

**GAZ TÜRBİNLERİNDE FİLM SOĞUTMA AKIŞ
KARAKTERİSTİKLERİNİN PIV YÖNTEMİYLE
İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Seyhun DURMUŞ

Eskişehir, 2017

**GAZ TÜRBİNLERİNDE FİLM SOĞUTMA AKIŞ KARAĞERİSTİKLERİNİN
PIV YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

Seyhun DURMUŞ

DOKTORA TEZİ

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Ocak, 2017

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1508F586 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Seyhun DURMUŞ'un "GAZ TÜRBİNLERİNDE FİLM SOĞUTMA AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN PIV YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ" başlıklı tezi 02/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

<u>Unvanı-Adı Soyadı</u>		<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı) :	Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ	
Üye :	Prof. Dr. Ramazan KÖSE	
Üye :	Doç. Dr. Can Özgür ÇOLPAN	
Üye :	Doç. Dr. Emin AÇIKKALP	
Üye :	Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ	

.....

Enstitü Müdürü

ÖZET

GAZ TÜRBİNLERİNDE FİLM SOĞUTMA AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN PIV YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Seyhun DURMUŞ

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak, 2017

Danışman: Prof. Dr. Hikmet KARAKOÇ

Çalışma kapsamında 1/9 ölçekte boyutlandırılmış bir yanma odası cidarında, slot film soğutma, efüzyon film soğutma ve dilüsyon mekanizmalarının hibrit etkileri incelenmiştir. Film soğutma hakkında literatürde yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda akış kinematiği hakkında detay bir çalışma yoktur. Bu tezde termal ölçümlerle beraber akış yapıları da ele alınmış ve literatürdeki bu boşluğa katkı sağlamıştır. Test düzeneğinde, ana akımdan gelen sıcak hava ile kompresörden gelen soğuk havanın çapraz akış mekanizmasında oluşan akış yapıları incelenmiş ve Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) ile hız haritaları, girdaplılık konturleri ve akış vektörleri gibi sonuçlar elde edilmiştir. IR termografi yöntemiyle de gerçek zamanlı plaka sıcaklık dağılımları görüntülenmiş ve farklı üfleme oranları için piksel sıcaklık değerlerinden film etkinlik katsayılarına ulaşılmıştır. Ayrıca HAD analizleriyle de 2 farklı konfigürasyon (slot film + efüzyon ile slot film + efüzyon + dilüsyon) ve 3 farklı üfleme oranları için optik hava tünelinin hibrit etkilerinin sayısal doğrulaması yapılmıştır. PIV ve HAD analizlerinde jet lift-off, CRVP, at nalı girdapları, kidney vortisleri ve resirkülasyon baloncukları gibi akış yapıları gözlemlenmiştir. Slot, film ve dilüsyon hibrit plaka ölçümlerinde eksenel ısıl etkinlik oranları açısından bakıldığında en etkin üfleme oranları efüzyon plakası için 0.24 kg/dak, dilüsyon plakası için de 0.35 kg/dak üfleme oranlarına denk gelen test koşullarında oluşmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gaz Türbinleri, Yanma Odası Cidar Soğutma, Film Soğutma, PIV, Kızılötesi Termografi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FILM COOLING FLOW CHARACTERISTICS IN GAS TURBINES WITH PIV METHOD

Seyhun DURMUŞ

Airframe Powerplant Maintenance Department

Anadolu University, Graduate School of Sciences, January, 2017

Supervisor: Prof. Dr. Hikmet KARAKOÇ

In this study, the hybrid effects of slot film cooling, effusion film cooling and dilution hole mechanism were investigated together in a combustion chamber liner scaled with a 1/9. There is no a detail work about full flow kinematics in a great majority of the literature done on film cooling. In this thesis, as well as the thermal measurement studies the detailed flow structures are discussed and contributed to fill the gap in the literature. The flow structures in cross flow mechanism, that occurs due to hot air from the main stream and the cold air from the compressor, the results such as velocity maps, swirl contours and flow vectors were obtained with Particle Image Velocity (PIV) method in the test setup. Real-time surface temperature distributions were also visualized by IR thermography and for different blowing ratios film efficiency coefficients were evaluated from the pixel temperature values. Also, numerical validation of the hybrid effects on the optical air tunnels was performed with CFD analysis for 2 different configurations (slot film + effusion, slot film + effusion + dilution) and 3 different blowing ratios. Flow structures such as jet lift-off, CRVP, horseshoe vortices, kidney vortices and recirculation bubbles were observed with both PIV and CFD analyzes. Under the corresponding test conditions, when looking at the spanwise averaged thermal efficiency ratios in the slot, film and dilution hybrid plates, the best thermal efficiency is seen for effusion plate at a 0.24 kg/min blowing ratio and for the dilution plate at a 0.35 kg/min blowing ratio.

Keywords: Gas Turbines, Combustor Liner Cooling, Film Cooling, PIV, Infrared Thermography.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tezin tamamlanmasında vizyonu, sonsuz anlayışı, problem çözme yeteneği ve zarif kişiliği ile rehberliğin çok ötesinde destek ve motivasyon sağlayan Danışmanım Prof. Dr. Hikmet KARAKOÇ'a teşekkürlerimi sunarım. Test düzeneğinin oluşturulmasında kesim ve montaj kısımlarında gerekli destekleri sağlayan Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi ve Torna Atölyesi çalışanlarına, her türlü teknik konuda destekleri için Yrd. Doç. Dr. Tolga YASA ve Emrah DAŞİK'e teşekkürü borç bilirim. Ayrıca çalışma arkadaşlarım Yasin ŞÖHRET'e ve Melih YILDIZ'a teşekkür ederim. Fedakârlıklarından ve desteklerinden dolayı değerli eşime, canım aileme, henüz hayatlarının en güzel dönemlerinde olan biricik çocuklarıma sonsuz teşekkür ederim. Mevcut laboratuvarın kurulması ve işler hala gelmesinde Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Komisyonu'nun sağladığı proje olanaklarının katkısı fazladır. Bu bağlamda bilimsel araştırma projelerine olan destekleri için Anadolu Üniversitesi'ne teşekkürü borç bilirim. Ayrıca BİDEP 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Burs Programının sağladığı maddi desteklerden dolayı da TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ocak, 2017, Eskişehir

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan "bilimsel intihal tespit programı"yla tarandığını ve hiçbir şekilde "intihal içermediğini" beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Seyhun DURMUŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
GÖRSELLER DİZİNİ.....	xvii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Gaz Türbinleri ve Türbin Soğutma Teknikleri	1
1.2. Yanma Odası ve Cidar Soğutma Teknikleri.....	6
1.3. Motivasyon ve Amaç	13
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	16
2.1. Film Soğutmaya Etki Eden Faktörler	16
2.2. Üfleme Oranı (Kütle Akı Oranı).....	17
2.3. Yoğunluk Oranı ve Momentum Akı Oranı.....	19
2.4. Ana Akım Türbülans Düzeyi.....	21
2.5. Delik Şeklinin Etkisi	24
2.6. Enjeksiyon ve Bileşim Açısı ile Delik Yapısının Etkisi.....	29
2.7. Diğer Faktörler	31
2.7.1. Yüzey pürüzlülüğü	32
2.7.2. Yüzey kavitesi	32
2.7.3. Buğu İlave Etkisi.....	33

2.8. Yanma Odası Cidarında Film ve Efüzyon Soğutma Çalışmaları.....	33
2.8.1. Yanma odası cidarı film soğutma çalışmaları.....	34
2.8.2. Yanma odası cidarı efüzyon soğutma çalışmaları	36
2.9. Gerçekçi Bir Yanma Odası Cidar Soğutma Modelleme Çalışmaları.....	39
2.9.1. Slot etkisi	40
2.9.2. Dilüsyon (dilution) etkisi.....	40
2.9.3. Girdap, çarpma ve çapraz akış etkisi	42
2.9.4. Konjuge ısı transfer etkisi.....	44
3. ARAŞTIRMANIN ÇERÇEVESİ.....	45
3.1. Film Soğutma Fiziği	45
3.2. Dinlenme Odası Hesapları	52
3.3. Hava Tüneli Boyutlandırma	54
3.4. Slot Film Soğutma Plakası.....	56
3.5. Efüzyon Soğutma Plakası	58
3.6. Efüzyon Soğutma +Dilüsyon Plakası.....	60
3.7. Test Koşulları.....	61
4. DENEY DÜZENİ.....	64
4.1. Deney Düzenine Ana Şeması.....	64
4.2. Radyal Fan	65
4.3. Hava Isıtıcı (Heater)	67
4.4. Kompresör ve Soğuk Hava Hattı	68
4.5. Hassas Hava Debimetresi.....	69
4.6. Dinlenme Odası (Plenum)	70
4.7. Hava Tüneli ve Test Kısım.....	71
4.8. PIV Lazer-Kamera Sistemi	73
4.9. Termal Kamera ve IR Camlar	78
5. YÖNTEM.....	81

5.1. PIV ve Ölçüm İlkeleri	81
5.2. PIV ile Görüntü Edinme	83
5.2.1. Tohumlama (seeding).....	84
5.2.2. Aydınlatma (illumination) ve optik lensler	86
5.2.3. Görüntü işleme ve kaydetme	88
5.3. PIV ile Görüntü İşleme	89
5.3.1. Dijital imaj işlemenin temelleri	90
5.3.2. En küçük kareler eşleşmesi.....	92
5.3.3. Çapraz korelasyon.....	92
5.3.4. Ortalama korelasyon.....	93
5.3.5. Adaptif PIV	94
5.4. PIV Deneyleri ve Akış Kinematığı	95
5.5. Infrared Termografi Tekniği.....	98
5.5.1. IR camların tünele montajı ve veri işleme yazılımı	100
5.5.2. IR termografi ile sıcaklık karakteristiklerinin görüntülenmesi.....	102
5.6. Basınç Ölçümleri	105
5.7. Sayısal Modelleme, HAD Analizlerin Yapılması	108
5.7.1. CAD Model.....	108
5.7.2. Ağ (mesh) ve sınır koşulları.....	109
5.7.3. Türbülans analiz modelleri.....	111
5.8. Analiz ve Ölçümlerin Doğruluğu	113
6. BULGULAR ve DEĞERLENDİRMELER.....	114
6.1. PIV Akış Analizi Sonuçları.....	114
6.2. Termal Analizler ve Film Etkinlik Oranı Sonuçları	134
6.3. HAD Analizleri Sonuçları.....	138
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	159
7.1. Sonuçlar.....	159

7.2. Öneriler	161
KAYNAKÇA.....	165
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1. Yanma Odası Tasarım Gereksinimleri	13
Tablo 3.1. Test Plakası Geometrik Parametreler	46
Tablo 3.2. Test Koşullarına Bağlı Parametreler	46
Tablo 3.3. Gerçek Yanma Odası Koşulları ve Test Koşulları.....	55
Tablo 3.4. Doğrulama Test Plakası ve Geometrik Parametreler.....	56
Tablo 3.5. Film Plaka Literatür Derlemesi.....	57
Tablo 3.6. Efüzyon Plaka Literatür Derlemesi.....	59
Tablo 3.7. Test Koşulları.....	62
Tablo 3.8. Efüzyon Plaka İçin Test Debileri.....	63
Tablo 3.9. Dilüsyon Plaka İçin Test Debileri.....	63
Tablo 4.1. Fanın Özellikleri	66
Tablo 4.2. Kamera Çözünürlük ve Saniye Başına Alabileceği Kareler (FPS).....	75
Tablo 4.3. FLIR A655sc Optik Veriler	79
Tablo 5.1. 25’lik Lensin Farklı Uzaklıklar için Görüş Alanı	103
Tablo 5.2. 45’lik Lensin Farklı Uzaklıklar için Görüş Alanı.....	104
Tablo 5.3. Fluent Kullanıcı Tanımlı Malzeme Değer Girişi	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Gaz Türbinleri Genel Şema.....	2
Şekil 1.2. İdeal Brayton Çevrim Eğrisi.....	3
Şekil 1.3. Türbin Soğutma Teknikleri	4
Şekil 1.4. Film Soğutma Şeması.....	5
Şekil 1.5. Yanma Odası Çeşitleri.....	6
Şekil 1.6. Yanma Bölgeleri ve Soğutma Deliklerinin Gösterimi	7
Şekil 1.7. Yanma Odasında Havanın Yüzdelik Dağılımı	9
Şekil 1.8. Plaka Soğutma Modellerinin Şematik Gösterimi.....	10
Şekil 1.9. Film Soğutma ve Efüzyon Soğutma.....	11
Şekil 2.1. Etkinliğin Üfleme Oranı ile Eksenel Değişimi.....	18
Şekil 2.2. Farklı Momentum Akırlarında Soğutma Jet Girdapları.....	20
Şekil 2.3. Zıt Yönlü Vorteks Çiftleri (CRVP) Gösterimi	22
Şekil 2.4. Soğutma Delik Konfigürasyonları.....	24
Şekil 2.5. Anti Vorteks Film Delikleri	26
Şekil 2.6. Oyuk ve Krater Şekilli Soğutma Delikleri	27
Şekil 2.7. Geriye Enjeksiyonlu Soğutma Delikleri.....	28
Şekil 2.8. Duş Başlığı Soğutma Deliklerinin Gösterimi.....	28
Şekil 2.9. Enjeksiyon ve Bileşim Açılarının Gösterimi.....	29
Şekil 2.10. Delik Uzunluğu ve Delik Adımının Gösterimi	31
Şekil 2.11. Yanma Odasında Akış Şematiğinin Gösterimi	41
Şekil 2.12. Çapraz Akış ve Enjeksiyon/Efüzyon Plakası	43
Şekil 3.1. Düz Plaka ve Film Tabakalı Plakada Isı Akırları	47
Şekil 3.2. Soğutma ve Ana Akım Hava Yoğunluk Hız Gösterimleri	48
Şekil 3.3. Dinlenme Odası Şematiği.....	52
Şekil 3.4. Literatürde Çalışılan Tünel Kesitleri.....	54
Şekil 3.5. Efüzyon Test Plakası Çizimi	58
Şekil 3.6. Efüzyon ve Dilüsyon Plaka Geometrisi	60
Şekil 4.1. Deney Düzenegi Ana Şeması.....	65
Şekil 4.2. Quadro Therm 780i Termal Hava Debimetre Yazılımı	70
Şekil 4.3. Optik Hava Tüneli Kesit Görünümü	72
Şekil 4.4. Dynamic Studio Paket Yazılımı.....	76

Şekil 4.5. Travers Sistem Kontrol Yazılımı	77
Şekil 5.1. Hız Ölçüm Teknikleri Sınıflandırma.....	82
Şekil 5.2. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm (PIV) Tekniği.....	83
Şekil 5.3. PIV Sistemi ve Veri İşleme Prosesi	84
Şekil 5.4. Farklı Çaplara ve Yoğunluklara Sahip Tohumlama Parçacıkları.....	85
Şekil 5.5. Sıvı Parçacık Jeneratörünün Çalışma Prensibi.....	85
Şekil 5.6. Lazerin Temel Çalışma Prensibi	86
Şekil 5.7. PIV Ölçümü için Başlatılmış Atım Zinciri.....	87
Şekil 5.8. Tekli/Çoklu Kare ve Pozlama	88
Şekil 5.9. PIV Görüntü İşleme Şematik Gösterimi	89
Şekil 5.10. PIV Alt İşlemler Algoritması	90
Şekil 5.11. Analog İmajların Dijital İmaja Dönüşümü.....	91
Şekil 5.12. Çapraz Korelasyonda Uzaysal Çözünürlüğün Bileşenleri	92
Şekil 5.13. Ortalama Korelasyon Tepeciklerinin Toplamı.....	93
Şekil 5.14. Ortalama Korelasyon Akış Şeması.....	93
Şekil 5.15. Sırasıyla Çapraz ve Adaptif Korelasyon Hız Dağılımı.	94
Şekil 5.16. Kamera Kalibrasyonu ve Deplasman Ölçekleme.....	95
Şekil 5.17. Çapraz Korelasyon Haritası ve Sinyal Gürültü Oranı Tepe Değeri	96
Şekil 5.18. Tohumlayıcı Parçacık Yoğunluğu.....	97
Şekil 5.19. Işığın Madde Üzerindeki Üç Değişik Tavrı	99
Şekil 5.20. İnfrared Termografi Genel Ölçüm Şeması.....	101
Şekil 5.21. Çinko Selonoid Camın İletim-Dalgaboyu Eğrisi	102
Şekil 5.22. Gerçek Zamanlı Sıcaklık Takibi.....	102
Şekil 5.23. Termal Kamera Görüş Alanı	103
Şekil 5.24. CFD Post Statik Basınç Ölçümleri.....	107
Şekil 5.25. CFD Post Slot Film ve Efüzyon Plaka Basınçları.....	107
Şekil 5.26. Hava Tüneli ve Dinlenme Odası (Slot + Efüzyon Plakası).....	108
Şekil 5.27. Hava Tüneli ve Dinlenme Odası (Slot + Dilüsyon Plakası)	109
Şekil 5.28. Ağın Gösterimi ve Sıklığı.....	109
Şekil 5.29. Duvar Etkilerinin İndirgenmesi.....	110
Şekil 5.30. Hava Tüneli Modeli ve Sınır Koşulları	111
Şekil 6.1. Tohumlayıcı Jet Çıkışı Ham İmaj	114
Şekil 6.2. Jet Akış Yukarı (Lift Off) Etkisi	114

Şekil 6.3. Hız Vektörü ve Resirkülasyon Baloncuğu	115
Şekil 6.4. Slota Gönderilen Tohumlayıcı Ham İmaj	116
Şekil 6.5. Slota Gönderilen Tohumlayıcı için Vektör Haritası.....	116
Şekil 6.6. Ana Akıma Gönderilen Tohumlayıcı ve Jet çıkışları.....	117
Şekil 6.7. Jetler Arasında Oluşan Resirkülasyon Bölgelerinin Gösterimi.....	117
Şekil 6.8. Efüzyon Jet Çıkışları PIV Ham İmajlar ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)	118
Şekil 6.9. Vektör Haritası ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, DOT).....	118
Şekil 6.10. Efüzyon Jet Çıkış Hız Vektörlerinin Gösterimi ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)	119
Şekil 6.11. U Hız Bileşeni Kontur Haritası ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)	119
Şekil 6.12. V Hız Bileşeni Kontur Haritası ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)	119
Şekil 6.13. Efüzyon Jet Çıkış Hız Şiddet Konturleri($\dot{m}=0.24$ kg/dak).....	120
Şekil 6.14. Girdaplılık Haritası ($\dot{m}=0.24$ kg/dak).....	120
Şekil 6.15. Efüzyon Jet Çıkışları PIV Ham İmaj ($\dot{m}=0.72$ kg/dak).....	121
Şekil 6.16. Dynamic Studio ile İmaj Maskeleme	121
Şekil 6.17. U Hız Bileşenine Ait Konturler ve Hız Vektörleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak).....	122
Şekil 6.18. V Hız Bileşenine Ait Konturler ve Hız Vektörleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak).....	122
Şekil 6.19. Adaptif PIV Doğrulama Ek Vektörleri	123
Şekil 6.20. Girdaplılık (Vortisite) Konturleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)	123
Şekil 6.21. Soğutma Jeti Hız Şiddetleri ($\dot{m}=0.48$ kg/dak).....	124
Şekil 6.22. U Hız Bileşenine Ait Konturler ve Vektörler ($\dot{m}=0.24$ kg/dak).....	124
Şekil 6.23. V Hız Bileşenine Ait Konturler ve Vektörler ($\dot{m}=0.48$ kg/dak).....	125
Şekil 6.24. U Hız Bileşenine Ait Konturler ($\dot{m}=0.48$ kg/dak).....	125
Şekil 6.25. Ana Akıma Gönderilmiş Tohumlayıcı ($\dot{m}=0.48$ kg/dak, AAT).....	126
Şekil 6.26. Hız Vektörleri($\dot{m}=0.48$ kg/dak, AAT)	126
Şekil 6.27. V Hız Bileşeni ($\dot{m}=0.48$ kg/dak, AAT).....	127
Şekil 6.28. Hız Şiddet Konturleri ($\dot{m}=0.48$ kg/dak, AAT)	127
Şekil 6.29. U/ U_{RMS} Hız Vektörleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, AAT)	128
Şekil 6.30. Hız Şiddetleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, AAT)	128
Şekil 6.31. V Hız Değişimi Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak AAT).....	129
Şekil 6.32. Dv/Dx Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak AAT)	129
Şekil 6.33. Diverjans Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, AAT)	130
Şekil 6.34. Dilüsyon Deliği Çıkış Jeti ($\dot{m}=1.05$ kg/dak, AAT)	130

Şekil 6.35. Dilüsyon Jet Vektörleri ($\dot{m}=1.05$ kg/dak, AAT)	131
Şekil 6.36. Dilüsyon V/V_{RMS} Jet Vektörleri ($\dot{m}=0.69$ kg/dak, AAT)	131
Şekil 6.37. Dilüsyon U/U_{RMS} Jet Vektörleri ($\dot{m}=0.69$ kg/dak, AAT)	132
Şekil 6.38. Dilüsyon Çıkış Jeti Ham İmaj ($\dot{m}=0.35$ kg/dak, DAT)	132
Şekil 6.39. Dilüsyon Deliği Hız Vektörleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak, DAT)	133
Şekil 6.40. Dilüsyon Deliği ve Hız Konturleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak, DAT)	133
Şekil 6.41. Ham Sıcaklık Dağılımı ($\dot{m}=0.35$ kg/dak)	134
Şekil 6.42. Akış Yönünde Film Soğutma Etkinliği Dağılımı	134
Şekil 6.43. Research IR Sıcaklık Değişim Eğrisi ($\dot{m}=1.05$ kg/dak)	135
Şekil 6.44. Termal Kamera Ham İmajları ($\dot{m}=0.69$ kg/dak)	135
Şekil 6.45. Termal İmajların (640x480 Matris) Matlab ile İşlenmesi	136
Şekil 6.46. Efüzyon Plaka Tüm Film Soğutma Etkinlik Değerleri	137
Şekil 6.47. Dilüsyon Plaka Tüm Film Soğutma Etkinlik Değerleri	137
Şekil 6.48. Zıt Yönlü Dönen Girdap Çiftlerinin Görünümü	138
Şekil 6.49. Jet Çarpması ve Efüzyon Jetlerinin Gösterimi ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)	138
Şekil 6.50. Plaka Üzerindeki Statik Basınçların Dağılımı ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)	139
Şekil 6.51. Plenum ve Tünelde Yoğunluk Dağılımları ($\dot{m}=0.72$ kg/dak.)	139
Şekil 6.52. Jet Çıkış Dip Noktadaki Akış Profili	140
Şekil 6.53. Yan Kesit Hız Vektörleri	140
Şekil 6.54. Slot Yuvası Akış Karakteristikleri	141
Şekil 6.55. Dinlenme Odası ve Delik Girişlerindeki Etkin Viskozite	141
Şekil 6.56. Akış Kesiti U Hızı ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)	142
Şekil 6.57. Akış Kesiti V Hızı ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)	142
Şekil 6.58. Farklı Yüksekliklerdeki Jetlerin Tepeden Görünümü	143
Şekil 6.59. Film Soğutma Delik Çıkışı Hız Vektörleri	144
Şekil 6.60. Film Delik TKE Konturları	144
Şekil 6.61. Akış Kesiti Akım Çizgileri	145
Şekil 6.62. Orta Yanal Kesitte w Hız Konturleri	145
Şekil 6.63. Slot +Efüzyon Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)	146
Şekil 6.64. Slot +Efüzyon Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)	147
Şekil 6.65. Slot +Efüzyon Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)	147
Şekil 6.66. Slot +Efüzyon Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)	148
Şekil 6.67. Slot +Efüzyon Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)	149

Şekil 6.68. Slot +Efüzyon Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak).....	149
Şekil 6.69. Film Delik Jetlerinin İzometrik ve Tepeden Görünümü	150
Şekil 6.70. Dilüsyon ve Efüzyon Jetlerinin İzometrik Görünümü	150
Şekil 6.71. Dilüsyon Jetinin Yandan Görünümü ($\dot{m}=0.35$ kg/dak)	151
Şekil 6.72. Yanal Kesit Dilüsyon Jet ve Resirkülayon Bölgeleri	151
Şekil 6.73. Plaka Üzerinde Dilüsyon Jet Etkilerinin Tepeden Görünümü	152
Şekil 6.74. Dilüsyon Jeti Kesit U Hız Konturü	153
Şekil 6.75. Dilüsyon Jeti Kesit Türbülans Edi Frekans Ölçeği(ω)	154
Şekil 6.76. Dilüsyon Jeti Eksenel Yayılımı ($y=8$ mm).....	154
Şekil 6.77. Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak)	155
Şekil 6.78. Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.69$ kg/dak)	156
Şekil 6.79. Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=1.05$ kg/dak)	156
Şekil 6.80. Akış Kesiti Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak).....	157
Şekil 6.81. Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak)	157
Şekil 6.82. Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.69$ kg/dak)	158
Şekil 6.83. Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=1.05$ kg/dak)	158

GÖRSELLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Görsel 2.1. 3B Yazıcıda Inkonel 625'ten İşlenmiş Bir Yanma Odası	39
Görsel 3.1. Film Slot Test Plakası.....	57
Görsel 3.2. Dilüsyon Test Plakası	61
Görsel 4.1. Laboratuvar ve Deney Düzeneği	65
Görsel 4.2. Radyal Salyangoz Fan	66
Görsel 4.3. Radyal Fan Kontrol Sürücüsü	67
Görsel 4.4. Hava Isıtıcı.....	67
Görsel 4.5. Kompresör ve Soğuk Hava Hattı.....	68
Görsel 4.6. İğneli Vana ve Debi Kontrolü	68
Görsel 4.7. Sierra 780i Termal Hava Debimetresi	69
Görsel 4.8. Poliüretan Levhadan Üretilmiş Dinlenme Odası.....	71
Görsel 4.9. Test Plakalarının 4 Eksenli CNC'de Kesimi	71
Görsel 4.10. Optik Hava Tünel Montajı.....	72
Görsel 4.11. Dinlenme Odası ve Hava Tüneli	73
Görsel 4.12. Litron LDY 304 Lazer.....	74
Görsel 4.13. Phantom v641 Yüksek Hızlı Kamera	75
Görsel 4.14. Sıvı Parçacık Jeneratörü ve Duman Jeneratörü	76
Görsel 4.15. Travers Hareket Sistemi	77
Görsel 4.16. Kalibrasyon Plakası ve 90 Derecelik Lazer Ayna Ünitesi	78
Görsel 4.17. FLIR A655sc Termal Kamera	78
Görsel 4.18. IR Kamera ve Termal Test Düzeneği	80
Görsel 5.1. Jet Çıkışları ve Lazer ile Aydınlatılmış Tohumlayıcı.....	96
Görsel 5.2. Tünel Üst Kapak Oyukları ve IR Cam	101
Görsel 5.3. IR Camların Yerleşimi	104
Görsel 5.4. Basınç Sensörü ve Veri Toplama Modülü (NI 9205).....	105
Görsel 5.5. Veri Toplama Panosu ve Veri Toplama Ara Yüzü	105
Görsel 5.6. Daldırma Tip Toplam Basınç ve Statik Basınç Problemleri	106

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bi	: Biot Sayısı
BR	: Üfleme Oranı
Cd	: Deşarj Katsayısı
Cp	: Özgül Isı (J/kg.K)
D	: Delik Çapı (m)
DR	: Yoğunluk Oranı
h	: Entalpi (J/kg.K)
I	: Momentum Akısı
Ig	: Görüntü Yoğunluk Alanı
K	: Termal İletkenlik Katsayısı (W/m.K)
kl	: Laminer Kinetik Enerji (m ² /s ²)
kt	: Türbülans Kinetik Enerji (m ² /s ²)
L	: Delik Uzunluğu (m)
m	: Kütle Akısı (kg/s)
Ma	: Mach Sayısı
Nu	: Nusselt Sayısı
PR	: Basınç Oranı
q"	: Isı Akısı (W/m ²)
r	: Dönüşüm Faktörü
Re	: Reynolds Sayısı
R_C(s)	: Ortalama Arkaplan Korelasyonu
R_D(s)	: Yerdeğişimi Korelasyon Tepeciği
R_F(s)	: Gürültü Terimi
R(s)	: Uzaysal Çözünürlük
R_{II}	: Uzaysal Çapraz Korelasyon
r_{ij}	: Dönme Oranı Tensörü
S	: Delik Adım (m)
s_{ij}	: Kayma Oranı Tensörü
T	: Sıcaklık (K)
Tu	: Türbülans Yoğunluğu
U	: Eksenel Hız Bileşeni (m/s)

