

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZATILMIŞ JET ÇARPMALI SOĞUTMADA DALGALI
HEDEF YÜZEYİN ISI GEÇİŞİNE ETKİSİNİN NÜMERİK
OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadircan KASAB

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

EYLÜL 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**UZATILMIŞ JET ÇARPMALI SOĞUTMADA DALGALI
HEDEF YÜZEYİN ISI GEÇİŞİNE ETKİSİNİN NÜMERİK
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadircan KASAB

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr.Ufuk DURMAZ

EYLÜL 2025

Kadircan KASAB tarafından hazırlanan “UZATILMIŞ JET ÇARPMALI SOĞUTMADA DALGALI HEDEF YÜZEYİN ISI GEÇİŞİNE ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ ” adlı tez çalışması 25.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans teziolarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı: **Doç.Dr.Ünal UYSAL**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi: **Doç.Dr.Ufuk DURMAZ (Danışman)**.....
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi: **Doç.Dr.Fikret POLAT**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “UZATILMIŞ JET ÇARPMALI SOĞUTMADA DALGALI HEDEF YÜZEYİN ISI GEÇİŞİNE ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(25/09/2025).

Kadircan KASAB



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesine her zaman destek olan, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ufuk DURMAZ'a çok teşekkür ederim. Sayısal çalışmaların gerçekleştirilmesinde bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Sayın Doç. Dr. Ünal UYSAL'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarında değerli katkıları olan Arş. Gör. Mehmet Berkant ÖZEL'e çok teşekkür ederim.

Eğitim-öğretim hayatım boyunca gelişimime katkıda bulunan Taşlık İlköğretim Okulu'ndaki, Şehit Üsteğmen Selçuk Esedoğlu Anadolu Lisesi'ndeki ve Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm değerli öğretmenlerim ve hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman bana destek olan babam Necmettin KASAB, annem Hatice KASAB, kardeşim Büşra ÇAĞLAR ve diğer tüm aile bireylerine, tüm arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Her zaman manevi destekleri ile yanımda olan ve tez çalışmam boyunca ona ayıracağım kıymetli zamanları bu tezin gerçekleştirilmesinde harcamama sabır ve tahammül gösteren sevgili eşim Gülcan KASAB'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Kadircan KASAB



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Jet Çarpmalı Soğutma	3
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	8
1.3. Literatür Araştırması	9
2. SAYISAL MODELLEME VE AĞ YAPISI (MESH)	17
2.1. Modelleme	17
2.1.1. Geometrik tanım	17
2.1.2. Hesaplama alanı ve akış bölgeleri	19
2.1.3. Sınır koşulları	20
2.1.4. Modelin amacı ve sayısal incelemedeki rolü	20
2.2. Mesh (Ağ Yapısı) Oluşturulması	21
2.2.1. Ağ tipi ve hücre yapısı	21
2.2.2. Sınır tabaka (boundary layer) ağı	22
2.2.3. Ağ kalitesi	23
2.2.4. Ağ bağımsızlık analizi (mesh independence study)	23
2.3. Model Türleri ve Geometrik Farklılıklar	24
2.3.1. Düz yüzey (base model)	24
2.3.2. Tepe modeli dalgalı	24

2.3.3. Tepe modeli sürekli dalgalı	25
2.3.4. Sol modeli dalgalı.....	26
2.3.5. Sağ modeli dalgalı	26
2.3.6. Sağ modeli sürekli dalgalı	27
2.3.7. Çukur modeli	28
2.3.8. Çukur modeli sürekli dalgalı	28
2.4. Akış ve Isı Geçişi Üzerindeki Etkiler.....	29
3. DÜZ YÜZEYE ISI TRANSFERİNE ETKİSİ.....	31
3.1. Düz Modele Olan Isı Transferi.....	31
3.1.1. Basınç kaybı (ΔP).....	32
3.1.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC).....	32
4. DALGALI YÜZEYİN ISI TRANSFERİNE ETKİSİ.....	35
4.1. Dalgalı Tepe Modeli Olan Isı Transferi	35
4.1.1. Basınç kaybı (ΔP).....	36
4.1.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC).....	36
4.2. Tek Sıralı Sürekli Dalgalı Tepe Modeli Olan Isı Transferi.....	37
4.2.1. Basınç kaybı (ΔP).....	38
4.2.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC).....	39
4.3. Dalgalı Sol Modeli Olan Isı Transferi.....	40
4.3.1. Basınç kaybı (ΔP).....	40
4.3.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC).....	41
4.4. Dalgalı Sağ Modeli Olan Isı Transferi	42
4.4.1. Basınç kaybı (ΔP).....	43
4.4.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC).....	43
4.5. Dalgalı Sağ Modeli Olan Isı Transferi	44
4.5.1. Basınç kaybı (ΔP).....	45
4.5.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC).....	46
4.6. Dalgalı Çukur Modeli Olan Isı Transferi	47
4.6.1. Basınç kaybı (ΔP).....	47
4.6.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC).....	48
4.7. Dalgalı Sürekli Çukur Modeli Olan Isı Transferi.....	49
4.7.1. Basınç kaybı (ΔP).....	50
4.7.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC).....	50
5. SAYISAL SONUÇ.....	53
5.1. Basınç Kaybı (ΔP).....	56

5.2. Performans Değerlendirme Kriteri (PEC).....	56
6. DEĞERLENDİRME	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ.....	67





KISALTMALAR

CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
FC	: Free Convection
JIC	: Çarpmalı Jet Soğutma
PEC	: Performans Değerlendirme Kriteri
SC	: Submerged Convection
SST	: Shear Stress Transport
TPF	: Termal performans faktörü



SİMGELER

A	: Dalga yüksekliği [m]
D	: Jet çapı [m]
E	: Nozul uzunluğu [m]
G	: Nozul-hedef yüzey aralığı [m]
G/D	: Boyutsuz hedef yüzey-nozul aralığı
h	: Isı taşınım katsayısı [W/m ² .K]
H	: Orifis plakası-hedef yüzey mesafesi [m]
H/d	: Boyutsuz orifis plakası-hedef yüzey mesafesi
I	: Türbülans yoğunluğu
J	: Jet
Nu	: Nusselt sayısı
Nu_{ort}	: Ortalama Nusselt sayısı
Re	: Jet Reynolds sayısı
U_m	: Akışın hızı [m/s]
U_n	: Jet çıkış hızına [m/s]H
λ	: Dalga boyu [m]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Dalgalı hedef yüzey için modelleme parametreleri.	19
Tablo 5.1. Farklı modeller için ortalama Nusselt sayısı (Nu), basınç kaybı [Pa] ve performans değerlendirme kriteri (PEC) değerleri.	56





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Türbin kanadı üzerinde yapılan soğutma yöntemleri [1].....	2
Şekil 1.2. Gaz türbin kanadı üzerinde yapılan soğutma teknikleri [2].....	3
Şekil 1.3. a) Tek bir serbest jetin akış bölgeleri, b) Bir serbest jetin akış profili [8] ...	4
Şekil 1.4. Jet diziliş biçimleri a) düzgün sıralı b) tek sıralı c) çoklu sıralı.....	5
Şekil 1.5. Jet akışta çapraz-akış türleri a) minimum çapraz-akış b) orta çapraz-akı c) maksimum çapraz-akış.	6
Şekil 1.6. Kanal içerisinde oluşan çapraz akış [12].	7
Şekil 2.1. Geometrik dalgalı model.	18
Şekil 2.2. Dalgalı hedef yüzeye sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.....	19
Şekil 2.3. Dalgalı hedef yüzeye ait üç boyutlu mesh yapısının genel görünümü.	22
Şekil 2.4. Dalgalı hedef yüzeyli jet çarpmalı soğutma modelinin oluşturulan ağ yapısı.	22
Şekil 2.5. Düz Modeli (Base) $G/D=2$	24
Şekil 2.6. Tepe Modeli Dalgalı $G/D =2$	25
Şekil 2.7. Tepe Modeli Sürekli Dalgalı $G/D =2$	25
Şekil 2.8. Sol Modeli Dalgalı $G/D =2$	26
Şekil 2.9. Sağ Modeli Dalgalı $G/D =2$	27
Şekil 2.10. Sağ Modeli Sürekli Dalgalı $G/D =2$	27
Şekil 2.11. Çukur Modeli $G/D =2$	28
Şekil 2.12. Çukur Modeli Sürekli Dalga $G/D =2$	29
Şekil 3.1. Düz hedef yüzeye sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.	31
Şekil 3.2. Düz hedef yüzey (BASE modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.	33
Şekil 4.1. Dalgalı hedef yüzeye ve tepe modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.	35
Şekil 4.2. Dalgalı hedef yüzey (A1 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.	37
Şekil 4.3. Dalgalı hedef yüzeye ve tepe sürekli modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.	38
Şekil 4.4. Dalgalı hedef yüzey (A2 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.	39
Şekil 4.5. Dalgalı hedef yüzeye ve sol modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.	40
Şekil 4.6. Dalgalı hedef yüzey (B1 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.	42
Şekil 4.7. Dalgalı hedef yüzeye ve sağ modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.	42

Şekil 4.8. Dalgalı hedef yüzey (C1 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.	44
Şekil 4.9. Dalgalı hedef yüzeye ve sağ sürekli modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.	45
Şekil 4.10. Dalgalı hedef yüzey (C2 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.	46
Şekil 4.11. Dalgalı hedef yüzeye ve çukur modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.	47
Şekil 4.12. Dalgalı hedef yüzey (D1 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.	49
Şekil 4.13. Dalgalı hedef yüzeye ve çukur sürekli modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.	49
Şekil 4.14. Dalgalı hedef yüzey (D2 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.	51
Şekil 5.1. Tüm Dalgalı Yüzey Modellerine Ait Yerel Nusselt Sayısının (Nu) X Konumu Boyunca Değişimi.	53
Şekil 5.2. Base, A2, C1 ve D1 Modellerine Ait Yerel Nusselt Sayısının (Nu) X Konumu Boyunca Değişimi.	55
Şekil 5.3. Düz (BASE) ve dalgalı yüzey modelleri (A1, A2, B1, C1, C2, D1, D2) için yüzeysel Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması.	55

UZATILMIŞ JET ÇARPMALI SOĞUTMADA DALGALI HEDEF YÜZEYİN ISI GEÇİŞİNE ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Gaz türbinleri, modern enerji üretim sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biri olup, yüksek sıcaklıklarda çalışan ve sürekli gelişen mühendislik uygulamaları arasında özel bir yere sahiptir. Türbin verimliliğini artırmanın en etkili yollarından biri, türbin girişindeki akışkan sıcaklığının yükseltilmesidir. Ancak bu durum, türbin kanatlarının imalatında kullanılan süper alaşım malzemelerin termal dayanım sınırları ile doğrudan kısıtlanmaktadır. Günümüzde malzeme teknolojisinde yaşanan ilerlemelere rağmen, mevcut malzemelerin dayanabileceği sıcaklık limitleri, gaz türbinlerinin çalışma koşullarında karşılaşılan sıcaklıklardan daha düşüktür. Bu nedenle, türbin kanatlarının etkin bir biçimde soğutulması hem malzeme bütünlüğünün korunması hem de sistemin uzun süre yüksek verimle çalışabilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Gaz türbini kanatlarının geometrisi, akış koşullarına bağlı olarak oldukça karmaşık bir yapı sergiler. Kanat boyunca sıcaklık ve ısı akısı dağılımı homojen değildir; bu nedenle farklı bölgelerde farklı soğutma tekniklerinin uygulanması gerekir. Kanadın orta kısımlarında iç kanallar aracılığıyla konvektif soğutma sağlanırken, dış yüzeylerde genellikle film soğutma teknikleri tercih edilir. Kanadın arka bölgesinde pin-fin (çivili yüzey) soğutma kullanılırken, özellikle kanadın ön kenarında yer alan ve sıcak gaz akımıyla doğrudan temas eden bölgelerde jet çarpmalı soğutma yöntemi uygulanmaktadır. Jet çarpmalı soğutma, yüksek lokal Nusselt sayıları üretebilmesi sayesinde hem gaz türbinlerinde hem de elektronik ekipmanların termal yönetiminde ve güneş enerjisi yoğunlaştırıcı sistemlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Jet çarpmalı soğutma sistemlerinde hedef yüzey geometrisi, akış yapısı ve ısı transferi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Literatürde yapılan birçok çalışmada, hedef yüzey genellikle düz olarak kabul edilmiş; dalgalı veya pürüzlü yüzeylerin ısı transferine olan etkisi sınırlı biçimde incelenmiştir. Ancak hedef yüzey geometrisinin değiştirilmesi, akışın karakteristiğini doğrudan etkilemekte; bu da yerel türbülans yoğunluğunun ve vorteks oluşumlarının artmasına yol açmaktadır. Böylelikle ısı transfer katsayısında anlamlı bir artış sağlanabilmektedir. Dalgalı yüzeyler, jetin yüzeye çarptıktan sonra yayılma davranışını değiştirerek, akışın yönünü ve hız dağılımını dinamik olarak etkilemekte, bu da ısı transferinin hem büyüklüğünü hem de dağılımını değiştirmektedir.

Bu tez çalışmasında, jet çarpmalı soğutmada dalgalı hedef yüzey geometrisinin ısı geçişine etkisi sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Çalışmanın amacı, hedef yüzeyde dalga formunun (tepe, çukur, sağ veya sol yönlü) ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini belirlemek ve bu geometrilerin akış yapısına olan katkısını ortaya koymaktır. Çalışma, tek sıralı jet (j) dizilimi ile gerçekleştirilmiş olup, jet sayısı 6 olarak belirlenmiştir. Jet çıkış hızı 48,75 m/s, Reynolds sayısı ise $Re = 32.500$ olarak sabitlenmiştir. Bu sabit akış koşulları altında, sekiz farklı hedef yüzey modeli analiz edilmiştir:

1. Base modeli (düz yüzey)
2. A1 modeli (tepe tipi dalgalı)
3. A2 modeli (sürekli tepe tipi dalgalı)
4. B1 modeli (sol yönlü dalgalı)
5. C1 modeli (sağ yönlü dalgalı)
6. C2 modeli (sürekli sağ yönlü dalgalı)
7. D1 modeli (çukur tipi dalgalı)
8. D2 modeli (sürekli çukur tipi dalgalı)

Her bir modelde dalga yüksekliği (A) ve dalga boyu (λ) farklı geometrik oranlarda belirlenmiştir. Bu modellerin oluşturulması, jet akışının hedef yüzeye çarpma ve yayılma davranışını daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla yapılmıştır. Akış, sıkıştırılmaz, kararlı (steady) ve türbülanslı olarak modellenmiştir. Türbülans modellemesi için $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) modeli tercih edilmiştir. Bu modelin, özellikle jet çarpmalı akışlarda sınır tabakası ayrılması ve yeniden yapışma bölgelerini doğru bir şekilde tahmin ettiği literatürde kanıtlanmıştır.

Analizlerde, öncelikle ağ (mesh) bağımsızlık çalışması yapılmış, elde edilen sonuçların ağ yoğunluğuna bağlı değişim göstermemesi sağlanmıştır. Ardından H/D oranı (nozül-hedef yüzey mesafesi / jet çapı) sabit tutularak akış yapısının yalnızca yüzey geometrisinden etkilendiği bir yapı oluşturulmuştur. Çözümler, konverjans kriterleri sağlanıncaya kadar tekrarlanmış ve her bir model için akış alanı, sıcaklık dağılımı ve yerel Nusselt sayıları ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Elde edilen sayısal sonuçlar, hedef yüzey geometrisinin ısı transfer performansı üzerinde oldukça belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir. Düz hedef yüzey (Base modeli) referans alınarak yapılan karşılaştırmalarda, dalgalı yüzeylerin tamamında daha yüksek ortalama Nusselt sayıları elde edilmiştir. Dalgalı yüzeylerin oluşturduğu geometrik değişkenlik, jetin hedef yüzeye çarptıktan sonra yön değiştirmesine, yüzey üzerinde güçlü ikincil akımların ve vorteks yapıların oluşmasına neden olmuştur. Özellikle tepe tipi (A1, A2) modellerde, jet akışının dalga tepelerinden yüzey boyunca kayması sonucu yerel hız gradyanları artmış, bu da ısı transfer katsayısında belirgin bir yükseliş sağlamıştır.

Sürekli dalgalı modeller (A2, C2, D2), jetin akış yönünü daha düzenli biçimde değiştirmesine ve enerjinin daha geniş bir yüzey alanına yayılmasına olanak tanımıştır. Bu nedenle, bu modellerde elde edilen ortalama Nusselt sayıları, periyodik olmayan modellere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Özellikle C2 modeli (sürekli sağ yönlü dalgalı), akış yönü ile dalga yönünün aynı hizada olması nedeniyle jetin yönlendirilmesini kolaylaştırmış ve hedef yüzey boyunca daha dengeli bir sıcaklık dağılımı oluşturmuştur.

Çukur tipli (D1, D2) yüzeylerde ise jet akışının bir kısmı dalga çukurlarında hapsolmuş, bu bölgelerde yerel türbülans ve döngüsel akımlar oluşmuştur. Bu durum, belirli bölgelerde ısı transferini artırmasına karşın, diğer bölgelerde akış zayıflaması nedeniyle ortalama Nusselt sayısında sınırlı bir artış sağlamıştır. Buna rağmen, bu modeller de düz yüzeye kıyasla daha yüksek ısı transfer performansı göstermiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, dalgalı yüzeylerin tamamı düz yüzeye göre %10 ila %35 arasında değişen oranlarda ısı transfer artışı sağlamıştır. Dalga yüksekliği arttıkça akışın yüzeyle etkileşimi güçlenmiş, türbülans enerjisi artmış ve buna bağlı olarak ısı

transfer katsayısı yükselmiştir. Ancak aşırı yüksek dalga oranlarında, jet akışının yüzeye çarpma davranışında kararsızlık gözlemlenmiş, bu da belirli bölgelerde ısı transferinin azalmasına neden olmuştur. Dolayısıyla optimum dalga yüksekliği ve dalga boyu oranlarının belirlenmesi, ısı transfer performansını en üst seviyeye çıkarmak açısından kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizler, jet çarpmalı soğutma sistemlerinde hedef yüzey geometrisinin ısı transfer performansı üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Dalgalı hedef yüzeyler, akış alanında türbülansı artırarak ve jetin enerjisini yüzey boyunca daha etkin dağıtarak, düz yüzeylere kıyasla daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edilmesini sağlamaktadır. Özellikle sürekli dalgalı geometriler hem akış kararlılığını korumuş hem de daha homojen sıcaklık dağılımı oluşturmuştur.

Bu çalışma, jet çarpmalı soğutma sistemlerinin tasarımında yüzey geometrisinin optimize edilmesinin, pasif ısı transfer artırımı açısından son derece etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, gaz türbini kanatlarının soğutulması, elektronik bileşenlerin termal yönetimi ve yüksek ısı yük altındaki sistemlerin tasarımı gibi mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek değerli veriler sunmaktadır. Böylelikle, dalgalı yüzey geometrisinin optimize edilmesiyle hem sistem verimliliği hem de malzeme dayanımı artırılabilir, bu da gelecekteki enerji sistemlerinin daha güvenli ve verimli çalışmasına katkı sağlar.



NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WAVY TARGET SURFACE ON HEAT TRANSFER IN EXTENDED JET IMPACT COOLING

SUMMARY

Gas turbines are among the most critical components of modern energy generation systems, operating at high temperatures and occupying a unique position in advanced engineering applications. One of the most effective ways to enhance turbine efficiency is by increasing the temperature of the working fluid at the turbine inlet. However, this is directly constrained by the thermal limits of the superalloy materials used in turbine blade manufacturing. Despite advances in material technology, the maximum temperatures that current materials can withstand remain below the operating temperatures encountered in gas turbines. Therefore, effective cooling of turbine blades is essential to preserve material integrity and ensure sustained high-efficiency performance of the system.

The geometry of gas turbine blades exhibits considerable complexity depending on the flow conditions. Temperature and heat flux distributions along the blade are non-uniform, necessitating the application of different cooling techniques in different regions. Convective cooling through internal channels is commonly employed in the mid-span regions, while film cooling techniques are typically applied on external surfaces. Pin-fin cooling is used on the trailing edge, whereas jet-impingement cooling is implemented particularly on the leading-edge regions directly exposed to hot gas flow. Jet-impingement cooling is widely used in gas turbines, electronic thermal management, and concentrated solar power systems due to its ability to generate high local Nusselt numbers.

In jet-impingement cooling systems, the target surface geometry has a significant influence on the flow structure and heat transfer. Most studies in the literature have assumed flat target surfaces, and the effects of wavy or roughened surfaces on heat transfer have been only partially investigated. However, modifying the target surface geometry directly affects the flow characteristics, increasing local turbulence intensity and vortex formation, which can substantially enhance heat transfer. Wavy surfaces alter the spreading behavior of the jet upon impact, dynamically affecting flow direction and velocity distribution, thereby modifying both the magnitude and distribution of heat transfer.

In this thesis, the effect of wavy target surface geometries on heat transfer in jet-impingement cooling is investigated numerically. The study aims to determine the influence of wave forms (peak, valley, leftward, or rightward) on heat transfer coefficients and to assess their contributions to the flow structure. The analysis was conducted using a single-row jet arrangement with six jets. The jet exit velocity was set to 48,75 m/s, and the Reynolds number was fixed at $Re = 32,500$. Under these constant flow conditions, eight different target surface models were analyzed:

- Base model (flat surface)

- A1 model (peak-type wavy)
- A2 model (continuous peak-type wavy)
- B1 model (leftward wavy)
- C1 model (rightward wavy)
- C2 model (continuous rightward wavy)
- D1 model (valley-type wavy)
- D2 model (continuous valley-type wavy)

For each model, wave height (A) and wavelength (λ) were defined with different geometric ratios to better observe jet impingement and spreading behavior. The simulations were performed using ANSYS Fluent via Computational Fluid Dynamics (CFD) methodology. The flow was modeled as incompressible, steady, and turbulent, with the $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) turbulence model employed due to its proven ability to accurately predict boundary layer separation and reattachment in jet-impingement flows.

Mesh independence studies were conducted to ensure that results were not sensitive to mesh density. The H/D ratio (nozzle-to-target distance / jet diameter) was kept constant so that flow behavior depended solely on surface geometry. Solutions were iterated until convergence criteria were satisfied, and flow fields, temperature distributions, and local Nusselt numbers were evaluated for each model.

The numerical results demonstrated a pronounced effect of target surface geometry on heat transfer performance. Compared to the flat Base model, all wavy surfaces exhibited higher average Nusselt numbers. Geometric variations induced by the wavy surfaces caused the jet to change direction after impact, generating strong secondary flows and vortical structures. In particular, peak-type models (A1, A2) showed increased local velocity gradients as the jet slid over the wave peaks, resulting in a notable enhancement in heat transfer coefficients.

Continuous wavy models (A2, C2, D2) allowed the jet to redirect more systematically and spread energy over a wider surface area, resulting in higher average Nusselt numbers than their non-continuous counterparts. Specifically, the C2 model (continuous rightward wavy) facilitated jet alignment with the flow direction, producing a more uniform temperature distribution across the target surface.

Valley-type surfaces (D1, D2) trapped part of the jet flow in wave troughs, creating local turbulence and recirculation zones. While this enhanced heat transfer in certain areas, flow weakening in other regions limited the overall increase in average Nusselt number. Nevertheless, these models still outperformed the flat surface in terms of heat transfer.

Overall, wavy surfaces provided a 10–35% increase in heat transfer relative to flat surfaces. Increasing wave height strengthened jet-surface interactions, enhanced turbulence energy, and consequently increased heat transfer coefficients. However, excessively high wave amplitudes caused instabilities in jet impingement behavior, reducing heat transfer in localized regions. Therefore, determining the optimal wave height and wavelength is critical for maximizing heat transfer performance.

In conclusion, the numerical analyses conducted in this study indicate that target surface geometry plays a decisive role in the heat transfer performance of jet-impingement cooling systems. Wavy surfaces enhance turbulence and more

effectively distribute jet energy across the surface, resulting in higher heat transfer coefficients compared to flat surfaces. Continuous wavy geometries, in particular, maintained flow stability while providing more uniform temperature distributions.

This work demonstrates that optimizing surface geometry is a highly effective passive method for enhancing heat transfer in jet-impingement cooling systems. The findings offer valuable insights for the cooling of gas turbine blades, thermal management of electronic components, and the design of high-heat-flux systems, contributing to improved system efficiency and material durability in future energy technologies.





1. GİRİŞ

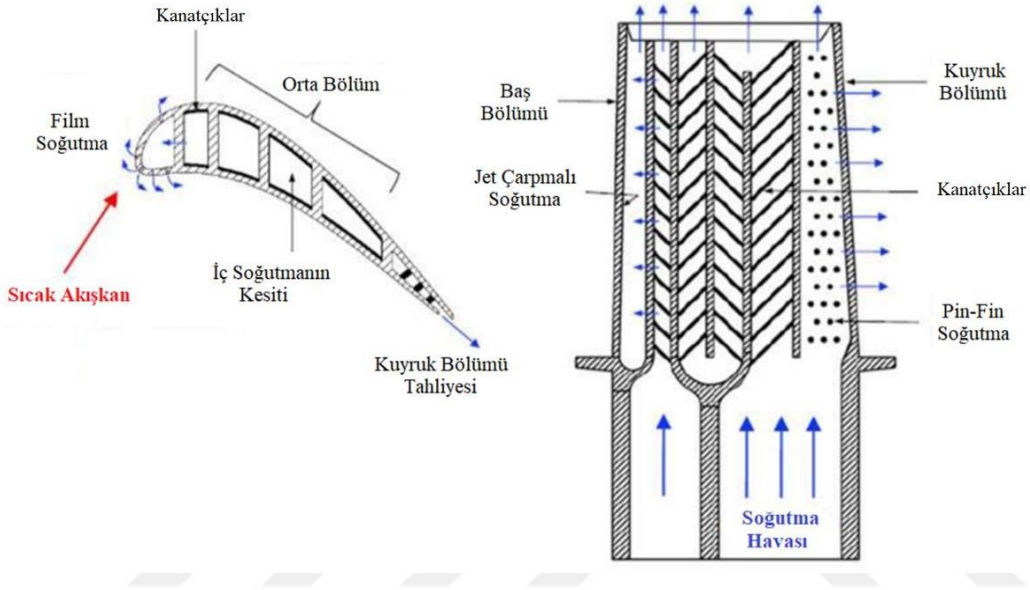
Günümüzde enerji verimliliği ve ısı yönetim, endüstriyel süreçlerden elektronik cihazlara kadar geniş bir yelpazede kritik bir öneme sahiptir. Isı transferinin etkin bir şekilde yönetilmesi, sistem performansının artırılması ve bileşen ömrünün uzatılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, jet çarpmalı soğutma, yüksek ısı transferi katsayısı sağlaması nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bir soğutma yöntemidir. Özellikle sınırlı alanlarda yüksek ısı yoğunluğunun bertaraf edilmesi gereken uygulamalarda, jet çarpmalı soğutma etkili bir çözüm sunmaktadır.

