**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ÇEŞİTLİ GEOMETRİLERE SAHİP ÇAPRAZ AKIŞIN JET AKIŞ İLE KARIŞTIRILMASININ ARAŞTIRILMASI

**Alp Eren YILDIZ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ / DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Alişan GÖNÜL

Mart, 2025

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ÇEŞİTLİ GEOMETRİLERE SAHİP ÇAPRAZ AKIŞIN JET AKIŞ İLE KARIŞTIRILMASININ ARAŞTIRILMASI

Alp Eren YILDIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 14.03.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı-Proses Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

| | |
|---|---|
| Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ | Dr. Öğr. Üyesi Alişan GÖNÜL |
| Yıldız Teknik Üniversitesi | Siirt Üniversitesi |
| Danışman | Eş-Danışman |

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ali PINARBAŞI, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Abdulkerim OKBAZ, Üye

Doğuş Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "ÇEŞİTLİ GEOMETRİLERE SAHİP ÇAPRAZ AKIŞIN JET AKIŞ İLE KARIŞTIRILMASININ ARAŞTIRILMASI" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Alp Eren YILDIZ

İmza

# TEŞEKKÜR

Kale Jet Engines şirketindeki değerli yöneticilerime ve bana desteğini esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma; Yıldız Teknik Üniversitesi'nden danışmanım Prof. Dr. Ahmet Selim Dalkılıç'a, eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Alişan Gönül'e, yüksek lisans tezim üzerinde çalışırken bana sağladıkları sonsuz destek ve kıymetli bilgiler için derin minnettarlığımı sunarım. Bu süreçte gösterdikleri sabır ve verdikleri ilham, akademik yolculuğumda benim için paha biçilemez birer rehber olmuştur.

Alp Eren YILDIZ

# İÇİNDEKİLER

**SİMGE LİSTESİ** vii

**KISALTMA LİSTESİ** ix

**ŞEKİL LİSTESİ** x

**TABLO LİSTESİ** xiv

**ÖZET** xv

**ABSTRACT** xvii

**1 GİRİŞ** 1

1.1 Literatür Özeti ..... 1

1.2 Tezin Amacı ..... 15

1.3 Hipotez ..... 16

**2 NÜMERİK HESAPLAMA YAKLAŞIMI** 17

2.1 Fiziksel Model ..... 17

2.2 Sayısal Model ..... 18

2.2.1 Sınır Şartları ve Termal Özellikler ..... 18

2.2.2 Ağ Yapısı ..... 19

2.2.3 HAD Modeli ..... 21

2.2.4 Türbülans Modeli Doğrulama Çalışmaları ..... 22

2.2.5 Model ile Analizlerin Doğrulanması ..... 24

**3 BULGULAR VE TARTIŞMA** 34

3.1 Farklı Şekillerin Etkisi ..... 34

3.2 Farklı Eğimlerin Etkisi ..... 44

**4 SONUÇ** **56**

**KAYNAKÇA** **58**

**TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR** **64**

# SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| $M$ | Ağ yapısı adı |
| β | Alt duvardaki jetin giriş açısı [°] |
| $L$ | Alt ve üst duvar uzunluğu [$m$] |
| $P$ | Basınç ($Pa$) |
| $\bar{\theta}$ | Boyutsuz karışım sıcaklığı |
| $V_c$ | Çapraz akışın hızı [$ms^{-1}$] |
| $\rho_c$ | Çapraz akışın yoğunluğu [$kgm^{-3}$] |
| $T_c$ | Çapraz akışının sıcaklığı [$K$] |
| $\mu$ | Dinamik viskozite [$Nsm^{-2}$] |
| $W$ | Genişlik uzunluğu [$m$] |
| $c_p$ | Isı kapasitesi [$Jkg^{-1}°C^{-1}$] |
| $u_i, u_j$ | i ve j için hız komponenti [$ms^{-1}$] |
| $\overline{u_i'}, \overline{u_j'}$ | i ve j için ortalama hız komponenti |
| $x_i, x_j$ | i ve j yönündeki koordinatlar |
| S | İki jet merkezi arasındaki uzaklık [$m$] |
| $L_i$ | İlk jetin merkez noktasının çapraz akış girişine olan uzaklık [$m$] |
| $V_j$ | Jet akışın hızı [$ms^{-1}$] |
| $T_j$ | Jet akışın sıcaklığı [$K$] |
| $\rho_j$ | Jet akışının yoğunluğu [$kgm^{-3}$] |
| $X$ | Jet merkezinin +$x$ yönündeki uzaklığı [$m$] |
| $Y$ | Jet merkezinin +$y$ yönündeki uzaklığı [$m$] |
| JL | Jet uzunluğu [$m$] |
| $\sigma_k$ | $k$ için türbülans Prandtl sayısı |
| $x, y, z$ | Kartezyen koordinatlar |
| $v$ | Kinematik viskozite [$m^2s^{-1}$] |
| $\delta_{ij}$ | Kronecker delta fonksiyonu |
| $S_k, S_\varepsilon$ | Kullanıcı tanımlı kaynak terimleri |
| $m$ | Kütlesel debi [$kgs^{-1}$] |
| $T_{min}$ | Minimum Sıcaklık [$K$] |

| | |
|---|---|
| $J$ | Momentum akısı oranı |
| $W_{1/2}^{\pm}$ | Ölçeklendirme Parametresi [Şekil 2.6] |
| $Y_c$ | Ölçeklendirme Parametresi [Şekil 2.6] |
| $\theta_c$ | Ölçeklendirme Parametresi [Şekil 2.6] |
| $\theta_{max}^{\pm}$ | Ölçeklendirme Parametresi [Şekil 2.6] |
| $\theta_{min}^{\pm}$ | Ölçeklendirme Parametresi [Şekil 2.6] |
| $T$ | Sıcaklık [$K$] |
| $\theta$ | Sıcaklık farkı oranı |
| $Y_M$ | Sıkıştırılabilir türbülanslı yapıdaki dalgalı dilatasyonun genel dağılıma oranı [$Ns^{-1}$] |
| $E$ | Toplam Enerji [$Jkg^{-1}$] |
| $\varepsilon$ | Türbülans enerji dağılımı oranı [$Jkg^{-1}s^{-1}$] |
| $k$ | Türbülans kinetik enerji [$Jkg^{-1}$] |
| $G_k, G_b$ | Türbülans kinetik enerjisinin üretilmesini sağlayan ortalamaya bağlı hız gradyanları [5] |
| $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ | Türbülans modelindeki sabitler |
| $Pr_t$ | Türbülans Prandtl sayısı |
| $\mu_t$ | Türbülans viskozite [] |
| α | Üst duvardaki jetin giriş açısı [°] |
| $H$ | Yan duvar uzunluğu [$m$] |
| $\rho$ | Yoğunluk [$kgm^{-3}$] |
| $t$ | Zaman ($s$) |
| $\sigma_\varepsilon$ | $\varepsilon$ için türbülans Prandtl sayısı |

# KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---|---|
| HAD | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| SIMPLE | Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı-Kapalı Yöntem (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) |

# ŞEKİL LİSTESİ

**Şekil 1.1** Çapraz akışta gerçekleşen jet akışının yapısı [1] ..... **2**
**Şekil 1.2** Tek delikli bir çapraz akışın gerçekleştiği durumdaki sıcaklık dağılımı [22] ..... **4**
**Şekil 1.3** Büyük deliklerin yanına küçük delikler açılarak iyileştirilen modelin sıcaklık dağılımı [22] ..... **4**
**Şekil 1.4** Film soğutma etkinliği laminar (a) ve türbülans (b) sınır tabaka [23] ..... **5**
**Şekil 1.5** $\alpha$ değerleri (a) 30°, (b) 45°, (c) 60°, (d) 75° ve (e) 90° için ters akış bölgesinin gösterilmesi [24] ..... **6**
**Şekil 1.6** Momentum akı oranının artmasıyla film soğutma etkisinin dağılımı [25] ..... **7**
**Şekil 1.7** Jet akışının soğutulması gereken parçaya çarpması ile oluşan hız dağılımı [28] ..... **8**
**Şekil 1.8** Kademeli (a) ve sıralı (b) dizilim gösteren jetlerin gösterdiği akış çizgileri [29] ..... **9**
**Şekil 1.9** Karışma oranının artmasıyla penetrasyondaki değişim [30] ..... **10**
**Şekil 1.10** En boy oranı 2 (a), 1 (b) ve 0,5 (c) olduğunda oluşan akış vektörleri [31] ..... **11**
**Şekil 1.11** Jet nozulunun çapraz akış yönünde 20° (a), 45° (b), 75° (c), 90° (d) açı ile eğimli olduğunda oluşan akış vektörleri [31] ..... **12**
**Şekil 1.12** Jet deliğinin jetler arasındaki mesafe ye oranı, 1 (a), 0,335 (b) ve 0,25 (c) olduğu durumdaki sıcaklık dağılımları [32] ..... **13**
**Şekil 1.13** Momentum akı oranının 21'den (a) 38,1'e (b) yükselmesi ile oluşan girdaplar [33] ..... **14**
**Şekil 1.14** Jetler arasındaki mesafe artırılarak yapılan analizin hız dağılımı ..... **15**
**Şekil 2.1** Akış alanın boyutsal gösterimi ..... **34**
**Şekil 2.2** Jet giriş şekilleri ..... **35**
**Şekil 2.3** Sınır koşullarının akış alanın üzerinde gösterilmesi ..... **36**
**Şekil 2.4** Ana akış hacimsel ağ yapısı gösterimi ..... **37**
**Şekil 2.5** *X/H*=0,25, *X/H*=0,5 ve *X/H*=1'de sıcaklık farkı oranının ($\theta$) yüzdesel karşılaştırılması ..... **40**
**Şekil 2.6** Ölçeklendirme parametreleriyle standart dikey sıcaklık profilinin şeması [35] ..... **42**

**Şekil 2.7** Holdeman vd.'nin kendi sonuçlarıyla (nokta nokta çizgi) ile modelinin (düz çizgi) karşılaştırılması [15] ..... **43**

**Şekil 2.8** $J$=4 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **44**

**Şekil 2.9** $J$=8 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **45**

**Şekil 2.10** $J$=16 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **46**

**Şekil 2.11** $J$=8 ve $\alpha$=5°, $\beta$=5°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **47**

**Şekil 2.12** $J$=8 ve $\alpha$=10°, $\beta$=10°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **48**

**Şekil 2.13** $J$=8 ve $\alpha$=15°, $\beta$=15°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **49**

**Şekil 2.14** $J$=8 ve $\alpha$=15°, $\beta$=105°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **50**

**Şekil 3.1** $J$=4 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta farklı şekilli jet için sıcaklık farkı oranı dağılımları ..... **53**

**Şekil 3.2** $J$=4 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90° için çapraz akışta farklı şekilli jetlerin orta düzleminden ($X$-$Y$ düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı ..... **54**

**Şekil 3.3** $J$=8 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta farklı şekilli jet için sıcaklık farkı oranı dağılımları ..... **55**

**Şekil 3.4** *J*=8 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90° için çapraz akışta farklı şekilli jetlerin orta düzleminden (*X*-*Y* düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı ..... **56**

**Şekil 3.5** *J*=16 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta farklı şekilli jet için sıcaklık farkı oranı dağılımları ..... **57**

**Şekil 3.6** *J*=16 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90° için çapraz akışta farklı şekilli jetlerin orta düzleminden (*X*-*Y* düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı ..... **58**

**Şekil 3.7** $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de farklı momentum akı oranları için çapraz akıştaki üçgen ve kare şekilli jetlerdeki *X/H*=0,25'deki *Y*-*Z* düzleminden toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı ..... **59**

**Şekil 3.8** $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de *J*=4, *J*=8 ve *J*=16 için çapraz akışta üçgen ve kare şekilli jetin orta düzleminden (*X*-*Y* düzlemi) türbülans kinetik enerji dağılımları ..... **60**

**Şekil 3.9** $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de *J*=4, *J*=8 ve *J*=16 için farklı jet şekilleri ile elde edilen karışım sıcaklığı değerlerinin karşılaştırması ..... **61**

**Şekil 3.10** *J*=4, *J*=8 ve *J*=16 momentum akı oranlarında $\alpha$=90°, $\beta$=90° için farklı jet şekillerinde penetrasyon derinliğinin karşılaştırılması ..... **62**

**Şekil 3.11** *J*=8'de $\alpha$=5,10,15° ve $\beta$=5,10,15° için *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen şekilli jet için sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **64**

**Şekil 3.12** *J*=8 ve $\alpha$=5,10,15°, $\beta$=5,10,15° için çapraz akışta üçgen şekilli jetlerin orta düzleminden (*X*-*Y* düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı ..... **65**

**Şekil 3.13** *J*=8'de $\alpha$=5,10,15° ve $\beta$=5,10,15° için *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta beşgen şekilli jet için sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **66**

**Şekil 3.14** *J*=8 ve $\alpha$=5,10,15°, $\beta$=5,10,15° için çapraz akışta beşgen şekilli jetlerin orta düzleminden (*X*-*Y* düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı ..... **67**

**Şekil 3.15** *J*=8 ve $\alpha$=15°, $\beta$=105°'de *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve X/H=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma ..... **68**

**Şekil 3.16** $J$=8 ve $\alpha$=15°, $\beta$=105° için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jetlerin orta düzleminden ($X$-$Y$ düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı ..... **69**

**Şekil 3.17** Farklı açılardaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerin $J$=8 için $X/H$=0,25'deki $Y$-$Z$ düzleminden alınan toplam sıcaklık dağılımı ..... **70**

**Şekil 3.18** Farklı açılardaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerin $J$=8 için $X/H$=0,25'deki $Y$-$Z$ düzleminden alınan hız büyüklüğü dağılımı ..... **71**

**Şekil 3.19** Farklı açılardaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerin $J$=8'de gösterdiği karışım sıcaklığı değerlerinin karşılaştırması ..... **72**

**Şekil 3.20** Farklı açılardaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerin $J$=8'de gösterdiği penetrasyon derinliğinin karşılaştırılması ..... **73**

# TABLO LİSTESİ

**Tablo 2.1** Akış alanının geometrik özellikleri**.....36**
**Tablo 2.2** X/H=0,25, X/H=0,75, X/H=1,25 ve X/H=1,75 için ağ yapısına göre minimum yerel toplam sıcaklık değerleri **.....39**

# ÖZET

## ÇEŞİTLİ GEOMETRİLERE SAHİP ÇAPRAZ AKIŞIN JET AKIŞ İLE KARIŞTIRILMASININ ARAŞTIRILMASI

Alp Eren YILDIZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Proses Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Eş-Danışman: Doç. Dr. Alişan GÖNÜL

Bu çalışma, çapraz akıştaki karşılıklı ve tandem dizilimli çeşitli jet şekillerinin karışıma olan etkisinin farklı momentum akı oranları altında hesaplamalı analiz yoluyla incelemektedir. Bu araştırmada jet giriş şekilleri için üçgen, beşgen, daire ve kare şekilleri incelenmiştir. Genellikle jet akışı çapraz akışa dik bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, ana akışa karşı veya akış yönüne doğru jet akışının sıcaklık dağılımını nasıl etkileyeceğini görmek için eğimli jetler de analiz edilmiştir. Üçgen şekilli jet, jet çıkışından farklı mesafelerdeki sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında sıcaklığı en çok düşüren ve hızlı penetrasyon gerçekleştiren şekil olmuştur. Jetin geometrisini değiştirmek, sıcaklığı düşürme de en düşük performansını sergileyen kare şekilli jete kıyasla sıcaklık farkı oranını %13'e kadar artırma potansiyeline sahiptir. Jet şekillerine göre yüksek momentum akısı oranlarında penetrasyon derinliğindeki değişim daha fazla görülmekte olup, üçgen jet en düşük penetrasyon derinliğini veren kare şekilli jete göre %31 daha yüksektir. Analizler karşılıklı jet-

lerden birinin ana akışa karşı ve diğerinin de ana akış yönünde karşılıklı eğimli jetleri de içerir. Sayısal sonuçlar, tüm analizlerdeki sıcaklık dağılımlarının bir model ile uyumlu olduğunu da göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çapraz akışta jet akışı, Jet şekilleri, Eğimli Jet, Karışım

# ABSTRACT

## INVESTIGATION OF THE MIXING OF CROSS FLOW WITH VARIOUS GEOMETRIES WITH JET FLOW

Alp Eren YILDIZ

Department of Mechanical Engineering

Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Co-supervisor: Assist. Prof. Dr. Alişan GÖNÜL

This study examines the effect of various jet shapes in cross-flow, reciprocal and tandem arranged, on the mixing under different momentum flux rates through computational analysis. In this research, triangle, pentagon, circle and square shapes were examined for jet inlet shapes. Generally, jet flow occurs perpendicular to the cross flow. Therefore, inclined jets were also analyzed to see how the jet flow against or upstream of the main flow would affect the temperature distribution. When the temperature distributions at different distances from the jet exit were compared, the triangular jet was the shape that reduced the temperature the most and achieved rapid penetration. Changing the geometry of the jet has the potential to increase the temperature difference ratio by up to 13% compared to the square shaped jet, which performs the least at lowering temperature. Compared to jet shapes, the change in penetration depth is more visible at high momentum flux rates, and the triangular jet is 31% higher than the square shape that gives the lowest penetration depth. The analyzes also include mutually inclined jets, one of which is against the main flow

and the other in the direction of the main flow. Numerical results show that the temperature distributions in all analyzes are consistent with a correlation equation.

**Keywords:** Jet in crossflow, Jet shapes, Inclined Jet, Mixing

# 1

# GİRİŞ

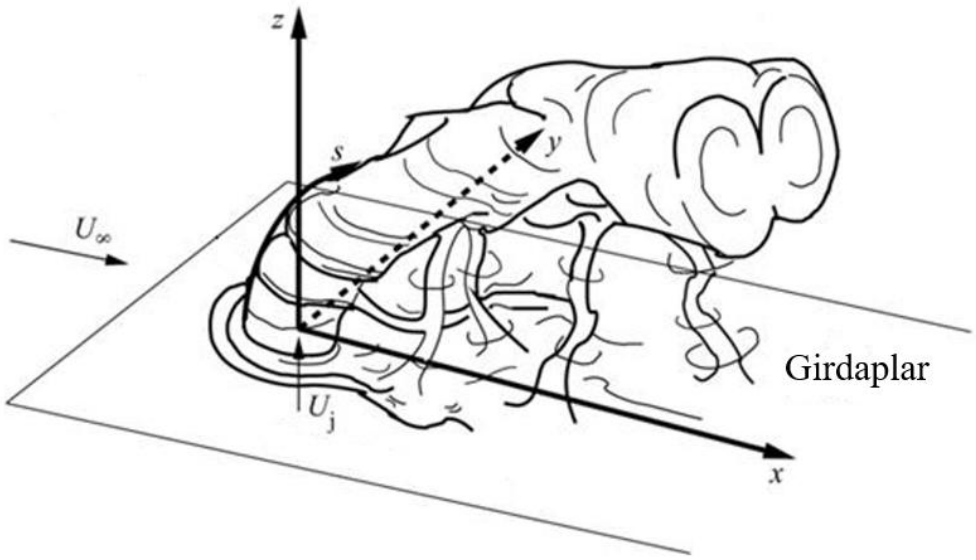
## 1.1 Literatür Özeti

Çapraz akışta jet akışı ile karışım çeşitli mühendislik ve endüstri alanlarında birçok önemli uygulamaya sahip olan bir akışkanlar dinamiği olgusudur. Özellikle savunma sanayi ve enerji uygulamalarının vazgeçilmemizi olan gaz türbinlerinde uygulamalarında sıklıkla uygulanır. Gaz türbinlerinde yanma odasındaki seyreltme delikleri, yakıt enjektörleri gibi çeşitli uygulamaların merkezinde yer alır. Araştırmacılar 50 yılı aşkın süredir gaz türbinleri üzerinde çalışmaktadır. Dolayısıyla, gaz türbinlerinin çeşitli bileşenlerini geliştirmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bir gaz türbininde verimliliği önemli ölçüde etkileyen ve enerji üretiminin önemli bir kısmına katkıda bulunan kritik bileşenlerden biri yanma odasıdır. Yanma odası çapraz akışlı jetin gerçekleşmesine güzel bir örnektir. Bunu yanma odası astarındaki delikler aracılığıyla gerçekleştirir. Hava kompresör kanatlarının üzerinden akarken astara doğru yönlendirilir ve astardaki deliklerden yanma odasına doğru jet akışı şeklinde ilerler. Jet akışı ile bileşenlerin yüksek sıcaklık dolayısıyla zarar görmesinin önlenmesi ve yanma odasında homojen bir karışım sağlayarak verim arttırılmasında önemli avantajlar sağlar. Araştırmacılar yanma odalarının iyileştirilmesine yönelik birçok çalışma gerçekleştirmiştir. [1-3]. Ayrıca içten yanmalı motorlarda etkili yakıt-hava karışımı oluşumu için kullanılırlar. Etkili yakıt hava karışımı hem emisyonların azaltılması hem de yanma verimliliğinin arttırılarak enerji verimliliği ve çevre üzerinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Yanma odasındaki yakıt manifoltundan gelen yakıt çapraz akışa maruz kalır. Bu düzenleme, yanma odasındaki aşırı sıcaklık ve basınç değişimlerine karşı koruma sağlar. Astar delikleri gaz akışını yönlendirir ve yanma odasındaki hava-yakıt karışımını optimize eder. Literatürde çapraz akışta jet akışı konusuna ilişkin çok sayıda çalışma bulunmaktadır [4-7]. Çapraz akışta jet akışının uygulamalarından biri de roket motorlarında yakıt ve oksitleyici karışımının kontrolünde kullanılarak itki gücünün ve yanma verimliliğinin arttırılmasıdır. Çapraz akışta jet konusu aynı zamanda reaksiyona giren akış bağlamında da araştırılmaktadır. Özellikle çeşitli kimyasal reaksiyonlarda kullanılan maddelerin homojen bir şekilde karıştırılarak hem reaksiyon verimliliğini hem de ürün kalitesini arttırmak için uygulanmaktadır. Isı transferi uygulamalarında da

önemli bir yere sahip olup önemli bir ısıl iyileştirme yöntemidir. Böylece farklı jet hızlarının, şekillerinin ve konfigürasyonlarının kimyasal reaksiyonlar nedeniyle karıştırma kalitesini nasıl etkilediğinin araştırılmasına bu konuya olan ilgiyi arttırmaktadır [8-10].

Jet akışın özellikle elektronik bileşenlerin soğutulması ve ısı transferi optimizasyonunda önemli bir uygulama alanı bulunmaktadır. Elektronik bileşenlerin ömrü ve performansı etkili bir termal yönetime bağlıdır. Jet soğutma bu kapsamda kullanılarak ısı üretimi yüksek bileşenin istenen sıcaklık değerlerinde stabil çalışması için oldukça uygun bir yaklaşımdır. [11-13].

Jet genellikle yüksek bir hız ve basınca sahip olup çeşitli dizilimlere sahip delikler aracılığıyla farklı yönde hareket halindeki akışa enjekte edilmektedir. Çapraz akışta jet akışı, jet akışının bir delikten çıktığında ve delik boyunca akan çevredeki akış etkileşime girdiğinde meydana gelir. Şekil 1.1'de çapraz akış ile etkileşime giren bir jet akışının yapısı görülmektedir. $U_\infty$, çapraz akış yönündeki hızı ve $U_j$, jet akış yönünü temsil etmektedir.




**Şekil 1.1** Çapraz akışta gerçekleşen jet akışının yapısı [1]

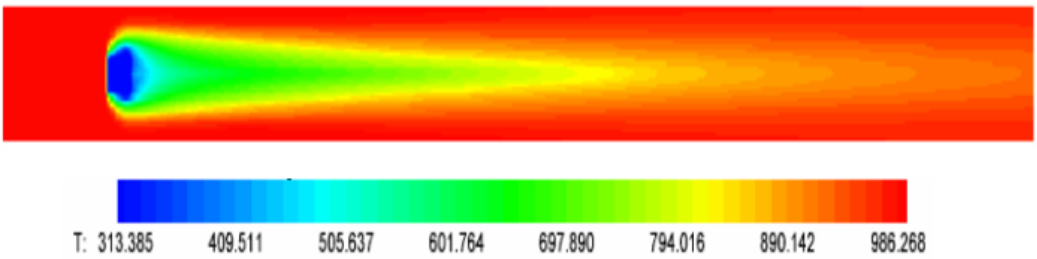
Jet akışı çıktığı şekle, hıza ve akışkana bağlı olarak karakteristik bir yörüngeye sahiptir. Jet ve çapraz akışın etkileşimi gerçekleştiğinde karışımın etkisiyle kaotik bir ortam oluşur ve ters yönde dönen girdap oluşturur.

Bu durumda artan etkileşim ve türbülanslar dolayısıyla çapraz akışın ve jet akışının birbirine karışması sağlanır. Jetler çeşitli uygulamalara göre basit bir boru veya kanal içindeki sıcak bir gaz akışına soğuk gaz enjektesi ile komponentlerin soğutulması amacıyla tek delik uygulamasında kullanılabileceği gibi gaz türbinlerindeki yanma odalarında kullanılan şekliyle çok delikli olarak da kullanılabilir.

Srinivasan vd. 1980'li yıllardan günümüze çapraz akışta jet akışı konusunda deney ve analizler yaparak literatüre önemli bir katkı sağlamıştır. Üç farklı koşul için çapraz akışta jet akışını araştırmışlardır. Bu çalışmalardaki kullandıkları parametreler; jetlerin dizilim düzeni, jet çapı, jet nozul şekli, jetten jete olan mesafe ve jet hızı. Aşama I'de [14], bir dizi jetin çapraz akışla karıştırılması üzerindeki çeşitli faktörlerin etkisi incelenmiştir. Jet yayılma hızının yüksek momentum oranlarıyla, jet çapının büyümesi ve jetler arası mesafenin azalması ile yükseldiğini ve jet çapının küçülmesi ile jetler arasındaki mesafenin artmasıyla da yayılma hızının düştüğünü belirtmişlerdir. Ek olarak jet karıştırma bölgesindeki sıcaklık dağılımları ile ilgili modeller tespit edilmiştir. Aşama II'de [15], çapraz akışta karşılıklı jetlerinin ısıl performansa etkisi incelenmiştir. Jet girişi iki taraflı olunca jetin nüfuz etmesi, tek taraflı jetlere göre daha az olduğu bulunmuştur. Diğer yandan jet yayılma oranları, tek taraflı jetlere kıyasla iki taraflı jetlerin olduğu durumdan daha hızlı olduğu belirtilmiştir. Aşama III'te [16], kavisli, blöf ve açılı yuvalar dahil olmak üzere farklı şekil ve jet dizilimlerine sahip ayrı yuvaları dikkate alarak çapraz akışta tek taraflı jet akışı araştırılmıştır. Kavisli ve blöf deliklerin jet penetrasyonları ve karışım özelliklerinin, sabit bir momentum akısı oranında, kanal yüksekliğine göre bitişik delikler arasında aynı mesafeye sahip eşdeğer alanlı dairesel deliklerinkine benzer olduğu saptanmıştır. Ancak 45 derecelik yuvalar için jet nüfuzu ve karışım oranları, eşdeğer alanlı dairesel deliklerle, kavisli veya blöf yuvalarıyla karşılaştırıldığında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

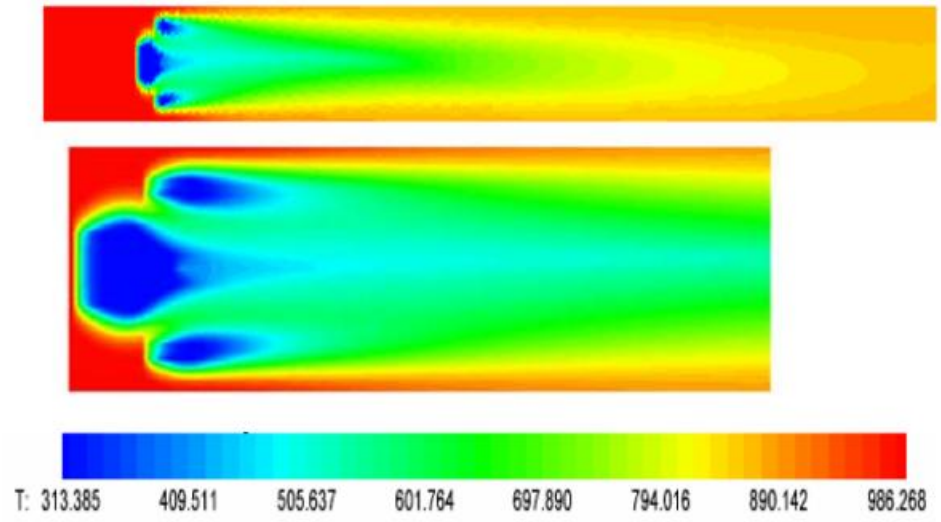
Çapraz akıştaki jet çeşitli senaryolarda incelenebilir. Film soğutma ve ısı transferi alanında çok sayıda araştırmacı çalışmalar yürütmüştür [17-21]. Javadi vd. [22] film soğutma etkinliğini ve tekdüzeliğini arttırmak için yeni bir yaklaşım geliştirdiler.

