 0,466$ 'da artması $Q^* = 0,2$ 'ye göre Nu_o ve Nu 'daki düşüşleri SM ve S durumlarında daha fazla artırdığı görülmüştür (Bkz. Şekil 6.26(b), (d)). Bu ise artan Q^* ile S_g 'nin ısı transferi üzerine etkisinin arttığını gösterir. $Q^* = 0,2$ 'den $0,466$ 'ya artmasıyla ısı transferi büyüklüğünün azalması, çarpma plakası üzerindeki basınç düşüşünün $Q^* = 0,2$ 'den $0,466$ 'ya azalmasıyla ilişkilendirilebilir (Bkz. Şekil 6.33). Bu durum Q^* artışının eksenel momentumu azaltarak jetin yayılmasını artıran teğetsel momentumu artırmasıyla açıklanabilir.

S durumundaki ısı transferinin her durumda SM durumundan çok az da olsa düşük olduğu görülmüştür ve fark artan S_g ile artmıştır. Benzer durum sadece dönen jette $H/D = 1$ için literatürde de mevcuttur [121]. S durumunun ısı transferinin SM durumundan biraz daha düşük olması engelleyici plakanın varlığıyla açıklanabilir. Diğer bir ifadeyle çevredeki

durgun akışkanın lüleden çıkan jet tarafından sürüklenerek çarpan jete dahil edilmesine engelleyici plakanın engel olmasıyla açıklanabilir.

Çizelge 6.2’de sınırlandırılmamış jet (SM) durumuna göre sınırlandırılmış jet (S) durumundaki ısı transferi düşüşü (λ) $Q^* = 0,2$ ve $0,466$ için yüzde olarak gösterilmiştir. Genel olarak S_g ’nin artmasıyla, her hacimsel debi oranında SM’ye göre S’deki ısı transferinin azaldığı görülmüştür. Bu durum, engelleyici plakanın yüksek S_g ’de ısı transferi üzerinde daha etkili olduğunu gösterebilir. Diğer taraftan hacimsel debi oranı $Q^* = 0,466$ ’daki ısı transferi düşüşünün genel olarak $Q^* = 0,2$ ’ye göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu S durumunda bulunan engelleyici plakanın, artan S_g ve Q^* ile ortamdaki durgun akışkanın jetin içerisine sürüklenmesine engel olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca artan S_g ile jete daha fazla ortam akışkanının dahil edilebileceği de söylenebilir. Bir de hacimsel debi oranı sabitken artan girdap numarasının ısı transferi düşüşü üzerine etkisinin arttığı söylenebilir.

Çizelge 6.2. SM durumuna göre S durumundaki ısı transferi düşüşünün (λ) yüzde değerleri

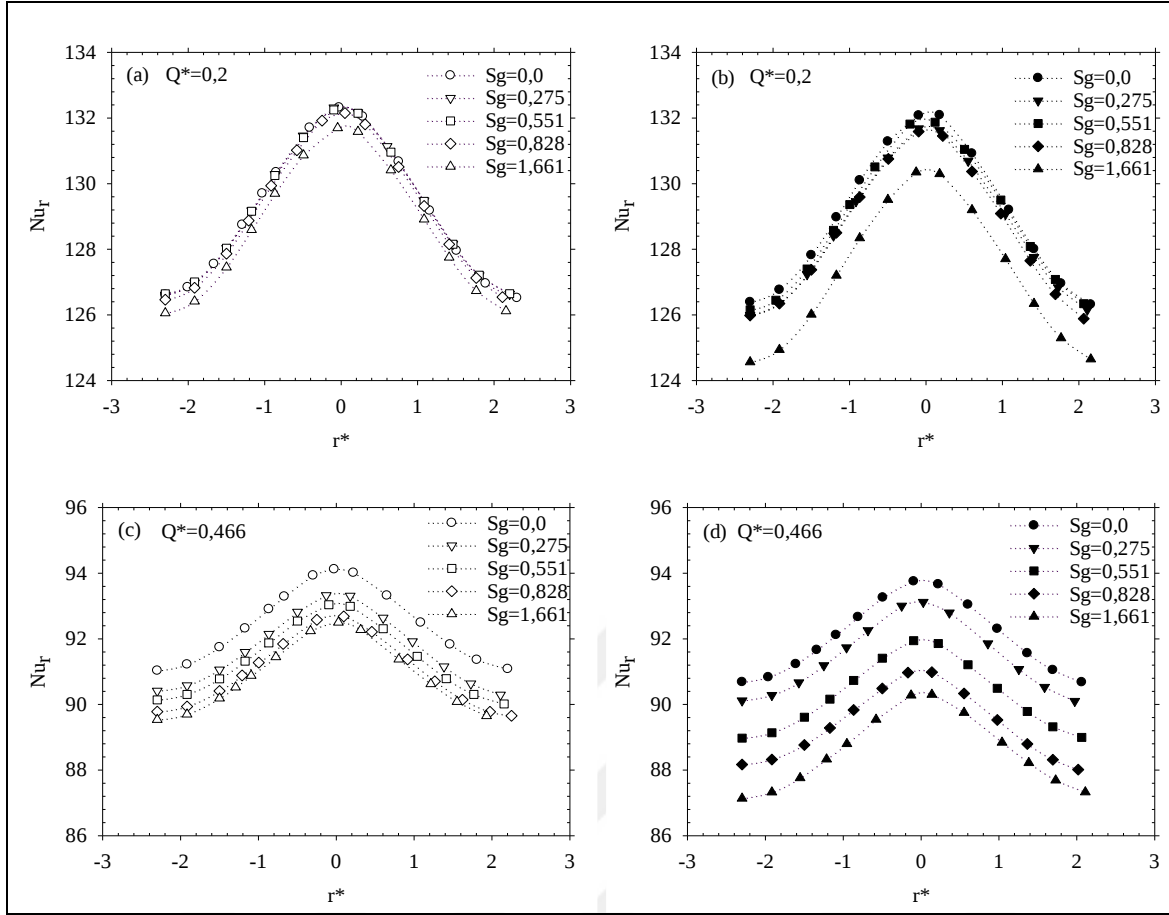
Q^*	S_g				
	0,0	0,275	0,551	0,828	1,661
0,2	0,1	0,4	0,3	0,5	1,1
0,466	0,5	0,3	1,2	1,8	2,5

Çizelge 6.3’te Q^* ’ın $0,2$ ’den $0,466$ ’ya artmasıyla SM ve S durumlarında meydana gelen ısı transferi düşüşü yüzde olarak verilmiştir. SM ve S durumlarındaki düşüşlerin her ikisinin de birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Girdap numarası sabit iken artan hacimsel debi oranıyla S durumunda meydana gelen ısı transferi düşüşünün SM’ye göre genel olarak daha fazla olduğu görülmüştür. Girdap numarasının artmasıyla ısı transferi düşüşünün hem SM hem de S için arttığı görülmüştür. SM durumunda artan hacimsel debi oranı ile $Q^* = 0,2$ ’ye göre $Q^* = 0,466$ ’da değişen girdap numarasına bağlı olarak %28,4 ile %29,5 arasında bir azalma olmuştur. S’de ise %28,7 ile %30,4 arasında bir düşüş olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.3. Hacimsel debi oranındaki artışla ısı transferindeki yüzde düşüş değerleri

$((Nu_{Q^*0,2} - Nu_{Q^*0,466})/Nu_{Q^*0,2}) \times 100$		
S_g	SM	S
0,0	28,4	28,7
0,275	29,1	29,0
0,551	29,3	30,0
0,828	29,6	30,5
1,661	29,5	30,4

Farklı girdap numaralı (S_g) eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin (DDHL) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış (S) jet durumunda çarpma plakası üzerindeki yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımına etkisi Şekil 6.27’de verilmiştir. Şekillerde SM durumu içi boş sembollerle gösterilirken (Şekil 6.27(a), (c)), S durumu ise içi dolu sembollerle gösterilmiştir (Şekil 6.27(b), (d)). Literatüre bakılarak artan debi oranının (Q^*) [27, 28] ve girdap numarasının (S_g) [72, 75] çarpma plakası üzerinde jetin yayılmasını artırarak üniform ısı transferini artıran iki önemli faktör olduğu söylenebilir. Akışkanın çarpma plakası üzerindeki yayılması, lüle geometrisi [17, 64, 75] veya aerodinamik dinamik [45, 80] olarak oluşturulan teğetsel hız bileşeniyle sağlanmıştır. Şekil 6.27(a), (b)’de SM ve S durumlarındaki Nu_r dağılımlarının hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,2$ ’de engelleyici plakanın Nu_r dağılımı üzerinde ($S_g = 1,661$ hariç) etkili olmadığı söylenebilir. $Q^* = 0,466$ ’da farklı S_g ’ler için SM durumunda meydana gelen Nu_r dağılımlarının S durumuna göre birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. S durumunda ise Nu_r dağılımlarının birbirlerinden daha ayrı olduğu görülmüştür. Hacimsel debi oranı artışının Nu_r dağılımı üzerine engelleyici plaka ile S_g ’nin etkisini artırdığı söylenebilir (Şekil 6.27 (c), (d)).



Şekil 6.27. Farklı girdap numaralı DDHL'nin Nu_r dağılımına etkisi SM durumunda (a) $Q^* = 0,2$, (c) $Q^* = 0,466$ ve S durumunda (b) $Q^* = 0,2$, (d) $Q^* = 0,466$

Önceki çalışmalarda sadece dönen çarpan jette eyer şekli (saddle profile) oluşumunun düşük lüle-plaka mesafelerinde veya artan girdap numarası [17, 75] ile daha belirgin hale geldiği belirtilmiştir. Eyer oluşumu durma noktasında düşük ısı transferi ve daha sonra radyal yönde bir tepe noktası ısı transferi oluşumu olarak ifade edilmiştir. Mevcut sunulan çalışmada farklı girdap numaralı birleştirilmiş çarpmalı jetlerin en önemli avantajlarından biri girdap numarası ve hacimsel debi oranının artmasına rağmen Nu_r dağılımında eyer oluşumunun görülmemiş olmasıdır. Bu birleşik lülenin helisel kısım ile döndürme etkisi sağlarken aynı zamanda merkezi de dairesel jetle desteklemesiyle açıklanabilir.

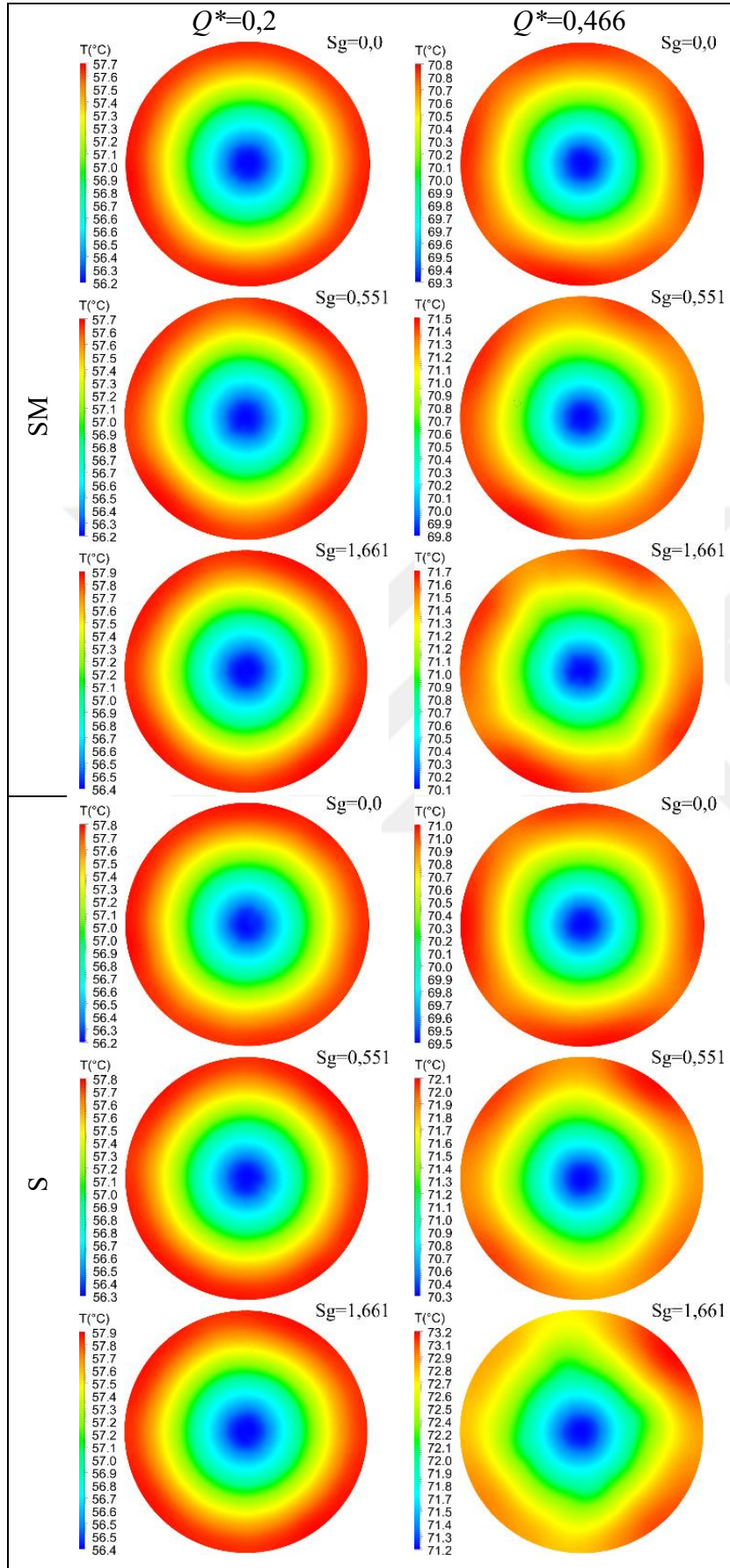
Çizelge 6.4'te en yüksek ısı transferinin olduğu durma noktası ($r^* = 0$) ile radyal yönde en düşük ısı transferinin olduğu yer ($r^* = 2,3$) dikkate alınarak çarpma plakası üzerindeki üniform ısı transferi (Ψ) değerleri yüzde olarak sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumları için farklı girdap numaraları (S_g) ve hacimsel debi oranları (Q^*) için verilmiştir. Genel olarak hem SM hem de S durumunda $Q^* = 0,466$ 'daki ısı

transferi üniformluğunun $Q^* = 0,2$ 'ye göre daha iyi olduğu görülmüştür. Q^* 'ın artmasının S_g 'nin artmasına göre üniform ısı transferinde daha fazla iyileşme sağladığı söylenebilir. Aynı Q^* 'ların SM ve S durumlarındaki üniform ısı transferlerinin birbirlerine yakın olması engelleyici plakanın ısı transferi sapması üzerine çok da etkili olmadığını gösterir.