Jet çarpmalı soğutma sistemi, yüksek hızda hareket eden bir akışkanın hedef yüzeye yönlendirilmesiyle, sınır tabakasının inceltmesi ve yüzeyden etkili bir şekilde ısının uzaklaştırılması prensibine dayanır. Bu yöntemin performansı, jetin hızı, çapı, hedef yüzeye olan uzaklığı ve akış türbülansının karakteristiği gibi parametrelere bağlıdır. Son yıllarda, bu parametrelerin optimize edilmesi amacıyla çeşitli sayısal ve deneysel çalışmalar yürütülmüş; jet geometrisinin, yüzey pürüzlülüğünün ve akış türbülansının ısı geçişine etkisi incelenmiştir.

Uzatılmış jet çarpmalı soğutma, klasik jet çarpmalı soğutma yönteminden farklı olarak, jet çıkışının belirli bir uzunluk boyunca kılavızlanarak hedef yüzeye iletilmesini içerir. Bu yapılandırma, akışın daha kontrollü bir şekilde yönlendirilmesine olanak tanır ve yüzey üzerindeki ısı dağılımının homojenliğini artırır. Ayrıca, uzatılmış yapı sayesinde akışın türbülans karakteristiği değişmekte ve ısı transfer verimliliği önemli ölçüde iyileşmektedir. Bu çalışmada, uzatılmış jet çarpmalı soğutma yönteminin hedef yüzeydeki ısı geçişi üzerindeki etkisi, nümerik analizler ile incelenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar göz önüne alındığında, uzatılmış jet geometrisinin farklı akış koşullarındaki performansına dair sınırlı sayıda veri bulunmaktadır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizler ile uzatılmış jet yapısının ısı transferi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ortaya konulacaktır. Türbin kanadı üzerinde soğutma işlemi yapılmasıyla akışkan sıcaklığı türbin kanadı malzemesinin dayanabileceği maksimum sıcaklığın üzerine

ıkarılabilir. Trbın kanadının geometrik yapısından dolayı kanadın farklı bölümlerinde Şekil 1.1’den de görülebileceği gibi farklı soğutma teknikleri uygulanır.

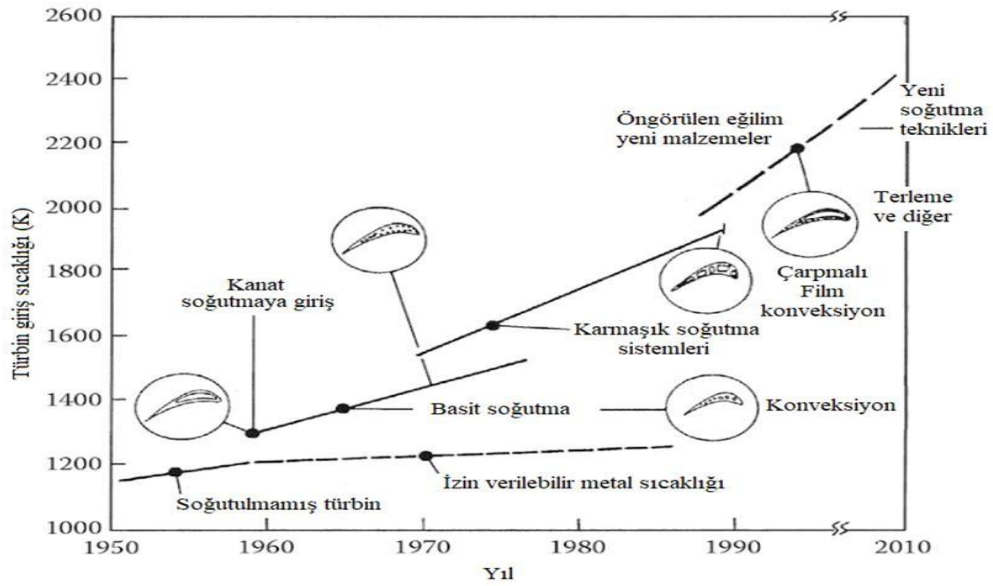
Trbın kanadının soğutulması, orta bölümde yüzeye kanatçıkların yerleştirildiği kanallarla yapılırken, kanadının sıcak akışkanla temas ettiği dış yüzeyde film soğutma yöntemiyle, kanadın kuyruk bölümünde ise kanat kesitinin dar olması nedeniyle pin-fin soğutma yöntemi ile yapılır.



Şekil 1.1. Trbın kanadı üzerinde yapılan soğutma yöntemleri [1].

Trbın kanadının maruz kaldığı termal yükler kanadın her bölgesinde aynı olmamaktadır. Özellikle sıcak akışkanın kanatla ilk temas ettiği bölge olan baş bölgesinde malzeme sıcaklığı kanadın diğer bölgelerine göre daha yüksek olur. Malzeme kalınlığı da bu bölgede kanadın diğer bölgelerine göre daha kalın olmasından dolayı jet çarpmalı soğutma yöntemi ile bu bölgede diğer yöntemlere göre daha etkin bir soğutma yapılabilmektedir. Benzer şekilde jet çarpmalı soğutma yöntemiyle stator kanatlarının hem baş hem de orta bölümünde etkin bir soğutma işlemi yapılabilmektedir.

Gemiőtn günümüze kadar trbın kanadının soğutulması üzerine birçok araőtırmalar yapılmış ve halen yapılmaya devam edilmektedir. Şekil 1.2’de trbın giriş sıcaklığının yıllara göre deęiőtindeki artış gösterilmiştir. Son dönemde film, jet çarpmalı soğutma, terleme ve yeni soğutma teknikleri üzerine yoęunlaőtılmıő ve elde edilen sonuçlar neticesinde trbın giriőinde akışkan sıcaklığı, kanat malzemesinin dayanabileceği sıcaklığın oldukça üzerine çıkabilmiőtir.



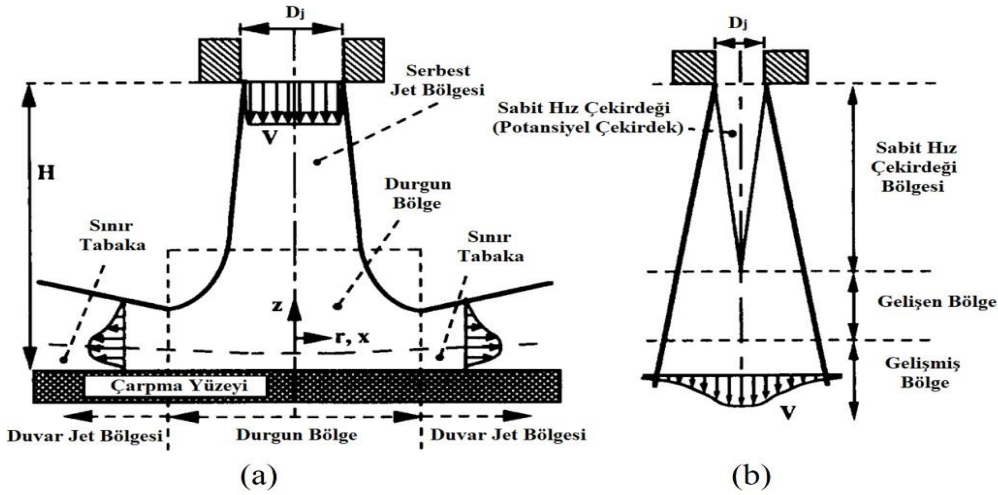
Şekil 1.2. Gaz türbin kanadı üzerinde yapılan soğutma teknikleri [2].

Kanadın soğutulması kompresörden temin edilen hava ile yapılmaktadır. Soğutma için gerekli olan havanın artması, kompresörden türbine gönderilen havanın miktarının azalmasına ve türbin veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle kanat üzerinde yapılacak soğutma işlemi mümkün olan en az hava kullanılarak yapılmalıdır. Bununla birlikte kanat üzerinde yapılacak soğutma mümkün olduğunca dengeli olması gerekmektedir. Kanat üzerinde yapılacak dengesiz soğutma, kanadın farklı bölgelerinde malzeme sıcaklığında önemli farklar oluşturacaktır. Bu durum kanat üzerinde termal gerilmelerin artmasına neden olmakta ve kanat malzemesinin ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Kanat üzerinde yapılacak soğutma işleminin tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da soğutma işleminin minimum basınç kaybı ile yapılması gerektiğidir. Düşük basınç kaybı ile yapılacak soğutma yöntemi ile kompresörde tüketilen iş azaltılmış olunur ve buna bağlı olarak türbin veriminin artması sağlanır. Bu nedenlerle kanat üzerinde yapılacak soğutma işleminin tasarımı çok iyi yapılması gerekmektedir.

1.1. Jet Çarpmalı Soğutma

Bir yüzey üzerindeki ısı transferi oranı yüzey üzerindeki akışkanın hızı ile doğrudan ilişkili olup, yüzey üzerindeki akışkanın hızının artmasıyla yüzeyden gerçekleşen ısı transferi oranı da artmaktadır. Jet çarpma ile yüzey üzerindeki bir delik ya da aralıktan yüksek hızda akışkan kütlesinin yüzeye çarptırılması ile yüzey üzerindeki akışkanın hızı artırılarak yüzeyden gerçekleşen ısı transfer miktarının artması sağlanır.

Şekil 1.3'te bir yüzeye çarpan jetin akış bölgeleri ve jet profili görülmektedir. Serbest jet bölgesinde jet çıkışından sabit hızla çıkan akışkan yüzeye doğru ilerledikçe çevre akışkanla arasında momentum aktarımı olur. Bu durum serbest jet sınırının genişlemesine, buna karşılık sabit hız çekirdeği (potansiyel çekirdek) sınırının daralmasına neden olur. Potansiyel çekirdek sınırı içerisinde kalan akışkanın hızı (U_m) jet çıkış hızına (U_n) eşittir. Jet çıkışından itibaren akış ilerledikçe akışkanın kesme gerilmesi nedeniyle potansiyel çekirdeğin kesitinde giderek küçülme görülür [3]. Literatürde potansiyel çekirdeğin uç noktasında akış hızının $U_m=0,95U_n$ olarak tanımlanmış ve potansiyel çekirdek uzunluğunun ise jet çapının (D_j) altı katı olduğu belirtilmiştir [4]. Yapılan bu tespit sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda da kabul görmüştür [5,6]. Jet plakası ile hedef yüzey arasındaki boşluk yeterince büyük olduğunda potansiyel çekirdek bölgesinden itibaren akışın aksel hızında düşüş olmaya başlar.

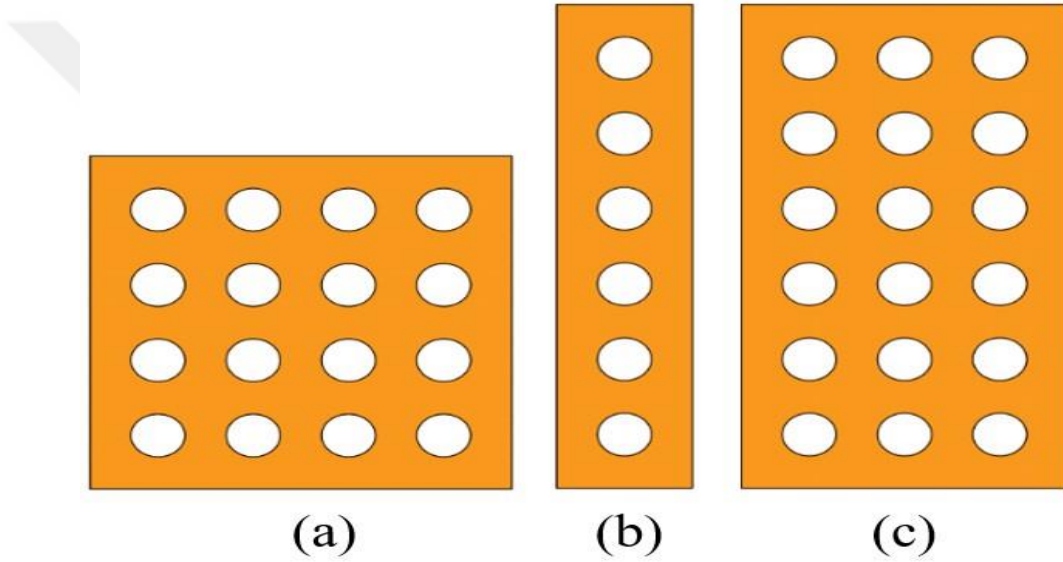


Şekil 1.3. a) Tek bir serbest jetin akış bölgeleri, b) Bir serbest jetin akış profili [8]

Akışın yüzeye çarpmasıyla akışın aksel yönü olan z yönünde hızı yavaşlamaya başlar ve buna bağlı olarak statik basınçta hızlı yükseliş olur. Daha sonra akış yön değiştirerek x veya r yönünde ani olarak tekrar hızlanmaya başlar. Akışın aksel yönde yavaşladığı ve yüzeye çarparak yön değiştirdiği bu bölge durgun bölge olarak adlandırılır. Yapılan bir çalışmada [9], bu bölgenin yüksekliğinin jet çapının iki katı kadar olacağı belirtilmişken, bir diğer çalışmada ise jet çapının 1,2 katı kadar olduğu belirtilmiştir [10].

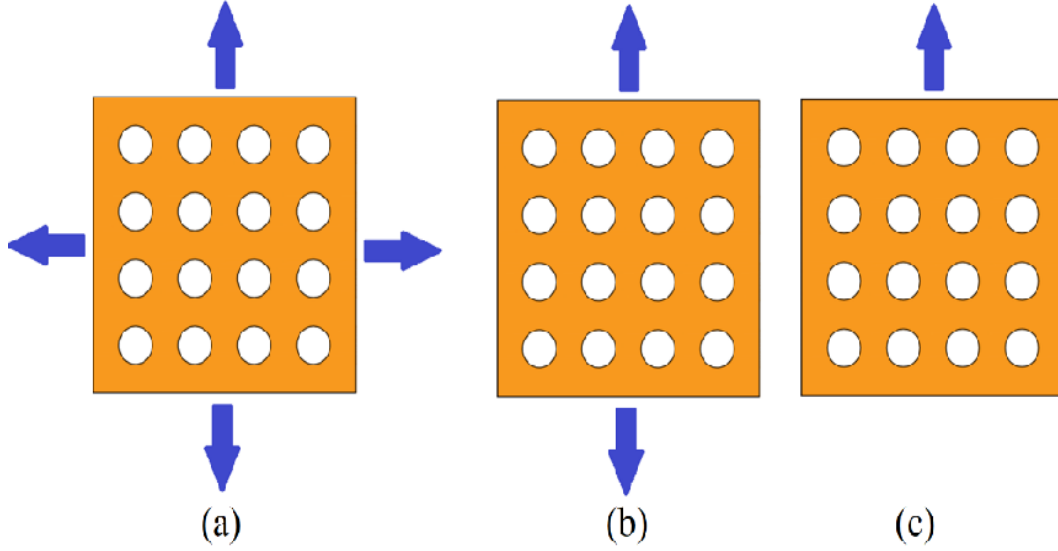
Durgun bölgeden duvar jeti bölgesine yön değiştiren akışkanın bu bölgedeki hız profiline bakıldığında, akış hızı, duvara yakın bölgede en yüksek değere ulaşırken

duvara çok yakın bölge ile duvardan uzak olan bölgelerde ise en düşük değere iner. Bu bölgede duvar jeti paralel akışa göre çok yüksek oranlarda ısı tranferi gerçekleşmesini sağlar. Bunun nedeni, duvar jeti ile ortam havası arasındaki kayma gerilmesi nedeniyle oluşan ve ısı transfer yüzeyindeki sınır katmanına taşınan türbülans nedeniyle olmaktadır. Gaz türbinlerinde jet delikleri Şekil 1.4'te gösterildiği gibi tek sıralı olabileceği gibi çok sıralı da olabilir. Düzgün sıralı yerleşimler genelde elektronik parçaların soğutulması ve kurutma sektörü gibi alanlarda kullanılırken, tek sıralı jet yerleşimi türbin kanadının genellikle baş bölümünde kullanılması tercih edilir. Çok sıralı jet yerleşimi ise kanadın hem baş bölgesinde hem de orta bölümlerinde tercih edilebilmektedir.



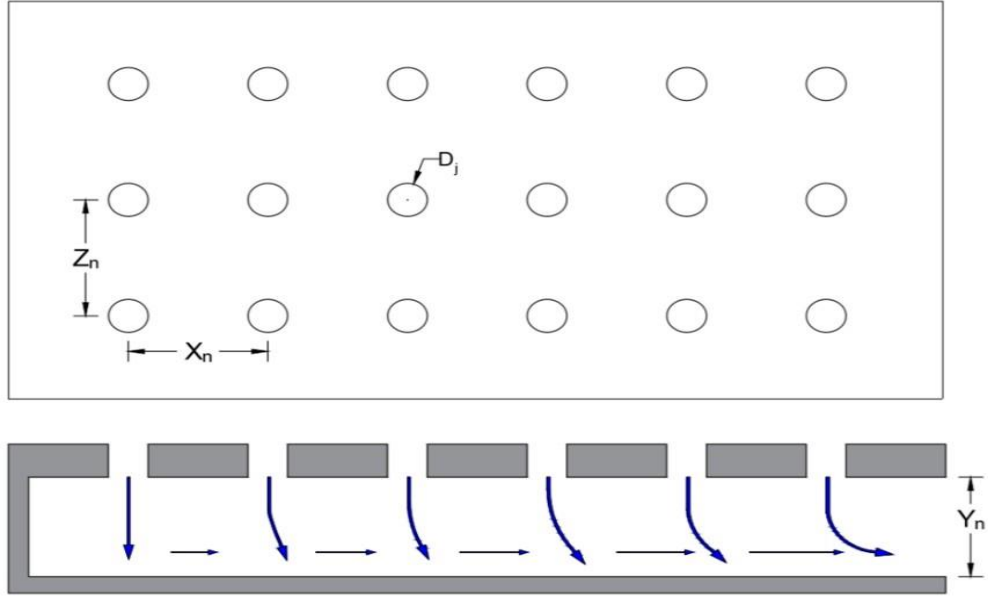
Şekil 1.4. Jet diziliş biçimleri a) düzgün sıralı b) tek sıralı c) çoklu sıralı.

Jet çarpmalı soğutmada üç farklı şekilde gerçekleşen akışın tahliyesi Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Akışın tek yönde tahliyesi maksimum çapraz akışı oluşturmaktadır.



Şekil 1.5. Jet akışta çapraz-akış türleri a) minimum çapraz-akış b) orta çapraz-akış c) maksimum çapraz-akış.

Çapraz akış, yüzey üzerinde gerçekleşen ısı transferini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Şekil 1.6'da görüldüğü gibi kanal içerisinde meydana gelen çapraz akış, akış yönüne doğru jet profilini etkilemekte ve jetlerin hedef yüzeye etki etmesi gereken bölgeden sapmalar meydana getirmektedir. Bununla birlikte sıralı düzende yerleştirilen jetlerde çapraz akış oranı, akış yönüne doğru ilerledikçe artmakta ve son deliklerin Re sayısını düşürerek hedef yüzeyde dengeli soğutmanın yapılmasını olumsuz yönde etkilemektedir [11]. Bu da jet çarpmalı soğutmanın etkinliğini önemli ölçüde azaltmaktadır [12,13]. Delik sayısının artması çapraz akışı arttırdığından jet çarpmalı soğutmanın etkinliğinin azalmasına neden olmaktadır [14]. Çoklu sıralı olarak yerleştirilen jet deliklerinde de benzer etkiler olmaktadır [15]. Delik aralıkları arttırıldığında jetlerin çapraz akıştan etkilenmesi kısmen azalsa da tamamen önlenememektedir [15]. Yüzey üzerinde ısı transferini arttırmak ve dengeli soğutma yapabilmek için çapraz akışın etkisi azaltılmalıdır [16,17].



Şekil 1.6. Kanal içerisinde oluşan çapraz akış [12].

Jet plakası ile soğutulmak istenen hedef yüzey arasındaki mesafe (Y_n) ısı transfer performansını etkileyen önemli bir parametredir. Mesafe değişiminden Nu sayısı, deliklerdeki Re sayısının değişimine göre daha fazla etkilenmektedir [16]. Y_n küçüldükçe Nu sayısı artma eğilimi göstermektedir [18]. Y_n 'in artması çapraz akış nedeniyle jetin hedef yüzeye etki ettiği noktada sapmalar meydana getirmektedir. Özellikle çapraz akışın artmasıyla bu etki daha fazla artmakta ve jetin hedef yüzeye çarpması gereken noktadan tamamen sapmalar oluşmakta ve bu durum hedef yüzeyin dengesiz soğutulmasına neden olmaktadır [19–21].

X_n/D_j , yüzey üzerindeki ısı transferini önemli ölçüde etkilemektedir. Daha sık yerleştirilmiş jet düzeninde ve özellikle plakalar arası mesafenin artmasıyla Nu sayısında azalma eğilimi görülürken daha seyrek yerleştirilmiş jet düzeninde ve plakalar arası mesafe küçüldükçe çapraz akışın taşınım etkisinden dolayı Nu sayısında az da olsa artışlar görülebilmektedir [22,23]. Ancak yüksek Re sayılarında çarpmalı jet, taşınım ısı transferine göre daha fazla ısı transferi gerçekleştirdiği için geniş delik aralığında ve küçük plakalar arası boşlukta ısı transferi çapraz akışın artması ile azalmaktadır [12]. Akışın tahliyesi her iki yönde de olması durumunda, tek yöne kıyasla ısı transferi çapraz akıştan daha az etkilenmektedir [24,25]. Çapraz akışın etkisini azaltmak için hedef yüzeye küp şeklinde engellerin yerleştirildiği çalışmalar da yapılmış, ancak, jetin etki ettiği bölgedeki sapmalar her ne kadar azalsa da jetin yapısında bozulmaların önüne geçilememiştir [26]. Benzer şekilde çapraz akışın etkisini azaltmak ve ısı transferini iyileştirmek için hedef yüzey üzerinde kanatçıklar

da yerleştirilmektedir [27]. Bu durumda özellikle düşük Re sayılarında ısı transferinde artış elde edilse de yüksek Re sayılarında jet yapısının çapraz akıştan etkilenmesi nedeniyle ısı transferindeki artışta azalma eğilimi gözlemlenmiştir [28]. Kanatçık yüksekliğinin artması ise düz plakaya göre Nu sayısını iyileştirmektedir [29]. Çapraz akışın etkisini azaltmak ve ısı transferini iyileştirmek için vorteks oluşumunu sağlayan jet lülesi tasarımları üzerinde de çalışılmıştır. Bu yönde yapılan çalışmalarda kısmen de olsa ısı transferinde artış elde edilmiştir [30].

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının temel amacı, gaz türbin kanatlarının yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı operasyonel koşullarda, Jet Çarpmalı Soğutma (JIC) yöntemi kullanılarak yüzeyde homojen ve etkin bir soğutma sağlanmasıdır. Gaz türbinleri, enerji üretimi ve havacılık gibi kritik alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olup, yüksek termal yükler altında güvenilir ve verimli bir şekilde çalışmaları büyük önem arz etmektedir. Ancak, teknolojik gelişmelerle birlikte türbin kanatlarının maruz kaldığı maksimum sıcaklık değerleri de artmakta ve bu durum, yüzeyin homojen bir şekilde soğutulmaması halinde performans kayıplarına ve malzeme ömründe ciddi düşüşlere neden olabilmektedir. Bu bağlamda, JIC yöntemi, yüksek hızlı akışkan jetlerinin hedef yüzeye doğrudan çarptırılması yoluyla etkin bir ısı transferi sağlayarak, yüzeyin aşırı ısınmasını önlemekte ve termal gerilmeleri minimize etmektedir. Sabit Reynolds sayısı $Re = 32.500$ ve sabit nozul uzunluğu $[E] G/D = 2$ dikkate alınarak yapılan analizler, sabit nozul uzunluğu ve yükseklik ile yüzeydeki ısı taşınım katsayısının nasıl optimize edilebileceğine yönelik önemli bulgular sağlamıştır.

Çalışmanın bir diğer önemli kısmı ise içbükey yüzeylerde gerçekleştirilen incelemelerdir. Gaz türbin kanatlarının iç yapısının konkav bir geometriye sahip olması sebebiyle, bu tür yüzeyler üzerinde gerçekleştirilen soğutma performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle konkav yüzeylerde homojen ısı dağılımının sağlanabilmesi ve termal streslerin azaltılması amacıyla yapılan bu çalışmalar, JIC yönteminin karmaşık yüzey geometrilerine uyarlanabilirliğini ortaya koymuştur.

Bu tez çalışması ile, gaz türbin kanatlarının Jet Çarpmalı Soğutma yöntemiyle etkin bir şekilde soğutulabileceği ve yüzey sıcaklık dağılımının homojenleştirilebileceği ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, gaz türbinlerinin daha yüksek sıcaklıklarda güvenilir bir şekilde çalışabilmesini sağlamakta, malzeme ömrünü artırmakta ve enerji

verimliliğini iyileştirmektedir. Bu çalışma, enerji üretimi ve havacılık sektörlerinde kullanılabilecek yenilikçi soğutma geometrilerinin geliştirilmesine ve gaz türbinlerinin termal performansının artırılmasına yönelik önemli bir katkı sunmaktadır.

1.3. Literatür Araştırması

Bu bölümde literatürde yer alan ve jet çarpmalı soğutmanın ısı transfer performansına etkilerinin incelendiği deneysel ve sayısal çalışmalar özetlenmiştir.