Bu durumu soğutucu jetin arkasındaki iz bölgelerini kontrol ederek ve birleşik jetler kullanarak sıcak akış ile soğuk akışlar arasındaki karışım gücünü azaltarak başardılar. Şekil 1.2'de gösterilen tek bir büyük deliğe sahip akış hacmi üzerinden iyileştirme yapmak istemişlerdir.




**Şekil 1.2** Tek delikli bir çapraz akışın gerçekleştiği durumdaki sıcaklık dağılımı [22]

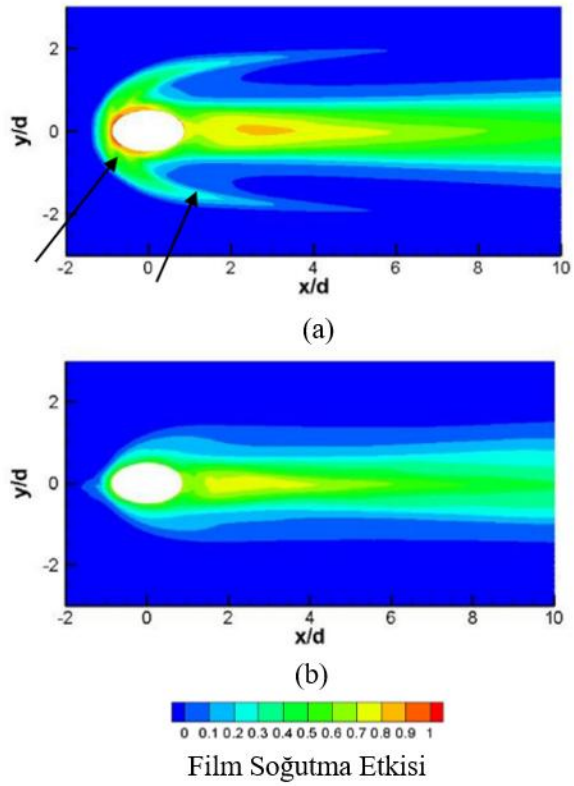
Yaklaşımları, bir ana soğutma jeti ve ana jetin yukarısı ile aşağısında iki ilave küçük soğutma jeti içeren yeni bir sistemi içermektedir. Bu konfigürasyon, sıcak ve soğuk akışlar arasındaki etkileşimi ve karışımı etkili bir şekilde kontrol etmektedir. Konfigürasyonun uygulandığı model Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Sonuçlar, birleşik jetlerin film soğutması olarak adlandırılan bu yeni yaklaşımın kullanılmasıyla film soğutma etkinliğinde %50'nin üzerinde önemli bir gelişme olduğunu göstermiştir.




**Şekil 1.3** Büyük deliklerin yanına küçük delikler açılarak iyileştirilen modelin sıcaklık dağılımı [22]

Zhong vd. [23], çapraz akışta eğimli jetlerin ısı transfer katsayısını araştırmak için Büyük Girdap Simülasyonu (LES) kullanılarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Jet,

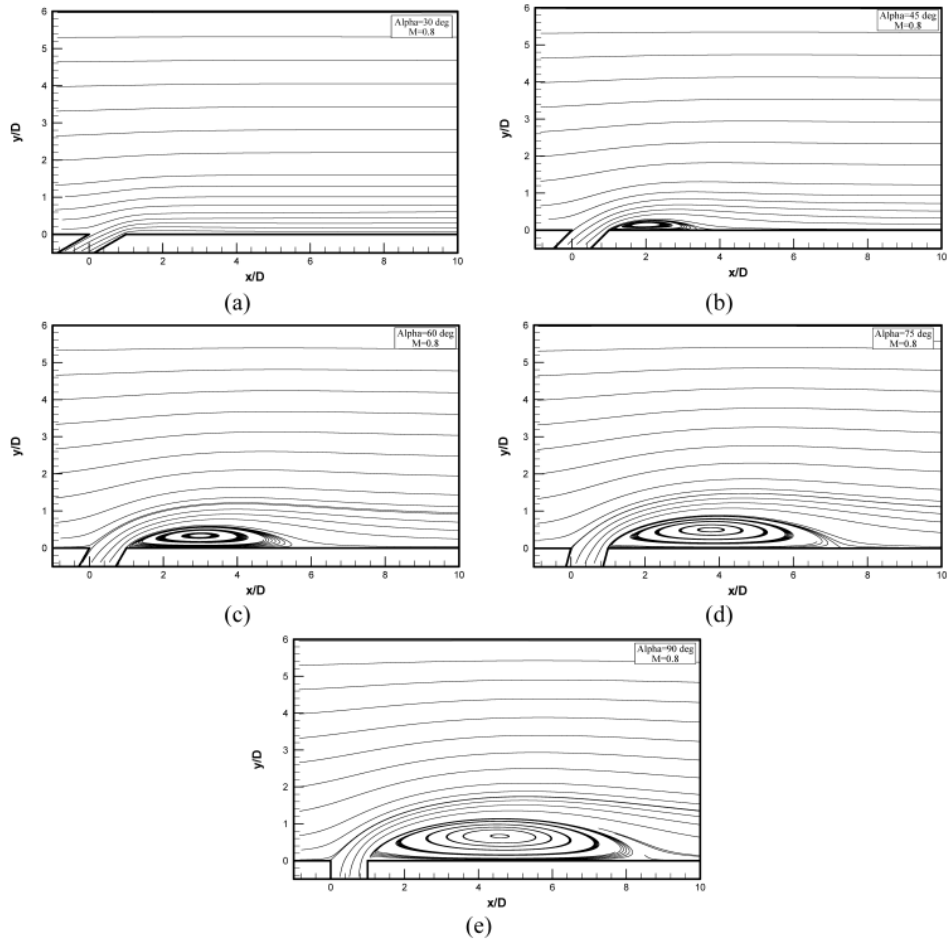
ana akış yönüne doğru 35 derece açı ile konumlandırılmıştır. Araştırmacılar türbülans ve laminer sınır tabakayı araştırmak istemişlerdir. Laminer yaklaşan bir sınır tabakasıyla, soğutma deliğinin çıkışının yakınında tutarlı girdaplar gelişmektedir. Daha sonra ana akışın benzer hızında aşağı yönde taşıdığını gözlemlemişlerdir. Türbülanslı bir sınır tabakanın da soğutucu ve ana akışın karışmasını arttırdığını buldular. Soğutma deliğinin akışındaki soğutma etkinliği, türbülanslı yaklaşan sınır tabakası durumunda çok daha düşük olduğunu çünkü soğutma deliğinin üst akışındaki devridaim bölgesiyle daha az soğutucu karıştığını gözlemlediler. Şekil 1.4'te laminer ve türbülans modellerdeki film soğutma etkinliği gösterilmektedir.




**Şekil 1.4** Film soğutma etkinliği laminar (a) ve türbülans (b) sınır tabaka [23]

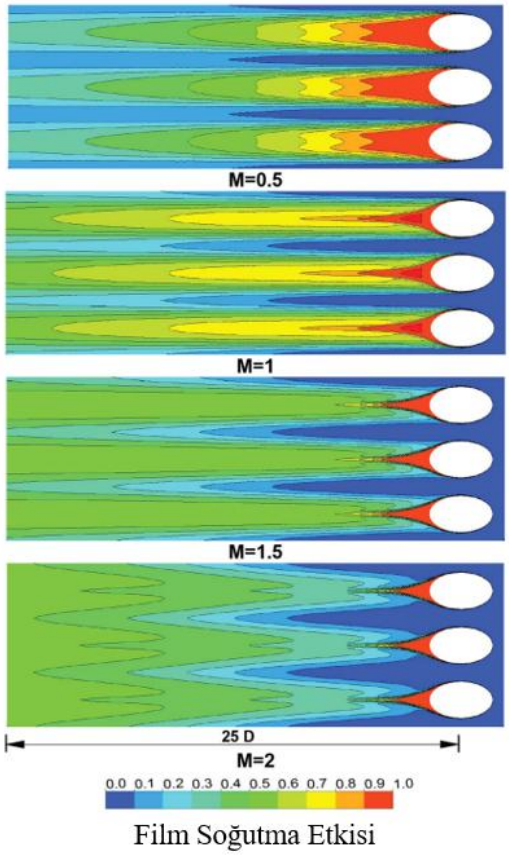
Bayraktar vd. [24], dört farklı üfleme oranına sahip sıcak çapraz akışa beş farklı açıyla enjekte edilen soğuk enine jetin termal ve akış özelliklerini araştırmaktadır. Artan jet enjeksiyon açılarında, soğutucu enjeksiyonu, gelen sıcak akışkanın duvar üzerinden yayılmasını engelleyen bir tabaka haline gelir ve film soğutma etkinliğinde önemli bir artışa yol açtığı gözlemlenmiştir.

Maksimum soğutma verimliliğine 30 derecelik açı ve 0,8 üfleme oranında ulaşılabileceği bulunmuştur. Bu konfigürasyonda en iyi sonuç vermesinin nedeni Şekil 1.5'te görüldüğü üzere 30° açılı ile jet girdiğinde geriye sirkülasyonun görülmediğinden kaynaklandığı ifade edilmiştir.




**Şekil 1.5** $\alpha$ değerleri (a) 30°, (b) 45°, (c) 60°, (d) 75° ve (e) 90° için ters akış bölgesinin gösterilmesi [24]

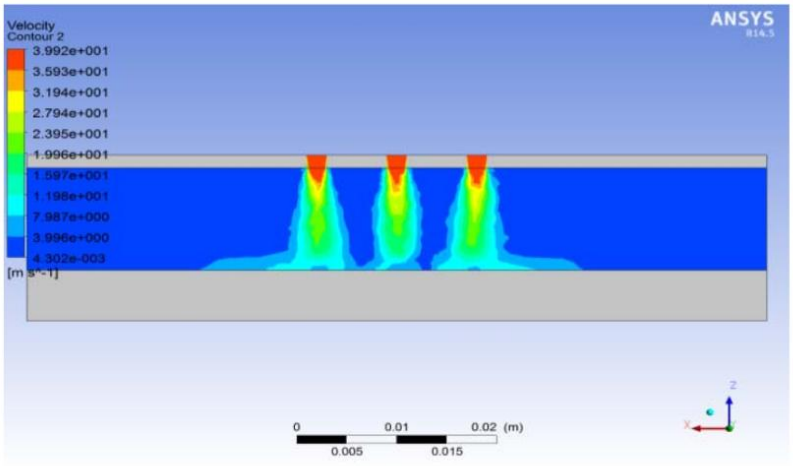
Abdala vd. [25], halka şeklindeki bir jet deliğinde jet hızının film soğutma performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için dört farklı kütlesel debi ile analizler gerçekleştirdiler. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi jet hızı arttıkça soğutma etkisinin arttığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, halka film deliğinin dikdörtgen ve dairesel deliklerine kıyasla yüksek film soğutma verimliliği, düşük ısı transfer katsayısı ve daha yüksek net ısı akısı azaltımı sağladığını göstermektedir. Spesifik olarak, halka şeklindeki film deliğinin ortalama film soğutma verimi, dikdörtgen ve dairesel film deliklerine kıyasla sırasıyla %106 ve %328,5 arttığını belirtmişlerdir.




**Şekil 1.6** Momentum akı oranının artmasıyla film soğutma etkisinin dağılımı [25]

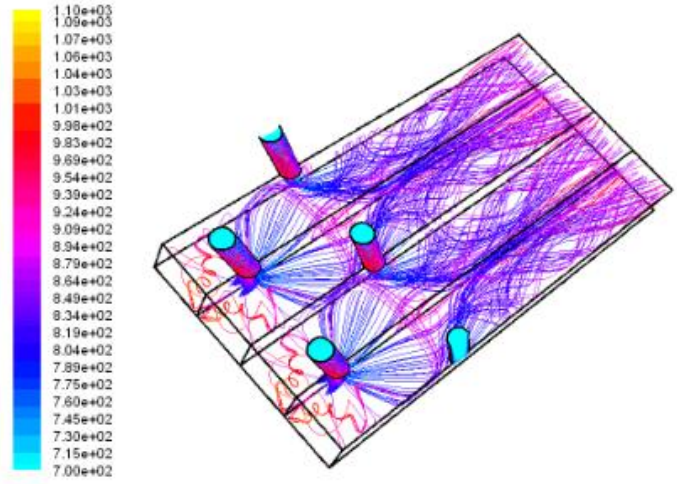
Sharif vd. [26] jet çarpması nedeniyle hareketli bir izotermal sıcak plakadan konvektif ısı transferini sayısal olarak araştırmışlardır. Dikdörtgen akış geometrisi, hareketli çarpma yüzeyine paralel olarak yerleştirilen sınırlayıcı bir adyabatik duvar içerir. Jet, bu sınırlayıcı duvarın ortasında konumlandırılmıştır. Çalışmada jet çıkışlarında farklı Reynolds sayısı, plaka hızı ve ayrılma mesafesi dikkate alınmıştır. Analiz, ortalama Nusselt sayısının hem jet çıkışı Reynolds sayısı hem de plaka hızıyla önemli ölçüde arttığını belirttiler. Bununla birlikte, ortalama yüzey sürtünme katsayısı Reynolds sayısına nispeten duyarsız olduğunu ancak plaka hızıyla birlikte belirgin şekilde arttığını gözlemlediler. Çalışkan vd. [27], jet geometrisinin akış ve ısı transferi özellikleri üzerindeki etkisini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada farklı en boy oranlarına sahip eliptik ve dikdörtgen şekillerde jet şekilleri dikkate alınmıştır. Çalışmalarında farklı jet Reynolds sayılarını ve jet ile ulaşması istenen hedef mesafelerini araştırdılar. Çarpışma bölgelerindeki eliptik jetler için Nusselt sayılarının dairesel jetlere göre daha büyük olduğunu gözlemlediler.

Leena vd. [28], sabit bir düz bakır plakaya çarpan çoklu hava jetlerinin ısı transfer özelliklerini incelemek için yürütülen deneysel ve sayısal araştırmalar üzerinde çalışmışlardır. Bu düzenekte alttan ısıtılan bir bakır plaka, bir çipi simüle ederek ısı transfer yüzeyi görevi görmektedir. Jet-plaka mesafesi, jet çapının katlarında değiştirilmiştir. Çalışmada Reynolds sayısının ve jet ile diğer jet mesafesinin ısı transferi özellikleri üzerindeki etkileri sayısal simülasyonlar yoluyla incelenmiştir. Optimum soğutmanın jet-plaka aralığı jet çapının 6 katı olduğunda gerçekleştiğini bulmuşlardır. Nusselt sayısı için Reynolds sayısına göre bir korelasyon sunulmuş ve bu korelasyon soğutma ortamı olarak hava için de geçerli olduğunu vurgulamışlardır. Şekil 1.7'de jetten akışının soğutması gerçekleştirilen parçaya çarptırılmasıyla oluşan hız dağılımı gösterilmektedir.

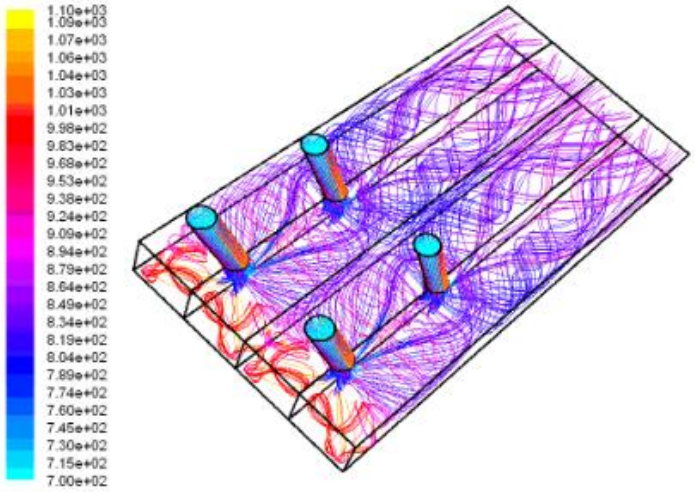



**Şekil 1.7** Jet akışının soğutulması gereken parçaya çarpması ile oluşan hız dağılımı [28]

Zu vd. [29], farklı jet dizilimleri ve giriş açılarına sahip çoklu jetler altında akışı ve ısı transferi simüle edip, incelemişlerdir. Özellikle, soğutma delikleri yakınındaki alan ortalamalı Nusselt sayısı giriş açısıyla birlikte arttığını ve 90 derecelik jetlerin en yüksek Nusselt sayılarını sağladığını bulmuşlardır. Ayrıca, kademeli jet dizilimde, sıralı jetlere göre daha yüksek alan ortalamalı Nusselt sayıları sergilediğini buldular. Şekil 1.8'de kademeli ve sıralı jetlerin olduğu durumdaki akış çizgileri gösterilmiştir.




(a)

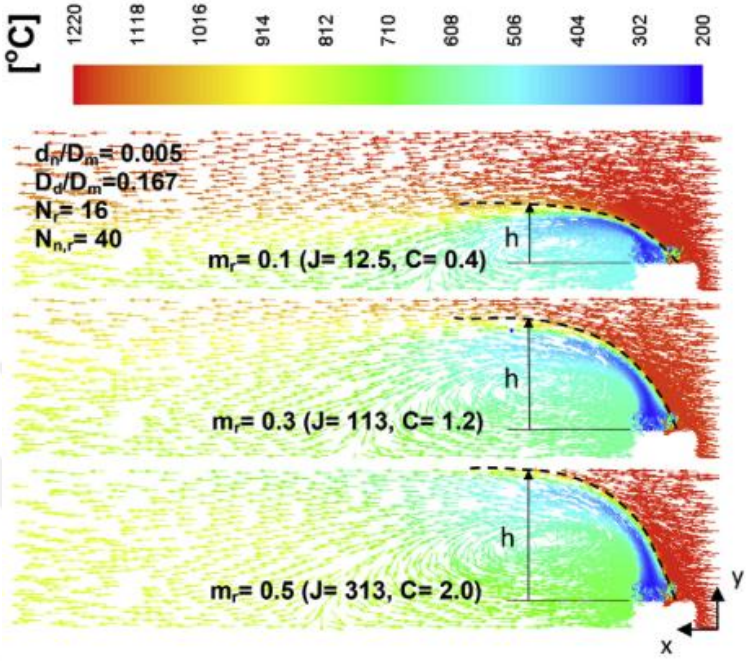



(b)

**Şekil 1.8** Kademeli (a) ve sıralı (b) dizilim gösteren jetlerin gösterdiği akış çizgileri [29]

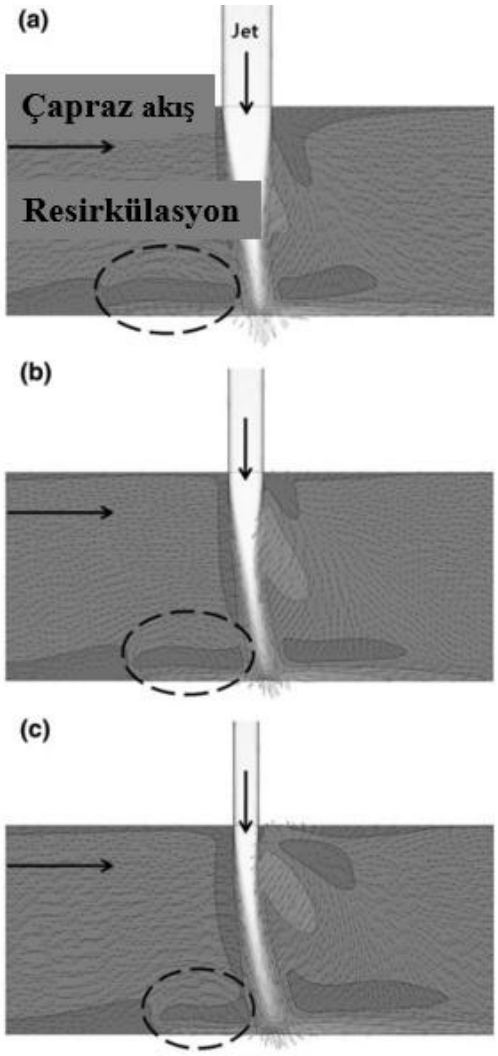
Nada vd. [30], silindirik bir oda içindeki reaksiyona girmeyen ısıtılmış bir çapraz akışa merkez hattındaki çok sıralı bir difüzörden dışarı doğru enjekte edilen soğutucu radyal jetlerin akış ve karışım özellikleri üzerine bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) parametrik çalışması yürütmüşlerdir. Jet karışım oranı, jet çapı, difüzör çapı, sıra başına jet sayısı, jet sıra sayısı gibi parametrelerin etkilerini araştırmışlardır. Temel bulguları arasında jet çapı, difüzör çapı ve jet karışım oranının, jet sayısı ve sırasının etkileriyle karşılaştırıldığında penetrasyon derinliğini ve karıştırma kalitesini önemli ölçüde etkilediğini bulunmuşlardır.

Spesifik olarak, jet karıştırma oranının 0,1'den 0,5'e artmasıyla akış yönündeki penetrasyon derinliği, jet difüzör çıkışı ve oda çıkışının merkez hattındaki karıştırma kalitesi sırasıyla yaklaşık %46 ve %49 arttırdığını gözlemlediler. Şekil 1.9'da karışma oranı arttıkça jet penetrasyonunun artması gösterilmektedir.



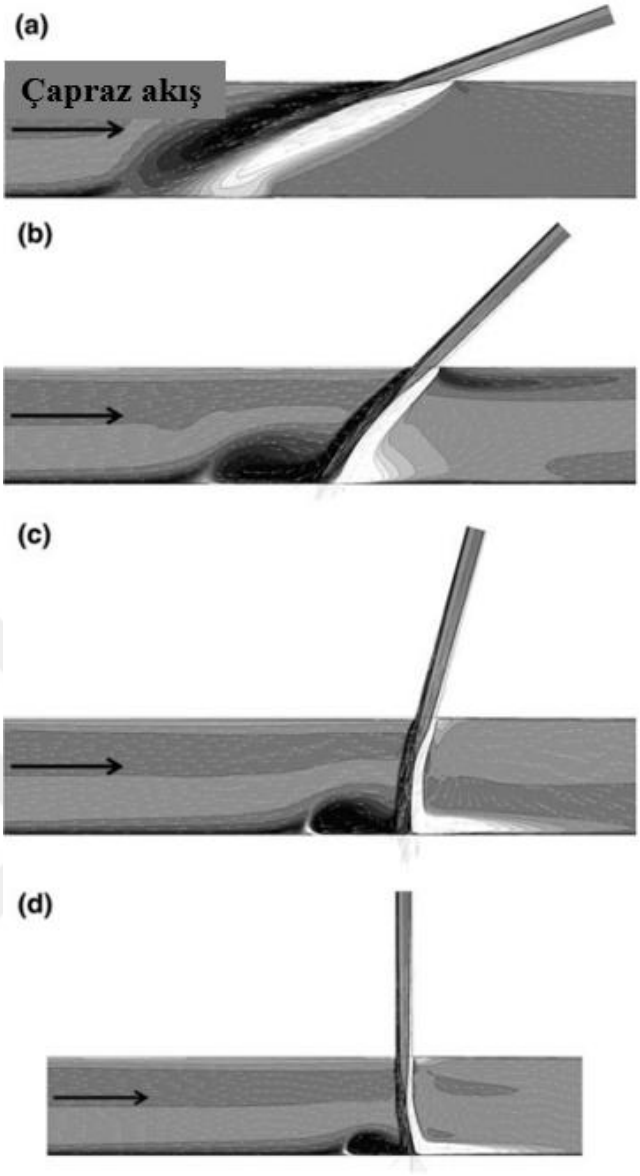

**Şekil 1.9** Karışma oranının artmasıyla penetrasyondaki değişim [30]

Heo vd. [31], tek jetin çapraz akışta gerçekleştirilmesiyle ısı transferini artırmak için parametrik çalışma ve optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Jet şekli olarak eliptik şekilli jet kullanılmış ve deliğinin en-boy oranı ile jet nozulunun eğim açısı olacak şekilde iki tasarım değişkeni belirlenmiştir. Tasarım değişikliklerinin ısı transfer performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuç olarak, jet deliğinin en-boy oranı yerine jet nozulunun eğim açısının daha önemli olduğu belirlenmiştir. Şekil 1.10'da jet ve çapraz akışın etkileşimi meydana gelen sirkülasyon akışının boyutunun en boy oranı azaldıkça küçüldüğü gözlemlenebilmektedir.



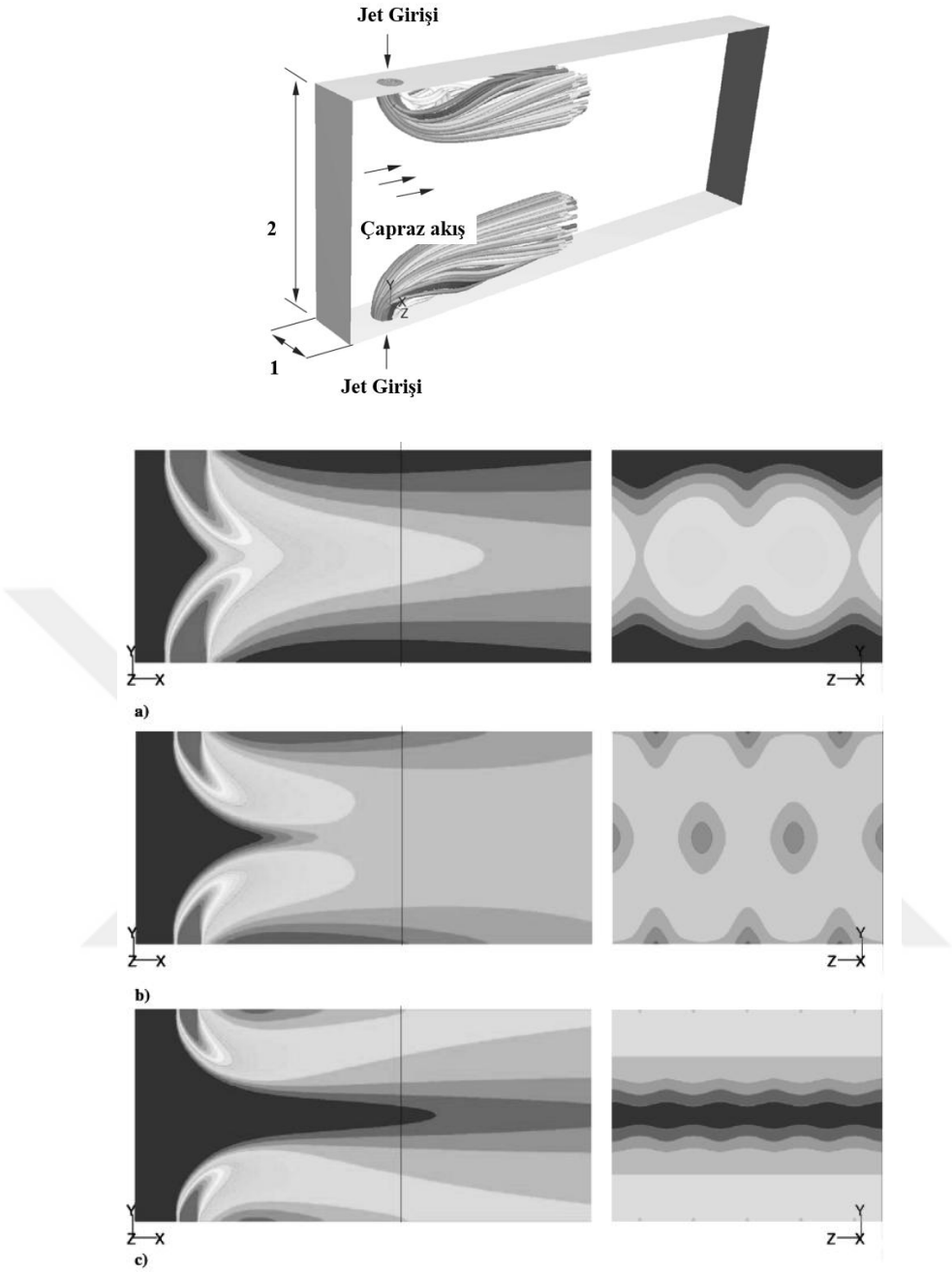

**Şekil 1.10** En boy oranı 2 (a), 1 (b) ve 0,5 (c) olduğunda oluşan akış vektörleri [31]

Şekil 1.11'de jet nozuluna eğim verildiğinde çapraz akış ile etkileşimi ile ortaya çıkan akış vektörleri gösterilmektedir. Çapraz akış yönünde 20° açı verildiğinde çapraz akış ile jet akışı arasındaki fazla karışımdan dolayı jet akışı hedef plakaya yeterince ulaşamadığını gözlemlediler. Bu nedenle de soğutmak için hedeflenen plaka yeterince jet etkisini görememektedir. Maksimum ısı transfer performansı açı 45° olduğunda görülmektedir. Açı 75° ile 90° arasında olduğu zaman Nusselt sayısında önemli bir değişiklik görülmediği de belirtilmiştir. Yapılan analizlerle üfleme oranı 7,98 için optimum şeklin en boy oranı ve eğim açısı sırasıyla 0,586 ve 50,24 derece olarak bulunmuştur.