Çizelge 6.4. SM ve S durumlarında meydana gelen üniform ısı transferinin (Ψ) yüzde olarak değerleri

S_g	SM		S	
	$Q^* = 0,2$	$Q^* = 0,466$	$Q^* = 0,2$	$Q^* = 0,466$
0,0	4,3	3,3	4,4	3,3
0,275	4,3	3,2	4,3	3,2
0,551	4,3	3,1	4,4	3,3
0,828	4,3	3,2	4,3	3,1
1,661	4,3	3,2	4,5	3,6

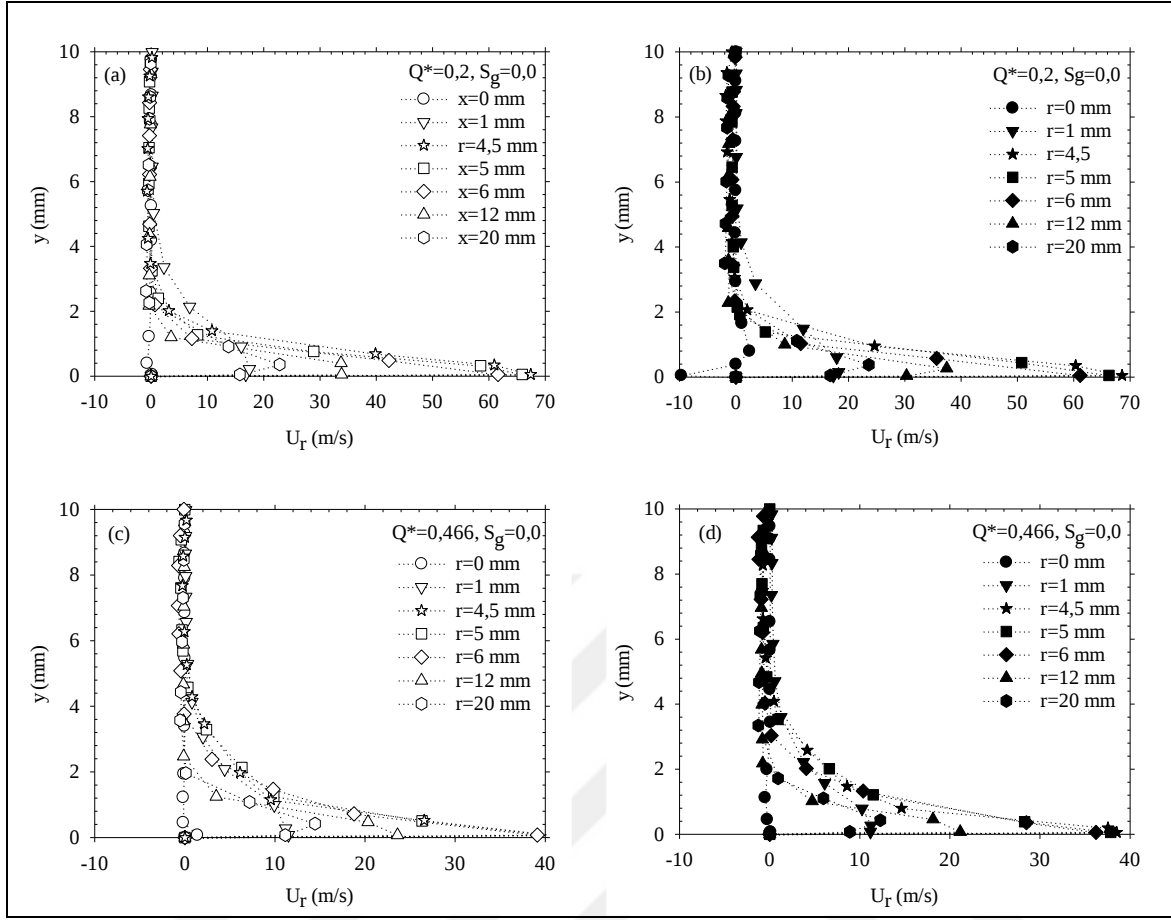
Şekil 6.28'de farklı girdap numaralı (S_g) eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin (DDHL) sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında çarpma plakası üzerinde meydana gelen sıcaklık konturları verilmiştir. $Q^* = 0,2$ 'de sıcaklıklar hemen hemen tüm girdap numaralarında hem SM hem de S için aynı kalmıştır. $Q^* = 0,466$ 'da S_g 'nin artmasıyla S durumunda SM'ye göre biraz daha fazla sıcaklık artışı olduğu görülmüştür. Ayrıca $Q^* = 0,466$ 'da jetin çarpma plakası üzerindeki yayılımının artan S_g ile $Q^* = 0,2$ 'ye göre daha belirgin hale geldiği görülmüştür.



Şekil 6.28. Farklı girdap numaralı DDHL için SM ve S durumlarındaki sıcaklık konturları

6.4.2. Akış alanıyla ilgili sonuçlar

Girdap numarası $S_g = 0,0$ olan eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin (DDHL) belli radyal mesafelerde lüle-plaka mesafesi $H = 10$ mm durumunda y -yönü boyunca radyal yöndeki hız dağılımları Şekil 6.29'da verilmiştir. $y = 0$ mm çarpma plakasının üzerindeki, $y = 10$ mm ise birleşik lülenin çıkışına denk gelen mesafeyi ifade eder. y 'nin 10 mm olduğu durum aynı zamanda y 'nin H 'ye eşit olduğunu da ifade eder. İçi boş semboller sınırlandırılmamış jet (SM) durumunu içi dolu semboller ise sınırlandırılmış jet (S) durumunu gösterir. Çarpmalı jet bölgesi durgunluk ve duvar jeti bölgesiyle karakterize edilir. Duvar jeti bölgesi, durma noktasındaki yüksek basınçlı ve hızı sıfır olan akışkanın radyal yöne dönerek hızlandığı bölge olarak bilinir. Literatürde lüle-plaka mesafesinin $0 < H/D < 12$ olduğu aralıkta, dairesel jetle oluşturulan radyal yöndeki duvar jetinin en yüksek hızının durma noktasına yaklaşık bir jet çapı kadar mesafede olduğu belirtilmiştir [130]. Şekil 6.29'da DDHL için benzer bir durum olduğu görülmüştür. Duvar jeti bölgesindeki en yüksek hız dairesel lülenin (D_l) çapına karşılık gelen radyal mesafede ($r = 4,5$ mm'de) meydana gelmiştir. Buna dayanarak dairesel jete ilave edilen helisel jetlerin ve hacimsel debi oranının (Q^*) en yüksek hızın oluştuğu mesafeyi etkilemediği söylenebilir. $Q^* = 0,2$ 'de radyal yöndeki U_r hızının tüm radyal mesafelerde $Q^* = 0,466$ 'dan yüksek olduğu görülmüştür. Q^* 'ın artmasıyla radyal yöndeki hızın hem SM ve hem de S durumunda azaldığı görülmüştür. Bu durum artan Q^* ile eksenel momentumun azalmasına bağlı olarak radyal yöndeki hızın da azalmasıyla açıklanabilir. Aynı Q^* 'larda SM ve S durumlarındaki radyal hız U_r 'nin hemen hemen aynı kalması, engelleyici plakanın radyal hız üzerinde lüle plaka mesafesi $H = 10$ mm'de etkisinin olmadığını göstermektedir.

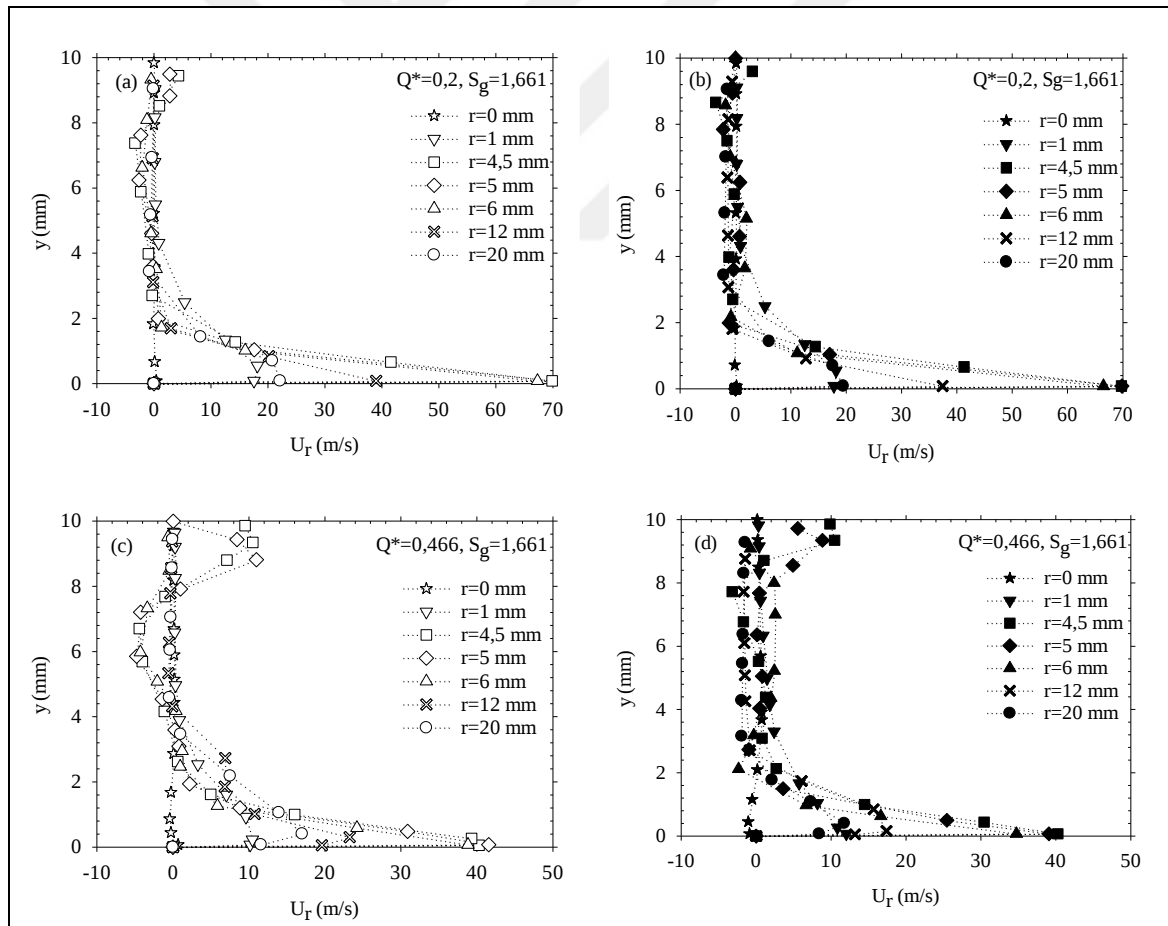


Şekil 6.29. $S_g = 0,0$ olan DDHL için plaka üzerindeki belli radyal mesafelerde radyal yöndeki hız dağılımı: SM durumunda (a) $Q^* = 0,2$, (c) $Q^* = 0,466$, S durumunda (b) $Q^* = 0,2$, (d) $Q^* = 0,466$

Duvar jetinin ortalama hız profili duvardan en yüksek hız noktasına kadar uzanan bir sınır tabakası şekli sergiler. Daha sonra maksimum hızdan serbest akış hızına gelir ve burada serbest jet akış şekli ile birleşir [131]. DDHL’de hem SM hem de S durumları için $Q^* = 0,2$ ’deki en yüksek radyal hızın $r = 4,5$ mm’de meydana geldiği ve çarpma plakasından yüksekliğinin $y = 0,08$ mm olduğu görülmüştür. Ayrıca $Q^* = 0,466$ ’da hem SM hem de S durumları için en yüksek radyal hızın $r = 4,5$ mm’de meydana geldiği ve çarpma plakasından yüksekliğinin $y = 0,097$ mm olduğu görülmüştür. Sonuçlar, Q^* ’ın artmasıyla birlikte duvar jeti hızının azalmasına bağlı olarak sınır tabaka yüksekliğinin arttığını göstermiştir.

Girdap numarası $S_g = 1,661$ olan eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin (DDHL) belli radyal mesafelerde lüle-plaka mesafesi $H = 10$ mm durumunda y -yönü boyunca radyal yöndeki hız dağılımları Şekil 6.30’da verilmiştir. $y = 0$ mm çarpma plakasının üzerindeki, $y = 10$ mm ise birleşik lülenin çıkışına denk gelen mesafeyi ifade eder. y ’nin 10 mm olduğu

durum aynı zamanda y 'nin H 'ye eşit olduğu durumu göstermektedir. İçi boş semboller sınırlandırılmamış jet (SM) durumunu için dolu semboller ise sınırlandırılmış jet (S) durumunu gösterir. Duvar jeti bölgesindeki en yüksek hız dairesel lülenin (D_I) çapına karşılık gelen radyal mesafede ($r = 4,5$ mm'de) meydana gelmiştir. Buna dayanarak dairesel jete ilave edilen helisel jetlerin ve hacimsel debi oranının (Q^*) en yüksek hızın oluştuğu mesafeyi etkilemediği söylenebilir. $Q^* = 0,2$ 'de radyal yöndeki U_r hızı, tüm radyal mesafelerde $Q^* = 0,466$ 'dan yüksek olduğu görülmüştür. Q^* 'ın artmasıyla radyal yöndeki hız hem SM hem de S durumunda azalmıştır. Bu durum artan Q^* 'ın eksenel momentumu azaltmasına bağlı olarak radyal yönde meydana gelen hızı da azaltmasıyla açıklanabilir. Aynı Q^* 'larda SM ve S durumlarındaki radyal hız U_r 'nin hemen hemen aynı kalması engelleyici plakanın radyal hız üzerinde lüle plaka mesafesi $H = 10$ mm'de çok da etkisinin olmadığını gösterir.