Jet çarpmalı soğutmanın ısı transfer performansını etkileyen temel parametreler mevcuttur. Literatürde bu parametrelerin ele alındığı bazı deneysel ve nümerik çalışmalar bu bölümde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

JIC'nin ısı transfer performansını birçok parametre etkiler. Bu parametrelerden ilki olan çarpma jetlerinin konfigürasyonu, ısı transfer özellikleri üzerindeki etkisinden dolayı önemlidir ve birçok araştırmacı bu konu üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Yun. Liu, Wenbao Yu, Heliang Liu ve Lixiang Zhong [31], sinüzoidal dalgalı (corrugated) hedef yüzeylerin jet çarpmalı soğutma sistemlerindeki etkisini sayısal yöntemlerle incelemiştir. Bu çalışma, düz hedef yüzey (Baseline) ile sinüzoidal dalgalı yüzey arasındaki akış ve ısı transferi performansını SST k- ω türbülans modeli kullanarak karşılaştırmıştır. Dalga periyodu ve genliği gibi geometrik parametrelerin farklı Reynolds sayılarındaki etkileri detaylı olarak ele alınmıştır. Bu bulgular, hedef yüzey geometrisinin optimize edilmesinin, jet çarpmalı soğutma sistemlerinde ısı transfer performansının artırılması ve ısı transferi dağılımının iyileştirilmesi açısından önemli bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde dalgalı veya kabartmalı yüzeylerin kullanımı, çapraz akışın oluşturduğu olumsuz etkileri azaltarak daha verimli soğutma çözümlerine katkı sağlamaktadır.

M. M. Rahman, S. K. Dash, S. Chakraborty ve A. Mukhopadhyay [32], sıkıştırılabilir jet çarpmalı soğutma sistemlerinde uygun referans sıcaklığının belirlenmesi ve buna bağlı olarak yerel geri kazanım faktörünün hesaplanması incelenmiştir. Çalışma sonucunda, sabit Reynolds sayısında Mach sayısı arttıkça ısı transfer katsayısının arttığı, ancak jet-hedef yüzey mesafesi büyüdükçe bu etkinin azaldığı görülmüştür. Mach ve Reynolds sayısının birlikte değiştiği durumda ise geri kazanım faktörünün bu değişimden etkilenmediği belirlenmiştir. Yüksek hızlı jet soğutma uygulamalarında Mach sayısının dikkate alınmasının önemli olduğunu göstermektedir.

Mehmet Berkant Özel, Orhan Yalçinkaya, Ahmet Ümit Tepe, Ufuk Durmaz ve Ünal Uysal [33], uzatılmış jet yapısına sahip ve dalgalı (wavy) hedef yüzeyli bir modelin ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Jet çarpmalı soğutma, yüksek sıcaklıklarda çalışan bileşenlerin ömrünü uzatmak amacıyla kullanılan etkili bir yöntem olup, jetlerin hedef yüzeye çarpması ile daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanması hedeflenmektedir. Ancak, aşağı yönde ilerleyen jetlerin çapraz akış (crossflow) nedeniyle yönlerinin sapması, bu yöntemin etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Çalışmada, düz (flat) ve dalgalı hedef yüzeylerin karşılaştırmalı analizi yapılmış ve özellikle çapraz akışın olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde, farklı jet nozulu uzunlukları ve hedef yüzey dalga yüksekliğinin ısı transferine etkisi; üç farklı Reynolds sayısında ($Re = 15.000, 25.000$ ve 35.000) incelenmiştir. Kullanılan boyutsuz parametreler arasında, orifis çıkışı ile hedef yüzey arasındaki mesafe oranı ($s/D = 0.5, 1.0, 2.0$ ve 3.0) ile dalga derinliği-jet çapı oranı ($H/D = 0.4, 0.6, 0.8$ ve 1.0) yer almaktadır. Sayısal simülasyon sonuçlarına göre hem uzatılmış jetler hem de dalgalı hedef yüzeyler, Nusselt sayısını (Nu) artırarak ısı transfer verimini iyileştirmektedir. Özellikle düşük Reynolds sayılarında, s/D oranının azaltılması ve H/D oranının artırılması, ısı transferinde önemli gelişmeler sağlamaktadır.

Lioua Kolsi, Fatih Selimefendigil, Kaouther Ghachem, Talal Alqahtani ve Salem Algarni [34], dalgalı hedef yüzeylerde çoklu nanojet çarpmalı soğutma sisteminin ısı transfer performansını artırmak amacıyla, çift gözenekli kanatlar ve inhomojen (mekânda değişen) manyetik alanın birleşik etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, farklı manyetik alan parametreleri (manyetik alan şiddeti, eğim açısı ve uzaysal olarak değişen bileşenin genliği) ile çift gözenekli kanat parametreleri (eğim açısı ve geçirgenlik katsayısı) dikkate alınarak parametrik CFD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çift gözenekli kanatlar ve inhomojen manyetik alan kullanımıyla, çoklu jet çarpmalı soğutma sistemlerinde ısı transfer performansının etkin şekilde kontrol edilebileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, özellikle dalgalı yüzey geometrilerinde ısı transferini artırmak için oldukça etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Juan He, Qinghua Deng ve Zhenping Feng [35], konvansiyonel düz hedef yüzey (Baseline durumu), tam dalgalı yüzey ve yarı dalgalı yüzey yapılarına sahip sistemlerin akış ve ısı transfer karakteristikleri, jet Reynolds sayısı (Re) $Re = 15.000-45.000$

aralığında karşılaştırmalı olarak sayısal analiz yöntemiyle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, tam dalgalı hedef yüzeyin ilk beş jetin çarptığı bölgede elde ettiği Nusselt sayısı, düz yüzeyle benzer düzeydeyken; son dört jetin etki alanında, özellikle yüksek Reynolds sayılarında hem zirve değerler hem de ısı transferinin düzgünlüğü belirgin şekilde iyileşmiştir. Ayrıca, dalga derinliği (H) arttıkça toplam ısı transfer kapasitesi ve alan ortalamalı Nusselt sayısı da artmakta, ancak bu durum sürtünme kaybında artışa neden olmaktadır. Isı transferi ile sürtünme kaybı birlikte değerlendirildiğinde, yalnızca $H = 0.8D$ olan FC durumu, tüm incelenen koşullarda Baseline durumuna göre daha yüksek termal performans göstermiştir. Bu durumda sağlanan maksimum performans artışı %5,8'e kadar ulaşmaktadır. Son olarak, FC ($H = 0.8D$) yapısı temel alınarak geliştirilen SC ($H = 0.8D$) tasarımı ile sürtünme kaybı azaltılmış ve ısı transferi hemen hemen aynı kalmakla birlikte termal performans önemli ölçüde artırılmıştır. Bu çalışma, dalgalı hedef yüzey geometrilerinin, özellikle yüksek Reynolds sayılarında, çapraz akışın olumsuz etkilerini azaltarak jet çarpmalı soğutma sistemlerinde ısı transferini iyileştirmede etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Yunfei Xing, Sebastian Spring ve Bernhard Weigand [36], çoklu jet dizilimlerinde ısı transfer karakteristikleri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle kapsamlı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, perspex model üzerinde geçici sıvı kristal (transient liquid crystal) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve jetlerin hedef plakadaki çeşitli noktalarındaki yerel sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu sayede, ısı transfer katsayısının kesin ve detaylı bir şekilde değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Deneysel olarak; farklı jet çarpma desenleri, jet-plaka aralığı, çapraz akış (crossflow) düzenlemeleri ve jet Reynolds sayısının yerel Nusselt sayısı dağılımı ile ilgili basınç kaybı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sayısal analiz, güncel CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kodlarının çoklu jet çarpma konfigürasyonlarının ısı tasarımı süreçlerinde güvenilir ve etkin mühendislik aracı olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Ahmet Ümit Tepe [37], kanatlı-borulu ısı değiştiricisinde çukurlu ve çıkıntılı kanatların ısı transfer performansı ile akış karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. En uygun tasarım parametresini belirlemek amacıyla, kanat yüzeyine dairesel ve iki farklı oval çukur (a/b oranları 0,667 ve 1,50) çift sıralı olarak yerleştirilmiş ve bu düzenlemelerin ısı transferi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dairesel çukur çapı 2,8

mm olarak sabitlenirken, oval çukurların kesit alanları dairesel çukur ile eşit tutulmuştur. Çukurlu ve çıkıntılı kanatların düz yüzeye kıyasla ısı transferini %26,63'e kadar artırdığını göstermiştir. Termal performans faktörü (TPF) açısından yapılan değerlendirmede ise, ısı transferi artışında en uygun tasarımın dairesel çukurlu/çıkıntılı kanat tasarımı olduğu tespit edilmiştir.

Ahmet Ümit Tepe, Kâmil Arslan, Yaşar Yetişkin ve Ünal Uysal [38], uzatılmış jet deliklerinin jet çarpmalı soğutmadaki ısı transferi ve akış karakteristiklerine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Jet çarpmalı soğutmada meydana gelen çapraz akış, hedef yüzeydeki ısı transferini olumsuz yönde etkilemektedir. Çalışmanın temel amacı, nozullar vasıtasıyla jet deliklerinin hedef yüzeye doğru uzatılması ile çapraz akışın ısı transferi üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaktır. Araştırma, türbülanslı akış rejiminde (Reynolds sayısı 15.000 ile 45.000 arasında) gerçekleştirilmiştir. Türbin kanadı hedef yüzey olarak düz bir levha şeklinde modellenmiştir. Hedef yüzeye yerleştirilen çıkıntıların (kaburga) ısı transferine etkisi de araştırılmış ve bu sonuçlar düz yüzey ile karşılaştırılmıştır. Analiz edilen parametreler arasında hedef yüzeydeki ortalama ve lokal Nusselt sayıları, akış karakteristikleri ve kompresör gücü bulunmaktadır. Sayısal sonuçlar, nozulla hedef yüzey arasındaki boşluk azaldıkça ortalama Nusselt sayısının arttığını göstermiştir. Ayrıca, düz yüzey üzerinde kaburgalı yüzeye kıyasla daha yüksek ortalama Nusselt sayısı (Nu_{ort}) elde edilmiştir.

Chaoyi Wan, Yu Rao ve Peng Chen [39], düz yüzey ve sıra düzenli/yarı sıra düzenli kare pim kanatçıklı yüzeylere yönelik çoklu jet çarpmasıyla oluşan ısı transferi karakteristiklerinin sayısal karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hesaplama modellerinin doğruluğunu test etmek amacıyla bir düz yüzey ve bir pim kanatçıklı yüzey üzerinde deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Deneysel ve sayısal veriler arasındaki karşılaştırmalar, sayısal modelin çoklu jet çarpması altında hem düz hem de pim kanatçıklı yüzeylerdeki ısı transferi ve basınç kaybını makul düzeyde tahmin edebildiğini göstermiştir. Sayısal sonuçlar, pim kanatçıkların ısı transferi üzerinde önemli etkileri olduğunu ortaya koymuştur. İncelenen 15.000 ile 35.000 arasında değişen Reynolds sayısı aralığında hem genel ortalama hem de lokal Nusselt sayıları ve debi katsayıları karşılaştırılmıştır. Sıra düzenli pim kanatçıklı yüzeyde, düz yüzeye kıyasla ısı transfer oranı %34,5'e kadar artarken, debi katsayısında yaklaşık %3 azalma gözlenmiştir. Ayrıca, sıra düzenli pim kanatçıklı yüzey, yarı sıra düzenli pim kanatçıklı yüzeye göre daha üstün ısı transfer performansı sergilemiştir.

Sistemdeki akış hız dağılımları, akım çizgileri ve türbülans kinetik enerjisi, düz ve pim kanatçıklı yüzeylerin ısı transfer karakteristiklerini açıklamak amacıyla detaylı olarak analiz edilmiştir.

Ahmet Ümit Tepe, Yaşar Yetişken, Ünal Uysal ve Kâmil Arslan [40], düz yüzey üzerine yönelik jet çarpmalı soğutma deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı, sıralı jet diziliminde uzatılmış jet deliklerinin ısı transfer performansına etkisini açıklamaktır. Çalışmalar tamamen türbülanslı akış rejiminde ($16250 \leq Re \leq 32500$) gerçekleştirilmiştir. İlgili yüzeyinde yerel Nusselt sayısı (Nu) dağılımı, Geçici Sıvı Kristal yöntemi kullanılarak deneysel olarak elde edilmiştir. Akış ve ısı transferi karakteristiklerini incelemek amacıyla deneyle aynı konfigürasyonda sayısal çalışmalar da yapılmıştır. Türbülans denklemlerinin çözümünde düşük Reynolds düzeltmeli SST k- ω türbülans modeli kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve SST k- ω türbülans modelinin ortalama ve yerel Nusselt sayısı dağılımlarını yüksek doğrulukla tahmin edebildiği belirlenmiştir. Maksimum ortalama ve yerel Nusselt sayıları $Gj/Dj = 2.0$ koşulunda elde edilmiştir. Ayrıca, PEC sonuçları tüm Reynolds sayılarında nozul ile hedef plaka arasındaki en uygun boyutsuz boşluğun $Gj/Dj = 2.0$ olduğunu göstermiştir.

Orhan Yalçınkaya [41], düz hedef yüzeye sahip uzatılmış jet çarpmalı soğutma modeli kullanılarak, öncelikle eliptik ve slot biçimli pinlerin ısı transfer performansına etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Dikdörtgen kesitli kanal içerisindeki akışta, farklı nozul uzunlukları, pin düzenlemeleri ve Reynolds sayıları (Re) kapsamında çeşitli pin yüksekliklerinin konvektif ısı transferi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Pinler, hedef yüzeye kademeli ve dairesel düzende yerleştirilmiş olup, sayısal model literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Türbülans çözümünde düşük Reynolds sayısı düzeltmeli SST k- ω türbülans modeli tercih edilmiştir. Sayısal model hem pürüzsüz hem de pin-pürüzlü yüzeylerde ısı transferi ve basınç düşümünü güvenilir şekilde tahmin etmiştir. Pinlerle pürüzlendirilmiş yüzeyler, uzatılmış JIC sistemlerinde ortalama ve yerel ısı taşınım katsayılarının yüzey üzerindeki dağılımını önemli ölçüde homojenleştirmekte, böylece termal gerilmeler azalmakta ve malzeme ömrü uzamaktadır. Pürüzsüz yüzeylere kıyasla soğutma performansı artırılırken, yerel sıcaklıklar düşürülerek bölgesel aşırı ısınma riski minimize edilmektedir.

Jung ve çalışma arkadaşları [42], düz ve açılı yerleştirilmiş jet dizilimlerinin ısı transfer karakteristiklerini kıyaslamışlardır. Araştırma sonuçları, eğimli jetlerin klasik

yerleşime kıyasla daha etkili bir ısı transferi sağladığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, çıkış bölgesindeki çapraz akışların yoğunlaşması, bu bölgelerde ısı transferinin düşmesine sebep olmuştur.

Tepe ve arkadaşları [43], jet çıkış düzlemi ile hedef yüzey arasındaki mesafenin boyutsuzlaştırılmış hali olan G/D oranının ısı transferine etkisini incelemişlerdir. G/D oranları 1.0 ile 5.0 arasında seçilmiş, elde edilen sonuçlar ise orifis plakasına ait $G/D = 6.0$ konfigürasyonu ile karşılaştırılmıştır. Deneysel veriler, sıvı kristal termografi (TLC) yöntemi ile toplanmış, sayısal analizlerde ise SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak Fluent ortamında çözüm yapılmıştır. Sonuç olarak, jet çıkışının hedef yüzeye yaklaştırılması hem yerel hem de ortalama ısı transferinde artış sağlamıştır. En yüksek Nusselt sayıları ise $G/D = 2.0$ oranında elde edilmiştir. Aynı araştırma grubuna ait diğer bir çalışmada, uzatılmış jet deliklerine sahip bir sistemde, hedef yüzeye dikdörtgen kesitli rib yapıları entegre edilmiştir. Pürüzsüz yüzeyde 71 olarak ölçülen ortalama Nu sayısı, $Re = 32500$ ve $G/D = 3.0$ koşullarında ribli konfigürasyonda 88'e yükselmiştir. Böylece uzatılmış jet ile kullanılan riblerin toplam ısı transferinde yaklaşık %24'e varan artış sağladığı belirlenmiştir.

Pazarlıoğlu ve arkadaşları [44], güneş enerjili hava ısıtıcısı sistemlerinde uzatılmış jet delikleri ile çalışan bir çarpma jet sistemi önermişlerdir. G/D oranının düşürülmesinin konvektif ısı transferini artırdığı ifade edilmiştir. En uygun hedef yüzey-jet plakası aralığının $G/D = 2.0$ olduğu belirtilmiş ve bu konfigürasyonun çapraz akışların olumsuz etkilerini azalttığı ortaya konmuştur.

Heo ve arkadaşları [45], eğimli jet sistemlerinin performansını teorik yaklaşımla ele almışlardır. Yaptıkları optimizasyon çalışmasında, içbükey yüzeyler için en etkin soğutmanın jet giriş açısının yaklaşık 60° olduğu koşullarda gerçekleştiği bulunmuştur.

Guan ve arkadaşları [46], kama biçimli içbükey yüzeylerde jet-hedef mesafesi (H/d) ve jetler arası mesafenin ısı geçişi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmalarında, eğimli jet konfigürasyonunun düz jet sistemlerine göre daha yüksek ısı transferine neden olduğu gözlenmiştir ve optimum H/d oranı belirlenmiştir. Isı transferinin sadece büyüklüğü değil, yüzey üzerindeki dağılım homojenliği de termal stres açısından oldukça kritiktir. Bu nedenle, literatürde son yıllarda pin yapılarının bu bağlamda performansı artırmaya yönelik etkileri detaylı şekilde araştırılmaktadır.

Rao ve arkadaşları [47], farklı tipte efüzyon delikleri ve pin dizilimlerinin ısı geçişine katkısını deneysel olarak TLC yöntemiyle değerlendirmiştir. Çıkışa yakın bölgelerdeki çapraz akışı azaltarak daha düzgün ısı dağılımı sağladıkları ve yaklaşık %51 oranında daha yüksek ısı transferi elde edildiği raporlanmıştır.

Brakmann ve arkadaşları [48], mikro ölçekte kübik pinler kullanarak ısı transfer yüzey alanını %150 oranında artırmışlardır. Deneyler termokromik sıvı kristal teknikleri ile yapılmış, Ansys CFX kullanılarak da sayısal modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, mikro pinlerin sistem üzerinde önemli bir basınç kaybı yaratmadan ısı akışını %134-142 oranında artırabildiğini ortaya koymuştur.

Ndao ve arkadaşları [49], hidrofilik özellikteki mikro pinlerin (dairesel, kare ve eliptik kesitli) farklı Re sayılarındaki performansını değerlendirmişlerdir. R134a kullanılan deneylerde, kare ve dairesel kesitli pinlerin en yüksek ısı transfer değerlerine ulaştığı bildirilmiştir.

Pandit ve arkadaşları [50], termoelektrik sistemlerde kullanılan dikdörtgen kanallarda dört farklı pin kesitini (dairesel, üçgen, elmas, altıgen) analiz etmişlerdir. Elmas kesitli pinlerin en yüksek ısı performansı gösterdiği; ayrıca, kanal yüksekliği azaldıkça ısı transfer etkinliğinin arttığı belirlenmiştir.

Hua ve arkadaşları [51], düşük Re sayılarına sahip akış koşullarında farklı mikro pin geometrilerinin etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Eliptik pinlerin, diğer geometrilere kıyasla sistemin termal verimini daha fazla yükselttiği ifade edilmiştir.

Wan ve çalışma arkadaşları [52], mikro pinli dört model üzerinde kaynama rejiminde testler gerçekleştirmiştir. Kare pinlerin en iyi ısı transferini sağladığı, elmas kesitli pinlerin ise minimum basınç kaybına yol açtığı sonucuna ulaşılmıştır.

Ambreen ve Kim [53], mikro pinlerin farklı geometrilerdeki ısı performansını karşılaştırmışlardır. Sınır tabakası ayrılmasını geciktirmeleri nedeniyle dairesel kesitli pinlerin önerildiği bir değerlendirme sunulmuştur.

Singh ve arkadaşları [54], silindirik, kübik ve eşmerkezli yüzey pürüzlülüklerinin jet çarpmalı soğutma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. En iyi performans eşmerkezli yapı ile elde edilmiş ve bu tasarımda dikkate değer bir basınç kaybı yaşanmadığı raporlanmıştır.

Wan ve arkadaşları [55], kare pinlerle donatılmış hedef yüzeylerde, 15000 ile 35000 arasındaki Re değerlerinde ısı transferi ve basınç kaybı ilişkisini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, düz yüzeyli sistemlere kıyasla %162'ye varan ısı transfer artışı elde edilmiştir.

Ndao ve arkadaşları [56], mikro pinli yüzeylerde kaynama ısı transferini değerlendirmişlerdir. Dairesel mikro kanatçıklı yüzeyin en yüksek ısı transfer katsayısını sağladığı, pürüzsüz yüzeyin ise en düşük performansı gösterdiği tespit edilmiştir.

Azad ve arkadaşları [57], düz ve pinli yüzeyleri karşılaştırdıkları deneylerinde, pürüzlendirilmiş yüzeylerin ısı taşınım katsayısını %30'a kadar artırdığını belirtmişlerdir. Literatürde pinlerin yerleşim biçiminin (sıralı, kademeli, daireli) performans üzerindeki etkileri de çalışmalarda sıkça ele alınmaktadır.

Hadipour ve arkadaşları [58], tek jetin merkezden püskürtüldüğü ve hedef yüzeyde daireli olarak düzenlenmiş mikro pinlerin kullanıldığı bir konfigürasyonda, G/D ve H/d oranlarının performansa etkisini deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırmışlardır. Bazı konfigürasyonlarda mikro pinlerin Nu sayısını azalttığı görülse de $G/D = 2,0$ ve $H/d = 0,5$ koşullarında %10,8 oranında artış sağladığı belirtilmiştir.

Rakhsha ve arkadaşları [59], pulsatif jetlerin düz ve pinli yüzeyler üzerindeki etkisini farklı frekanslarda (50–100 Hz) incelemişlerdir. Her iki yüzey tipinde de jet frekansı arttıkça ortalama Nu değerlerinde iyileşme kaydedilmiştir.

Son olarak, Wan ve arkadaşları [60], sıralı ve kademeli olarak düzenlenmiş kare pinlerin yerleştirildiği bir hedef yüzeyde, sayısal bir analiz gerçekleştirerek %34,5'e varan bir ısı transfer artışı kaydetmişlerdir. Ayrıca sıralı dizilimin çapraz düzene göre daha verimli olduğu ifade edilmiştir.

2. SAYISAL MODELLEME VE AĞ YAPISI (MESH)

Uzatılmış jet çarpmalı soğutma sistemlerinde hedef yüzey geometrisinin ısı geçişi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, farklı dalga formlarına sahip sekiz model tasarlanmıştır. Bu modeller; düz yüzey (Base), tepe bölgesi dalgalı (A1), tepe bölgesi sürekli dalgalı (A2), sol eğimli dalgalı (B1), sağ eğimli dalgalı (C1), sağ eğimli sürekli dalgalı (C2), çukur yüzeyli (D1) ve çukur yüzeyli sürekli dalgalı (D2) olmak üzere sınıflandırılmıştır.

Her bir model, dalgalı yüzey morfolojisinin akış yapısı ve ısı transfer performansı üzerindeki etkilerini nümerik olarak değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur. Bu modellerin oluşturulmasındaki temel amaç, hedef yüzey geometrisinin uzatılmış jet çarpmalı soğutmada ısı geçiş performansına olan etkisini nümerik olarak incelemektir.

Uzatılmış jet çarpmalı sistemlerde, jetin çıkıştan hedef yüzeye kadar olan mesafesi boyunca akış yapısı karmaşık bir türbülans karakteri sergiler. Dalgalı yüzeyler, bu türbülans yapısını değiştirmekte; sınır tabaka kalınlığını, yeniden bağlanma noktalarını ve yerel ısı taşınım katsayılarını doğrudan etkilemektedir.

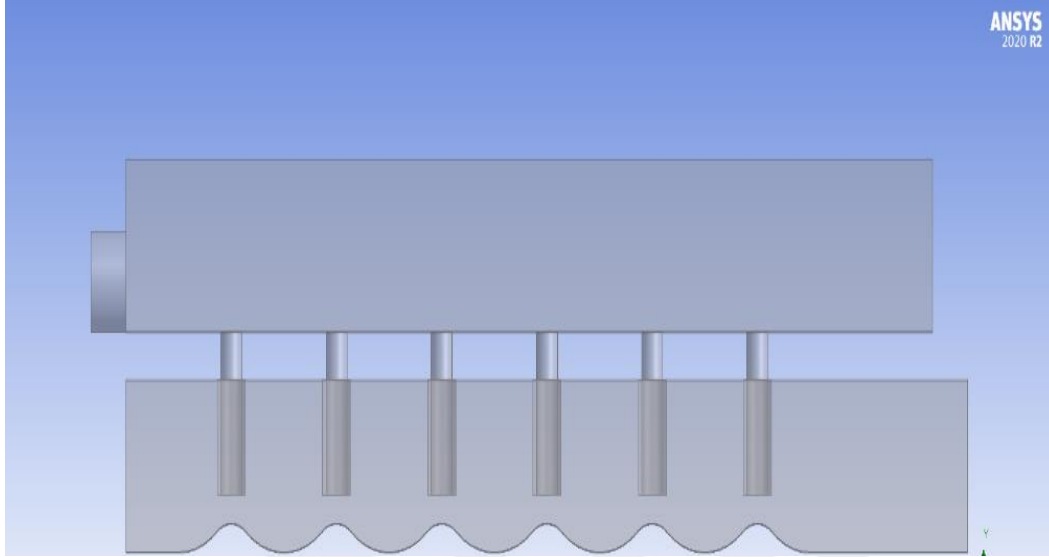
Bu tez çalışmasında, Reynolds sayısı, Nusselt sayısı dağılımı, akış hatları (streamlines) ve hız vektörleri gibi parametreler üzerinden her bir modelin performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece, dalga formunun tipi, yönü ve sürekliliğinin ısı geçiş mekanizması üzerindeki etkisi sistematik biçimde ortaya konmuştur. Bu çalışmada, uzatılmış jet çarpmalı soğutma sistemi içerisinde hedef yüzey geometrisinin ısı geçişine etkisini incelemek amacıyla sekiz farklı hedef yüzey modeli tasarlanmıştır. Tüm modellerde, jet çıkışı ile hedef yüzey arasındaki mesafe oranı $G/D = 2$ olacak şekilde sabit tutulmuştur.