**Şekil 1.11** Jet nozulunun çapraz akış yönünde 20° (a), 45° (b), 75° (c), 90° (d) açı ile eğimli olduğunda oluşan akış vektörleri [31]

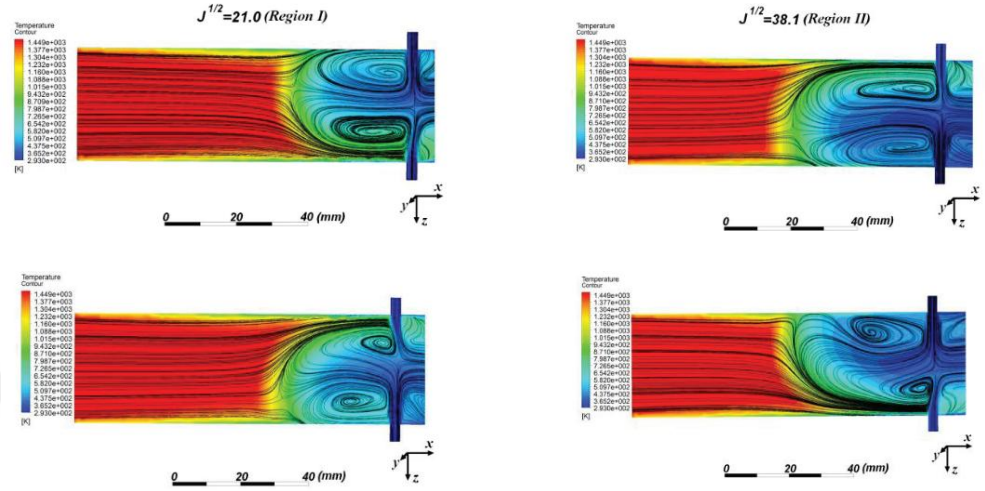
Morris vd. [32] çapraz akışta karşılıklı jetlerin karıştırma etkinliğini araştırmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve matematiksel optimizasyon kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sabit bir orifis-ana akış alanı oranında ve momentum akı oranında jet deliği boyutu ve karşılıklı jetler arasındaki mesafedeki değişikliklerin, karıştırma etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlediler. Şekil 1.12'de karşılıklı jet deliğinin büyüklüğü ve delikleri arasında farklı mesafelerin olduğu durumlardaki sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Yakın aralıklı küçük delikler ile daha geniş aralıklı daha büyük delikler için oluşan durumlarda en yüksek derecede karıştırma sağlandığı bulunmuştur.




**Şekil 1.12** Jet deliğinin jetler arasındaki mesafe ye oranı, 1 (a), 0,335 (b) ve 0,25 (c) olduğu durumdaki sıcaklık dağılımları [32]

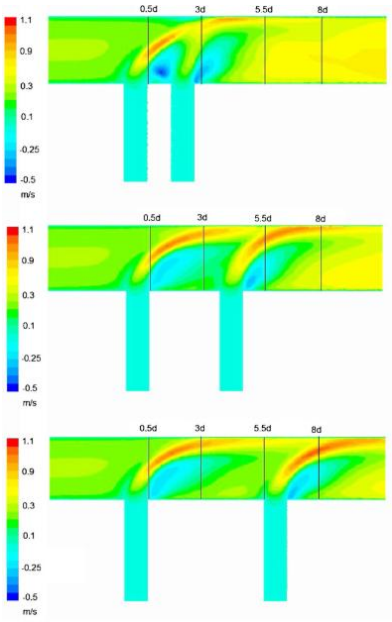
Kartaev vd. [33], yüksek sıcaklıkta sınırlı bir çapraz akışa radyal olarak enjekte edilen birden fazla yuvarlak jetin çarpışmasından kaynaklanan, geliştirilmiş bir karşı akışlı jetin nihai yukarı akış penetrasyonu üzerinde deneysel ve sayısal araştırmalar gerçekleştirmiştir.

Çalışma, momentum akı oranındaki bir artışın, yukarı akış sirkülasyon akış bölgesinde karışımı teşvik ettiğini ve genel karıştırma performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Momentum akı oranındaki artışın yarattığı girdaplar Şekil 1.13'te gösterilmektedir.




**Şekil 1.13** Momentum akı oranının 21'den (a) 38,1'e (b) yükselmesi ile oluşan girdaplar [33]

Naik-Nimbalkar vd. [34] çapraz akışlı tandem ikiz jetlerde termal karışımın deneysel bir çalışmasını ve sayısal hesaplamasını incelemişlerdir. Çalışma, farklı hız oranları için jet aralığının etkilerini içermektedir. Spesifik olarak, jet aralığı jet çapının iki katına eşit olduğunda her iki jetin de birbirini önemli ölçüde etkilediğini buldular. Ancak jet aralığının artmasının jetler arasındaki karşılıklı etkiyi azalttığını da gözlemlediler. Şekil 1.14'te jetler arasındaki mesafenin artması ile jetlerin birbiri arasında nasıl daha az etkilendiği gösterilmiştir.




**Şekil 1.14** Jetler arasındaki mesafe artırılarak yapılan analizin hız dağılımı

## 1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, çapraz akış içerisinde farklı jet geometrileri ve yerleşimlerinin akış karışım performansı üzerindeki etkilerini incelemektir. Jet akışları, özellikle yanma sistemleri ve soğutma uygulamalarında, akış karışımını artırarak sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Literatürde, jet akışlarının karışım etkinliği ve penetrasyon özelliklerinin sistem verimliliği açısından kritik bir rol oynadığı gösterilmiştir. Jetin ana akışla etkileşimi, sistem performansı ve verimliliğini belirlemede önemli bir faktördür. Bu bağlamda, çalışmada farklı jet çıkış geometrileri (daire, kare, üçgen ve beşgen) ve jet yönelimlerinin (dikey ve eğimli) çapraz akış ile etkileşimi incelenmektedir. Karışım etkinliği, penetrasyon derinliği, türbülans yoğunluğu ve sıcaklık dağılımı gibi temel akış parametreleri değerlendirilerek en verimli jet geometrisi ve yönelimi belirlenmeye çalışılmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri kullanılarak jet akışlarının çapraz akışa nüfuz etme mekanizması detaylı bir şekilde analiz edilmektedir. Elde edilen sonuçların, yanma sistemleri, soğutma teknolojileri ve enerji sistemleri gibi mühendislik alanlarında daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir tasarımların geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

### 1.3 Hipotez

Bu çalışmada, farklı jet çıkış geometrilerinin (üçgen, beşgen, daire ve kare) ve jet hızlarının, çapraz akışa penetrasyon seviyesi ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisinin belirgin farklılıklar göstereceği hipotez edilmektedir. Özellikle, jet çıkış geometrisinin akış yapısını doğrudan etkileyerek çapraz akışa karışma ve sıcaklık dağılımında önemli değişimlere neden olacağı öngörülmektedir.

Jet çıkış geometrisinin etkisi açısından, üçgen ve beşgen jet çıkışlarının, kare ve daire jet çıkışlarına kıyasla daha düzensiz bir akış yapısı oluşturması beklenmektedir. Bu nedenle, bu jetler çapraz akışa daha derin nüfuz edecek ve sıcaklık dağılımında daha belirgin dalgalanmalara neden olabilmektedir. Öte yandan, kare ve daire jet çıkışlarının daha simetrik bir akış yapısı sağlayarak sıcaklık dağılımını daha homojen hale getireceği düşünülmektedir.

Jet hızının etkisine bakıldığında, artan jet hızının çapraz akışa penetrasyonu artırarak sıcaklık dağılımının daha geniş bir bölgeye yayılmasına yol açacağı tahmin edilmektedir. Buna karşılık, daha düşük jet hızlarında akışın daha hızlı dağılacağı ve çapraz akışa etkisinin azalacağı öngörülmektedir.

Bunun yanı sıra, jetlerin yöneliminin de çapraz akışla etkileşimini doğrudan etkileyerek sıcaklık dağılımı üzerinde belirleyici bir rol oynayacağı düşünülmektedir. Ana akış yönüne eğimli jetlerin, dik jetlere kıyasla çapraz akışla daha iyi karışarak sıcaklık değişimini daha dengeli hale getirmesi beklenmektedir. Buna karşın, ana akışa dik yönlendirilmiş jetlerin daha fazla türbülans yaratarak sıcaklık dalgalanmalarına neden olacağı tahmin edilmektedir.

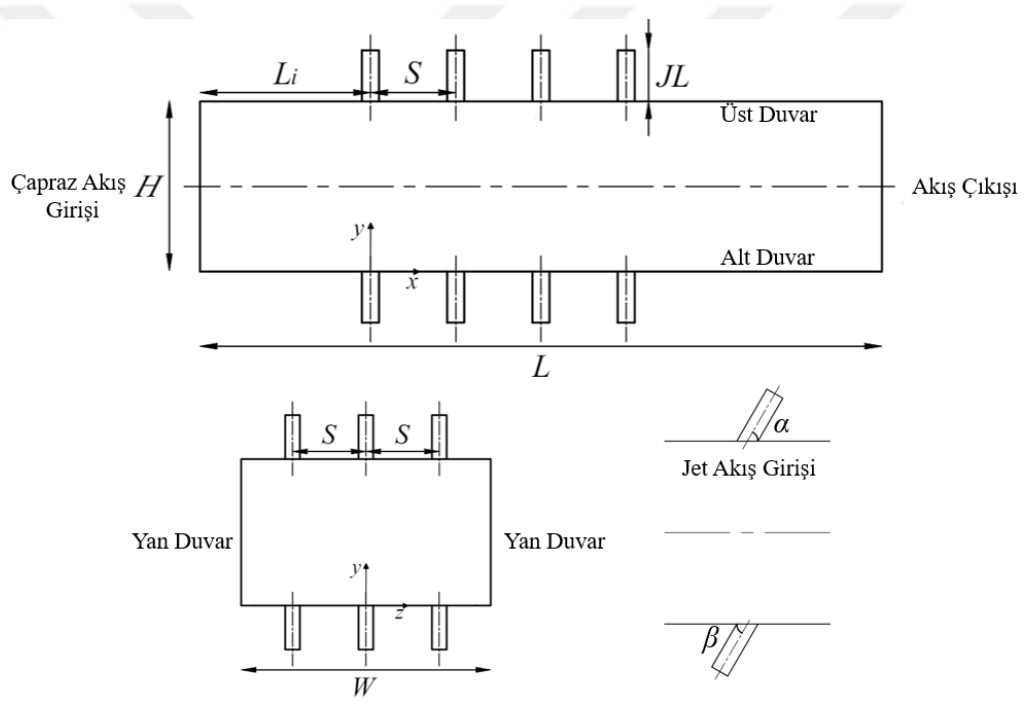
Bu hipotez, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile test edilecek ve literatürde kabul görmüş çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulanacaktır. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin, yanma odası tasarımlarında sıcaklık dağılımını optimize etmek ve yeni tasarımlar için bilimsel bir altyapı oluşturmak amacıyla kullanılması hedeflenmektedir.

# 2

# NÜMERİK HESAPLAMA YAKLAŞIMI

## 2.1 Fiziksel Model

Sonlu elemanlar ve sonlu hacimler metodu ile yapılan analizlerde model hazırlamakta yaygın olarak kullanılan SpaceClaim 2024 yazılımı ile analizin geometri modelleri oluşturulmuştur. Ana alan, karşılaştırma kolaylığı sağladığı için Holdeman vd. [35] alanına benzer yapıda seçilmiştir. HAD analizlerinin yapılacağı ana alanın boyutları Şekil 2.1'de gösterilmektedir ve alanın geometrik özellikleri de Tablo 2.1'de özetlenmektedir.

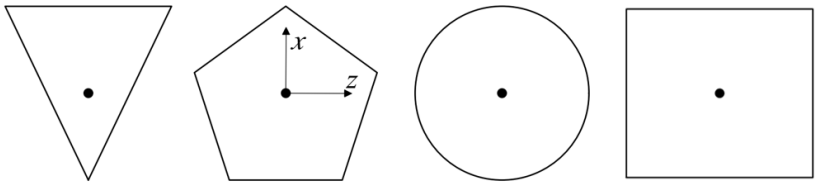



**Şekil 2.1** Akış alanın boyutsal gösterimi

**Tablo 2.1** Akış alanının geometrik özellikleri

| Boyut | $H$ | $L$ | $L_i$ | $S$ | $W$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Uzunluk ($m$) | 0,1 | 0,4 | 0,125 | 0,05 | 0,15 |

Bu çalışmada jet giriş şekilleri olarak üçgen, beşgen, daire ve kare şekilleri kullanılmıştır. Bu şekillerin gösterimi Şekil 2.2'deki gibidir. Farklı şekillerin her bir kenarı, komşu kenarlarına eşittir. Her farklı jet giriş şeklinin alanı yaklaşık 0,000049 $m^2$ olarak belirlenmiştir.




**Şekil 2.2** Jet giriş şekilleri

Tam gelişmiş akışlar için jet giriş uzunluğunun (*JL*, Şekil 2.1) giriş çapının yaklaşık 10 katı olması gerektiği belirtilmektedir [36]. Bu çalışmada *JL* için yaklaşık 0,08 m olması gerekirken ağ eleman sayısını azaltmak için analizde bu değer 0,05 m ve 0,03 m olarak denenmiş ve sonuçlardaki değişimin %1'in altında olduğu görülmüştür. Bu nedenle *JL* için 0,03 m değeriyle analize devam edilmiştir.

## 2.2 Sayısal Model

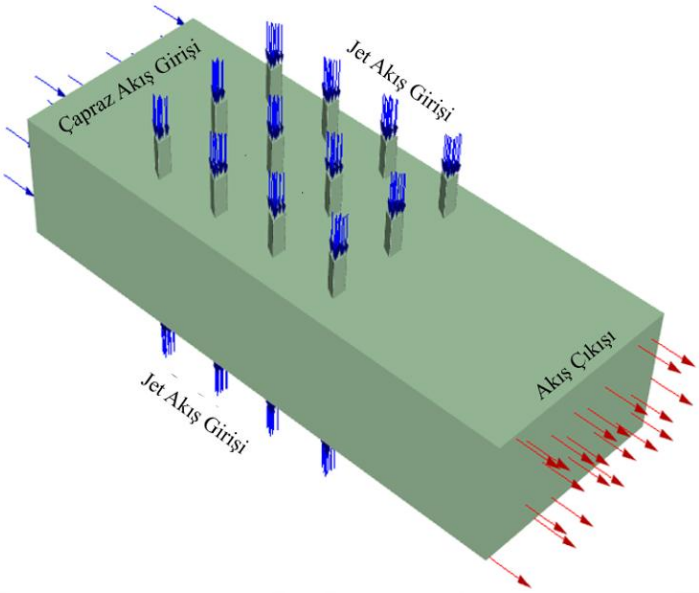
### 2.2.1 Sınır Şartları ve Termal Özellikler

Akışkan olarak sıkıştırılamaz hava seçilmiş ve tüm termal özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değişecek şekilde belirlenmiştir. Jet giriş şekillerinin sıcaklık dağılımına etkisini görebilmek amacıyla jet girişinde farklı hızlar belirlenmiştir. Farklı hızları belirlemek amacıyla çapraz akışta jet akışlarında, penetrasyon gibi global özelliklerden birisi olan momentum akısı oranı kullanılmıştır [3]. Bu amaçla momentum akısı oranı Denklem 2.1'de gösterildiği gibi kullanılmıştır.

$$J = \rho_j V_j^2 / \rho_c V_c^2 \tag{2.1}$$

İki hız giriş sınır koşulu ve bir basınç çıkış sınır koşulu vardır. Giriş sınır koşulları çapraz akış girişi, diğeri ise jet girişi olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada üç farklı momentum akı oranı için HAD analizler yapılmıştır: *J*=4, *J*=8 ve *J*=16. Giriş sınırlarında çapraz akış hızı $V_c$=15 m/s olacak şekilde sabit düzgün profil uygulanmakta olup jet giriş hızı değerleri $V_j$=19,3-44,0 m/s arasında değişmektedir. Her momentum akı oranı için çapraz akış sıcaklığı ($T_c$) ve jet giriş sıcaklığı ($T_j$) sabit tutulmuştur.

Böylece çapraz akış girişi sıcaklığı $T_c$ = 600 K, jet girişi sıcaklığı ise $T_j$ = 300 K olarak belirlendi. Üst duvar, alt duvar ve yan duvarlar için adyabatik ve kaymaz duvar sınır koşulları tanımlanmıştır. Sınır koşullarının akış alanı üzerindeki yerleşimi Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

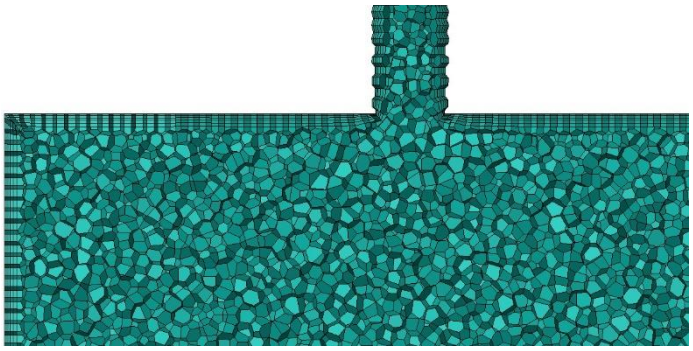



**Şekil 2.3** Sınır koşullarının akış alanın üzerinde gösterilmesi

### 2.2.2 Ağ Yapısı

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kullanılan uygulamalarda ağ oluşturma çok önemli bir yere sahiptir. Kesin, güvenilir ve tutarlı simülasyon sonuçları elde etmek için ağ yapıları titizlikle uygulanmalıdır. Bu çalışmada ağ yapısını oluşturmada için ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Ağ yapısı oluşturma işlemi hem yüzey hem de hacimsel ağ yapısı oluşturulmasını içerir. Her simülasyon senaryosu için polyhedral (çokyüzlü) bir ağ oluşturulmuştur. Polyhedral (çokyüzlü) ağlar, dörtgen veya üçgenlere yapıdaki ağlarla karşılaştırıldığında daha az sayıda düğüm noktasına sahiptir ve bu da daha hızlı hesaplama süreleri sağlamaktadır [37].

Yüzey ağı, minimum 0,00065 *m* ve maksimum 0,002 *m* boyutunda oluşturulmuştur. Sınır tabaka etkileşimlerini daha iyi inceleyebilmek için 5 sıra prizma tipi ağ yapısı ile daha detaylı ince bir hacimsel ağ oluşturulmuştur. Bu prizmaların yüksekliği, 5e-6 *m*'lik başlangıç kalınlığından başlayarak 1,2 oranında olarak artmaktadır. Ek olarak her ağdaki Y+ değeri 1'in altında olduğundan emin olunmuştur. Akışkan alanının hacimsel ağ ayrıntıları Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



**Şekil 2.4** Ana akış hacimsel ağ yapısı gösterimi

Farklı sayılarda ağ yapıları için türbülans etkilerinin daha fazla gözlendiği zorlu durum olan *J*=16'da analizler yapılmış ve yerel minimum toplam sıcaklık sonuçları Tablo 2.2'de gösterilmiştir. M6 ağından sonraki tüm *X/H* değerleri için %0,75'ten daha büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Bu nedenle ileriki analizlerde hesaplama maliyeti göz önünde bulundurularak M6 ağ yapısı ile yapılmıştır.

**Tablo 2.2** X/H=0,25, X/H=0,75, X/H=1,25 ve X/H=1,75 için ağ yapısına göre minimum yerel toplam sıcaklık değerleri

| Ağ Yapısı Adı | Ağ yapısı sayısı | Yerel Minimum Toplam Sıcaklık [*K*] | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *X/H*=0,25 | *X/H*=0,75 | *X/H*=0,125 | *X/H*=0,175 |
| M1 | 957738 | 465 | 438 | 433 | 430 |
| M2 | 1568873 | 459 | 431 | 430 | 426 |
| M3 | 2913409 | 457 | 430 | 422 | 416 |
| M4 | 5559834 | 454 | 429 | 419 | 413 |
| M5 | 6946488 | 450 | 425 | 418 | 412 |
| M6 | 9904487 | 449 | 424 | 418 | 410 |
| M7 | 12627261 | 448 | 422 | 416 | 409 |
| M8 | 17975322 | 446 | 421 | 415 | 408 |

### 2.2.3 HAD Modeli

Kararlı durum RANS (Reynolds Ortalamalı Navier Strokes) denklemleri akışkanlar mekaniğinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu denklemler akışkanın hızı, basıncı ve yoğunluğu gibi özelliklerini tanımlar. Çok sayıda teknik ve bilimsel uygulama bu denklemlerden yararlanmaktadır. Süreklilik (Denklem 2.2), momentum (Denklem 2.3) ve enerjiyi (Denklem 2.4) içeren üç boyutlu sıkıştırılamaz akışlar için geçerli denklemler [38]:

Süreklilik:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.2}$$

Momentum:

$$\frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} + \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[v\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) \tag{2.3}$$

Enerji:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\frac{c_p \mu_t}{Pr_t}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial x_i}\right) + \mu u_i\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)\right] \tag{2.4}$$

Basınca dayalı çözücü tipi, yerçekiminin neden olduğu etkileri göz ardı ederek, sabit sıkıştırılamaz akış koşulları varsayımına dayanması nedeniyle tercih edilmektedir. Türbülans belirleme yöntemleri, jet ve çapraz akış girişinde, türbülans yoğunluğu ve türbülans kinetik enerji için standart ayarlar olan sırasıyla %5 ve %10 değerleri kullanılmıştır. Taşıma ve korunum denklemlerinin ayrıklaştırılması açısından, ikinci dereceden ayrıklaştırma yaklaşımı kullanılmaktadır. Jet çapraz akış fenomeninin araştırılmasında çok sayıda araştırmacı tarafından kullanılan [39-42] ve yaygın olarak benimsenen SIMPLE şeması, seçilen çözüm yaklaşımı olarak basınç-hız eşleşmesini kolaylaştırdığı için yapılan analizlerde tercih edilmiştir.

Enerji denklemi de dâhil olmak üzere tüm değişkenlerin normalize edilmiş kalıntısı $10e^{-5}$'in altında standart değer haline geldiğinde analiz çözümünün yakınsadığı kabul edilmiştir. Kararlı durum koşulu için, duvar yakınındaki akışın viskoz etkilerini analiz etmek üzere geliştirilmiş duvar işleme (Enhanced Wall Treatment) duvar

fonksiyonuna sahip standart k-epsilon türbülans modeli seçilmiştir. Standart k-ε türbülans modeli, türbülans koşulları için ortalama akış özelliklerinin hesaplanmasında çok yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Kısmi diferansiyel denklemler olan iki taşıma denkleminden (Denklem 2.5 ve 2.6) [38] oluşur. Türbülans kinetik enerjisi ($k$) ve onun dağılma hızı (ε) aşağıdaki denklemlerden elde edilmektedir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_k) + C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.6)$$

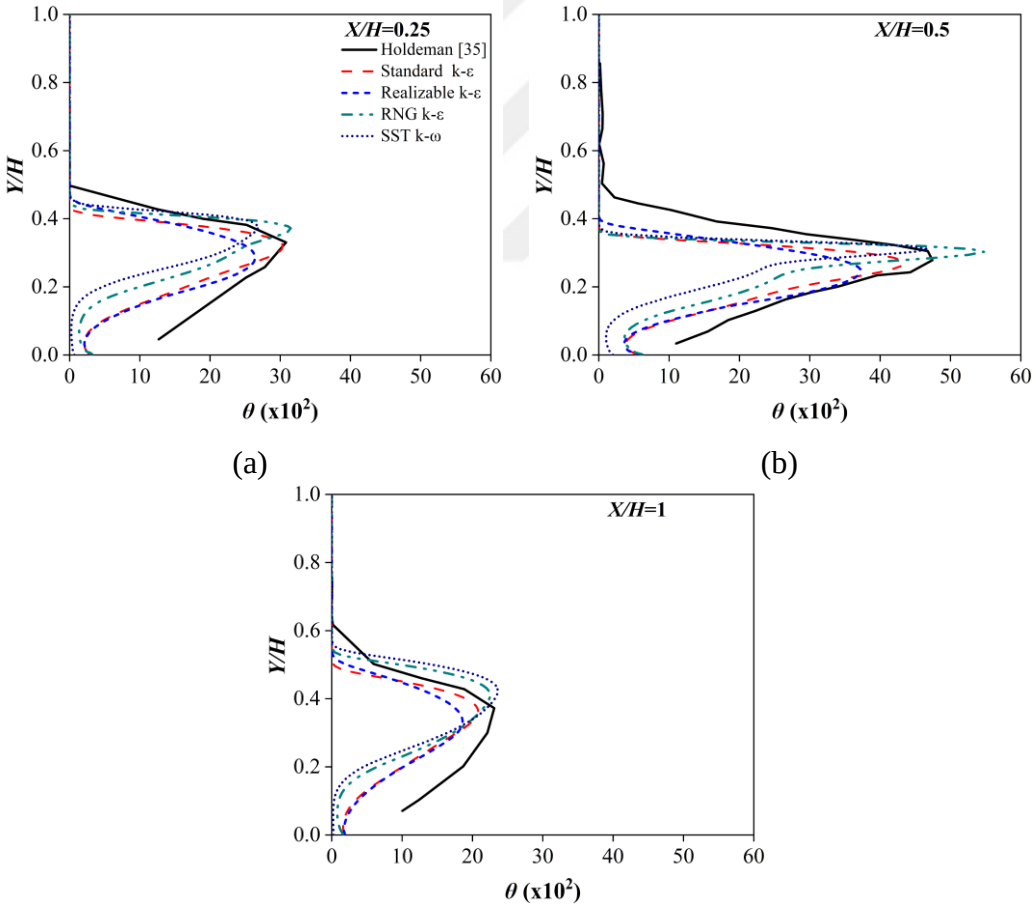
### 2.2.4 Türbülans Modeli Doğrulama Çalışmaları

Mevcut çalışmada analizler ANSYS Fluent (2023) tarafından yapılmıştır. Yazılımlar birçok türbülans modeli sağlamaktadır. Analizin doğruluğunu sağlamak için türbülans modelleri Holdeman vd. [35] deneysel verileriyle karşılaştırıldı. Doğrulama durumunda Holdeman vd. [35] geometrisindeki H/D ve S/D değerleri sırasıyla 4 ve 8 olarak seçilmiştir ve böylece H=0,1016 m, W=0,3048 m olarak belirlenmiştir. Standart k-epsilon, Realizable k-ε, RNG k- ε ve k-ω SST türbülans modelleri, momentum akı oranı ($J$) 6 için analiz edilmiştir. Seçilebilir duvar fonksiyonuna sahip türbülans modelleri için geliştirilmiş duvar işleme (Enhanced Wall Treatment) modeli seçilmiştir. Analizde akışın sabit ve sıkıştırılamaz olduğu kabul edilmiş ve havanın tüm termal özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak ayarlanmıştır. Çözücü seti olarak SIMPLE algoritması ve ikinci dereceden ayrıklaştırma kullanılmıştır.