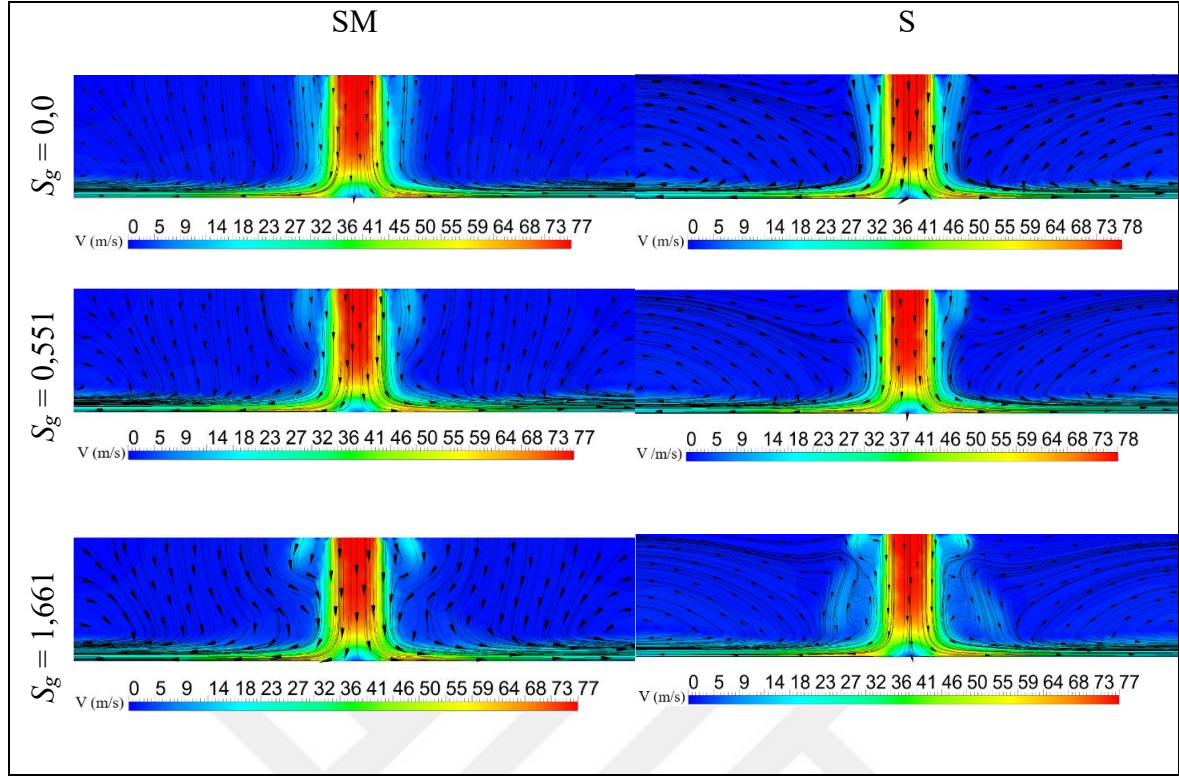


Şekil 6.30. $S_g = 1,661$ olan DDHL için plaka üzerindeki belli radyal mesafelerde radyal yöndeki hız dağılımı: SM durumunda (a) $Q^* = 0,2$, (c) $Q^* = 0,466$, S durumunda (b) $Q^* = 0,2$, (d) $Q^* = 0,466$

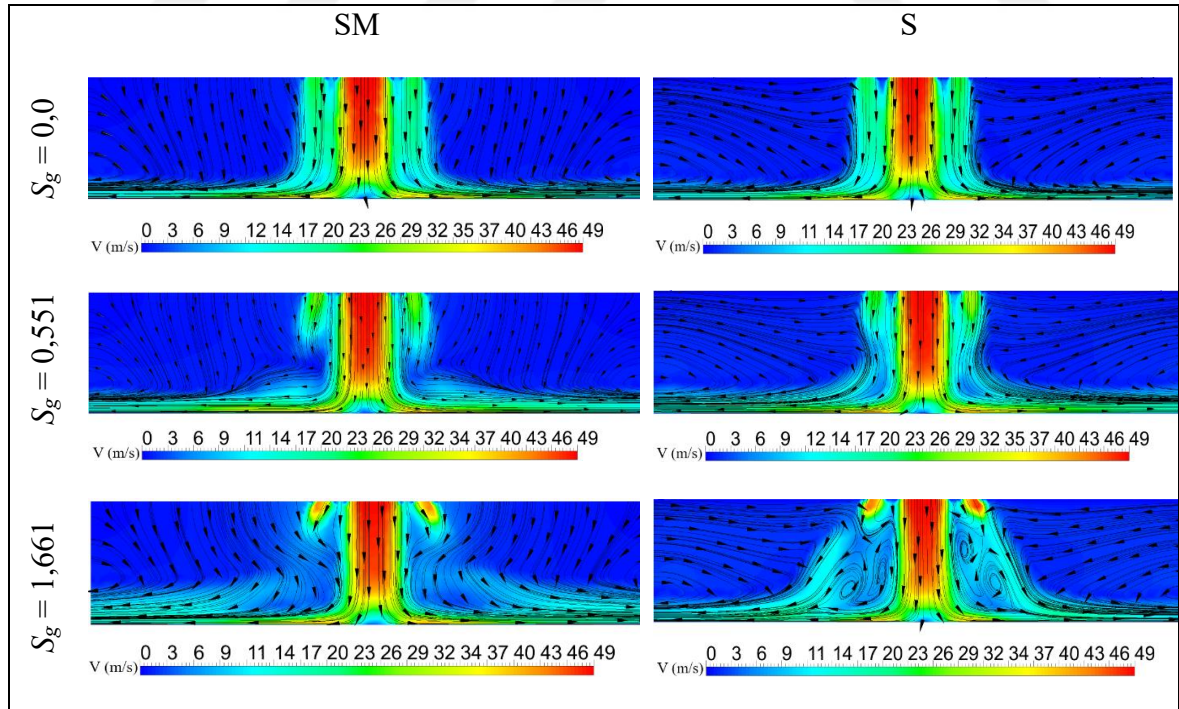
DDHL’de hem SM hem de S durumları için $Q^* = 0,2$ ’deki en yüksek radyal hızın $r = 4,5$ mm’de meydana geldiği ve çarpma plakasından yüksekliğinin $y = 0,08$ mm olduğu görülmüştür. Ayrıca $Q^* = 0,466$ ’da hem SM hem de S durumları için en yüksek radyal hızın $r = 4,5$ mm’de meydana geldiği ve çarpma plakasından yüksekliğinin $y = 0,092$ mm olduğu görülmüştür. Sonuçlar, Q^* ’ın artmasıyla birlikte duvar jeti hızının azalmasına bağlı olarak sınır tabaka yüksekliğinin arttığını göstermektedir. $S_g = 1,661$ ’de helisel lüleden çıkan jetlerin negatif hız dağılımlarına neden olduğu görülmüştür. Bu durum $Q^* = 0,466$ ’da daha da belirginleşmiştir.

Şekil 6.29 ve Şekil 6.30 karşılaştırıldığında artan girdap numarasının (S_g) hem SM hem de S durumu için her iki debi oranında da radyal hızı az da olsa artırdığı görülmüştür. Ayrıca $S_g = 0,0$ ve $S_g = 1,661$ için hemen hemen aynı sınır tabakası kalınlığı gözlemlenmiştir. Bu durum S_g ’nin sınır tabakası kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını gösterir.

Farklı girdap numaralı eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüle için sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında hız konturları ve akım çizgileri hacimsel debi oranı $Q^* = 0,2$ için Şekil 6.31’de, $Q^* = 0,466$ için Şekil 6.32’de gösterilmiştir. Şekillerin solundaki kolon SM durumundaki, sağdaki kolon ise S durumundaki hız konturlarını ve akım çizgilerini göstermektedir. Literatürde yüksek girdap numaralı dönmeli jette lüle çıkışının yakınında hem radyal hem de eksenel yönlerde güçlü bir basınç gradyanı gelişerek eksenel yönde devridaim bölgesi oluşturduğu belirtilmiştir [134]. Girdap bozulması olarak adlandırılan bu durumun dönen akışlarda teğetsel momentumun eksenel momentumu aştığı zaman meydana geldiği ifade edilmiştir. Girdap bozulması jetin hız profilinde ters bir basınç gradyanı nedeniyle jetin merkez hattı boyunca hızda yerel bir minimumla sonuçlanır [97]. Bu ise jetin çıkış merkezinde geri akışla birlikte devridaim bölgesi oluşmasına neden olur [65]. Literatürde girdap bozulmasının meydana geldiği girdap numarası aralıkları genelde $S = 0,48-0,94$ olarak belirtilmiştir [135]. Aynı zamanda girdap bozulmasıyla jetin merkezinde oluşan devridaim bölgesine bağlı olarak çarpma plakasının merkezinde düşük ısı transferi oluştuğu görülmüştür [68]. Şekil 6.31 ve 6.32’ye bakıldığında hacimsel debi oranı ve girdap numarasındaki artışın jetin merkezinde girdap bozulmasının neticesi olan devridaim bölgesi oluşmasına neden olmadığı görülmüştür. Bu durum mevcut olarak çalışılan birleşik lülenin üniform ısı transferi oluşturmasında önemli bir avantaj olarak görülebilir.



Şekil 6.31. Farklı girdap numaralı DDHL'nin SM ve S durumlarında $Q^* = 0,2$ 'deki hız konturları ve akım çizgileri



Şekil 6.32. Farklı girdap numaralı DDHL'nin SM ve S durumlarında $Q^*=0,466$ 'daki hız konturları ve akım çizgileri

Şekil 6.31 ve Şekil 6.32'nin her ikisinde de sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında ortam akışkanın jet tarafından sürüklenerek jete dahil edildiği görülmektedir. Başka bir ifadeyle helisel jetler ve duvar jeti duran akışkanı sürükleyerek ters yönde radyal hız bileşenini meydana getirmiştir.

SM durumunda sürüklenen akışkanın akım çizgileri her iki hacimsel debi oranında da aynı girdap numaraları için benzerlik göstermiştir. Girdap numarasının 0,0'dan 1,661'e artmasıyla eksenel jete yakın bölgelerde neredeyse eksenel jete paralel olan akım çizgilerinin eğrilik yarıçaplarının arttığı görülmüştür.

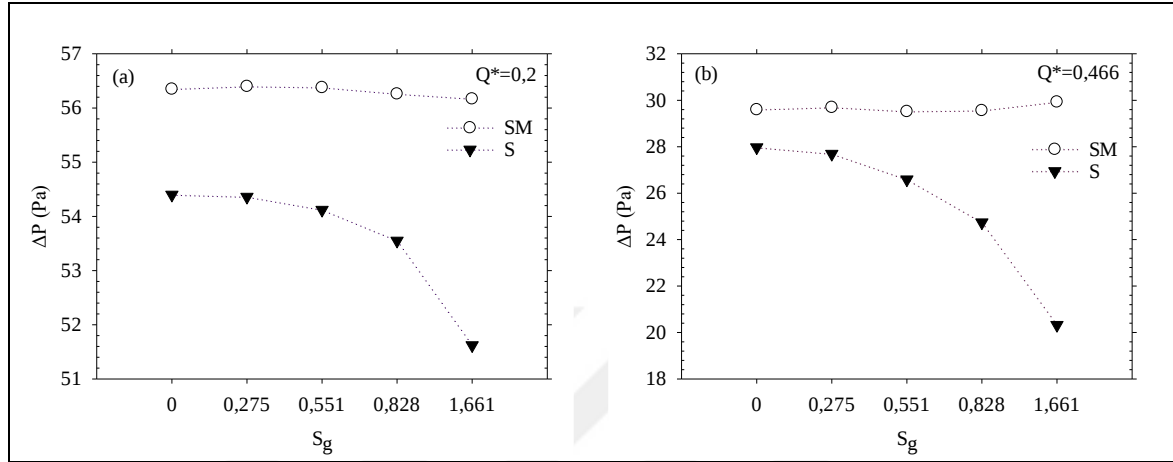
S durumunda ise engelleyici plakanın varlığından dolayı çevreden sürüklenen akışkanın akım çizgileri genel olarak daha yassı şekildedir. Her iki Q^* 'da S_g 'nin artmasıyla akım çizgilerinin birbirlerine yaklaştığı yani sürüklenen akışkanın hızının arttığı görülmüştür.

Literatürde H/D 'nin ve Reynolds sayısının artmasıyla devridaim bölgelerinin genişleyeceği ve çarpma plakasının üzerinde artan radyal mesafe yönünde hareket edeceği belirtilmiştir [133]. Şekil 6.31 ve 6.32'de genel olarak çarpma plakası üzerinde tam bir devridaim bölgesinin görülmemesi çarpma plakasının çapının çalışılan $H/D = 1$ ve jet hızlarına göre küçük kalmasıyla açıklanabilir. $S_g = 1,661$ 'de dairesel jetin yanında S durumunda devridaim bölgelerinin belirgin bir şekilde olduğu görülmüştür. Literatürde S durumundaki devridaim bölgelerinin oluşumu basınç altı bölgelerin varlığıyla desteklenmiştir [136]. Benzer şekilde $S_g = 1,661$ 'de S durumunda meydana gelen devridaim bölgeleri basınç altı bölgelerinin varlığıyla açıklanabilir (Bkz. Şekil 6.34). Ayrıca artan girdap numarasının merkez jet etrafında daha fazla negatif basınç oluşturarak devridaimlerin oluşmasına sebep olduğu da söylenebilir.

6.4.3. Basınç alanıyla ilgili sonuçlar

Farklı girdap numaralı eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüle için sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında çarpma plakası üzerindeki basınç düşüşü Şekil 6.33'te gösterilmiştir. Şekil 6.33(a) hacimsel debi oranı $Q^* = 0,2$ için ve Şekil 6.33(b) $Q^* = 0,466$ için elde edilen sonuçları göstermektedir. $Q^* = 0,2$ 'de çarpma plakası üzerindeki basınç düşüşünün $Q^* = 0,466$ 'daki basınç düşüşünden hem SM hem de S durumunda fazla olduğu görülmüştür. Bu Q^* 'ın artmasıyla jetin yayılmasına bağlı olarak eksenel yöndeki

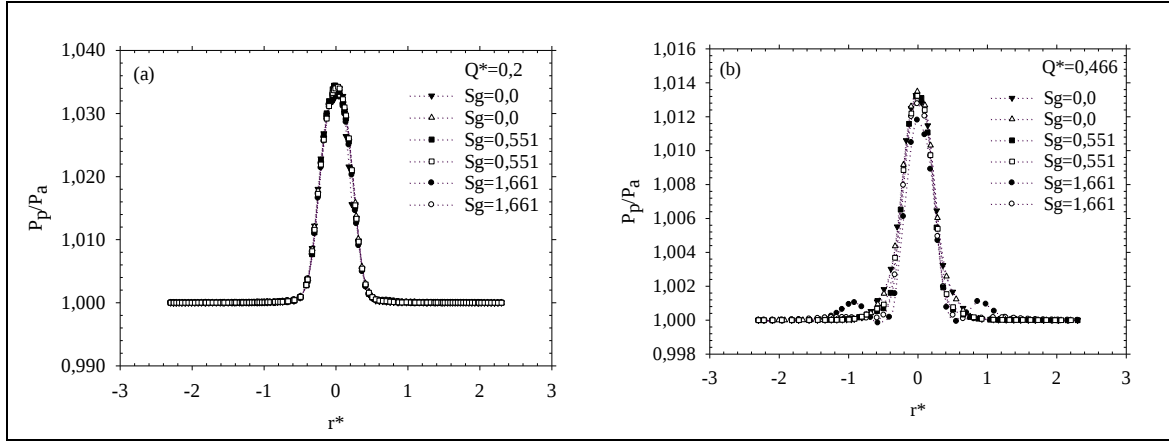
kinetik enerji ve eksenel momentumun azalmasıyla açıklanabilir. $Q^* = 0,2$ ve $0,466$ 'daki hacimsel debi oranlarının her ikisinde de SM durumundaki girdap numarasının artmasıyla S durumuna göre daha üniform basınç düşüşü gösterdiği görülmüştür. SM durumunda S_g 'nin artmasının basınç düşüşü üzerinde çok da etkili olmadığı söylenebilir.