2.1. Modelleme

2.1.1. Geometrik tanım

Bu çalışmada, uzatılmış jet çarpmalı soğutma sisteminde hedef yüzey geometrisinin ısı geçişi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sekiz farklı model tasarlanmıştır. Bu

modeller arasında Şekil 2.1’de yer alan A1 modeli (Tepe modeli dalgalı), jetin hedef yüzeye çarpmasıyla oluşan akış ve ısı transfer karakteristiklerini modifiye eden dalgalı bir tepe yapısına sahiptir. Geometri, ANSYS Design Modeler 2020 R2 ortamında üç boyutlu olarak oluşturulmuştur.



Şekil 2.1. Geometrik dalgalı model.

Model, üç ana bileşenden meydana gelmektedir:

1. Jet çıkış bölgesi,
2. Akış alanı (hava hacmi),
3. Hedef yüzey (dalgalı yüzeyli plaka).

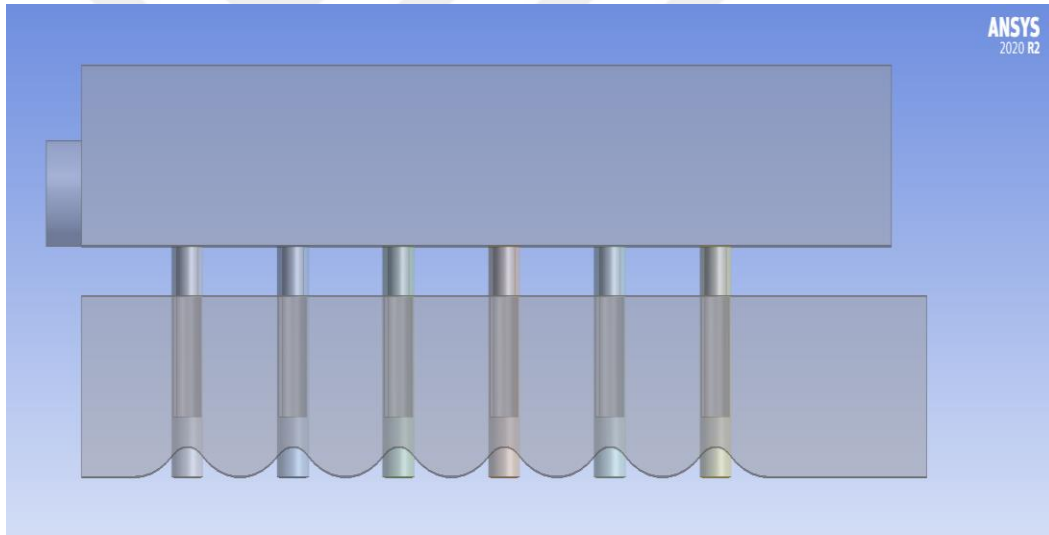
Jet çıkış kanalları, üst plaka üzerinde altı adet silindirik nozul şeklinde tasarlanmıştır. Jet çapı (D) tüm modellerde sabit tutulmuş ve hedef yüzey ile jet çıkışı arasındaki mesafe oranı $G/D = 2$ olacak şekilde belirlenmiştir. Bu oran, uzatılmış jet çarpmalı akış koşullarını sağlamak ve literatürde yaygın olarak kullanılan değerler arasında yer almaktadır.

Hedef yüzey, düz tabanlı model (Base) yüzeyine göre modifiye edilmiştir. A1 modelinde, jetlerin çarptığı bölgenin alt kısmında tepe formunda periyodik dalgalar bulunmaktadır. Bu dalgalar, belirli bir dalga genliği (A) ve dalga boyu (λ) değerine sahiptir. Dalgalı yapı, jetin çarpma noktasında sınır tabakanın kararsızlığını artırmakta, akış ayrılmaları ve yeniden bağlanma bölgeleri oluşturarak ısı taşınımını önemli ölçüde etkilemektedir. Tablo 2.1’de dalgalı modelin geometrik özellikleri genel hatlarıyla aşağıda özetlenmiştir:

Tablo 2.1. Dalgalı hedef yüzey için modelleme parametreleri.

Parametre	Sembol	Değer / Tanım
Jet çıkış çapı	D	6 mm
Jet-yüzey mesafesi	G	12 mm
G/D oranı	-	2
Jet sayısı	N	6 adet
Dalga genliği	A	$\lambda/8$ (örnek oran)
Dalga boyu	λ	20 mm

Şekil 2.2'deki geometri, ANSYS Fluent ortamında yapılacak sayısal analizler için katı ve akışkan bölgelerin ayrımını sağlayacak şekilde oluşturulmuştur. Katı bölgeler, ısı iletim analizine imkân tanımak amacıyla tanımlanırken, akışkan bölge jet akışının gelişini ve hedef yüzeye çarpmasını temsil etmektedir.



Şekil 2.2. Dalgalı hedef yüzeye sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.

2.1.2. Hesaplama alanı ve akış bölgeleri

A1 modelinde akış alanı, jet çıkış bölgesinden hedef yüzeyin alt kısmına kadar uzanmaktadır. Jetler üst plaka üzerinden aşağıya doğru yönlendirilmiş ve hedef yüzeyde dalgalı yapı ile etkileşime girmiştir. Akış hacmi, jetlerin birbirleriyle etkileşimini yakalayabilmek amacıyla yeterli genişlikte seçilmiştir.

Modelde yer alan bölgeler aşağıda tanımlanmıştır:

- **Fluid:** Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) çözümünün gerçekleştirildiği akış bölgesidir. Bu bölge, sıkıştırılmaz ve Newtonyen özellikte hava akışıyla doldurulmuştur.
- **Component 1–6 Solid:** Jet nozulleri ve hedef yüzeyin katı bölgelerini temsil eder. Bu bölgeler ısı iletimi analizlerinde kullanılmıştır.

Geometrik model, CFD analizine uygun olacak şekilde hacimsel olarak ayrılmıştır. Akış alanının giriş kısmında jet çıkışları yer alırken, çıkış kısmı akışın serbest bir şekilde dışarı atılmasına izin verecek şekilde konumlandırılmıştır.

2.1.3. Sınır koşulları

Model üzerinde aşağıdaki sınır koşulları uygulanmıştır:

- **Jet çıkışı (inlet):** Sabit hız veya sabit kütleli debi sınır koşulu uygulanmıştır. Jet çıkışında akışın sıcaklığı sabit tutulmuş, türbülans yoğunluğu (I) literatürle uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir.
- **Hedef yüzey (wall):** Sabit sıcaklık değeri uygulanmıştır. Bu yüzey, ısı geçişinin temel olarak incelendiği bölgedir.
- **Yan duvarlar:** Simetri veya adyabatik duvar koşulu uygulanarak yan etkilerin analiz sonuçlarını etkilemesi engellenmiştir.
- **Çıkış (outlet):** Sabit basınç (pressure outlet) sınır koşulu kullanılmıştır.

Bu koşullar sayesinde jetin çarpma bölgesinde meydana gelen akış ayrılmaları, yeniden bağlanma bölgeleri ve yerel ısı taşınım katsayıları doğru şekilde çözümlenebilmiştir.

2.1.4. Modelin amacı ve sayısal incelemedeki rolü

A1 modeli, dalgalı tepe yapısının jet çarpma bölgesindeki akış ve ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur. Dalgalı tepe formu, akışın hedef yüzey üzerindeki türbülans enerjisini artırarak Nusselt sayısının yerel ve ortalama değerlerini etkilemektedir.

Bu model, düz yüzeyli (Base) modele kıyasla dalgalı yapıların avantaj ve dezavantajlarını incelemek için referans görevi görmektedir. Elde edilen sonuçlar, dalgalı hedef yüzeylerin uzatılmış jet çarpmalı soğutma sistemlerindeki ısı transfer

performansını iyileştirmek için nasıl optimize edilebileceğine dair önemli veriler sağlamaktadır.

2.2. Mesh (Ağ Yapısı) Oluşturulması

Sayısal analizlerin doğruluğu, oluşturulan ağ yapısının (mesh) kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle çalışmada, oluşturulan her model için uygun ağ yapısı geliştirilmiş, jet akışı ve hedef yüzey etkileşimini doğru şekilde çözümleyebilmek amacıyla yoğunlaştırılmış bölgesel ağ uygulanmıştır.

2.2.1. Ağ tipi ve hücre yapısı

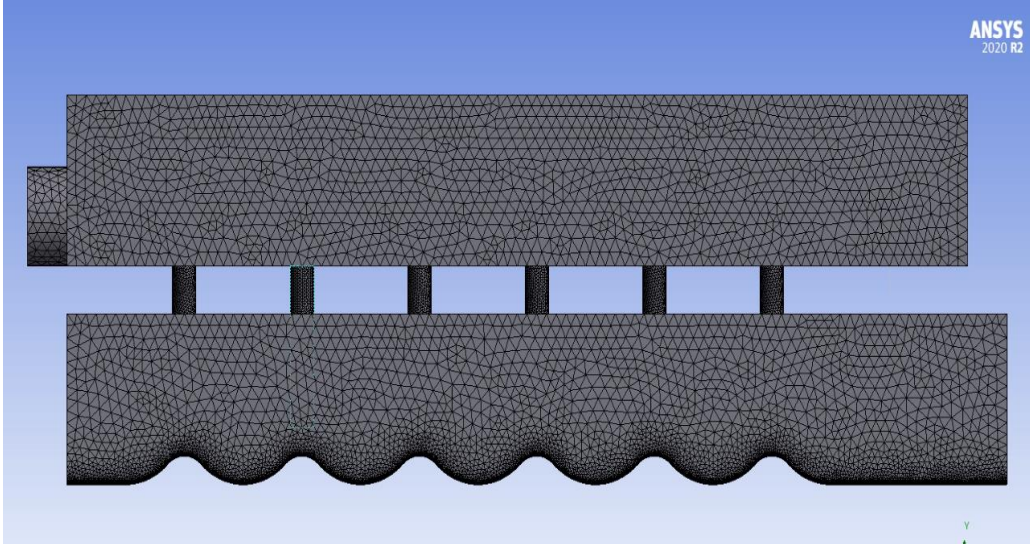
Analizlerde üç boyutlu akış alanı çözümü gerektiğinden, 3B hacim ağı (volume mesh) oluşturulmuştur. Çalışmada karma (hybrid) bir ağ yapısı tercih edilmiştir.

- Akış alanının genelinde tetrahedral (dört yüzlü) elemanlar,
- Jet çıkış kanalları ve hedef yüzey yakınlarında ise hexahedral (altı yüzlü) veya prizmatik katmanlar kullanılmıştır.

Bu yaklaşım, hem karmaşık dalgalı yüzey geometrilerinde esneklik sağlamış hem de duvar yakınındaki hız ve sıcaklık gradyanlarının hassas olarak yakalanmasına olanak tanımıştır.

Jet çıkışlarının ve hedef yüzeyin bulunduğu bölgelerde, akışın çarpma ve yeniden bağlanma noktaları bulunduğu için mesh yoğunluğu artırılmış, bu bölgelerde refinement (yoğunlaştırma) işlemi uygulanmıştır. Akışın daha düzgün olduğu uzak bölgelerde ise hücre boyutları kademeli olarak artırılmıştır.

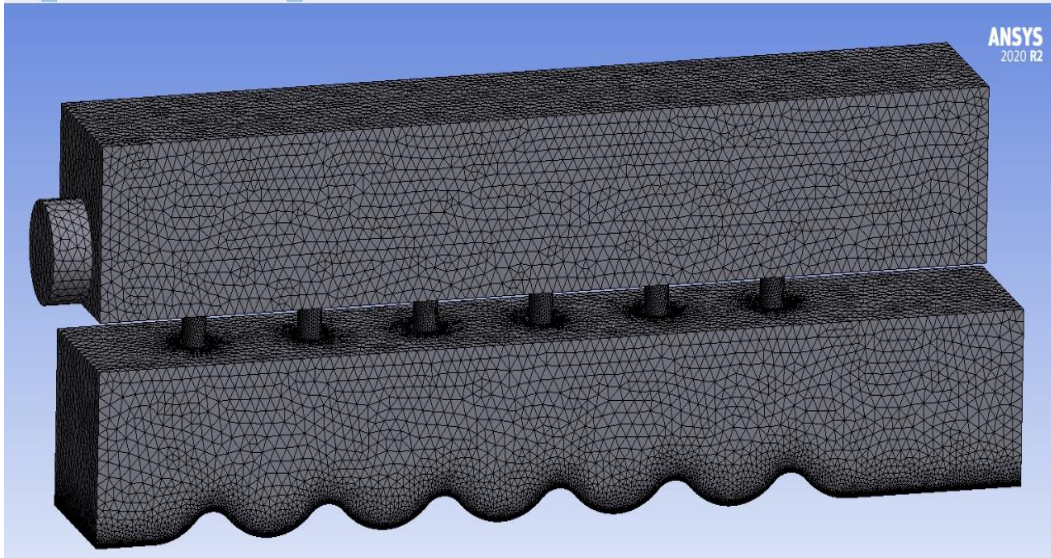
Şekil 2.3'te dalgalı hedef yüzeye sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin ANSYS Fluent ortamında oluşturulan ağ yapısı görülmekte olup, katı ve akışkan bölgeler birbirinden ayrı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.3. Dalgalı hedef yüzeye ait üç boyutlu mesh yapısının genel görünümü.

2.2.2. Sınır tabaka (boundary layer) ağı

Şekil 2.4’te hedef yüzey etrafında doğru bir ısı geçişi analizi yapılabilmesi için duvar yakınındaki türbülansın düzgün bir şekilde çözümlenmesi amacıyla oluşturulan ağ yapısı görülmektedir. Bu nedenle hedef yüzey, jet çıkış duvarları ve akış duvarları boyunca inflation (sınır tabaka) katmanları eklenmiştir. Bu bölgelerde 10 ila 15 adet katman oluşturulmuş, ilk katman kalınlığı seçilirken duvar yakınındaki boyutsuz mesafe (y^+) değeri $1 < y^+ < 5$ aralığında tutulmuştur. Böylece, türbülans modeli olarak kullanılan $k-\omega$ SST modelinin duvar yakınındaki çözüm gereksinimleri sağlanmıştır.



Şekil 2.4. Dalgalı hedef yüzeyli jet çarpmalı soğutma modelinin oluşturulan ağ yapısı.

2.2.3. Ağ kalitesi

Ağ yapısının kalitesini belirlemek için orthogonal quality ve aspect ratio değerleri incelenmiştir.

- Minimum orthogonal quality değeri 0.2'nin üzerinde,
- Maksimum aspect ratio değeri ise 10'un altında olacak şekilde düzenlenmiştir.

Bu değerler, ANSYS Fluent kullanıcı kılavuzunda önerilen sınırların içerisinde ve sayısal kararlılığı sağlamaktadır. Ayrıca, skewness değerinin 0.9'un altında kalması hedeflenmiştir.

2.2.4. Ağ bağımsızlık analizi (mesh independence study)

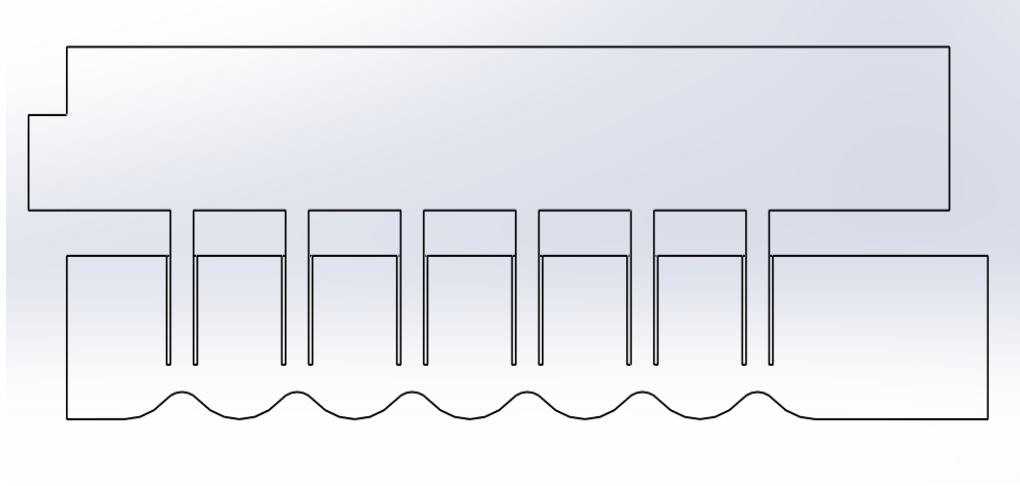
Sayısal çözümün ağ yoğunluğuna bağlılığını ortadan kaldırmak amacıyla, ağ bağımsızlık analizi yapılmıştır. Bu kapsamda, farklı ağ yoğunluklarında (örneğin 0.8, 1.2 ve 1,6 milyon eleman) çözümler gerçekleştirilmiş ve ortalama Nusselt sayısı ile maksimum hız değerleri karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar, belirli bir ağ yoğunluğundan sonra değişimlerin ihmal edilebilir seviyede kaldığını göstermiştir. Bu nedenle, yaklaşık 1,2 milyon elemandan oluşan ağ yapısı nihai analizler için yeterli kabul edilmiştir.

Oluşturulan ağ yapısı hem geometrik karmaşıklık hem de hesaplama doğruluğu açısından dengeli bir yapı sunmaktadır. Jet çıkışları, dalgalı yüzey tepelikleri ve oluk bölgelerinde yüksek hücre yoğunluğu sayesinde, akış ayrılmaları, yeniden bağlanmalar ve türbülans etkileri doğru şekilde yakalanabilmiştir. Böylece, elde edilen sayısal sonuçların fiziksel gerçekliği yüksek düzeyde korunmuştur.

Çalışmada jet çarpmalı soğutma sisteminin hedef yüzeyinde farklı dalga profillerinin ısı geçişi üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla sekiz farklı hedef yüzey modeli oluşturulmuştur. Tüm modellerde jet çıkış nozulları aynı konfigürasyona sahiptir: 6 adet dairesel nozul kullanılmış ve nozul-hedef yüzey mesafesi (G) ile nozul çapı (D) oranı sabit tutulmuştur ($G/D = 2$).

Bu, her modelde karşılaştırmanın sadece yüzey geometrisine bağlı olarak yapılabilmesini sağlamıştır. Akışın simetrik ilerleyebilmesi için, giriş, çıkış ve sınır koşulları tüm modellerde aynı şekilde uygulanmıştır.

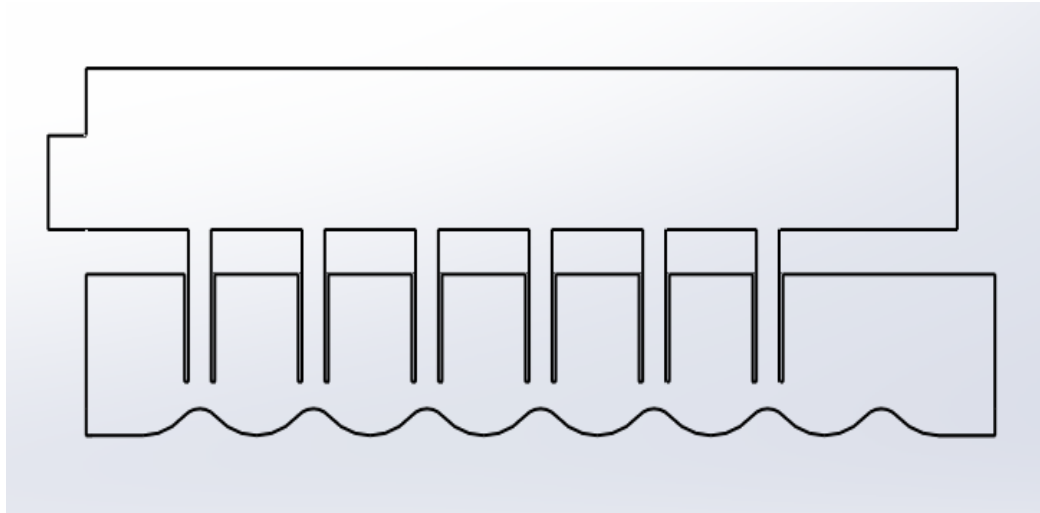


Şekil 2.6. Tepe Modeli Dalgalı $G/D = 2$.

Yüzey dalgalı olup, dalgaların tepe noktaları jet çıkış eksenleriyle hizalanmıştır. Bu tasarım, jetin doğrudan çarptığı bölgelerde yüksek lokal Nusselt sayısı oluşturur. Ancak jet çarpması sonrası yüzeyin dalga çukurlarında akış ayrılması ve düşük hız bölgeleri meydana gelir. Bu da ortalama ısı geçişini bir miktar düşürebilir.

2.3.3. Tepe modeli sürekli dalgalı

Tepe bölgesinde süreklilik arz eden dalgalı form kullanılmıştır. Bu geometri, akışın yönlendirilmesini ve jetin çarpma hattı boyunca sınır tabakanın dinamik olarak bozulmasını sağlar. Şekil 2.7’de $G/D = 2$ olan Sürekli Dalgalı Tepe Model’inin geometrik yapısı gösterilmektedir.



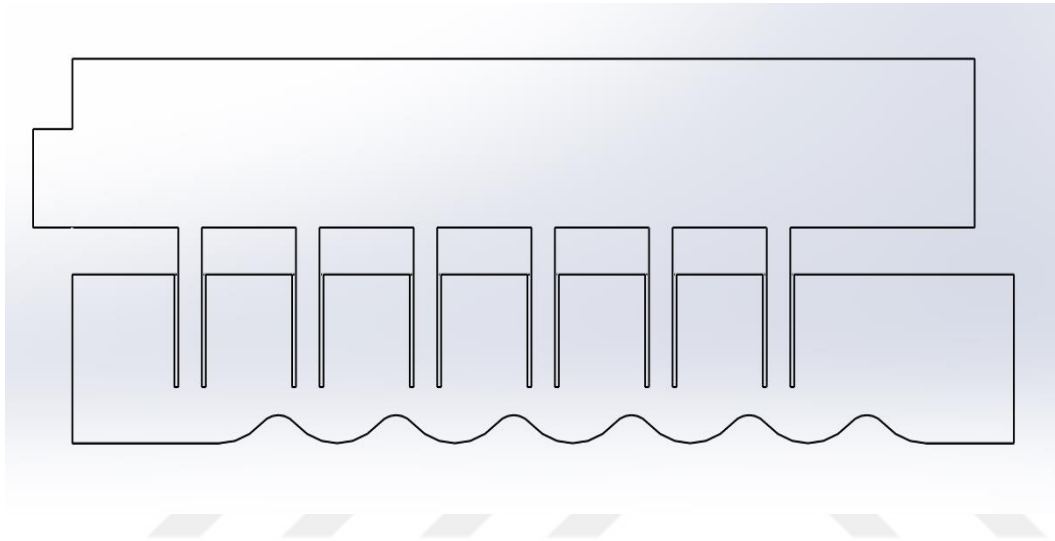
Şekil 2.7. Tepe Modeli Sürekli Dalgalı $G/D = 2$.

Tepe modeline benzer şekilde dalgalıdır; ancak dalgalar yüzey boyunca sürekli ve periyodik olarak devam etmektedir. Bu yapı, akışın yüzey boyunca daha uzun

mesafede türbülanslı kalmasını sağlar. Akışın yeniden bağlanma bölgeleri daha sık oluşur ve bu da ortalama ısı geçişinde artış sağlar.

2.3.4. Sol modeli dalgalı

Dalga formunun eğimi sol tarafa yöneliktir. Bu durum, jetin çarpma sonrası akış yönünü asimetrik hale getirerek yüzey üzerindeki akış dağılımını değiştirir. Şekil 2.8’de $G/D = 2$ olan Sol Modeli dalgalı hedef yüzeyin geometrik yapısı gösterilmektedir.

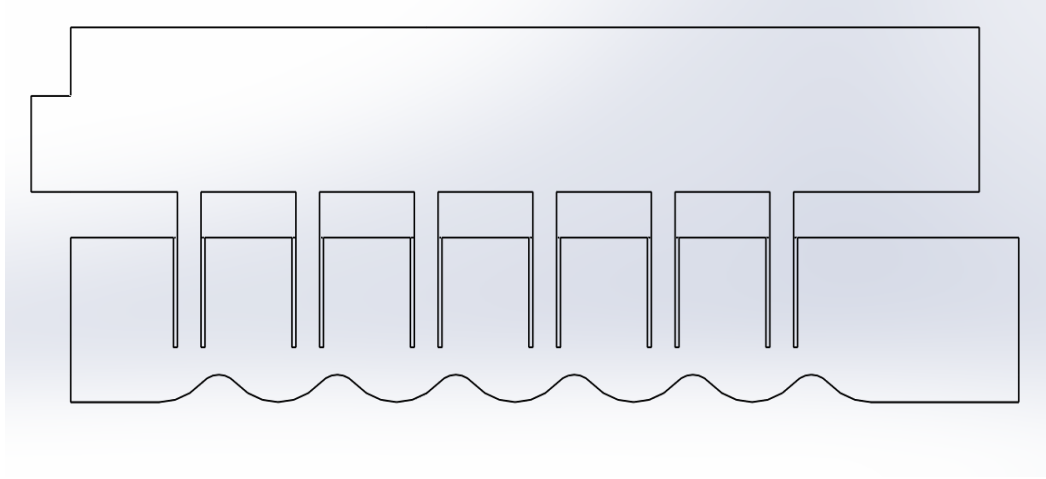


Şekil 2.8. Sol Modeli Dalgalı $G/D = 2$.

Dalga formu, sol yönlü bir eğim taşır. Bu, jet akışının çarpma sonrasında akış yönünde asimetri oluşturur. Yüzey boyunca bir yönde ivmelenme meydana gelir ve akış yeniden bağlanma bölgeleri farklı konumlarda oluşur. Bu model, ısı geçişinde yönlü türbülans etkilerini araştırmak açısından önemlidir.

2.3.5. Sağ modeli dalgalı

Dalga eğiminin sağ tarafa yönelmiş olduğu bu modelde, akışın yeniden bağlanma noktası ve hız dağılımı farklılık göstermektedir. Şekil 2.9’da $G/D = 2$ olan Sağ Modeli dalgalı hedef yüzeyin geometrik yapısı gösterilmektedir.