Analizde *X/H*=0,25, *X/H*=0,5 ve *X/H*=1'de Denklem 2.7'de gösterilen sıcaklık farkı oranı ($\theta$) incelenmiştir. Bu şekilde $\theta$ karşılaştırılarak sıcaklığın ne kadar düşebildiği ve karışım etkisi konusunda yorumlar yapılacaktır.

$$\theta = \frac{T_c - T}{T_c - T_j} \tag{2.7}$$

*X/H*=0,25, *X/H*=0,5 ve *X/H*=1'deki sıcaklık farkı oranı ($\theta$) için analiz sonuçları Şekil 2.5'te gösterilmektedir. En yakın sonuçlar standart k-ε türbülans modeliyle elde edilmiştir. Standart k-ε türbülans modeli ile Holdeman vd. [35] *X/H*= 0,25, 0,5 ve 1'deki $\theta$ değişimini sırasıyla %8, %1, %9 farklarla elde etmemizi sağlamıştır. Bu nedenle bu çalışmada tüm analiz durumları için geliştirilmiş duvar işleme modeli ile standart k-e türbülansı tercih edilmiştir.




**Şekil 2.5** *X/H*=0,25, *X/H*=0,5 ve *X/H*=1'de sıcaklık farkı oranının ($\theta$) yüzdesel karşılaştırılması

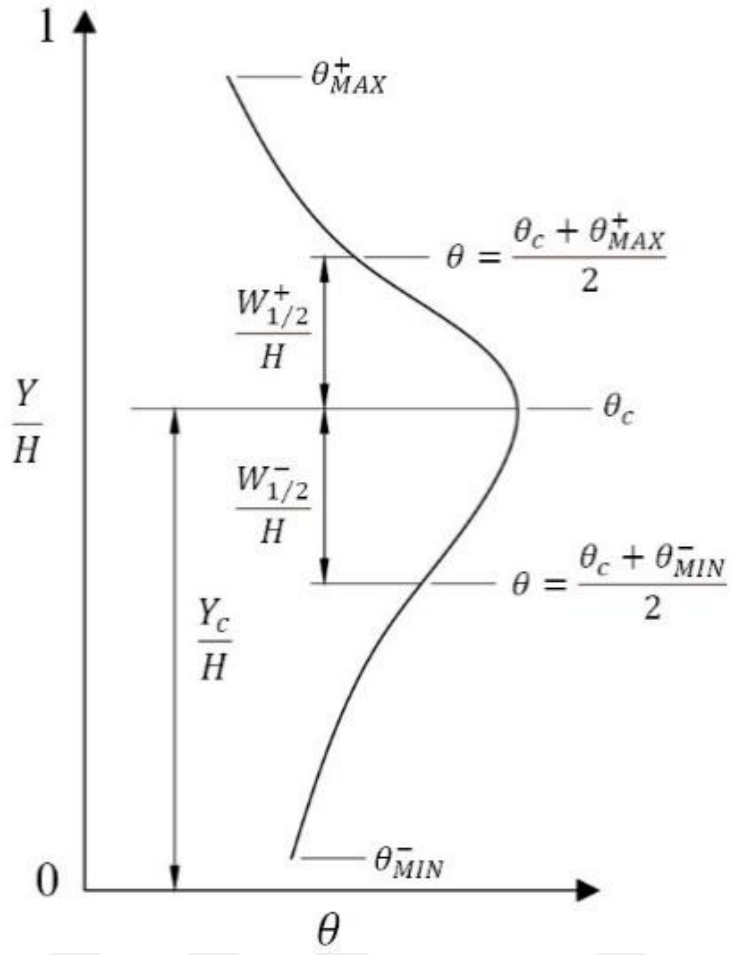
Analiz sonuçlarında farklı bölgelerdeki sıcaklık dağılımları üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçları genelleştirmek adına Denklem 2.8'de gösterilen jetlerin çapraz akış ile birlikte karışması ile meydana gelen karışım sıcaklığı parametresi kullanılacaktır [43]. Böylece bu sonuçlarla analizlerde karışım etkinliğini ve ne kadar sıcaklığın düşürebildiğini sıcaklık dağılımı eğrilerinden bağımsız olarak karşılaştırılabilecektir. Denklem 2.8, *X/H*=0,25 ve *X/H*=1,75'deki *Y-Z* düzlemlerindeki debi ve minimum toplam sıcaklık değerlerinden hesaplanabilmektedir.

$$\bar{\theta} = \frac{m_{X/H=0,25} T_{min,\frac{X}{H}=0,25} + m_{X/H=1,75} T_{min,X/H=1,75}}{m_{X/H=0,25} + m_{X/H=1,75}} \tag{2.8}$$

### 2.2.5 Model ile Analizlerin Doğrulanması

Bu çalışmanın en önemli konularından birisi de çapraz akışta farklı şekilli tandem ve karşılıklı jetten kaynaklanan sıcaklık farkı dağılımının Holdeman vd. [35] tarafından bulunan sıcaklık dağılımı modeli ile de doğrulanmasıdır. İlgili model Denklem 2.9'de sunulmuş olup, akış alanının herhangi bir noktasındaki sıcaklık farkı oranına ilişkin inceleme yapmaya olanak sağlar. Şekil 2.6'da modelde kullanılan standart dikey sıcaklık profilini ölçeklendirme parametrelerini gösteren bir diyagram yer almaktadır.

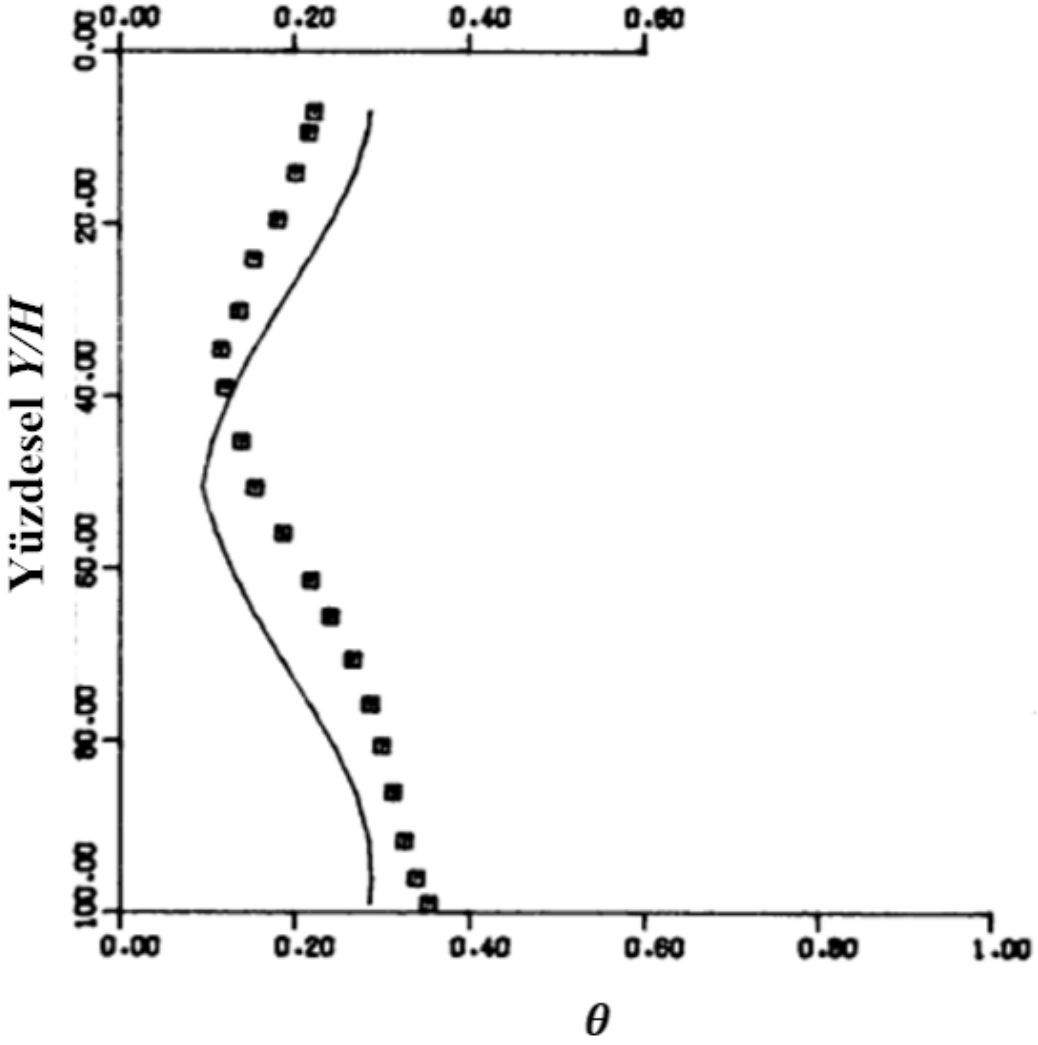
$$\theta = \theta_{min}^{\pm} + \left(\theta_c - \theta_{min}^{\pm}\right) exp\left[ - \ln 2 \left( \frac{Y - Y_c}{W_{1/2}^{\pm}} \right)^2 \right] \tag{2.9}$$




**Şekil 2.6** Ölçeklendirme parametreleriyle standart dikey sıcaklık profilinin şeması [35]

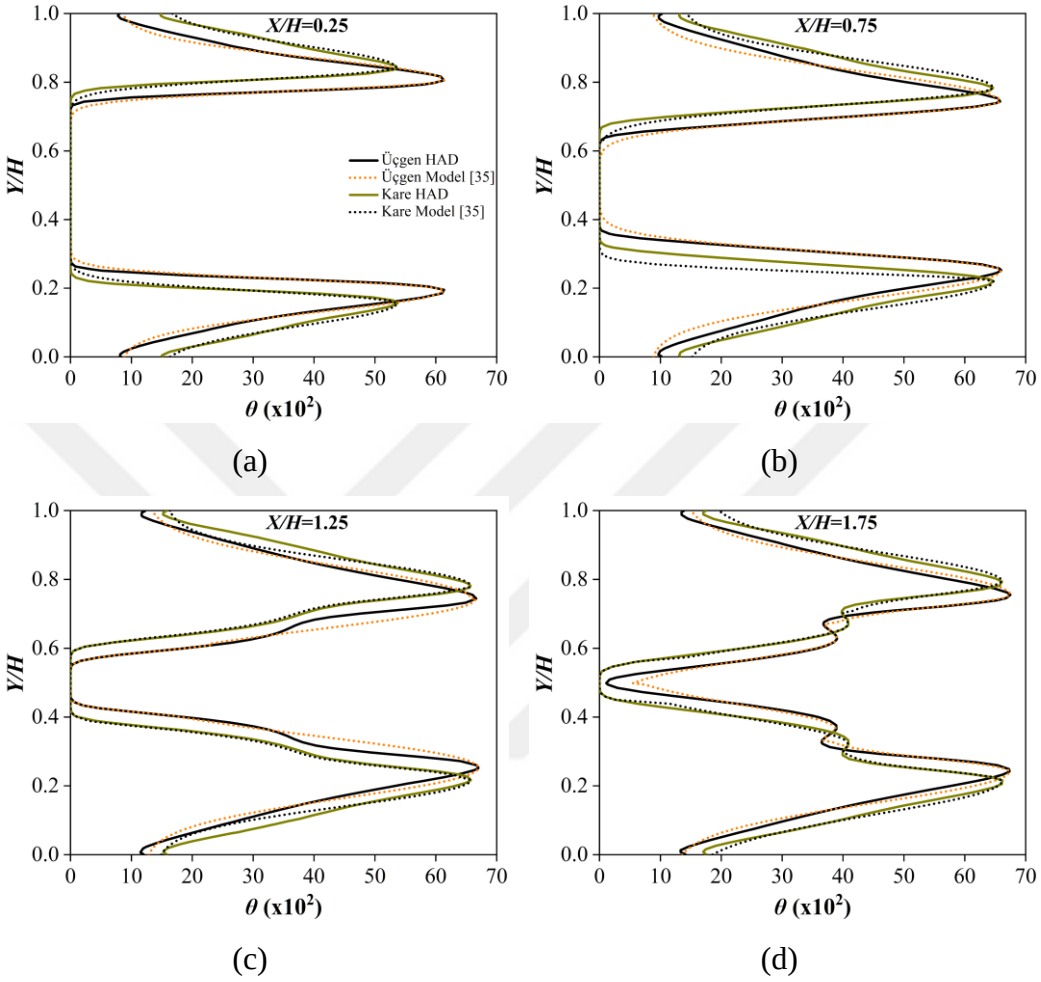
Gerçekleştirilen analizlere Holdeman vd. [35] modeli Denklem 2.9 uygulanmıştır. Örnek olarak Şekil 2.7'de Holdeman vd. [35]'ın kendi deneysel verisi ile karşılaştırmasını gösterilmektedir. Burada da görüleceği üzere İlgili modelin kendi deneysel verileriyle de birebir örtüşmediği görülmektedir. Bu modelin amacı bizlere sıcaklık dağılımının trendini vermesidir. Yapmış olduğumuz HAD analizlerinin sonuçları model sonuçları ile iyi bir şekilde örtüşmektedir. Şekil 2.8-Şekil 2.10 arasında en yüksek ve en düşük, sıcaklık farkı oranı ile penetrasyon derinliği gösteren üçgen ve kare şekilli jetlerdeki $\theta$ dağılımları $J$=4, $J$=8 ve $J$=16 için $\alpha$=90°, $\beta$=90° açılarındaki analiz sonuçları model ile karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekil 2.11-Şekil 2.13 arasında beşgen şekilli jetin $J$=8 için jetlerin eğimlerinin $\alpha$=5°,10°,15° ve $\beta$=5°, 10°, 15° olduğu durumdaki analiz sonuçları ile model karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.14'te ise üçgen şekilli jetin $J$=8'deki jet eğimlerinin $\alpha$=15° ve $\beta$=105° olduğu analiz sonuçları model ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendi-

ğine başlangıç kısmında biraz sapmalar görünmesine rağmen sıcaklık dağılımlarının trendi oldukça benzerlik göstermektedir. Diğer şekillerdeki jetler ve momentum akı oranları ile yapılan analizlerde de $\theta$ dağılımlarının model ile benzer şekilde eşleştiği görülmüştür.



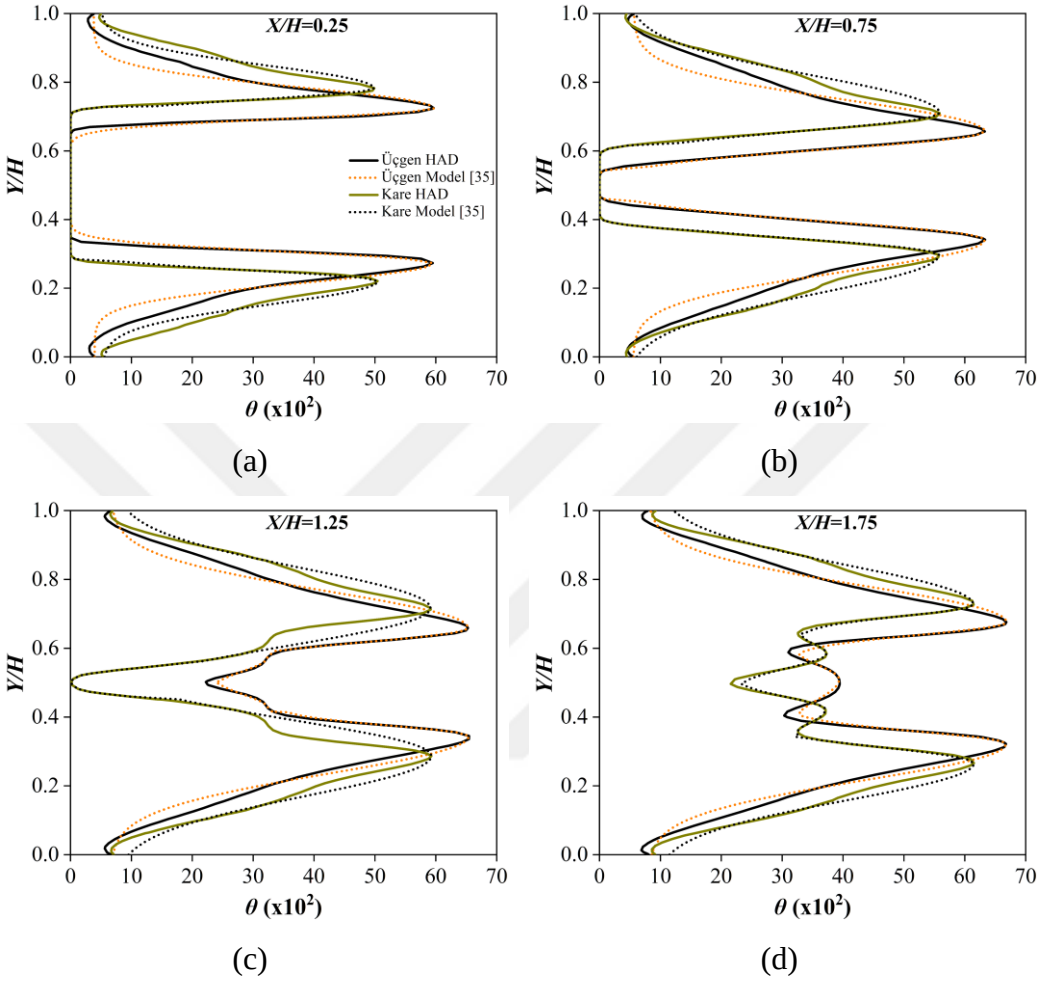

**Şekil 2.7** Holdeman vd.'nin kendi sonuçlarıyla (nokta nokta çizgi) ile modelinin (düz çizgi) karşılaştırılması [15]

Şekil 2.8'de momentum akı oranı 4 olduğunda çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için model ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık farkı oranının karşılaştırılması gösterilmektedir.



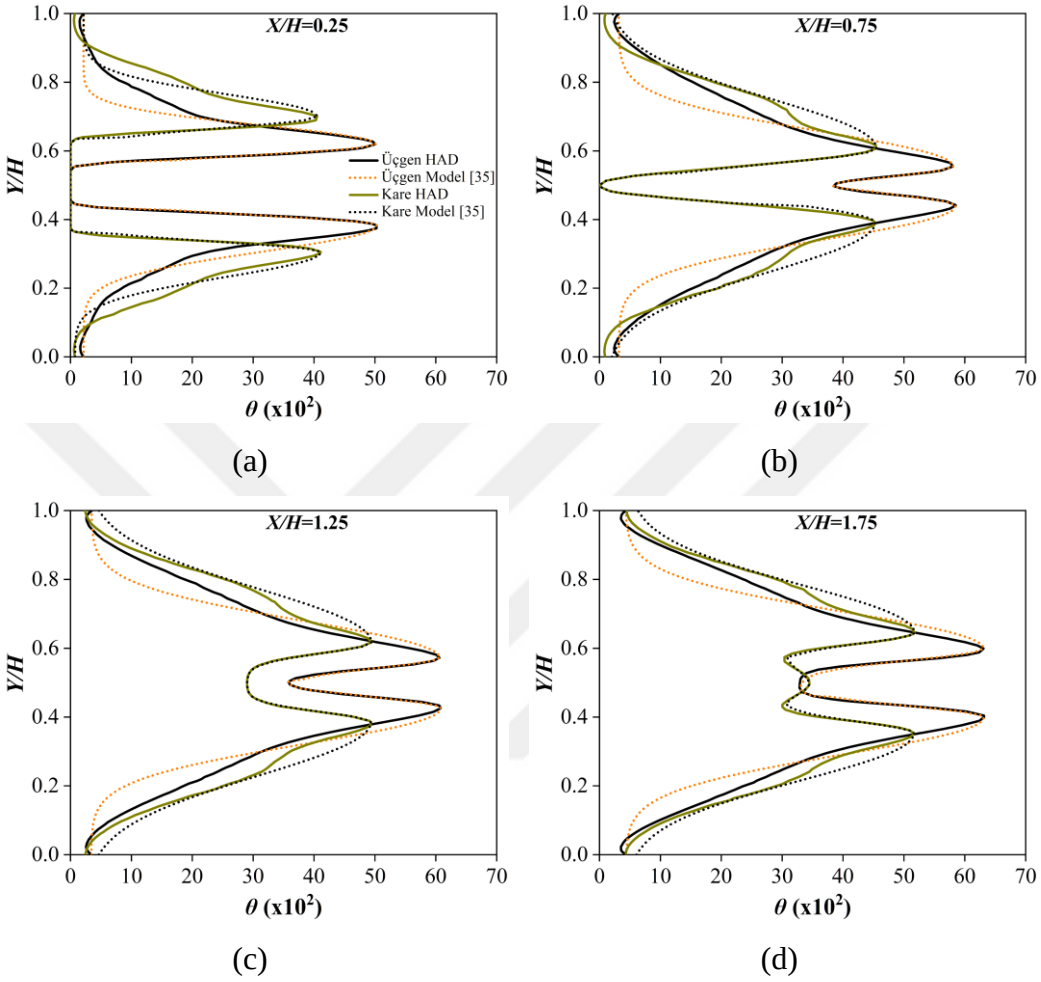

**Şekil 2.8** $J$=4 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

Çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için momentum akı oranı 8 olduğunda model ile analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık farkı oranının karşılaştırılması Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



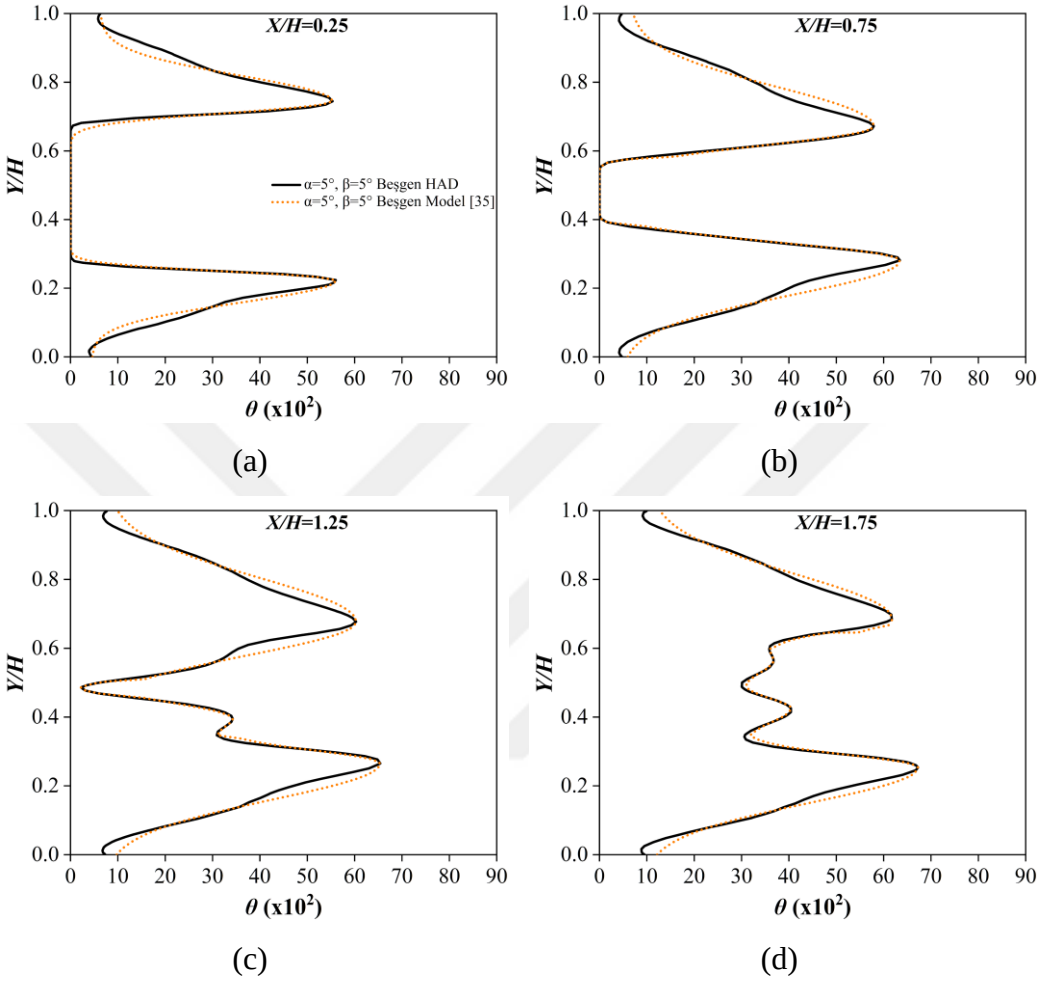

**Şekil 2.9** $J$=8 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

Momentum akı oranı 16 olduğunda çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için model ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık farkı oranının karşılaştırılması Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



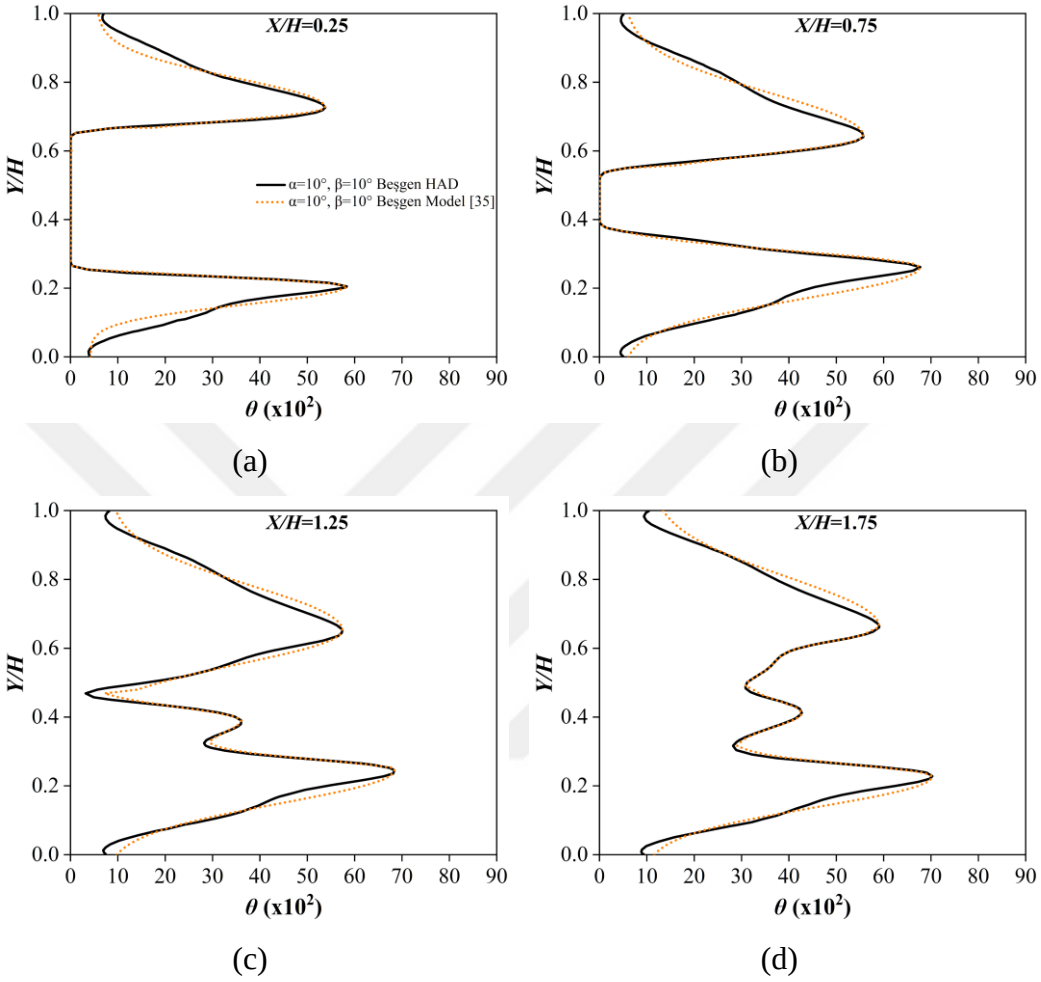

**Şekil 2.10** $J$=16 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

Çapraz akışta beşgen şekilli jetlerdeki eğim açıları α=5°, β=5° için momentum akı oranı 8 olduğunda model ile analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık farkı oranının karşılaştırılması Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



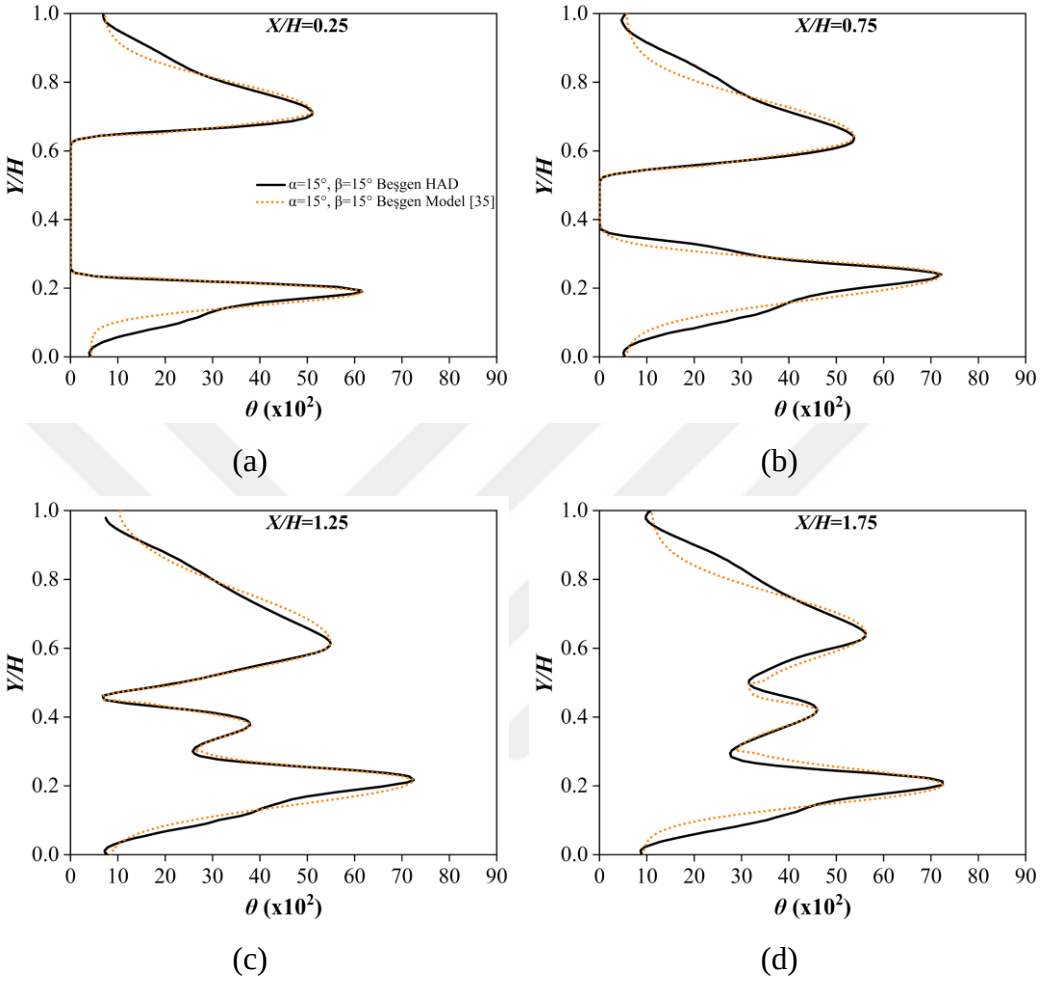

**Şekil 2.11** *J*=8 ve *α*=5°, *β*=5°'de *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

Şekil 2.12'de momentum akı oranı 8 olduğunda çapraz akışta beşgen şekilli jette α=10°, β=10° açıları için model ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık farkı oranının karşılaştırılması gösterilmektedir.