Şekil 6.33. Farklı girdap numaralı eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lülenin SM ve S durumlarında basınç düşüşüne etkisi (a) $Q^* = 0,2$, (b) $Q^* = 0,466$

S durumunda ise her iki Q^* 'daki basınç düşüşünün S_g 'ye daha duyarlı olduğu görülmüştür. Artan S_g ile basınç düşüşü azalma göstermiştir. Engelleyici plakanın varlığı bu durumun ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Diğer bir ifadeyle engelleyici plakanın S_g 'nin eksenel momentumu düşürmesi üzerine etkisini artırdığı söylenebilir. Hacimsel debi oranının $0,2$ 'den $0,466$ 'ya artması S_g 'nin basınç düşüşü üzerindeki etkisini, dolayısıyla engelleyici plakanın basınç düşüşü üzerine etkisini daha ön plana çıkardığı söylenebilir. S durumunda girdap numarasının $0,0$ 'dan $1,661$ 'e artmasıyla basınç düşüşünde $Q^*=0,2$ ve $0,466$ için sırasıyla %5 ve %27'lik bir azalma meydana gelmiştir.

Farklı girdap numaralı (S_g) eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel lüle (DDHL) için sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarında çarpma plakası üzerinde radyal yön boyunca meydana gelen boyutsuz basınç dağılımı (P_p/P_a) Şekil 6.34'te gösterilmiştir. Boyutsuz basınç (P_p/P_a) ifadesi yerel basıncın atmosferik basınca oranıdır. Şekillerde içi boş semboller SM durumunu, içi dolu semboller ise S durumunu gösterir. Şekil 6.34(a)'da hacimsel debi oranı $Q^* = 0,2$ için farklı S_g 'lerde verilen basınç dağılımlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Hacimsel debi oranı $Q^* = 0,2$ 'de S_g 'nin basınç dağılımı üzerine hem SM hem de S durumunda fazla bir etkisinin olmadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 6.34. Farklı girdap numaralı DDHL'nin SM ve S durumlarında radyal mesafe boyunca basınç dağılımı: (a) $Q^* = 0,2$, (b) $Q^* = 0,466$

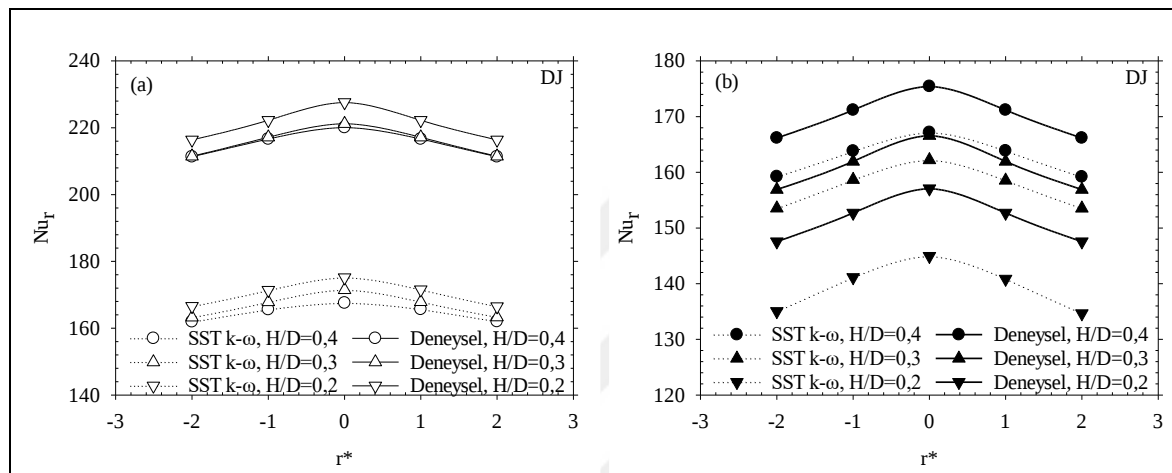
Şekil 6.34(b)'de hacimsel debi oranı $Q^* = 0,466$ 'daki basınç dağılımının S_g 'nin değişimine daha duyarlı olduğu söylenebilir. Durma noktasında ($r^* = 0$) $S_g = 1,661$ 'in S durumu hariç diğer girdap numaralarının hem SM hem de S durumlarında birbirlerine çok yakın değerler aldığı görülmüştür. Fakat radyal mesafe $r^* = 0,4$ 'ten sonra birbirlerinden çok az da olsa farklı davranış sergilemişlerdir. Durma bölgesinde yaygın eğilim gösteren basınç eğrilerinin S_g 'nin artmasıyla durma noktasına doğru daha dikey konumlandığı görülmüştür. Bu durum S_g 'nin artmasıyla helisellerden çıkan jetin daha ileri radyal mesafelere çarpması ve jetin merkez basıncına olan etkisinin azalmasıyla açıklanabilir. Helisel jetin plaka üzerinde ileri vurması, $S_g = 1,661$ 'in S durumunda $r^* = 0,8$ 'de yaptığı tepe noktasıyla açıkça görülebilir. Ayrıca $S_g = 1,661$ 'in SM durumunda $\pm 1,0 < r^* < \pm 1,6$ aralığında az da olsa basınçta artış görülmüştür. S durumunda $S_g = 1,661$ 'de oluşan atmosfer altı bölgeleri devridaim bölgelerinin oluştuğuna delil olarak gösterilebilir.

Hacimsel debi oranının $Q^* = 0,2$ 'den $0,466$ 'ya artması basıncın en yüksek olduğu yer $r^* = 0$ ile plakanın uç noktası olan $r^* = 2,3$ arasındaki sapmayı genel olarak azalttığı söylenebilir. $Q^* = 0,2$ 'de bu sapma %3,3 iken $Q^* = 0,466$ 'da %1,3'tür. Artan hacimsel debi oranında yüksek $S_g = 1,661$ 'deki basınç dağılımının dalgalı olmasına rağmen yine de $Q^* = 0,2$ 'ye göre daha düzgün basınç dağılımına sebep olduğu söylenebilir ve benzer durum literatürde de görülmüştür [28]. Durma noktasındaki basınç değerleri artan Q^* ile azalmıştır.



7. DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALARIN KIYASLANMASI

Şekil 7.1’de dairesel jet (DJ) ile düz çarpma plakasında (P0) yapılan deneysel ve sayısal çalışmanın farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) için yerel Nusselt sayısı (Nu_r) dağılımının karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekil 7.1(a) ve (b) sırasıyla sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki Nu_r dağılımını göstermektedir. Sayısal çalışma sonuçları SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak elde edilmiştir.

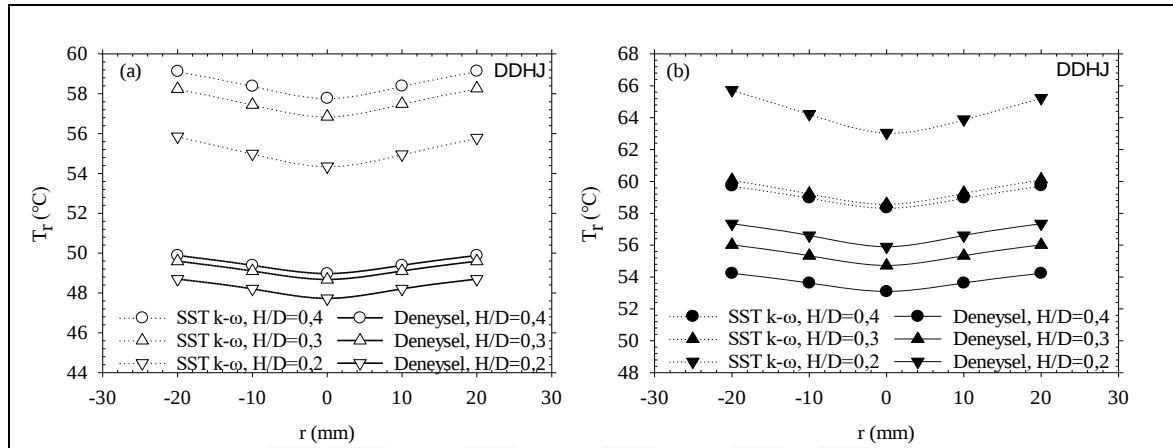


Şekil 7.1. DJ ile P0’da deneysel ve sayısal çalışmanın farklı H/D ’ler için Nu_r dağılımının karşılaştırılması (a) SM durumu, (b) S durumu

Şekil 7.1(a) ve (b)’de karşılaştırılan her bir sayısal ve deneysel çalışmanın aynı ısı transferi eğilimini gösterdiği görülmüştür. SM durumunda (Şekil 7.1(a)), deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki ısı transferi sapmasının %21 ile %24 arasında olduğu görülmüştür. Sapma büyüklüğünde meydana gelen farkın düşük lüle-plaka mesafesinde çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanı yüksekliğinden kaynaklanabileceği belirtilmiştir [17]. S durumunda ise (Şekil 7.1(b)) deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki ısı transferi sapması %4,2 ile %8,8 arasında değişmektedir.

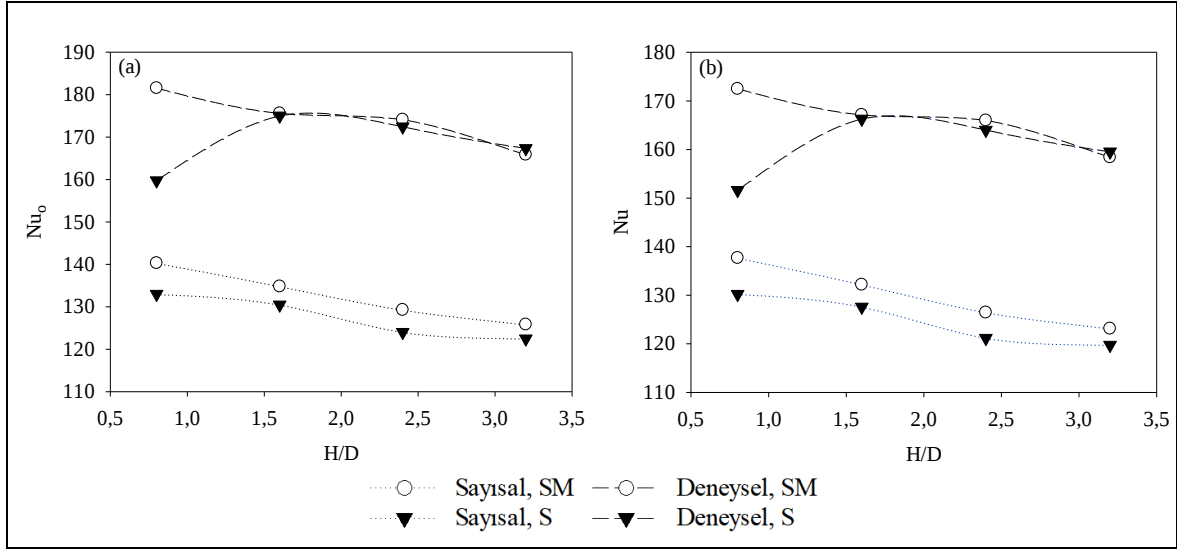
Şekil 7.2’de eş eksenli dairesel ve dörtlül helisel jetler (DDHJ) ile düz çarpma plakasında (P0) yapılan deneysel ve sayısal çalışmanın farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri (H/D) için yerel sıcaklık (T_r) dağılımının karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekil 7.1(a) ve (b) sırasıyla sınırlandırılmamış jet (SM) ve sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki T_r dağılımını göstermektedir. Sayısal çalışma sonuçları SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak elde edilmiştir.

SM durumunda (Şekil 7.2(a)) deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki sıcaklık dağılımının sapması %14,5 ile %18 arasında değişmektedir. S durumunda (Şekil 7.2(b)) deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki ısı transferi sapmasının %9,8-13,7 arasında değiştiği görülmüştür. Sonuçlara göre sayısal çalışmaların deneysel çalışmalarla uyum içerisinde olduğu söylenebilir.



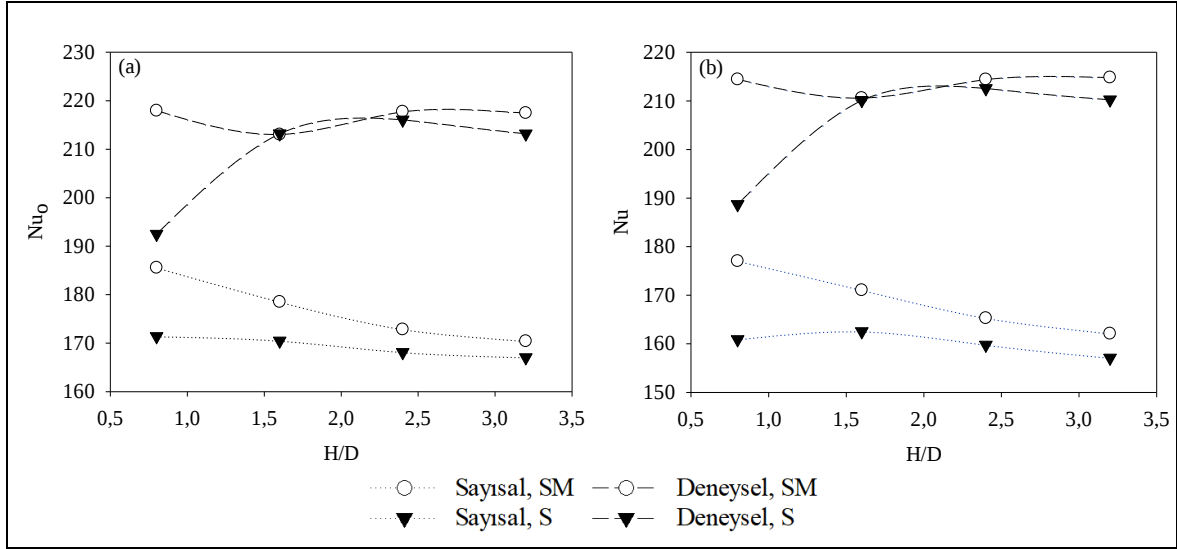
Şekil 7.2. DDHJ ile P0'da deneysel ve sayısal çalışmanın farklı H/D 'ler için T_r dağılımının karşılaştırılması (a) SM durumu, (b) S durumu

Şekil 7.3'te eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler (DİHJ) ile kanatçık boyları 2 mm olan çarpma plakasında (P2) yapılan deneysel ve sayısal çalışmanın farklı boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde (H/D) sınırlandırılmamış jet (SM) ile sınırlandırılmış jet (S) durumlarındaki ısı transferlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 7.3(a) ve (b) sırasıyla durma noktası Nusselt sayısı (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısını (Nu) gösterir. Sayısal çalışma sonuçları SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 7.3'teki içi boş semboller SM durumunu, içi dolu semboller ise S durumunu gösterir. SM ve S durumlarında deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki Nu_o sapması sırasıyla %22,7-24 ve %16,7-25 arasında değişirken (Bkz. Şekil 7.3(a)), Nu değerinin sapması yine SM ve S için sırasıyla %20,1-22,3 ve %14,1-24 arasında değiştiği görülmüştür (Bkz. Şekil 7.3(b)).