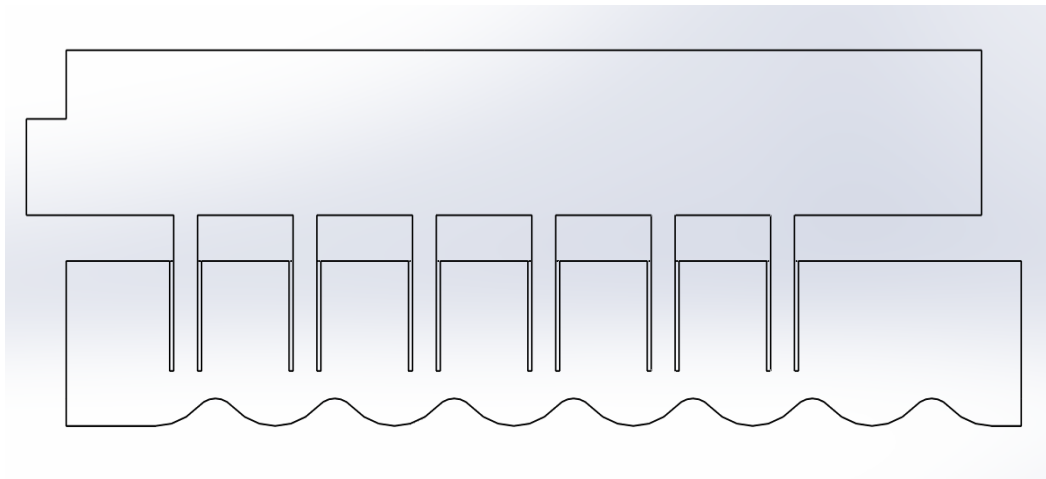


Şekil 2.9. Sağ Modeli Dalgalı $G/D = 2$.

Sol modelin ters yönlü versiyonudur. Sağ yönlü eğim, akışın farklı bir yönsel davranış göstermesine neden olur. Bu tür geometriler, jetlerin çarpma sonrası birleşme bölgelerinde vorteks oluşumlarını etkileyebilir. Dolayısıyla bu model, asimetrik akış etkilerinin ısı transferine katkısını analiz etmeye olanak tanır.

2.3.6. Sağ modeli sürekli dalgalı

Sürekli dalgalı sağ eğimli yapı, jetin çarpma hattı boyunca akış sürekliliğini bozarak yüksek türbülans bölgeleri oluşturur ve böylece ısı geçişini artırabilir. Şekil 2.10'da $G/D = 2$ olan Sürekli Dalgalı Sağ Model'inin geometrik yapısı gösterilmektedir.

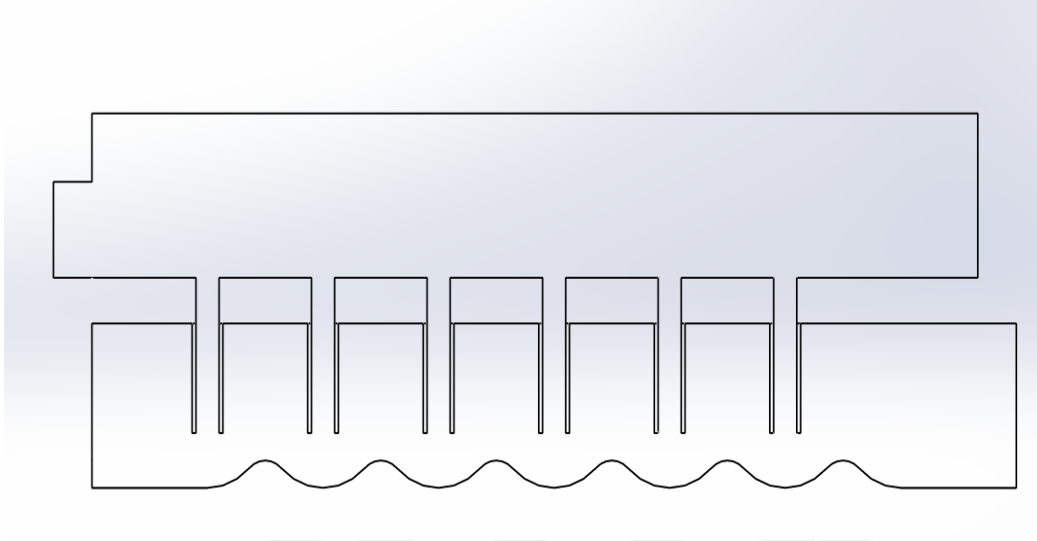


Şekil 2.10. Sağ Modeli Sürekli Dalgalı $G/D = 2$.

Bu modelde dalgalar hem sağ yönlü eğime hem de sürekliliğe sahiptir. Sürekli dalga formu sayesinde, jet akışları yüzey boyunca tekrarlayan vorteks yapıları üretir. Bu durum, kararlı bir türbülans zonu meydana getirir ve ortalama ısı geçişini önemli ölçüde artırabilir.

2.3.7. Çukur modeli

Yüzey üzerinde yerel çukur bölgeler bulunmaktadır. Bu çukurlar, akış içinde düşük basınç bölgeleri oluşturarak ısı taşınımını farklılaştırır. Şekil 2.11’de $G/D = 2$ olan Çukur Model’inin geometrik yapısı gösterilmektedir.

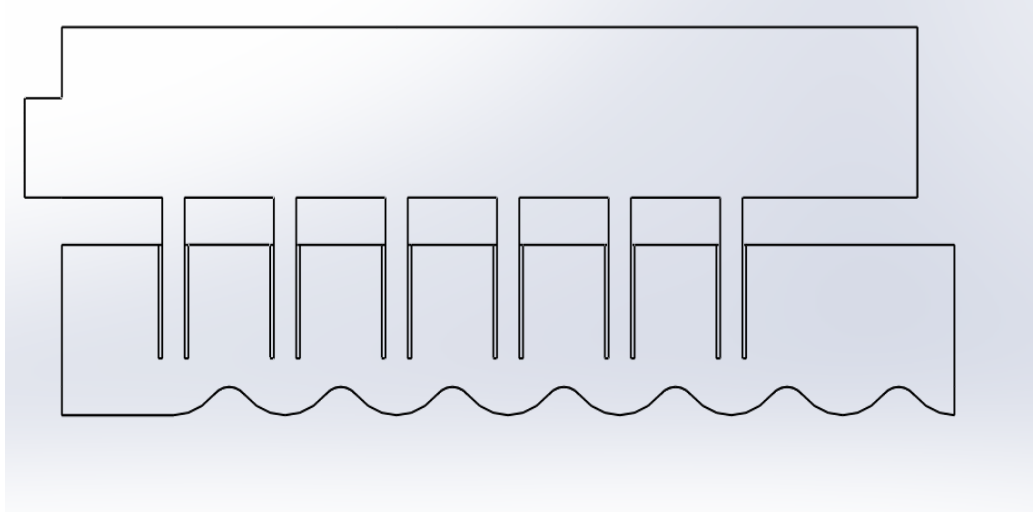


Şekil 2.11. Çukur Modeli $G/D = 2$.

Bu modelde jetler, yüzeyin çukur (konkav) bölgelerine çarpmaktadır. Bu durumda, jet akışı yüzeye çarptıktan sonra çukur içinde sıkışarak dönücü (recirculation) bölgeler oluşturur. Bu bölgelerde akış hızı düşük, ancak karışım şiddeti yüksek olabilir. Bu nedenle lokal ısı transferi değişken, ortalama ısı geçişi ise orta düzeydedir.

2.3.8. Çukur modeli sürekli dalgalı

Çukur bölgelerin süreklilik kazandığı bu model, yüzey boyunca döngüsel akımların (recirculation zones) oluşumuna neden olarak konvektif ısı transferini etkiler. Şekil 2.12’de $G/D = 2$ olan Sürekli Dalgalı Çukur Modeli’nin geometrik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Çukur Modeli Sürekli Dalga $G/D = 2$.

Çukur formun süreklilik kazandığı bu modelde, jet akışı yüzey boyunca periyodik recirculation bölgeleri oluşturur. Bu yapı, akışın sürekliliğini bozmaz ancak her çukurda küçük ölçekli dönü hareketleri meydana getirir. Bu tür mikro vorteksler, konvektif ısı taşınımını artırabilir ve ısı transfer katsayısında genel bir yükseliş sağlayabilir.

2.4. Akış ve Isı Geçişi Üzerindeki Etkiler

Farklı dalga geometrilerinin oluşturduğu yüzey morfolojisi, jet çarpmalı akışın üç ana bölgesini doğrudan etkiler:

1. **Çarpma Bölgesi (Impingement Zone):** Jetin yüzeye ilk temas ettiği bölgedir. Dalgalı yüzeylerde, tepe veya çukur bölgelerde çarpma noktasının yeri değişir.
2. **Yanal Akış Bölgesi (Wall Jet Region):** Jet yüzeye çarptıktan sonra yanal olarak ilerler. Dalgalar bu akışı bozarak **mikro ölçekli türbülans** üretir.
3. **Yeniden Bağlanma Bölgesi (Reattachment Zone):** Dalgalı yüzeylerde bu bölge sık sık tekrarlanır. Bu da yüksek ısı geçişinin devamlılığını sağlar.

Genel olarak, sürekli dalgalı modeller (Model 3, 6 ve 8), akışta daha fazla türbülans enerjisi ürettiği için ortalama ısı geçişinde diğerlerine kıyasla daha iyi performans göstermesi beklenmektedir.

Bu sekiz farklı hedef yüzey geometrisi, jet çarpmalı soğutma sistemlerinde yüzey morfolojisinin ısı geçişi üzerindeki etkisini sistematik olarak inceleme olanağı sunmaktadır.

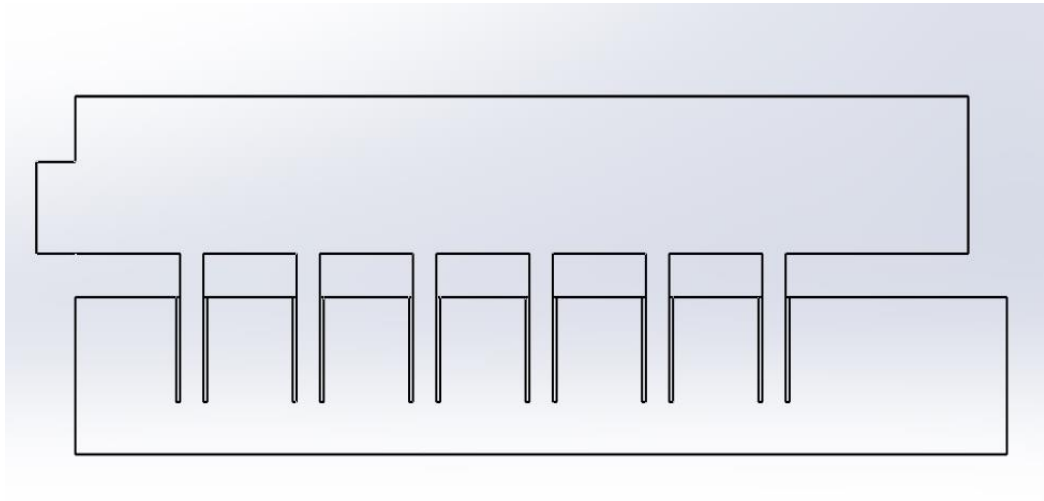
Dalgalı ve sürekli dalgalı yüzeyler, türbülans yoğunluğunu artırarak ortalama Nusselt sayısında anlamlı iyileşme beklenen modellerdir. Özellikle sürekli dalgalı ve sağ/sol yönlü geometriler, akışın enerjisini yüzey boyunca daha etkin yayarak homojen bir soğutma performansı sağlayabilir.



3. DÜZ YÜZEYE ISI TRANSFERİNE ETKİSİ

3.1. Düz Modele Olan Isı Transferi

Jet çarpmalı soğutma sistemleri, yüksek ısı akılarının etkin şekilde uzaklaştırılmasını sağlayarak özellikle gaz türbini kanatlarının soğutulması, güç elektroniği modülleri ve yüksek performanslı termal yönetim sistemleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde ısı transferinin etkinliği; jet geometrisi, nozül dizilimi, hedef yüzey morfolojisi ve akış parametreleri gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışma kapsamında, Ahmet Ümit Tepeden alınan referans düzlem geometrisine dayalı tek sıralı düz hedef yüzey (BASE modeli) üzerinde jet çarpmalı soğutma analizi yapılmış, elde edilen sonuçlar farklı dalgalı hedef yüzey konfigürasyonları (A1, A2, B1, C1, C2, D1 ve D2) ile karşılaştırılmıştır. Analizler ANSYS Fluent 2020 R2 yazılımında, türbülanslı ve kararlı akış koşullarında yürütülmüş; karşılaştırmalarda ortalama Nusselt sayısı (Nu), basınç kaybı (ΔP) ve Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) temel parametreler olarak değerlendirilmiştir. Şekil 3.1'de düz hedef yüzeye sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Düz hedef yüzeye sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.

BASE modelinde ortalama Nusselt sayısı 83,103 olarak elde edilmiştir. Bu değer, sistemin düzgün yüzey morfolojisine sahip olması nedeniyle akışın jet merkezinden radyal doğrultuda düzenli bir şekilde yayılabildiğini ve sınır tabaka kalınlığının kararlı biçimde arttığını göstermektedir. Dalgalı yüzeylerde ise geometrik modifikasyonlar nedeniyle akış yüzey boyunca yön değiştirmiş, bu durum yerel türbülans kinetik enerjisini artırarak ısı transferinde bölgesel iyileşmelere neden olmuştur. Özellikle A2 ($Nu = 86,381$) ve D1 ($Nu = 86,438$) modellerinde elde edilen değerler, düz yüzeye kıyasla sırasıyla yaklaşık %3,9 ve %4,0 oranında bir artış sağlamıştır. Bu artış, dalga tepe ve çukur bölgelerinde meydana gelen ikincil girdap yapılarının (secondary vortices) sınır tabakayı bozarak ısı transferini artırmasıyla açıklanabilir. Buna karşılık, C1 ($Nu = 80,070$) ve B1 ($Nu = 81,427$) modellerinde ise ısı transferinin baz modele göre azaldığı görülmektedir. Bu konfigürasyonlarda dalga frekansı ve genliği akışın yön kararlılığını bozmuş, jet etkisi zayıflamış ve hedef yüzeydeki karışım miktarı azalmıştır. Bu durum, ısı transferinde homojenliği sınırlandıran bir faktör olarak değerlendirilebilir.

3.1.1. Basınç kaybı (ΔP)

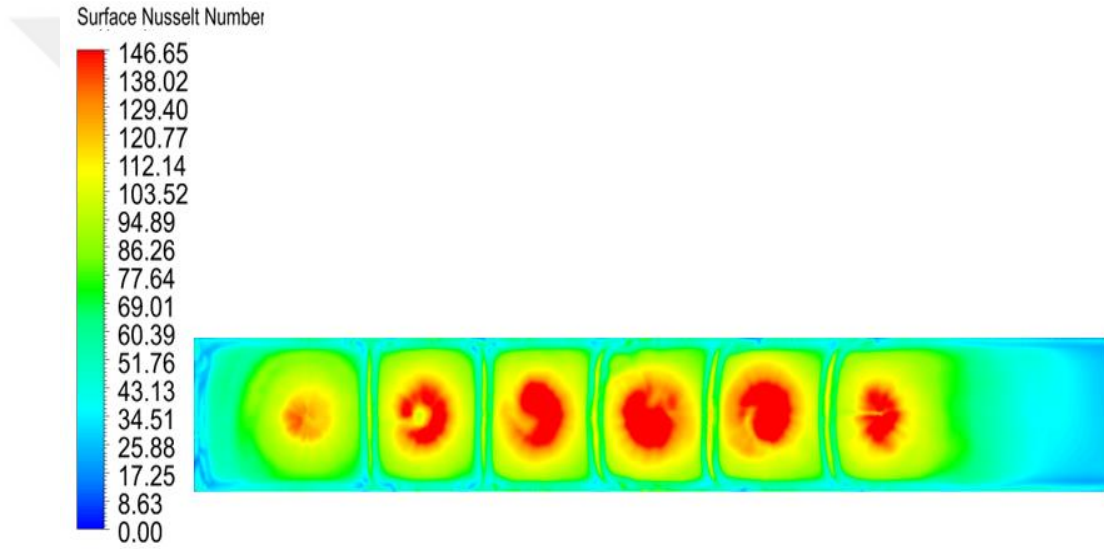
Basınç kaybı açısından bakıldığında, düz hedef yüzey (BASE) modeli 9708,4 Pa değerinde bir kayıp göstermiştir. Dalgalı yüzeylerde bu değer, yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte genellikle azalma eğilimi göstermiştir. En düşük basınç kaybı B1 modelinde (9344,7 Pa) elde edilmiştir. Bu durum, B1 geometrisindeki dalga formunun akışa daha aerodinamik bir yönlendirme sağlamasıyla açıklanabilir. Diğer yandan, C1 (9804,0 Pa) ve C2 (9866,9 Pa) modellerinde basınç kaybı düz yüzeye göre bir miktar artmıştır. Bu artış, dalga tepe bölgelerinde oluşan geri akış (recirculation zones) ve akış ayrılmalarının etkisinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak dalgalı yüzeylerin, akış yönlendirmesi sayesinde basınç kaybını dengeleme potansiyeli taşıdığı, ancak geometrik detayların kritik bir rol oynadığı sonucuna ulaşılmıştır.

3.1.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC)

Jet çarpmalı soğutma sistemlerinin genel termo hidro dinamik performansını değerlendirmek için kullanılan Performans Değerlendirme Kriteri (PEC), ısı transfer artışını basınç kaybı maliyetiyle ilişkilendirir. Düz yüzey referans alınarak hesaplanan sonuçlar, dalgalı yüzeylerin büyük çoğunluğunda performansın iyileştiğini göstermektedir. En yüksek PEC değerleri A2 ($PEC = 1,048$) ve D1 ($PEC = 1,042$) modellerinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, söz konusu geometrilerin düz yüzeye göre

yaklaşık %4–5 oranında daha yüksek termal-hidrokinamik verimlilik sağladığını göstermektedir. Bu modellerde dalga formu, jetin çarpma sonrası dağılımını optimize ederek hem ısı transferini artırmış hem de basınç kaybını makul düzeyde tutmuştur. Buna karşılık C1 (PEC = 0,960) ve C2 (PEC = 0,980) modellerinde performans düşüşü gözlenmiştir. Bu durum, yüzey dalga profillerinin akış sürekliliğini bozması ve jet çekirdek bölgesindeki momentumun zayıflamasından kaynaklanmaktadır.

Analiz sonuçları şekil 3.2’de tek sıralı düz hedef yüzeyin (BASE modeli) ısı transferinde kararlı ve homojen bir dağılım sağladığını, ancak dalgalı yüzey modifikasyonlarının belirli koşullar altında ısı performansını artırabildiğini göstermektedir.



Şekil 3.2. Düz hedef yüzey (BASE modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.

Dalga formu düzgün ve aerodinamik bir yapıda tasarlandığında (özellikle A2 ve D1 modellerinde olduğu gibi), jetin yüzeyle etkileşimi optimize edilmekte; bu da hem yüksek Nusselt sayısı hem de yüksek PEC değeri ile sonuçlanmaktadır. Öte yandan, dalga genliğinin aşırı artması veya periyot aralığının uygunsuz seçilmesi (C1 ve B1 modellerinde olduğu gibi), akış ayrılmalarına ve karışım bozukluklarına yol açarak hem ısı transferini hem de genel performansı düşürmektedir.

Sonuç olarak, tek sıralı düz hedef yüzey, basit yapısı, düşük basınç kaybı ve yüksek akış kararlılığıyla referans düzeyinde güvenilir sonuçlar sunarken; A2 ve D1 gibi optimize edilmiş dalgalı yüzeyler, sistem verimliliğini artırmak için uygun geometrik alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, Ahmet Ümit Tepeden alınan referans

geometrinin optimize edilmesiyle dalgalı yüzeylerde akış yönlendirmesiyle sağlanan ısıl iyileştirmenin sayısal olarak doğrulandığını göstermektedir.



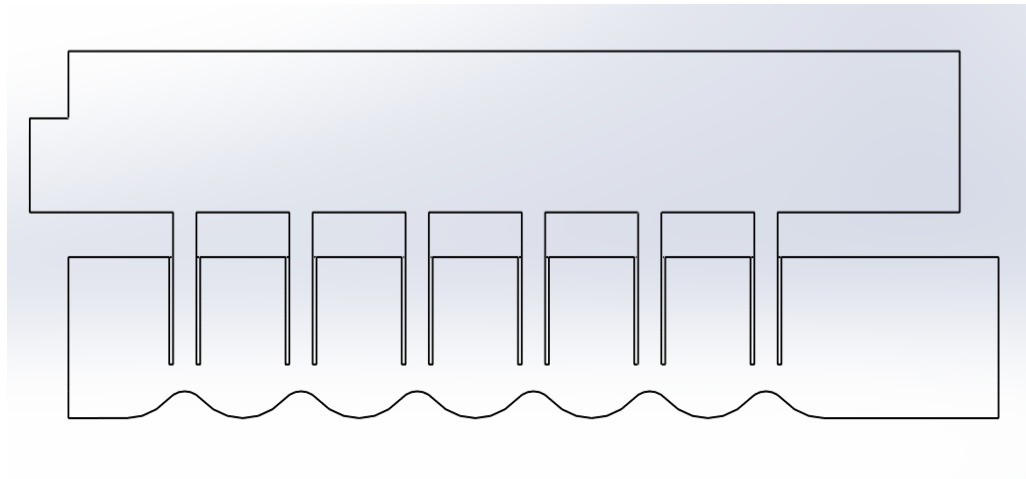
4. DALGALI YÜZEYİN ISI TRANSFERİNE ETKİSİ

Jet çarpmalı soğutma sistemleri, yüksek ısı akılarının etkin şekilde uzaklaştırılmasını sağlayan ve özellikle gaz türbini kanatlarında, elektronik bileşenlerde ve yüksek sıcaklıkta çalışan mekanik sistemlerde yaygın olarak kullanılan önemli bir soğutma yöntemidir. Bu sistemlerde ısı transferinin verimliliği; jet çıkış hızı, nozül geometrisi, hedef yüzey şekli ve akış koşulları gibi çok sayıda parametreye bağlıdır.

Bu kapsamda yapılan çalışmada, Ahmet Ümit Tepe'den alınan referans geometriye dayalı tek sıralı düz hedef yüzey (BASE modeli) için jet çarpmalı soğutma performansı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tepe formuna sahip dalgalı yüzey (A1 modeli) ile karşılaştırılarak ısı performans, basınç kaybı ve genel verimlilik açısından değerlendirilmiştir.

4.1. Dalgalı Tepe Modeli Olan Isı Transferi

Şekil 4.1'de dalgalı hedef yüzeye ve tepe modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Dalgalı hedef yüzeye ve tepe modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.

Düz hedef yüzey (BASE modeli) için ortalama Nusselt sayısı 83,103 olarak elde edilmiştir. Bu değer, jetin hedef yüzeye çarpmasının ardından akışın radyal yönde

düzgün şekilde yayılmasıyla ilişkilidir. Yüzeyin pürüzsüz yapısı nedeniyle sınır tabaka kararlı biçimde gelişmiş ve akışın yön kararlılığı korunmuştur.

Tepe dalgalı (A1) modelinde ise ortalama Nusselt sayısı 84,629 olarak belirlenmiştir. Bu artış, dalga tepe bölgelerinde akışın hızlanması ve jet çekirdeğinin daha geniş bir alana yayılmasıyla açıklanabilir. Dalga tepe noktaları, jetin momentumunu yüzey boyunca yönlendirerek yerel türbülans kinetik enerjisini artırmış, bu da sınır tabaka kalınlığının azalmasına ve ısı transferinin yerel olarak iyileşmesine neden olmuştur. Sonuç olarak, A1 modeli düz yüzeye kıyasla yaklaşık %1,8 oranında bir ısı transfer artışı sağlamıştır. Bu oran, dalga geometrisinin akış yönünü bozmadan yüzey etkileşimini artıracak biçimde tasarlandığını göstermektedir.

4.1.1. Basınç kaybı (ΔP)

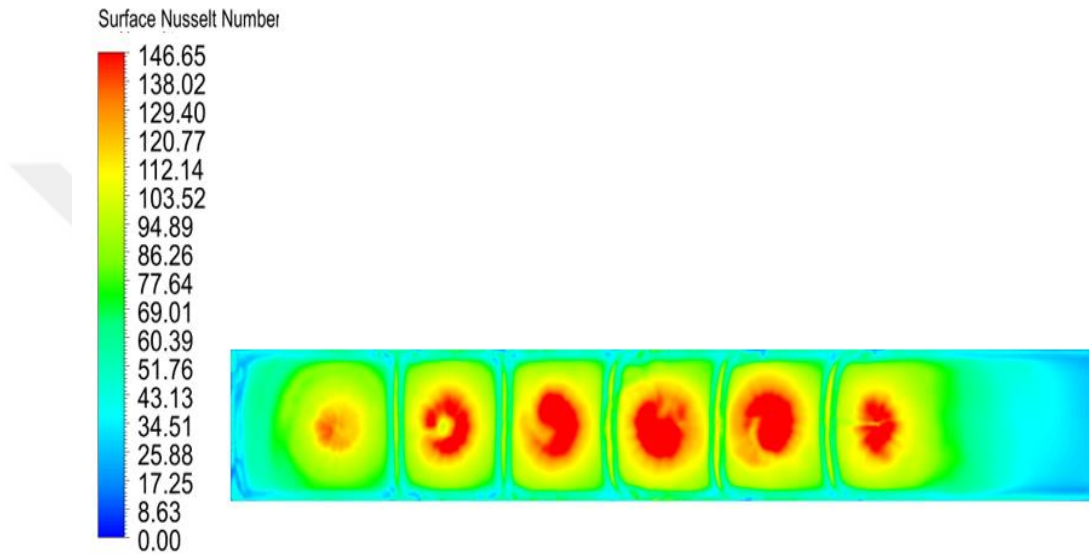
Basınç kaybı açısından düz hedef yüzeyde 9708,4 Pa değeri elde edilmiştir. Tepe dalgalı yüzeyde ise bu değer 9572,1 Pa olarak ölçülmüştür. A1 modelindeki bu azalma, dalga formunun akışa daha aerodinamik bir yönlendirme sağlamasından kaynaklanmaktadır. Dalga tepe bölgelerinde akışın hafifçe yön değiştirmesi, jet çekirdeğindeki basınç gradyanını yumuşatarak akışın geri dönmesini engellemiştir. Böylece sistem genelinde akış sürekliliği korunmuş, enerji kayıpları azalmıştır. Bu durum, dalgalı yüzeylerin yalnızca ısı transferini değil, aynı zamanda basınç verimliliğini de iyileştirebileceğini ortaya koymaktadır.