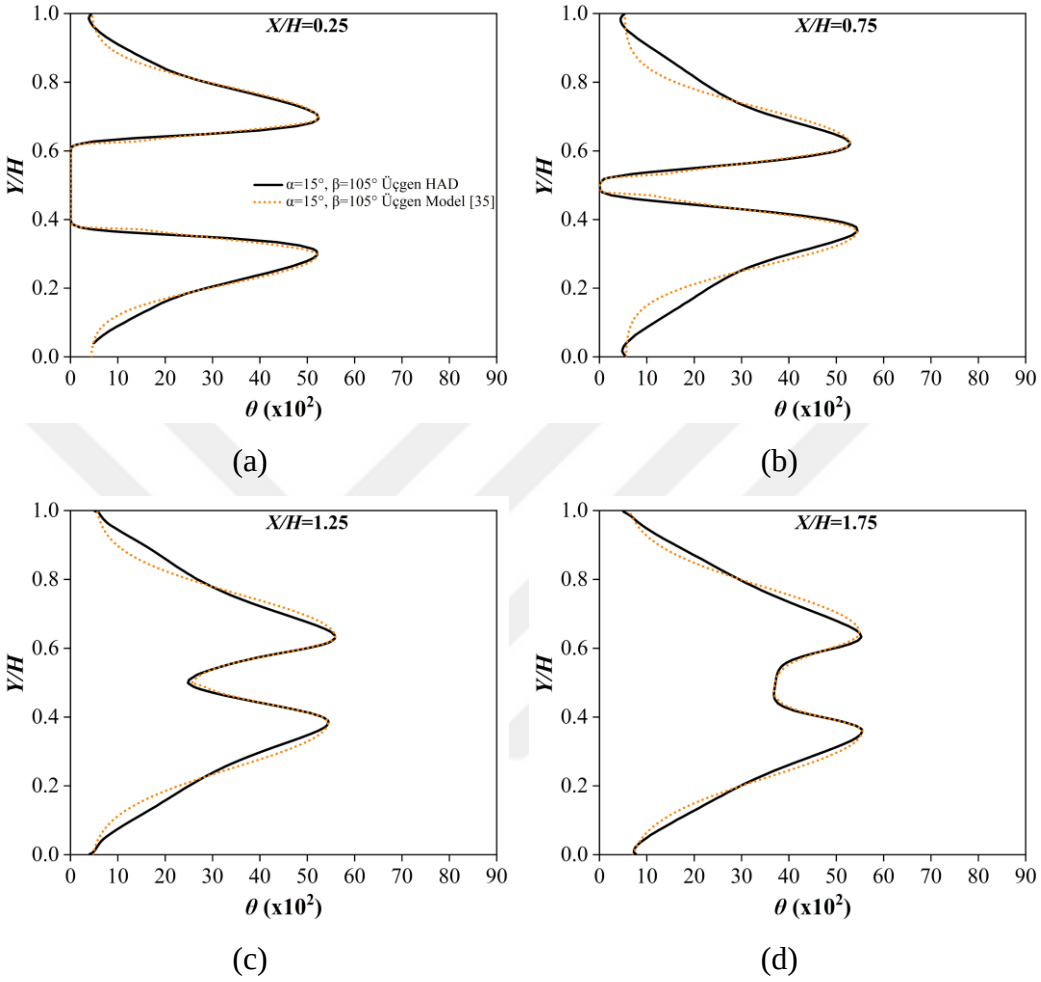

**Şekil 2.12** *J*=8 ve *α*=10°, *β*=10°'de *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

Çapraz akışta beşgen şekilli jet eğim açıları α=15°, β=15° için momentum akı oranı 8 olduğunda model ile analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık farkı oranının karşılaştırılması Şekil 2.13'te gösterilmektedir.




**Şekil 2.13** *J*=8 ve *α*=15°, *β*=15°'de *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta beşgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

Momentum akı oranı 8 olduğunda çapraz akışta üçgen şekilli jetin eğim açıları α=15°, β=105° için model ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık farkı oranının karşılaştırılması Şekil 2.14'te gösterilmektedir.




**Şekil 2.14** *J*=8 ve *α*=15°, *β*=105°'de *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen şekilli jet için model ve sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

Sonuç olarak hem ağdan bağımsızlık çalışmaları hem de literatürde kabul görmüş çalışmalarla uygulanan analiz metodunun alternatif geometrileri ve dizilimleri incelemek için uygun bir yaklaşım olacağı belirlenmiştir.

# 3

# BULGULAR VE TARTIŞMA

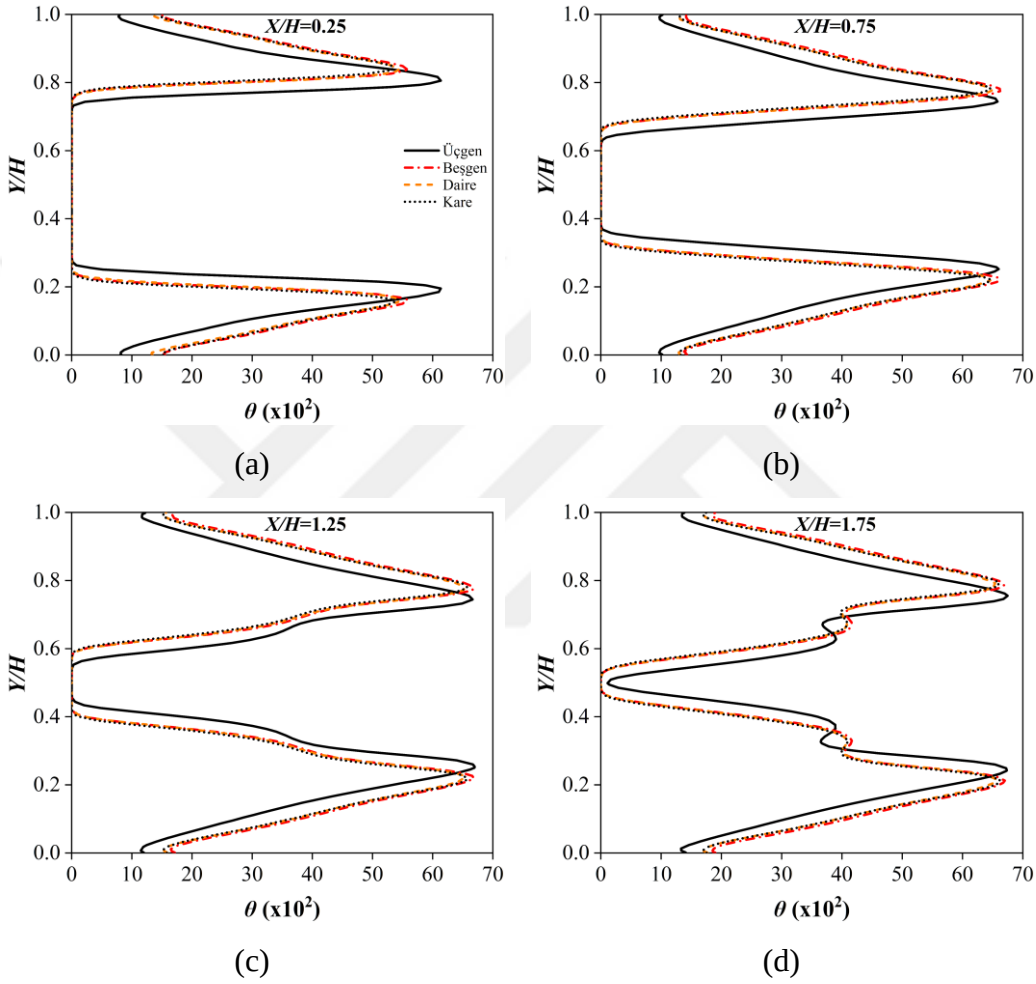
Analiz sonuçlarında jet çıkışında belirli mesafelerden sıcaklık dağılımları elde edilerek hesaplanan sıcaklık farkı oranının (Denklem 2.7) karşılaştırılması yapılmıştır. Daha yüksek sıcaklık farkı oranı ($\theta$), jetler tarafından sıcaklığın ne kadar düşürüldüğü konusunda fikir vermektedir. Bu durum aynı zamanda jet akış ile çapraz akış karışımının ne kadar yüksek olduğunu gösterir. Jet yörüngesinin önemli bir etkiye sahip olduğu sıcaklık dağılımın alındığı bölgeler *X/H*=0,25, *X/H*=0,75, *X/H*=1,25 ve *X/H*=1,75 olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen analizler iki başlık altında incelenecektir. Bunlardan bir tanesi farklı şekillerin etkisi bir diğeri ise farklı eğimlerin etkisi olarak belirlenmiştir. Farklı şekillerin etkisinde jet akışının sağlandığı delik şekilleri üçgen, beşgen, daire ve kare olarak modellenmiş ve farklı momentum akı oranlarında analizi gerçekleştirilerek karışıma etkileri incelenmiştir. Farklı eğimlerin etkisinde, analiz edilen şekiller arasında en çok olumlu etkiye sahip olanların farklı açılar ile çapraz akışa karışımı incelenmiştir.

## 3.1 Farklı Şekillerin Etkisi

Analiz modelinde Şekil 2.1'de gösterilen akış hacmine ve Şekil 2.2'de gösterilen jet şekilleri ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu bölümde jet akışının giriş açıları $\alpha$=90° ve $\beta$=90° olarak modellenmiştir. Bunun anlamı jet, çapraz akışa dik bir şekilde girecek demektir. Şekillerin etkisini net karşılaştırmak için momentum akı oranı hem düşük hızlarda hem de yüksek hızlardaki davranışı gözlemleyebileceğimiz *J*=4, *J*=8 ve *J*=16 seçilmiştir ve farklı şekiller için birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

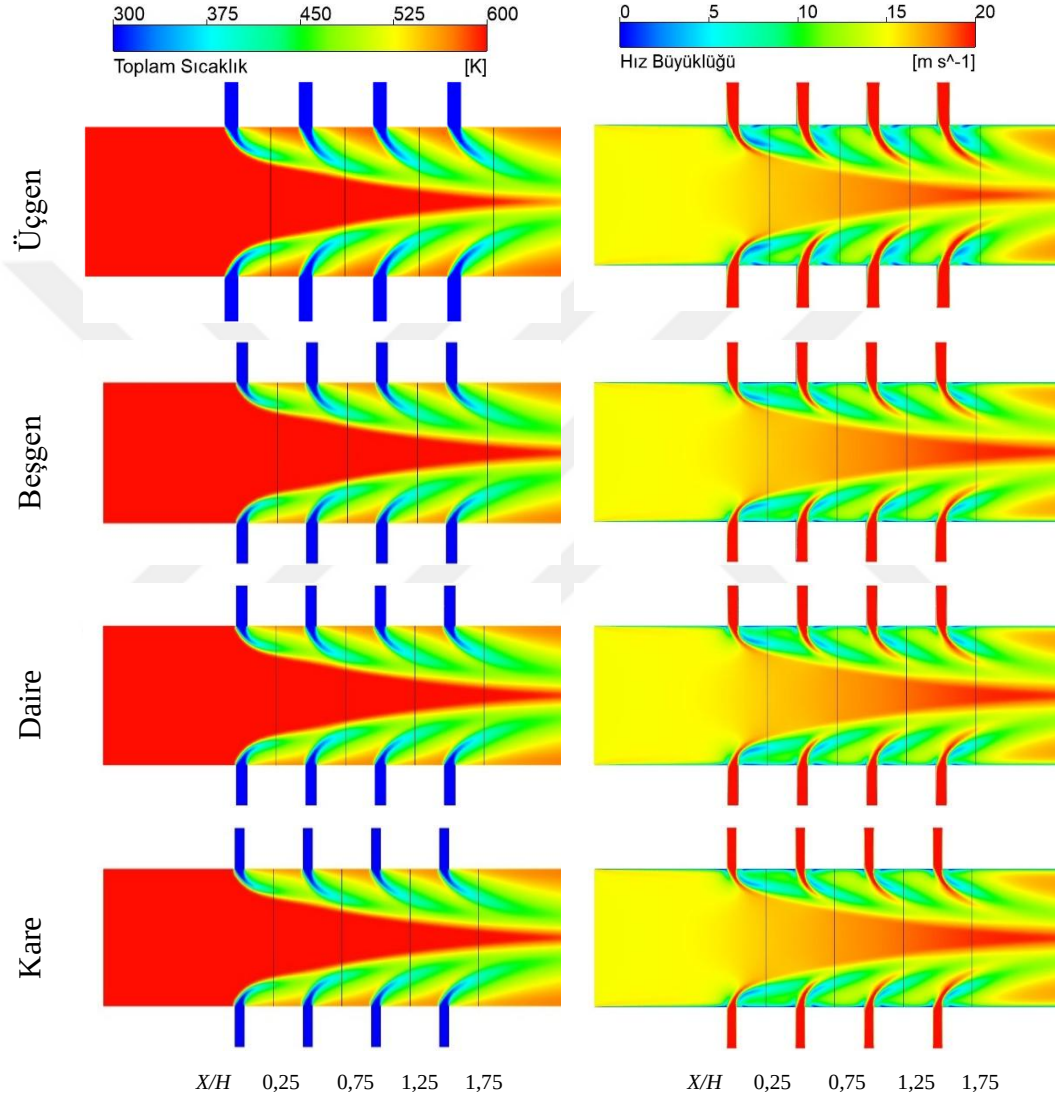
Şekil 3.1'de *J*=4 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90° için farklı *X/H* değerlerindeki sıcaklık farkı oranlarının dağılımları gösterilmektedir. Şekil 3.1 (a)'da *X/H*=0,25'den alınan sıcaklık dağılımları ilk jetin hemen ardından incelenen bölge olması nedeniyle jetin yörüngesi en net bu bölümde görülmektedir. En yüksek karışım tüm *X/H*'de üçgen şekilli jet için görülmüştür ve *X/H*=0,25'teki en yakın beşgen şekilli jetten yaklaşık %8 daha fazladır. Diğer taraftan en düşük karışım kare şekilli jette gözlenmiştir. Şekil 3.1 (b), (c) ve (d)'de sıcaklık farkı oranının dağılımı sırasıyla *X/H*=0,75, *X/H*=1,25 ve *X/H*=1,75 için gösterilmektedir.

Burada en yüksek ve en düşük karışım değerleri birbirine oldukça yakındır. Bunun nedeni jet hızının çapraz akış hızından çok farklı olmamasıdır, dolayısıyla $\theta$'da önemli bir artış yoktur. Her karşılıklı jet akışından sonra karşılıklı jetler birbirine yaklaşmakta ancak $J$= 4 için jetler arasında bir birleşme gerçekleşmemektedir. Ayrıca $Y/H$≅0,2 m ve $Y/H$≅0,8 m için düşük jet hızından dolayı akışların karışım bölgesi üst ve alt duvar yakınında etkili olduğu görülmektedir.




**Şekil 3.1** $J$=4 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta farklı şekilli jet için sıcaklık farkı oranı dağılımları

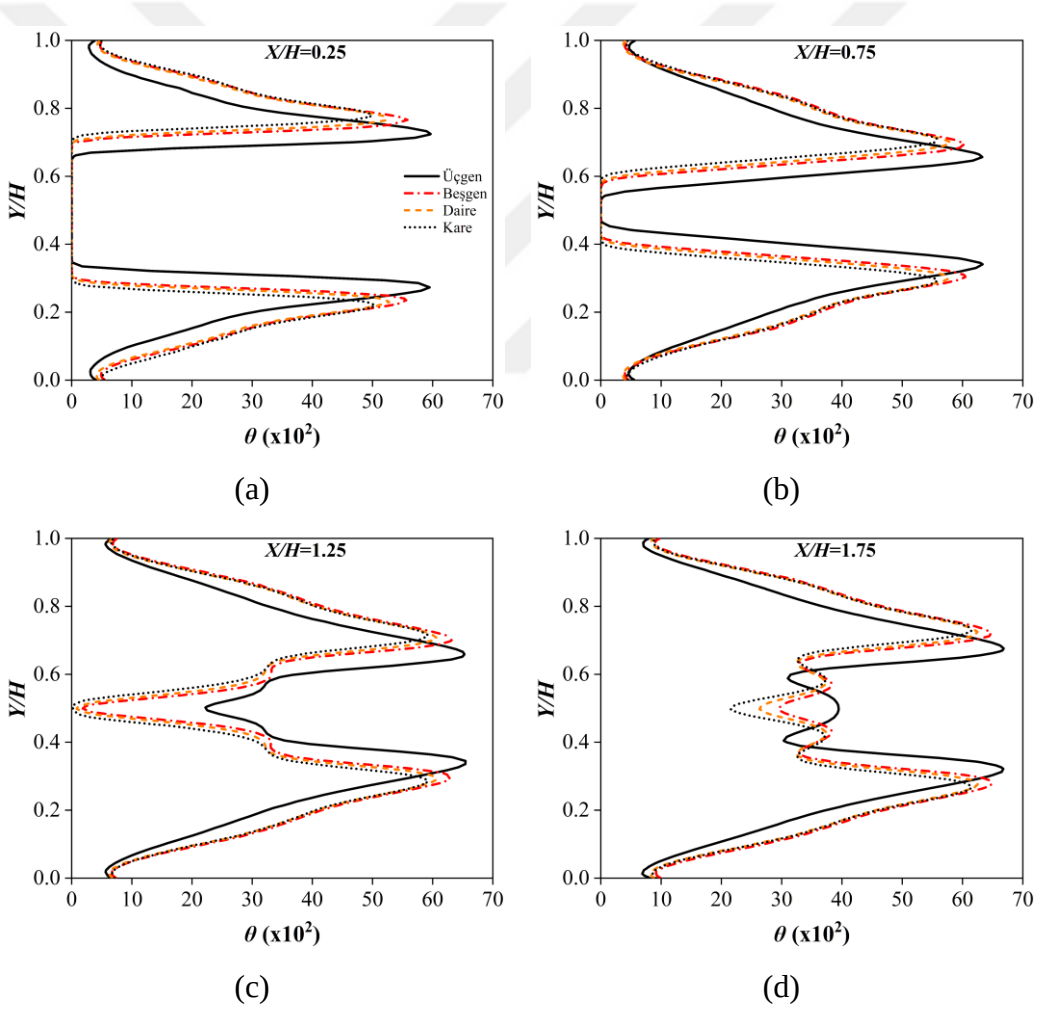
Şekil 3.2'de $J$=4 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de farklı jet şekilleri için yapılan analizlerin toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü konturları gösterilmektedir. Toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü konturlarından da anlaşılacağı üzere üçgen şekilli jetin erken nüfuz etmesinden dolayı daha yüksek $\theta$ değerine sahip olduğu ve karışımı erken sağladığı görülmektedir. Kare şeklinde, nüfuz etme daha geç gerçekleştiği için $\theta$ düşük çıkmaktadır.




**Şekil 3.2** $J$=4 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90° için çapraz akışta farklı şekilli jetlerin orta düzleminden ($X$-$Y$ düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı

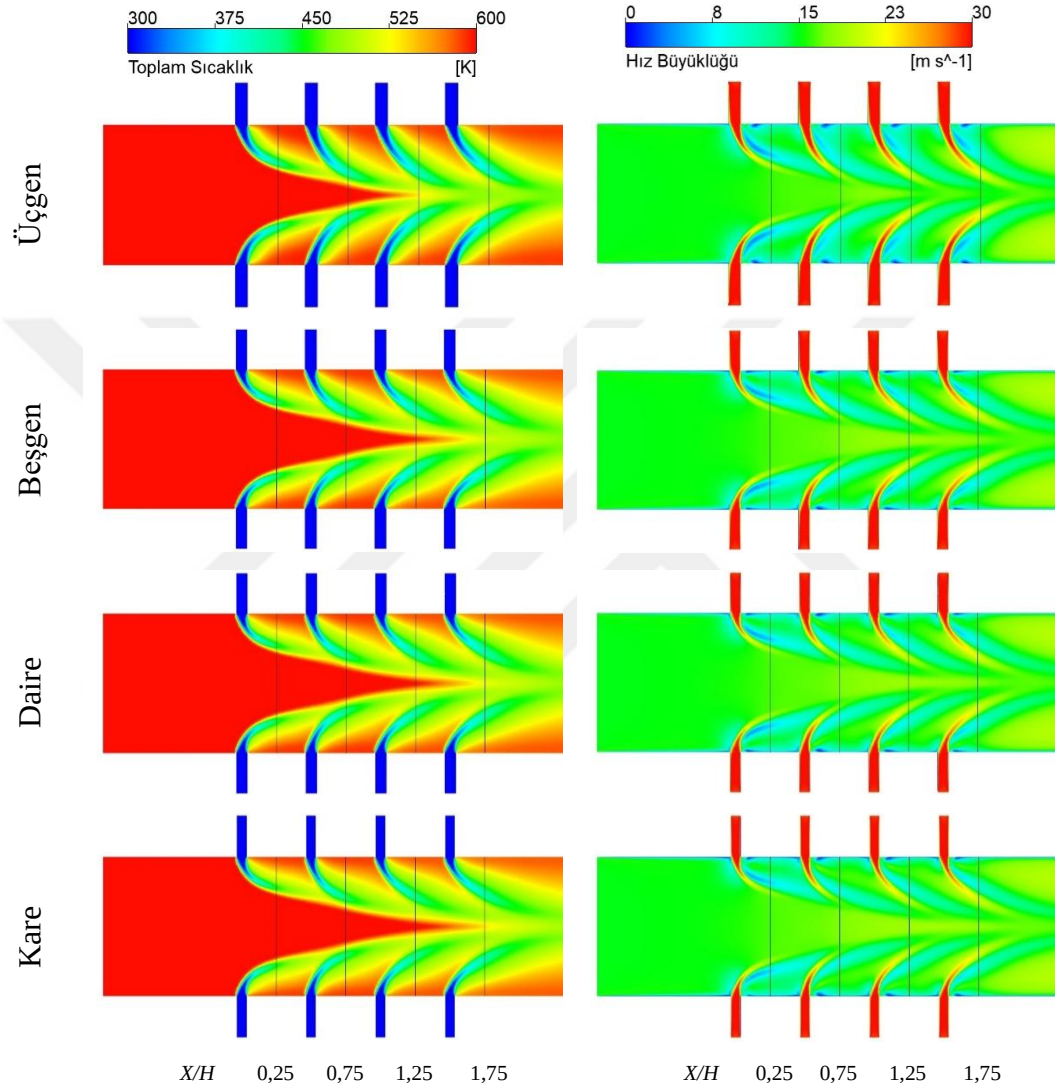
Şekil 3.3'te görüldüğü gibi şekiller arasındaki en yüksek ve en düşük $\theta$ değerlerindeki fark $X/H$=0,25'ten sonra azalmıştır. Şekil 3.1'de her bir $X/H$'de $\theta$ dağılımında $X/H$= 0,25'teki farkın neredeyse korunduğu görülmektedir. En düşük karışım kare şekilli jet olmaya devam etmektedir. Şekil 3.3'te $J$=8 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90° için farklı

*X/H* değerlerindeki sıcaklık farkı oranlarının dağılımları gösterilmektedir. En yüksek sıcaklık farkı oranı üçgen şekilli jette görülmektedir ve kare şekilli jete göre *X/H*=0,25, *X/H*=0,75, *X/H*=1,75 için sırasıyla %9, %8, %6 ve %5 daha fazladır. Şekil 3.3 (b), (c) ve (d)'de sıcaklık farkı oranı ($\theta$) dağılımı sırasıyla *X/H*=0,75, *X/H*=1,25 ve *X/H*=1,75 için gösterilmektedir. Diğer taraftan *J*=8 ile jet hızı arttığı için jet penetrasyonu artık $\theta$ dağılımı üzerinden gözlemlenebilmektedir. Bu durum *X/H*=1,25 ve *X/H*=1,75'te *Y/H*≅0,5 m için üst ve alt jetin ortasındaki bölgede $\theta$ artışından gözlemlenebilmektedir. Jet hızının artmasıyla birlikte karışımın olduğu bölge *Y/H*≅0,3 m ve *Y/H*≅0,7 m'de belirgin bir şekilde gözlenmektedir. *X/H*=1,25'te ilk defa üçgen şekilli karşılık jetlerin akışlarının birleşmesi gözükmüştür ardından *X/H*=1,75 bölgesinden sonra diğer şekiller de birleşmiştir.