Şekil 7.3. D1HJ ile P2’de deneysel ve sayısal çalışmanın farklı H/D ’lerde ısı transferinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

Şekil 7.4’te DDHJ ile P6’da yapılan deneysel ve sayısal çalışmanın farklı H/D ’lerde SM ve S durumlarındaki ısı transferlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 7.4(a) ve (b) sırasıyla durma noktası Nusselt sayısı (Nu_o) ve ortalama Nusselt sayısını (Nu) göstermektedir. Sayısal çalışma sonuçları SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 7.4’teki içi boş semboller SM durumunu, içi dolu semboller ise S durumunu göstermektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki Nu_o sapması SM durumunda %14,9-21,6 ve S durumunda %10,9-21,6 (Şekil 7.4(a)); Nu sapması SM durumunda %14,7-24,5 ve S durumunda ise %14,7-24 (Şekil 7.4(b)) arasında değişmiştir.



Şekil 7.4. DDHJ ile P6’da deneysel ve sayısal çalışmanın farklı H/D ’lerde ısı transferinin karşılaştırılması (a) Nu_o-H/D , (b) $Nu-H/D$

Şekil 7.1-7.4’te verilen deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki sapmalarda birleşik çarpmalı jetlerin karmaşık akış yapısı ve türbülans modellerinin buna karşı yetersiz kalması dikkate alınmalıdır [26]. Literatürde türbülans modellerinin akış dinamiklerini ve durma noktasındaki ısı transferini tam olarak tahmin etmede yetersiz kaldığı ifade edilmiştir [66, 124]. Türbülans modellerinin durma noktasındaki başarısızlığı jetin hızının durma noktasında aniden sıfır olmasıyla türbülanslı akışta laminar akış koşullarının meydana gelmesiyle açıklanabilir. Bu durumun sayısal ve deneysel sonuçların sapmasına yol açtığı söylenebilir. Ayrıca sayısal sonuçların deneysel sonuçlardan sapması yoğun akış dalgalanmalarına, güçlü akış geçişlerine ve jetin çarpma alanı içindeki akış sınırlarının belirlenmesindeki zorluklarla da ilişkilendirildiği görülmektedir [73, 90]. Başka bir ifadeyle literatür göz önüne alındığında mevcut türbülans modellerinin çarpan jetlerin karmaşık ve zorlu fiziğini tam olarak yakalamakta yetersiz kaldığı söylenebilir. Diğer taraftan sayısal çalışmada helisel kısımlar için uygun hücre yapısının tanımlanmasındaki zorluklar sayısal çalışmanın deneysel çalışmadan sapmasına diğer bir neden olarak gösterebilir. Deneysel hatanın da en fazla %9,90 olduğu dikkate alındığında sayısal çalışmaların deneysel çalışmalardan olan sapma miktarlarının kabul edilebilir olduğu söylenebilir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mevcut tez kapsamında farklı çarpmalı jetlerin ısı transferi ve akış alanları deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır. Çalışmalarda etkin ve üniform ısı transferi istenen elektronik ekipmanların soğutulması amaçlanmıştır. Bu amaçla düşük lüle-plaka mesafesinde eksenel dairesel jet, düşük lüle-plaka mesafesinde dönen çarpmalı jet, birleşik çarpmalı jetler ve farklı girdap numaralı lüleler oluşturulan birleşik çarpmalı jetler tez kapsamında çalışılmıştır. Çalışılan parametreler çalışmadan çalışmaya farklılık göstermekle birlikte genel olarak şu şekildedir: Boyutsuz-lüle plaka mesafesi (H/D), toplam hacimsel debi (Q_t), hacimsel debi oranı (Q^*), lüle geometrisi, çarpma plakası geometrisi, sınırlandırılmamış jet (SM), sınırlandırılmış jet (S) ve girdap numarasıdır. Düşük lüle-plaka mesafesinde eksenel dairesel jet ile düz çarpma plakasının SM ve S durumları için hız konturları ve akım çizgilerinin birbirleriyle karşılaştırılarak verilmesi ve aynı zamanda ısı transferi üniformluğu ile ilgili verilen sonuçlar çalışmanın özgün bir yönüdür. Dönen çarpmalı jetlerde düşük-lüle plaka mesafesinde çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanı yüksekliğinin ısı transferi sonuçları üzerine etkisinin sayısal olarak araştırılması çalışmanın özgünlüğünün bir diğer yönünü oluşturur. Birleşik lüleler ile düz ve kanatçıklı plakaların ısı transferi ve akış alanı üzerine etkilerinin deneysel ve sayısal olarak SM ve S durumları için çalışılması ve sonuçların birbiriyle kıyaslanarak verilmesi bu çalışmanın diğer bir özgün yanını oluşturmaktadır. Ayrıca birleşik lülelerde, girdap numarası ile debi oranının ısı transferi ve akış alanı üzerine etkilerinin sayısal olarak incelenmesi tezin bir diğer özgün yönüdür.

Düz plakaya çarptırılan dairesel jet SM ve S durumları için düşük lüle-plaka mesafelerinde ($H/D = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$) ve $Q_t = 85 \text{ L/dk}$ 'da sabit tutularak deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır. SM ve S durumlarının sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak verilmiştir. S durumunda meydana gelen ortalama Nusselt sayısının SM durumuna göre %20-30 aralığında düşük olduğu görülmüştür. Bu değer literatürle uyum içerisindedir. S durumunda çarpma plakası üzerindeki akış hacmini dolduran akışkanın ortalama sıcaklığının SM durumuna göre yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenlerden dolayı elektronik ekipmanların düşük H/D 'lerde S durumunda soğutulmasının SM durumuyla kıyaslandığında uygun olmadığı söylenebilir. S durumunda artan H/D , Nu_o ve Nu' 'nin artışına neden olduğu gibi, sayısal çalışmada da artan H/D çarpma plakası üzerindeki basınç düşüşünün artışına sebep olduğu görülmüştür. Bu, SM durumunda tam tersi olarak gerçekleşmiştir. S durumunda artan H/D ile ısı transferinde görülen artış, artan H/D ile plaka üzerinde meydana

gelen basınç düşüşü artışıyla ilişkilendirilebilir. Fakat SM durumunda olduğu gibi S durumundaki basınç artışı, Nu ile birebir aynı trende sahip değildir. Bu ise S durumunda ısı transferi üzerine basınç düşüşünden başka engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak oluşan devridaim bölgeleri ve geri akış bölgeleri gibi etki eden baskın faktörlerle açıklanabilir. S durumundaki çarpan jet, çarpma plakasından ısıyı aldıktan sonra ortamdan kaçış alanı engelleyici plaka tarafından kısıtlanır. Ayrıca engelleyici plakanın varlığına bağlı olarak çarpma plakası ile engelleyici plaka arasındaki akışkanın sıcaklığı artar. Bu sebeple tüm H/D 'lerde S durumundaki ısı transferi SM durumuna göre düşüktür. Dairesel jetin düz plakada meydana getirdiği en iyi ısı transferi üniformluğunun sınırlandırılmamış jet durumunda $H/D = 0,4$ için %3,97 olarak bulunmuştur.

İkinci olarak, dönen çarpmalı jet ile düz plakanın düşük lüle-plaka mesafesinde ısı transferi ve akış alanı sayısal olarak çalışılmıştır. Çarpma plakası üzerine tanımlanan üç farklı hesaplama alanı yüksekliğinin ısı transferi üzerine etkisi literatürle karşılaştırılarak araştırılmıştır. Çözümler altı farklı türbülans modeliyle gerçekleştirilmiştir. Daha sonra farklı Reynolds sayıları ($Re = 2,1 \times 10^3, 4,1 \times 10^3, 6,1 \times 10^3, 8,1 \times 10^3$) ve boyutsuz düşük lüle-plaka mesafeleri ($H/D = 0,25, 0,5, 0,75, 1,0$) için ısı transferi ve akış alanı parametrik olarak incelenmiştir. Sonuçlar, ısı transferinin düşük H/D 'lerde çarpma plakası üzerine tanımlanan hesaplama alanı yüksekliğine duyarlı olduğunu göstermiştir. Girdap bozulması ve girdap üretici geometrisine bağlı olarak oluşan ve ısı transferi üniformluğunu olumsuz etkileyen eyer şeklindeki profil (saddle profile) görülmüştür. Bu sebeple çalışılan dönen çarpmalı jetin üniform ısı transferi istenen elektronik elemanların soğutulmasında kullanılmasının uygun olmadığı söylenebilir. $H/D < 1,0$ 'ın altında tüm Re 'ler için çarpma plakası üzerinde negatif basınç bölgeleri oluşmuştur. Ayrıca negatif basınç değerleri ile basınç tepe noktaları büyüklüklerinin hem Reynolds sayısının artmasıyla hem de H/D 'nin azalmasıyla arttığı görülmüştür. H/D sabit iken Re arttıkça teorik girdap numarası (S_m) azalmıştır. Re 'nin artışının teğetsel momentumdan ziyade ağırlıklı olarak eksenel momentumdaki artışı desteklediği görülmüştür. S_m 'nin üniform ısı transferi elde etmek için tek başına yeterli bir parametre olmadığı görülmüştür. Re 'nin artmasıyla momentum transferinde meydana gelen artış ısı transferini iyileştirmiştir. Isı transferi tepe noktası konumunun Re 'den etkilenmediği, ancak H/D azaldıkça durma noktasına doğru kaydığı görülmüştür. Re azaldıkça ısı transferinin H/D 'ye bağlılığı azalmıştır. Durma noktası ile tepe noktası ısı transferi değerlerinin birbirlerine göre sapma büyüklüklerinin H/D 'ye bağlı olduğu görülmüştür.

Üçüncü olarak, birleşik lülelerle üretilen hem dairesel hem helisel (dönen) jetler farklı H/D , Q_t , Q^* , SM ve S durumları için farklı plakalara çarptırılarak deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Çalışma sekiz farklı boyutsuz lüle-plaka mesafesi aralığı (H/D), altı farklı hacimsel debi oranı (Q^*) ve dört farklı toplam debi miktarı (Q_t) için yapılmıştır.

$0,1 \leq H/D \leq 0,4$ için birleşik çarpmalı jetler ile düz plakadan elde edilen önemli bazı sonuçlar şu şekildedir: Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler (DDHJ) ile düz plakada $0,176 \leq Q^* \leq 0,588$ aralığında Q^* 'ın artmasıyla artan girdap (dönme) etkisinin SM ve S durumlarındaki ısı transferini azalttığı görülmüştür. En düşük ısı transferi hem SM hem de S durumunda $Q^* = 0,588$ 'de görülmüştür. Literatürdeki bazı sonuçlar [68, 120], artan girdap etkisinin (dönme etkisinin) üniform ısı transferini artırırken ısı transfer hızını azaltabileceğini ifade etmektedir. Nu_o ve Nu 'nun azalması, artan girdabın eksenel momentumu azaltmasına bağlanabilir. Girdabın (dönmenin) artmasına sebep olan artan hacimsel debi oranı ($Q^* = 0,176$ 'dan $Q^* = 0,588$ 'e) ısı transferini azaltırken, $Q^* = 0,823$ 'te ısı transfer hızını artırıcı etki yaptığı görülmüştür. Bu durum literatürdeki gibi $Q^* = 0,823$ 'ün eksenel jetin yoğunluğuna katkı sağlaması [29] ve karışımı artırarak ısı sınır tabakayı bozmasıyla açıklanabilir. H/D 'nin artmasına bağlı olarak çarpma plakası ile engelleyici plaka arasında çıkış için açılan alanın artması, ısı transfer hızını olumlu etkilemiştir. Ayrıca artan H/D 'nin, çarpma plakası ve engelleyici plaka arasında oluşan devridaim bölgelerinin içerde sıcak akışkanı döndürerek ısı transferini düşürücü etkisini azaltması ve daha fazla dış ortam akışkanının içeri çekilmesini sağlamasıyla ısı transferi üzerinde olumlu etki yaptığı söylenebilir. Diğer taraftan artan H/D , duvar jetinin çıkışta meydana gelen geri akışla çarpışmasını azalttığı için ısı transferi hızının artmasına sebep olmuştur.

Artan H/D hem SM hem de S durumunda üniform ısı transferini artırmıştır. S durumundaki engelleyici plaka üniform ısı transferini olumsuz etkilemiştir. Dönen çarpmalı jetlerde düşük H/D 'lerde meydana gelen eyer şeklindeki profil, çalışılan $0,1 \leq H/D \leq 0,4$ aralığında görülmemiştir. Bu duruma bağlı olarak elektronik elemanların soğutulmasında birleşik lülenin düşük H/D 'lerde kullanımı tavsiye edilebilir. Devridaim bölgesinin oluşumu üzerine H/D ve engelleyici plakanın etkili olduğu görülmüştür. Helisel jetler maksimum hızın olduğu mesafeyi etkilememiştir. Ayrıca engelleyici plakanın sınır tabakası kalınlığı üzerinde etkili olmadığı görülmüştür.

$0,8 \leq H/D \leq 3,2$ aralığı için birleşik çarpmalı jetler ile düz ve kanatçıklı plakalardan elde edilen önemli bazı sonuçlar şu şekildedir: Eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetler ile düz çarpma plakasında genel olarak hem SM hem de S durumunda H/D 'nin artmasıyla ısı transferi üniformluğunun iyileştiği görülmüştür. S durumunda H/D 'nin ısı transferi üzerine Q^* 'a göre daha etkili olduğu görülmüştür. H/D sabit iken Q^* 'ın artmasıyla genel olarak üniform ısı transferinde iyileşme olmuştur. Eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetler ile düz çarpma plakasında yüksek hacimsel debi oranlarının ($Q^* = 0,764$ ve $0,823$) düşük H/D 'de ($H/D = 0,8$) dairesel jetin eksenel momentumuna kuvvet vererek ısı transferini artırdıkları görülmüştür. H/D 'nin artmasıyla $Q^* = 0,764$ ve $0,823$ 'ün bu etkilerini kaybederek ısı transferini düşürücü yönde etki yaptıkları görülmüştür. S durumundaki yüksek Q^* 'da ısı transferinin H/D 'nin değişimine daha hassas olduğu görülmüştür. DDHJ ile düz plakada en iyi üniform ısı transferinin $Q^* = 0,764$ ve $H/D = 2,4$ için %0,21 olarak SM durumunda meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca $Q^* = 0,823$ 'te üniform ısı transferi yüzde değerlerinin negatif değerler alması, boyutsuz lüle-plaka mesafenin $0,8 \leq H/D \leq 1,6$ olduğu aralıkta ısı transferi sapmasının sıfır olabileceği bir H/D bulunacağını göstermektedir. Bu sonuca dayanarak yüksek hacimsel debi oranlarında, S durumu için boyutsuz lüle-plaka mesafenin $0,8 \leq H/D \leq 1,6$ olduğu aralıkta yüksek üniform ısı transferi elde edilebileceği söylenebilir. Yüksek dönme yoğunluğunu meydana getiren hacimsel debi oranlarının ($0,588 \leq Q^*$) belirli bir lüle-plaka mesafesinden sonra ($H/D = 2,4$ 'ten sonra) üniform ısı transferini bozduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle artan dönme yoğunluğunun üniform ısı transferini her zaman artırıcı yönde etkilemeyeceği söylenebilir. Q^* sabit iken artan Q_t ısı transferini artırırken, üniform ısı transferini düşürmüştür. Isı transferindeki bu artış eksenel momentumun artmasıyla, üniformlukta meydana gelen azalma ise çarpan jetin plaka üzerinden daha fazla geri yansıtılmasıyla açıklanabilir. Kanatçık boyu 2 mm olan çarpma plakasında (P2) $Q^* = 0,352$ için eş eksenli dairesel ve ikili helisel jetlerin (DİHJ) diğer eş eksenli dairesel ve üçlü helisel jetlere (DÜHJ) ve eş eksenli dairesel ve dörtlü helisel jetlere (DDHJ) göre ısı transferinin daha düşük ve üniform ısı transferinin daha iyi olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre ısı transfer hızı ile üniform ısı transferi arasında çalışılan aralıklarda ters orantı olduğu söylenebilir. Diğer bir ifadeyle, artan helisel sayısının çalışılan parametreler için ($Q^* \leq 0,352$ ve $0,8 \leq H/D \leq 3,2$) P2'de ısı transferini artırırken üniform ısı transferini azalttığı görülmüştür. P2'de $Q^* = 0,176$ için $0,8 \leq H/D \leq 1,6$ aralığında birleşik lülelerin tümünün S durumundaki ısı transferi üniformluğunun SM durumundan daha iyi olduğu görülmüştür. Bu durum geri yansımak isteyen jetin engelleyici plaka tarafından çarpma plakası üzerine geri çevrilerek yayılmaya zorlanmasıyla açıklanabilir. $1,6 < H/D \leq 3,2$ aralığında ise engelleyici