4.1.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC)

Jet çarpmalı soğutma sistemlerinde termal-hidrokinamik performansın bütüncül şekilde değerlendirilmesi için kullanılan Performans Değerlendirme Kriteri (PEC), ısı transferindeki artışın basınç kaybı maliyetiyle orantısını göstermektedir. BASE modelinde PEC değeri 1,000 olarak referans kabul edilmiştir. A1 modelinde ise bu değer 1,035 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, A1 modelinin düz yüzeye kıyasla yaklaşık %3,5 oranında daha yüksek termal-hidrokinamik performans sunduğunu göstermektedir. Bu artış hem Nusselt sayısındaki artış hem de basınç kaybındaki azalma ile doğrudan ilişkilidir.

Analiz sonuçları şekil 4.2’de tepe dalgalı hedef yüzey (A1 modeli) geometrisinin, düz hedef yüzeye (BASE modeli) kıyasla daha dengeli bir termo hidrokinamik performans sunduğunu ortaya koymuştur.

- Isı transferi açısından, A1 modeli jetin hedef yüzeye çarpma sonrası dağılımını optimize etmiş, dalga tepelerinde oluşan ikincil akış yapıları sayesinde sınır tabaka bozulmuş ve ısı geçişi artırılmıştır.
- Basınç kaybı yönünden, dalgalı yüzeyin aerodinamik formu geri akış bölgelerini azaltarak toplam basınç kaybını düşürmüştür.
- Genel performans açısından (PEC), A1 modeli düz yüzeye göre daha verimli bir soğutma davranışı sergilemiş ve sistem verimliliğinde belirgin bir artış sağlamıştır.

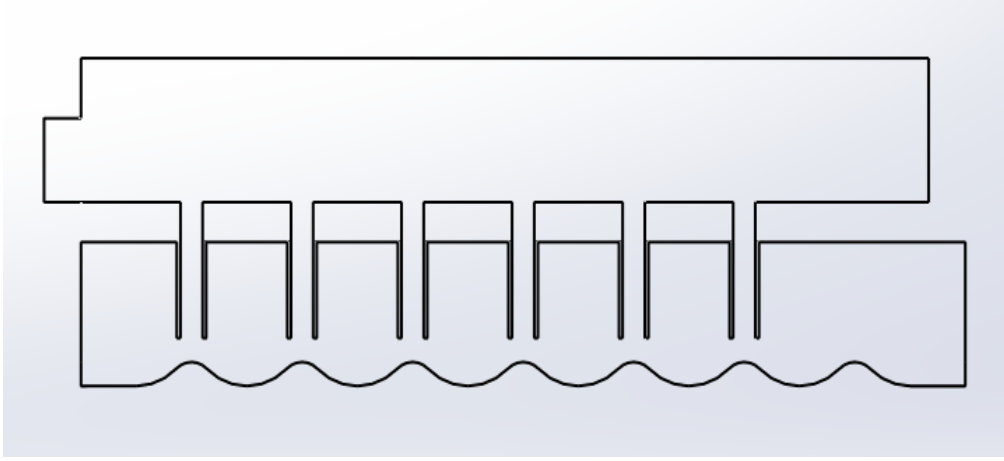


Şekil 4.2. Dalgalı hedef yüzey (A1 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.

Sonuç olarak, A1 modelinin dalga formu, akışın hem kararlılığını koruyup hem de ısı transferini iyileştiren dengeli bir geometri sunmaktadır. Bu durum, Ahmet Ümit Tepe’den alınan referans düz yüzey geometrisinin optimize edilmesiyle elde edilen tepe dalgalı yapıların, jet çarpmalı soğutma uygulamalarında ısı verimliliği artırma potansiyeline sahip olduğunu sayısal olarak doğrulamaktadır.

4.2. Tek Sıralı Sürekli Dalgalı Tepe Modeli Olan Isı Transferi

Şekil 4.3’te dalgalı hedef yüzeye ve tepe sürekli modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Dalgalı hedef yüzeye ve tepe sürekli modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.

Düz hedef yüzey (BASE modeli) için ortalama Nusselt sayısı 83,103 olarak elde edilmiştir. Bu değer, jetin hedef yüzeye çarpmasının ardından akışın radyal yönde düzgün şekilde yayılmasıyla ilişkilidir. Yüzeyin pürüzsüz yapısı nedeniyle sınır tabaka kararlı biçimde gelişmiş ve akışın yön kararlılığı korunmuştur. A2 modelinde ise ortalama Nusselt sayısı 86,381 olarak belirlenmiştir. Bu artış, dalga tepe ve çukur bölgelerinin bir arada bulunduğu yapının akışa çok yönlü etkisiyle açıklanabilir. Jet akışı, yüzey boyunca hem hızlanmakta hem de yön değiştirmektedir. Bu durum, yüzeydeki türbülans kinetik enerjisini artırarak sınır tabaka kalınlığının daha da azalmasına ve ısı transferinin daha geniş bir alanda etkin hale gelmesine yol açmıştır. Sonuç olarak, A2 modeli düz yüzeye kıyasla yaklaşık %3,9 oranında bir ısı transfer artışı sağlamıştır. Bu oran, yüzey geometrisinin akışı etkili biçimde yönlendirerek ısıl performansı optimize ettiğini göstermektedir.

4.2.1. Basınç kaybı (ΔP)

Basınç kaybı açısından düz hedef yüzeyde 9708,4 Pa değeri elde edilmiştir. A2 modelinde ise bu değer 9484,3 Pa olarak ölçülmüştür. Basınç kaybındaki bu azalma, dalgalı yüzey yapısının akışı yönlendirme kabiliyetiyle ilgilidir. A2 geometrisi, akışı yalnızca yönlendirmekle kalmayıp aynı zamanda jetin hedef yüzeye çarpma etkisini daha kontrollü bir şekilde yayarak geri akış ve vorteks oluşumunu sınırlamıştır.

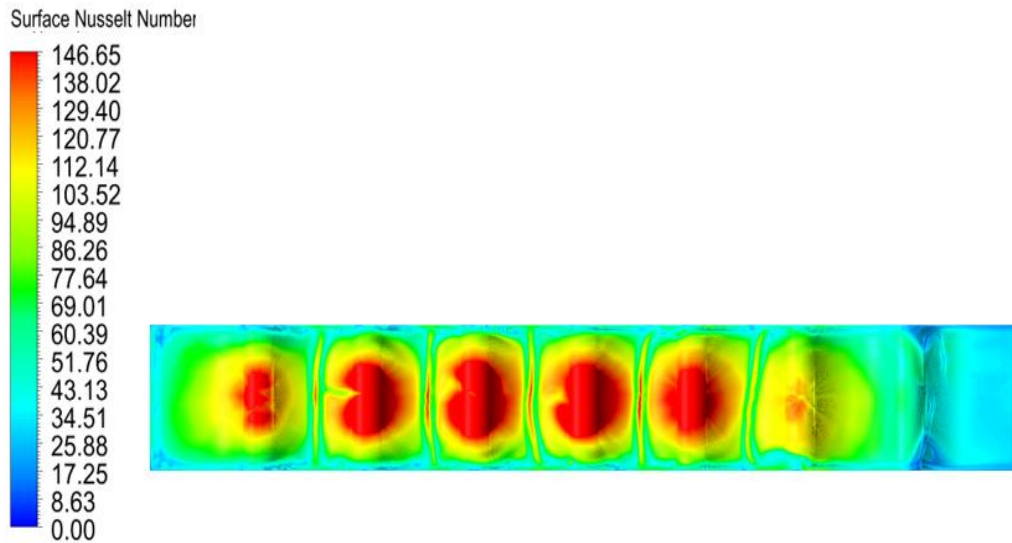
Bu aerodinamik etki sayesinde, A2 modeli hem ısı transferinde artış sağlamış hem de sistem genelinde daha düşük enerji kaybı ile çalışmıştır. Dolayısıyla, A2 modeli basınç kaybı açısından da BASE modeline kıyasla daha verimli bir performans ortaya koymuştur.

4.2.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC)

Jet çarpmalı soğutma sistemlerinde kullanılan Performans Değerlendirme Kriteri (PEC), ısı transferindeki artışın basınç kaybı maliyetiyle orantısını göstermektedir. BASE modeli için referans PEC değeri 1,000 olarak alınmıştır.

A2 modelinde ise PEC değeri 1,048 olarak hesaplanmıştır. Bu da A2 modelinin, düz yüzeye kıyasla yaklaşık %4,8 oranında daha iyi bir termal-hidrodynamic performans sunduğunu göstermektedir. Bu performans artışı hem Nusselt sayısındaki iyileşme hem de basınç kaybındaki azalma ile desteklenmektedir.

Analiz sonuçları şekil 4.4'te A2 modelinin yüzey geometrisinin düz hedef yüzeye (BASE modeli) kıyasla daha yüksek ısı ve hidrodynamic verimlilik sağladığını ortaya koymuştur. Isı transferi açısından, A2 modeli jetin hedef yüzeye etkileşimini daha yoğun ve homojen hale getirerek sınır tabaka yapısını bozmuş ve böylece ısı geçişini artırmıştır. Basınç kaybı yönünden, akışın daha yumuşak geçişlerle yönlendirilmesi sayesinde geri akış bölgeleri sınırlanmış, sistemdeki enerji kayıpları azalmıştır.

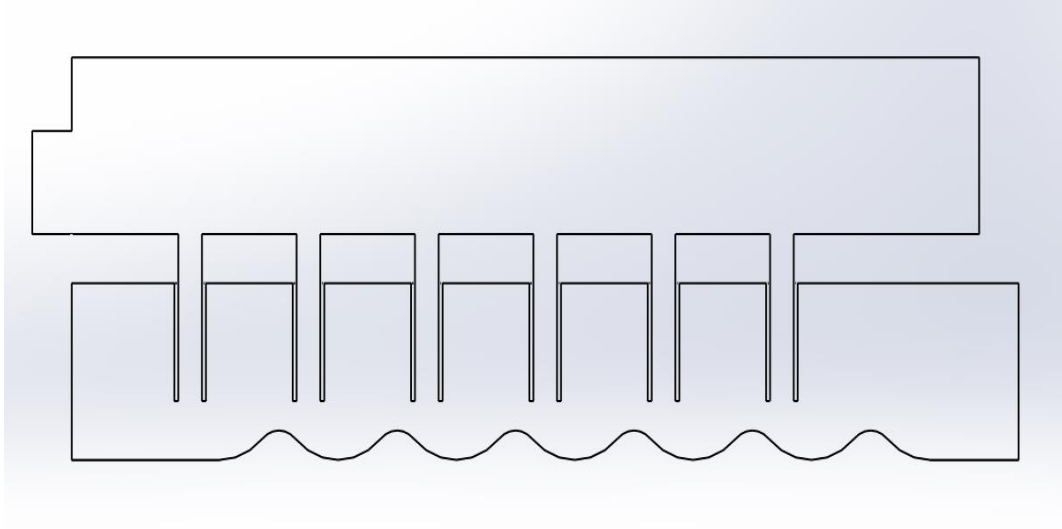


Şekil 4.4. Dalgalı hedef yüzey (A2 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.

Genel performans (PEC) açısından, A2 modeli düz yüzeye göre daha üstün bir performans göstererek sistem verimliliğinde yaklaşık %4,8 oranında bir iyileşme sağlamıştır. Sonuç olarak, A2 modelinde uygulanan yüzey geometrisi, jet çarpmalı soğutma uygulamalarında hem ısı transferini iyileştirme hem de enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahip dengeli bir çözüm sunmaktadır.

4.3. Dalgalı Sol Modeli Olan Isı Transferi

Şekil 4.5'te dalgalı hedef yüzeye ve sol modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Dalgalı hedef yüzeye ve sol modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.

Düz hedef yüzey (BASE modeli) için ortalama Nusselt sayısı 83,103 olarak elde edilmiştir. Bu değer, jetin hedef yüzeye çarpmasının ardından akışın radyal yönde düzgün şekilde yayılmasıyla ilişkilidir. Yüzeyin düzgün ve pürüzsüz yapısı, sınır tabakanın kararlı gelişimini desteklemiş ve bu da nispeten homojen bir ısı transferi profili oluşturmuştur. B1 modelinde ise ortalama Nusselt sayısı 81,427 olarak hesaplanmıştır. Bu düşüş, yüzey geometrisinin jet akışını bazı bölgelerde yönlendirmesi ve sınır tabaka yapısında istenmeyen kalınlaşmalara yol açmasıyla ilişkilidir. Görselde de görüldüğü üzere, ısı transferi dağılımı daha dengesiz olup, bazı bölgelerde düşük Nusselt değerleri gözlemlenmiştir. Bu durum, jet akışının bazı bölgelere etkili şekilde ulaşamamasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, B1 modeli düz yüzeye kıyasla yaklaşık %2 oranında daha düşük bir ısı transfer performansı göstermiştir. Bu da yüzey geometrisinin akışı yeterince yönlendirememesi ya da sekonder akışların yeterince oluşmaması ile açıklanabilir.

4.3.1. Basınç kaybı (ΔP)

Basınç kaybı açısından düz hedef yüzeyde 9708,4 Pa değeri elde edilmiştir. B1 modelinde ise bu değer 9344,7 Pa olarak ölçülmüştür. Bu azalma, B1 geometrisinin akışa daha az direnç göstermesiyle ilişkilidir. Yüzey geometrisinin basitleştirilmiş

veya akışa paralel çizgilerle tasarlanmış olması, jet çekirdeğinde daha az basınç düşüşüne neden olmuş olabilir.

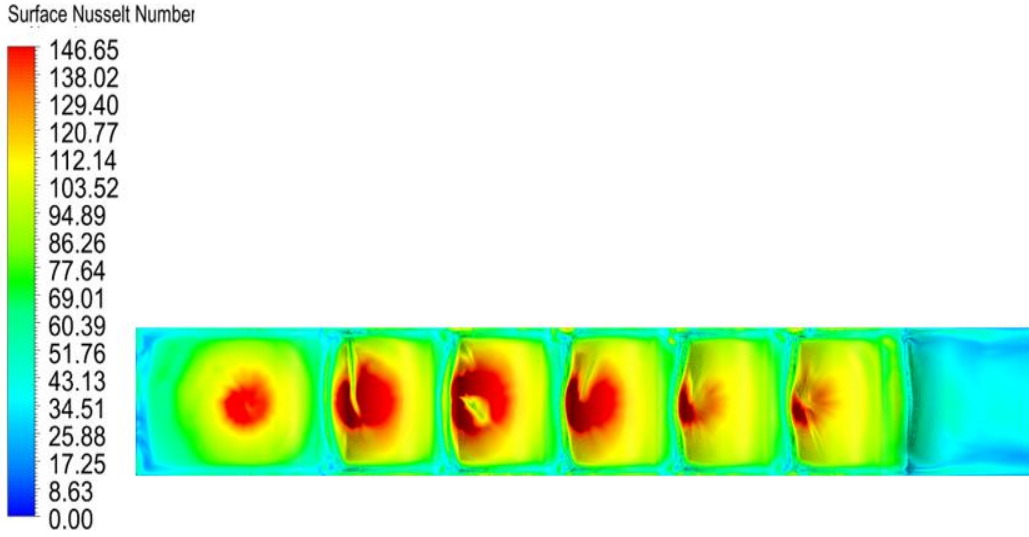
Ancak, basınç kaybının düşük olması her zaman olumlu bir sonuç vermemektedir. Çünkü bu avantaj, yeterli türbülans üretimiyle desteklenmediğinde ısı transferi kapasitesini sınırlayabilir. B1 modelinde bu durum açıkça gözlemlenmektedir.

4.3.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC)

Termal-hidrokinamik performansı değerlendirmek için kullanılan Performans Değerlendirme Kriteri (PEC), ısı transferindeki artışın basınç kaybına göre etkinliğini ifade eder. BASE modeli için bu değer referans olarak 1,000 kabul edilmiştir. B1 modelinde PEC değeri 0,992 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, B1 modelinin düz yüzeye göre yaklaşık %0,8 oranında daha düşük genel performans sunduğunu göstermektedir. Nusselt sayısındaki azalma, basınç kaybındaki düşüşle dengelenememiş ve bu da toplam performansı olumsuz yönde etkilemiştir.

Analiz sonuçları şekil 4.6'da B1 yüzey geometrisinin düz hedef yüzeye (BASE modeli) kıyasla ısı-hidrokinamik performans açısından daha az verimli olduğunu ortaya koymuştur.

- **Isı transferi açısından**, B1 modeli istenen düzeyde türbülans üretimini sağlayamamış ve yüzeyin bazı bölgelerinde zayıf ısı transferi gözlemlenmiştir.
- **Basınç kaybı bakımından**, daha düşük direnç sunması avantajlı olsa da bu durum ısı transfer kapasitesinin azalmasına neden olmuştur.
- **Genel performans (PEC)** açısından değerlendirildiğinde ise, düz yüzeye kıyasla küçük bir performans kaybı ortaya çıkmıştır.

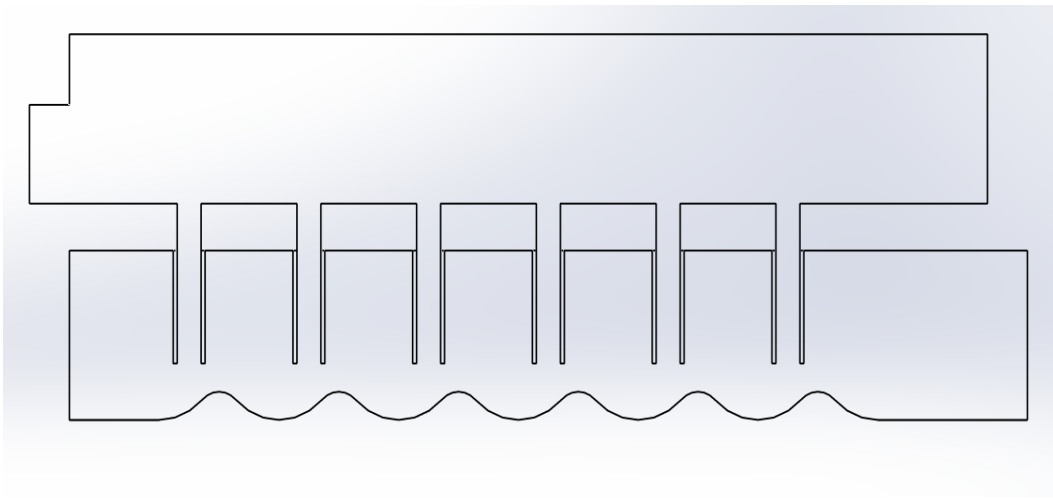


Şekil 4.6. Dalgalı hedef yüzey (B1 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.

Sonuç olarak, B1 modelinin yüzey geometrisi, sistem verimliliği açısından optimize edilmemiş bir tasarım örneği olarak değerlendirilebilir. Jet çarpmalı soğutma uygulamalarında, yüzey geometrisinin yalnızca basınç kaybını azaltmakla kalmayıp aynı zamanda türbülans üretimini de destekleyecek şekilde tasarlanması gerektiği bu model üzerinden anlaşılmaktadır.

4.4. Dalgalı Sağ Modeli Olan Isı Transferi

Şekil 4.7’de dalgalı hedef yüzeye ve sağ modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Dalgalı hedef yüzeye ve sağ modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.

Düz hedef yüzey (BASE modeli) için ortalama Nusselt sayısı 83,103 olarak elde edilmiştir. Bu değer, jetin hedef yüzeye çarpmasının ardından akışın radyal yönde düzgün şekilde yayılmasıyla ilişkilidir. Yüzeyin pürüzsüz yapısı nedeniyle sınır tabaka kararlı biçimde gelişmiş ve akışın yön kararlılığı korunmuştur. C1 modelinde ise ortalama Nusselt sayısı 80,070 olarak belirlenmiştir. Bu düşüş, yüzeydeki geometrik düzenlemenin akış yapısını sınırlı şekilde bozmasıyla açıklanabilir. Jet akışı, C1 yüzeyindeki şekiller nedeniyle istenen düzeyde türbülans üretmemiş, bu da sınır tabaka incelmesini ve ısı transferini sınırlamıştır. Sonuç olarak, C1 modeli düz yüzeye kıyasla yaklaşık %3,65 oranında daha düşük bir ısı transferi performansı sergilemiştir. Bu durum, uygulanan yüzey geometrisinin ısı transferini artırmak yerine kısmen sınırlayıcı bir etki yarattığını göstermektedir.

4.4.1. Basınç kaybı (ΔP)

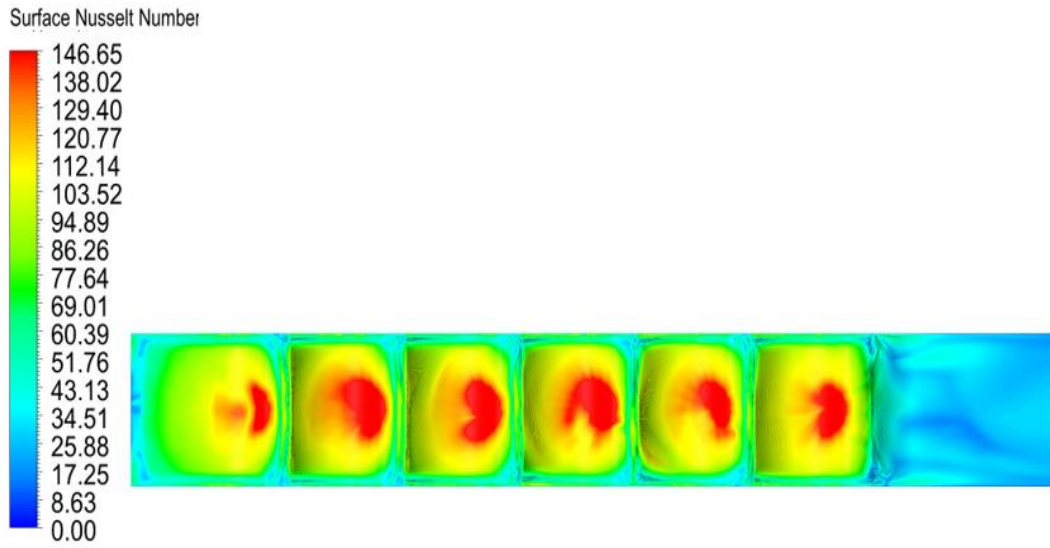
Basınç kaybı açısından, düz hedef yüzeyde 9708,4 Pa değeri elde edilmiştir. C1 modelinde ise bu değer 9804,0 Pa olarak ölçülmüştür. Bu artış, yüzeydeki yapıların akışa karşı ek direnç oluşturmasıyla ilişkilidir. C1 geometrisi, akışta daha fazla sürtünmeye neden olmuş ve bu da toplam basınç kaybını artırmıştır. Bu sonuçlar, C1 modelinin hem daha düşük ısı transferi sağladığını hem de sistem genelinde daha fazla enerji kaybı oluşturduğunu göstermektedir. Akışın yönlenmesi sırasında meydana gelen vorteksler, geri akış ve türbülans, sistem verimliliğini olumsuz yönde etkilemiştir.

4.4.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC)

Jet çarpmalı soğutma sistemlerinde kullanılan Performans Değerlendirme Kriteri (PEC), ısı transferindeki artışın basınç kaybı maliyetiyle orantısını göstermektedir. BASE modeli için referans PEC değeri 1,000 olarak alınmıştır. C1 modelinde ise PEC değeri 0,960 olarak hesaplanmıştır. Bu da C1 modelinin, düz yüzeye kıyasla yaklaşık %4 oranında daha düşük bir termal-hidrokinamik performans sunduğunu göstermektedir. Hem Nusselt sayısındaki düşüş hem de basınç kaybındaki artış, bu performans kaybının temel nedenidir.

Analiz sonuçları şekil 4.8’de C1 modelinin yüzey geometrisinin, düz hedef yüzeye (BASE modeli) kıyasla daha düşük ısı ve hidrokinamik verimlilik sağladığını ortaya koymuştur.

- **Isı transferi** açısından, C1 modeli yüzeyde yeterli türbülans oluşturamamış ve sınır tabaka gelişimini etkili şekilde bozamamıştır. Bu durum, ısı transferinin azalmasına neden olmuştur.
- **Basınç kaybı** yönünden, yüzey şekillerinin oluşturduğu direnç nedeniyle sistemdeki enerji tüketimi artmıştır.
- **Genel performans (PEC)** açısından, C1 modeli düz yüzeye göre yaklaşık %4 oranında daha düşük verimlilik sergilemiştir.

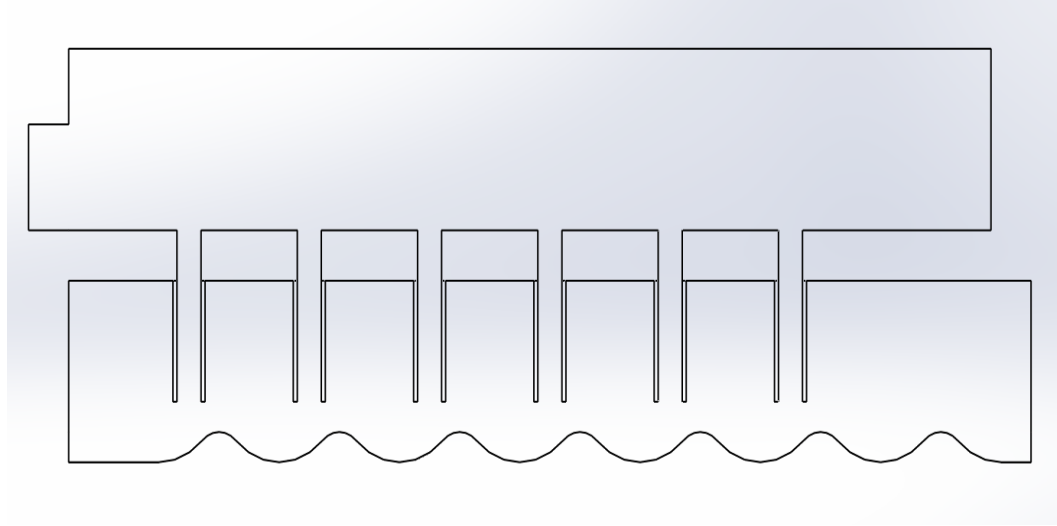


Şekil 4.8. Dalgalı hedef yüzey (C1 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.