V	: Radyal Hız Bileşeni (m/s)
W	: Z Yönündeki Hız Bileşeni (m/s)
x	: Eksenel Uzaklık (m)
Δs	: Deformasyon Alanı(m ²)

Yunan Sembolleri:

α	: Enjeksiyon Açısı
β	: Bileşim Açısı
γ	: Isı Kapasite Katsayıları Oranı
δ	: Sınır Tabaka Kalınlığı (m)
ε	: Türbülans Edi Disipasyon Oranı
η	: Adyabatik Film Etkinlik Katsayısı
θ	: Boyutsuz Sıcaklık
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
Φ	: Bütün Etkinlik Oranı
ω	: Girdap (1/s)
τ	: Kayma Gerilmesi
$\tau(x)$	: Görüntü Nokta Dağılım Fonksiyonu
μ	: Mutlak Viskozite (kg/m.s)
λ	: Lambda Operatörü
ν_T	: Türbülans Edi Viskozite

Alt İndisler:

aw	: Adyabatik Duvar
c	: Soğutucu Akışkan
dil	: Dilüsyon
ef	: Efüzyon
f	: Film
ms,∞	: Anaakım
ov	: Tüm Plaka
RMS	: Karakök Orta Hızlar
s	: Yüzey
w	: Duvar

KISALTMALAR:

AAT	: Ana Akıma Gönderilmiş Tohumlayıcı
AFE	: Adyabatik Film Etkinliği
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CRVP	: Zıt Yönlü Dönel Vorteks Çiftleri
DAT	: Dinlenme Odasına Gönderilmiş Tohumlayıcı
DJFC	: Çifte Jet Film Soğutma
FDCA	: İleri Difüze Bileşim Açılı
FDSA	: İleri Difüze Basit Açılı
FOV	: Kamera Görüş Alanı
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HTC	: Isı Transfer Katsayısı
IR	: Kızılötesi
IRT	: Kızılötesi Termografi
LDCA	: Yanal Difüze Bileşim Açılı
LDSA	: Yanal Difüze Basit Açılı
LDV	: Lazer Doppler Velosimetri
NHFR	: Net Isı Akı Düşüşü
PIV	: Parçacık Görüntülemeli Velosimetri
PSP	: Basınç Duyarlı Boya
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı
TKE	: Türbülans Kinetik Enerji
TLC	: Termokromik Sıvı Kristal
TSP	: Sıcaklık Duyarlı Boya

1. GİRİŞ

Gaz türbinleri ısıl enerjiyi mekanik enerjiye çeviren makineler olup havacılıkta, elektrik üretim santrallerinde, gemilerde, trenlerde, tanklarda ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Gaz türbinleri temel olarak kompresör, yanma odası ve türbin gibi üç ana kısımdan oluşur. Gaz türbinlerinde atmosferik hava kompresörde sıkıştırılıp yüksek basınç değerlerinde yanma odasına girer. Atmosferik hava yanma odasında yakıt ile karıştırılarak yüksek sıcaklıkta ve basınçta türbine girişi sağlanır. Türbinde egzoza kadar genişleyen yüksek sıcaklık ve basınçlı hava şaft gücüne dönüştürülüp kompresör, elektrik jeneratörü vb. yapıları tahrik eder. Gaz türbinlerinin çalışma esnasında oluşan yüksek sıcaklıklar gerek termal gerilmeler gerekse mekanik gerilmelere yol açarak hem malzeme ömrünü kısaltmakta hem de motorun malzeme dayanım sınırını belirleyerek motorun üst sınır verimini aşağı çekmektedir. Uçaklarda kullanılan motorların performansları en genel olarak itki/ağırlık oranına göre değerlendirilmektedir. İtke/ağırlık oranının artırılması da, kompresör basınç oranının ve türbin giriş sıcaklığının optimize edilerek, birim akış için maksimum gücün elde edilmesiyle sağlanır. Kompresör basınç oranının ve türbin giriş sıcaklığının birlikte artırılması eniyilemiş termal verimin yakalanması açısından önemlidir. Bunun yanı sıra, gaz türbinlerinin yanma odasında sıcaklık karakteristikleri kontrol altında olması istendiğinden ve cidarın malzeme ömrünü artırmak için yanma odası cidarına da soğutma uygulanır. Aksi takdirde yanma odası çıkışında yani türbin girişinde üniform olmayan sıcaklık dağılımları noktasal termal yüklere (hot spots) böylece termal gerilmelere ve malzemenin hasarlanmasına yol açmaktadır. Bu sebeplerle yanma odası cidarında hem cidar üzerinde göreceli küçük deliklerle cidar soğutma hem de yanma sonunda göreceli büyük çapta deliklerle akış seyreltme (dilüsyon) uygulanır. Sonraki bölümlerde gaz türbinleri ve türbin soğutma teknikleri ile yanma odası ve yanma odası cidar soğutma tekniklerine dair temel bilgilere yer verilmiştir.

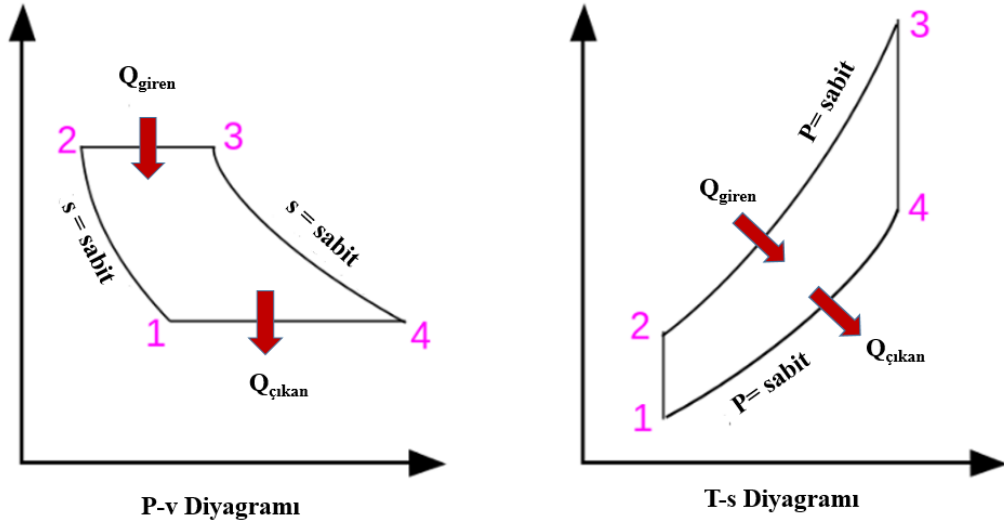
1.1. Gaz Türbinleri ve Türbin Soğutma Teknikleri

Türbin soğutma ile elde edilecek avantajlar temel olarak malzeme ömrü ve maliyet ile gaz türbinli motorun çıkış gücü ve termal verimi olmak üzere iki ana kategoride toplanabilir. Etkin türbin soğutma teknolojileriyle malzeme ömrü, malzemenin emre-amadelik süreleri ve kapasite kullanım faktörü artırılabilir; böylece bakım maliyetleriyle beraber işletme birim maliyetleri azaltılabilir. Ayrıca, etkin türbin soğutma

The diagram illustrates the components and energy flows of a gas turbine engine cycle. The main components shown are the Kompresör (Compressor), Yanma Odası (Combustion Chamber), and Türbin (Turbine). The cycle is divided into four states: (1) Hava Girişi (Air Inlet), (2) after compression, (3) after combustion, and (4) after expansion. The flow of air is indicated by a green arrow at (1) and a blue arrow at (2). The flow of fuel (Yakıt) is indicated by a grey arrow. The heat input to the combustion chamber is labeled Q_{giren} . The temperature at the turbine inlet is labeled Türbin Giriş Sıcaklığı. The work output of the turbine is labeled $W_{çıkan}$. The heat output from the cycle is labeled (4) $Q_{çıkan}$.

Kaynak: *Nguyen, 2010'dan revize edilmiştir.*

2



Şekil 1.2. İdeal Brayton Çevrim Eğrisi

Kaynak: Cengel ve Boles, 2014'ten revize edilmiştir.

Brayton çevrim verimi hesaplanırken net ısı miktarı ($q_g - q_c$) giren ısı (q_g) miktarına bölünerek hesaplanır. Sabit özgül ısı kabulü için Brayton çevriminin verimi Denklem 1.1'de ve ideal çevrim kabulleriyle sadeleştirilmiş çevrim verimi de Denklem 1.2'de verilmiştir.

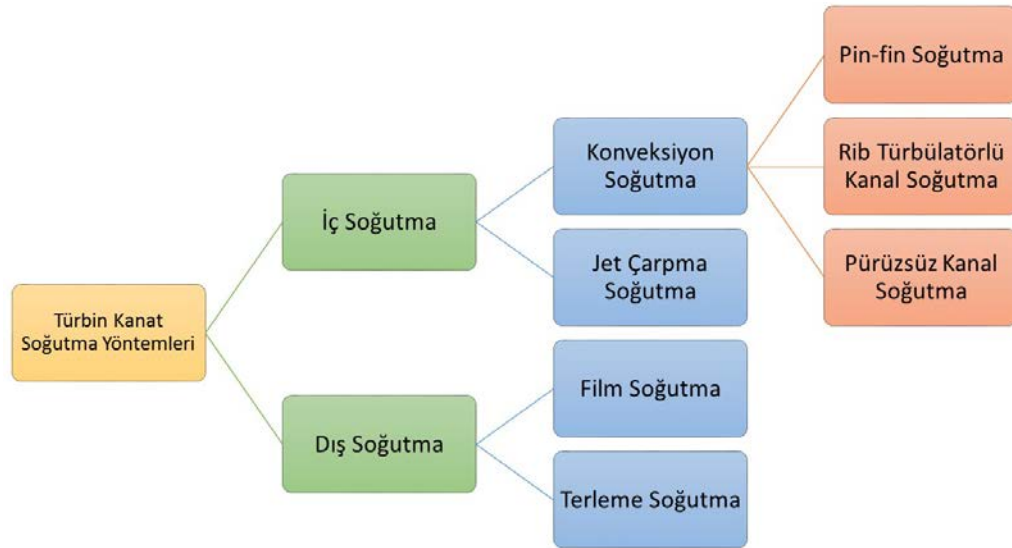
$$\eta_{\text{Brayton}} = w_{\text{net}} = 1 - \frac{q_c}{q_g} = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (1.1)$$

$$\eta_{\text{çevrim}} = \eta_{\text{ideal, Brayton}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} \quad (1.2)$$

Gaz türbinlerinde türbin kanatlarında soğutma işlemi genel çerçevede iç ve dış soğutma olmak üzere ikiye ayrılır. İçten soğutmada, kompresör kademesinden alınan soğutucu akışkan türbin kanatçıklarının iç kanallarından geçirilerek soğutucu akışkanın ısıyı kendi üstüne almasıyla soğutma yapılır. İç soğutma kendi içinde konveksiyon soğutma (pasaj soğutma, rib türbülatoörlü kanal soğutma, pin-fin soğutma) ve jet çarpma (jet impingement) soğutma diye ikiye ayrılır. Jet çarpma soğutma daha çok türbin kanadının hücum kenarı kısmında, rib türbülatoörlü soğutma orta kısmında ve pin-fin soğutma firar kenarı kısmında yapılan soğutma türleridir. Dıştan soğutma yönteminde ise

kanada açılan delikler sayesinde soğutucu akışkan kanadın dış yüzeyinde yanmış gaz ile kanat yüzeyi arasında tampon bir tabaka oluşturarak soğutma yapılır. Dış soğutma yöntemi kendi içinde film soğutma ve transpirasyon soğutma diye ikiye ayrılır. Film soğutmada kanat dış yüzeyine açılan deliklerden geçen havanın kanat dış yüzeyinde ince, koruyucu, tampon bir film tabakası oluşturarak kanadı yüksek sıcaklıklardan korur. Terleme (transpiration) soğutmada ise soğutucu akışkan, daimi gözenekli (porous) kanat yüzeyinin içinden geçmeye zorlanır ve böylece yüzeyi koruyan sürekli bir soğutma tabakası oluşturarak soğutma yapılır.

Türbin kanatlarında soğutma yöntemleri temel olarak aşağıdaki Şekil 1.3.'teki gibi sınıflandırılır.

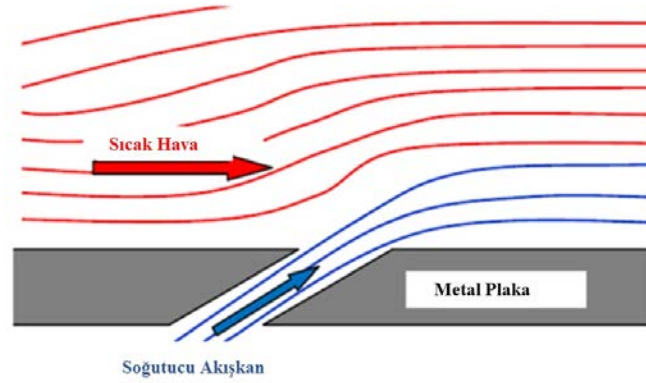


Şekil 1.3. Türbin Soğutma Teknikleri

Film soğutma, sıcak gazlarla çevrelenen plaka yüzeyini korumak için verimli bir yoldur. Soğutma havası plaka yüzeyindeki deliklerin içinden geçer ve plakanın üzerinde nispeten düşük sıcaklıklı bir koruma filmi oluşur. Film soğutma yöntemi, günümüz yüksek sıcaklık gaz türbinlerinin gelişimine olanak sağlamıştır. Film soğutma, genellikle birinci kademe hareketli kanatlar (vanes) ve sabit kanatlar (stators) gibi gaz türbininin en sıcak parçalarında uygulanır. Soğutucu akışkan açılan deliklerden çıkan jet etkisiyle ana akıma karışıp ana akımın çarpma, karışım ve baskın gelme etkisiyle yüzeye yönelerek yüzey üzerinde bir koruyucu tabaka oluşturur.

Soğutma tasarım analizi yapılırken ele alınacak başlıca parametreler aşağıda listelenmiştir:

- Temel alt tabaka malzeme seçimi,
- Kaplama malzemesi seçimi,
- Termal tasarım,
- Mekanik tasarımı,
- Aerodinamik tasarımı,
- Üretim ve maliyet,
- Malzeme ömrü,
- Sürdürülebilirlik.



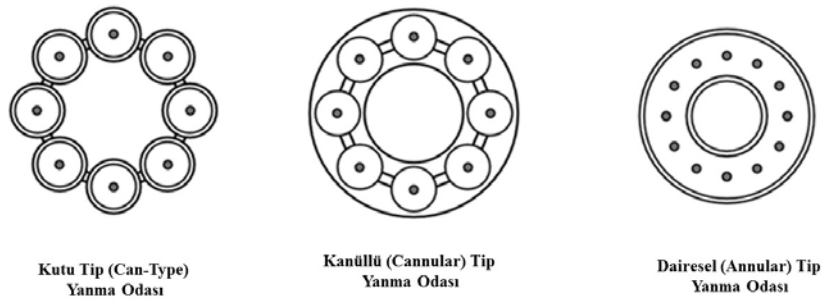
Şekil 1.4. Film Soğutma Şeması

Şekil 1.4.'te film soğutma ile ilgili şematik gösterim verilmiştir. Kanat yüzeyinde, soğutma havası hem koruyucu bir film tabakası oluşturur hem de kanada geçmesi muhtemel ısıyı üzerine alarak ortamdan uzaklaştırmaya çalışır. Film soğutma için gerekli soğutucu akışkan, önce kanadın içindeki kanallardan geçer ve iç soğutma görevini yapar. Yani bu soğutma yöntemi aslında iki yöntemin birleşiminden oluşmaktadır. Kanat yüzeyleri, kanat uçları, kanat platformları ile yanma odası cidar soğutulmasında özellikle film soğutma yöntemi kullanılır. Film soğutmada kullanılan akışkanın sıcaklığı, gaz türbinden üzerinden geçen yanmış gaz akış sıcaklığından oldukça düşüktür. Kanat üzerinde oluşturulan ince bir film tabakası ile kanada etkiyen termal yükleri düşürür ve böylece kanadın ömrünü arttırır. Şayet kanadın çalışma sıcaklığı, maksimum tasarım sıcaklığının 10 °C üzerinde ise, bu fark sıcaklık kanadın ömrünü yaklaşık %50 oranında azaltabilir. Film soğutma performansı, üfleme oranı, yoğunluk oranı, çeper eğriligi, üç

boyutlu dıştan akış yapısı, serbest akış türbülansı, sıkıştırılabilirlik, akış kararsızlığı, delik ölçüsü, delik şekli, deliğin konumu, enjeksiyon açısı ve bileşim açısı tarafından etkilenir. Genelde, soğutma verimi ve ısı transfer katsayısı çalışma ortamındaki birçok parametrelerin fonksiyonlarıdır. En temel parametreler akışın fiziksel yapısı ve geometrik yapısı olarak iki ana kategoride gruplandırılabilir. Özellikle adyabatik film soğutma verimi ve ısı transfer katsayıları soğutma geometrisi (plaka kalınlığı, üfleme açısı vb.) ile akışın fiziksel özelliklerinin (basınç, sıcaklık, debi, hız vb.) bir fonksiyonudur.

1.2. Yanma Odası ve Cidar Soğutma Teknikleri

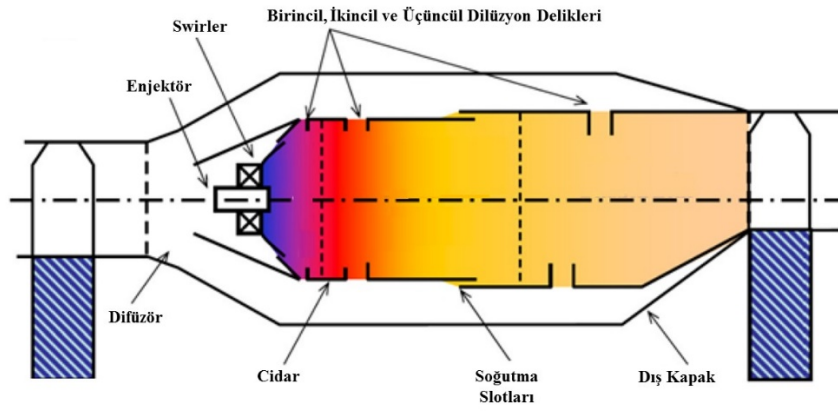
Yanma odaları gaz türbinleri, ramjet ve scramjet gibi motorlarda ara komponent olarak yer alır. Gaz türbinlerinde kompresörden gelen basınçlı hava yakıtla yakılarak türbine gönderilirken, ramjet ve scramjette ise difüzörden gelen hava ile yakıt karışımı yanarak yanma sonu ürünleri nozul ile atmosfere atılır. Gaz türbinlerinde yanma odaları kullanılan malzeme açısından yapısal üretim olarak genelde inkonel (nikel krom bazlı) alaşımlarından üretilir. Üç tip yanma odası çeşidi mevcuttur. Bunlar çok odacıklı silindirik kutu tipi (can type) yanma odası, dairesel bir boru şeklinde dizili çok odacıklı (cannular) yanma odası ve günümüzde en yaygın olarak kullanılan dairesel tek odacıklı (annular) yanma odasıdır. Şekil 1.5.'te yanma odası çeşitleri çizgisel şemalarla gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Yanma Odası Çeşitleri

Çok odacıklı kutu tip yanma odaları tarihsel gelişimde ilk yanma odası türleridir. Tasarım ve test etme olanakları diğerlerine göre basittir ve bakımı kolaydır. Bunun yanı sıra yapısal açıdan ağırdır ve yanma boyunca %7'lik yüksek basınç düşüşüne yol açarlar. Dairesel dizili çok odacıklı yanma odalarında yanma alanları bölünmüştür. Daha düzenli bir sıcaklık elde edilirken bakımı kutu tipe görece zordur. Yanma boyunca % 6'lık basınç

düşüşü yaşanır. Dairesel tek odacıklı günümüzde en yaygın kullanılan yanma odası tipidir. Yanma odası cidar dışında ekstradan muhafaza kapağı (casing) mevcuttur. Çıkış sıcaklığı diğer çeşitlere kıyasla daha düzenlidir. Dairesel tek odacıklı yanma odaları göreceli olarak hafiftir ve yanma boyunca %5'lik göreceli en düşük basınç düşüşü yaşanır. Yanma odalarında yanma sonunda oluşan emisyonlar, yanmaya dolayısıyla yanma odasına bağlı en güncel sorunlardan biridir. Genel olarak yanma sonu ürünleri olan CO₂ ile yanmamış hidrokarbonlar (UHC), karbon monoksit (CO) ile nitrojen oksitler (NO_x) emisyonların büyük bölümünü oluşturur.



Şekil 1.6. Yanma Bölgeleri ve Soğutma Deliklerinin Gösterimi

Kaynak: El Hossaini, 2013'ten revize edilmiştir.

Şekil 1.6.'da yanma bölgeleri ile soğutma ve dilüzyon deliklerinin gösterimi verilmiştir. Yanma odasında yer alan kısımlar ile temel işlev ve nitelikleri aşağıda verilmiştir:

Dış kapak (Casing) : Yanma odası cidarının dışında dış koruyucu kapak olarak bulunup yanma odasını muhafaza eder. Dış kapak, kompresörden gelen yüksek basınçlı havaya dayansın diye basınç kapları gibi kalındır ve basınç dayanımı yüksektir. Bakıma çok az ihtiyaç duyulan bir aksan olma özelliği vardır.

Difüzör: Difüzör kompresörden gelen yüksek hızlı havayı yanmaya daha hazır optimal bir hız seviyesine düşürür. Ağırlık ve maliyet açısından bakıldığında difüzör yapı olarak olabildiğince kısa tutulmaktadır.

Cidar (Liner): Yanma odasının en önemli bölümlerinden biridir. Üzerinde gerek soğutma (cooling) delikleri, gerek yanma sonu takviye (secondary) ve üçüncül seyreltme

(tertiary) delikleri bulunmaktadır. Cidar soğutma teknikleri olarak genelde film, efüzyon soğutma ve terleme (transpiration) soğutma gibi teknikler kullanılmaktadır. Bazı yanma odalarında türbin kanatlarındaki gibi termal yüklere karşı cidar kaplaması olarak termal bariyer kaplama da kullanılmaktadır.

Girdap Oluşturucu (Swirler): Kompresörden gelen basınçlı havanın yakıtla daha iyi karışması bakımından girdap oluşturarak karışım (mixing) oranını artırarak yakıtın tam yanmasına yardımcı olur. Bununla beraber çok yüksek girdap etkisinden kaynaklı ilk bölgede (primary zone) oluşan yüksek basınç gradyenlerine sahip girdaplar cidara çarparak cidara yakın duvar bölgelerinde vorteks hücreleri ve resirkülasyon bölgeleri oluşturarak soğutma deliklerinden çıkan havanın soğutma etkinliğini ciddi oranda düşürürler.

Enjektör: Esas amacı swirler ile beraber kompresörden gelen ilk temel havaya yakıtın enjekte edilmesini sağlamaktır. Basınç-atomize edici tip, hava patlatma tip, buharlaştırıcı tipi ve ön-karışım / ön-buharlaştırıcı tip gibi değişik tiplerde enjektör çeşitleri bulunmaktadır.

Tutuşturucu (igniter): Yakıt hava karışımının tutuşmasını sağlar. Günümüzde genel olarak elektrikli kıvılcım ateşleyici tip tutuşturucular kullanılır.

Yanma odasında soğutma incelenirken öncelikle yanma odasına hâkim dört çeşit hava türüne bakmakta fayda vardır. Yanma odasında bulunan temel 4 hava türü aşağıda verilmiştir.

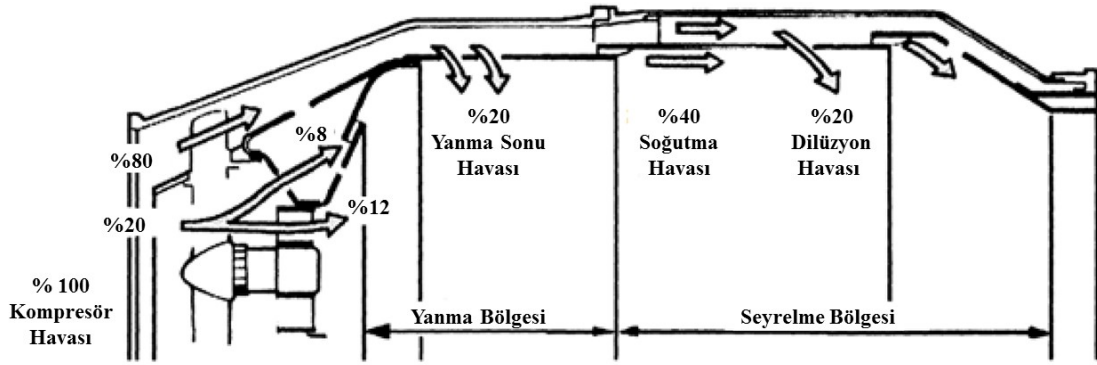
1-Ana Kompresör ve Yanma Havası (Primary Air): Kompresörden gelen ana hava olup yakıt ile karışarak alev tüpünün olduğu ilk bölgede (primary zone) ana yanmayı gerçekleştirir. Yanma odası tasarımına göre değişse de kompresörden gelen tüm hava debisinin yaklaşık %20'si civarını oluşturur.

2- Yanma Sonu Takviye Havası (Intermediate Air): Asıl amacı eksik yanma sonucu oluşan hem ısı enerji kaybına hem de CO ve UHC gibi istenmeyen emisyonlara yol açan yanma sonu ürünlerin alev tüpünün art bölgesinde takviye hava takviye ederek eksik yanmanın etkilerini minimize ederek yanma sonucu istenmeyen hidrokarbonlar ile karbon monoksitin tam yanmasını sağlamaktır. Yanma odası tasarımına göre değişse de kompresörden gelen tüm hava debisinin yaklaşık %20 civarını oluşturur.

3-Cidar Soğutma Havası (Cooling Air): Cidar soğutma havası, cidarda açılan film delikleri ya da efüzyon deliklerinden çıkan soğutma jetlerinin cidar üzerinde film tabaka etkisi oluşturarak cidarın termal yüklerden korunmasını sağlamaktır. Yanma odası

tasarımına göre değişse de kompresörden gelen tüm hava debisinin yaklaşık %40 civarını oluşturur.

4-Dilüsyon Havası (Dilution Air): Dilüsyon havasını asıl amacı hem yanma odasında termal yükleri kontrol altına almak hem de türbine giden havayı seyreltmek kaydıyla türbin girişinde oluşan noktasal termal gerilmeleri önlemek, sürünme etkileri ile yüksek sıcaklık korozyonu gibi yapısal hasarlardan türbin kanatlarını korumaktır. Yanma odası tasarımına göre değişse de seyreltme havası kompresörden gelen tüm hava debisinin yaklaşık %20 civarını oluşturur. Şekil 1.7.'de yanma odasında kompresörden gelen havanın yüzdelik debilerle dağılımı ve gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.7. Yanma Odasında Havanın Yüzdelik Dağılımı

Kaynak: Oates, 1989'dan revize edilmiştir.

Yanma odası cidar soğutmada uygulanan altı çeşit soğutma tekniği vardır. Bunlar konveksiyon (taşıma) soğutma, film soğutma, efüzyon soğutma, çarpma soğutma, terleme soğutma ve sıvı enjeksiyonla film soğutma gibi soğutma teknikleridir.

Taşıma (konveksiyon) soğutma: Slot film yarıklarıyla soğuk hava taşınımıyla sıcak havanın karşılaşmasını sağlayarak soğuk havanın tampon bölge oluşturarak görece sıcak havanın plaka üzerindeki termal etkilerini minimize etmeyi sağlayan soğutma tekniğidir.

Film soğutma: Plaka üzerine açılan tek sıralı deliklerden enjekte edilen soğutma jetlerinin plaka üzerinde koruma filmi oluşturarak belirli bir mesafe boyunca film koruma seridi oluşturarak soğutma oluşmasını sağlamaktır.