plakanın artan H/D 'ye bağılı olarak bu etkisini kaybetmesiyle, S ve SM durumlarının birbirlerine yakın ısı transferi üniformluğu sergilediği söylenebilir. DDHJ ile kanatçık boyu 2 mm olan çarpma plakasında en iyi üniform ısı transferinin $Q^* = 0,823$ ve $H/D = 3,2$ için %3,03 olarak SM durumunda meydana geldiği görülürken, kanatçık boyu 6 mm olan çarpma plakasında (P6) ise yine SM durumunda $H/D = 3,2$ ve $Q^* = 0,823$ için %1,67 olarak meydana geldiği görülmüştür. S durumunda bulunan engelleyici plaka $H/D = 0,8$ 'de, çarpan jetin ortamdaki kaçış alanını kanatçıklarla birlikte azaltmasıyla P2 ve P6'da ısı transferinin SM durumuna göre düşük olmasına neden olduğu söylenebilir. P0'da ise $H/D=0,8$ için SM ve S durumlarının Nu 'larının benzer değerler aldığı görülmüştür. Bu, P0'da engelleyici plakanın ısı transferini düşürücü etkisinin zayıf olduğunu gösterir. Kanatçık boylarının artmasıyla da (2 mm'den 6 mm'ye), $H/D = 0,8$ ' de SM ve S durumlarındaki ısı transferi hızlarının arasındaki farkın arttığı görülmüştür. Yine bu durum da artan kanatçık boylarının ısınmış jetin ortamı terk etmesine daha fazla engel olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca artan kanatçık boylarıyla kanatçıklar arasında jetin daha fazla basınç düşüşüne maruz kalmasına bağılı olarak radyal yöndeki jet hızının azalmasıyla da ısı transferinin düştüğü söylenebilir. $Q^* = 0,352$ ve $H/D = 3,2$ için DDHJ'de düz plakaya göre 2 ve 6 mm kanatçık boylu plakalarda meydana gelen ısı transferi artışı yaklaşık olarak %15 ve %49 iken DDHJ'de bu değerlerin %20 ve %57 olduğu görülmüştür. Bu durum artan helisel sayısının plaka üzerinde karışmayı artırarak ısı transferini artırdığını gösterir. Kanatçıklı plakalar ile birleşik çarpan jetler gerekli düzenlemelerden sonra elektronik elemanların soğutulması için kullanımı tavsiye edilebilir.

Dördüncü olarak, farklı girdap numaralı birleşik lülelerle oluşturulan çarpmalı jet ile düz plakanın ısı transferi ve akış alanına etkisi farklı girdap numaraları ($S_g = 0,0, 0,275, 0,551, 0,828, 1,661$ ve hacimsel debi oranları ($Q^* = 0,2$ ve $0,466$) için SM ve S durumlarında sayısal olarak çalışılmıştır. Sonuçlarda dönme yoğunluğunu ve jetin plaka üzerinde yayılmasını artıran hacimsel debi oranının artması ($Q^* = 0,2$ 'den $0,466$ 'ya), hem SM hem de S durumunda durma noktası Nusselt sayısını ve ortalama Nusselt sayısını azalttığı görülmüştür. Yüksek hacimsel debi oranında ($Q^* = 0,466$) geometrik girdap numarasının (S_g) artması hem SM hem de S durumları için düşük hacimsel debi oranına ($Q^* = 0,2$) göre durma noktası Nusselt sayısı ve ortalama Nusselt sayısında büyük azalmalara neden olmuştur. Bu durum artan Q^* ile S_g 'nin ısı transferi üzerindeki etkisinin daha belirgin hale geldiğini gösterir. Ayrıca $Q^* = 0,2$ 'den $0,466$ 'ya artmasıyla basınç düşüşünün de azaldığı ve bu durumun ısı transferindeki düşüşle bağlantılı olduğu söylenebilir. Q^* 'ın artmasıyla

S_g 'deki değişime bağlı olarak ısı transferi SM durumunda %28,39-29,45 arasında azalırken, S durumunda ise %28,68-30,43 arasında azalmıştır. Artan Q^* 'ın ısı transferi üniformluğunu artan S_g 'den daha fazla geliştirdiği görölmüştür.

Bu tez çalışmasının, elektronik ekipmanların soğutulması veya üniform ısı transferi istenen gelecekte yapılacak olan çalışmalara yol gösterici olacağı düşünölmektedir. Sunulan sonuçların çarpmalı jetlerin ısı transferi ve akış alanlarının anlaşılmasında araştırmacılar yardımcı olacağı beklenmektedir. Araştırmacılar, gelecekte birleşik çarpmalı jetler için yapacakları çalışmalarda farklı akışkanlar kullanabilirler. Birleşik çarpmalı jette deneysel olarak hız ölçömleri yapılarak değişen parametrelere (H/D , Q^* , Q_t , farklı çarpma plakaları, SM ve S durumları) bağlı olarak türbölans yoğunlukları belirlenebilir. Çarpmalı jetin sayısal çalışmaları kullanılmak üzere türbölans modelleri geliştirilmesi üzerine de çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Öztekin, E., Aydin, O., and Avcı, M. (2012). Hydrodynamics of a turbulent slot jet flow impinging on a concave surface. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(10), 1631-1638.
2. Nuntadusit, C., Wae-hayee, M., Bunyajitradulya, A., and Eiamsa-ard, S. (2012). Visualization of flow and heat transfer characteristics for swirling impinging jet. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(5), 640-648.
3. Gao, X., and Sundén, B. (2003). Experimental investigation of the heat transfer characteristics of confined impinging slot jets. *Experimental Heat Transfer*, 16(1), 1-18.
4. Zuckerman, N., and Lior, N. (2006). Jet impingement heat transfer: Physics, correlations, and numerical modeling. In *Advances in Heat Transfer*, 39, 565-631.
5. Yu, J., Peng, L., Bu, X., Shen, X., Lin, G., and Bai, L. (2018). Experimental investigation and correlation development of jet impingement heat transfer with two rows of aligned jet holes on an internal surface of a wing leading edge. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(10), 1962-1972.
6. Wae-hayee, M., Yeranee, K., Sukswan, W., Alimalbari, A., Sae-ung, S., and Nuntadusit, C. (2021). Heat transfer enhancement in rotary drum dryer by incorporating jet impingement to accelerate drying rate. *Drying Technology*, 39(10), 1314-1324.
7. Kurnia, J. C., Sasmito, A. P., Tong, W., and Mujumdar, A. S. (2013). Energy-efficient thermal drying using impinging-jets with time-varying heat input - A computational study. *Journal of Food Engineering*, 114(2), 269-277.
8. Colucci, D. W., and Viskanta, R. (1996). Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 13(1), 71-80.
9. Polat, S. (2007). Heat and mass transfer in impingement drying. *Drying Technology*, 11(6), 1147-1176.
10. Fairweather, M., and Hargrave, G. (2002). Experimental investigation of an axisymmetric, impinging turbulent jet. 1. Velocity field. *Experiments in Fluids*, 33(3), 464-471.
11. Gardon, R., and Akfirat, J. C. (1965). The role of turbulence in determining the heat-transfer characteristics of impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 8(10), 1261-1272.
12. Kim, Y. H., Lee, D. H., and Han, S. H. (2017). Investigation of impingement surface geometry effects on heat transfer in a laminar confined impinging slot jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 347-353.
13. Ozmen, Y., and Ipek, G. (2016). Investigation of flow structure and heat transfer characteristics in an array of impinging slot jets. *Heat and Mass Transfer*, 52(4), 773-787.

14. Pamadi, B. N., and Belov, I. A. (1980). A note on the heat transfer characteristics of circular impinging jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23, 783-787.
15. Lytle, D., and Webb, B. W. (1994). Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37(12), 1687-1697.
16. Huang, L., and El-Genk, M. S. (1998). Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(3), 583-600.
17. Demir, F., Turgut, O., and Calisir, T. (2023). Investigation of swirling impinging jet at low nozzle to plate distances. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(21), 11999-12016.
18. Nuntadusit, C., Wae-hayee, M., Bunyajitradulya, A., and Eiamsa-ard, S. (2012). Heat transfer enhancement by multiple swirling impinging jets with twisted-tape swirl generators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(1), 102-107.
19. Amini, Y., Mokhtari, M., Haghshenasfard, M., and Barzegar Gerdroodbary, M. (2015). Heat transfer of swirling impinging jets ejected from nozzles with twisted tapes utilizing CFD technique. *Case Studies in Thermal Engineering*, 6, 104-115.
20. Ahmed, Z. U., Al-Abdeli, Y. M., and Matthews, M. T. (2015). The effect of inflow conditions on the development of non-swirling versus swirling impinging turbulent jets. *Computers & Fluids*, 118, 255-273.
21. Ahmed, Z. U., Al-Abdeli, Y. M., and Guzzomi, F. G. (2017). Flow field and thermal behaviour in swirling and non-swirling turbulent impinging jets. *International Journal of Thermal Sciences*, 114, 241-256.
22. Terekhov, V. I., Kalinina, S. V., and Sharov, K. A. (2018). Convective heat transfer at an annular jet impingement on a flat blockage. *High Temperature*, 56(2), 217-22.
23. Yang, H. Q., Kim, T., Lu, T. J., and Ichimiya, K. (2010). Flow structure, wall pressure and heat transfer characteristics of impinging annular jet with/without steady swirling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(19-20), 4092-4100.
24. Celik, N., and Eren, H. (2009). Heat transfer due to impinging co-axial jets and the jets' fluid flow characteristics. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(4), 715-727.
25. Markal, B., and Aydin, O. (2018). Experimental investigation of coaxial impinging air jets. *Applied Thermal Engineering*, 141, 1120-1130.
26. Demir, F., and Turgut, O. (2024). Experimental and numerical study of combined impinging jets at low nozzle-plate distance for confined and unconfined impingement plate. *Applied Thermal Engineering*, 252, 123690.
27. Markal, B. (2019). The effect of total flowrate on the cooling performance of swirling coaxial impinging jets. *Heat and Mass Transfer*, 55(11), 3275-3288.

28. Markal, B. (2018). Experimental investigation of heat transfer characteristics and wall pressure distribution of swirling coaxial confined impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 517-532.
29. Wannassi, M., and Monnoyer, F. (2015). Fluid flow and convective heat transfer of combined swirling and straight impinging jet arrays. *Applied Thermal Engineering*, 78, 62-73.
30. Viskanta, R. (1993). Nusselt-Reynolds Prize Paper Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 6, 111-134.
31. Livingood, J. B. (1973). Impingement heat transfer from turbulent air jets to flat plates a literature survey. *National Aeronautics and Space Administration*.
32. Ball, C. G., Fellouah, H., and Pollard, A. (2012). The flow field in turbulent round free jets. *Progress in Aerospace Sciences*, 50, 1-26.
33. Ozmen, Y., and Baydar, E. (2008). Flow structure and heat transfer characteristics of an unconfined impinging air jet at high jet Reynolds numbers. *Heat and Mass Transfer*, 44(11), 1315-1322.
34. Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M. A., and Button, B. L. (1992). A review of heat transfer data for single circular jet impingement. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 13(2), 106-115.
35. Gauntner, J. W., Livingood, J. N. B., and Hrycak, P. (1970). *Survey of literature on flow characteristics of a single turbulent jet*. Washington D.C: National Aeronautics and Space Administration.
36. Blevins, R. D. (1984). *Applied fluid dynamics handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold Co.
37. Reichardt, H. (1942). Gesetzmissigkeiten der freien Turbulenz. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 33(5-6), 219.
38. Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent Jets*. Elsevier Scientific Publishing Company.
39. Chigier, N. A., and Chervinsky, A. (1967). Experimental investigation of swirling vortex motion in jets. *Journal of Applied Mechanics*, 34(2), 443-451.
40. Örlü, R., Alfredsson, P. H., and Örlü, R. (2008). An experimental study of the near-field mixing characteristics of a swirling jet. *Flow, Turbulence and Combustion*, 80, 323-350.
41. Oberleithner, K., Schmid, P. J., and Haller, G. (2011). Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: Stability analysis and empirical mode construction. *Journal of Fluid Mechanics*, 679, 383-414.
42. Al-Abdeli, Y. M., and Masri, A. R. (2015). Review of laboratory swirl burners and experiments for model validation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 69, 178-196.

43. Schimek, S., Moeck, J. P., and Paschereit, C. O. (2011). An experimental investigation of the nonlinear response of an atmospheric swirl-stabilized premixed flame. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133(10).
44. Cala, C. E., Fernandes, E. C., Heitor, M. V., and Shtork, S. I. (2006). Coherent structures in unsteady swirling jet flow. *Experimental Fluids*, 40(2), 267-276.
45. Ahmed, Z. U., Al-Abdeli, Y. M., and Guzzomi, F. G. (2016). Heat transfer characteristics of swirling and non-swirling impinging turbulent jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 991-1003.
46. Davoust, S., Jacquin, L., and Leclaire, B. (2014). New results on the structure of turbulence in a mixing layer with and without swirl. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 49(C), 11-17.
47. Kumar, S. S., Hindasageri, V., and Prabhu, S. V. (2017). Local heat transfer distribution on a flat plate impinged by a swirling jet generated by a twisted tape. *International Journal of Thermal Sciences*, 111, 351-368.
48. Nozaki, A., Igarashi, Y., and Hishida, K. (2003). Heat transfer mechanism of a swirling impinging jet in a stagnation region. *Heat Transfer—Asian Research*, 32(8), 663-673.
49. Ahmed, Z. U. (2016). *An experimental and numerical study of surface interactions in turbulent swirling jets*. PhD Thesis, Edith Cowan University, Australia.
50. Martin, H. (1977). Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. *Advances in Heat Transfer*, 13(C), 1-60.
51. Rajaratnam, N., Zhu, D. Z., and Rai, S. P. (2010). Turbulence measurements in the impinging region of a circular jet. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 37(5), 782-786.
52. Carlomagno, G. M., and Ianiro, A. (2014). Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance: A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 58, 15-35.
53. Baydar, E. (1999). Confined impinging air jet at low Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 19(1), 27-33.
54. Baydar, E., and Ozmen, Y. (2005). An experimental and numerical investigation on a confined impinging air jet at high Reynolds numbers. *Applied Thermal Engineering*, 25(2-3), 409-421.
55. Choo, K. S., and Kim, S. J. (2010). Comparison of thermal characteristics of confined and unconfined impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(15-16), 3366-3371.
56. Choo, K. S., and Kim, S. J. (2010). Heat transfer characteristics of impinging air jets under a fixed pumping power condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1-3), 320-326.