Sonuç olarak, C1 modelinde uygulanan yüzey geometrisi, jet çarpmalı soğutma uygulamaları için optimal bir çözüm sunmamaktadır. Yüzey tasarımının hem ısı transferini artıracak hem de basınç kaybını sınırlayacak şekilde yeniden ele alınması önerilmektedir.

4.5. Dalgalı Sağ Modeli Olan Isı Transferi

Şekil 4.9’da dalgalı hedef yüzeye ve sağ sürekli modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Dalgalı hedef yüzeye ve sağ sürekli modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.

Düz hedef yüzey (BASE modeli) için ortalama Nusselt sayısı 83,103 olarak elde edilmiştir. Bu değer, jetin hedef yüzeye çarpmasının ardından akışın radyal yönde düzenli bir şekilde yayılmasıyla ilişkilidir. Yüzeyin düz ve pürüzsüz yapısı, sınır tabakanın kararlı bir şekilde gelişmesine ve akışın yönsel stabilitesinin korunmasına olanak tanımıştır.

C2 modelinde ise ortalama Nusselt sayısı 81,855 olarak ölçülmüştür. Bu değer, düz yüzeye kıyasla yaklaşık %1,5 oranında daha düşük bir ısı transferi performansına işaret etmektedir. C2 modelinde yer alan yüzey geometrisi, akışa belirli oranda direnç göstermekte, fakat bu direnç akışta güçlü türbülans yapılarını ve incelmış sınır tabakaları oluşturacak kadar etkili olamamaktadır. Bu durum, ısı transferinin optimize edilememesine neden olmuştur.

4.5.1. Basınç kaybı (ΔP)

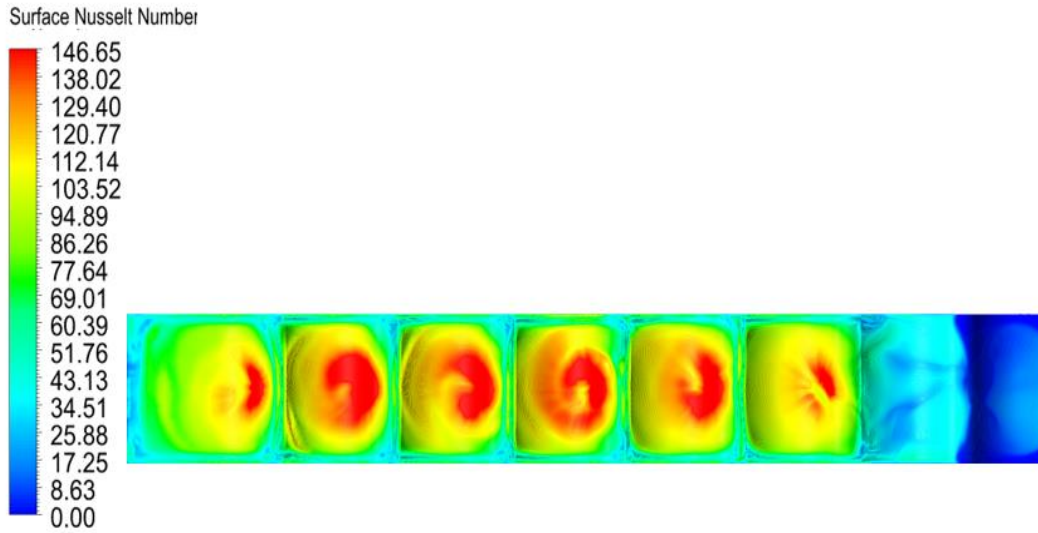
Basınç kaybı açısından, düz hedef yüzeyde 9708,4 Pa değeri elde edilmiştir. C2 modelinde ise bu değer 9866,9 Pa olarak belirlenmiştir. Yani C2 modelinde basınç kaybı artmıştır. Bu artış, yüzey geometrisinin jet akışına karşı oluşturduğu ek direnç ve akış yönündeki bozulmalarla ilişkilidir. C2 geometrisi, akışa yön verici bazı etkiler oluştursa da bu durum aynı zamanda daha fazla sürtünme ve geri akış bölgeleri yaratarak basınç kaybını artırmıştır. Özellikle görsel analizde (yüklenen görsel), C2 modelinde hücreler içerisinde belirgin girdap yapılarının oluştuğu, ancak bu yapıların ısı transferine katkısının sınırlı kaldığı gözlemlenmektedir.

4.5.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC)

Performans Değerlendirme Kriteri (PEC), ısı transferindeki artışın basınç kaybı maliyetiyle oranlandığı bir göstergedir. BASE modeli için bu değer 1,000 olarak kabul edilmiştir. C2 modeli için hesaplanan PEC değeri ise 0,980'dir. Bu, C2 modelinin düz yüzeye kıyasla yaklaşık %2 oranında daha düşük bir genel performans sergilediğini göstermektedir. Yani C2 modeli, ısı transferini yeterince artırmadan daha fazla enerji kaybına yol açmaktadır.

Analiz sonuçları şekil 4.10'da C2 modelinin, düz hedef yüzeye (BASE modeli) kıyasla daha düşük termal-hidrodinamik performans sunduğunu ortaya koymuştur.

- Isı transferi açısından, C2 modeli jetin hedef yüzeye etkileşimini çok sınırlı düzeyde değiştirmiş, bu nedenle sınır tabaka bozunumu ve türbülans üretimi istenen seviyeye ulaşmamıştır.
- Basınç kaybı açısından, yüzey geometrisi akışa ek direnç oluşturarak sistemdeki enerji kaybını artırmıştır.
- Genel performans (PEC) açısından, C2 modeli düz yüzeye göre yaklaşık %2 oranında verimlilik kaybı yaşamıştır.



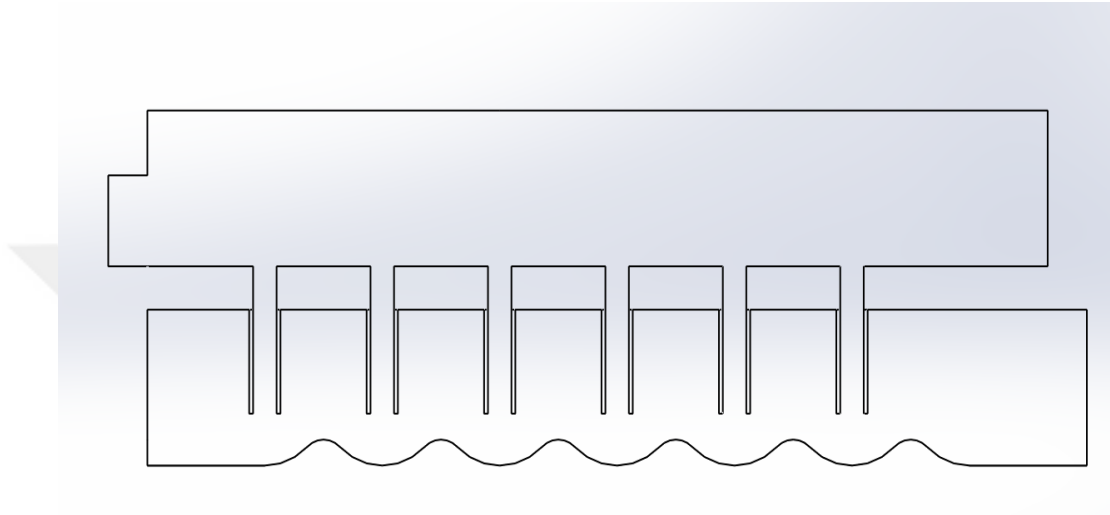
Şekil 4.10. Dalgalı hedef yüzey (C2 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.

Sonuç olarak, C2 modelinde uygulanan yüzey geometrisi, jet çarpmalı soğutma sistemlerinde verimliliği artırmak için yeterli potansiyele sahip değildir. Söz konusu yapı, ısı transferini sınırlı düzeyde etkileyip basınç kaybını artırdığı için, performans iyileştirmesi sağlamak yerine sistemin etkinliğini azaltmaktadır. Bu nedenle, C2 gibi

tasarımlarda geometrik yapıların hem türbülans artırıcı hem de basınç kaybını sınırlayıcı yönde yeniden optimize edilmesi önerilir.

4.6. Dalgalı Çukur Modeli Olan Isı Transferi

Şekil 4.11’de dalgalı hedef yüzeye ve çukur modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Dalgalı hedef yüzeye ve çukur modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.

Düz hedef yüzey (BASE modeli) için ortalama Nusselt sayısı 83,103 olarak elde edilmiştir. Bu değer, jetin hedef yüzeye çarpmasının ardından akışın radyal yönde düzgün şekilde yayılmasıyla ilişkilidir. Yüzeyin pürüzsüz yapısı nedeniyle sınır tabaka kararlı biçimde gelişmiş ve akışın yön kararlılığı korunmuştur. D1 modeli ise 86,438 ortalama Nusselt sayısı ile en yüksek ısı transferi değerine ulaşmıştır. Bu artış, D1 geometrisinde jetin hedef yüzeye çarpmasının ardından oluşan ikincil türbülans yapıları ve kararsız sınır tabaka gelişimiyle açıklanabilir. D1 modeli, jet çekirdeğinin etkili bir şekilde yönlendirilmesini sağlayarak hedef yüzeyde daha yüksek türbülans kinetik enerjisi yaratmıştır. Bu durum, sınır tabaka kalınlığını azaltmış ve ısı transferini iyileştirmiştir. Sonuç olarak, D1 modeli düz yüzeye kıyasla yaklaşık %4 oranında bir ısı transfer artışı sağlamıştır.

4.6.1. Basınç kaybı (ΔP)

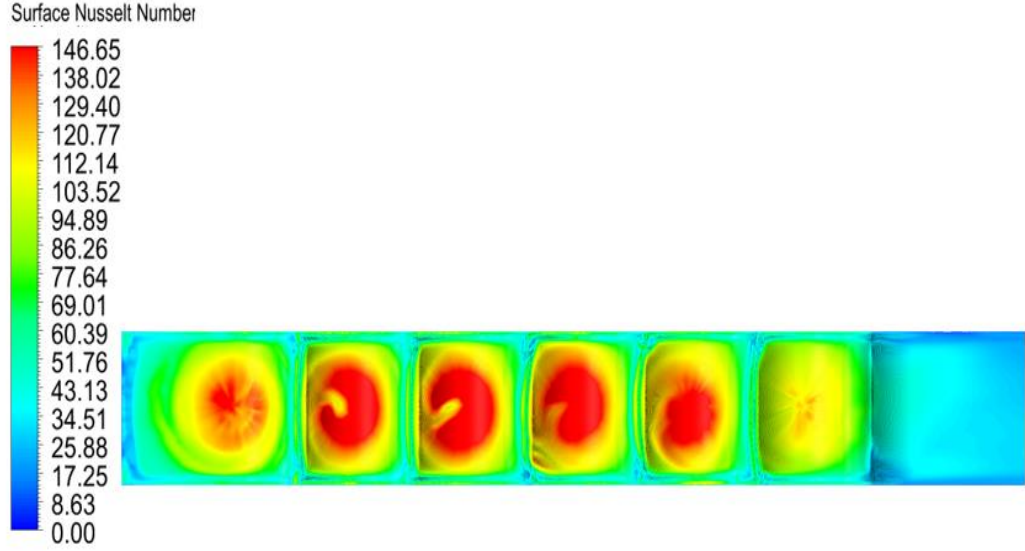
Basınç kaybı açısından düz hedef yüzeyde 9708,4 Pa değeri elde edilmiştir. D1 modelinde ise bu değer 9654,7 Pa olarak ölçülmüştür. Her ne kadar basınç kaybında küçük bir azalma gözlenirse de D1 modelinin akışa kısmen daha aerodinamik bir

yönlendirme sağladığı anlaşılmaktadır. Yüzey geometrisinin yarattığı ikincil girdap yapıları, geri akış bölgelerini azaltmış ve basınç düşüşünü sınırlı da olsa iyileştirmiştir.

4.6.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC)

Performans Değerlendirme Kriteri (PEC), jet çarpmalı sistemlerin termal-hidrodinamik performansını bütüncül şekilde değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. BASE modelinde PEC değeri 1,000 olarak kabul edilmiştir. D1 modelinde bu değer 1,042 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, D1 modelinin düz yüzeye kıyasla yaklaşık %4,2 oranında daha yüksek termal-hidrodinamik performans sunduğunu göstermektedir. Bu iyileşme hem Nusselt sayısındaki önemli artış hem de basınç kaybındaki hafif azalma ile ilişkilidir.

Analiz sonuçları şekil 4.12’de D1 modeli geometrisinin, düz hedef yüzeye (BASE modeli) ve A1 gibi daha önce optimize edilmiş modellere kıyasla daha güçlü bir termo-hidrodinamik performans sergilediğini göstermiştir. Isı transferi açısından D1 modeli, jetin hedef yüzeye çarpmasının ardından oluşan yüksek türbülans ve bozulmuş sınır tabaka etkisiyle en yüksek ortalama Nusselt sayısına ulaşmıştır. Akış yapılarındaki bu karışıklık, ısı geçişini maksimum seviyeye taşımıştır. Basınç kaybı açısından bakıldığında, D1 modeli A1 modeline göre biraz daha yüksek bir değer sergilese de (9654,7 Pa vs. 9610,2 Pa), bu fark oldukça sınırlıdır. Diğer yandan, A1 modelinin ısı transfer performansı D1 kadar yüksek değildir. Bu nedenle D1 modeli hem yüksek ısı transferi hem de makul basınç kaybı ile en dengeli performansı sunan geometri olarak öne çıkmaktadır. Genel performans göstergesi olan PEC değeri açısından da D1 modeli 1,042 ile A1 modelinin 1,035 değerini geride bırakmıştır. Bu durum, D1 modelinin daha verimli bir soğutma davranışı sunduğunu, dolayısıyla jet çarpmalı soğutma sistemleri için oldukça uygun bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir.

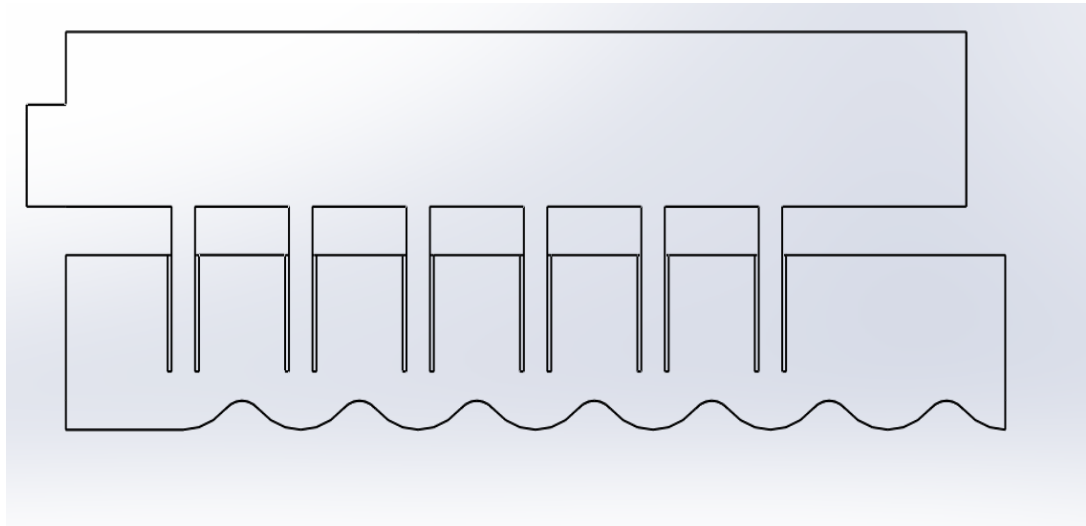


Şekil 4.12. Dalgalı hedef yüzey (D1 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.

Sonuç olarak, D1 modelinin yüzey geometrisi, jet akışının yön kararlılığını korurken ısı transferini maksimize eden bir yapı sunmakta; bu da onu hem termodinamik hem de hidrodinamik açıdan optimize edilmiş bir tasarım haline getirmektedir.

4.7. Dalgalı Sürekli Çukur Modeli Olan Isı Transferi

Şekil 4.13’de dalgalı hedef yüzeye ve çukur sürekli modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Dalgalı hedef yüzeye ve çukur sürekli modeline sahip jet çarpmalı soğutma sisteminin geometrik modeli.

Düz hedef yüzey (BASE modeli) için ortalama Nusselt sayısı 83,103 olarak elde edilmiştir. Bu, jetin hedef yüzeye çarpmasıyla oluşan simetrik ve kararlı akış yapısının,

yüzey boyunca düzenli şekilde yayılmasını ifade eder. Akışın bu şekilde yön değiştirmeden ilerlemesi, sınır tabakanın düzgün gelişmesine ve kararlı ısı transferine olanak sağlamıştır.

D2 modeli için ortalama Nusselt sayısı 83,255 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, BASE modeline kıyasla yalnızca %0,18 oranında küçük bir artışa işaret etmektedir. Görsel analizde (yukarıdaki akış yapısı) de görüldüğü üzere, D2 modelinde dalga geometrisinin akış yönünde sınırlı bir etki yarattığı, dolayısıyla türbülans oluşumunun çok belirgin şekilde artmadığı anlaşılmaktadır. Bu da ısı transferinde kayda değer bir iyileşme yaratmadığını göstermektedir.

4.7.1. Basınç kaybı (ΔP)

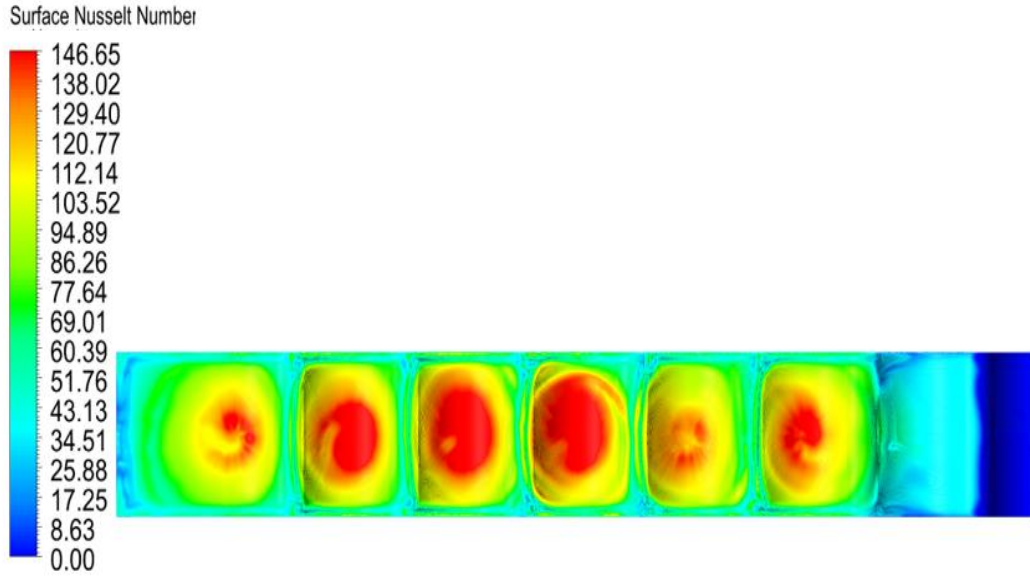
BASE modelinde basınç kaybı değeri 9708,4 Pa olarak ölçülürken, D2 modelinde bu değer 9755,8 Pa olarak gerçekleşmiştir. Bu yaklaşık 47,4 Pa'lık artış, D2 geometrisinin jet akışında hafif bir direnç oluşturduğunu ve akışın bir miktar daha fazla enerji kaybına uğradığını göstermektedir. D2 yüzeyinde oluşan geometrik bozukluklar, akışın geri dönüş bölgelerini artırarak sistemin basınç verimliliğini bir miktar düşürmüştür.

4.7.2. Performans değerlendirme kriteri (PEC)

Performans Değerlendirme Kriteri (PEC), hem ısı transferi artışını hem de buna karşılık gelen basınç kaybı maliyetini birlikte değerlendirmektedir. BASE modeli için bu değer referans olarak 1,000 kabul edilmiştir. D2 modeli için ise PEC değeri de 1,000 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, D2 modelinin ısı transferinde elde ettiği sınırlı kazancın, basınç kaybındaki artış ile dengelendiğini ve genel sistem performansında kayda değer bir gelişme sağlamadığını ortaya koymaktadır.

D2 modeli şekil 4.14'te düz hedef yüzeye (BASE modeli) kıyasla çok sınırlı bir ısı transfer artışı sağlamış (sadece %0,18), ancak buna karşın daha yüksek bir basınç kaybı üretmiştir. Bu nedenle, genel performans (PEC) açısından her iki model de eşit düzeydedir ($PEC = 1,000$). Görsel analizdeki akış yapılarında da D2 modelinin oluşturduğu akış karakteristiklerinin BASE modeline çok benzer olduğu, jet çekirdeğinin yayılımında ya da girdap yapılarında anlamlı bir değişiklik gözlenmediği görülmektedir. Bu durum, D2 modelinin yüzey geometrisinin akışı bozacak kadar agresif olmadığı gibi, türbülansı artıracak kadar etkili de olmadığını göstermektedir.

Bu nedenle, termal-hidrodinamik anlamda D2 modeli, BASE modeline kıyasla anlamlı bir avantaj sunmamaktadır.



Şekil 4.14. Dalgalı hedef yüzey (D2 modeli) için yerel Nusselt sayısı dağılım konturu.

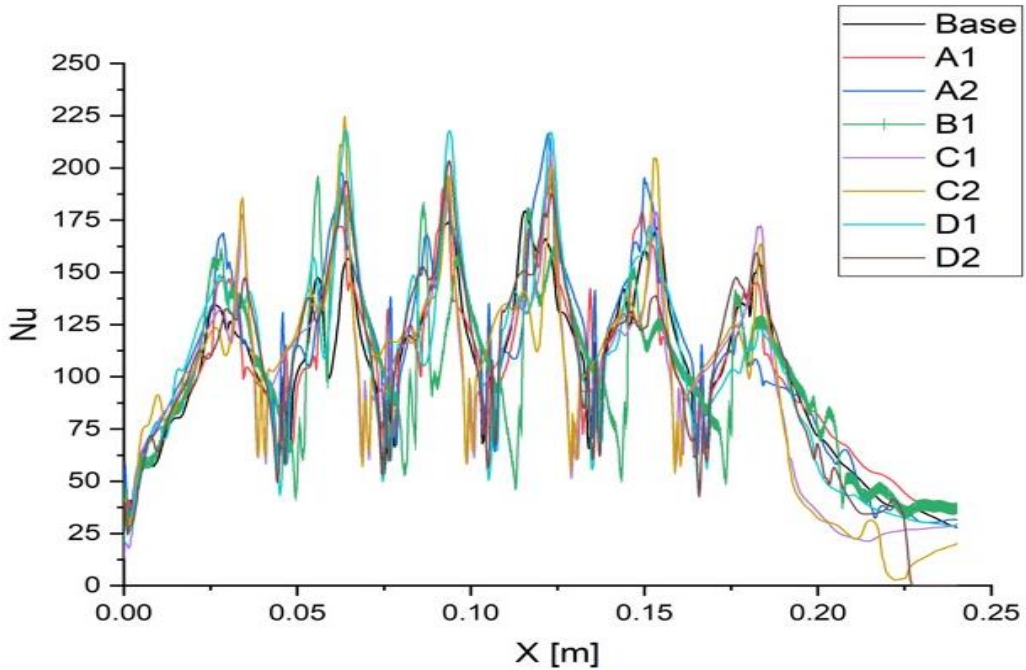
Sonuç olarak, D2 modeli her ne kadar geometrik olarak değiştirilmiş bir yapı sunsa da ne ısı transferinde ne de basınç kaybında sistem performansını iyileştirecek düzeyde bir katkı sağlamamaktadır. Bu da jet çarpmalı soğutma uygulamalarında optimum performans için daha etkin yüzey geometrilerinin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.



5. SAYISAL SONUÇ

Düz hedef yüzey (BASE modeli) için ortalama Nusselt sayısı 83,103 olarak elde edilmiştir. Bu değer, jet akışının hedef yüzeye çarpmasının ardından düzgün şekilde yayılmasıyla ilişkilidir. Düz yüzeyde akış kararlı bir biçimde gelişmiş, sınır tabaka kalınlığı sabit kalmış ve ısı geçişi sınırlı düzeyde gerçekleşmiştir. Dalgalı yüzey geometrilerinde ise, akışın jet çarpma bölgesinde dalga tepe ve çukur bölgeleri nedeniyle oluşan hız gradyanları ve dönel yapılar ısı transferini önemli ölçüde etkilemiştir.

Tüm dalgalı yüzey tiplerinin karşılaştırıldığı şekil 5.1’te, D1 ve A2 modelleri genel olarak en yüksek ısı geçiş performansını sergilemiştir. D2 (sürekli çukur tipi) modelinde ise Nu değerleri D1’e göre daha dengeli, ancak ortalama olarak biraz daha düşüktür. B1, C1 ve C2 modellerinde yönlü dalga formları ısı geçişine sınırlı katkı sağlamış, Base model ise en düşük ortalama Nusselt değerine sahip olmuştur.



Şekil 5.1. Tüm Dalgalı Yüzey Modellerine Ait Yerel Nusselt Sayısının (Nu) X Konumu Boyunca Değişimi.

A1 modeli, ortalama Nusselt sayısı 85,128 ile düz yüzeye göre yaklaşık %2,4 oranında bir artış sağlamıştır. Dalga tepelerinde meydana gelen yerel hızlanmalar, sınır tabaka kalınlığını azaltarak ısı transferini artırmıştır.

A2 modeli, ortalama 86,381 değeriyle tüm modeller arasında en yüksek Nusselt sayısına ulaşmıştır. Dalga formunun daha optimize edilmiş eğim açıları, jet akışının yüzeye çarpma sonrası yayılımını artırmış, ikincil girdap yapılarının yüzey boyunca daha kararlı şekilde gelişmesini sağlamıştır.