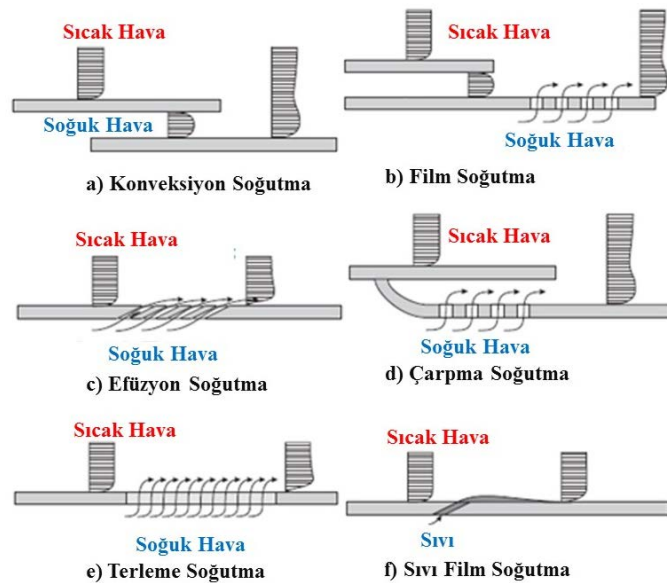
Efüzyon soğutma: Film soğutmanın özel bir çeşidi olup film soğutma deliklerinden göreceli küçük çapta ve çok fazla sayıda ve dizide açılmış deliklerle soğutma jetlerinin

plaka üzerinde homojen bir koruma oluşturarak çok sıralı film delikleriyle soğutma yapması tekniğine dayanır.

Çarpma (impingement) soğutma: Soğuk hava görece dar çaplardan geçirilerek soğutma jetlerinin hızlıca cidarın alt tarafındaki duvarda soğuk termal yükler oluşturarak soğutma yapma mantığına dayanmaktadır. Çarpma soğutma yanma odası cidarının yanı sıra yüksek termal yüklere maruz kalan türbin kanat ucunda kullanılan soğutma tekniğidir.

Terleme (transpiration) soğutma: Gözenekli ve geçirgen (porous) malzeme yapısıyla imal edilen cidarlarda plaka ya da cidar üzerinde delik açmadan soğutma havasının geçirgen gözeneklerden geçirerek doğrudan malzeme iç yapısını soğutma prensibine dayanır. Bütün soğutma çeşitleri arasında en etkin olanı olup malzeme teknolojisi ve uygulanabilirlik açısından yeni bir teknoloji olup uygulanabilirlik testleri de yeni yeni yapılmaktadır.

Sıvı film soğutma: Sıvı film soğutmada soğutucu akışkan gaz yerine sıvı kullanılarak açılan delikten sıvı enjekte ederek film soğutma oluşturmaktır. Sıvı film soğutmanın gazlara göre avantajı, gazlar sıcak hava ile karışıp jet yukarı etkilerden kaynaklı cidar üzerinde istenen soğutma örtüşmesini sağlayamazken sıvı jet yukarı etkiye kapılmadan direkt olarak plakada koruyucu alanlar oluşturmaktadır. Şekil 1.8’de plaka üzerinde soğutma türlerinin gösterimi verilmiştir.

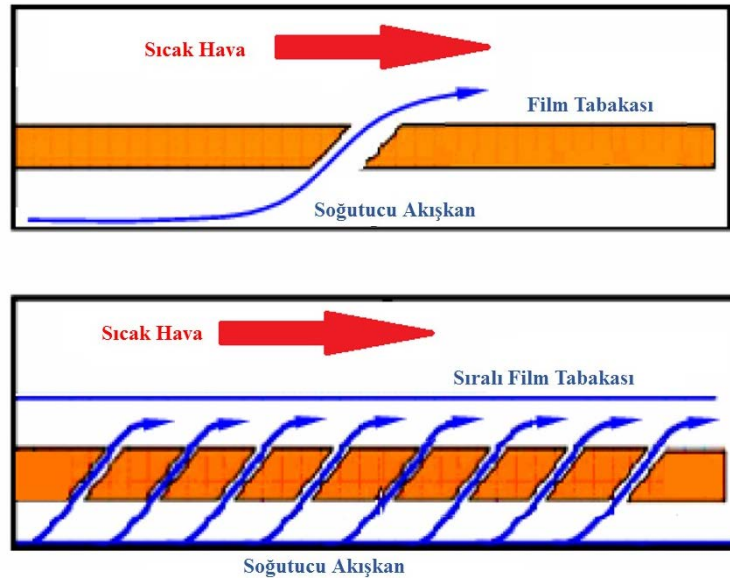


Şekil 1.8. Plaka Soğutma Modellerinin Şematik Gösterimi

Kaynak: Gustafson, 2001’den revize edilmiştir.

Film soğutmanın fikir öncülüğündeki ilk uygulamalar Wiegardt (1946)'ın anti-buzlanma üzerine yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır. Kanat hücum kenarında dış yüzeyde oluşan buzu eritmek için açılan deliklerden sıcak hava enjeksiyonu yapılarak buzlanmayı önleme üzerine kurulu mantık sonrasında tersine çevrildiğinde birebir film soğutma uygulamasına dönüştürülmüştür. Welsh (1961), Wiegardt (1946)'ın anti-buzlanma üzerine yaptığı çalışmaların etkilerini tersine çevirerek yani soğutucu jeti sıcak akıma karıştırıp sıcak hava ile duvar arasında soğuk havanın tampon bir tabaka oluşturarak cidarı soğutmasını sağlamıştır. Film soğutmanın ilk uygulamalarını roket motorlarının cidarlarını soğutma üzerinde uygulamışlardır.

Efüzyon soğutma tek sıra delikli film soğutmanın özel bir çeşidi olup çok fazla sayıda ve çoklu dizide küçük çapta film soğutma delikleriyle imal edilen cidar üzerinde homojen bir film tabaka oluşturarak soğutma yapmaktır. Şekil 1.9.'da film ve efüzyon soğutmanın karşılaştırılması verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere efüzyon soğutmada çoklu dizi delikler ve göreceli olarak da daha küçük çaplarda delikler yardımıyla soğutma yapma tekniğidir.



Şekil 1.9. Film Soğutma ve Efüzyon Soğutma

Film soğutmayı etkileyen temel fiziksel özellikler, yanmış gaz akışına göre soğutucu akışkanın üfleme oranı, hız oranı, yoğunluk oranı ve ana akım türbülans yoğunluğudur. Fiziksel özelliklerin yanı sıra geometrik karakteristiklerin de film soğutma verimi üzerinde etkisi vardır. Bu yüzden delik geometrisi, enjeksiyon açısı, bileşim açısı,

delik dizi sayısı, dağılımı, delik adımı (pitch) ve deliğin bulunduğu yüzeyin kavitesi gibi faktörler film soğutma verimini etkileyen geometrik faktörler olarak ele alınmaktadır.

Yanma odalarında performans kriterleri olarak aranan özellikler yüksek yanma verimi, minimum basınç düşmesi, çıkış sıcaklığının düzgünlüğü, yanma kararlılığı ve ateşleme kolaylığı gibi isterlerdir. Yanma verimi doğrudan yakıt sarfiyatını etkilerken basınç düşmesi ise hem yakıt sarfiyatını hem de net shaft işini etkiler. Yanma odası boyunun minimize edilmesi ve düşük akışkan debisi kullanımı yanma odasında basınç düşmesinin en düşük seviyede tutulması için kaçınılmaz tasarım girdileridir. Diğer taraftan kısa yanma odaları türbin kanatlarının yüksek sıcaklıklara ve primary zonda oluşan alev maruz kalmasına sebep olur. Ayrıca kompresörden gelen hava akışının hızı çok yüksekse alev türbin girişine doğru kayarak eksik yanma oluşmasına yol açacak, hava hızı çok düşükse de alev difüzör ucuna doğru geri teperek yakıt karşısında sönmülenecektir. Dolayısıyla bu tasarım isterlerinin bir kısmı birbiri ile zıt özelliklerdir. Çıkış sıcaklığının düzgün olması faydalanılabilen türbin giriş sıcaklığını belirleyeceği için gaz türbininden elde edilen net işi de doğrudan etkiler. Sıcaklık dağılımı düzgün değilse ortalama türbin giriş sıcaklığı düşürerek hem çevrim verimini düşürecek hem de kararlı çalışma ve uzun bir yaşam döngü ömrü için gerekli özelliklerde olacaktır. Yanma kararlılığı, geniş bir yakıt/hava oranı bölgesinde yanmanın dengeli olmasını ve rölantiden tam yüke kadar olan termal yük değişimlerinde yanmanın kaybolmaması anlamını taşır. Ateşlemenin gecikmesi sebebiyle yanma odasında birikecek yakıtın meydana getireceği sıcak çalıştırmayı engellemek için ateşleme kolaylığı veya pozitif ateşleme özelliği gereklidir.

Soğutma etkinliğini belirleyen faktörler aşağıdaki gibidir:

- Soğutma havasının yanmış gaz akış debisine oranı
- Soğutma havasının yanmış gaz akış yoğunluğuna oranı
- Yanmış gaz ve film soğutma akışkanında oluşan ana akım türbülans
- Delik şekli, delik kanal enjeksiyon açısı ve bileşim açısının etkisi
- Film tabakası oluşturacak soğutma havasının deliklerden çıktıktan sonraki yanal ve eksenel yayılımı
- Film soğutma deliklerinin sayısı ve birbirine olan mesafesi
- Yüzey kavitesi etkisi
- Yüzey pürüzlülüğü etkisi

Tablo 1.1. Yanma Odası Tasarım Gereksinimleri

ÜST PARAMETRE	ALT PARAMETRELER
İşlerlik	• Yerde Çalıştırma • Belirli İrtifada Ateşleme • Yalın Püskürtme • Sızdırmazlık
Performans	• Yanma Verimi • Basınç Düşüşü • Çıkış Sıcaklığı Dağılımı
Konfigürasyon	• Boyut • Ağırlık • Termal Yük Gelişimi • Montaj Yöntemi
Emisyonlar	• Karbon Monoksit (CO) • Yanmamış Hidrokarbonlar • Azot Oksitler (No_x)
Dayanıklılık	• Yapısal Bütünlük, • Yaşam Döngüsü • Sürdürülebilirlik

Yanma odası tasarım gereksinimleri Tablo 1.1.'de verilmiştir. Bu gereksinimlerin bazılarının birbiriyle çelişkili olduğu durumlarda üretici ilgili alt parametreler ile üst parametreler arasında uzlaşma yoluna giderek performans maliyet dengesi sağlar. Bir sonraki kaynak taraması ana bölümünde film ve efüzyon soğutmaya etki eden faktörler derinlemesine ele alınmış ve bu konularla ilgili yapılmış detay kaynak taraması ve literatür derlemesi çalışmasına yer verilmiştir.

1.3. Motivasyon ve Amaç

Havacılık endüstrisinde yaygın kullanımı olan gaz türbinlerinde birim maliyeti düşürme, işlerliği artırma, malzeme ömrünü artırma, itki verimini artırma ve birim çıkış gücünü artırma, yanma verimini artırma ve emisyonları azaltma en temel isterlerdir. Ülkemizde havacılık alanında geçmişte yapılan atılımlar ve elde edilen kazanımlar maalesef kesintiye uğramış ve bu alanda ülkemiz çağdaş uygarlık düzeyinin gerisinde kalmıştır. Ülke olarak bu açığı kapatmayı sağlayacak en önemli unsurun güncel gelişmelerin takip edilmesi ve bu alanlarda kazanımlar elde etmek ve deneyim sahibi

kişilerin sanayiye katkı sağlamasıdır. Yerli üretime ve savunma sanayiine katkı sağlamak için bu alanda güncel çalışmaları takip ederek bu alandaki AR-GE ve çağdaş teknolojik çalışmaları yapabilme bilgisine (know-how) ve tecrübesine sahip olmak gerekmektedir.

Tez kapsamında gaz türbinlerinin yanma odalarında cidar soğutma teknolojilerinde kullanılan slot film soğutma, efüzyon soğutma fiziğiyle beraber cidara açılan dilüsyon deliğinden çıkan jetlerin soğutma fiziğine nasıl etki ettiğiyle ilgili etkilerin deneysel ve sayısal analiz yöntemlerle detaylı bir çalışma yapılmıştır. Tezde çalışılan plakalar yanma odasının ikincil ve üçüncül bölgelerinde uygulanan soğutma teknikleridir. Yanma odasının birincil bölgesine hâkim olan yapı ise swirllerin oluşturduğu güçlü girdapların cidar üzerindeki etkilerine bu çalışmada girilmemiştir. Yanma odası cidar bölgelerinde efüzyon ve film soğutma testleri uygulanmış böylece farklı akış koşullarının ve farklı geometrik parametrelerin soğutma etkinliğini üzerindeki etkilerini anlamak için deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Yanma odası dış çeperleri iyi soğutulursa malzeme ömrü artar. Bunun yanı sıra soğutmaya giden artık havayı ikincil yanma bölgesine göndererek tam yanma oluşmasını böylece düşük emisyonu sahip bir yanma odası hayal olmaktan çıkar. Bunun yanı sıra yanma odasından çıkan hava doğrudan yüksek basınç türbinine gireceğinden iyi bir soğutma sayesinde yanma odası çıkışında üniform bir sıcaklık dağılımı oluşacak ve yüksek basınç türbini düzensiz termal jetlerin etkisinden korunacaktır. Plaka soğutma fiziğiyle ilgili ve çapraz jet akışlarıyla ilgili çalışmaların sayısı literatürde fazla olsa da slot film ve efüzyon plakasının etkilerinin birlikte yapıldığı çalışmalar ender rastlanır. Hatta slot film, efüzyon plaka ve çalışma literatürde sadece bir kişi tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada da gerek slot film + efüzyon gerekse slot film+ efüzyon +dilüsyon etkileri ayrı ayrı çalışılmış ve akış ve termal karakteristikleri detaylı bir biçimde irdelenmiştir.

Çalışma kapsamında, parçacık görüntülemeli velosimetri (PIV) akış karakteristiklerini izlemede kullanılmış ve infrared (IR) termografi de sıcaklık karakteristiklerini ve film soğutma etkinlik değerlerini elde etmede kullanılmıştır. Tez kapsamında oluşturulan veri toplama sayesinde debi, basınç ve sıcaklık değerleri gerçek zamanlı ölçülmüştür. Tez kapsamında önce yaygın bir kaynak taraması yapılmış, kaynak taramasına bağlı araştırma çerçevesi oluşturulmuş ve model ve test düzeneği üretimine gidilmiş ve düzeneğin akış karakteristikleri PIV yöntemiyle, termal karakteristikleri IR termografi yöntemiyle incelenmiştir. Ayrıca deney düzeneğinin CAD modeli

oluşturulmuş, modele 15 milyonun üzerinde hassas bir ađ (mesh) atılmış ve modelin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile validasyonu yapılarak çalışılan deneysel düzeneğin sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler ve testler sonucunda farklı debilerde film + efüzyon gerekse slot film + efüzyon + dilüsyon etkileri elde edilen hız ve türbülans karakteristikleri, termal karakteristikleri, debi basınç vb. fiziksel özellikler hakkında bulgular ve sonuçlar değerlendirilip önerilerle beraber tez sonlandırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çalışma kapsamında detaylı bir literatür derlemesi yapılmıştır. Kaynak taraması çalışmasında gaz türbinli motorlar ve film soğutma karakteristiklerinin kesişimi ile ilgili yayınlar, tezler, patentler ve temel alan kitapları incelenmiştir. Gaz türbinlerinde film ve efüzyon soğutmanın amaçları ve kısmen yöntemleri farklı olsa da hem türbinde hem de yanma odası cidarında uygulanan bir yöntemdir. Çalışma kapsamında edinilen kaynaklardan derlenen film soğutma karakteristikleri hakkında bir sınıflandırmaya gidilmiştir. Bu sınıflandırma özünde test geometrisi, test koşulları ve diğer faktörler olmak üzere üç ana kısma bölünmüştür. İncelenen ve derlenen literatür hakkında ana bir sınıflandırma yapıldıktan sonra literatürün gözden geçirilmesine başlanmıştır. Sonrasında ise özellikle yanma odasında yapılan çalışmalar hakkında ayrı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu kapsamda öncelikle yanma odası cidarında film, efüzyon soğutma ve gerçekçi bir yanma odası (slot, dilüsyon, girdap etkisi, konjuge ısı transfer etkisi) çalışmaları için yapılan güncel çalışmalar hakkında kaynak taramalarından derlenen bilgilere yer verilmiştir.

2.1. Film Soğutmaya Etki Eden Faktörler

Film soğutmaya etki eden faktörleri genel olarak üç ana gruba ayırabiliriz. Bu ana gruplar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

1. Soğutucu ve ana akım akış koşulları
2. Soğutma delik çapı ve geometrisi
3. Diğer faktörler

Film soğutmaya etki eden ana faktörleri aşağıda listelene alt gruplara bölebiliriz.

1- Soğutucu ve ana akım akış koşulları da kendi içinde beş gruba bölünebilir. Bunlar:

- Üfleme Oranı (BR)
- Yoğunluk Oranı (DR)
- Momentum Akısı Oranı (I)
- Türbülans Düzeyi (Tu)
- Yaklaşım Sınır Tabaka Kalınlığı (δ)

2- Soğutma geometrisi kendi içinde altı ana başlığa bölünebilir. Bunlar:

- Deliğın Şekli
- Enjeksiyon Açısı(α)
- Bileşim Açısının Etkisi (β)
- Delik Adımı (S_x/D , S_y/D)
- Deliğın Uzunluğu /Delik Çapı (L/D)
- Delik Dizi Sayısı
- Toplam Delik Sayısı (Gözeneklilik)

3-Diğer Faktörler. Bunlar:

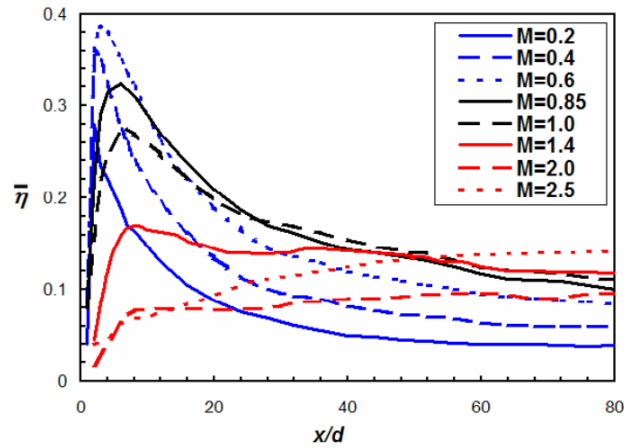
- Yüzey Kavisliliğı
- Yüzey Pürüzlülüğü
- Buğu Püskürtme Etkisi
- Konjuge Isı Transfer Etkisi

Türbin kanat yapısı kalınlık olarak yanma odası cidarına göre daha kalın olduğundan soğutma delik yapı konfigürasyonlarının uygulanabilirliğı daha fazladır. Yanma odası cidarının ise olabildiğinde ince tabakadan oluşması istendiğinden farklı geometrik konfigürasyonlarının uygulanabilirliğı kısıtlama getirir. Bu yüzden özellikle literatürde yapılan farklı geometrilerin büyük bir çoğunluğu türbin kanat yapısı üzerindeki çalışmalardır.

2.2. Üfleme Oranı (Kütle Akı Oranı)

Üfleme oranı ısı transfer katsayıları ver film soğutma etkinliğini etkileyen önemli bir parametredir. Üfleme oranı soğutucu akışkan debisinin sıcak ana akım debisine oranından hesaplanır. Üfleme oranını açarsak kütle debi akı oranları olarak karşımıza çıkar, yani soğutucu akışkan ile sıcak ana akımın hızları oranı ve yoğunlukları oranının çarpımıdır. Literatürde genel olarak kullanılan üfleme oranları 0.25 ila 3. arasındadır. İlk olarak Goldstein vd. (1974) 35° derecelik eğim açılı enjeksiyon film soğutma delik açılarında çalışmalar yapmıştır. İlk bulgular, belirli bir üfleme oranı değerine kadar film soğutma etkinliğı artarken sonradan düşmeye başladığı yönünde olmuştur. Sonrasında Bergeles vd. (1977) düşük üfleme oranlarından soğutucu akışkan hedef plaka yüzeyine daha fazla yapışırken yüksek üfleme oranlarında soğutucu akışkan yüzeyde film tabakası oluşturmak yerine yüzeyden jet akış yukarı (lift-off) şekilde hareket ederek yüzeyden

uzaklaşmaya çalışır. Ammari vd. (1990) ve Sinha vd. (1991) üfleme oranları ve yoğunluk oranlarının etkisini birlikte incelemiş ve aynı yoğunluk oranlarında Jabbari ve Goldstein (1978)'i doğrulayan çalışmalar yapmışlardır. Özetle, düşük üfleme oranlarında akışkan yüzeye tutunmaya çalışırken yüksek üfleme oranlarında jet akış yukarı akış etkisiyle ana akımla karışan akış yüzeyden uzaklaşma etkisi gösterir. Yüksek üfleme oranlarında akışkan yüksek momentuma bağlı yüksek atalet kuvvetlerinden dolayı yüzeyden jet akış yukarı etki gösterir. Bu bakımdan üfleme oranının tek başına incelenemeyeceğini ve üfleme oranı dışında momentum akı oranına da bakmak gerektiğini bulgulamışlardır. Yüksek üfleme oranlarında, jet kalkışı ana akımla soğutucu akışkan arasında oluşan eddies girdaplarını arttırarak daha fazla karışım oluşmasını sağlarken yüzeyden uzaklaştığı için film koruma tabaka oluşumu bundan kötü şekilde etkilenir.



Şekil 2.1. Etkinliğin Üfleme Oranı ile Eksenel Değişimi

Kaynak: Baldauf, 2002

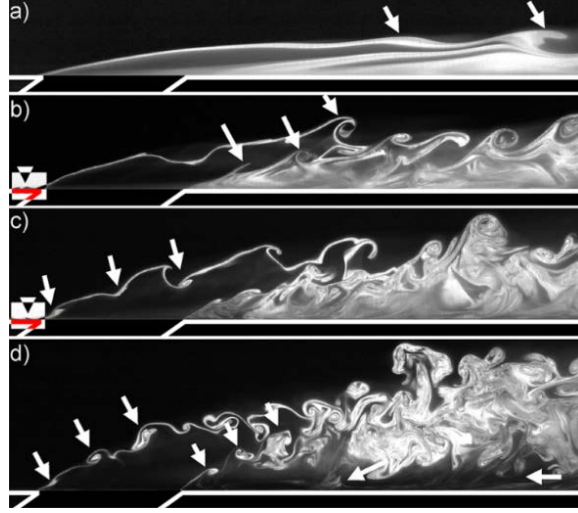
Şekil 2.1.'de Baldauf vd. (2002) yaptığı farklı üfleme oranlarında (BR ya da M) ısıl etkinlik oranının üfleme oranıyla eksenel değişim grafiği verilmiştir. Bu çalışmada adyabatik film etkinliğinin (η) üfleme oranı (M) = 0.6 değerine kadar sistematik olarak arttığı ve $M \geq 0.85$ değerinde sonra eğrinin tepe değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Düşük üfleme oranlarında ($M < 0.85$) delik çapının 5 katı eksen uzunluğuna kadar soğutma etkinliğinin arttığını sonrasında film koruma tabakası etkisini yitirdiğinden adyabatik film etkinliğinin de düştüğünü gözlemlemişlerdir. Goldstein ve Jin (2000) düşük üfleme oranlarında ($BR < 0.8$) enjeksiyon açısının ana akıma etkisi neredeyse önemsenmeyecek kadar etkisiz kaldığını sonucuna varmışlardır. Ekkad vd. (1997)

yoğunluk oranı ve üfleme oranını etkisinin film soğutma etkinliğine nasıl etki ettiğini deneysel olarak çalışmak için 2 farklı soğutucu akışkan kullanmış ve yüksek yoğunluklu soğutkanın yüksek üfleme oranlarında daha etkin soğutma etkinliği verdiği sonucuna ulaşmışlardır. Martiny vd. (1995) düşük enjeksiyon açılarındaki adyabatik koşullara ulaşmanın zor olduğunu ve düşük enjeksiyon açılarındaki delik çapı ne kadar büyük olursa olsun, ısı emici (heat sink) etkisinin ihmal edilmeyecek derecede olduğunu bulgulamışlardır.

Film soğutma üzerine yapılan güncel çalışmalar Baldauf vd. (2002), yüksek piksel çözünürlüğüne sahip infrared kamera ile aldıkları sıcaklık verilerini sayısal olarak işleyip sıcaklık değerlerinden adyabatik film soğutma etkinlik değerlerine ulaşmasıyla şekillenmiştir. Aynı zamanda sonlu eleman yöntemi ve görüntü işleme ile istenilen yerel sıcaklık istasyonları için noktasal etkinlik değerlerini hesaplamışlardır. Ayrıca hem yanal hem de eksenel eksenler boyunca ortalama film soğutma etkinlik değerlerine ulaşmışlardır.

2.3. Yoğunluk Oranı ve Momentum Akı Oranı

Momentum akı oranı (I) kütle debilerinin hızlarla bir daha çarpımından elde edilen oranlardır. Yoğunluk oranı genel olarak soğutucu akışkan yoğunluğunun ana akım akışkan yoğunluğuna oranıdır. Momentum akı oranı ile üfleme arasındaki tek parametre yoğunluk oranı (DR) olduğu için literatürde her ne kadar momentum akı oranı ayrı olarak incelense de sabit bir üfleme oranında yoğunluk oranı değiştiğinde momentum akı oranı da değiştiğinden sabit üfleme oranları için yoğunluk oran çalışmalarıyla momentum akı oranı çalışmaları benzer etkenleri inceleme çalışmalarıdır. Yoğunluk oranı ile momentum akısı arasında ters orantı olduğundan düşük yoğunluklu oranları, jet deliklerinden geçen hızlı dolayısıyla türbülansı artırıp yüksek ısı transfer katsayıları sağlar. Yüksek ısı transfer katsayıları aynı zamanda düşük adyabatik film etkinlik değerleri demektir. Şekil 2.2.'de değişik momentum akı oranlarında soğutma jetinin oluşturduğu girdaplar gösterilmiştir. Yüksek momentum akılarına sahip jet karışımında yüksek ediler oluşur. Bu ediler ısı transfer katsayılarını artırırken film soğutma etkinliğini düşürücü yönde etki yapar. Yüksek momentum akılarında yüksek karışımından kaynaklı akış rejimi duvardan uzak soğutucu tabaka oluşturma eğiliminden uzaklaşarak temel akış eğilimi jet akış yukarı akış şeklinde davranır (Bidan 2013).



Şekil 2.2. Farklı Momentum Akılarında Soğutma Jet Girdapları

Kaynak: Bidan, 2013

Thole vd. (1992) ortalama sıcaklık alan değerleri ölçümünden elde ettikleri sonuçlarda genel olarak momentum akı oranları ile jet hız profilleri arasında bir orantı olduğu yönünde yürüttüğü çalışmada düz plakalarda momentum akı oranlarının

- $I < 0.4$ yüzeye tutunmuş jetler (fully attached jets)
- $0.4 < I < 0.8$ hem tutulu-hem ayırık jetler (detached/reattached jets)
- $I > 0.8$ tam ayırık jetler (fully detached jets)

şeklinde oluştuğu sonucuna varmışlardır. Makki ve Jakubowski (1986) yoğunluk oranının etkisi ile ilgili yaptıkları ilk çalışmalarda yoğunluk oranı artışının film soğutma etkinliğini düşürdüğünü iddia etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda farklı soğutucu akışkan olarak helyum, nitrojen ve CO_2 gibi gazlar ile çalışmışlardır. Ammari vd. (1990) $\text{DR}=1.0$ ve $\text{DR}=1.52$ oranlarında 2 farklı yoğunluk oranları için sabit üfleme oranında 35° enjeksiyon açısıyla film soğutma deliklerinde yaptıkları çalışmada düşük yoğunluk oranlarının film soğutma etkinliğini düşürdüğünü bulgulamışlardır. Düşük yoğunluk oranlarının yüksek momentum akısı demek olduğunu ve düşük yoğunluk oranlarında jet deliklerinde yüksek girdaplı edilerin (eddies) oluştuğunu bulgulamışlardır. Ayrıca üfleme oranı ya da yoğunluk oranını tek başına bir parametre almak yerine ikisinin kombine etkisini tek parametrede inceleyen momentum akı oranı ile ele alınması gerektiğini savunmuşlardır.