57. Choo, K., Friedrich, B. K., Glaspell, A. W., and Schilling, K. A. (2016). The influence of nozzle-to-plate spacing on heat transfer and fluid flow of submerged jet impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 66-69.
58. Gulati, P., Katti, V., and Prabhu, S. V. (2009). Influence of the shape of the nozzle on local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(3), 602-617.
59. Choo, K., Kang, T. Y., and Kim, S. J. (2012). The effect of inclination on impinging jets at small nozzle-to-plate spacing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(13-14), 3327-3334.
60. Kuraan, A. M., Moldovan, S. I., and Choo, K. (2017). Heat transfer and hydrodynamics of free water jet impingement at low nozzle-to-plate spacings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 2211-2216.
61. Chatterjee, A., and Deviprasath, L. J. (2001). Heat transfer in confined laminar axisymmetric impinging jets at small nozzle-plate distances: The role of upstream vorticity diffusion. *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, 39(8), 777-800.
62. Sagot, B., Antonini, G., Christgen, A., and Buron, F. (2008). Jet impingement heat transfer on a flat plate at a constant wall temperature. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(12), 1610-1619.
63. Ahmed, Z. U., Khan, M. H. U., Khayat, R. E., and Tasnim, S. (2018). Effect of flow confinement on the hydrodynamics and heat transfer characteristics of swirling impinging jets. *AIP Conference Proceedings*, 1980(1).
64. Eiamsa-ard, S., Nanan, K., and Wongcharee, K. (2015). Heat transfer visualization of co/counter-dual swirling impinging jets by thermochromic liquid crystal method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 600-621.
65. Alekseenko, S. V., Bilsky, A. V., Dulin, V. M., and Markovich, D. M. (2007). Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(6), 1340-1359.
66. Afroz, F., and Sharif, M. A. R. (2020). Numerical investigation of heat transfer from a plane surface due to turbulent annular swirling jet impingement. *International Journal of Thermal Sciences*, 151, 106257.
67. Lee, D. H., Won, S. Y., Kim, Y. T., and Chung, Y. S. (2002). Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(1), 223-227.
68. Ianaro, A., and Cardone, G. (2012). Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets. *Applied Thermal Engineering*, 49, 89-98.
69. Paolillo, G., Greco, C. S., Astarita, T., and Cardone, G. (2022). Effects of the swirl number, Reynolds number, and nozzle-to-plate distance on impingement heat transfer from swirling jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 197, 123284.

70. Bilen, K., Bakirci, K., Yapici, S., and Yavuz, T. (2002). Heat transfer from a plate impinging swirl jet. *International Journal of Energy Research*, 26(4), 305-320.
71. Ikhlaq, M., Al-Abdeli, Y. M., and Khiadani, M. (2021). Flow and heat transfer characteristics of turbulent swirling impinging jets. *Applied Thermal Engineering*, 196, 117357.
72. Senda, M., Inaoka, K., Toyoda, D., and Sato, S. (2005). Heat transfer and fluid flow characteristics in a swirling impinging jet. *Heat Transfer-Asian Research*, 34(5), 324-335.
73. Ahmed, Z. U., Al-Abdeli, Y. M., and Guzzomi, F. G. (2015). Impingement pressure characteristics of swirling and non-swirling turbulent jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 722-732.
74. Wen, M. Y., and Jang, K. J. (2003). An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(24), 4657-4667.
75. Bakirci, K., and Bilen, K. (2007). Visualization of heat transfer for impinging swirl flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(1), 182-191.
76. Xu, L., Zhang, Y., Ma, Y., Gao, J., and Li, Y. (2021). Flow and heat transfer characteristics of a swirling impinging jet issuing from a slotted nozzle. *International Journal of Thermal Sciences*, 166, 107227.
77. Xu, L., Lan, J., Ma, Y., Gao, J., and Li, Y. (2017). Numerical study on heat transfer by swirling impinging jets issuing from a screw-thread nozzle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 232-237
78. Abrantes, J. K., Fernando, L., and Azevedo, A. (2006). Fluid flow characteristics of a swirl jet impinging on a flat plate. *13th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon*, 1-12.
79. Nanani, K., Wongcharee, K., Nuntadusit, C., and Eiamsa-ard, S. (2012). Forced convective heat transfer by swirling impinging jets issuing from nozzles equipped with twisted tapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(6), 844-852.
80. Ikhlaq, M., Al-Abdeli, Y. M., and Khiadani, M. (2019). Transient heat transfer characteristics of swirling and non-swirling turbulent impinging jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 109, 109917.
81. Singh, P., Aider, Y., and Kaur, I. (2023). Swirl jet impingement heat transfer: Effect of jet-to-target spacing, jet Reynolds number and orientation with flat target. *International Journal of Thermal Sciences*, 184, 107993.
82. Sharif, M. A. R. (2016). Numerical investigation of round turbulent swirling jet impingement heat transfer from a hot surface. *Computational Thermal Sciences: An International Journal*, 8(6), 489-507.

83. Shuja, S. Z., Yilbas, B. S., and Rashid, M. (2003). Confined swirling jet impingement onto an adiabatic wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(16), 2947-2955.
84. Ikhlaq, M., Al-Abdeli, Y. M., and Khiadani, M. (2020). Nozzle exit conditions and the heat transfer in non-swirling and weakly swirling turbulent impinging jets. *Heat and Mass Transfer*, 56(1), 269-290.
85. Uddin, N., Weigand, B., and Younis, B. A. (2019). Comparative study on heat transfer enhancement by turbulent impinging jet under conditions of swirl, active excitations and passive excitations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 100, 35-41.
86. Xu, L., Zhang, Y., Ma, Y., Gao, J., Li, Y., and Zhao, Z. (2021). Flow and heat transfer characteristics of a swirling impinging jet issuing from a threaded nozzle. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100970.
87. Ahmed, Z. U., and Al-Abdeli, Y. M. (2023). Temperature uniformity, correlations and the flow field in swirling impinging jets. *Journal of Thermal Science*, 32(2), 662-679.
88. Wongcharee, K., Chuwattanakul, V., and Eiamsa-ard, S. (2017). Influence of CuO/water nanofluid concentration and swirling flow on jet impingement cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 277-283.
89. Mohamed Illyas, S., Ramesh Babu, B. R., and Rao, V. V. (2018). Heat transfer and flow visualization of swirling impinging jet on flat surface using helicoid inserts. *Journal of Visualization*, 21(5), 729-749.
90. Xu, L., Xiong, Y., Xi, L., Gao, J., Li, Y., and Zhao, Z. (2019). Numerical simulation of swirling impinging jet issuing from a threaded hole under inclined condition. *Entropy*, 22(1), 15.
91. Ahmed, Z. U., Sharif, M. A. R., and Al Nahian, N. (2024). Convective heat transfer from a spherical concave surface due to swirling impinging jets issuing from a circular pipe. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121489.
92. Ortega-Casanova, J., and Castillo-Sanchez, S. I. (2017). On using axisymmetric turbulent impinging jets swirling as Burger's vortex for heat transfer applications: Single and multi-objective vortex parameters optimization. *Applied Thermal Engineering*, 121, 103-114.
93. Wongcharee, K., Kunnarak, K., Chuwattanakul, V., and Eiamsa-Ard, S. (2020). Heat transfer rate of swirling impinging jets issuing from a twisted tetra-lobed nozzle. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100780.
94. Fénot, M., Dorignac, E., and Lalizel, G. (2015). Heat transfer and flow structure of a multichannel impinging jet. *International Journal of Thermal Sciences*, 90, 323-338.
95. Yang, T., Sun, Y., Xu, L., Xi, L., Gao, J., and Li, Y. (2023). Comparative study on flow and heat transfer characteristics of swirling impingement jet issuing from different nozzles. *International Journal of Thermal Sciences*, 184, 107914.

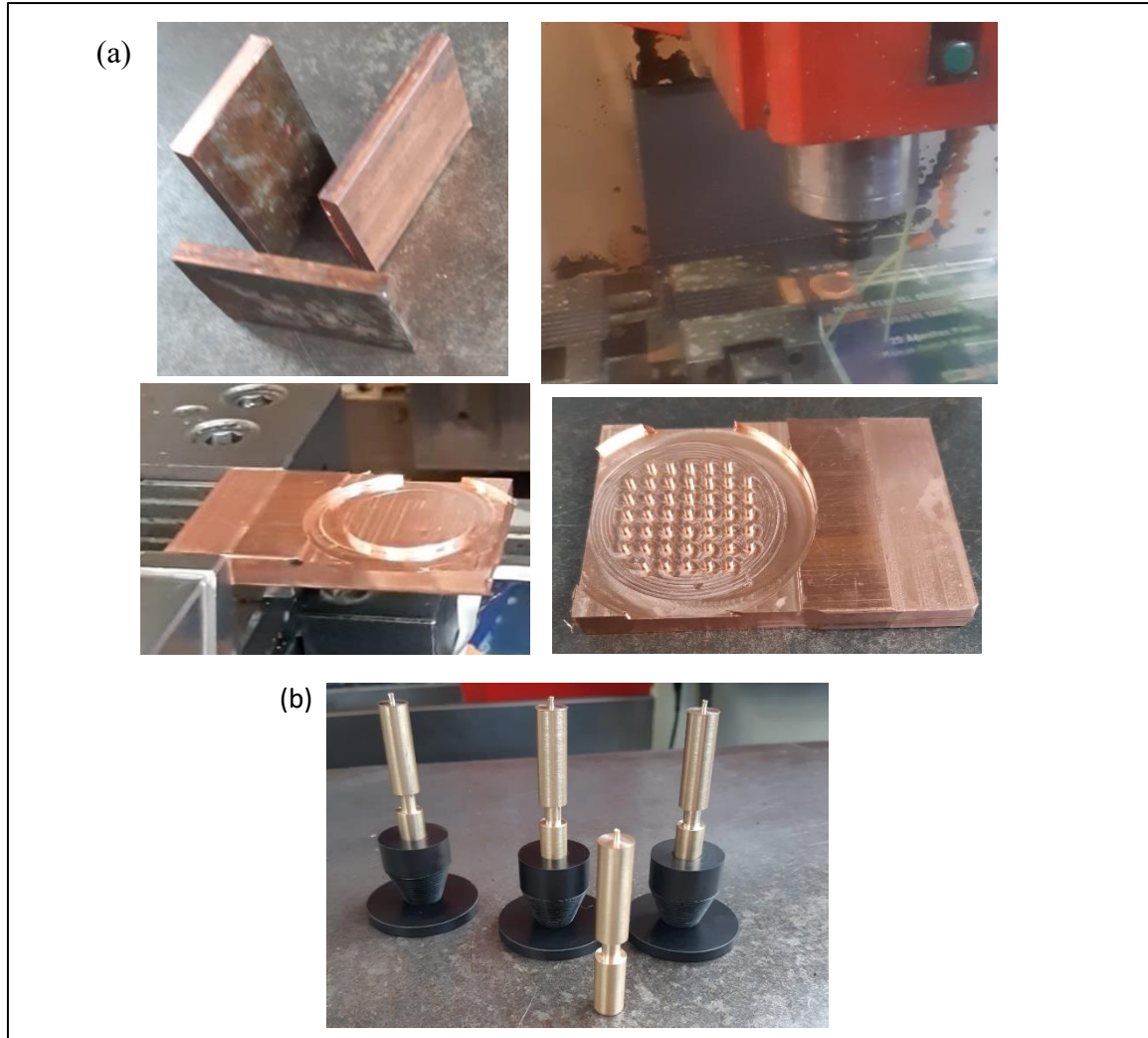
96. Huang, H., Sun, T., Zhang, G., Liu, M., and Zong, Z. (2022). Analysis of the three-dimensional swirling and non-swirling jet impingement using a turbulence model with cross-diffusion correction. *Applied Thermal Engineering*, 200, 117708.
97. Chandra, P. V., Panda, P. P., and Dutta, P. (2023). Flow and heat transfer characteristics of an impinging jet augmented with swirl. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 149, 107121.
98. Ledezma, G., Morega, A. M., and Bejan, A. (1996). Optimal spacing between pin fins with impinging flow. *Journal of Heat Transfer*, 118(3), 570-577.
99. Brignoni, L. (1999). Experimental optimization of confined air jet impingement on a pin fin heat sink. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 22(3), 399-404.
100. Maveety, J. G., and Jung, H. H. (2002). Heat transfer from square pin-fin heat sinks using air impingement cooling. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25(3), 459-469.
101. Maveety, J., and Hendricks, J. (1999). A heat sink performance study considering material, geometry, nozzle placement, and Reynolds number with air impingement. *Journal of Electronic Packaging*, 121(3), 156-162.
102. Park, K., Choi, D. H., and Lee, K. S. (2004). Numerical shape optimization for high performance of a heat sink with pin-fins. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 46(9), 909-927.
103. Ravanji, A., and Rajabi Zargarabadi, M. (2021). Effects of pin-fin shape on cooling performance of a circular jet impinging on a flat surface. *International Journal of Thermal Sciences*, 161.
104. Yang, Y. T., and Peng, H. S. (2008). Numerical study of pin-fin heat sink with non-uniform fin height design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(19-20), 4788-4796.
105. Li, H. Y., Chen, K. Y., and Chiang, M. H. (2009). Thermal-fluid characteristics of plate-fin heat sinks cooled by impingement jet. *Energy Conversion and Management*, 50(11), 2738-2746.
106. Li, H. Y., and Chen, K. Y. (2007). Thermal performance of plate-fin heat sinks under confined impinging jet conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(9-10), 1963-1970.
107. Wiriyaart, S., and Naphon, P. (2020). Heat spreading of liquid jet impingement cooling of cold plate heat sink with different fin shapes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 20, 100638.
108. Wiriyaart, S., and Naphon, P. (2019). Liquid impingement cooling of cold plate heat sink with different fin configurations: High heat flux applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 281-292.