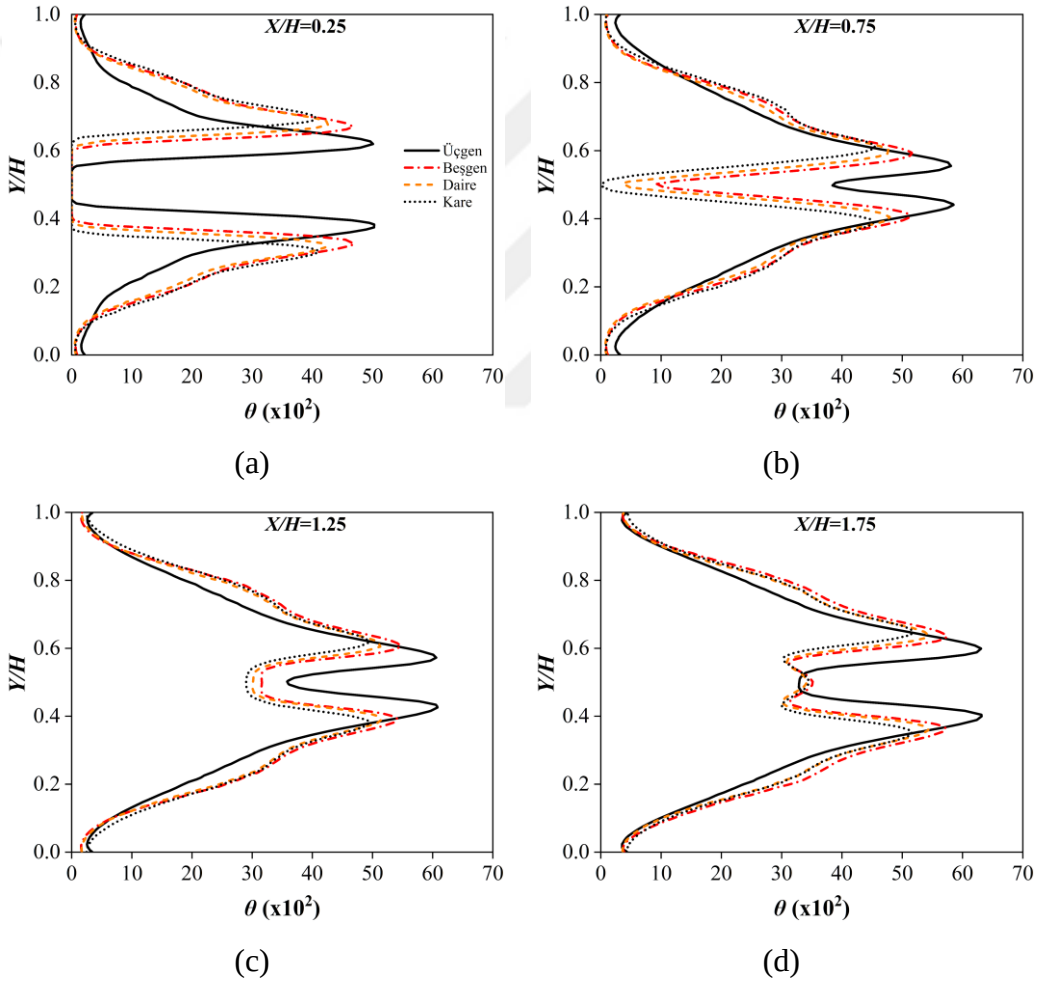

**Şekil 3.3** *J*=8 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta farklı şekilli jet için sıcaklık farkı oranı dağılımları

Şekil 3.4'te $J$=8 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de çeşitli jet şekilleri için yapılan analizlerin toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü konturları görülmektedir. Toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü konturlarından, $J$=4 için görülen sadece karşılıklı üçgen jet şeklinin birleşmesi durumu jet hızı arttığı için gözlemlenmemiştir. Diğer şekildeki jetlerde karışıma başlamışlar, fakat üçgen şeklinin daha erken başladığı gözlemlenmektedir.



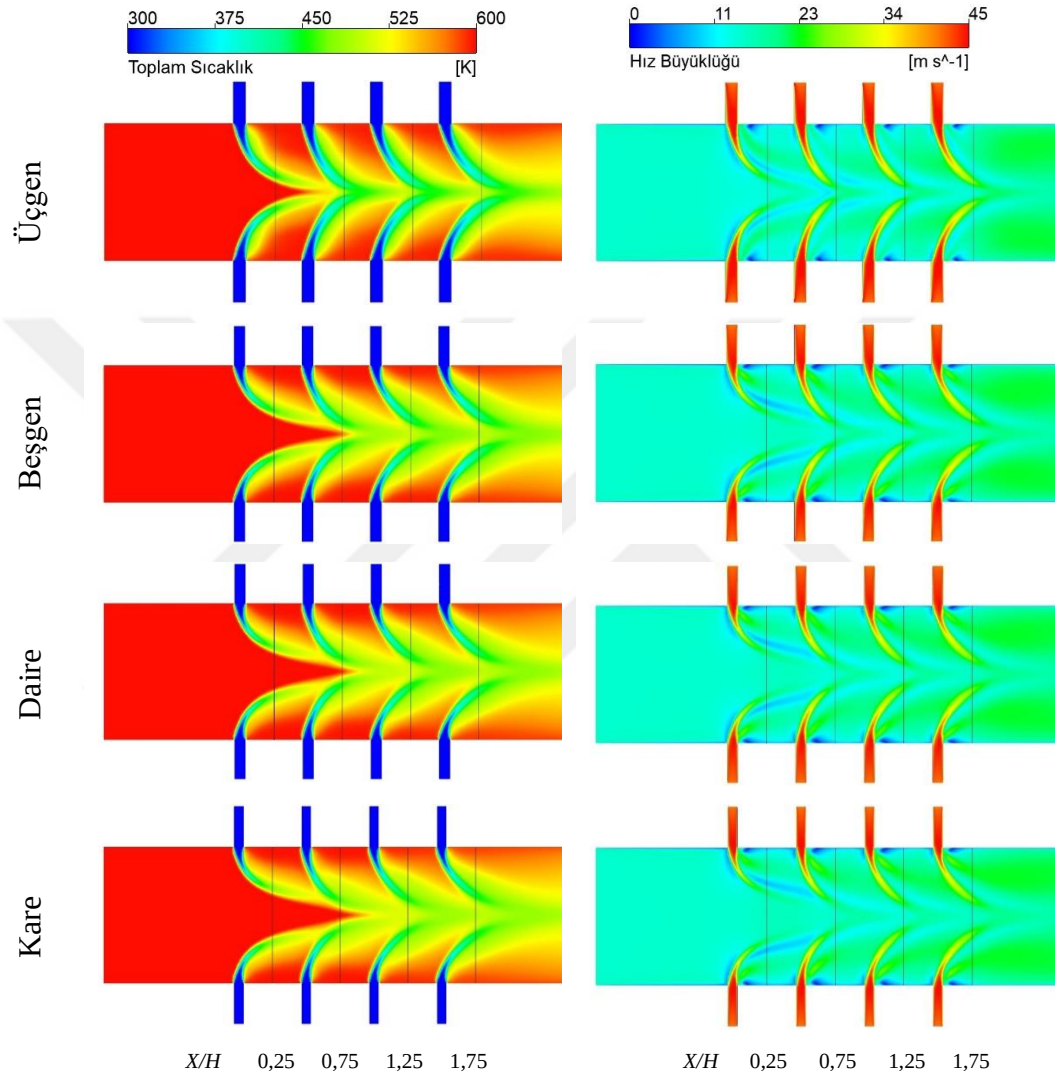

**Şekil 3.4** $J$=8 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90° için çapraz akışta farklı şekilli jetlerin orta düzleminden ($X$-$Y$ düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı

Şekil 3.5'te $J$=16 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90° için farklı $X/H$ değerlerindeki sıcaklık farkı oranlarının dağılımları gösterilmektedir. $J$=16'da jet hızının daha da artmasıyla, karşıt jetlerin karışması daha hızlı gerçekleşmektedir. Üçgen jetin karışıma olan etkisi artık $J$=16'da daha belirgindir. Bu nedenle, karşılıklı jetlerin birleşmesi ilk kez üçgen şekilli jette $X/H$=0,75 için görülebilmektedir. $X/H$=0,25, $X/H$=0,75, $X/H$=1,25, $X/H$=1,75 değerlerinde kare şekilli jete göre sırasıyla %9, %13, %11 ve %12 daha fazla sıcaklık düşüşü sağlanmaktadır. Kare şeklindeki jet halen en düşük sıcaklık farkı oranıyla karışım etkisi göstermektedir. Jet hızının artması ve erken penetrasyon ile karışım bölgeleri merkezde $Y/H$≅0,4 m ve $Y/H$≅0,6 m gözlemlenebilmektedir.




**Şekil 3.5** $J$=16 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $X/H$=0,25 (a), $X/H$=0,75 (b), $X/H$=1,25 (c) ve $X/H$=1,75 (d) için çapraz akışta farklı şekilli jet için sıcaklık farkı oranı dağılımları

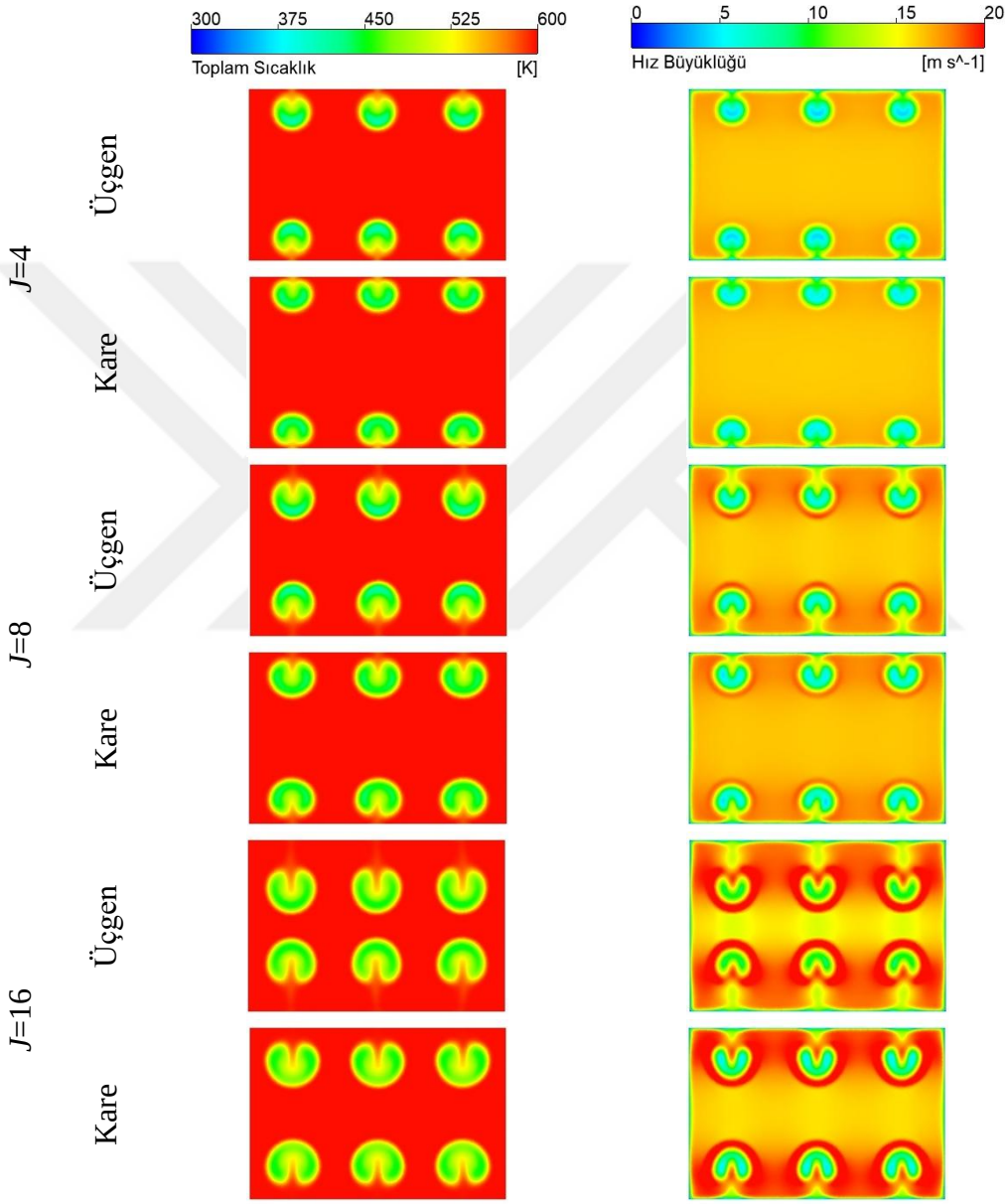
Şekil 3.6'da $J$=16 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de farklı jet şekilleri için yapılan analizlerin toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü konturları gösterilmektedir. Üçgen jet için, sıcaklık dağılımında karşıt jetlerin karışması neredeyse ikinci jetten sonra meydana gelmektedir. Diğerlerinde ise şekilleri nedeniyle karşılıklı jetlerin karışması, akışı duvara biraz daha yakın yaydıkları için daha geç meydana gelmektedir.




**Şekil 3.6** $J$=16 ve $\alpha$=90°, $\beta$=90° için çapraz akışta farklı şekilli jetlerin orta düzleminden ($X$-$Y$ düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı

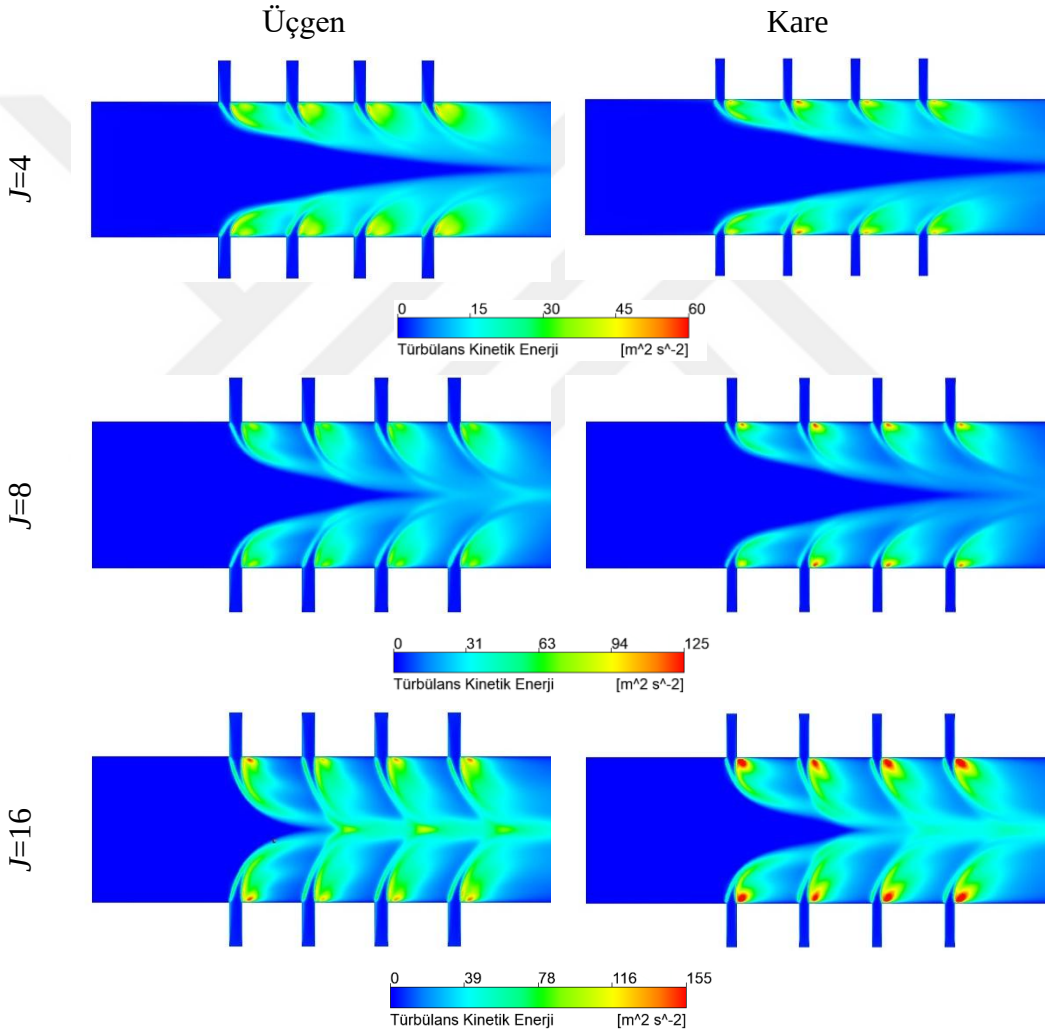
Üçgen şekilli jetin her farklı momentum akısı oranında daha fazla karışım sağladığı görülmektedir. Şekil olarak daha dar bir alana sahip olduğundan çapraz akışla etkileşime girdikten sonra jet akışını ileri doğru taşımakta ve akış yönünde daha az bozulmayla karşı jet akışıyla birleşmektedir.

Diğer jet şekillerinde bu nispeten daha az görülmektedir. Kare şeklindeki jet akışında çapraz akışın baskınlığı nedeniyle jet akışını baskılamakta ve bu durumu sonraki jetlere ileterek karşıt jetlerin birleşmesini önleyen en düşük $\theta$ değerini göstermektedir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi üçgen, şekli nedeniyle kareye göre duvardan daha uzak alanlarda etkili olabilmektedir. Kare, şekli gereği daha fazla yayılma eğilimi gösterirken, üçgen şekilli jette bu durum daha az görülmektedir.



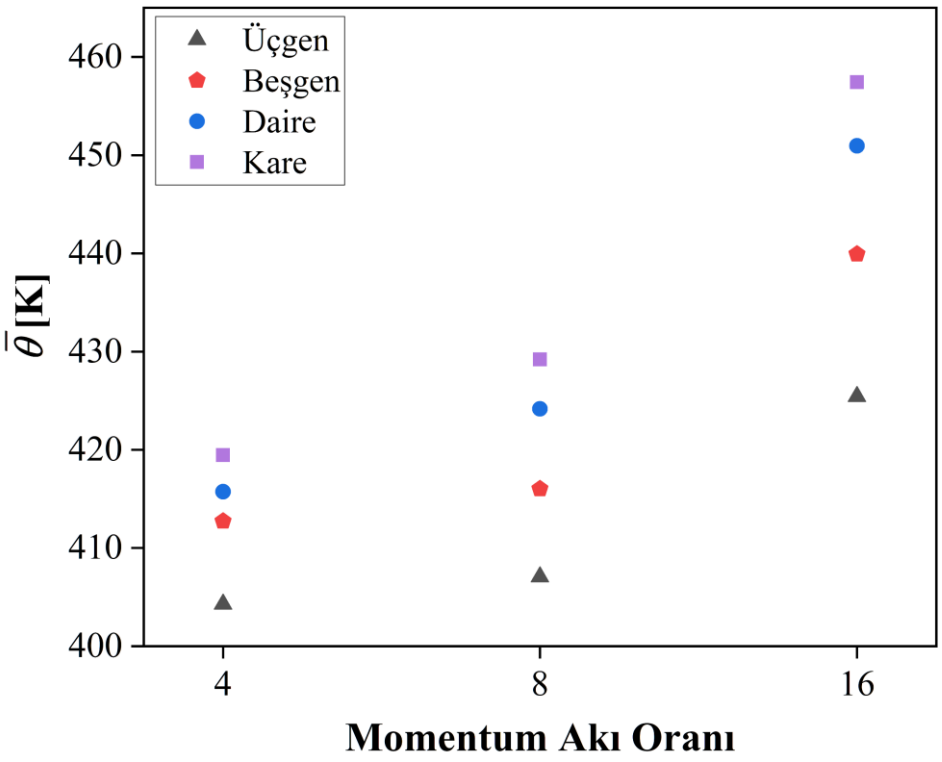

**Şekil 3.7** $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de farklı momentum akı oranları için çapraz akıştaki üçgen ve kare şekilli jetlerdeki *X/H*=0,25'deki *Y-Z* düzleminden toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı

Çapraz akışın jet akışıyla etkileşimi, doğası gereği türbülans kinetik enerjisini artıracaktır. Şekil 3.8'de en yüksek ve en düşük karışımı etkisi gösteren çapraz akışlı durumlarda üçgen ve kare şeklindeki jetteki türbülans kinetik enerji dağılımları, $\alpha$=90 ve $\beta$=90°'de $J$=4, $J$=8 ve $J$=16 için gösterilmektedir. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere kare şekilli jet akış çıktıktan sonraki birinci bölgedeki girdap bölgesi arttığı için yüksek türbülans kinetik enerji değeri göstermiştir. Bu durum bizlere jet akışından sonra akışın daha da kaotikleştiğini, karşısındaki jet ve ana akış ile daha iyi karışamadığını göstermektedir. Bu nedenle kare şekilli jet akışın ortalarına sıcaklığı iyi dağıtamamaktadır.



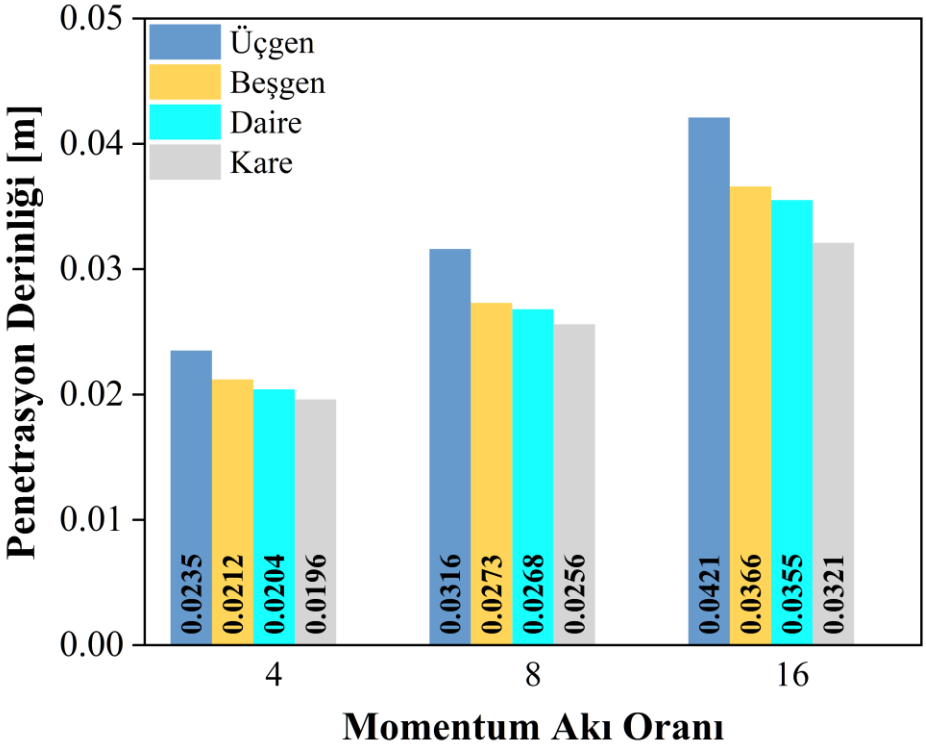

**Şekil 3.8** $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $J$=4, $J$=8 ve $J$=16 için çapraz akışta üçgen ve kare şekilli jetin orta düzleminden ($X$-$Y$ düzlemi) türbülans kinetik enerji dağılımları

Sıcaklık dağılımları yerel olarak hangi jetin daha fazla sıcaklığı düşürdüğünü ve karıştığını göstermektedir. Jet şeklinin genel karışıma olan etkisini görmek ve karşılaştırmayı kolaylaştırmak için Denklem 2.8 ile elde edilen karışım sıcaklığı değerleri Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Üçgen şeklinin en düşük karışım sıcaklığına sahip olduğu ve kare şeklindeki jete göre $J$=4, $J$=8 ve $J$=16 için sırasıyla %3, %5 ve %8 daha düşük sıcaklık gösterdiği bulunmuştur. Bu da bizlere üçgen şekilli jetin oluşturduğu karışımın en düşük sıcaklığa sahip durum olduğunu göstermektedir.




**Şekil 3.9** $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $J$=4, $J$=8 ve $J$=16 için farklı jet şekilleri ile elde edilen karışım sıcaklığı değerlerinin karşılaştırması

Şekil 3.10'da farklı jet şekilleri için $X/H$=0,25'den alınan penetrasyon derinliği değerlerinin karşılaştırılması, jet akışlarının çapraz akışla nasıl etkileşime girdiğine dair önemli bilgiler ortaya koymaktadır. Jet şekillerindeki sıcaklık dağılımlarında gözlemlenen eğilim, penetrasyon derinlikleri ile tutarlıdır. Çeşitli momentum akı oranı değerleri arasında üçgen jet sürekli olarak en yüksek penetrasyon derinliği değerini sergilerken, kare şekilli jet sürekli olarak en düşük değere sahiptir. Spesifik olarak, üçgen jet ile kare jet karşılaştırıldığında, $\alpha$=90°, $\beta$=90°'de $J$=4, $J$=8 ve $J$=16 için nüfuz derinliği değerleri sırasıyla %20, %23 ve %31 artmıştır.



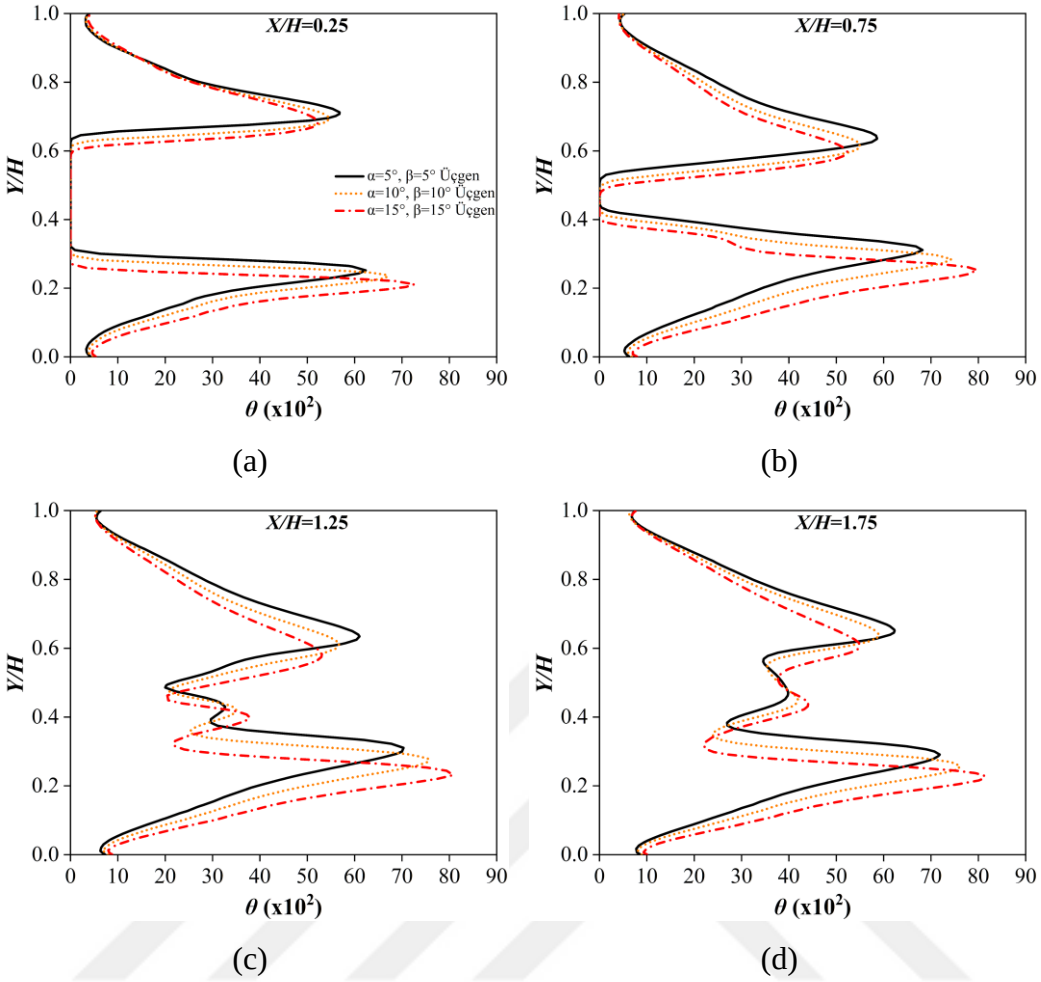

**Şekil 3.10** $J$=4, $J$=8 ve $J$=16 momentum akı oranlarında $\alpha$=90°, $\beta$=90° için farklı jet şekillerinde penetrasyon derinliğinin karşılaştırılması

### 3.2 Farklı Eğimlerin Etkisi

Literatürde jet akışları genellikle çapraz akışa karşı bir açıyla veya çapraz akış yönünde konumlandırılır [44-47]. Bu bölümdeki analizlerde, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, çapraz akışa karşı jetlerin ve aynı yöndeki jetlerin kombinasyonunu içermektedir. Şekil 2.1'de gösterilen $\alpha$ ve $\beta$ açıları 5,10 ve 15° olarak modellenmiştir. Açıları bu şekilde yaparak yukarıdaki jetler çapraz akışa karşı, aşağıdaki jetler çapraz akış yönünde olmaktadır. Bu bölümdeki analizlerin amacı çapraz akışa farklı eğimlerle giren jetlerin etkisi incelemek olduğu için bütün şekillerin analizi yapılmamıştır.