Sinha vd. (1991) 1.46 üfleme oranında 1.0'den 1.52'ye kadar olan yoğunluk oranı aralıklarda değişiminin film soğutma etkinliğinin sadece % 10 oranında değiştiğini gözlemlemiştir. Thole ve Knost (2005) türbin kanat gövde birleşim yerinden yaptıkları

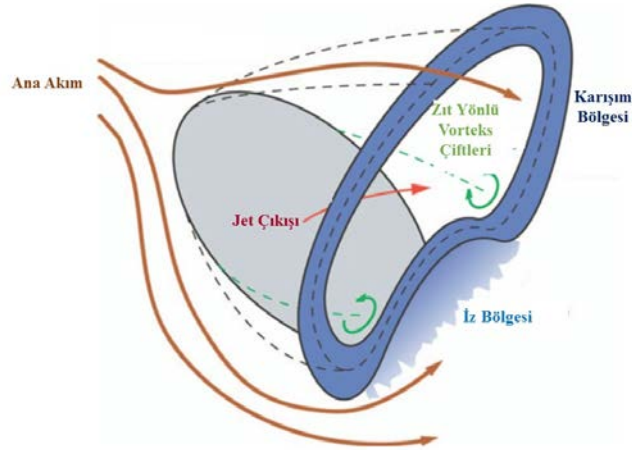
film soğutma çalışmasında yüksek momentum akı oranlarının yüzeyde süprüntü etkisi yaratarak adyabatik film soğutma etkinliğini artırıcı etki yapmakta olduğunu öne sürmüşlerdir. Coulthard vd. (2007), Thole ve Knost (2005)'un çalışmalarını doğrulayan çalışmalar yapmışlardır. Jet ayrılması düzeyinin, zıt yönlü dönen girdap çiftleri (CRVP) bölgesinde oluşan en düşük sıcaklığın duvar arasındaki mesafe ve akım yönünde ilerleyen mesafe arasındaki ilişki ile bağlantılı olduğunu öne sürmüşlerdir. Ethridge vd. (2001) ile Narzary vd. (2011) film soğutma delik geometrisine ve yoğunluk oranlarına bağlı olarak maksimum ve optimum film soğutma etkinlik değerlerini ölçmüşlerdir. Delik çıkış çap artışının film soğutma etkinliğinin de arttığını soğutucu jetlerinde daha yüksek momentum akı oranlarına ulaştığını bulgulamışlardır. Yüksek momentum akılarına rağmen uygun tasarlanmış bileşim açısının (compound angle) soğutma jetlerini yüksek miktarlarda bile yüzeye tutunup akışın yanal dağılımını arttırarak daha fazla film soğutma etkinliği elde etmesine olanak sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

2.4. Ana Akım Türbülans Düzeyi

Ana akım türbülans düzey başlığı birçok parametreden oluşmaktadır. Bunlar; türbülans yoğunluğu (T.I.), türbülans düzeyi (Tu), yaklaşım sınır tabaka kalınlığı (δ) basınç gradyanları, Reynolds sayısı, yakın duvar yapıları, akış yukarı soğutucu akış yapısı soğutucu ve ana akımla ilgili temel yapılardır. Fan şekilli deliklerden önce yapılan silindirik delikli çalışmaların tamamı zıt yönlü dönen girdap çifti (Counter Rotating Vortex Pair, CRVP) oluşumuna yani kidney ve anti kidney girdaplarının oluşumuna yol açmaktadırlar. Zıt yönlü dönen vorteks çiftleri ilgili ilk detaylı çalışmayı Andreopoulos ve Rodi (1984)'te yapmıştır. Haven ve Kurosaka (1997) zıt yönlü dönen girdap çiftinin birbirleri üzerinde eş baskın etki oluşturmaya çalıştığını iddia etmiştir. Bu etki soğutma jetini yüzeyden yukarıya jet akış yukarı doğru uzaklaştırırken ana akım jetini de jet akış aşağı etki ile soğutma jetine karıştırarak jetin akış aşağı hareket etmesine yol açmaktadır. Plesniak (2006) kısa soğutma deliklerinden çıkan jetlerin çapraz akışta etkileri HAD yöntemiyle incelemiş ve zıt yönlü dönen vorteksler hakkında detaylı bir çalışma yürütmüştür.

Literatürde incelenen türbülans düzeyleri genel olarak %0.5 ile %20 arasındaki değerlerdir. Gerçekçi bir motor yanma odası cidarlarında ve türbin kanatlarında türbülans düzeyi (Tu) %10-%15 arası iken pürüzsüz düz plaka ile yapılan deneysel çalışmalarda türbülans düzeyi yaklaşık %1.5-2 civarındadır. Türbülans düzeyin en doğrudan etkilediği

faktör ise sınır tabaka kalınlığı (δ) faktörüdür. Sınır tabaka, gelişimi itibariyle sıralı deliklerin olduğu bir yapıda süperpozisyon etkisiyle farklı akış yapıları gösterme etkisine sahip olduğundan film plaka kalınlığını da doğrudan etkileyen en önemli akış parametresidir. Türbülans yoğunluk değerleri hem soğutucu akışkanda hem de ana akımda oluşan farklı türbülans yoğunluk değerleri olup film soğutma etkinlik değerlerinde oluşan karekök orta hızlar üzerinde ciddi etkiye sahiptir. Şekil 2.3.'te zıt yönlü dönen girdap çifti (CRVP) yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Zıt Yönlü Vorteks Çiftleri (CRVP) Gösterimi

Kaynak: Johnson, 2012'den revize edilmiştir.

Kadotani ve Goldstein (1979) ile Bons vd. (1996) ana akım türbülans düzeyi arttıkça plaka üzerindeki film soğutma etkinliğinin düştüğünü söylemiştir. Yüksek ana akım türbülans düzeyleri karşımı oranını yani ısı transfer katsayılarını artırarak film soğutma etkinliğini düşürücü yönde etki yapmaktadır. Drost vd. (1997) düşük üfleme oranlarında ($BR < 1.5$) ana akım türbülans düzeyi yüksek olduğundan soğutucu akışkanın jet yapısını modellemenin zor olduğunu söylemişlerdir. Fakat yüksek üfleme oranlarında soğutucu akışkan jetinin momentum akı oranı ana akımdan yüksek olduğundan karışım oranı artarak jetin yüzeye yapışmasını önler böylece film soğutma etkinliğini de düşürür. Mayhew vd. (2003) infrared termografi tekniği ile yüksek üfleme oranlarında ana akım türbülans yoğunluğunu artırarak yüksek üfleme oranlarından film soğutma etkinliğinin düşmesine yol açtığı sonucuna ulaşmışlardır. Ou ve Rivir (2001) %1 ile %20 arasında değişen farklı türbülans düzeyleri için thermochromic liquid crystal (TLC) tekniği ile yaptıkları termal ölçüm çalışmasında farklı üfleme oranlarında (1.0, 1.5, 2, 2.5) türbülans düzeyi etkisinin Frossling Sayısı ($Fr = Nu/\sqrt{Re}$) üzerinde önemli bir faktör

olduğunu bulgulamışlardır. Saumweber vd. (2003) %3.6 ila %11'e kadar türbülans düzey aralıklarında çalışmalar yapmış ve türbülans düzey artış etkisinin fan şekli deliklerin ısı transfer katsayıları artış etkisinin silindirik deliklere göre daha fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Mayhew vd. (2002)'a göre kavislilik (curvature) etkisi olmadan net ısı akı düşüşü (NHFR) soğutucu akışkanın türbülans düzeyi ile lineer olarak düştüğünü öne sürmüşlerdir. Düşük üfleme oranlarında, silindirik film delikleriyle şekilli film deliklerine kıyasla ana akım türbülans düzeyini etkisi daha azdır. Yüksek üfleme oranlarında ana akım türbülans düzey etkisinin şekil üzerindeki etkisi nerdeyse ihmal edilebilir. Schmidt ve Bogard (1996) göre türbülans düzeyi (Tu) %8'den büyük olduğundan film soğutma etkinliğinde önemli düşüşler olurken türbülans düzeyi değeri %17 değerlerine vardığında film soğutma etkinliği sıfıra doğru yaklaşır. Mayhew vd. (2004) yaptığı çalışmada yüksek türbülans yoğunlukları soğutucu akışkanı kidney vortislerinin etkisiyle de komşu deliklerde de yüksek karışım oranı yani ısı transfer artışı sağlamaktadır.

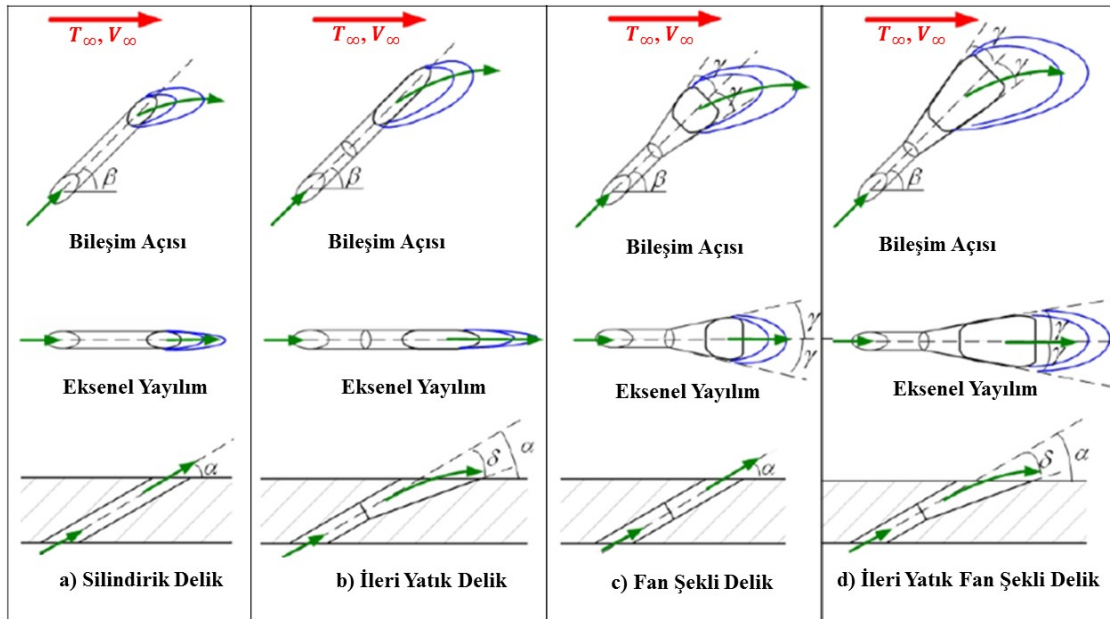
Simon (1986), Marek ve Tacina (1975)'nin NASA'da yapılan çalışma bulgularının üzerine yaptığı çalışmada film soğutmanın bir eş baskın karışım akışı olduğunu ve karışım direncinin kontrolü için türbülans yoğunluklarının incelenmesi gerektiğini düşünmüş ve Marek ve Tacina (1975)'nin modellerini büyötmüştür. Simon (1986), tezini Abramovich (1963)'in klasik jet teorisiyle birleştirerek ana akım türbülansın slot film soğutma etkisi üzerinde bir çalışma yapmıştır. Film soğutma, soğuk ile sıcak hava jet karışımı bir çeşit çapraz akış (crossflow) olduğundan bu etki jet dinamiğinin incelenmesine dayanır.

Literatürde çapraz akışla ilgili birçok bir çalışma mevcuttur. Anderopoulos ve Rodi (1984) yaptıkları çapraz akış jet karışım çalışmasında alttan gelen jetin ana akımla karışmaya çalıştığını ana akım jetinin baskın gelerek alttan gelen jeti aşağı doğru eğerken jet de ana akım jetini yukarı yönde ittiğini öne sürmüşlerdir. Muldoon ve Acharya (1999) delik çıkışında kidney ve anti-kidney vorteks oluşumunu gözlemlemişlerdir. Soğutma jetinin yüzeyden uzaklaşma eğilimi gösterdiğini buna rağmen ana akım jetinin jeti duvar sınır tabakaya doğru ittiğini bulgulamışlardır. Ayrıca çapraz akış jetinden ana akımın jet karşılaşmanın olduğu yerde at nalı girdaplarına bölündüğü ve zıt yönlü dönen vorteks çiftlerinin oluştuğunu (CRVP) oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Wright vd. (2011)'de yaptıkları çalışmada, türbülans yoğunluğunun fan şekilli delikler üzerindeki etkisini incelemiş ve fan şekilli deliklerde türbülans yoğunluk artışının ana akımla soğutma jetleri

arasında daha az etkileşim oluşturduğundan artan türbülans yoğunluğunun düşük üfleme oranlarında fan şekilli deliklerde daha iyi sonuçlara yol açtığını belirtmiştir.

2.5. Delik Şeklinin Etkisi

Soğutma delikleri geometrisi ele alınırken deliğin şekli, enjeksiyon açısı, bileşim açısı, delik adımı, L/D , dizi sayısı ve toplam delik sayısı gibi parametreler ele alınmalıdır. Bu bölümde en temel etken olan delik şekli ele alınacaktır. Geleneksel soğutma tekniklerinin büyük bir çoğunluğu yuvarlak yani silindirik şeklindeki deliklerle yapılır. Daha sonra silindirik delikler yerini ileri ve yanal difüzyonu arttıran fan şekli delik yapılarına bırakmıştır. Maliyet ve üretim zorlukları fan şekli deliklerin kullanımını ve yaygınlaşmasını olumsuz yönde etkiler. Yanal ve ileriye doğru uzanan delikler jet yukarı akış oranını düşürdüğünden yuvarlak deliklere nazaran kanat veter uzunluğunca hesap edilen ortalama film etkinlik değerini yükseltmektedir. Bu etki düşük üfleme oranlarında kendini hissettirmezken yüksek üfleme oranlarında daha fazla belirgin hale gelir. Fan şekli delikler, yuvarlak deliklere nazaran 3 kat daha iyi soğutma etkinliği sağlar. Fan şekilli delikler, silindirik şekillerdeki gibi jet yukarı etki ve jet ayrılması oluşturmadığı için plaka üzerinde soğutucu akışkanın yüzeye tutunarak film tabaka oluşturma eğilimini artırır. Şekil 2.4.’te silindirik, fan şekli ve geriye yatık (laidback) soğutma deliklerinin gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Soğutma Delik Konfigürasyonları

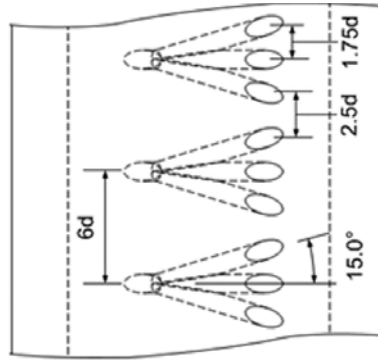
Kaynak: Gao, 2007’den revize edilmiştir.

Thole vd. (1998) yaptığı çalışmada jet çıkışında genişlemiş alanın ortalama hızda bir düşme yaratacağından soğutma jetinin yüzeye tutunma eğilimini artırdığını ve bunun da film soğutma etkinliğini artırdığını öne sürmüştür. Bunker (2010) geriye yatık (laid back) ve fan şekilli deliklerin anti kidney vortis oluşumunda yuvarlak deliklerin aksine etki yaptığından delik çıkış alanı, ana akım ve enjeksiyon akımı arasındaki edilerin oluşumuna yol açtığını bu etkinin de yüksek kayma gerilmelerine yol açtığını bulgulamıştır. Delik çıkış alanı arttıkça püskürtme oranı artacak böylece soğutucu akışkanın akıntı yönünde yüzeye tutunabilirliği de o düzeyde artacaktır. Makki ve Jakubowski (1986) ile Kohli ve Bogard (1999) ileri ve yanal konumlandırılmış film soğutma deliklerinin yuvarlak deliklere göre daha düşük ısı transfer katsayılarına yol açtığını böylece daha yüksek film soğutma etkinliği oluşturduklarını gözlemlemişlerdir. Kim Y. ve Kim S. (2004) şekilli deliklerde yaptığı çalışmada konik difüze deliklerin, silindirik deliklere göre daha iyi performans verdiğini öne sürmüştür. Cho vd. (2001) silindirik ve konik delik şekilleri üzerinde çalışmışlardır. Bileşim açılı konik şekillerin yuvarlak şekillere göre daha iyi performans gösterdiğini söylemişlerdir. Yine, Yu vd. (2002) delik uzunluğu $L/D=10$ olan ve 30° 'lik enjeksiyon açılı deliklerde $0.79 D$ civarında 10° ileri difüze açısı (böylece 40°) vermiş ve 10 derecelik ileri difüze edilmiş deliğin yuvarlak deliğe göre daha iyi performans sağladığını öne sürmüştür. Sargison vd. (2002) daralan konsol açıyla (converging slot-hole) yaptığı çalışmada delik daraldığında jetin akışı yukarı doğru ivmelenme gösterdiğini ve ivmelenmiş jet akışının daha düşük ve kararlı bir jet girdabı oluşturduğunu öne sürmüştür. Konsol film soğutma delikleri yuvarlak ve fan şekilli deliklere göre daha az basınç kaybı oluşturduğunu fakat delik çıkış alanında yüksek termal gerilim konsantrasyonlarına yol açmaktadır.

Liu vd. (2011) Sargison'un düzeneğine benzer konsol bir düzenek kurmuş ve düşük çıkış alanının daha düşük deşarj katsayısıyla daha yüksek film soğutma etkinliği sağladığından daha iyi termal koruma sağladığını söylemişlerdir. Saumweber vd. (2003) fan şekilli, laidback fan şekli ve yuvarlak deliklerle yaptığı çalışmada laidback fan ile düz fan deliklerine benzer karakteristikler gösterdiğini iddia etmişlerdir. Ayrıca fan şekli delikler yanal yayılma alanı oluşturduğundan yüksek jet püskürtme alanı oluşturduğundan yuvarlak deliklere göre daha yüksek film soğutma etkinliği oluşturduğunu iddia etmişlerdir. Dittmar vd. (2003) infrared termografi tekniği ile yaptığı çalışmada silindirik delikler ve fan şekli delikler ile bileşim açılı ve bileşim açısız delik konfigürasyonlarında yaptıkları çalışmada düşük üfleme oranlarında konfigürasyonlar

arasında belirgin bir fark oluşmazken yüksek üfleme oranlarında bileşim açılı ve fan şekilli konfigürasyonların en iyi soğutma etkinliğini verdiği sonucuna ulaşmıştır. Maitech ve Jubran (2004) basit ve bileşim açılı iki dizili plaka üzerinde basınç gradyenlerinin film soğutmaya olan etkisini çalışmışlardır. Khanicheh (2005) ileri yatık ağızlı ve 2 değişik bileşimli açılı konfigürasyonda yaptığı çalışmada yine yüksek üfleme oranlarından difüzör şekli deliklerin en iyi termal verim performansını verdiklerini ve delik çıkış alan artışının ana akıma göre daha az jet nüfuzuna yol açtığını böylece momentum akısının düşüp jet yukarı akış etkisi azaldığından soğutma etkinliğinin arttırdığını söylemişlerdir. Yanal difüze edilmiş basit (bileşim açısı olmayan) açılı delik çıkış alanının momentum akısını düşürdüğünden ana akıma nüfuzunu da düşürür. Baheri (2008) oyuklu soğutma delik kanallarının yuvarlak ve fan şekilli deliklere göre hem akım yönü eksenel hat boyunca hem de yanal genişleme hattı boyunca daha üstün performans verdiğini öne sürmüştür.

Geleneksel fan şekli deliklerinin aksine Koç (2007), dikdörtgen şeklindeki soğutma delikleriyle çalışma yürütmüştür. Dhungel vd. (2007) ile Heidmann ve Ekkad (2008) anti-vorteks film soğutma delikleri ya da zıt yönlü dönen vorteks çiftlerinin (counter-rotating vortex pair) etkilerini incelemişler ve delik çıkışındaki vortislerin ikincil akışlara yol açarak yüzeye tutunduğunu bu etkinin de film soğutma performans artışı sağladığını öne sürmüşlerdir. Kusterer vd. (2007) duble jet film deliklerini çalışmış ve komşu jetler arasındaki etkileşimin anti-kidney vorteks çiftlerini yarattığını ve bu etkinin film soğutma performansını arttırdığından çift jet film soğutma deliklerinin yanal yönde iyi bir difüze akış dağılımı sağladığını öne sürmüşlerdir. Şekil 2.5.'te anti vorteks film deliklerinin gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.5. Anti Vorteks Film Delikleri

Kaynak: LeBlanc, 2013

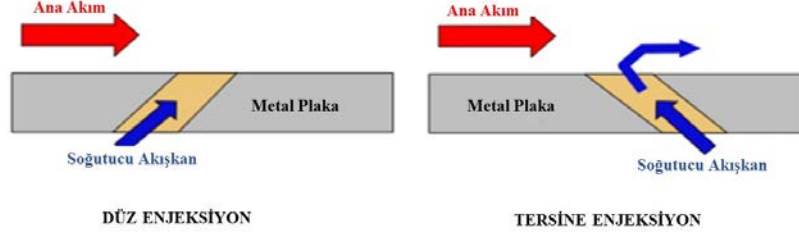
Okita ve Nishiura (2007) ok başı fan şekilli soğutma deliklerinin (arrowhead fan shaped hole) düşük üfleme oranlarında ok başı, laidback ve fan şekli deliklerle benzer performans gösterdiğini ama yüksek üfleme oranlarında ($Br > 1.5$) ok başı fan şekilli soğutma deliklerinin diğerlerine göre yüksek performans gösterdiğini bulgulamışlardır. Schroeder ve Thole (2014) 30° enjeksiyon açılı, 7° geri yaslı ve 7° yana yaslı optimize edilmiş bir delik geometrisinin ayrıklı şekilde film soğutma deliğinden çıktığını ve gelecek çalışmalar için baz alınacak jenerik bir geometrik çalışma olacağını öne sürmüşlerdir. Zuniga (2007) konik şekilli soğutma deliklerinin soğutma jeti yüzeyi üzerinde daha iyi bir tutunma etkisi yaratarak termal gerilme etkilerini düşürdüğünü öne sürmüştür. Oyuk (trench) ve krater yapılı delikler, fan şekilli yapıların üretim zorluğu ve maliyet hesapları bakımından göreceli ucuz ve üretilebilir delikler olup delik çıkış alanını ile yanal ve ileri difüzyonu artırıcı yöntemlerdir. Şekil 2.6.'da oyuk ve krater şekilli soğutma deliklerinin gösterimi verilmiştir. Waye ve Bogard (2007), bir oyuğa gömülü film soğutma delikleriyle yapılan birkaç çalışmada oyuklu deliklerin soğutma etkinliğini iyileştirdiğini bulguladı. Soğutucuyu bir oyuğa enjekte etmek bu oyukta eğik film soğutma delik konfigürasyonunun daha iyi bir yanal yayılma oluşturur. Bu etki cidar ya da kanat üzerinde iyi bir soğutma etkinliği oluşturur. Yine Lee ve Kim (2014) transvers kanala gömülü silindirik soğutma delik etkisini çalışmış ve benzer sonuçlara ulaşmışlardır.



Şekil 2.6. Oyuk ve Krater Şekilli Soğutma Delikleri

Rhee vd. (2002) dikdörtgen kesitli soğutma delikleriyle yaptığı çalışmada silindirik film soğutma deliklerine göre Coanda etkisinden kaynaklı zıt yönlü vorteks çiftlerinin merkezi cidara daha yakın olduğundan daha iyi soğutma etkinliği sağladığını söylemişlerdir. Düz enjeksiyon çalışmaları haricinde Li (2010) ve Subbuswamy (2011) ters yönlü enjeksiyon etkisini çalışmışlardır. Ters yönlü enjeksiyonda soğutucu akışkan ana akıma zıt yönde çarptığından daha güçlü bir etkileşim oluşurken yanal yönde hız düşüşlerine yol açarak komşu etkiler oluştururken aksenal akım yönünde ciddi

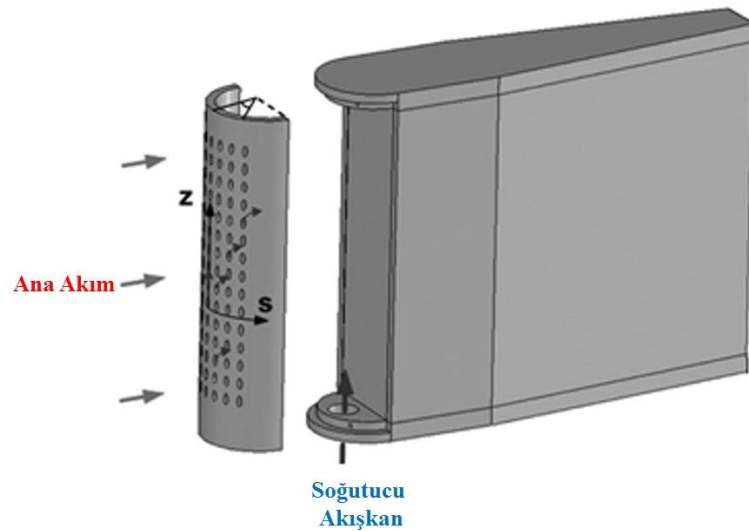
momentum kayıplarına yol açtığından kötü tercih bir konfigürasyondur. Şekil 2.7.'de düz ve tersine enjeksiyonlu soğutma deliklerinin şematiği verilmiştir.



Şekil 2.7. Geriye Enjeksiyonlu Soğutma Delikleri

Kaynak: Subbuswamy, 2012'den revize edilmiştir.

Na ve Shih (2007) soğutma deliklerinin önüne koydukları tümsekte oluşan geri basamak konfigürasyonu ile tümseğin basamak akışı yönünde oluşan resirkülasyon bölgesinde akışı hapsettiğinden bu akış film tabakasını olumlu yönde etkileyip daha iyi bir soğutma etkinliği sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Xue vd. (2013) türbin kanadı hücum kenarı soğutmada duş başlığı soğutmanın (showerhead cooling holes) yüksek düzey ısı düşüşüne yol açtıklarını söylemişlerdir. Şekil 2.8.'de Li vd. (2014) basınca duyarlı boyalarla (PSP) yaptıkları çalışmada türbin kanadı hücum kenarında duş başlığı film soğutma deliklerinin termal yüklerin yüksek olduğu hücum kenarında daha iyi soğutma tekniği olduğunu iddia etmişlerdir.

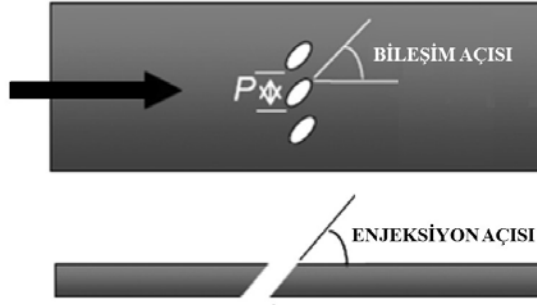


Şekil 2.8. Duş Başlığı Soğutma Deliklerinin Gösterimi

Kaynak: Li vd., 2014'ten revize edilmiştir.

2.6. Enjeksiyon ve Bileşim Açısı ile Delik Yapısının Etkisi

Soğutucu akışkanın geçtiği film deliklerinin yatay eksen doğrultusuyla yaptığı açıya enjeksiyon açısı, ana akım doğrultusuyla ile yaptığı açıya da bileşim açısı denir. Şekil 2.9.'da enjeksiyon ve bileşim açılarının gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.9. Enjeksiyon ve Bileşim Açılarının Gösterimi

Genel olarak enjeksiyon açısı ile bileşim açısının 4 farklı kombinasyonu mevcuttur.