- 109.San, J. Y., and Chen, J. J. (2014). Effects of jet-to-jet spacing and jet height on heat transfer characteristics of an impinging jet array. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 8-17.
- 110.Kline, S. J., and McClintock, F. A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1), 3-8.
- 111.ANSYS. (2015). Fluent theory guide (15th ed.).
- 112.Ajour, M. N., Khan, M. M., and Naji, S. (2023). Numerical investigation of the effect of swirling flow caused by twisted tape in impinging jet's nozzle on heat transfer: Application in cooling of electronic components and turbine blades. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 150.
- 113.Launder, B. E., and Spalding, D. B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. London: Academic Press.
- 114.Yakhot, V., and Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*, 1(1), 3-51.
- 115.Wilcox, D. (1998). *Turbulence modeling for CFD*. URL: <https://www.academia.edu/download/7132166/contents.pdf>, Son Erişim Tarihi: 04.09.2024.
- 116.Menter, F. R. (1993). AIAA 93-2906 Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows.
- 117.ANSYS Fluent Users Guide (15th ed.).
- 118.Gupta, A. K., Lilley, D. G., and Syred, N. (1984). *Swirl flows*. London: Abacus Press.
- 119.Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.
- 120.Kotb, A., Askar, H., and Saad, H. (2023). On the impingement of heat transfer using swirled air jets. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 9, 1120985.
- 121.O., Çiftçi, B., and Yıldırım, H. (2024). Investigation of heat transfer effects in unconfined and confined swirling jets impinging on a flat plate. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 13(2), 261-285.
- 122.Dao, W., and Hong Kong. (2019). Fluid flow and heat transfer characteristics of multiple swirling impinging jets at various impingement distances. *International Journal of Thermofluid Science and Technology*, 6(4).
- 123.Eiamsa-Ard, S., Kunnarak, K., Wongcharee, K., and Chuwattanakul, V. (2020). Heat transfer visualization of swirling impinging jets using nozzle with centrally hollow helical-tape. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 9(5), 673-678.

124. Hofmann, H. M., Kaiser, R., Kind, M., and Martin, H. (2007). Calculations of steady and pulsating impinging jets - An assessment of 13 widely used turbulence models. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 51(6), 565-583.
125. Debnath, S., Khan, Md. H. U., and Ahmed, Z. U. (2020). Turbulent swirling impinging jet arrays: A numerical study on fluid flow and heat transfer. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100580.
126. Ortega-Casanova, J. (2012). CFD and correlations of the heat transfer from a wall at constant temperature to an impinging swirling jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21-22), 5836-5845.
127. Ko, N. W. M., and Kwan, A. S. H. (1976). The initial region of subsonic coaxial jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 73(2), 305-332.
128. Ozmen, Y. (2011). Confined impinging twin air jets at high Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(2), 355-363.
129. Abdel-Fattah, A. (2007). Numerical and experimental study of turbulent impinging twin-jet flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31(8), 1061-1072.
130. Abramovich, G. N. (1963). *The theory of turbulent jets*. America: The M.I.T. press.
131. Kim, M., Schanz, D., Novara, M., Godbersen, P., Yeom, E., and Schröder, A. (2023). Experimental study on flow and turbulence characteristics of jet impinging on cylinder using three-dimensional Lagrangian particle tracking velocimetry. *Scientific Reports*, 13(1), 10929.
132. Deogonda, P., Chalwa, V. N., and Dixit, V. (2014). Wall static pressure distribution due to confined impinging circular air jet. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(3), 591-597.
133. Ichimiya, K., and Yamada, Y. (2003). Three-dimensional heat transfer of a confined circular impinging jet with buoyancy effects. *Journal of Heat Transfer*, 125(2), 250-256.
134. Lambourne, N. C., and Bryer, D. W. (1961). The bursting of leading-edge vortices-Some observations and discussion of the phenomenon. URL: <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/handle/1826.2/3859>, Son Erişim Tarihi: 04.09.2024.
135. Ramachandran, G., Dutta, A. K., Durairaj, H., and Chaudhuri, S. (2020). On the interaction of swirling flames in a lean premixed combustor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 142(3).
136. Colucci, D. W., and Viskanta, R. (1996). Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 13(1), 71-80.



EK-1. Plaka ve Lülelerin Üretim Aşamasındaki Fotoğrafları



Şekil 1.1. (a) Plakalarının ham ve işlenirken ki hallerinin fotoğrafları, (b) lülelerin tam işlenmemiş hallerinin fotoğrafları

EK-2. Çarpma Plakasına Aktarılan Net Isı Akısı ile İlgili Örnek Hesaplama

Hesaplama için lazım olan deneysel veriler aşağıdaki Çizelge EK-2.1’de verilmiştir.

Çizelge EK-2.1. Hesaplama için kullanılan veriler

Yan yüzeye konulan yalıtım malzemesinin iç yüzeyindeki sıcaklık (T_{y1})	56,31 °C
Yan yüzeye konulan yalıtım malzemesinin dış yüzeyindeki sıcaklık (T_{y2})	38,09 °C
Yan yüzeydeki yalıtım malzemesinin boyu (L_y)	0,006 m
Isıtıcının altına konulan yalıtım malzemesinin üst yüzey sıcaklığı (T_{a1})	64,59°C
Isıtıcının altına konulan yalıtım malzemesinin alt yüzey sıcaklığı (T_{a2})	49,02 °C
Alt yüzeydeki ölçüm yapılan yalıtım kalınlığı (L_a)	0,009 m
Çevre sıcaklığı (T_c)	24,09 °C
Isıtıcıya verilen voltaj (V)	17,02 V
Isıtıcıya verilen akım (I)	1,05 A
Bakırın yayıcılığı (ε)	0,03
Taş yünü ısı iletim katsayısı (k_y)	0,04 W/m·K
Çarpma plakasının çapı (D_3)	46 mm
Çarpma plakasının alanı (A_p)	0,00167 m ²
Çarpma plakasının merkezinden iç yüzeydeki ısı çifti olan mesafe (r_1)	0,023 m
Çarpma plakasının merkezinden iç yüzeydeki ısı çifti olan mesafe (r_2)	0,029 m
Ortalama yüzey sıcaklığı (T)	51,44 °C

Elektriksel güç aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$P = VI = 17,02 * 1,05 = 17,871 \text{ W}$$

Alt yüzeyden iletimle olan ısı kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$q_a = -\frac{k_y A_p (T_{a2} - T_{a1})}{L_a} = \frac{0,04 * 0,00167 * (64,59 - 49,02)}{0,009} = 0,116 \text{ W}$$

Yan yüzeyden iletimle olan ısı kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$q_y = \frac{T_{y2} - T_{y1}}{\ln(r_2/r_1)/(2\pi L_y k_y)} = \frac{56,31 - 38,09}{\ln(0,029/0,023)/(2\pi * 0,006 * 0,04)} = 0,119 \text{ W}$$

EK-2. (devam) Çarpma Plakasına Aktarılan Net Isı Akısı ile İlgili Örnek Hesaplama

Işıma ile olan ısı kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} q_r &= \sigma \varepsilon A_p (T^4 - T_{\text{ç}}^4) \\ &= 5,67 \times 10^{-8} \times 0,03 \times 0,00167 \times ((51,44 + 273,15)^4 \\ &\quad - (24,09 + 273,15)^4) = 0,0094 \text{ W} \end{aligned}$$

Çarpma plakasına iletilen net ısıl güç aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$q = P - q_y - q_a - q_r = 17,871 - 0,116 - 0,119 - 0,0094 = 17,63 \text{ W}$$

Çarpma plakasına sağlanan net ısı akısı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$q'' = q/A_p = 17,63/0,00167 = 10\,557 \text{ W/m}^2$$

EK-3. Belirsizlik Analizi ile İlgili Örnek Hesaplama

Ölçümler esnasında kullanılan cihaz ve aletlerin üretici kataloglarında verilen hata miktarları (w) Çizelge EK-3.1’de verilmiştir.

Çizelge EK-3.1. Ölçüm sistemlerinde verilen hata miktarları

K-tipi ısı çift	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Sıcaklık ölçümündeki toplam hata miktarı	$\pm 1,1^{\circ}\text{C}$
Debi ölçümleri	$\pm \%4$
Boyut ölçümleri	$\pm 0,02 \text{ mm}$
Akım ölçümü	$\pm 0,005$
Voltaj ölçümü	$\pm 0,005$

Örnek hata analizi hesaplamalarında ölçülen deneysel veriler ve hesaplanan değerler sırasıyla Çizelge EK-3.2 ve Çizelge EK-3.3’te verilmiştir.

Çizelge EK-3.2. Hata analizi için ölçülen deneysel veriler

Yan yüzeye konulan yalıtım malzemesinin iç yüzeyindeki sıcaklık (T_{y1})	66,64°C
Yan yüzeye konulan yalıtım malzemesinin dış yüzeyindeki sıcaklık (T_{y2})	41,56°C
Yan yüzeydeki yalıtım malzemesinin boyu (L_y)	0,006 m
Yan yüzeyde çarpma plakasının merkezinden içteki ısı çifti olan mesafe (r_1)	23,50 mm
Yan yüzeyde çarpma plakasının merkezinden dıştaki ısı çifti olan mesafe (r_2)	29,50 mm
Isıtıcının altına konulan yalıtım malzemesinin üst yüzey sıcaklığı (T_{a1})	71,74°C
Isıtıcının altına konulan yalıtım malzemesinin alt yüzey sıcaklığı (T_{a2})	55,47°C
Alt yüzeydeki ölçüm yapılan yalıtım kalınlığı (L_a)	0,009 m
Çevre sıcaklığı (T_c)	22,45°C
Plakadaki yerel sıcaklık (T_r)	45,21°C
Isıtıcıya verilen voltaj (V)	17,02 V
Isıtıcıya verilen akım (I)	1,05 A
Birleşik lülenin çapı (D)	10 mm
Çarpma plakasının çapı (D_3)	46 mm
Çarpma plakasının alanı (A_p)	0,00167 m ²

Çizelge EK-3.3 Hata analizinde kullanılan hesaplanmış değerler

Isıtıcıya verilen toplam güç (P)	17,87 W
Yan yüzeyden iletimle olan kayıp (q_y)	0,166 W
Altan yüzeyden iletimle olan kayıp (q_a)	0,121 W
Çarpma plakasına aktarılan net ısı güç (q)	17,58 W

EK-3. (devam) Belirsizlik Analizi ile İlgili Örnek Hesaplama

Hata analizinde kullanılan taş yününün ısı iletim katsayısı (k_y) 0,04 W/m·K'dir.

Isıtıcıya verilen güçte yapılan hata oranı:

$$\frac{w_P}{P} = \left[\left(\frac{w_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{w_I}{I} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{0,005}{17,02} \right)^2 + \left(\frac{0,005}{1,05} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,0048 \text{ (veya \%0,48)}$$

$$w_P = 0,0852 \text{ W (hata miktarı)}$$

Alan hesabında yapılan hata oranı:

$$\frac{w_{A_p}}{A_p} = \left[\left(\frac{2w_{D_3}}{D_3} \right)^2 \right]^{1/2} = [(2 \times 0,02)/46]^2]^{1/2} = 0,00086 \text{ (veya \%0,086)}$$

Plakanın alt ve yan kısmından iletimle yapılan hata oranları:

$$\begin{aligned} w_{q_a} &= \left[\left(\frac{\partial q_a}{\partial L_a} w_{L_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_a}{\partial T_{a1}} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial q_a}{\partial T_{a2}} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial q_a}{\partial A_p} w_{A_p} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(\frac{0,04 \times 0,00167 \times (71,74 - 55,47) \times (0,02 \times 10^{-3})}{(9 \times 10^{-3})^2} \right)^2 \right. \\ &\quad + \left(\frac{0,04 \times 1,1 \times 0,00167 \times 55,47}{9 \times 10^{-3}} \right)^2 + \left(\frac{0,04 \times 1,1 \times 0,00167 \times 71,74}{9 \times 10^{-3}} \right)^2 \\ &\quad \left. + \left(\frac{0,04 \times (71,74 - 55,47) \times (1,44 \times 10^{-6})}{(9 \times 10^{-3})} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,740 \text{ W} \end{aligned}$$

EK-3. (devam) Belirsizlik Analizi ile İlgili Örnek Hesaplama

$$\begin{aligned}
w_{q_y} &= \left[\left(\frac{\partial q_y}{\partial L_y} w_{L_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_y}{\partial T_{y1}} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial q_y}{\partial T_{y2}} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial q_y}{\partial r_1} w_{r_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_y}{\partial r_2} w_{r_2} \right)^2 \right]^{1/2} \\
&= \left[\left(\frac{2\pi \times 0,04 \times (66,64 - 41,56) \times (0,02 \times 10^{-3})}{\ln(29,5/23,5)} \right)^2 \right. \\
&\quad + \left(\frac{2\pi \times 0,04 \times (41,56) \times (6 \times 10^{-3}) \times 1,1}{\ln(1,26)} \right)^2 + \left(\frac{2\pi \times 0,04 \times (66,64) \times (6 \times 10^{-3}) \times 1,1}{\ln(29,5/23,5)} \right)^2 \\
&\quad + \left(\frac{2\pi \times 0,04 \times (66,64 - 41,56) \times (6 \times 10^{-3}) \times (0,02 \times 10^{-3})}{(\ln(29,5/23,5))^2 \times (29,5 \times 10^{-3})} \right)^2 \\
&\quad \left. + \left(\frac{2\pi \times 0,04 \times (66,64 - 41,56) \times (6 \times 10^{-3}) \times (0,02 \times 10^{-3})}{(\ln(29,5/23,5))^2 \times (23,5 \times 10^{-3})} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,575 \text{ W}
\end{aligned}$$

Isı iletiminde toplam yapılan hata oranı:

$$\begin{aligned}
w_q &= \left[\left(\frac{\partial q}{\partial q_y} w_{q_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial q_a} w_{q_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial P} w_P \right)^2 \right]^{1/2} \\
&= [(0,740)^2 + (0,575)^2 + (0,0852)^2]^{1/2} \\
&= 0,941 \text{ W}
\end{aligned}$$

Taşıyım ile ısı aktarımında yapılan hata oranı:

$$\begin{aligned}
\frac{w_{h_r}}{h_r} &= \frac{\left[\left(\frac{\partial h_r}{\partial q} w_q \right)^2 + \left(\frac{\partial h_r}{\partial T_r} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial h_r}{\partial T_\zeta} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial h_r}{\partial A_p} w_{A_p} \right)^2 \right]^{1/2}}{h_r} \\
&= \left[\left(\frac{0,941}{17,58} \right)^2 + \left(\frac{1}{(45,21 - 22,45)} \times 1,1 \right)^2 + \left(\frac{1}{(45,21 - 22,45)} \times 1,1 \right)^2 \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{1}{0,00167} \times 1,44 \times 10^{-6} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,0868 \text{ (veya \%8,68)}
\end{aligned}$$

EK-3. (devam) Belirsizlik Analizi ile İlgili Örnek Hesaplama

Nu_r 'nin hesaplanmasında yapılan hata oranı:

$$\frac{w_{Nu_r}}{Nu_r} = \frac{\left[\left(\frac{\partial Nu_r}{\partial h} w_{h_r} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu_r}{\partial D} w_D \right)^2 \right]^{1/2}}{Nu_r} = \left[(0,0868)^2 + \left(\frac{0,02 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= 0,0869 \text{ (veya \%8,69)}$$



Gazili olmak ayrıcalıktır