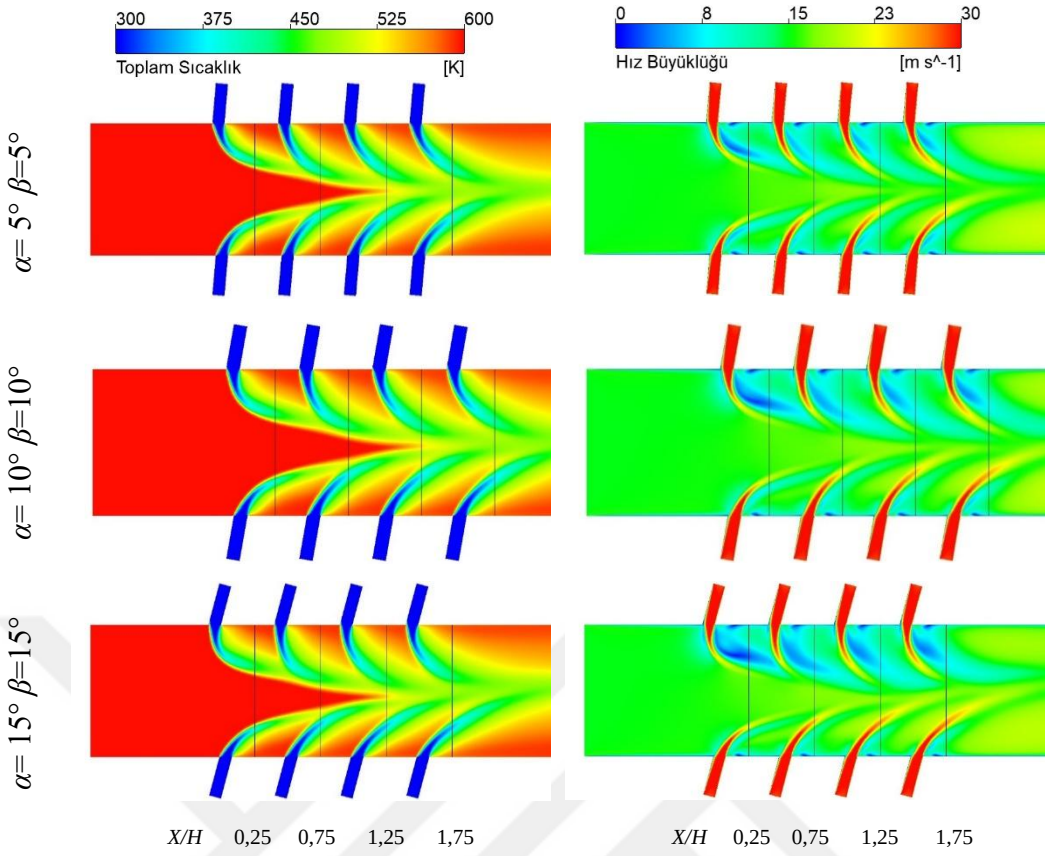
En hızlı penetrasyon ve en yüksek sıcaklık farkı oranına sahip üçgen şekilli ile diğer şekillerden daha yüksek sıcaklık farkı oranına sahip beşgen şekilli jetler için açılı olarak modellenmiştir. Momentum akı oranında ise penetrasyonun her model için gerçekleşmediği $J$=4 ve yüksek hızlara sahip olduğu için penetrasyonun bir şekilde gerçekleştiği $J$=16 kullanılmamıştır. Bunun yerine üçgen ve beşgen şekilli jetleri karşılaştırmak adına ortalama bir değer olan $J$=8 için analizler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.11'de çapraz akışta $\alpha$=5, 10, 15° ve $\beta$=5, 10, 15° açılarında olan üçgen şekilli jetin $\theta$ dağılımı gösterilmektedir. Açı artışları karşılaştırıldığında $\alpha$ açısı arttıkça sıcaklık farkı oranı düşmektedir, $\beta$ açısı arttığında ise sıcaklık farkı oranı aynı şekilde artmaktadır. Çapraz akış ile aynı yönde veya karşı yönlerde gerçekleşen jet akışlarının aynı akış alanında olması sayesinde hangi yönde jet akışının daha etkili olduğu da analizlerden görülebilmektedir. Sıcaklık farkı oranı ($\theta$) en yüksek alt taraftaki ana akış ile aynı yöne eğimli jetlerde görülmektedir. Bunun nedeni jetin akış yönünde olmasıyla ile birlikte jetten gelen düşük sıcaklıktaki akış doğrudan çapraz akışa daha az direnç ile girmektedir. Diğer taraftan üst taraftaki ana akışa karşı eğimli olan α açılı jetlerde ise bu durum tam tersidir. Ana akış yönüne eğimli β açılı jetlere göre nispeten daha az sıcaklık farkı oranı gösteren bu jetler çapraz akışa karşı bir zorlama yaratarak akışta daha çok yayılım göstermiş ve akış hacminde daha çok bölgede düşük sıcaklık göstermiştir. Bu nedenle $\alpha$ açısı arttıkça zorlanmada artacağı için sıcaklık farkı oranı düşerken sıcaklığı yaydığı bölge artmaktadır. Eğimli jetlerin karışıma etkisini daha net görebilmek adına jetlerin etkisinin başladığı ve bittiği noktalar olarak adlandırabileceğimiz $X/H$=0,25 ile $X/H$=1,75 bölgelerinden alınan maksimum sıcaklık farkı oranlarını karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma bizlere sıcaklık farkı oranının akış boyunca ne kadar değiştiği konusunda bilgi verecektir. İlk jet ve son jetten sonraki maksimum sıcaklık farkı oranları karşılaştırıldığında $\alpha$ =5, 10, 15° için sırasıyla %5, %4 ve %3 olarak bulunmuştur. Açılar $\beta$ =5, 10, 15° olduğunda ise $X/H$=0,25 ile $X/H$=1,75'deki maksimum sıcaklık farkı oranı değişimi her bir açı için yaklaşık %9 olarak görülmektedir. Bu durum bizlere karşılaşılan direnç arttıkça akış boyunca oluşan sıcaklık değişim oranının azaldığını ve jetlerden sonraki akış alanının genelinde minimum sıcaklığa benzer olduğunu göstermektedir.




**Şekil 3.11** *J*=8'de $\alpha$=5,10,15° ve $\beta$=5,10,15° için *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen şekilli jet için sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

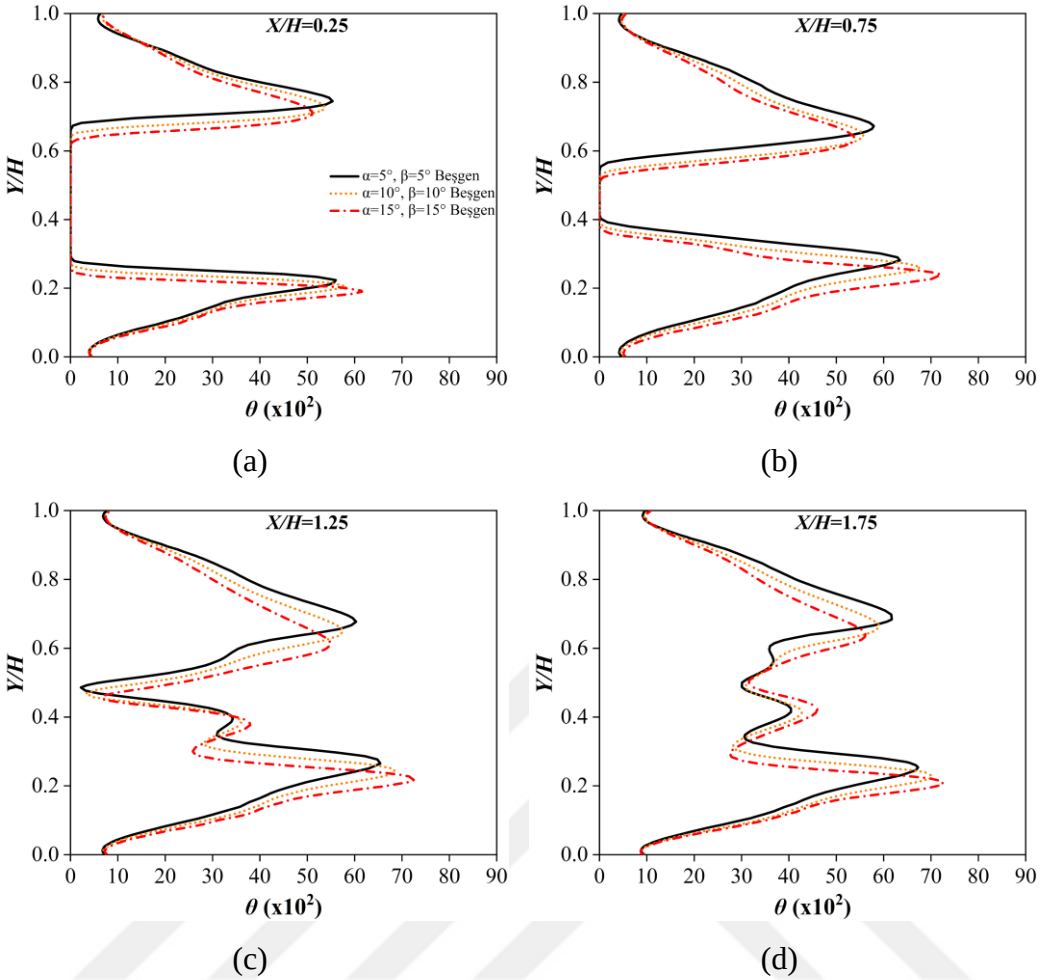
Şekil 3.12'de üçgen şekilli jetlerin $\alpha$=5, 10, 15° ve $\beta$=5, 10, 15° açılarında olduğu durumdaki toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımları gösterilmektedir. Dağılımlar incelendiğinde çapraz akışa karşı yönde olan yukarıdaki α açılı jetler bir direnç yaratarak akışı zorlamaktadır. Açılar arttıkça, hız büyüklükleri dağılımından da görüleceği gibi jetin arkasında kalan bölgede hız değerleri oldukça düşmektedir. Bu durum bizlere jet akışının daha çok penetre etmek istediğini ve karşılaştığı direncin büyüklüğünü göstermektedir. $\beta$ açısı jet akış yönünde açılandırıldığı için bir zorlanmanın az olduğu ve buna bağlı olaraktan penetrasyon derinliğinin yüksek olmadığı görülmektedir.




**Şekil 3.12** $J$=8 ve $\alpha$=5,10,15°, $\beta$=5,10,15° için çapraz akışta üçgen şekilli jetlerin orta düzleminden ($X$-$Y$ düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı

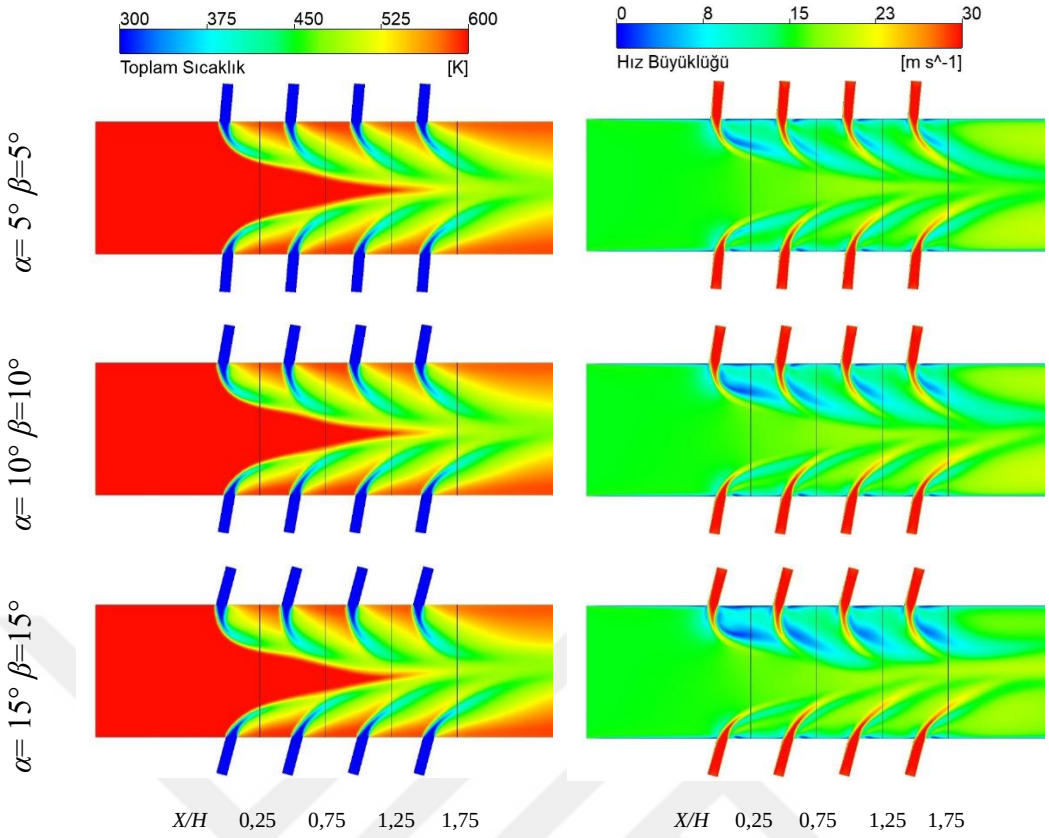
Beşgen şekilli jetlerin $\alpha$=5, 10, 15° ve $\beta$=5, 10, 15° açılarına sahip olduğu durumlardaki $\theta$ dağılımı Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Beşgen şekilli jette üçgen jet ile benzer bir trend göstererek $\alpha$ açıları arttıkça $\theta$ da düşüş ve $\beta$ açıları arttıkça da $\theta$ da artış gözlemlenmektedir. Penetrasyon beşgen şeklinde üçgen şekline göre daha az olduğu önceki analizlerden bulunduğu için haliyle sıcaklık dağılımında da bununla ilgili farklar görülmektedir.

Beşgen şeklindeki açının $\alpha$=5, 10, 15° olduğu çapraz akışa karşı yöne eğimli olan jetteki $X/H$=0,25 ile $X/H$=1,75'deki maksimum sıcaklık farkı oranındaki değişim, açılar için sırasıyla %6, %5 ve %5 olarak bulunmuştur. Jetlerin çapraz akış ile aynı yönde olduğu $\beta$=5, 10, 15° açılarında jetlerin $X/H$=0,25 ile $X/H$=1,75'deki maksimum $\theta$ her bir açı için yaklaşık %11 değişmektedir. Beşgen şekilli jette penetrasyon daha az olduğu için çapraz akış tarafından daha fazla zorlanmasına rağmen çevresine düşük sıcaklığı yaydığı alanı biraz daha artmaktadır.




**Şekil 3.13** *J*=8'de $\alpha$=5,10,15° ve $\beta$=5,10,15° için *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve *X/H*=1,75 (d) için çapraz akışta beşgen şekilli jet için sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

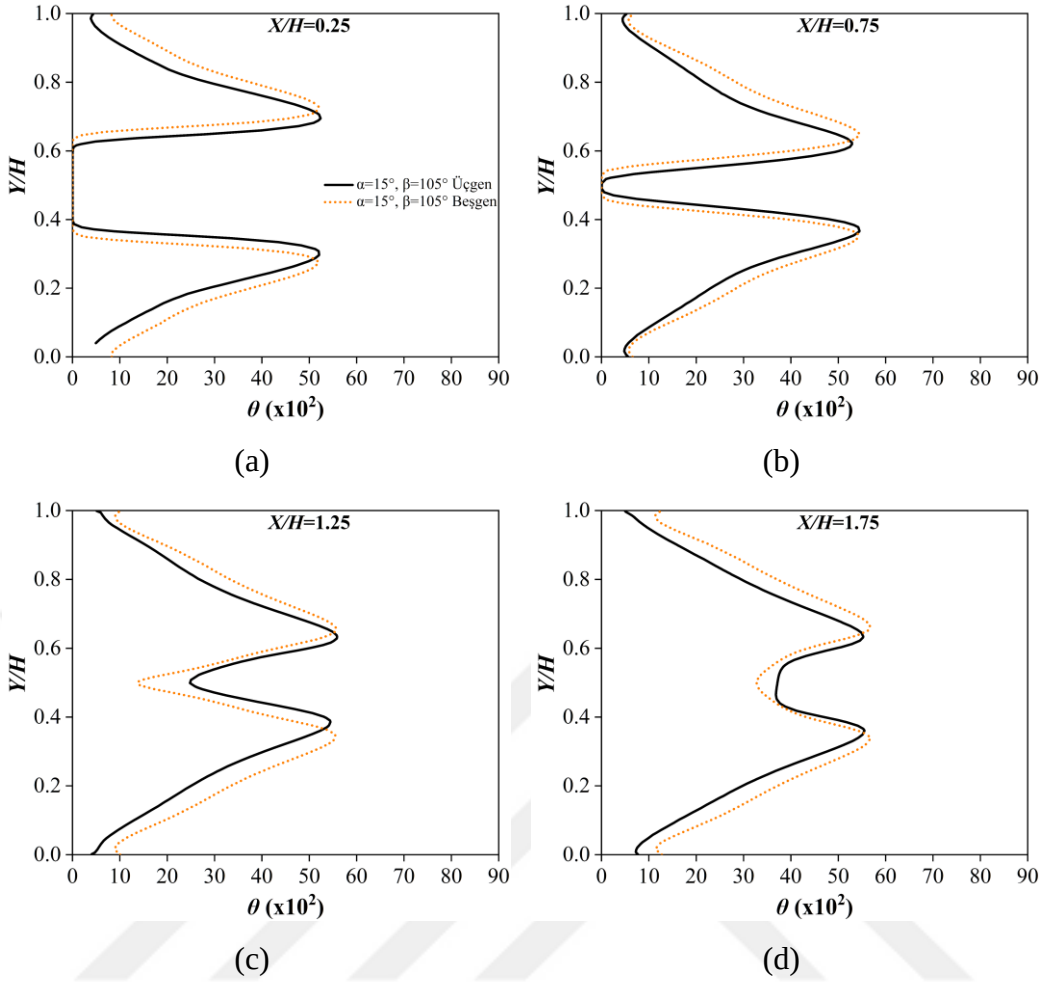
Beşgen şekilli jetlerin $\alpha$=5, 10, 15° ve $\beta$=5, 10, 15° açılarında olduğu durumdaki toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımları Şekil 3.14'te gösterilmektedir. Üçgen şekilli açılı dağılımda yapılan benzer yorumlar burada da geçerlidir. Farklı olarak beşgen şekli daha az penetrasyon derinliği gösterdiği için buradaki α açılı jetin zorlanmasına karşılık oluşan ölü bölge üçgen şeklindekine göre daha az görülmektedir.




**Şekil 3.14** $J$=8 ve $\alpha$=5,10,15°, $\beta$=5,10,15° için çapraz akışta beşgen şekilli jetlerin orta düzleminden ($X$-$Y$ düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı

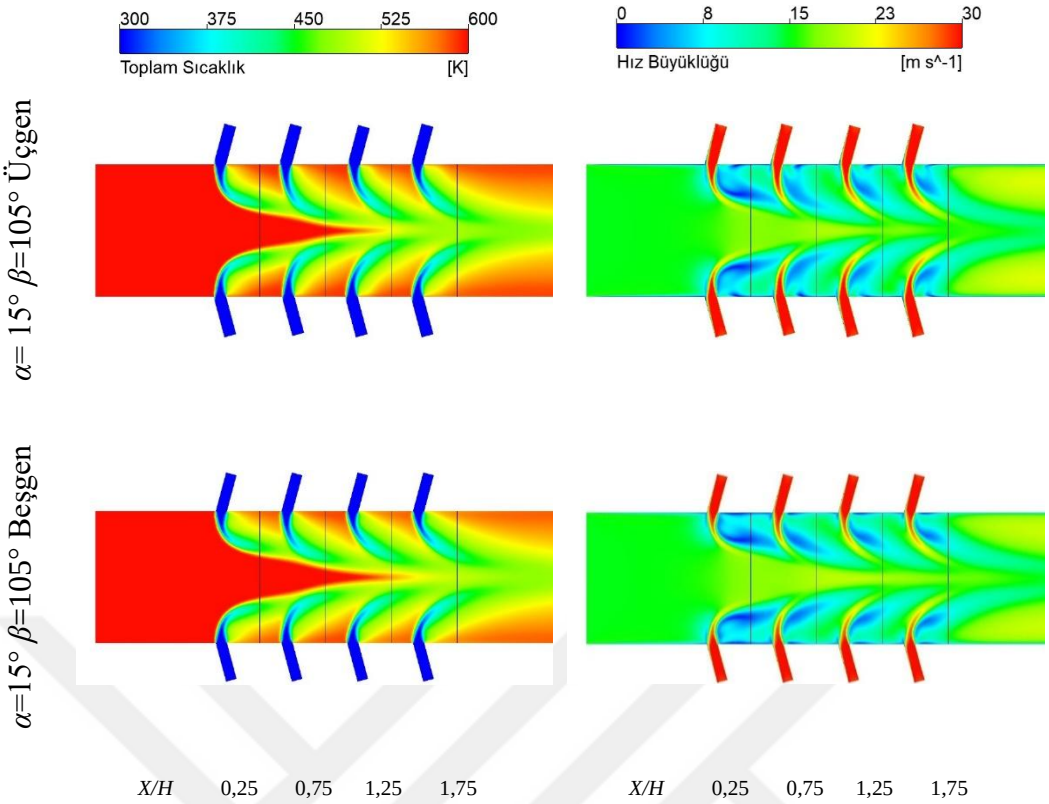
Jet akışının çapraz akışa karşı olduğu durumlarda jet akışının direnç yaratarak daha çok penetre ettiği yukarıdaki sonuçlardan gözlemlenmiştir. Bu nedenle sadece üsteki jetin değil alttaki jetin de çapraz akışa karşı olduğu $\alpha$=15° ve $\beta$=105° durumu için de analiz gerçekleştirilerek karşılaştırma yapılmak istenmiştir. Şekil 3.15'te üçgen ve beşgen şekilli jetlerin $\alpha$=15° ve $\beta$=105° açılarında $J$=8 için $\theta$ dağılımları gösterilmiştir.

Her iki jet aynı yönde ve açıda olduğu için simetrik bir sıcaklık dağılımı sergilemektedir. Çapraz akışın yarattığı direnç ile birlikte şekillerin etkisi çok fazla görülmemiştir. Diğer yandan yapılan önceki analizlerde üçgen şekli bütün $X/H$ değerlerinde en yüksek sıcaklık farkı oranına sahipken bu konfigürasyonda üçgen ve beşgen şekli birbirine oldukça yakın çıkmıştır. İlk jet ve son jetten sonraki maksimum sıcaklık farkı oranları karşılaştırıldığında $\alpha$ =15° ve $\beta$ =105° için üçgen ve beşgen şekli için sırasıyla %3 ve %4 olduğu bulunmuştur.




**Şekil 3.15** *J*=8 ve $\alpha$=15°, $\beta$=105°'de *X/H*=0,25 (a), *X/H*=0,75 (b), *X/H*=1,25 (c) ve X/H=1,75 (d) için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jet için sıcaklık farkı oranı arasındaki karşılaştırma

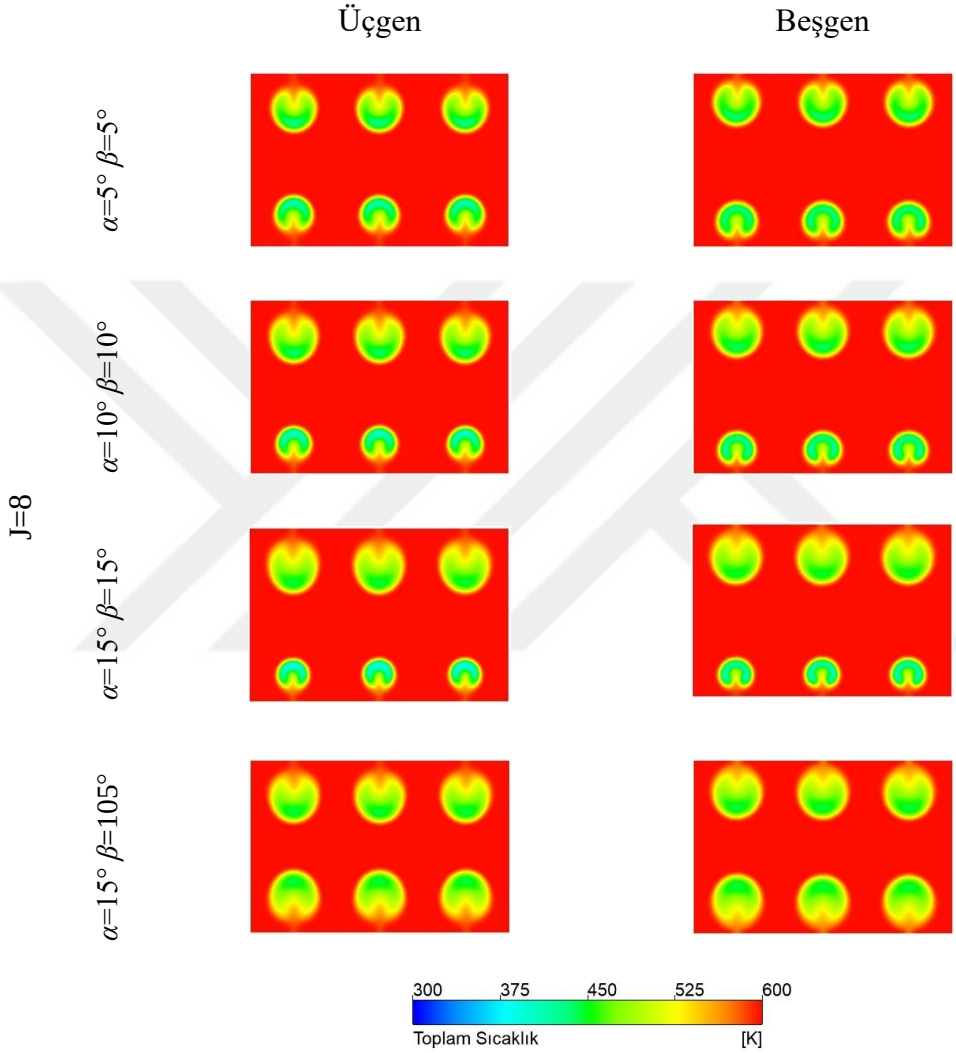
Üçgen ve beşgen şekilli jetlerin $\alpha$=15° ve $\beta$= 105° açılarında olduğu durumdaki toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımları Şekil 3.16'da gösterilmektedir. Şekiller arasındaki etkinin ne kadar düşük olduğu daha net bir şekilde görülmektedir. Ana akışın direnci jetleri basmaya çalıştığı için şekillerin yarattığı fark azalmaktadır. Her iki şekil için ölü bölge alanları da benzerlik göstermektedir.