Bunlar:

- Yanal Difüze Basit Açısı (Lateral Diffused Simple Angle, LDSA)
- İleri Difüze Basit Açısı (Forward Diffused Simple Angle, FDSA)
- Yanal Difüze Bileşim Açısı (Lateral Diffused Compound Angle, LDCA)
- İleri Difüze Bileşim Açısı (Forward Diffused Compound Angle, FDCA)

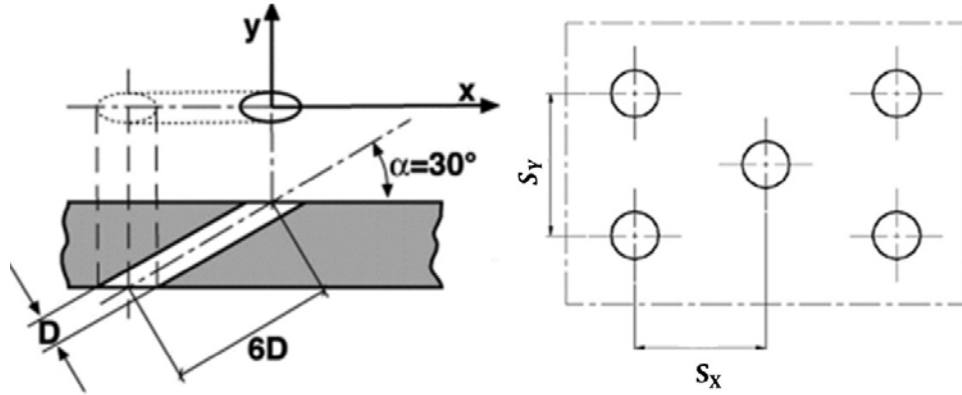
Sıfırdan büyük bileşim açısı, 0° bileşim açısına göre veter boyunca hesap edilen ortalama etkinliğin artmasını sağlar. Jet bileşim açıları, yüzey üzerinde türbülansı artırarak ısı transfer katsayısının yüksek değerlere çıkmasını sağlamaktadır. Ghorab (2011) ok başı film soğutma deliklerinde yaptığı çalışmada hem emme hem de basınç yüzeylerinde film soğutma etkinliğini arttırdığını bulgulamıştır. Goldstein (1982) ile Amman vd. (1990) delik enjeksiyon açısı arttıkça karışımın artacağını ve türbülans sınır tabaka deplasman kalınlığının da artacağını bulgulamışlardır. Bell vd. (2000) yanall difüze bileşim açısının (LDCA) ve ileri difüze bileşim açısının (FDCA) basit açılardan daha üstün performans verdiğini söylemişlerdir. Bunun yanı sıra bileşim açılı konfigürasyonlarda LDCA'nın FDCA'dan daha iyi performans verdiğini söylemişlerdir.

Jia vd. (2003) optimum enjeksiyon açısı için yaptığı çalışmalarda enjeksiyon açısı 30° ve altında olduğu zaman resirkülasyon baloncuğu oluşmayıp soğuk akım jetleri yüzeyi daha fazla korumaya meyilli bir akım oluşturduğunu öne sürmüşlerdir.

Ligrani vd. (1994) farklı delik adımlarıyla (S/D) ile farklı enjeksiyon ve bileşim açılarıyla yaptığı çalışmalarda açılı konfigürasyonun düz konfigürasyona nazaran alan artırıcı etki gösterdiğinden jet karışım etkisini artırdığını ve daha yüksek film soğutma etkinliği oluşturduğunu söylemişlerdir. Sen vd. (1996) üç farklı (0, 15 ileri, 60 yanal) bileşim açısı için yaptığı çalışmada 0 ve 60 derecelik bileşim açılarında momentum akı artışının, ısı transfer katsayılarını artırıcı yönde etki ettiğini bulgulamıştır. İleri bileşim açılılarda ise momentum akı artışının yanal karışımı artırdığı için ısı transfer katsayılarını iyileştirme oranında yanal yönde daha iyi bir iyileştirme sağladığını öne sürmüşlerdir. Schmidt vd. (1996) yine yüksek momentum akılarından ısı transfer katsayısının bileşim açılı konfigürasyonda bileşimsiz açılı konfigürasyonlara göre daha yüksek olduğunu öne sürmüştür. Chen vd. (2001) bileşim açısının etkisini yüzey kavite etkisiyle beraber incelemişlerdir. İçbükey yüzeylerde yüksek üfleme oranı ve momentum akı oranlarında bileşim açıları etkin sonuçlar verirken dışbükey yüzeyde hem düşük hem de yüksek üfleme oranlarında bileşim açılı konfigürasyonların daha iyi film soğutma performansı verdiklerini öne sürmüşlerdir.

Brittingham ve Leylek (2002) bileşim açılarının slot-jet etkisi yaratacak şekilde yani birbirine komşu deliklerde çapraz akış etkisini ortadan kaldıracak şekilde tasarlanması gerektiğini öne sürmüştür. Lee vd. (2002) akış görüntüleme tekniğiyle bileşim açılarına detaylı bir inceleme çalışması yürütmüş ve ısı transfer çalışmalarına akış kinematığının etkisi ile ilgili çalışmalar kazandırmışlardır. Zhang vd. (2012) bileşim açıları belirlenirken üfleme oranlarına bakılması gerektiğini ve özellikle yüksek üfleme oranlarında ve yüksek momentum akılarında bileşim açılarının düz bileşimsiz açılı deliklere göre film soğutma etkinliğini çok ciddi oranda olumlu etkilediğini öne sürmüştür. Delik şekillerinin yanı sıra delik uzunluğu, delik adımı, delik dizi çeşidi (staggered, inline, hibrit), delik dizi sayısı ve toplam delik sayısı gibi faktörler bir plaka üzerinde soğutmayı etkileyen diğer parametrelerdir. Şekil 2.10.'da delik uzunluğu (L/D), yanal ve eksenel delik adımı ile delik dizilerinin gösterimi verilmiştir. Deliğin uzunluğu literatürde genelde delik uzunluğundan çapa oranı (L/D) olarak ifade edilir ve bu şekilde ele alınır. Delik uzunluğu/delik çapı soğutma etkinliğine etkileyen nerdeyse en temel parametrelerin başında gelir. Bunun yanı sıra yine delik adımı eksenel (S_x/D) ve yanal (S_y/D) delik adımı

olmak üzere 2 çeşit iken delik adımlarının çapa oranı şeklinde ifade edilen delik adımı jet çıkışlarının eksenel ve yanal yayılımını ifade etmek için kullanılır.



Şekil 2.10. Delik Uzunluğu ve Delik Adımının Gösterimi

Delik dizi sayısı akış vektörlerinin belirli bir dizide geliştiğini belirli bir diziden sonra üniform bir hal aldığını ve ileri eksenel yönde sınır tabaka birikmesi (süperpozisyon) etkisiyle plaka sonuna doğru jetlerin plakayı daha fazla yaladığını ve film sınır tabakasının büyüdüğünü bulgulamışlardır. Bunun yanı sıra toplam delik sayısı efüzyon gözenekliliği denilen bir parametre üzerinden tanımlanır. Toplam delik alanı/plaka alan oranının da soğutmaya etki eden önemli bir parametre olduğu söylenebilir (Oguntade 2015). Küçük delik adımları büyük delik adımlarına göre duvarda daha iyi bir yayılma alanı sağladığından daha yüksek etkinlik değerleri sağlar. Düşük üfleme oranlarında delik sıra yapılarının soğutma etkinliğine etki etmese de yüksek üfleme oranlarında delik sıra sayısı artışıyla ısı transfer katsayıları artış gösterir. Art arda çapraz (staggered) dizilimlerin art arda düz sıralı (inline) dizilimlere göre daha fazla film etkinliği oluşturduğu Saumweber ve Schulz (2004) tarafından bulgulanmıştır.

2.7. Diğer Faktörler

Türbin kanadında ve yanma odası cidarında film soğutma yapıları iç ve dış akış yapılarından bağımsız olmadığından türbin kanat airfoil yapısından, kanadın kaideye tutunduğu duvar yapılar göz önüne alındığında kanat ucu (tip), gövdesi (span) ve duvar kaidesi (endwall) için film soğutma jetlerinin karşılaştığı ana akımlar da farklı karakteristiklerdedirler. Yanma odası cidar modelleri de her ne kadar düz plaka şeklinde de incelense de cidar dairesel (annular) olduğundan ya da yanma odası çıkışına doğru alan daraldığından yüzey kavitesi etkileri de ilgili çalışmalarda göz önüne alınmalıdır.

2.7.1. Yüzey pürüzlülüğü

Gaz türbinlerde yüksek sıcaklıklara ve gerilmeye bağlı aşınma, yüksek sıcaklık korozyonu ile çalışan parça ve yakıt atık birikmesi ve yüzeye tutunup yüzeylerde pürüzlülük etkisi oluşmaktadır. Goldstein vd. (1986) düşük üfleme oranlarında yüzey pürüzlülüğünün film soğutma etkinliğini %20 azaltırken yüksek hava üfleme oranlarında yüzey pürüzlülüğünün film soğutma etkinliğini % 50 oranında arttırdığını söylemişlerdir. Boyle ve Senyitko (2003) yüzey pürüzlülüğü etkisinin basınç düşüş katsayısına bağlı bir endeks üzerinden ele almıştır. Bons ve McClain (2004) pürüzlülük etkisinin düşük basınç gradyenlerinde ısı transfer artışında daha kayda değer bir artış etkisi olduğunu iddia etmiş ve yüksek basınç gradyenlerinde pürüzlülük etkisinin etki derecesinin azaldığını öne sürmüştür. Cardwell vd. (2006) düşük üfleme oranlarında yüzey pürüzlülüğünün önemli bir etki sağlamadığını öne sürmüş fakat yüksek üfleme oranlarında yüzey pürüzlülük artışının adyabatik film etkinliğini düşürdüğünü bulgulamışlardır.

2.7.2. Yüzey kavitesi

Türbinin airfoil şeklinden kaynaklı basınç ve emiş kenarlarında bulunan yüzey kavitesinin film soğutma üzerindeki etkisi için yüzey kavite etkisi de çalışılmalıdır. Literatürdeki çalışmaların yoğun bir oranda düz plaka üzerinde çalışıldığı varsayılırsa içbükey ve dışbükey yüzeylerde film soğutma deliklerinden çıkan soğutma jetlerinin eğimli yüzey üzerinde ana akımla karşılaştığından nasıl davranacağını kestirmek için türbin kanat ve yanma odası cidar film soğutma tekniğinde göz ardı edilemez bir etkidir. Türbin kanadının hücum kenarı ve emme (suction) kenarı genelde dışbükey iken basınçlı kenar genelde içbükeydir. Ito (1977)'nin çalışma bulgularında genel olarak yüksek momentum akıları haricinde dışbükey yüzeylerde düz yüzeye göre film soğutma etkinliği artarken içbükey yüzeylerde ise azalma eğilimi gösterir. Dış bükey yüzeylerde artan üfleme ve momentum akı oranı jeti cidardan çok uzaklaştırdığı için film koruma tabakasının oluşumunu olumsuz yönde etkilemektedir.

Yüzey kavite etkisi, cidar normallerinin basınç gradyenleriyle ilişkilidir. Örneğin soğutucu jet momentumu ana akım momentumundan düşük olduğundan basınç gradyeni soğutucu jeti türbin kanadının emme (suction) duvarında dış bükey duvar yüzeyine doğru itme etkisi yaratır. Kruse (1985) yüzey kavite etkisiyle ilgili çalışmalara öncülük etmiştir. Jung ve Hennecke (2003)'nin yaptığı çalışmada düşük ve orta üfleme oranlarından adyabatik film etkinliği dışbükey (convex) yüzeylerde içbükey (concave) ve düz (flat)

yüzeylere göre daha yüksek film etkinliği sağlarken dışbükeyin bu etkisi yüksek momentum akıllarında kendini hissettirmez. Bogard ve Thole (1992) tarafından yapılan kapsamlı kaynak taramasına (review) göre, ana akım türbülansı ve delik şekliyle birlikte yüzey eğriliği, film soğutma performansını tanımlamada güçlü bir etkiye sahiptir. Weigand vd. (2000), sıfır basınç gradyanında akış için dışbükey bir yüzey üzerindeki adyabatik film soğutma etkinliğini incelemiştir. Üçü silindirik delik, ikisi de farklı şekilli deliklere sahip beş farklı enjeksiyon konfigürasyonunu test eden Weigand vd. silindirik bir delik ile karşılaştırıldığında şekilli bir delik kullanılarak daha yüksek bir film soğutma etkinliği ve daha düşük ısı transfer katsayıları elde edilir. Ayrıca, basınç tarafından emme tarafına doğru, ikincil akışların üfleme oranını azalttığı bulgusuna ulaşmışlardır.

2.7.3. Buğu İlave Etkisi

Li ve Wang (2006) yaptıkları çalışmalarda soğutma havasına %2 buğu (sis) enjeksiyonu ile %30-50 oranında soğutma oranında iyileştirme sağlandığını iddia etmişlerdir. Li vd. (2005) soğutma havasına sis püskürtme tekniği ile yaptığı çalışmada 10 µm damlaları içeren enjekte edilen sisin % 5 konsantrasyonu % 65'e kadar soğutmayı arttırmıştır. Li ve Wang (2006), farklı film deliği geometrileri kullanarak film soğutma performansı üzerine sis enjeksiyonunun etkisini inceleyerek çalışmanın kapsamını genişletmiştir. Yuvarlak ve fan şekilli delikler kullanan Li ve Wang (2007) ve soğutma sıvısı akış oranının % 2'lik bir enjeksiyon oranından dolayı % 30-50 arasında soğutma artışı oluşturduğunu bulguladılar. İki boyutlu yuva için % 38, 3 boyutlu silindirik delik için % 50 oranında, fan delik şeklindeki deliklerde ise % 52 artışla en yüksek tepe değer soğutma artışı sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

2.8. Yanma Odası Cidarında Film ve Efüzyon Soğutma Çalışmaları

Literatürde yanma odasında soğutma etkinliği ile ilgili genelde düz plaka üzerinde film, efüzyon soğutma delikleriyle ilgili yapılan çalışmalar mevcuttur. Yanma odası cidarındaki adyabatik soğutma etkinliği ise delik geometrisine (delik enjeksiyon açısı, delik adımı, plaka kalınlığı, delik uzunluğu vb.) ve yanma sonu ana akım akış ve test koşullarına (türbülans düzeyi, sınır tabaka kalınlığı, Reynolds Sayısı vb.) ve soğuk jet enjeksiyonu (üfleme oranı, hız oranı, momentum akı oranı vb.) gibi fiziksel özelliklere bağlıdır.

2.8.1. Yanma odası cidarı film soğutma çalışmaları

Yanma odası cidar soğutma model çalışmalarında delik uzunluğunun çapa oranı (L/D), delik enjeksiyon açısı (α), delik adımı (S_x/D , S_y/D) gibi geometrik değişkenlerle ve delik Reynolds Sayısı (Re_D), üfleme oranı (BR , M), yoğunluk oranı (DR), momentum akı oranı (I), türbülans düzeyi (Tu) gibi fiziksel değişkenlere bağlıdır. Baldauf vd. (2002) 30, 60 ve 90 derecelik eğimli film soğutma delikleriyle $L/D=6$ olan, üfleme oranları 0.2-2.5 olan, yoğunluk oranları 1.2, 1.5, 1.8 olan, soğutucu sıcaklığı 293 K ve ana akım sıcaklığı 550 K olan bir plaka üzerinde infrared termografi ve ısı çiftleriyle yaptıkları çalışmalarda değişik kombinasyonlar için eksenel (x/D) ve yanal (Z/D) film soğutma etkinlik katsayılarının değişimlerini ortaya çıkarmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre üfleme oranları 0.85 ile 1.0 civarında, momentum akı oranları (I) 0.4 ila 0.5 olduğu aralıklar adyabatik film etkinliği oluşması için gerekli optimum koşullardır. Üfleme oranları ve momentum akı oranları arttıkça jet akış yukarı kalkışından kaynaklı film soğutma etkinliğinin de düştüğü bulgulamışlardır. Silieti (2004) doktora tezinde 30 derecelik eğimli film soğutma delikleriyle $L/D=6$ olan, üfleme oranı 2 olan, yoğunluk oranı 1.6 olan, soğutucu sıcaklığı 290 K ve ana akım sıcaklığı 540 K olan bir plaka üzerinde genetik algoritma ve HAD analizlerini kullanarak konjuge etkileri incelemiştir. Silindirik deliklerin yanı sıra fan şekli delikler ve slot delikler için yapılan çalışma sonucunda ısı taşınım katsayıları, ısı akı oranlarının tersine problem yaklaşım sonucuyla sonlu eleman sonuçları arasında uyuşma çıktığı sonucuna varmıştır.

Para (2009) master tezinde 5-30 derecelik eğimli film soğutma delikleriyle üfleme oranı 0.5-2 olan, yoğunluk oranı 1 olan, soğutucu sıcaklığı 580 K ve ana akım sıcaklığı 1280 K olan silindirik bir yanma odası cidarı modeli üzerinde HAD analizlerini kullanarak enjeksiyon açısı ve üfleme oranları haricinde sis püskürtme ve damlacık (droplet) çap etkisinin de film soğutma etkinliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda üfleme oranı 1 olan durum için sis konsantrasyonu %10 olunca film soğutma etkinliğinin %57 arttığını ileri sürmüştür. Sis püskürtme olmayan soğutmada ise üfleme oranı 2 olduğunda film soğutma etkinliğinin en yüksek değer ulaştığı sonucuna varmıştır. Voigt vd. (2012) 17 derecelik eğimli film soğutma delikleriyle $L/D=5$ olan, üfleme oranı 1 olan, yoğunluk oranı 2.92 olan, soğutucu sıcaklığı 625 K ve ana akım sıcaklığı 1829 K olan düz bir plaka yanma odası cidarı modeli üzerinde HAD analizlerini kullanarak değişik ağ (mesh) sayılarında ve üfleme oranlarında film soğutma etkinliğinin eksenel (x/D) uzunluklara göre değişimlerini ortaya çıkarmıştır. Çalışma sonucunda

konjuge ısı transfer etkileri de incelenmiş olup üfleme oranı 0.5 iken soğutucu akışkanın sıcaklığı 30 °C artarken üfleme oranı 3 olduğunda bu artış 13.4 °C olmuştur. Greiner (2014) doktora tezinde 30 derecelik eğimli film soğutma delikleriyle $L/D=6$ olan, üfleme oranı 2 olan, yoğunluk oranı 1.6 olan, soğutucu sıcaklığı 290 K ve ana akım sıcaklığı 540 K olan bir plaka üzerinde deneysel (gerçek motor) ve HAD analizlerini kullanarak film soğutma etkinliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda zengin yanma ortamında çok sıralı film soğutma dizileri jet bağlanması ve yanal yayılma etkileriyle ısı akısı önemli ölçüde düşmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Hayes (2014) master tezinde 30 derecelik eğimli film soğutma delikleriyle $L/D=4$ olan, üfleme oranları 0.5-2 olan, yoğunluk oranları 1 ve soğutucu sıcaklığı / ana akım sıcaklık oranı 1.06 olan bir plaka üzerinde infrared termografi ve ısı çiftleriyle yaptıkları film soğutma etkinlikleri için değişik kombinasyonlar için ısı taşınım katsayı oranlarının eksenel (x/D) değişimlerini ortaya çıkarmıştır. Çalışmada silindirik deliklerin yanı sıra anti vorteks delikleri de çalışılmış olup ana akım türbülans değerleri %1, %7.5 ve %11.7 gibi 3 farklı durumlarda incelenmiştir. Çalışma sonucunda üfleme oranı 1.5 iken ve türbülans yoğunluk değeri %1 iken en iyi net ısı akı oranlarının oluştuğunu öne sürmüştür. Ayrıca, net ısı akı düşüşü (NHFR) açısından, anti vorteks delikler bariz biçimde silindirik deliklere üstünlük sağlarken üretim teknikleri açısından üretim zorluğu nedeniyle yanma odası cidarlarında uygulanmadığı hususuna da değinmişlerdir. Kingery (2015) master tezinde 30 derecelik eğimli film soğutma delikleriyle $L/D=4$ olan, üfleme oranları 0.5-1.5 olan, türbülans yoğunluk oranları %0.7-%13.7 olan, yoğunluk oranları 1 olan, soğutucu sıcaklığı 293 K ve ana akım sıcaklığı 313 K olan bir plaka üzerinde infrared termografi ve ısı çiftleriyle yaptıkları film soğutma etkinlik değerlerini değişik kombinasyonlar için eksenel, değişik türbülans düzeyleri ve üfleme oranları için Stanton sayısının eksenel (x/D) değişimlerini ortaya çıkarmıştır. Çalışma sonucunda slot deliklerle şekilli deliklerin ısıl etkinlik performansları da değerlendirilmiş olup slot deliklerin yakın bölgede daha iyi sonuçlar verirken akış yönü devamında şekilli delikler slot deliklere göre bariz üstünlük sağladığı ortaya çıkmıştır. Schroeder (2015) doktora tezinde 30 ve 55 derecelik eğimli film soğutma delikleriyle $L/D=4$ olan, üfleme oranı 0.5-3 olan, yoğunluk oranı 1.2 ve 1.5 olan, türbülans yoğunluk oranları % 0.5 (pürüzsüz plaka) ve %13.2 (pürüzlü plaka) olan bir yanma odası cidarı modeli üzerinde infrared termografi film soğutma etkinliğini değişik kombinasyonlar için eksenel uzaklıkla (x/D) pürüzlülük etkisinin (türbülans

düzeyi) değişimlerini incelemiştir. Pürüzlülük etkisinin yüksek üfleme oranlarında adyabatik film soğutma etkinliğini ciddi oranlarda düşürdüğü sonucuna varmıştır.

2.8.2. Yanma odası cidarı efüzyon soğutma çalışmaları

Mcghee (2000) 30 ve 90 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D=6$ olan delik Reynolds Sayısı 8200 olan, üfleme oranları 0.85-1.2 olan, yoğunluk oranları 0.8 olan, soğutucu sıcaklığı 305 K ve ana akım sıcaklığı 380 K olan bir plaka üzerinde infrared termografi ve ısı çiftleriyle yaptıkları ölçümlerle değişik kombinasyonlar için yerel sıcaklıkların eksenel (x/D) ve yanal (z/D) uzunluklara göre değişimlerini ortaya çıkarmıştır. Gustafsson (2001) 15, 20 ve 30 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D=8$ olan delik Reynolds Sayısı 3900-5800, üfleme oranı 14 olan, yoğunluk oranları 2 olan, soğutucu sıcaklığı 298 K ve ana akım sıcaklığı 523 K olan bir plaka üzerinde, infrared termografi ve ısı çiftleriyle yaptıkları ısı ölçümler ve LDA ile yaptıkları hız ölçümlerinden değişik üfleme oranı soğutucu ve ana akım sıcaklıkları için oluşturdukları kombinasyonlar için yerel sıcaklıkların ortalama hız, Reynolds gerilmeleri vb. akış özelliklerinin eksenel (x/D) ve yanal (z/D) değişimlerini ortaya çıkarmışlardır. Test plakasında efüzyon delik sayısı 80 civarındadır. Çalışma sonucunda duvara yakın jet çıkışında türbülans düzeylerinin %25 civarına yükseldiğini ve Reynolds gerilmeleri yükseldiğinde yanal hız oranlarında da artış görüldüğünü rapor etmiştir. Grierson (2004) 18 ve 25 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D=8.6$ olan, üfleme oranları 0.5-4 olan, yoğunluk oranları 1.2 olan, soğutucu sıcaklığı 300 K ve ana akım sıcaklığı 360 K olan bir plaka üzerinde infrared termografi ile yapılan ölçümlerle değişik kombinasyonlar için yerel sıcaklıkların eksenel (x/D) ve yanal (z/D) uzunluklara göre değişimlerini ortaya çıkarmıştır. Test plakasında efüzyon delik sayısı 80 civarındadır. Çalışmada delik açısı etkisi, üfleme oranı etkisi vb. etkilerin soğutma etkinliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Delik çapı artışının etkinliği artırdığını fakat delik çapı artışının soğutma jet hızını düşürdüğünden ana akım karışım oranının azalttığından soğutma etkinliğini düşürdüğünü gözlemlemiştir. Aynı şekilde delik eğiklik açısı düştükçe soğutma etkinliğinin arttığını fakat burada üretilebilirlik parametresi ele alındığında düşük eğiklik açısına sahip efüzyon deliklerinin üretimi meşakkatli ve maliyetli olduğunu belirtmiştir.

Scittore (2008) 30 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D=8.9$ olan delik Reynolds Sayısı 8600 olan, üfleme oranları 3.2-5 olan, yoğunluk oranları 1 olan,

soğutucu sıcaklığı 300 K ve ana akım sıcaklığı 330 K olan bir plaka üzerinde infrared termografi ve ısı çiftleriyle yaptıkları ölçümlerle değişik kombinasyonlar için yerel sıcaklıkların eksenel (x/D) ve yanal (z/D) uzunluklara göre değişimlerini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, Lazer Dopler Velocimetry (LDV) ile yaptıkları hız ölçümlerinden eksenel (x/D) ve yanal (z/D) hız profil akış karakteristiklerini çıkarmışlardır. Toplamda 20 sıralı efüzyon soğutma delikleriyle yaptığı çalışmada 15. dizi de efüzyon delikleri tam gelişmiş akış koşullarına ulaşmışlardır. Zhong (2007) 23 ve 90 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D = 8.6$ olan, üfleme oranları 0.2-1 olan, yoğunluk oranları 1 olan, soğutucu sıcaklığı 160 K ve ana akım sıcaklığı 320 K olan seramik bir plaka üzerinde HAD analizleriyle yapılan DNS bazlı nümerik çalışmada değişik kombinasyonlar için 3 boyutlu ısı transfer çalışması yapmıştır. Test plakasında yer alan efüzyon delik sayısı 200 civarındadır. Arcangeli vd. (2008) 30 ve 90 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D=10-43$ olan delik Reynolds Sayısı 6000 olan, üfleme oranları 0.3 olan, yoğunluk oranları 1 olan, soğutucu sıcaklığı 300 K ve ana akım sıcaklığı 325 K olan bir plaka üzerinde Infrared termografi ve ısı çiftleriyle yaptıkları ölçümlerle değişik kombinasyonlar için yerel sıcaklıkların eksenel (x/D) ve yanal (z/D) uzunluklara göre değişimlerini ortaya çıkarmıştır. Test plakasında efüzyon delik sayısı 60 civarındadır. Çalışmanın amacı L/D etkisinin diğer faktörler sabit kaldığından soğutma etkinliğini nasıl etkidiğiyle ilgilidir. Çalışma sonucunda $L/D=10$ ile $L/D=43$ arasında alınan değişik kanal uzunlukları için her zaman büyük L/D oranları için soğutma etkinliğinin büyük çıktığı sonucuna varmışlardır. Cho vd. (2008) 90 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D=1.5$ olan delik Reynolds Sayısı 3200 ile 14000 arası değişen yoğunluk oranları 1 olan, soğutucu sıcaklığı 300 K ana akım sıcaklığı 350 K olan bir plaka üzerinde değişik kombinasyonlar için naftalin süblimleşme tekniğini kullanarak buldukları Sherwood Sayısı'nın yanal (Z/D) uzunluklara göre değişimlerini ortaya çıkarmışlardır. Cho vd. çalışma sonucunda staggered, karma dizili (shifted) ve inline dizilimler açısından ısı transfer katsayıları incelenmiş ve çakışmayacak şekilde düzenlenmiş (staggered) yapının diğer dizilimlere göre üstünlük sağladığını öne sürmüşlerdir.

Facchini vd. (2009) 17 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle yaptıkları çalışmada $L/D=16$, delik Reynolds Sayısı 1200 ile 20000 arasında değişen, üfleme oranı 5, 7 ve 9 olan, yoğunluk oranı 1 olan, soğutucu sıcaklığı 306 K ve ana akım sıcaklığı 322 K olan bir plaka üzerinde TLC tekniğini kullanarak konvansiyonel (silindirik) ve fan şekli (eliptik) delikler için ayrı ayrı adyabatik soğutma etkinlik değerlerini bulgulamışlardır.