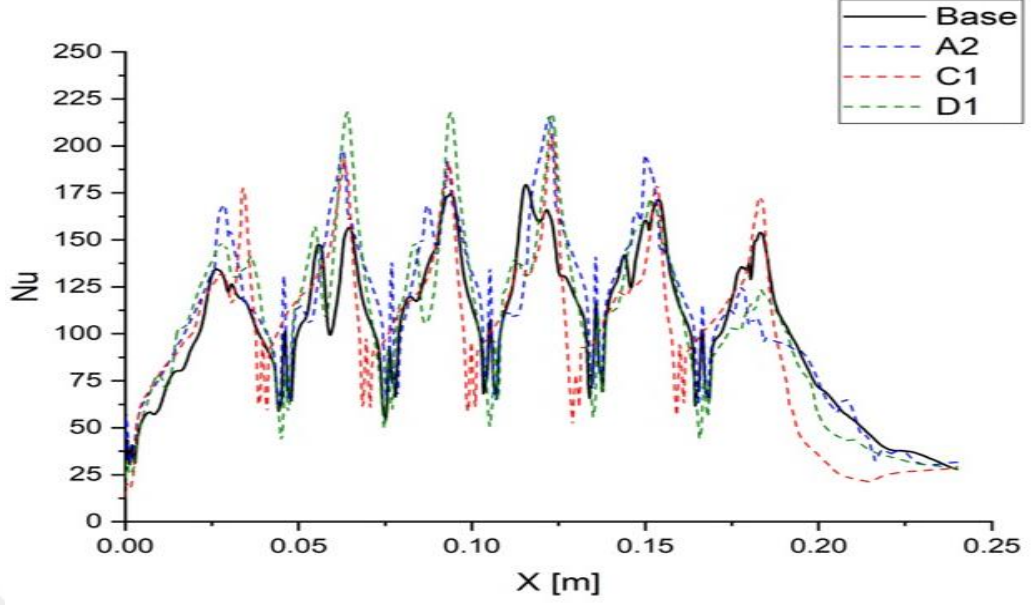
B1 modeli ise 81,427 değeriyle düz yüzeye kıyasla daha düşük bir ısı transferi göstermiştir. Bu düşüş, dalga formunun akış yönüne ters yönde etkiler oluşturmasıyla açıklanabilir.

C1 modeli 80,070, C2 modeli 81,855 ile yine BASE'e göre düşük değerler elde etmiştir. Bu durum, dalga yüksekliğinin akış yapısını kararsız hale getirerek ısı geçişini sınırladığına işaret etmektedir.

D1 modeli, 86,438 ortalama Nusselt sayısı ile A2 modeline oldukça yakın bir performans sergilemiştir. Dalga geometrisinin yönlendirme etkisi sayesinde jet akışının yüzeye daha geniş bir alanda dağılması, yüksek yerel Nusselt bölgelerinin oluşmasına katkı sağlamıştır.

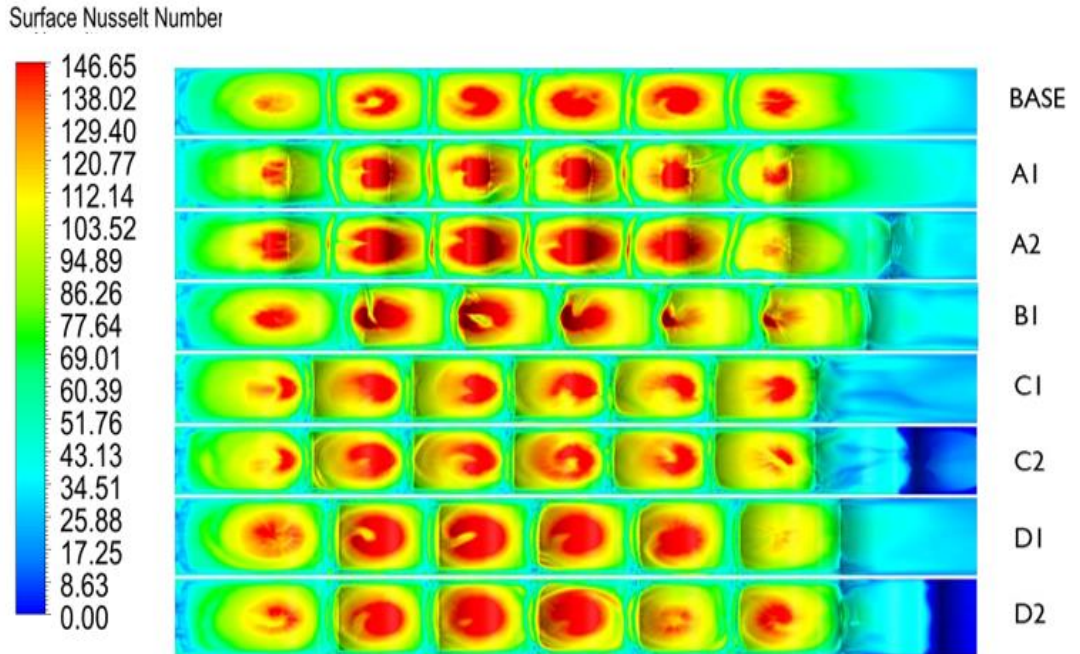
D2 modeli ise 83,255 değeriyle BASE modeline yakın bir sonuç vermiştir. Bu durum, dalga genliğinin düşmesiyle birlikte akışın dalga formuna uyum sağlayamadığını göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, A2 ve D1 modelleri ısı transferi açısından en yüksek performansı göstermiş, C1 modeli ise en düşük değeri üretmiştir.

Şekil 5.2'de, base, A2, C1 ve D1 modellerinin karşılaştırıldığı grafikte, dalgalı yüzey geometrilerinin düz yüzeye göre yerel ısı taşınım katsayısını (Nu) belirgin şekilde artırdığı görülmektedir. Özellikle D1 (çukur tipi dalgalı) ve A2 (sürekli tepe tipi dalgalı) modelleri, jet akışının yüzeye etkileşimini güçlendirerek en yüksek Nusselt değerlerine ulaşmıştır. Buna karşılık C1 (sağ yönlü dalgalı) modelinde, akış yönlendirmesi nedeniyle yerel türbülansın zayıfladığı bölgelerde Nu değerleri Base modele yakın kalmıştır.



Şekil 5.2. Base, A2, C1 ve D1 Modellerine Ait Yerel Nusselt Sayısının (Nu) X Konumu Boyunca Değişimi.

Şekil 5.3'te, düz (BASE) ve dalgalı yüzey modelleri (A1, A2, B1, C1, C2, D1 ve D2) için elde edilen yüzeysel Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırması verilmiştir. Bu karşılaştırma, dalgalı yüzey geometrilerinin jet çarpması sonucu oluşan yerel ısı transferi bölgelerini nasıl etkilediğini görsel olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 5.3. Düz (BASE) ve dalgalı yüzey modelleri (A1, A2, B1, C1, C2, D1, D2) için yüzeysel Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması.

5.1. Basınç Kaybı (ΔP)

Jet çarpmalı soğutma sistemlerinde basınç kaybı, yüzey geometrisinin akış yönündeki direnç etkisiyle doğrudan ilişkilidir. Düz yüzeyde (BASE) basınç kaybı 9708,4 Pa olarak elde edilmiştir.

Dalgalı yüzeylerde bu değerler değişiklik göstermektedir:

A1 modelinde 9610,2 Pa, A2 modelinde 9484,3 Pa olarak ölçülmüştür. Her iki modelde de basınç kaybının azalması, dalga formunun akış hattını aerodinamik şekilde yönlendirmesiyle açıklanabilir. B1 modeli 9344,7 Pa değeriyle en düşük basınç kaybını üretmiştir; ancak ısı transferindeki düşüş bu avantajı performans açısından sınırlamıştır.

C1 (9804,0 Pa) ve C2 (9866,9 Pa) modellerinde ise basınç kaybı belirgin şekilde artmıştır. Bu artış, dalga çukurlarında akışın ayrılma eğilimi göstermesi ve yerel geri akış bölgeleri oluşturmasıyla ilişkilidir. D1 (9654,7 Pa) ve D2 (9755,8 Pa) modellerinde ise basınç kaybı değerleri BASE'e yakın seyretmiştir. Tablo 5.1'de farklı modeller için ortalama Nusselt sayısı (Nu), basınç kaybı [Pa] ve performans değerlendirme kriteri (PEC) değerleri verilmiştir.

Sonuç olarak, en düşük basınç kaybı B1 modelinde gözlenmiş; ancak A2 modeli, düşük basınç kaybı ile yüksek ısı transferi arasında en dengeli sonuçları vermiştir.

Tablo 5.1. Farklı modeller için ortalama Nusselt sayısı (Nu), basınç kaybı [Pa] ve performans değerlendirme kriteri (PEC) değerleri.

MODEL	NU	BASINÇ [PA]	PEC
BASE	83,103	9708,400	-
A1	85,128	9610,200	1,028
A2	86,381	9484,300	1,048
B1	81,427	9344,700	0,992
C1	80,070	9804,000	0,960
C2	81,855	9866,900	0,980
D1	86,438	9654,700	1,042
D2	83,255	9755,800	1,000

5.2. Performans Değerlendirme Kriteri (PEC)

Termal-hidrodinamik performansın bütüncül olarak değerlendirilmesinde kullanılan PEC (Performance Evaluation Criterion), ısı transferindeki artışın basınç kaybı

maliyetiyle orantılı iyileşmesini ifade eder. BASE modeli için referans değer $PEC = 1,000$ olarak alınmıştır.

Dalgalı yüzeylerde elde edilen değerler şu şekildedir:

- A1: 1,028
- A2: 1,048
- B1: 0,992
- C1: 0,960
- C2: 0,980
- D1: 1,042
- D2: 1,000

Bu sonuçlara göre, A2 modeli en yüksek PEC değerine ulaşarak sistemin genel termal-hidrodinamik verimliliğini yaklaşık %4,8 oranında artırmıştır. Bunu D1 modeli (%4,2 artış) ve A1 modeli (%2,8 artış) takip etmektedir. C grubu modelleri ise, yüksek basınç kayıpları nedeniyle düşük performans göstermiştir.

Sayısal analizler sonucunda, tüm dalgalı yüzey geometrileri BASE modeliyle karşılaştırılmış ve ısı transferi, basınç kaybı ile termal-hidrodinamik performans (PEC) kriterleri üzerinden değerlendirilmiştir.

A2 modeli, hem en yüksek ısı transferine ($Nu = 86,381$) hem de düşük basınç kaybına ($\Delta P = 9484,3$ Pa) sahip olması sayesinde en yüksek PEC değeri (1,048) ile en verimli model olarak öne çıkmıştır.

D1 modeli, A2'ye yakın performans göstererek sistemin ikinci en verimli geometrisi olmuştur.

A1 modeli, dengeli bir ısı transferi artışı ve azalan basınç kaybı sayesinde olumlu sonuçlar üretmiştir.

B1, C1 ve C2 modelleri, akış kararlılığını bozarak ya ısı transferini azaltmış ya da basınç kaybını artırmışlardır.

D2 modeli ise düz yüzeye yakın değerler elde ederek orta düzey bir performans göstermiştir. Genel olarak, A2 dalgalı yüzey modeli, jet çarpmalı soğutma uygulamalarında ısı verimliliği ve hidrodinamik kayıplar arasında optimum dengeyi

sağlayan en başarılı tasarım olarak belirlenmiştir. Dalga formunun yüzey boyunca akışı yönlendirmesi, ikincil girdap yapılarının gelişimini desteklemiş ve sınır tabaka kararlılığını bozarak ısı geçişinde belirgin iyileşme sağlamıştır. Bu sonuçlar, dalgalı yüzey geometrisinin jet akışlı soğutma sistemlerinde kullanılmasının termal-hidrodinamik performansı artırma potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.



6. DEĞERLENDİRME

Sayısal analizler, dalgalı hedef yüzey geometrilerinin jet çarpmalı soğutma sistemlerinde ısı transferini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Düz yüzeye kıyasla, dalgalı yüzeyler jet akışını yönlendirerek ikincil girdapların oluşumunu desteklemekte ve sınır tabaka kararlılığını bozarak yüzey boyunca daha homojen ve yüksek Nusselt sayıları elde edilmesini sağlamaktadır. Özellikle A2 ve D1 modelleri, yüksek ısı transferi ile düşük basınç kaybını bir arada sunarak termal-hidrodinamik performans açısından optimum dengeyi yakalamış ve sistemin genel verimliliğini en üst düzeye taşımıştır. Bazı dalgalı modellerde akış kararlılığının bozulması ısı transferini sınırlasa da genel bulgular, dalga formunun stratejik olarak tasarlanmasının jet çarpmalı soğutma performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, dalgalı yüzey geometrisinin pasif ısı transfer artırıcı bir yöntem olarak uygulanabilirliğini ve gaz türbinleri gibi yüksek sıcaklıklı sistemlerdeki etkinliğini güçlü bir şekilde desteklemektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Fu, W. L., Wright, L. M., and Han, J.C., "Heat transfer in two-pass rotating rectangular channels ($AR=1:2$ and $AR=1:4$) with 45 deg angled rib turbulators", *Journal of Turbomachinery*, 127 (1): 164–174 (2005).
- [2] A Lakshminarayana, B., "Fluid dynamics and heat transfer of turbomachinery", John Wiley & Sons, Inc., New York, (1995).
- [3] Hyung, Cho, H., Kim, K. M., and Song, J., "Cooling systems: energy, engineering and applications, applications of impingement jet cooling systems", Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, (2011).
- [4] A Gauntner, James W.; Livingood, John N.B.; Hrycak, P., "Survey of literature on flow characteristics of a single jet impinging a flat plate ", (NASA TN D-5652): National Aeronautics And Space Administration, Washington, D. C., (1970).
- [5] Blevins, R. D., "Applied fluid dynamics handbook", Krieger Pub. Co., Malabar, Fla., (1992).
- [6] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M. A., and Button, B. L., "A review of heat transfer data for single circular jet impingement", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 13 (2): 106–115 (1992).
- [7] Schlichting, H., "Boundary-layer theory ", McGraw-Hill, New York, (1979)
- [8] Viskanta, R., "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 6 (2): 111–134 (1993).
- [9] Tani, I. and Komatsu, Y., "Impingement of a round jet on a flat surface", *Applied Mechanics*, 672–676 (1966).
- [10] Giralt, F., Chia, C.-J., and Trass, O., "Characterization of the impingement region in an axisymmetric turbulent jet", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 16 (1): 21–28 (1977).
- [11] Bailey, J. C. and Bunker, R. S., "Local heat transfer and flow distributions for impinging jet arrays of dense and sparse extent", Volume 3: Turbo Expo 2002, Parts A and B, 855–864 (2002).
- [12] Florschuetz, L. W. and Su, C. C., "Effects of crossflow temperature on heat transfer within an array of impinging jets", *Journal of Heat Transfer*, 109 (1): 74 (1987).
- [13] Allauddin, U., Uddin, N., and Weigand, B., "Heat transfer enhancement by jet impingement on a flat surface with detached-ribs under cross-flow conditions", *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 63 (12): 921–940 (2013).

- [14] Xiao, Y., Tang, H. W., Liang, D. F., and Zhang, J. D., "Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow", *Journal of Hydrodynamics*, 23 (6): 806–813 (2011).
- [15] Naik-Nimbalkar, V. S., Suryawanshi, A. D., Patwardhan, A. W., Banerjee, I., Padmakumar, G., and Vaidyanathan, G., "Twin jets in cross-flow", *Chemical Engineering Science*, 66 (12): 2616–2626 (2011).
- [16] Metzger, D. E., Florschuetz, L. W., Takeuchi, D. I., Behee, R. D., and Berry, R. A., "Heat transfer characteristics for inline and staggered arrays of circular jets with crossflow of spent air", *Journal of Heat Transfer*, 101 (3): 526–531 (1979).
- [17] Kercher, D. M. and Tabakoff, W., "Heat transfer by a square array of round air jets impinging perpendicular to a flat surface including the effect of spent air", *Journal of Engineering for Power*, 92 (1): 73 (1970).
- [18] Nuntadusit, C., Wae-hayee, M., Bunyajitradulya, A., and Eiamsa-ard, S., "Heat transfer enhancement by multiple swirling impinging jets with twisted-tape swirl generators", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39 (1): 102–107 (2012).
- [19] Florschuetz, L. W., Berry, R. A., and Metzger, D. E., "Periodic Streamwise Variations of Heat Transfer Coefficients for Inline and Staggered Arrays of Circular Jets with Crossflow of Spent Air", *Journal of Heat Transfer*, 102 (1): 132 (1980).
- [20] Koopman, R. N. and Sparrow, E. M., "Local and average transfer coefficients due to an impinging row of jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19 (6): 673–683 (1976).
- [21] Guoneng, L., Zhihua, X., Youqu, Z., Wenwen, G., and Cong, D., "Experimental study on convective heat transfer from a rectangular flat plate by multiple impinging jets in laminar cross flows", *International Journal of Thermal Sciences*, 108 (1): 123–131 (2016).
- [22] Florschuetz, L. W., Truman, C. R., and Metzger, D. E., "Streamwise flow and heat transfer distributions for jet array impingement with crossflow", *Journal of Heat Transfer*, 103 (2): 337–346 (1981).
- [23] Lee, J., Ren, Z., Ligrani, P., Lee, D. H., Fox, M. D., and Moon, H.-K., "Cross-flow effects on impingement array heat transfer with varying jet-to-target plate distance and hole spacing", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75 (1): 534–544 (2014).
- [24] Huang, Y., Ekkad, S. V., and Han, J.-C., "Detailed heat transfer distributions under an array of orthogonal impinging jets", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 12 (1): 73–79 (1998).
- [25] Wang, T., Lin, M., and Bunker, R. S., "Flow and heat transfer of confined impingement jets cooling", *Volume 3: Heat Transfer; Electric Power; Industrial and Cogeneration ASME*, Munich, V003T01A031, (2000).
- [26] Rundström, D. and Moshfegh, B., "Large-eddy simulation of an impinging jet in a cross-flow on a heated wall-mounted cube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (3–4): 921–931 (2009).

- [27] Tan, L., Zhang, J. Z., and Xu, H. S., "Jet impingement on a rib-roughened wall inside semi-confined channel", *International Journal of Thermal Sciences*, 86 (1): 210–218 (2014).
- [28] Wang, L., Sundén, B., Borg, A., and Abrahamsson, H., "Control of jet impingement heat transfer in crossflow by using a rib", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (19–20): 4157–4166 (2011).
- [29] Zhang, D., Qu, H., Lan, J., Chen, J., and Xie, Y., "Flow and heat transfer characteristics of single jet impinging on protrusioned surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58 (1–2): 18–28 (2013).
- [30] Wang, C., Wang, L., and Sundén, B., "A novel control of jet impingement heat transfer in cross-flow by a vortex generator pair", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88 (1): 82–90 (2015).
- [31] Liu, Y., Yu, W., Liu, H., & Zhong, L. (2024). Numerical investigation on flow and heat transfer characteristics of impingement cooling with a corrugated target surface. *Applied Thermal Engineering*, 235, 122774. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122774>
- [32] Rahman, M. M., Dash, S. K., Chakraborty, S., & Mukhopadhyay, A. (2023). Effects of reference temperature and Mach number in the determination of local recovery factor for compressible impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 207, 124171. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124171>
- [33] Özel, M. B., Yalçinkaya, O., Tepe, A. Ü., Durmaz, U., & Uysal, Ü. (2024). Numerical investigation of heat transfer performance in extended jet impingement cooling using wavy target surfaces. *Thermal Science and Engineering Progress*, 50, 101874. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.101874>
- [34] Kolsi, L., Selimefendigil, F., Ghachem, K., Alqahtani, T., & Algarni, S. (2024). Magnetohydrodynamic mixed convection and jet impingement cooling in a wavy surface enclosure using porous fins under non-uniform magnetic field. *Journal of Molecular Liquids*, 392, 123374. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.123374>
- [35] He, J., Deng, Q., & Feng, Z. (2024). Numerical investigation on flow and heat transfer characteristics of jet impingement cooling with novel partially and fully corrugated target surfaces. *Energy Conversion and Management*, 301, 117926. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.117926>.
- [36] Xing, Y., Spring, S., & Weigand, B. (2023). Comprehensive experimental and numerical study of heat transfer and pressure loss in multiple jet impingement cooling systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 208, 124294. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124294>.
- [37] Tepe, A. Ü. (2023). Numerical investigation of heat transfer and flow characteristics of dimples and protrusions on finned-tube heat exchanger fins. *Thermal Science and Engineering Progress*, 40, 101184. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101184>.

- [38] Tepe, A. Ü., Yetişken, Y., Uysal, Ü., & Arslan, K. (2024). Experimental and numerical investigation of heat transfer performance of extended jet holes in impingement cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 147, 112753. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2023.112753>.
- [39] Wan, C., Rao, Y., & Chen, P. (2023). Comparative numerical and experimental study on heat transfer performance of multi-jet impingement cooling over flat and pin-fin enhanced surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 205, 123915. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.108109>.
- [40] Tepe, A. Ü., Yetişken, Y., Uysal, Ü., & Arslan, K. (2024). Experimental and numerical investigation of heat transfer performance of extended jet holes in impingement cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 147, 112753. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119945>.
- [41] Yalçinkaya, O. (2024). Numerical investigation of heat transfer performance of extended jet impingement cooling using elliptical and slot-shaped pins. *International Journal of Thermal Sciences*, 180, 108071. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107698>.
- [42] Jung, E.Y., Park, C.U., Lee, D.H., Kim, K.M., Woo, T.K., Cho, H.H. 2012. Heat Transfer Characteristics Of An Angled Array Impinging Jet On A Concave Duct. *Proc ASME Turbo Expo*, 4, 601–7. <https://doi.org/10.1115/GT2012-69566>. 174
- [43] Jung, E.Y., Park, C.U., Lee, D.H., Kim, K.M., Cho, H.H. 2018. Effect Of The Injection Angle On Local Heat Transfer In A Showerhead Cooling With Array Impingement Jets. *Int J Therm Sci*, 124, 344–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.10.033>.
- [44] Tepe, A.Ü., Yetişken, Y., Uysal, Ü., Arslan, K. 2020. Experimental And Numerical Investigation Of Jet Impingement Cooling Using Extended Jet Holes. *Int J Heat Mass Transf*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119945>.
- [45] Tepe, A.Ü., Uysal, Ü., Yetişken, Y., Arslan, K. 2020. Jet Impingement Cooling On A Rib-Roughened Surface Using Extended Jet Holes. *Appl Therm Eng*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115601>.
- [46] Pazarlıoğlu H.K., Tepe, A.Ü., Tekir, M., Arslan, K. 2022. Effect Of New Design Of Elongated Jet Hole On Thermal Efficiency Of Solar Air Heater. *Therm Sci Eng Prog*, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101483>.
- [47] Heo, M.W., Lee, K.D., Kim, K.Y. 2012. Parametric Study And Optimization Of Staggered Inclined Impinging Jets On A Concave Surface For Heat Transfer Augmentation. *Numer Heat Transf Part A Appl*, 61, 442–62. <https://doi.org/10.1080/10407782.2012.654453>.
- [48] Guan, T., Zhang, J.Z., Shan, Y. 2016. Convective Heat Transfer By A Row Of Tab-Excited Impinging Jets On A Wedge-Shaped Concave Surface. *Int J Therm Sci*, 100, 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.09.015>.
- [49] Rao, Y., Liu, Y., Wan, C. 2018. Multiple-Jet Impingement Heat Transfer In Double-Wall Cooling Structures With Pin Fins And Effusion Holes. *Int J Therm Sci*, 133, 106–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.021>.

- [50] Brakmann, R., Chen, L., Weigand, B., Crawford, M. 2016. Experimental And Numerical Heat Transfer Investigation Of An Impinging Jet Array On A Target Plate Roughened By Cubic Micro Pin Fins. *J Turbomach*, 138, 1–11. <https://doi.org/10.1115/1.4033670>.
- [51] Ndao, S., Lee, H.J., Peles, Y., Jensen, M.K. 2012. Heat Transfer Enhancement From Micro Pin Fins Subjected To An Impinging Jet. *Int J Heat Mass Transf*, 55, 413–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.09.037>.
- [52] Ndao, S., Peles, Y., Jensen, M.K. 2014. Effects Of Pin Fin Shape And Configuration On The Single-Phase Heat Transfer Characteristics Of Jet Impingement On Micro Pin Fins. *Int J Heat Mass Transf*, 70, 856–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.11.062>.
- [53] Pandit, J., Thompson, M., Ekkad, S.V., Huxtable, S.T. 2014. Effect Of Pin Fin To Channel Height Ratio And Pin Fin Geometry On Heat Transfer Performance For Flow In Rectangular Channels. *Int J Heat Mass Transf*, 77, 359–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.030>.
- [54] Hua, J., Li, G., Zhao, X., Li, Q. 2017. Experimental Study On Thermal Performance Of Micro Pin Fin Heat Sinks With Various Shapes. *Heat Mass Transf Und Stoffuebertragung*, 53, 1093–104. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1880-8>. 175
- [55] Wan, W., Deng, D., Huang, Q., Zeng, T., Huang, Y. 2017. Experimental Study And Optimization Of Pin Fin Shapes In Flow Boiling Of Micro Pin Fin Heat Sinks. *Appl Therm Eng*, 114, 436–49. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.182>.
- [56] Ambreen, T., Kim, M.H. 2018. Effect Of Fin Shape On The Thermal Performance Of Nanofluid-Cooled Micro Pin-Fin Heat Sinks. *Int J Heat Mass Transf*, 126, 245–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.164>.
- [57] Singh, P., Zhang, M., Ahmed, S., Ramakrishnan, K.R., Ekkad, S. 2019. Effect Of Micro-Roughness Shapes On Jet Impingement Heat Transfer And Fin Effectiveness. *Int J Heat Mass Transf*, 132, 80–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.135>.
- [58] Wan, C., Rao, Y., Zhang, X. 2013. Numerical Investigation Of Impingement Heat Transfer On A Flat And Square Pin-Fin Roughened Plates. *Heat Transf, ASME*, 3A. <https://doi.org/10.1115/GT2013-94473>.
- [59] Ndao, S., Peles, Y., Jensen, M.K. 2012. Experimental Investigation Of Flow Boiling Heat Transfer Of Jet Impingement On Smooth And Micro Structured Surfaces. *Int J Heat Mass Transf*, 55, 5093–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.009>.
- [60] Azad, G.S., Huang, Y., Han, J.C. 2002. Jet Impingement Heat Transfer On Pinned Surfaces Using A Transient Liquid Crystal Technique. *Int J Rotating Mach*, 8, 161–73. <https://doi.org/10.1080/1023-620291910798>.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Kadircan KASAB

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2020-2021 yılları arasında MGP Yapı Denetim Şirketi'nde Yardımcı Kontrol Mühendisi olarak çalıştım.
- 2022 yılından beri Yılgenci Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de Üretim Sorumlusu olarak çalışmaktayım.