**Şekil 3.16** *J*=8 ve $\alpha$=15°, $\beta$=105° için çapraz akışta üçgen ve beşgen şekilli jetlerin orta düzleminden (*X*-*Y* düzlemi) toplam sıcaklık ve hız büyüklüğü dağılımı

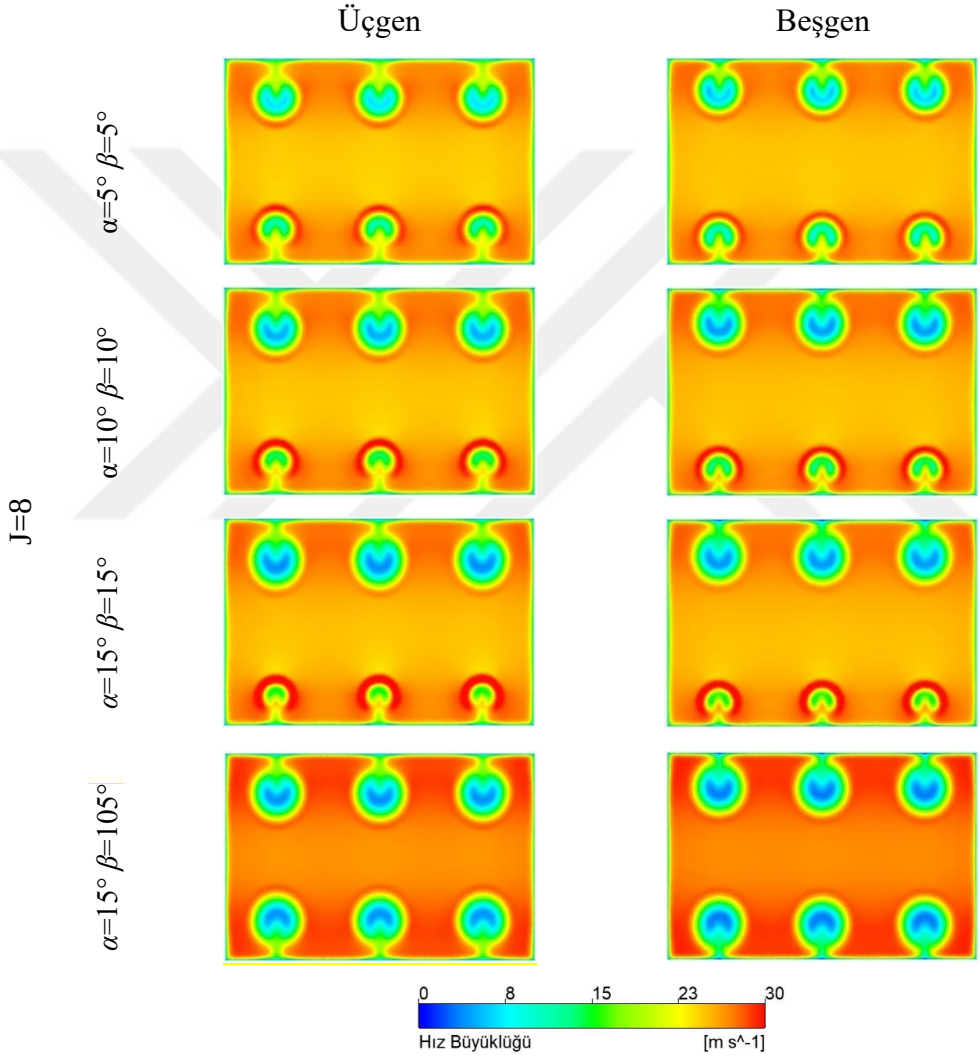
Şekil 3.17'de farklı açılardaki ve *J*=8 momentum akı oranına sahip çapraz akıştaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerdeki *X/H*=0,25'deki *Y*-*Z* düzleminden alınan toplam sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Dağılımlar incelendiğinde yukarıda kalan çapraz akışa karşı olan jetlerdeki dağılımın alttaki jete nazaran büyüklüğü bizlere çapraz akışın yarattığı dirence karşı davranışını göstermektedir. Bu büyüklük akış alanını daha çok kapladığı için sıcaklık farkının düşürüldüğü bölgenin de arttığı söyleyebiliriz.

Alttaki akış yönündeki jetlerde ise açı arttıkça sıcaklık düşüşünün olduğu bu alanın küçüldüğü görülmektedir. Bunun nedeni ise açı arttıkça akış yönüne doğru bir yönelim sağladığı için daha az direnç ile karşılaşmasıdır. Jetlerdeki açı $\alpha$=15° ve $\beta$= 105° olduğunda ise direnç kaynaklı her ikisinde de benzer davranış gözlemlenmektedir.



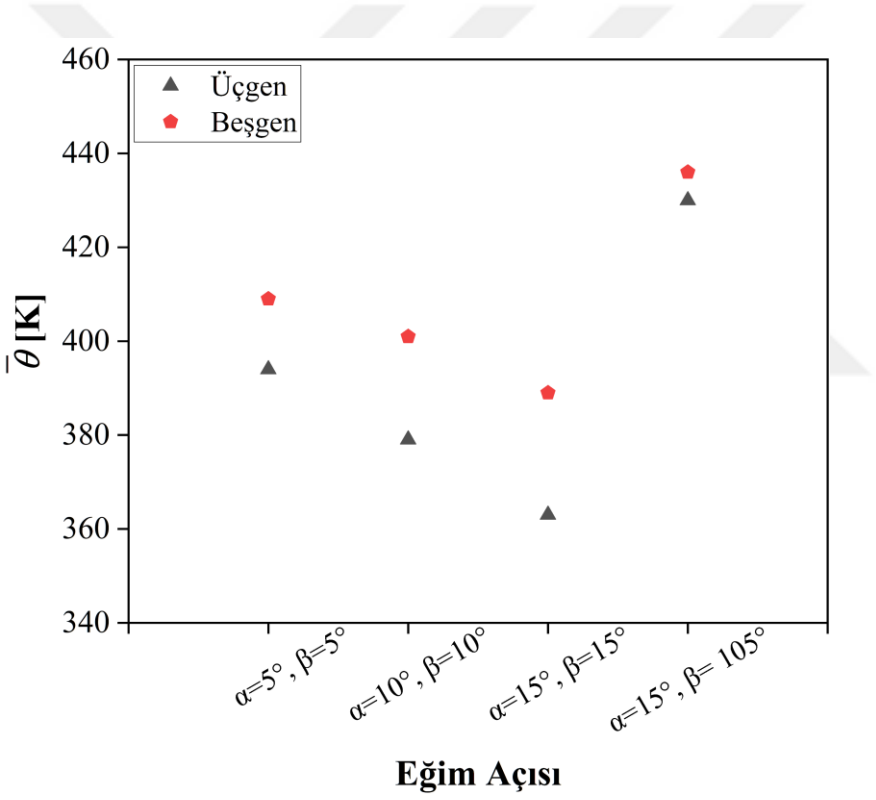

**Şekil 3.17** Farklı açılardaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerin *J*=8 için *X/H*=0,25'deki *Y-Z* düzleminden alınan toplam sıcaklık dağılımı

Şekil 3.18’de çapraz akıştaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerin farklı açılardaki ve *J*=8 için *X/H*=0,25'deki *Y-Z* düzleminden alınan hız büyüklüğü dağılımı gösterilmektedir. Açı arttıkça yukarıdaki çapraz akışa karşı olan açılı jetin karşılaştığı direnç arttığı için düşük hıza sahip olduğu alan artmaktadır. Aşağıda kalan akış yönündeki eğimli jet için ise bu durum tam tersidir ve yüksek hızların olduğu alan direnç azaldığı için artmaktadır. Yukarı ve aşağıdaki jetlerdeki $\alpha$=15° ve $\beta$=105° açılarında olduğunda ise hız büyüklüğü dağılımlardan da görüldüğü üzere şekillerin etkisi azalmış ve benzer bir davranış göstermiştir.




**Şekil 3.18** Farklı açılardaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerin *J*=8 için *X/H*=0,25'deki *Y-Z* düzleminden alınan hız büyüklüğü dağılımı

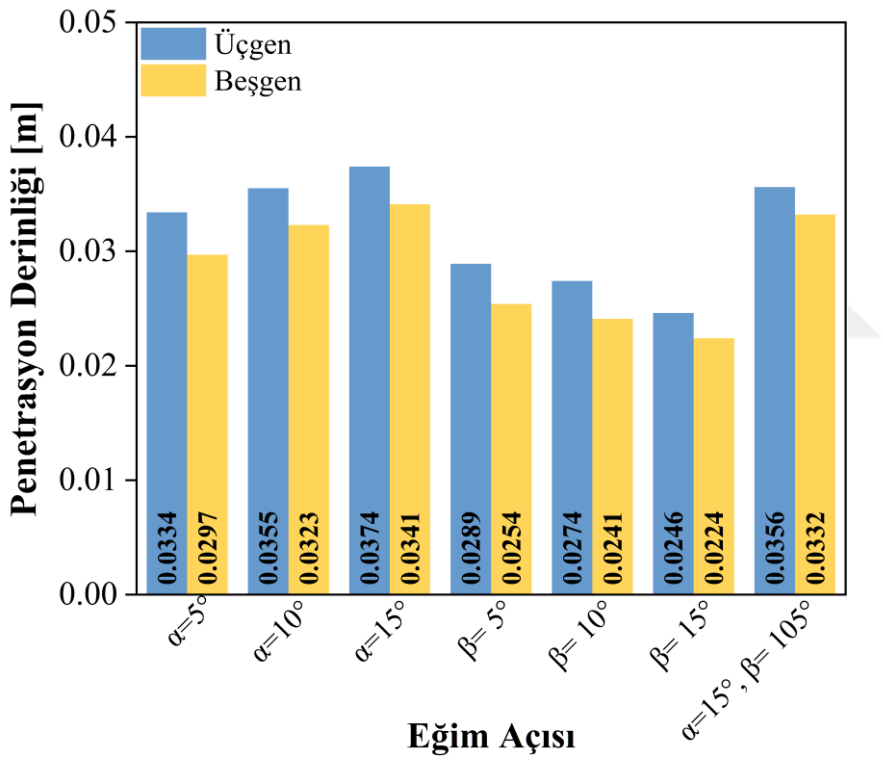
Açılı jetlerde karışım sıcaklığı değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3.19'da gösterilmektedir. Üçgen şekilli jet $\alpha$=5, 10, 15° ve $\beta$=5, 10, 15° için beşgen şekilli jete göre sırasıyla %4, %5 ve %7 daha düşük sıcaklıklar göstermektedir. Jetin açılı şekilde yerleştirilmesiyle ile üçgen şekilli jetin çıkışa doğru yüksek sıcaklık gördüğü alan azaldığı için $\alpha$=15° ve $\beta$=15° açılı üçgen şekli sıcaklık farkı oranını ve penetrasyonu arttırmak için en iyi konfigürasyonu vermektedir. Diğer yandan üçgen ve beşgen şekilli jetlerin $\alpha$=15° ve $\beta$=105° açılı durumları incelendiğinde ise üçgen şekilli jet yaklaşık %1 daha yüksek çıkmaktadır. Çapraz akışın yarattığı direnç jet akışlarına karşı baskın geldiği için farklı jet şekillerinde benzer değerler görülmesini sağlamıştır. Bu durum çapraz akışa karşı olacak şekilde jetlere eğim verildiğinde jet şeklinin farklı olmasının yarattığı etkinin azaldığını göstermektedir.




**Şekil 3.19** Farklı açılardaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerin $J$=8'de gösterdiği karışım sıcaklığı değerlerinin karşılaştırması

Şekil 3.20'de farklı jet açılarında üçgen ve beşgen şekilli jetlerin sahip olduğu penetrasyon derinliği değerleri gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde çapraz akışa dik giren jetlerdeki durum burada da geçerlidir ve üçgen şekli her açıda en yüksek değerlere sahiptir. Üçgen şekilli jet $\alpha$=5, 10, 15° ve $\beta$=5, 10, 15° için beşgen şekilli jete göre maksimum %14 daha yüksek çıkmıştır. Her iki jetin de çapraz akışa karşı

eğimli ($\alpha$=15° ve $\beta$=105°) olduğu durum incelendiğinde ise üçgen ve beşgen şekli arasında %7'lik bir fark çıkmaktadır. Bu karışım sıcaklığı değerlerinin karşılaştırmasındaki gibi birbirine yakın sonuçlar vermese de penetrasyon derinliği anlamında şekillerin etkisinin varlığı görülmüştür. Açıların $\alpha$=15° ve $\beta$=15° olduğu durum ile $\alpha$=15° ve $\beta$=105° olduğu durum karşılaştırıldığında üçgen ve beşgen şekli penetrasyon olarak tek jetin çapraz akışa karşı direnç yaratacak yönde olduğu koşullarda daha yüksek penetrasyon göstermiştir. Karşılık jetlerin çapraz akışa karşı yönde olması durumunda jetler birbirine etkisi penetrasyon değerini biraz düşürmüştür. Diğer yandan en yüksek ve en düşük penetrasyon değerlerini karşılaştırıldığında $\alpha$=15° ve $\beta$=15° açılı üçgen şekilli jet $\alpha$=5° ve $\beta$=5° açılı beşgen şekilli jete göre de %25 daha yüksek penetrasyon derinliği sağlamaktadır.




**Şekil 3.20** Farklı açılardaki üçgen ve beşgen şekilli jetlerin $J$=8'de gösterdiği penetrasyon derinliğinin karşılaştırılması

# 4

# SONUÇ

Çapraz akış içerisinde gerçekleşen jet akışı pek çok konuda kullanıldığı için geçmişten günümüze uzanan çok sayıda çalışmanın yapılmasına yol açmıştır. Bu araştırmanın temel amacı, farklı jet şekillerinin, çapraz akışa karşı ve çapraz akış yönündeki eğimli jetlerin karışıma olan etkisinin araştırılmasıdır. Analizler, jet akış hızının sıcaklık dağılımları ve penetrasyonu üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaları nedeniyle farklı momentum akı oranlarında gerçekleştirilmiştir. Karışıma ilişkin yorumlar, jet akışından belirli bir mesafede elde edilen sıcaklık dağılımlarından elde edilen sıcaklık farkı oranı ve karışım sıcaklığı parametresi hesaplanarak sağlanmıştır.

Bu araştırmadan elde edilen temel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- $\alpha$=90°, $\beta$=90° için momentum akısı oranı arttıkça karşılıklı jetlerin etkileşimi artmakta ve karışımdaki sıcaklık farkı oranı azalmaktadır.
- *X/H*=0,25, 0,75, 1,25 ve 1,75 için $\alpha$=90°, $\beta$=90° durumu incelendiğinde her bir momentum akı oranı değerinde, en yüksek karışım ve penetrasyon derinliği üçgen şekilli jette, en düşük değer ise kare şekilli jette gözlenmiştir.
- Kare şekilli jetin diğer şekillere göre üst ve alt duvarlara yakın yerlerde türbülans kinetik enerjisini arttırdığı görülmüştür. Bu nedenle karşıt jetlerin etkileşimi gecikmekte ve sahip olduğu sıcaklığı dağıtması düşük olmaktadır.
- *X/H*=0,25, 0,75, 1,25 ve 1,75 bölgelerinde her bir momentum akı oranında karşılaştırıldığında $\alpha$=90°, $\beta$=90° için üçgen şekilli jet, kare şekilli jete göre maksimum %13 daha yüksek daha fazla sıcaklık farkı oranıyla daha iyi karışım etkisi göstermiştir.
- Karışım sıcaklığı parametresi, $\alpha$=90°, $\beta$=90° için karşılaştırıldığında üçgen şeklindeki jetin en düşük değere sahip kare şeklindeki jete göre *J*=4, *J*=8 ve *J*=16 için sırasıyla %3, %5 ve %8 daha düşük sıcaklık gösterdiği bulunmuştur.

- En yüksek penetrasyon gösteren üçgen jet ile en düşük penetrasyon gösteren kare jet karşılaştırıldığında, $\alpha$=90°, $\beta$=90° için $J$=4, $J$=8 ve $J$=16 için penetrasyon derinliği değerleri sırasıyla %20, %23 ve %31artmıştır.
- Çapraz akışta $\alpha$=5, 10, 15° ve $\beta$=5, 10, 15° açılarında olan üçgen ve beşgen şekilli jetlerde karşılaştırılmıştır. Açı artışlarında $\alpha$ açısı arttıkça sıcaklık farkı oranı düşmektedir, $\beta$ açısı arttığında ise sıcaklık farkı oranı aynı şekilde artmaktadır.
- Jetlere eğim eklenmesi ile şekillerin etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Karışım sıcaklığı değerleri karşılaştırıldığında üçgen şekilli jet $\alpha$=5, 10, 15° ve $\beta$=5, 10, 15° için beşgen şekilli jete göre sırasıyla %4, %5 ve %7 daha düşük çıkmıştır.
- Her iki jetin de çapraz akışa karşı olduğu durum olan $\alpha$=15° ve $\beta$=105° açılar incelendiğinde şekillerin etkisinin azaldığı tekrar görülmüş ve karışım sıcaklığı üçgen şekilli jet için yaklaşık %1 daha düşük çıkmıştır.
- Eğimli jetlerdeki penetrasyon derinliği incelendiğinde üçgen şekilli jet $\alpha$=5, 10, 15° ve $\beta$=5, 10, 15° için beşgen şekilli jete göre maksimum %14 daha yüksek çıkmıştır.
- Çapraz akışa karşı eğimli jetler ($\alpha$=15° ve $\beta$=105°) incelendiğinde ise üçgen ve beşgen şekli arasındaki penetrasyonda %7'lik bir fark çıkmaktadır.

Çalışma, her bir analizin Holdeman vd.'nin modeli [35] ile uyumluluğunu analiz sonuçları ile karşılaştırarak önemli bir benzerlik ortaya çıkarmıştır. Gelecekteki araştırmalar bu modeli geliştirmeyi, bunları bir programa dahil etmeyi ve makine öğrenimi yoluyla sıcaklık dağılımlarını tahmin her seferinde analizlere gerek kalmaksızın bulunmasını amaçlamaktadır. Böylelikle yanma odalarının ve sıcaklık dağılımının önemli olduğu diğer kritik alanların tasarlanmasını büyük ölçüde kolaylaştıracaktır.

# KAYNAKÇA


[1] Karagozian, A. (2014). The jet in crossflow. *Physics of Fluids*, *26*(10). https://doi.org/10.1063/1.4895900

[2] Gupta, J., & Saha, A. K. (2024). A Flow-Visualization Study of an Elevated Jet in Crossflow. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 473–484. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5990-7_41

[3] Margason R. J., (19-22 April 1993), Fifty Years of Jet in Cross Flow Research, AGARD Conference Proceedings, pp. 1-141, Winchester

[4] Sachidananda Behera, & Saha, A. (2020). Evolution of the flow structures in an elevated jet in crossflow. Physics of Fluids, 32. https://doi.org/10.1063/1.5129498

[5] Zhou, D., Chang, J., Tang, C., & He, L. (2023). Review on research progress in liquid jet in crossflow. International Communications in Heat and Mass Transfer, 148, 107003–107003. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107003

[6] Mahesh, K. (2013). The Interaction of Jets with Crossflow. Annual Review of Fluid Mechanics, 45(1), 379–407. https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101115

[7] Margason, R. J., 1993, "Fifty Years of Jet in Cross Flow Research," AGARD report CP-534

[8] Panda, P. P., Oluwatobi Busari, Lucht, R. P., & Laster, W. R. (2017). Effect of the nature of vitiated crossflow on the flow-field of a transverse reacting jet. Experiments in Fluids, 58(2). https://doi.org/10.1007/s00348-016-2288-4

[9] Pinchak, M. D., Shaw, V. G., & Gutmark, E. J. (2019). Flow-field dynamics of the non-reacting and reacting jet in a vitiated cross-flow. Proceedings of the Combustion Institute, 37(4), 5163–5171. https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.019

[10] Miller, W. A., Medwell, P. R., Doolan, C. J., & Kim, M. (2018). Transient interaction between a reaction control jet and a hypersonic crossflow. Physics of Fluids, 30(4). https://doi.org/10.1063/1.5018877

[11] Zuckerman, N., & Lior, N. (2006). Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling. Advances in Heat Transfer, 565–631. https://doi.org/10.1016/s0065-2717(06)39006-5

[12] Sarper, B., Kirişçi, N. E., & Albayrak, M. (2022). Elektronik Bileşenlerin Bir Çift Slot Jet ile Soğutulmasında Nozül Konumunun Soğutma Performansına Etkisi. Journal of Polytechnic. https://doi.org/10.2339/politeknik.1169199

[13] Corvera, C., & Shadi Mahjoob. (2024). Thermal Analysis of Jet-In-Crossflow Technique for Hotspot Treatment in Electronics Cooling. ASME Journal of Heat and Mass Transfer, 1–35. https://doi.org/10.1115/1.4064458

[14] Srinivasan, R., Berenfeld, A., & Mongia, H. C. (1982). Dilution Jet Mixing Program, phase 1. Ntrs.nasa.gov. https://ntrs.nasa.gov/citations/19830007319

[15] Srinivasan, R., Coleman, E., & Johnson, K. (1984). Dilution Jet Mixing Phase II Program. NASA STI/Recon Technical Report N, 03, 05865. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984STIN...0305865S/abstract

[16] Srinivasan, R., Myers, G., & White, C. (1985). Dilution jet mixing program, phase 3. NASA. Lewis Research Center, Turbine Engine Hot Section Technology, 1985. https://ntrs.nasa.gov/citations/19880001771

[17] Culun, P., Celik, N., & Pihtili, K. (2018). Effects of design parameters on a multi jet impinging heat transfer. Alexandria Engineering Journal, 57(4), 4255–4266. https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.01.022

[18] Demircan, T. (2018). Numerical Analysis of Cooling an Electronic Circuit Component With Cross Flow and Jet Combination. Journal of Mechanics, 35(3), 395–404. https://doi.org/10.1017/jmech.2018.11

[19] El-Jummah, A. M., Andrews, G. E., & Staggs, J. E. J. (2013). Conjugate Heat Transfer CFD Predictions of Impingement Jet Array Flat Wall Cooling Aerodynamics With Single Sided Flow Exit. White Rose Research Online (University of Leeds). https://doi.org/10.1115/gt2013-95343

[20] S Llucià, Terzis, A., Ott, P., & M Cochet. (2015). Heat transfer characteristics of high crossflow impingement channels: Effect of number of holes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A, Journal of Power and Energy, 229(5), 560–568. https://doi.org/10.1177/0957650915594074

[21] Wae-hayee, M., Tekasakul, P., Eiamsa-ard, S., & Nuntadusit, C. (2014). Effect of cross-flow velocity on flow and heat transfer characteristics of impinging jet with low jet-to-plate distance. Journal of Mechanical Science and Technology, 28(7), 2909–2917. https://doi.org/10.1007/s12206-014-0534-3

[22] Javadi, A., Javadi, K., Darbandi, M., Rahni, M. T. (2003). A New Approach to Improve Film Cooling Effectiveness, Using Combined Jets. Int. Gas Turbine Congress, IGIC'03Tokyo, Japan

[23] Zhong, L., Zhou, C., & Chen, S. (2018). Large-Eddy Simulations of Inclined Jets in Crossflow with Different Holes. Journal of Propulsion and Power, 34(5), 1098–1108. https://doi.org/10.2514/1.b36594

[24] Bayraktar, S., Yilmaz, T. (2008). Two-dimensional numerical investigation of film cooling by a cool jet injected at various angles for different blowing ratios. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 222(7), 1215–1224. https://doi.org/10.1243/09544062jmes905

[25] Abdala, M. M. A., Elwekeel, N. M. F. (2016). CFD Simulations of Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer for Annular Film Hole. Arabian Journal for Science and Engineering. Section B, Engineering, 41(11), 4247–4262. https://doi.org/10.1007/s13369-016-2028-3

[26] Sharif, M. A. R., Banerjee, A. (2009). Numerical analysis of heat transfer due to confined slot-jet impingement on a moving plate. Applied Thermal Engineering, 29(2-3), 532–540. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.03.011

[27] Caliskan, S., Baskaya, S., Calisir, T. (2014). Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets. International Journal of Heat and Mass Transfer, 75, 685–703. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.005

[28] Leena, R., Syamkumar, G., Prakash, M. J. (2018). Experimental and Numerical Analyses of Multiple Jets Impingement Cooling for High-Power Electronics. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 8(2), 210–215. https://doi.org/10.1109/tcpmt.2017.2783629

[29] Zu, Y. Q., Yan, Y., Maltson, J. D. (2009). CFD Prediction for Multi-Jet Impingement Heat Transfer. https://doi.org/10.1115/gt2009-59488

[30] Nada, S. A., Fouda, A., & Elattar, H. F. (2016). Parametric study of flow field and mixing characteristics of outwardly injected jets into a crossflow in a cylindrical chamber. International Journal of Thermal Sciences, 102, 185–201. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.11.017

[31] Heo, M.-W., Lee, K.-D., & Kim, K.-Y. (2011). Optimization of an inclined elliptic impinging jet with cross flow for enhancing heat transfer. Heat and Mass Transfer, 47(6), 731–742. https://doi.org/10.1007/s00231-011-0763-2

[32] Morris, R. M., Snyman, J. A., & Meyer, J. P. (2007). Jets in Crossflow Mixing Analysis Using Computational Fluid Dynamics and Mathematical Optimization. Journal of Propulsion and Power, 23(3), 618–628. https://doi.org/10.2514/1.22136

[33] Kartaev, E., Ktalkherman, M., Emel'kin, V. (2018). Flow field and crossflow mixing upstream and downstream the multiple jet injection plane in case of impinging jets in a cylindrical duct. AIP Conference Proceedings. https://doi.org/10.1063/1.5065156

[34] Naik-Nimbalkar, V. S., Suryawanshi, A. D., Patwardhan, A. W., Banerjee, I., Padmakumar, G., & Vaidyanathan, G. (2011). Twin jets in cross-flow. Chemical Engineering Science, 66(12), 2616–2626. https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.03.018

[35] Holdeman, J. D., & Walker, R. E. (1977). Mixing of a Row of Jets with a Confined Crossflow. AIAA Journal, 15(2), 243–249. https://doi.org/10.2514/3.60622

[36] Düz, H. (2019). Numerical and Experimental Study to Predict the Entrance Length in Pipe Flows. Journal of Applied Fluid Mechanics, 12(1), 155–164. https://doi.org/10.29252/jafm.75.253.29218

[37] Talebi, H., Saputra, A., & Song, C. (2016). Stress analysis of 3D complex geometries using the scaled boundary polyhedral finite elements. Computational Mechanics, 58(4), 697–715. https://doi.org/10.1007/s00466-016-1312-0

[38] ANSYS Fluent Theory Guide, 15th ed., Canonsburg, PA 15317, 2013.

[39] Shadi Mahjoob, & Taeibi-Rahni, M. (2004). Computational Study of Parameters Affecting Turbulent Flat Plate Film Cooling. https://doi.org/10.1115/gt2004-53027

[40] Kartaev, Ｅ. V., & Holdeman, J. D. (2020). Steady-state and unsteady Reynolds-averaged Navier-stokes modelling of cold jets-in-hot crossflow in a cylindrical duct for non-impinging, impinging, and strongly impinging jets. Heat and Mass Transfer, 56(7), 2285–2302. https://doi.org/10.1007/s00231-020-02853-6

[41] Maghrabie, H. M., Attalla, M., Fawaz, H. E., & Khalil, M. (2017). Numerical investigation of heat transfer and pressure drop of in-line array of heated obstacles cooled by jet impingement in cross-flow. Alexandria Engineering Journal, 56(3), 285–296. https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.12.022

[42] Tehrani, B., & H, F. (2008). Numerical Analysis of Opposed Rows of Coolant Jets Injected into a Heated Crossflow. International Journal of Industrial Engineering & Production Research, 19(5), 89–96. http://ijiepr.iust.ac.ir/article-1-130-en.html

[43] Zhang, C., Xu, G., Li, H., Sun, J., & Cai, N. (2014). The Effect of Weak Crossflow on the Heat Transfer Characteristics of Short-Distance Impinging Cooling. Journal of Heat Transfer, 136(11). https://doi.org/10.1115/1.4028081

[44] Chambers, A. C., Gillespie, D. R. H., Ireland, P. T., & Kingston, R. (2009). Enhancement of Impingement Cooling in a High Cross Flow Channel Using Shaped Impingement Cooling Holes. Journal of Turbomachinery, 132(2). https://doi.org/10.1115/1.3140282

[45] Oguntade, H.I., Andrews, G. E., Burns, A., Ingham, D., Pourkashanian, M. (2010). CFD Predictions of Single Row Film Cooling With Inclined Holes: Influence of Hole Outlet Geometry. Volume 4: Heat Transfer, Parts a and B. https://doi.org/10.1115/gt2010-22308

[46] Kim, S.I., & Hassan, I. (2010). Unsteady Simulations of a Film Cooling Flow from an Inclined Cylindrical Jet. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 24(1), 145–156. https://doi.org/10.2514/1.33167

[47] Adami, P., Martelli, F., F. Montomoli, & C. Saumweber. (2002). Numerical Investigation of Internal Crossflow Film Cooling. https://doi.org/10.1115/gt2002-30171

# TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

**Konferans Bildirileri**

**1**. Yıldız A., Dalkılıç A. S., Gönül A., Bacak A., “Investigation Of Mixing Of Jet Flow With Various Geometries And Cross Flow In A Confined Channel”, International Conference on Mechanical, Manufacturing, Industrial and Civil Engineering, Istanbul, May 30-31, 2024, pp 1-5.