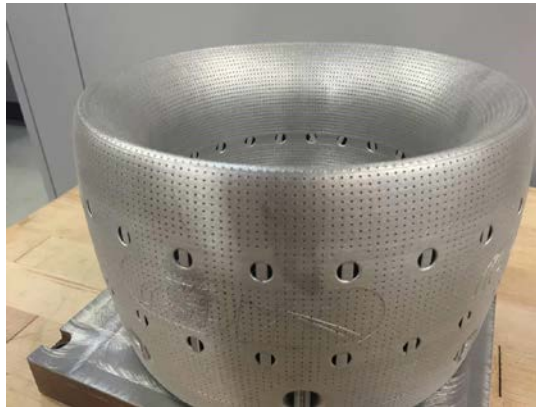
Çalışma sonucunda, düşük Reynolds Sayıları haricinde tüm durumlarda eliptik delikler silindirik deliklere göre daha üstün adyabatik soğutma etkinlik değerleri vermiştir. Adreini vd. (2011) 30 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D = 5.5$ olan, yoğunluk oranları 1 soğutucu sıcaklığı 500 K ana akım sıcaklığı 1200 K olan bir model plaka üzerinde HAD analizleriyle yapılan çalışmada yanma odasında üfleme (bleed) havasının efüzyon soğutma üzerindeki etkilerini çalışmışlardır. Ligrani vd. (2012) 20 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D = 8.35$ olan, üfleme oranları 2-5-10 olan, yoğunluk oranları 1.15 ve 1.25 olan, soğutucu sıcaklığı 300 K ve ana akım sıcaklığı 380 K olan bir plakada tanımladıkları konsantrasyon oranı (giriş alanı/ana akım alanı) için soğutma etkinlik değerlerini hesaplamışlardır. Wurm vd. (2012) gerçek yanma odasında oluşan yüksek anaförleri modellemek için nozul ile hava püskürtmek kaydıyla oluşan anaförlerin (swirl) efüzyon fiziği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında 30 ve 45 derecelik eğimli efüzyon delikleriyle çalışmalar yapmış olup değişik basınç düşüş değerleri için delik Reynolds Sayısını 1400 ila 6600 arası değerler için çalışmışlardır. Çalışmada statik basınç ölçümleri veri toplama sistemiyle, hız profilleri PIV ile ve sıcaklık profilleri Infrared termografi ile görüntülenmiştir. Çalışma sonucunda swirl etkisi olmadan 30 derecelik eğimli deliklerin 45 derecelik deliklere göre üstünlük sağlarken swirl etkisi ile beraber 45 derece eğimli deliklerin daha iyi soğutma etkinliği sunduğu sonucuna varmışlardır.

Andrei vd. (2014) 30 ve 45 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D = 6$ olan, üfleme oranları 1-3 olan, yoğunluk oranları 1 ve 1.5 olan, soğutucu sıcaklığı 290 K ve ana akım sıcaklığı 330 K olan bir plaka üzerinde $k - \omega$, SST gibi RANS modeliyle yaptıkları nümerik çalışmada üfleme oranı ve yoğunluk oranlarının çok dizili bir efüzyon plakasına nasıl etkidiği üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda düşük üfleme oranlarında ilk dizilerde film plaka koruması yüksek üflemedeki jet kalkış etkisinden kaynaklı daha iyi koruma sağlarken devam eden dizilerde (14. dizi) birikme (superposition) etkisinden kaynaklı yüksek üfleme oranlarıyla düşük üfleme oranları arasındaki etki nerdeyse ortadan kalkacak derecede azalır. Adreini vd. (2014) 30 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D = 6$ olan, üfleme oranları 0.5-5 olan ve yoğunluk oranları 1 ve 1.5 olan ana akım türbülans düzeyi %1.5 ve %17 olan soğutucu sıcaklığı 290 K ve ana akım sıcaklığı 330 K olan bir plaka üzerinde yaptıkları deneysel çalışmanın sonucunda yüksek türbülans düzeylerinden film koruma yanal eksen boyunca artış sağlamakta olduğu sonucuna varmışlardır. Diğer taraftan L/D değerinin çoğu zaman

etken bir parametre iken üretici tarafından sınırlandırıldığından üfleme oranı ve yoğunluk oranlarının adyabatik etkinliği nasıl etkidiği ile ilgili sonuçlar elde etmişlerdir. Soghe vd. (2015) 30 derecelik eğimli efüzyon soğutma delikleriyle $L/D=6$ olan, delik Reynolds Sayısı 8600 olan, yoğunluk oranı 1 olan, ana akım türbülans düzeyi %16 ve %32 olan, soğutucu sıcaklığı 300 K ve ana akım sıcaklığı 1000 K olan bir plaka HAD analizlerini kullanarak yaptıkları çalışmada soğutma deliklerinin besleyen rezervuarın Reynolds Sayısı ve türbülans düzeyinin ısı transfer artışı üzerinde çok az etkidiği sonucuna varmışlardır. Çalışmada nümerik analizlerle delik sayısına bağlı olarak Reynolds Sayısı, efüzyon gözeneklilik katsayısı ve basınç oranı açısından soğutma delikleriyle ısı transfer artışı arasında deneyi dayalı bir ilişileşim bulmayı amaçlamışlardır.

2.9. Gerçekçi Bir Yanma Odası Cidar Soğutma Modelleme Çalışmaları

Gerçekçi bir yanma odasının ilk bölgesinde swirl etkisine, ikinci bölgesinde slot, efüzyon ve dilüsyon etkisine, üçüncü bölgede ise efüzyon ve dilüsyon kombine etkilerine bakmak gerekmektedir. Bu çalışmanın özü de gerçekçi yanma odasında ikinci bölgeye tekabül eden slot film soğutma, efüzyon soğutma ve dilüsyon etkisinin kombine etkilerini çalışmaktır. Yanma odalarındaki çalışmalar gaz türbinlerinin geleceğine yön vermektedir. Görsel 2.1.'de 3B metal yazıcıda 102 saat işlenerek 1.5 mm et kalınlığına sahip inkonel 625 malzemeden işlenmiş bir yanma odası görülmektedir. 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin ilerlemesi metallerin hassasiyetle işlenmesine olanak vermiştir. Bu da daha küçük çaplarda soğutma delikleri açmak, istenilen eğriliği malzemeye vermek gibi ekstra üstünlükleri beraberinde getirmekle beraber teknolojinin yaygınlaşması maliyet sorununu da çözecektir.



Görsel 2.1. 3B Yazıcıda Inkonel 625'ten İşlenmiş Bir Yanma Odası

Kaynak: <http://www.3dmaterialtech.com>

Gerçekçi geometrilerin yanı sıra gerçekçi test koşulları da kaçınılmaz bir etkindir. Behrendt ve Hassa (2008) 2000 K sıcaklıkta ve 10 bar basınçta kurdukları test rigde gerçekçi yanma odası test koşullarına yakın değerlerde çalışma yürütmüşlerdir.

2.9.1. Slot etkisi

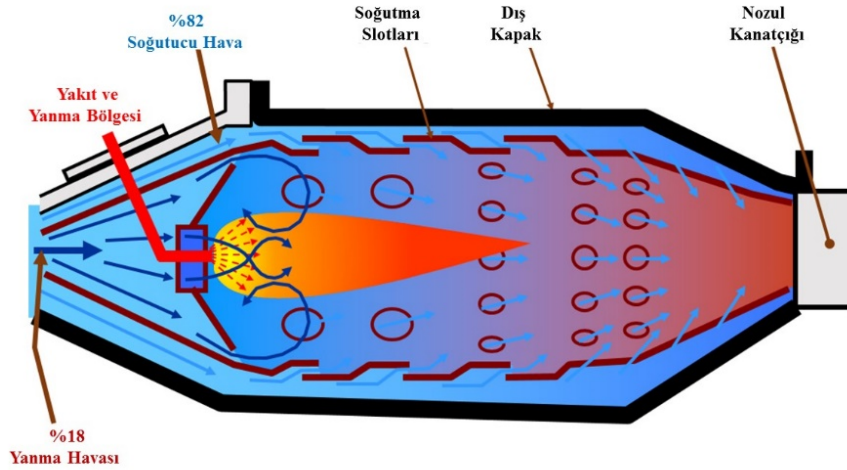
Taslim vd. (1992) slot yuva geometrilerin film soğutma etkinliğine nasıl etkidiğiyle ilgili ilk çalışmalara öncülük etmişlerdir. Çalışmada slot yüksekliği, slot genişliği, slot üfleme açısı gibi etkenlerin film soğutma etkinliğini nasıl etkidiğini incelenmişlerdir. Wang vd. (2002) enjeksiyon açılarında meydana gelen düzensiz soğutma ögelerini önlemek için slot geometrisi içinde oluşan jet karışımının daha düzenli bir akış ögesi oluşturma fikrini savunmuştur. Çalışma sonucunda ideal slot derinliği/çap oranlarının 2 ila 2.8 arasında değiştiğini ve 90 derecelik üfleme açısının en iyi sonuçları verdiğini söylemiştir. Jia vd. (2005) değişik açılarda slot film soğutma jet etkisini çalışmış ve üfleme oranlarının resirküle baloncuk oluşumu ile soğutma etkinliğini ciddi oranda etkilediği sonucuna varmış ve film soğutmada ana sakıncanın bu resirkülasyondan kaynaklı oluşan aerodinamik kayıpların olduğu sonucuna varmıştır.

Busche vd. (2014) artan ana akım türbülans düzeyinin sınır tabakada kalınlaşmanın 2 boyutlu film soğutma düzeneğine etkilerini incelemiş ve özünde belirli bir üfleme oranında, türbülans yoğunluğunun adyabatik etkinlik düzeyleri üzerindeki etkilerini bulgulamışlardır ve neredeyse tüm vakalar için üfleme oranları arttıkça soğutma etkinliğinin arttığını dile getirmişlerdir. Türbülans düzeyindeki ciddi artışa rağmen ısı transfer katsayısının ortalama bir artış gösterdiği sonucuna varmıştır. Raffan (2016) doktora tezinde slot film delikleriyle yaptığı çalışmada soğutucu akışkan 300 K ve ana akım sıcaklığını 500 K olarak almıştır. PIV ile akış karakteristiği ve mikro ısı çiftler (termokupllar) ile sıcaklık ölçümlerini yapmıştır. Raffan'ın yaptığı çalışma film etkinliği dışında akışın yaygın kinematik çalışmasını da kapsadığından literatürde ilk çalışma olma özelliğini de taşımaktadır.

2.9.2. Dilüsyon (dilution) etkisi

Yanma odasının ön temel bölgesinden sonra soğutma havası seyreltme (dilüsyon) deliklerinden geçmek kaydıyla türbine giden havayı seyreltmeye aynı zamanda yanma odasında istenen üniform sıcaklık dağılım etkisinin oluşmasını sağlar. Soğutma havası ile seyreltme havasının kullanım amaçları birbirinden farklı olduğu için istenen temel ölçüt birbirlerini olabildiğince az etkilemesidir. Soğutmada esas amaç cidarı soğutmak

olduğundan yanma havasında çok az oranda seyreltme sağlarken seyreltme delikleri cidar üzerinde yüksek oranda soğutma etkinliği sağlar.



Şekil 2.11. Yanma Odasında Akış Şematiğinin Gösterimi

Kaynak: Rolls Royce, 2015'ten revize edilmiştir.

Şekil 2.11.'de yanma odasında akış şematiğinin gösterimi verilmiştir. Literatürde dilüsyon delikleri ve efüzyon soğutma deliklerinin kombine etki çalışması ilk defa Scittore vd. (2005) tarafından yapılmıştır. Çalışmada efüzyon soğutma ve dilüsyon delikleri için farklı momentum akı değerleri için değişik durumlarda oluşan konfigürasyonlar için adyabatik etkinlik katsayılarının çıkarma çalışması yapılmıştır. Yine Scittore (2008) gerek termal gerekse akış karakteristiklerini incelediği değişik deney düzeneklerinde ve koşullarda efüzyon ve dilüsyon hibrit plakasından aldığı datalarda çoklu hava etkileşiminin soğutma etkinliğini ve hız profillerin ne düzeyde etkilediğiyle ilgili çalışma sonuçlarına erişmiştir.

Ceccherini vd. (2009) Scittore'un yaptığı çoklu akışı etkisini slot, efüzyon ve dilüsyon etkilerini beraber ele alan çalışmaya öncülük etmişlerdir. Çalışmada slot ve efüzyon için ayrı ayrı hesaplanabilen hız ve üfleme oranları için eşitlikler tanımlanmıştır. Çalışmada değişik hız oranları için yapılan konfigürasyonlarda 29 dizili plakada 14. diziden (dilüsyon deliğinin olduğu dizi) sonra adyabatik etkinlik katsayısı maksimum değere ulaştığını ve bundan sonra dalgalı bir rejime girdiğini bulgulamışlardır. Tarchi vd. (2012) slot, efüzyon ve dilüsyon etkilerini beraber ele alan Thermochromic Liquid Crystals (TLC) tekniğini kullanarak net ısı akı düşüşü (NHFR) bazlı bir soğutma çalışması yapmışlardır. Çalışmada, Ceccherini vd. (2009) kullandıkları düzeneği

kullanmışlar yani toplamda 29 dizi olan plakada 14. diziye dilüsyon deliği eklemişlerdir. Çalışma sonucunda değişik slot ve efüzyon üfleme oranları (3, 5, 7) için resirkülasyon oluşumunu ve bunun net ısı akışı ve adyabatik duvar etkinliğini nasıl etkilediği ile ilgili bulgular elde etmişlerdir.

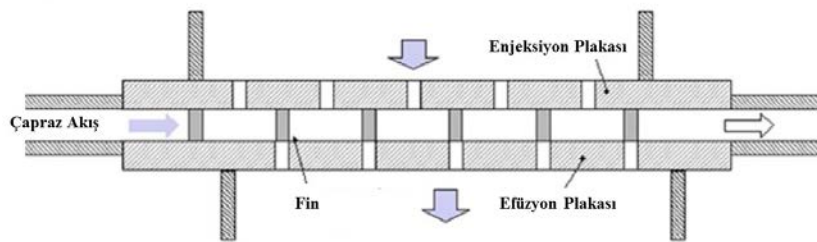
Tarchi vd. (2012) yine Ceccherini vd. (2009) tarafından kullanılan deney düzeneği (NEWAC) kullanmışlar yani toplamda 29 dizi olan plakada 14. diziye dilüsyon deliği eklenen plaka üzerinde ana akım havasının düz ve geri basamak akışı şeklinde konfigürasyonlarla slot, efüzyon ve dilüsyon hibrit plakasında soğutma etkinliğini nasıl etkidiğiyle ilgili çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma sonucunda geri basamak akışı düz akışa göre net ısı akı düşüşünü düşük oranda etkilediği sonucuna varmışlardır. Adreini vd. (2014) yine çalışmada Ceccherini vd. tarafından kullanılan düzeneği kullanmışlar yani toplamda 29 dizi olan plakada 14. Diziye dilüsyon deliği eklenen plaka üzerinde CO₂ ve hava gibi 2 değişik gaz kullanarak yoğunluk oranının slot, füzyon ve dilüsyon hibrit plakasında soğutma etkinliğine nasıl etkidiğiyle ilgili çalışmalar yürütmüşlerdir. Azwadi ve Kianpour (2014) yanma odası cidarında silindirik delikler yerine oyuklu kanallı (row trenched) delikleri önermiş ve dilüsyon etkileriyle beraber oyuklu kanallı deliklerin silindirik deliklere göre daha iyi soğutma etkinliği verdiği sonucuna varmıştır. Adrei vd. (2015) düz plaka üzerinde yapılan çalışmaların gerçekçi yanma- odası fiziğine ters düştüğünü söyleyerek modellediği CAD bir model üzerinde HAD analizler yapmışlardır.

2.9.3. Girdap, çarpma ve çapraz akış etkisi

Swirl kanatçıkları, türbülans oluşturarak yakıt ve hava karışımının iyi oranda karışmasını sağlayarak yanma verimini artırarak yanma sonu istenmeyen emisyonları azaltan girdap oluşturucu kanatçıklardan oluşan komponenttir. Gerçekçi yanma odalarında swirl kanatçıklarından kaynaklı oluşan girdapların cidar soğutma delikleriyle nasıl etkileştiği ile ilgili çalışmalar değerlidir. Adreini vd. (2015) Avrupa Birliği destekli Low Emissions Core-Engine Technologies (LEMCOTEC) adlı proje kapsamında kurdukları benzetim modelinde TLC tekniğiyle ısı transfer ve PIV tekniğiyle girdapların oluşturduğu etkileri gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda swirl kanatçıklarının oluşturduğu yüksek momentumlu girdaplar yanma odası cidarına çarparak burada resirkülasyon bölgesi oluşturdukları ve bu girdaplı bölgenin yanma odası ısı karakteristiklerine nasıl etkidiğiyle ilgili bulgular elde etmişlerdir. Liu ve Zheng (2015) HAD analizlerini kullanarak yaptıkları çalışmada yanma odasında girdap oluşumu, 2

dilüsyon deliği ile film soğutma ve efüzyon soğutma çeşitleri açısından ve soğutma delik enjeksiyon etkilerini incelemiştir. Sonuç olarak film etkinliği açısından efüzyon soğutmanın film soğutmaya göre daha üstün olduğunu hem de soğutucu akışkanın debisine % 20 oranında daha az ihtiyaç duyulduğunu fakat basınç kaybı açısından efüzyon soğutmada daha fazla basınç kaybı olduğu sonucuna varmıştır. Bunların yanı sıra 60 derecelik enjeksiyon açılı deliklerin 30 ve 90 dereceli enjeksiyon deliklere göre daha iyi performans verdiğini söylemişlerdir.

Yanma odası dış çeperdeki soğutucu akışkan dış çeperi by-pass yaparak geçer. İki kademeli bir cidar arasında çapraz geçen akışa efüzyon ve çarpma soğutma uygulayarak cidar soğutma sağlanabilir. Şekil 2.12.'de görülen çapraz akışın efüzyon ve çarpma (impingement) üzerindeki etkisi Rhee vd. (2003) tarafından fin etkisi olmadan incelenmiştir. Çalışma plakasında öncelikle sadece çapraz akış etkisi, çapraz akış etkisi ve efüzyon etkisi, çapraz akış ile çarpma etkisi ve son olarak tüm ortak etkiler birlikte çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda çapraz akışın efüzyon ve çarpma etkinliğini %20-30 oranında artırdığını ve efüzyon ve çarpmalı soğutmanın sadece çapraz akışlı soğutmaya göre üfleme oranlarına göre 3.5 kat ile 9 kat fark sağladığını öne sürmüştür. Hong vd. (2007) Rhee vd. düzeneğine ek olarak çapraz akışın önüne koydukları finlerin etkisini naftalin süblimleşme ve Sherwood Sayısını kullanarak incelemiştir. Çalışma fin olarak yuvarlak ve dikdörtgen finler kullanılmış ve değişik durumlar için Sherwood Sayısı kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda fin etkisinin özellikle yüksek üfleme oranlarında daha fazla kendini hissettirdiğini ve dikdörtgen finlerin daha fazla tutma (blokaj) oluşturduğunu böylece her ne kadar finler çapraz akış etkisini indirgese de yarattıkları blokaj etkisinden kaynaklı yüksek basınç düşümlerine yol açmakta olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.12. Çapraz Akış ve Enjeksiyon/Efüzyon Plakası

Kaynak: Hong vd., 2007'den revize edilmiştir.

2.9.4. Konjuge ısı transfer etkisi

Gerek türbin gerekse yanma odası materyallerinin büyük çoğunluğu metal ve alaşımlardan oluştuğu için bu yapılarda akışkan metal etkileşiminden kaynaklı konjuge etkilerin incelenmesi gerekmektedir. Çünkü metal içi sıcaklık dağılımı doğrudan metal ömrünü etkilemektedir. Özellikle türbin kanat ucundaki yüksek termal yükleri düşündüğümüzde burada konjuge etkileri göz önüne almadan yapılan çalışmalar eksik addedilebilecektir. İletim ısı transferi ve taşınım ısı transferi aynı anda ele alınıp modellendiği zaman konjuge (iletim + taşınım = birleşik ısı transferi) ısı transferi kavramı ortaya çıkmaktadır. Konjuge ısı transfer etkilerini deneysel çalışmak ölçüm olanakları açısından olanaksızdır. Konjuge çalışmaların tamamı HAD çalışması şeklindedir. Bu çalışmalarda malzeme kalınlığı, malzemenin iletim katsayısı ve akışkanın ısı taşınım katsayı etkileri birlikte incelenmiştir. Birleşik ısı transferi benzetiminde en önemli konu akışkan-katı ara yüzündeki ısı transferi özelliklerini iyi derecede tahmin etmektir. Taşınım ısı transferinde ısı akıları yüzeyde eşit akılar şeklinde dağılırken, konjuge ısı transferinde ısı akıları düzensiz akılar şeklinde dağılım gösterir. Bu dağılımın gözlenmesi için HAD analizleri kullanılarak akışkanla etkileşim halinde olan katı model içindeki sıcaklık dağılımı ve Biot Sayısı hakkında fikir verir.

Lu (2007) yaptığı deneysel ve nümerik çalışmalarda film soğutma üzerinde konjuge etkileri incelemiş ve ısı akı dağılımının adyabatik duvar sıcaklığı kabulüne göre çok farklı sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Bohn vd. (2005) konjuge etkiler göz önüne alındığından fan şekli film soğutma deliklerinin silindirik deliklere göre 3 kat daha iyi soğutma etkinliği sağladığını öne sürmüştür. Wu ve Miao (2006) nümerik analizlerle bileşim açılı soğutma deliklerinin konjuge etkilerini incelemiştir.

Florenciano ve Bruel, (2016) çok delikli bir plakada LES modeliyle yaptığı çalışmada önceden yapılmış ve deneye dayalı formüllerle elde edilmiş ısı transfer korelasyonlarıyla ilgili birkaç çalışmaya konjuge etkileri dâhil ederek çalışmaların doğruluğunu teyit eden çalışma yapmışlardır. El-Jummah(2014) HAD analizlerini kullanarak yaptığı bir çalışmada efüzyon/ çarpma ve hibrit plakaları modelleyip akış miktarlarının iletim ve taşınım yani konjuge etkilerin ısı transfer katsayılarına etkisini birlikte gözlemlemiştir.

3. ARAŞTIRMANIN ÇERÇEVESİ

Tezin giriş kısmında gaz türbinleri ve türbin soğutma teknikleri yanma odası cidar soğutma teknikleri hakkında, kaynak taraması kısmında ise film soğutmaya etki eden faktörler, yanma odası cidarında film ve efüzyon soğutma çalışmaları ve gerçekçi bir yanma odası cidarı soğutma modelleme çalışmaları hakkında bilgiler verilmişti. Genel olarak film soğutma çalışmalarından ısı transfer katsayıları ve soğutma etkinliği çalışmaları yapılır ama akışın full kinematığı ve bu etkilerin termal sonuçlara etkileri çoğu zaman ele alınmaz. Bu çalışmada akış yapıları ve hız haritaları için PIV tekniği ve termal karakteristikler için de IR tekniği kullanılmıştır. Çalışmada hibrit soğutma (film+ efüzyon) etkisiyle beraber dilüsyon deliklerinin soğutma delikleri üzerindeki etkisi incelemiştir. Bu bölümde ise film ve efüzyon soğutma fiziği, dinlenme odası modelleme, tünel kesit seçimi, film soğutma plaka geometrisi, efüzyon soğutma plaka geometrisi, dilüsyon seyreltme plaka geometrisi ve test koşulları gibi araştırmanın genel çerçevesi çizen temel denklikler, geometrik parametreler ve çalışma test koşulları gibi konular ele alınmıştır. Çalışma kapsamında PIV yazılım olan Dynamic Studio ile ham akış imajları işlenip akış konturleri ve vektörleri elde edilmiştir. Termal kamera yazılım olan Research IR ve Matlab ile ham veriler işlenip sıcaklık karakteristiklerini elde etmede kullanılmıştır. HAD analizleri de yapılan ölçümlerin sayısal doğrulamasını yapmak için kullanılmıştır. Film soğutmada slot geometrisi olarak 90 derecelik enjeksiyon açısında ve sabit bir debide çalışma yapılırken, efüzyon plakaları üzerinde 3 farklı üfleme oranında testler yapılmıştır. Ayrıca efüzyon plakasının ortasına açılan göreceli olarak çok büyük çapta dilüsyon deliklerinin soğutma delik akış yapısını üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

3.1. Film Soğutma Fiziği

Film/efüzyon soğutma fiziğine girmeden önce araştırma kapsamında yapılan çalışmaya etki eden faktörler geometrik parametreler ve yapılan testlerin fiziksel koşulları şeklinde iki ana başlıkta toplanabilir. Geometrik parametreler enjeksiyon açısı, test plakası kalınlığı, efüzyon delik uzunluğu/çap, eksenel delik adımı ve yanıl delik adımıdır. Ana akım sınır koşullarına bağılı, parametreler delik Reynolds sayısı, türbölans düzeyi sınır tabaka kalınlığı ile ana akım basınç ve sıcaklığı gibi parametrelerdir. Karışım bölgesinde oluşlan sınır tabaka gelişim koşulları da üfleme oranı, yoğunluk oranı momentum akı oranı ve çapraz akışta çalışılan basınç oranı ve sıcaklık oranı gibi faktörlere bağılı olarak değışir.

Tablo 3.1. Test Plakası Geometrik Parametreler

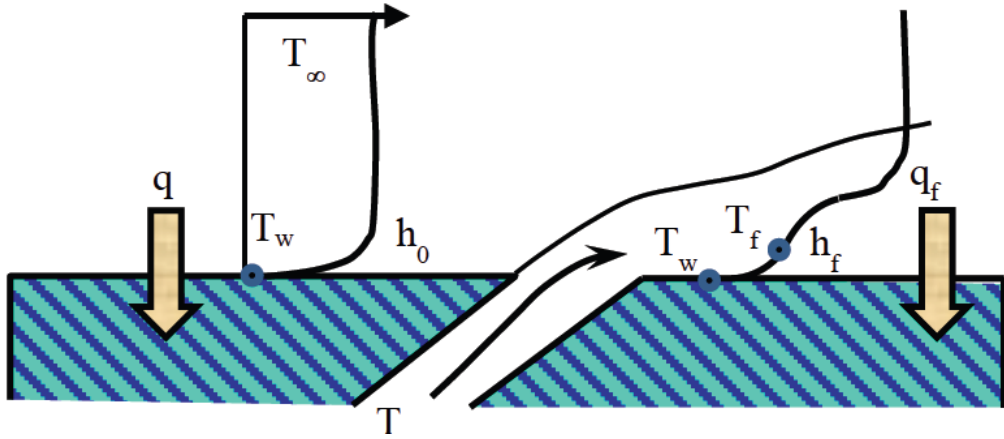
PARAMETRE	GÖSTERİM
Enjeksiyon Açısı	α
Plaka Kalınlığı	t
Delik Uzunluğu/ Delik Çapı	L/D
Eksenel Delik Adımı	S_x
Yanal Delik Adımı	S_y

Tablo 3.1.'de test geometrisine bağlı parametreler ve gösterimi verilmiştir. Tablo 3.2.'de ana akım test koşul parametreleri ve gösterimi ile soğutucu akışkan test koşul parametreleri ve gösterimi verilmiştir.

Tablo 3.2. Test Koşullarına Bağlı Parametreler

ANA AKIM SINIR KOŞULLARI		SOĞUTUCU AKIŞKAN SINIR KOŞULLARI	
Parametre	Gösterim	Parametre	Gösterim
Delik Çapına Bağlı Reynolds Sayısı	RE_D	Üfleme Oranı	BR
Türbülans Düzeyi	Tu	Yoğunluk Oranı	DR
Sınır Tabaka Kalınlığı	δ	Momentum Akı Oranı	I
Ana Akım Basınç ve Sıcaklığı	P_{ms} T_{ms}	Soğutucu ve Basınç ve Sıcaklığı	P_c T_c

Film tabaka etkisinin gözlemlenmesi için düz plakada taşınım ısı transferi ile geçen ısı akı oranı ile film tabakalı plakada taşınım ısı transferi ile geçen ısı akı oranlarının birlikte ele alınması gerekmektedir. Şekil 3.1.'de düz plaka ve film tabakalı plakada ısı akıları verilmiştir. Plaka üzerinde hız sınır tabaka ile beraber termal sınır tabaka da gelişir. Termal sınır tabaka gelişimi içinde sınır tabaka üst limitinde bulunan lokal sıcaklık çizgileri film tabaka sınırlarıdır. Plaka üzerinde akışkan ile katı arasında oluşan sınır tabakada taşınım ısı transferi devreye girer. Burada oluşan ısı akı oranları akışkanın taşınım katsayılarının ve sıcaklık farklarının bir fonksiyonudur.



Şekil 3.1. Düz Plaka ve Film Tabakalı Plakada Isı Akıları

Kaynak: Nadali, 2015'ten revize edilmiştir.

Bir plakada taşınım ile gerçekleşen ısı akı oranlarını bulmak için Denklem 3.1'de film soğutmasız ısı akı oranı ile Denklem 3.2'de yer alan film soğutmalı ısı akı değerlerinin hesaplanması ile ilgili eşitlikler verilmiştir. Taşınım ile geçen ısı akı oranları akışkanın taşınım katsayısı (h) ve film tabakası ile duvar arasındaki sıcaklık farkının çarpımından elde edilir.

$$q_0'' = h_0 (T_\infty - T_w) \quad (3.1)$$

$$q_f'' = h_f (T_{aw} - T_w) \quad (3.2)$$

Denklem 3.3'te boyutsuz sıcaklık denkliği verilmiştir. Boyutsuz sıcaklık (θ) lokal olarak ölçülen herhangi bir noktadaki sıcaklık ile soğutucu akışkan ve ana akım sıcaklığı arasında bağıntı kurmak için kullanılan bir ölçektir. Boyutsuz sıcaklıkta ölçülen lokal sıcaklık değeri eğer film sıcaklığı ise hesaplanan değer film soğutma etkinlik (η) değeridir. Denklem 3.4'te adyabatik film soğutma etkinliği verilmiştir.

$$\theta = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_c} \quad (3.3)$$

$$\eta = \frac{T_\infty - T_f}{T_\infty - T_c} \quad (3.4)$$

Testlerde genel olarak ana akım sıcaklığı ve soğutucu akışkan sıcaklığı bilindiğinden film sıcaklıkları termal kamera, termokupl, TLC vb. sıcaklık ölçüm teknikleriyle etkinlik değerleri hesaplanır. Film soğutmada ana akımla duvar arasında ısı

akış düşüşü olur. Film soğutmadan kaynaklı oluşan net ısı akı düşüş oranı (NHFR, Δq_r) Denklem 3.5'te gösterilmiştir. net ısı akı düşüşü verilmiştir.

$$\Delta q_r = 1 - \frac{q_f''}{q_0''} = 1 - \frac{h_f (T_{aw} - T_w)}{h_0 (T_\infty - T_w)} \quad (3.5)$$

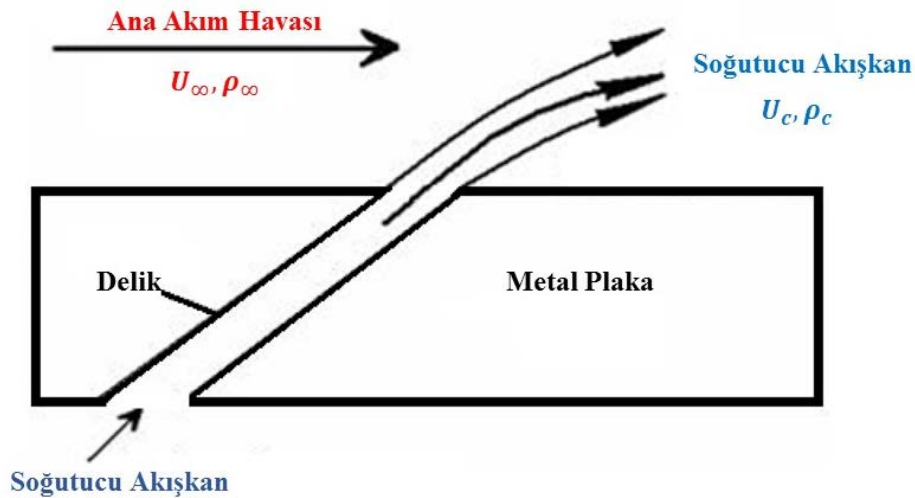
Net ısı akı düşüş oranı (NHFR, Δq_r) adyabatik etkinlik oranı ve ısı taşınım katsayıları açısından da ifade edilebilir. Denklem 3.6'da net ısı akı düşüş oranının adyabatik soğutma etkinliği ve bütün film soğutma etkinliği (Φ) açısından değeri verilmiştir.

$$\Delta q_r = 1 - \frac{h_f}{h_0} \left(1 - \frac{\eta}{\Phi} \right) \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da yer alan bütün film soğutma etkinliği (Φ) Denklem 3.7'de tanımlanmıştır. Bütün film soğutma etkinliğinde doğrudan duvar sıcaklığı ölçüldüğünden adyabatik etkinlik oranına göre daha tercih sebebidir. Çünkü termal kamera, termokupl, TLC vb. sıcaklık ölçüm teknikleriyle film tabaka kalınlığı yerine doğrudan duvar sıcaklıkları ölçülür.

$$\Phi = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_c} \quad (3.7)$$

Şekil 3.2.'de verilen genel bir film soğutma şemasında temelde dört tane fiziksel büyüklük mevcuttur. Bunlar soğutma havası yoğunluğu (ρ_c) ve ana akım yoğunluğu (ρ_∞) ile soğutma havası hızı (U_c) ve ana akım hız (U_∞) değerleridir.



Şekil 3.2. Soğutma ve Ana Akım Hava Yoğunluk Hız Gösterimleri

Yoğunluk Oranı (Density Ratio): Soğutucu akışkan yoğunluğunun (ρ_c) ana akım yoğunluğuna (ρ_∞) oranından hesaplanır. Yoğunluk oranı parametresi Denklem 3.8’de tanımlanmıştır.

$$DR = \frac{\rho_c}{\rho_\infty} \quad (3.8)$$

Hız Oranı (Velocity Ratio) : Soğutucu akışkan hızının (V_c) ana akım hızına (V_∞) oranıdır. Hız oranı Denklem 3.9’da tanımlanmıştır.

$$VR = \frac{V_c}{V_\infty} \quad (3.9)$$

Üfleme oranı (Blowing Ratio): Üfleme oranı ısı transfer katsayıları ve film soğutma etkinliğini etkileyen önemli bir parametredir. Soğutucu akışkanın yoğunluk ve hız çarpımının ana akım yoğunluk ve hız çarpım oranından hesaplanır. Üfleme Oranı (BR) aynı zamanda kütle akı oranı (M) diye de geçer. Literatürde yaygın olarak BR ile gösterilirken bazen de M ile gösterilir.

$$BR = \frac{U_c \rho_c}{U_\infty \rho_\infty} \quad (3.10)$$

Momentum Akı Oranı (Momentum Flux Ratio) : Net bir alandan geçen momentum akı miktarlarının oranıdır. Soğutucu akışkanın yoğunluk ve hızın karesiyle, ana akım yoğunluk ve hız karesiyle orantılı büyüklüktür. Momentum akı oranı denkliği Denklem 3.11’deki gibi hesaplanır.

$$I = \frac{\rho_c U_c^2}{\rho_\infty U_\infty^2} \quad (3.11)$$

Denklem 3.8 ile Denklem 3.10’u kullanarak Denklem 3.11’i yeniden yazmak gerekirse Denklem 3.12’yi elde ederiz. Momentum akı oranı (I) üfleme oranının karesi / yoğunluk oranı cinsinden de yazılabilir. Momentum akı oranının sabit bir üfleme oranında yoğunluk oranı ile ters orantılıdır. Bu ilişki Denklem 3.12’den anlaşılabılır.

$$I = \frac{BR^2}{DR} \quad (3.12)$$

Türbülans düzeyi: Ana akım türbülans düzeyinin doğrudan etkilediği faktör aslından türbülans sınır tabaka kalınlığıdır(δ). Sınır tabaka plaka boyunca gelişen akışın laminar ve türbülanslı olma özelliklerine göre incelik kalınlaşabilir. Fakat bu değer mevcut olanaklarla doğrudan gözlemlenemediği ve ölçülemediği için her hangi test

tüneline tüneline 3 boyutlu türbülans düzeyi hesaplanırken ortalama karekök hızların yardımıyla Denklem 3.13'teki gibi hesaplanır.

$$TU = \frac{\sqrt{0.33 (U_{rms}^2 + V_{rms}^2 + W_{rms}^2)}}{U_{\infty}} \quad (3.13)$$

2 boyutlu çalışma için türbülans düzeyi hesaplanırken Denklem 3.13'teki 3. hız bileşeni düşer ve türbülans düzeyi aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanır.

$$TU = \frac{\sqrt{0.5 (U_{rms}^2 + V_{rms}^2)}}{U_{\infty}} \quad (3.14)$$

Yine bir tünelde türbülans yoğunluğu hesaplaması da Denklem 3.14'te verilmiş olup ortalama karekök hızların, eksenel yöndeki hızlara oranından bulunur.

$$TI = \frac{\sqrt{0.33 (U_{rms}^2 + V_{rms}^2 + W_{rms}^2)}}{\sqrt{(U^2 + V^2 + W^2)}} \quad (3.15)$$

Birim zamanda bir kesitten geçen kütle debisi için genel eşitlik Denklem 3.16'da verilmiştir.

$$\dot{m} = \rho VA \quad (3.16)$$

Deşarj katsayısı: Kanal içinde sınır tabaka gelişiminden kaynaklı hız profilleri üniform olmaz. Teori her ne kadar hız profillerini üniforma alsada da gerçekte sınır tabaka kalınlığından kaynaklı üfleme kayıpları mevcuttur. Bu nedenle deşarj katsayısı her zaman 1'den küçüktür. Deşarj katsayısı delikten geçen soğutucu havanın gerçek debisinin delikten geçen teorik debiye oranından hesaplanır. Denklem 3.17'de deşarj katsayısının hesaplanması için bir eşitlik verilmiştir.

$$C_d = \frac{\dot{m}_{gerçek}}{\dot{m}_{teorik}} \quad (3.17)$$

Herhangi bir kanal için deşarj katsayısı, panele giden debi yani test plakasına giden gerçek debi ile soğutma deliklerinden çıkan jetlerin debisinin oranı şeklinde de yazılabilir.

$$C_d = \frac{\dot{m}_{panel}}{(\rho_c V_{c,teorik} A_c)} \quad (3.18)$$

Homojen deliklerin bulunduğu bir plakada üniform olan delik sayısı hesaplanırken teorik jet debisi deşarj katsayısı ile çarpıldığında panele geçen toplam debi değeri hesaplanabilir.

$$N = \frac{\dot{m}_{tünel}}{C_d \cdot \rho_c V_{c,teorik} A_c} \quad (3.19)$$

Plakadaki delikler homojen olmasa (efüzyon+ dilüsyon) bile, plakada ihtiyaç duyulan toplam alan deşarj katsayısı kullanılarak Denklem 3.20'deki gibi hesaplanabilir.

$$A_{toplam} = \frac{\dot{m}_{tünel}}{C_d \rho_c V_{c,teorik}} \quad (3.20)$$

Yine Denklem 3.18'den anlaşılaçağı üzere gerçek ile teorik hava debisi arasında yoğunluk ve alanın sabit tutarsak, gerçek hızlar ve teorik hızlar arasında deşarj katsayısı üzerinden ilişkilendirme yapılabilir.

$$V_{c,gerçek} = C_d V_{c,teorik} \quad (3.21)$$

Efüzyon ve film soğutma panellerinin bulunduğu tünel hesaplarında çoğu zaman ana akım Reynolds Sayısı yerine jetin karakteristiğı hakkında fikir veren delik çapına bağı Reynolds Sayısı daha kritiktir. Delik çapına bağı Reynolds Sayısı eşitliğı Denklem 3.22'de verilmiştir.

$$Re_D = \frac{\rho V D_{delik}}{\mu} \quad (3.22)$$

Denklem 3.22'de Reynolds Sayısı hesaplanırken farklı basınç ve sıcaklık değerlerinde yoğunluk hesapları için Denklem 3.23'teki ideal gaz denklemi kullanılmıştır. Burada ana akım basıncı, sıcaklığı ve yoğunluk değeri ile soğutucu akışkanın basıncı, sıcaklığı ve yoğunluk değerleri hesaplanırken ideal gaz denklemi kullanılmıştır.

$$P = \rho RT \quad (3.23)$$

Yine Denklem 3.22'de Reynolds Sayısı hesaplarken kullanılan mutlak viskozitenin değişimini hesaplamak için Denklem 3.22'de yer alan revize edilmiş Sutherland Denklemi kullanılmıştır. Burada referans sıcaklık (T_0) değeri 273.15 K ve referans mutlak viskozite değeri (μ_0) değeri de 1.716×10^{-5} (kg/ms)'dir.

$$\mu = \mu_0 \left[\frac{T}{T_0} \right]^{3/2} \left[\frac{T_0 + 110.4 \text{ K}}{T + 110.4 \text{ K}} \right] \quad (3.24)$$

Ana akım ve soğutucu jetler için Mach Sayısı, Denklem 3.25'te verilmiştir. Soğutma jeti için ayrı Mach ana akım için ayrı Mach değerleri hesaplanır. Burada ses hızı özgül ısı oranları ve sıcaklığın bir fonksiyonudur.

$$Mach = \frac{V}{a} = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (3.25)$$

Son olarak da sıcaklık ve basıncın sıkıştırılmaz akışlar için izantropik (tersinir ve adyabatik) değişimi ile ilgili denklemler Denklem 3.23 ve Denklem 3.24'te verilmiştir. Burada γ ısı kapasite katsayılarının oranıdır.

$$\frac{T}{T_0} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2 \right]^{-1} \quad (3.26)$$

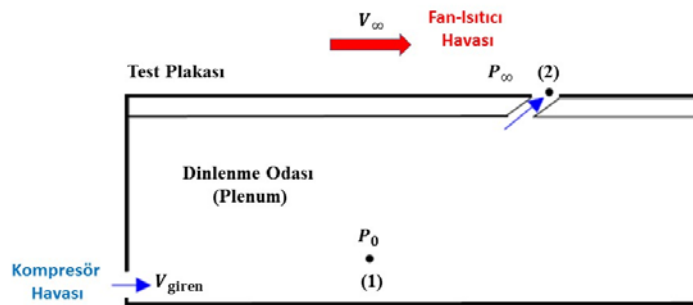
$$\frac{P}{P_0} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.27)$$

Gözeneklilik: Efüzyon plakasında gözeneklilik delik alanı ile delik adımları arasında kalan alanın oranıdır. Efüzyon plaka gözeneklilik katsayısı Denklem 3.24'te verilmiştir.

$$\sigma = \frac{0.25 \pi D^2}{S_x \cdot S_y} \quad (3.28)$$

3.2. Dinlenme Odası Hesapları

Deney düzeneğinde kompresörden gelen göreceli soğuk hava soğutma jetlerini besleyen ve film plakası oluşturan çapraz akış ögesidir. Kompresörden gelen hava öncelikle dinlenme odasına gönderilmiştir. Dinlenme odası akış regüle edici bal peteği şekli altıgen kanallarla (honeycomb) ile desteklendiğinden düzensiz akış profil oluşumunun önüne geçilmiştir. Şekil 3.3.'te dinlenme odası şematığı verilmiştir.



Şekil 3.3. Dinlenme Odası Şematığı

Dinlenme odası (Plenum) ile ilgili 1 ve 2 noktası arasında Bernoulli denklemini yükselti farkını ihmal edip sıkışmaz akış kabulünü yazarsak Denklem 3.25 ortaya çıkar

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (3.29)$$

Denklem 3.25'te plenum ve ana akım basınçlarını yerine koyarsak ve plenumda akışın hareket etmediğini durma noktasında olduğunu kabul edersek yani plenumdaki hızı sıfır ($V_1 = 0$) alırsak eşitlik Denklem 3.30'a indirgenir.

$$P_0 = P_\infty + \frac{1}{2}\rho V_c^2 \quad (3.30)$$

Denklem 3.30'dan soğutucu akışkan jet çıkış hızını çekersek pitot tüplerdeki hız ölçüm mantığı gibi jet hızı basınç farkı ve yoğunluk oranlarının kareköküyle orantılı şekilde bir eşitlikten hesaplanır.

$$V_{c,teorik} = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_\infty)}{\rho}} \quad (3.31)$$

Denklem 3.20'de teorik hızı deşarj katsayısı cinsinden yazarsak gerçek hız değeri için basınç farkı plenum ile plaka yüzeyindeki statik basınç fark değerine düşer.

$$\frac{V_{c,gerçek}}{C_d} = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_{statik})}{\rho}} \quad (3.32)$$

$$V_{c,gerçek} = C_d \cdot \sqrt{\frac{2(P_0 - P_{statik})}{\rho}} \quad (3.33)$$

Denklem 3.32 ile momentum akı oranı (Denklem 3.12) birleştirirsek momentum akı oranı, deşarj katsayısı ve basınç farkı ilişkisini veren Denklem 3.34 ortaya çıkar.

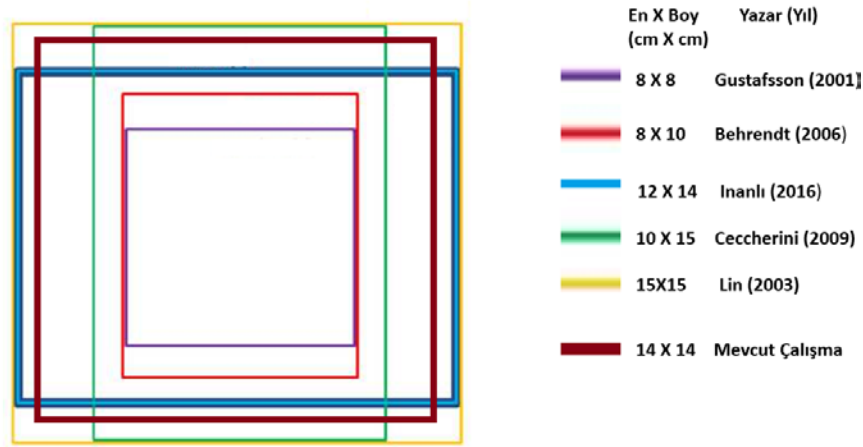
$$\Delta P = \frac{\rho_\infty \cdot I \cdot V_\infty^2}{2C_d^2} \quad (3.34)$$

Son olarak hız oranlarını statik basınçların oranı cinsinden yazarsak Denklem 3.35 ortaya çıkar. Denklem 3.35 hız oranlarıyla statik basınç oranları arasındaki ilişki hakkında fikir verir.

$$\frac{V_c}{V_\infty} = \sqrt{\left\{ \left[\frac{P_s}{P_0} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\} \frac{2}{\gamma-1}} \quad (3.35)$$

3.3. Hava Tüneli Boyutlandırma

Tünel plaka boyutlandırmanın ilk kademesi olan alt test plakası boyutlandırma da önce Barringer (2001) sonrasında Vakıl ve Thole (2003) daha sonra ise Scittore vd. (2007) tarafından çalışılan gerçek bir yanma odasının 9:1 ölçekleme (scaling) faktörü ile modellenen efüzyon test plakası modellenmiştir. Tünel kesiti olarak literatürde çalışılan kesitler göz önüne alındığında ekseriyetle kare kesitli kanallar öne çıkarken eni büyük tutanlar yan duvar etkilerini indirmek için kullanırken eni dar boyu yüksek tutanlar termal kamera ölçümleri için kullandıkları özel infrared ışınlarını geçiren camların maliyetinin düşürmeyi hedeflemişlerdir. Şekil 3.4.'te literatürde çalışılan çeşitli tünel kesitleriyle ilgili görsel kesitler ve tünel kesitinde çalışan yazarlarla birlikte verilmiştir. En küçük tünel hidrolik çapı 8 cm iken en yüksek tünelin hidrolik çapı 15 cm'dir. Gustafsson (2001) 8x8 cm kesitli, Behrendt (2006) 8x10 cm kesitli, Ceccherini (2009) 10 X15 cm kesitli, Lin (2003) 15X15 cm kesitli bir tünelde çalışma yapmıştır. Tez kapsamında kullanılan tünel kesiti ise 14 x 14cm'dir.



Şekil 3.4. Literatürde Çalışılan Tünel Kesitleri

Tez kapsamında slot film soğutma uygulaması olarak Gritsch vd. (1998) tarafından kullanılan deney düzeneğine benzer bir düzenek seçilmiştir. Bu kapsamda 10 mm'lik pleksi tünel üzerine 6 mm'lik 7 tane delik açılıp deliklerin üzerine 5 mm kalınlıkta bükümlü pleksi levha 1cm yükseklik ve 5 cm uzunluğunda bir slot mekanizmasıyla soğuk havanın slot film mekanizmasıyla ana akıma karışması sağlanmıştır. Film deliklerinden çıkan jetler üst plakaya çarpıp tekrar akış aşağı şekilde plakaya inerek ince bir film soğutma tabakası oluşmasına katkı sağlar.

Tablo 3.3. Gerçek Yanma Odası Koşulları ve Test Koşulları

PARAMETRE	GERÇEK Y.O.	TEST KOŞULLARI
Delik Çapı (mm)	0.5-3	2.25
Basınç (MPa)	1.5-4	0.1
Hız (m/s)	0-100	2-10
Ana Akım Sıcaklık (K)	1500	350
Soğutucu Akışkan Sıcaklığı(K)	600	296
Ana Akım Yoğunluğu (kg/m ³)	4.0	1.0
Soğutucu Akım Yoğunluğu (kg/m ³)	9.9	1.2
Yoğunluk Oranları	2.5	1.2
Ana Akım Viskozite (kg/ms)	5.3 x 10e5	2.1 x 10e5
Soğutucu Akım Viskozite (kg/ms)	3.0 x 10e5	1.8 x 10e-3
Viskozite Oranları	0.57	0.86
Delik Reynolds Sayısı	4500	700
Prandtl Sayısı	0.74	0.71
Ana Akım Isı İletim Katsayısı (W/(m-K)	0.087	0.030
Soğutucu Akım Isı İletim Katsayısı (W/(m-K)	0.046	0.026
Cidar İletim Katsayısı (W/(m-K)	20	0.2

Tablo 3.3.'te gerçek yanma odası koşulları ve test koşulları verilmiştir. Tez kapsamında efüzyon plakası olarak Scittore (2007) tarafından yapılan düz plaka üzerinde efüzyon soğutma test verileri doğrulama testleri için kullanılmıştır. Test düzeneğinin detay tasarım aşamasında pleksiglass malzeme test plakası kalınlığı 10 mm olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.4.'te sunulan L/D , t/d , S_x/d , S_y/d ve α değerlerinin iki testte de aynı olması için, test edilecek plakadaki delik çapı 2.25 mm, delikleri arası eksenel ve yanal mesafeler ise 11 mm olarak tutulmuştur.

Tablo 3.4.'te doğrulama testleri için test plakasına ait geometrik parametreler verilmiştir.

Tablo 3.4. Doğrulama Test Plakası ve Geometrik Parametreler

Parametre /Yazar	t (mm)	d (mm)	L/D	t/d	S _x (mm)	S _y (mm)	S _x /d	S _y /d	α (°)
Barringer (2001) Vakil (2003) ve Scrittore (2007)	25.4	5.7	8.9	4.5	27.9	27.9	4.9	4.9	30
Mevcut Düzenek	10	2.25	8.9	4.4	11.0	11.0	4.9	4.9	30

- t: Test plakası kalınlığı (mm)
- d: Efüzyon delik çapı (mm)
- L: Efüzyon delik uzunluğu (mm)
- S_x: Eksenel delik adımı (mm)
- S_y: Yanal delik adımı (mm)
- α : Delik açısı (°)

3.4. Slot Film Soğutma Plakası

Film soğutma slot plakası modellenirken yanma odası için yapılan çalışmalara bakılmıştır. Bu kapsamda literatürde yapılan çalışmalara bakılmıştır. Tez kapsamında slot film soğutma uygulaması olarak Gritsch vd. (1998) tarafından kullanılan slot deney düzeneğine benzer bir düzenek seçilmiş olup 5 mm'lik kalınlığından 1 cm yüksekliğinde ve 5 cm uzunluğunda bükümlü pleksiglass bir slot ile soğutma deliklerinden üflenen soğuk jetlerin ana akıma karışması sağlanmıştır. Film soğutma testleri için slot geometrisi kullanılmış ve pleksiglass malzeme 90 derece bükülmek kaydıyla film soğutma delikleri için slot tasarımı yapılmıştır. Daha düşük enjeksiyon açılarında üfleme plakasında eksenel yayılmanın fazlalığından dolayı slot uzunluğu biraz daha uzun tutulmalıdır. Uygun parametrelerde kesimi yapılan ve yüzeyi siyah mat boya ile boyanan slot film soğutma test plakalardan birisi Görsel 3.1.'de görülmektedir. Plaka tabanına atılan siyah boya gerek PIV çalışmalarında lazer ışığının yansımaları önlemiş gerekse termal kamera ölçümlerde yüzey emisivite değerinin 1 alınmasını sağlayarak daha doğru ölçümler alınmasını sağlamıştır.



Görsel 3.1. Film Slot Test Plakası

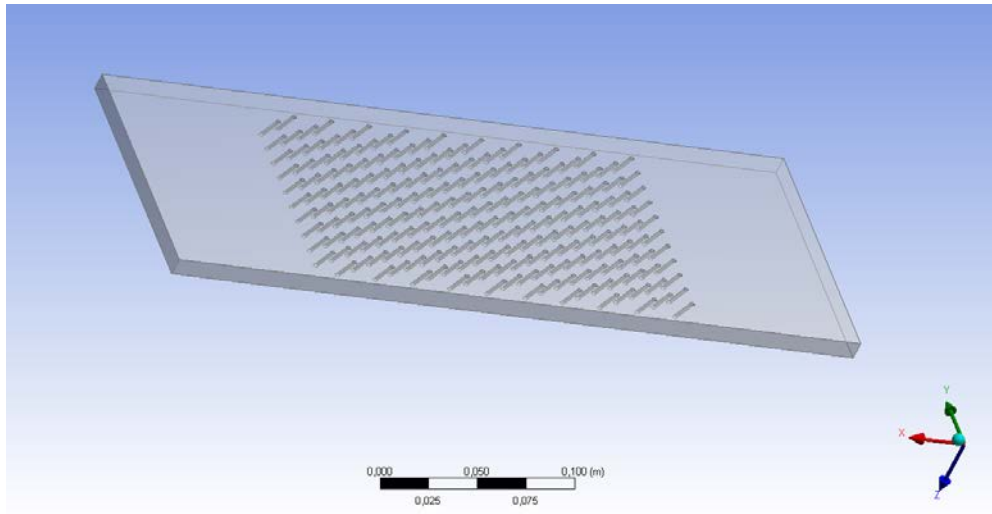
Tablo 3.5.'te film plaka hakkında yapılan literatür derlemesi verilmiştir.

Tablo 3.5. Film Plaka Literatür Derlemesi

Parametre /Yazar	Açı	L/D	Sx/D Sy/D	ReD	R (M)	DR	I	Tu	T _c (K) T _{ms} (K)
Baldauf (2002)	30, 60 90	6	2 3.5	6800 14000	0.2-2.5	1.2 1.5 1.8	0.03 5.2	1.5 4	293 550
Silieti (2004)	30	6	-	6800	2	1.6	2.5	1 1.5	290 540
Para (2009)	5-30	-	-	-	0.5-2	1	0.25 4	-	580 1280
Voigt vd. (2012)	17 0	1 0	4.48 7.45	-	0.5-3	1.7	-	-	300 530
Greiner (2014)	30	5	3	6070	1	2.92	0,342	-	625 1829
Hayes (2014)	30	4	3	9700	0.5-2	1	0.25 4	1. 7.5 17	-
Kingery (2015)	30	4	3	25000 0	0.5-5	1	0.25 2.25	0.7 13.7	293 313
Schroeder (2015)	30 55	4	3-8	2800 6600	0.5-3	1.2 1.5	-	0.5 13.2	-
Raffan(2016)	Slot	-	-	6500	-	-	-	-	300 500
Mevcut Çalışma	45	1.7	2.3	14000	2 4 6	1.18	-	2	296 350

3.5. Efüzyon Soğutma Plakası

Plakada 2.25 mm çapa sahip toplam 210 adet delik bulunmaktadır. Test plakası düşük ısı iletkenliği özelliğinden dolayı termal dağılımın gözlenmesini sağlamak, iletim kayıplarını minimize etmek sebebiyle pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Testler sırasında plaka yüzey sıcaklık dağılımı PIV kameraları ve termal kamerayla ölçüleceği için plaka yüzeyi siyah mat boyayla boyanmış, testler ve ölçümler sırasında yüzey yayılım katsayısı (surface emissivity) 1 olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.5.'te doğrulama testlerinde kullanılacak test plakasına ait bir CAD çizim gösterilmektedir



Şekil 3.5. Efüzyon Test Plakası Çizimi

CAD çizimi verilen efüzyon test plakasında 2.25 çapında sırasıyla 11 delikli ve 10 delikli art arda çakışmayacak şekilde düzenlenmiş (staggered row) 20 diziden oluşan bir efüzyon plakasında 2.25 mm çapında toplamda 210 tane soğutma deliği bulunmaktadır. Soğutma delikleri 30 derecelik açıyla plakaya üfletilmiş olup delik uzunluğu 20 mm tutulmuştur. Böylece L/D değeri 8.9 düzeylerinde tutulmuştur. Delikler arası mesafe 11 mm olarak eşit şekilde tutulmuş hem eksenel (S_x/D) hem de yanal olarak (S_y/D) değerler 4.9 mertebesinde hesaplanmıştır. Literatür çalışmasından derlenmiş efüzyon plakası çalışması Tablo 3.6.'da verilmiştir.

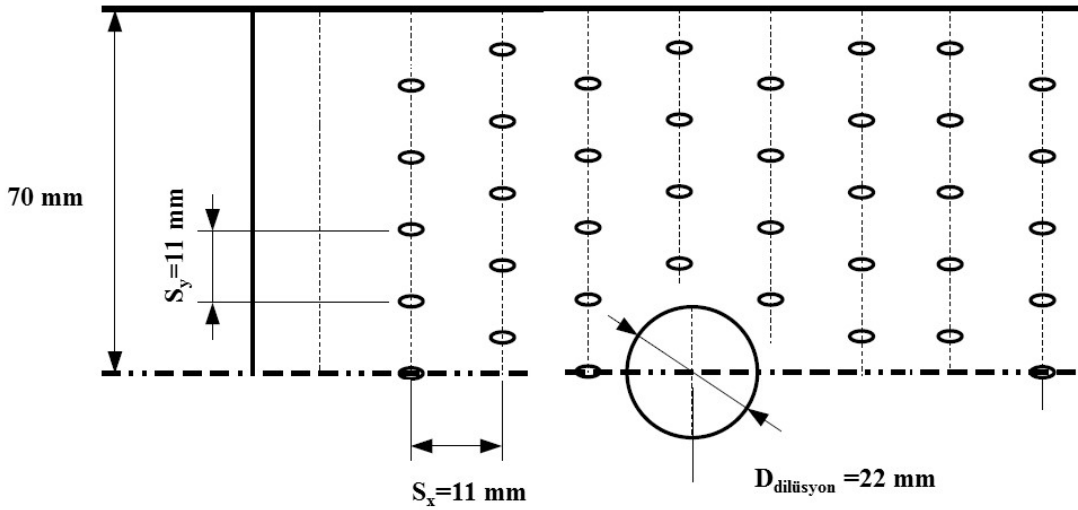
Literatür çalışmalarında genelde enjeksiyon açısı olarak genelde 30 derece ve 90 derecelik durumlar için çalışılmış, yoğunluk oranı ile ilgili çalışmalar azdır yani yoğunluk oranı genelde 1 alınmıştır. L/D oranı ise yaklaşık 8 bandında çalışılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda yapılan çalışmaların ekseriyeti deneysel değil sayısal çalışmadır.

Tablo 3.6. Efüzyon Plaka Literatür Derlemesi

Parametre / Yazar	α	L/D	S _x /D S _y /D	Re _D	BR	DR	Delik Sayısı	T _{ms} (K) T _c (K)
McGhee (2000)	30 90	6	14	8200	0.85 1.2	0.8	-	305 380
Gustafsson (2001)	15 30	8	8	3900- 5800	14	2	80	298 523
Grierson (2004)	18 25	8.6	6.2	-	0.5-4	1.2	80	300 360
Scittore vd. (2007)	30	8.9	4.9	8600	3.2-5	1	720	300 330
Zhong (2007)	23 90	0.8	0.7	-	0.2 -1	1	200	160 320
Arcangeli vd. (2008)	30 90	10- 43	7.5	6000	0.3	1	60	300 325
Cho (2008)	90	1.5	3	3200- 14000	-	1	20	300 350
Facchini vd. (2009)	17	16	13	12000 20000	5, 7, 9	1	36	306 322
Adreini vd. (2011)	30	5.5	-	3200	-	1	28	500 1200
Ligrani vd. (2012)	20	8.35	7	10000 12000	2, 5, 10	1.15 1.25	320	300 380
Wurm vd. (2012)	30 45	-	-	1400- 6600	-	-	972	250 430
Andrei vd. (2014)	30 45	6	-	-	1-3	1 1.5	60	290 330
Adreini vd. (2014)	30	6	6	-	0.5-5	1 1.5	160	290 330
Soghe vd. (2015)	30	6	6	8600	-	1	54	300 1000
Mevcut Düzenek	30	8.8	4.9	14000	2, 4, 6	1.18	210	296 350

3.6. Efüzyon Soğutma +Dilüsyon Plakası

Dilüsyon plakası testleri için model olarak Ceccherini vd. (2009) tarafından yürütülen ve Avrupa Birliği tarafından desteklenen FP6 projelerinden olan New Aero Engine Core Concepts (NEWAC) projesi kapsamında üretimi ve testleri yapılan plaka test koşulları baz alınarak modellenmiştir. Toplamda 29 dizi olan hibrit plakada 14. diziye dilüsyon deliği eklenerek efüzyon ve dilüsyon etkileri ortak olarak incelenmiştir. Dilüsyon delik çapı D , efüzyon soğutma çapı d olmak kaydıyla slot plaka ve efüzyon plakada alanlar (A_{slot} , $A_{efüzyon}$, $A_{anaakım}$) ve debiler ($\dot{m}_{slot}$, $\dot{m}_{efüzyon}$, $\dot{m}_{anaakım}$) üzerinden tanımlanmış üfleme oranları (BR) ile yoğunluk oranları (DR) tarafından tanımlanmış hız oranları (VR) Denklem 3.36-3.39 arasında verilmiştir. Şekil 3.6.'da efüzyon ve dilüsyon plaka geometrisinin yarım plaka üzerinde gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.6. Efüzyon ve Dilüsyon Plaka Geometrisi

$$BR_{efüzyon} = \frac{\dot{m}_{efüzyon} / (206 \cdot \pi d^2 / 4 + \pi D^2 / 4)}{\dot{m}_{anaakım} / A_{anaakım}} \quad (3.36)$$

$$VR_{efüzyon} = BR_{efüzyon} \frac{\rho_{anaakım}}{\rho_{efüzyon}} \quad (3.37)$$

$$BR_{slot} = \frac{\dot{m}_{slot} / A_{slot}}{\dot{m}_{anaakım} / A_{anaakım}} \quad (3.38)$$

$$VR_{slot} = BR_{slot} \frac{\rho_{anaakım}}{\rho_{slot}} \quad (3.39)$$

Efüzyon plakasında toplam delik sayısı 210 iken 22 mm'lik dilüsyon deliği açıldığında ortadaki 4 tane efüzyon deliği iptal olduğundan toplam delik sayısı 206'ya düşer. Böylece Denklem 3.36'yı kullanırsak $206 * \pi(2.25)^2/4 + \pi * (22)^2/4$ toplam alan yaklaşık olarak 1200 mm^2 olarak hesaplanır. Denklem 3.36'da verilen slot kesit alanı ise $10*140= 1400 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanırken ana akım için alan $140*140 = 19600 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Yukarda bulunan üfleme ve hız denklemlerinin yanı sıra slot ve delikler için Reynolds Sayısı hesapları da aşağıda verilmiştir. Denklem 3.40'taki h_{slot} değeri slot yüksekliğini Denklem 3.41'deki d_{delik} ise delik çapını göstermektedir. Görsel 3.2.'de çalışma kapsamında üretimi yapılan dilüsyon test plakası verilmiştir.

$$Re_{\text{slot}} = \frac{\dot{m}_{\text{slot}} \cdot h_{\text{slot}}}{A_{\text{slot}} \cdot \mu_{\text{soğutucu}}} \quad (3.40)$$

$$Re_{\text{delik}} = \frac{\dot{m}_{\text{eff}} \cdot d_{\text{delik}}}{A_{\text{eff}} \mu_{\text{soğutucu}}} \quad (3.41)$$



Görsel 3.2. Dilüsyon Test Plakası

3.7. Test Koşulları

Geometrik parametreler tanımlandıktan sonra testlerin yapıldığı koşulları ele alabiliriz. Testlerin yapıldığı laboratuvarında barometreden okunan ortam basıncı 1017 hektopaskal (hPa) olarak okunmuştur. Ana akımda tünel giriş koşullarını tanımlamak için PIV sistemiyle radyal tarama yapıp ortalama hız ölçüm değeri ana akım hızı (V_{ms}) olarak kabul edilmiştir. Bu değer yaklaşık 2 m/s'dir. Isıtıcı ile hava tüneli arası kısa tutulduğundan sıcaklık kayıpları önemsizmemek kaydıyla ısıtıcının çıkışında bulunan termokupl ile ölçülen sıcaklık tünel giriş sıcaklığı (T_{ms}) alınmıştır. Ana akım sıcaklık

değeri 77 °C (350 K) alınarak soğutma havası ise kompresörden gelen ortam havası 23 °C (296 K) olarak ele alınmıştır. Ana akıma giren debi hesabı için Denklem 3.16 kullanılmıştır. Bu değer yaklaşık olarak 2.4 kg/dak ya da 0.04 kg/s'dir. Ayrıca bu değer fan çıkışına bağlanan debimetre ile de ölçülmüştür. Denklem 3.40 ve Denklem 3.41'de değerler yerine konulduğundan slot ve delikler için Reynolds Sayıları hesaplanır. Slotun yüksekliği 10 mm, alanı ise 1400 mm² ve delik çapı ise 2.25 mm'dir.

Tablo 3.7. Test Koşulları

PARAMETRE	DEĞERLER
Test Kesit Alanı (Mm ²)	140x140
Test Kısmı Uzunluğu (Mm)	1000
Giriş, Film ve Efüzyon Plakası Uzunluğu (mm)	200, 400, 400
Ana Akım Sıcaklığı (K)	350
Soğutucu Akışkan Sıcaklığı (K)	296
Sıcaklık Oranı(T_{ms}/T_c)	1,182
Ana Akım Hızı (m/s)	2
Soğutucu Plaka Hızı (m/s)	2, 4, 6
Ana Akım Yoğunluğu, P_{ms} (kg/m ³)	1,008
Soğutucu Hava Yoğunluğu, P_c (kg/m ³)	1,188
Yoğunluk Oranı (P_c/P_{ms})	1.18
Ana akım Reynolds Sayısı (Re_{ms})	14170
Delik Reynolds Sayısı (Re_d)	625, 1250, 1870
Slot Reynolds Sayısı	1330

Tablo 3.7.'de verilen çalışma koşulları farklı geometrik düzenekler için aynı değerlerde tutulmuştur. Denklem 3.36-3.39'daki denklikler yerine konulduğundan 2, 4 ve 6 hız oranları için debiler hesaplanmış ve 2 farklı konfigürasyon ve 3 farklı üfleme oranı için debiler hesaplanmıştır.

Yanma sonunu temsil eden ana akım ve film delikleri üfleme debileri sabit tutulmak kaydıyla efüzyon plakasına açılan deliklerden benzer hız oranlarını tutturmak için gerekli debiler hesaplanmış ve bu debi değerleri Tablo 3.8.'de verilmiştir.

Tablo 3.8. *Efüzyon Plaka İçin Test Debileri*

EFÜZYON PLAKA TEST DEBİLERİ	(KG/DAK)	2 BASAMAKLI YAKLAŞIK DEĞER (KG/DAK)
M_{slot}	0,201	0.20
M_{eff2}	0,238	0.24
M_{eff4}	0,479	0.48
M_{eff6}	0,719	0.72

Dilüsyon plakasında da ana akım ve film delikleri üfleme debileri sabit tutulmuştur. Efüzyon +dilüsyon plakasına açılan deliklerden benzer hız oranlarını tutturmak için gerekli debiler hesaplanmış ve bu debi değerleri Tablo 3.9.'da verilmiştir.

Tablo 3.9. *Dilüsyon Plaka İçin Test Debileri*

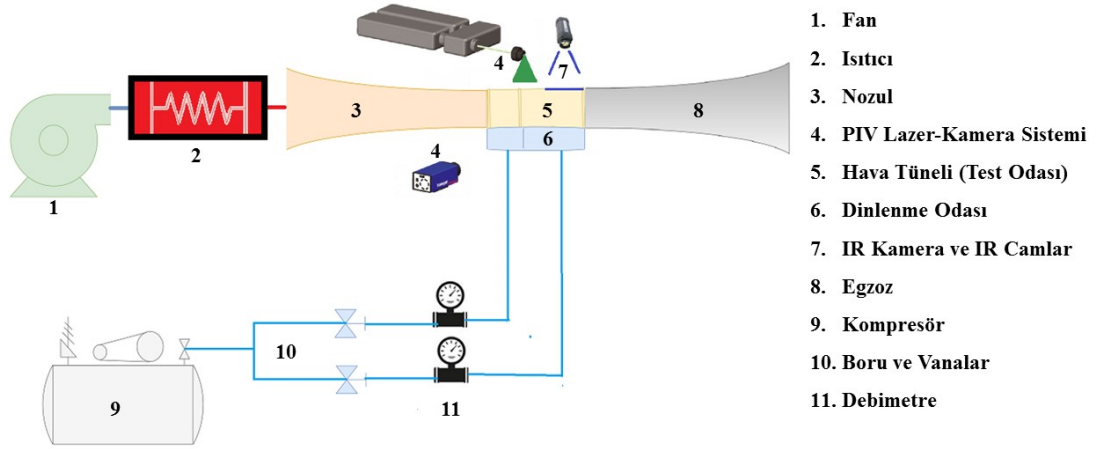
DİLÜSYON PLAKA TEST DEBİLERİ	(KG/DAK)	2 BASAMAKLI YAKLAŞIK DEĞER (KG/DAK)
M_{slot}	0,223	0.22
M_{dil2}	0,352	0.35
M_{dil4}	0,695	0.69
M_{dil6}	1,056	1.05

4. DENEY DÜZENEGİ

Bu bölümde araştırmanın çerçevesi kapsamında oluşturulan deney düzeneği ve ara bağlantı elemanları ele alınmıştır. Deney düzeneğinde temelde 2 ana akış olup fan ve ısıtıcı ile yapılan sıcak ana akım beslemesi yanma sonunu temsil eden sıcak hava şeklinde düşünülmüştür. Kompresör ve dinlenme odası ile efüzyon deliklerinden geçirilen soğutma jetleri de dış çeperden geçen soğuk havayı temsil edecek şekilde deney düzeneği kurgulanmıştır.

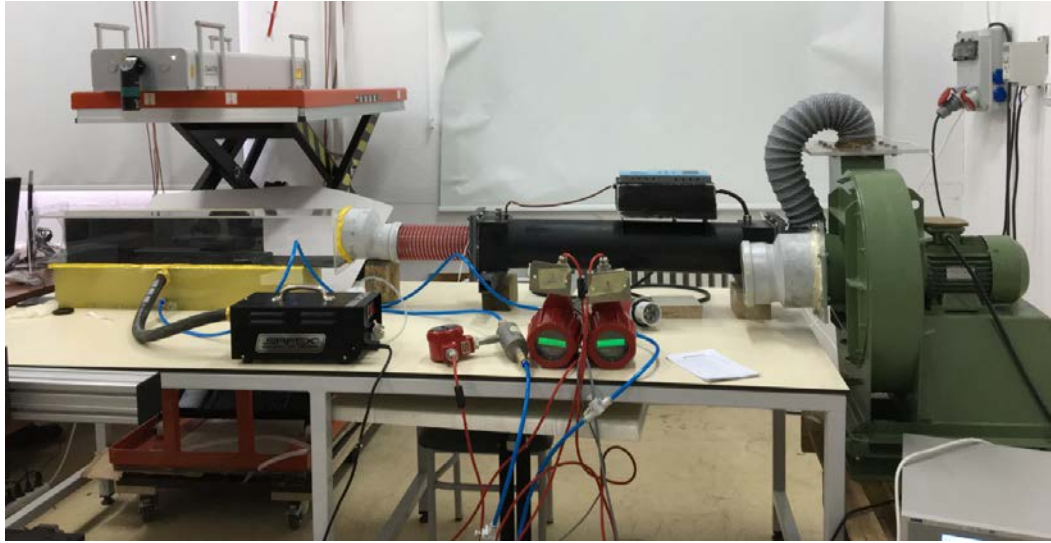
4.1. Deney Düzeneği Ana Şeması

Araştırma çerçevesi kapsamında oluşturulan deney düzeneğinde 2.2 Kw gücünde bir fan kullanılmış ve fan sürücü (fan driver) kontrolüyle sisteme kontrollü bir hava debisi girişi yapılmıştır. Fandan çıkan sabit debideki hava, özel üretimi yapılan ısıtıcıya girmek kaydıyla istenilen sıcaklık değerlerine çıkması sağlanmıştır. Burada test düzeneğinin optik olması istendiğinden ve plakanın kolay işlenebilir olması istendiğinden tünel imalatı pleksiglass malzeme ile yapılmıştır. Fakat malzeme yapısı çalışılan üst sıcaklık düzeyleri için kısıtlayıcı parametre olmuştur. Isıtıcı 5.5 Kw güç değerinde 380 Volt girişli elektrik şebekesine bağlı olup çıkabileceği üst sıcaklık 730 K iken tünel sıcaklık dayanım malzeme kısıtından dolayı 350 K düzeylerinde çalışma yapılmıştır. Isıtıcıdan çıkan yüksek sıcaklığa sahip hava tünele girişi nozul ile sağlamıştır. Bunun yanı sıra soğuk hava beslemesi için kompresör ve soğuk hava hattı kullanılmıştır. Kompresörden çıkan soğuk hava 2 ayrı şebekeye bölünmüş ve 10 mm'lik hava boruları ve debi kontrolü yapan iğneli vanalarla debimetrelerden geçirilmek kaydıyla hava tüneli altında film ve efüzyon için bölünmüş 2 ayrı dinlenme odasına girişi sağlanmıştır. Vana ve debimetre düzeneği sayesinde debi kontrolü ve ölçümleri yapılmıştır. Bunun haricinde kompresörden gelen basınçlı hava sıvı parçacık jeneratörüne bağlanmak kaydıyla tünele PIV ölçümleri için ihtiyaç duyulan tohumlamayı sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Dinlenme odasına giren havanın delik çapı küçük (10 mm hava hortumu) tutularak gelen havanın burada jet etkilerinden ve türbülansın arınarak dinlenme odasının özellikle üst bölgesinde üniform bir akış alanı sağlanıp efüzyon jet çıkışlarının üniform şekilde tünele soğuk hava beslemesi yapması sağlanmıştır. Deney düzeneğinde PIV lazer-kamera sistemi sayesinde akış karakteristikleri incelenirken IR kamera-IR cam düzeneğiyle de sıcaklık ve film etkinlik katsayıları ölçülmüştür. Tünel çıkışında oluşan çürük hava ve dinlenme odasından tahliye edilen hava egzozla dışarı atılmıştır.



Şekil 4.1. Deney Düzeneği Ana Şeması

Deney düzeneği ana şeması Şekil 4.1.'de verilmiştir. Deney düzeneğinin kurulduğu laboratuvarın genel görünümü aşağıda Görsel 4.1.'de gösterilmiştir.



Görsel 4.1. Laboratuvar ve Deney Düzeneği

4.2. Radyal Fan

Sıcak ana akım hattını beslemek için kullanılan radyal salyangoz fan Görsel 4.2'de verilmiştir. Fanın elektrik beslemesi için elektrik panosundan 380 Volt'luk elektrik beslemesi yapılmıştır. Radyal tip fan hem emiş hem de üfleme özelliklere sahiptir. Emiş ya da üfleme özelliği kullanılacak girişten ayarlanır. Üfleme hızları ise fan giriş/çıkışlarında kullanılan değişik çaplardaki flanşlarla ayarlanır.



Görsel 4.2. Radyal Salyangoz Fan

Ana akım havasını beslemede kullanılan fanın özellikleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Fanın Özellikleri

Tipi	Radyal Salyangoz Fan
Voltaj:	380 V – 50 Hz
Güç:	2.2 KW
Maks. Debi:	$V = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$
Basınç:	1.800 Pa
Maks. Devir:	2850 Dev/dak
Çıkış Ağız Ölçüsü:	15 X15 cm

Fanın debi kontrolü için devir kontrolü yapan fan sürücüsü temin edilmiş 0 ila 50 Hz değerleri arasında değişen frekanslarda fanın sağladığı debi değerleri ayrıca debimetreyle ölçülmüştür. Bu sayede hem ana akım debi değeri için gereken devirde sabit değerde debi değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiş hem de ısıtıcıya sabit bir debide hava gönderilerek ısıtıcının sıcaklık salınımları engellenmiştir. Görsel 4.3.'te fanın debi kontrolünü sağlayan fan sürücüsü gösterilmiştir.



Görsel 4.3. Radyal Fan Kontrol Sürücüsü

4.3. Hava Isıtıcı (Heater)

Hava ısıtıcı, özel üretim ısıtıcı olup proje kapsamında hava ısıtma sistemi olarak 380 V girişli elektrik beslemeli 6 kW maksimum güç değerinde tasarlanmıştır. Tünel malzemesi olarak pleksiglass malzeme kullanıldığından sıcaklık dayanımı göz önüne alındığı için yüksek sıcaklıklar tercih edilmemiştir. Isıtıcının çıkabileceği maksimum üst sıcaklık 730 K iken tünel sıcaklık dayanım malzeme kısıtından dolayı bu çalışmada soğuk hava-sıcak hava karışım testleri 350 K ila oda koşul sıcaklıkları düzeylerinde çalışılmıştır. Görsel 4.4.'te hava ısıtıcıya (air pre-heater) ait görseller verilmiştir.



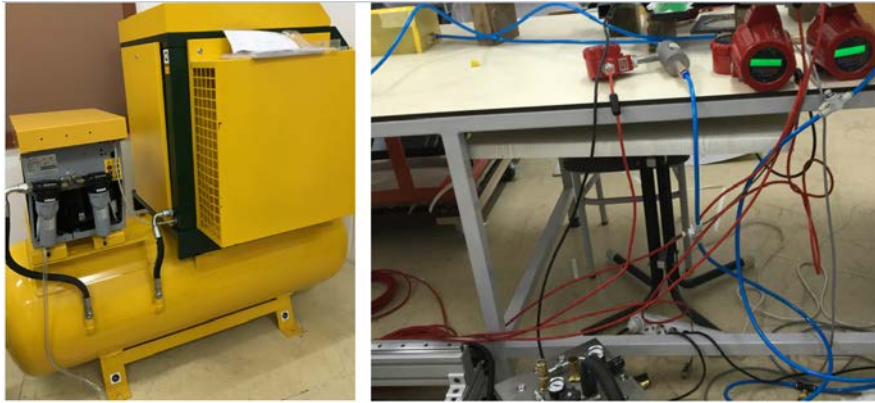
Görsel 4.4. Hava Isıtıcı

Isıtıcıya özel olarak PID kontrollü sürücü eklenerek sıcaklığın kontrolü ve sabit değerde durması sağlanmıştır. Isıtıcının sabit bir sıcaklıkta salınım derece hatası $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ olup üst düzeyde bir sıcaklık salınım kontrolüne ve düşük hata payıyla sıcaklığı sabit tutma özelliğine sahiptir. Örneğin 77°C 'ye sabitlenen PID kontrolör ünitesi ısıtıcıyı 76.8°C - 77.2°C aralıklarındaki sıcaklıklarda tutmaktadır. Isıtıcı, fanın karakteristiklerine

(maks. basınç, debi vb.) uygun olarak tasarlanmıştır. Isıtıcının toplam uzunluğu 70 cm olup çıkış çapı 15 cm'lik flanşlarla tünele bağlanacak şekilde sıcaklığa dayanıklı ara nozul bağlantı aracılığıyla tünele bağlanmıştır.

4.4. Kompresör ve Soğuk Hava Hattı

Göreceli soğuk hava beslemesi için kullanılan kompresör ünitesi 8 bar basınçta çalışan 500 litrelik tanka sahip vidalı tip kompresördür. Kompresör dakikada 1750 litre hava basma kapasitesine sahiptir. Bu da oda koşullarında en yüksek değerde dakikada yaklaşık 2.1 kg hava basması demektir. Görsel 4.5.'te vidalı tip kompresör ve soğuk hava hattı ile ilgili görsel verilmiştir.



Görsel 4.5. Kompresör ve Soğuk Hava Hattı

Dinlenme odasına giren ve kompresörden çıkan hava hattı ikiye bölünmüştür. Hava hattının biri slot film beslemesi için ilgili dinlenme odası bölümüne diğeri ise efüzyon/dilüsyon plakasını beslemek için diğeri dinlenme odası bölmesine gönderilmiştir. 10 mm'lik hortum bağlantılarının arasına yerleştirilen iğneli vanalardan kısma ya da açma yöntemiyle debimetrelerden okunan debiler istenilen değerlerde tutulmuştur. Görsel 4.6.'da debi kontrolü yapılan iğneli vana ile ilgili bir imaj verilmiştir.



Görsel 4.6. İğneli Vana ve Debi Kontrolü

4.5. Hassas Hava Debimetresi

Debimetreler hava ile çalışan ısıtılmış havanın da debisini ölçen çok küçük debilere karşı da hassasiyeti olan cihazlardır. Görsel 4.7.'de Sierra 780i modelinde iki adet termal hava debimetresi görülmektedir.



Görsel 4.7. Sierra 780i Termal Hava Debimetresi

Hassas termal kütle akışı için en önemli husus termal noktadan veri toplayan sensörlerin hassas ölçümüdür. Sierra, kaymayan (no slip) DrySense adlı termal kütle hızı sensörüyle akış ölçümünde önemli bir gelişme sağlamıştır. Termal debi ölçüm teknolojisinin doğası gereği kütle akış oranını ölçmek için kapalı bir sistemdeki ısı transfer fiziğini ve enerjinin korunum yasalarını uygulama yaparak ölçüm almaktır. Bu termal kütle akış sayacının en yüksek doğruluğu elde etmesi için, kayma yapmaması ve hassas sıcaklık değişimlerinde doğru debi değerlerini okumasıdır. Geleneksel termal sensörlerde bir sıcaklık sensörü ve bir hız sensörü olmak üzere toplamda 2 sensör bulunurken QuadraTherm'de dört sensör bulunur. Bunlardan üçü hassas platin sıcaklık sensörü biri ise DrySense kütle hızı sensörüdür. Bu sayede hem sıcaklık değişimlerinde doğru debi değerleri okunacak hem de kayma olmadığı için doğru hız değerleri okunarak debimetrenin hassasiyeti artacaktır. Hassas debimetre, kendisine ait bir yazılımdan (Quadro Therm 780i) gerçek zamanlı debi datası aktarmaya izin verdiği gibi, NI gibi harici veri toplama sistem modüllerine bağlanarak testler ve ölçümler sırasında gerçek zamanlı sıcaklık, basınç ve debi okunmasına ve bilgisayar ortamında kaydedilip işlenmesine olanak sağlar.

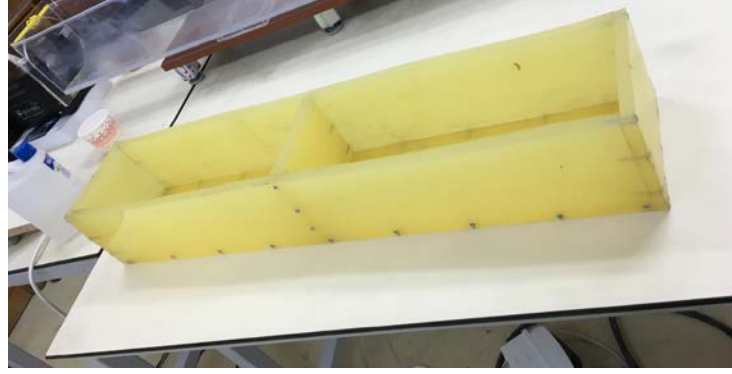


Şekil 4.2. *Quadro Therm 780i Termal Hava Debimetre Yazılımı*

Şekil 4.2.’de termal hava debimetre yazılımı olan Quadro Therm 780i ‘nin arayüzü verilmiştir.

4.6. Dinlenme Odası (Plenum)

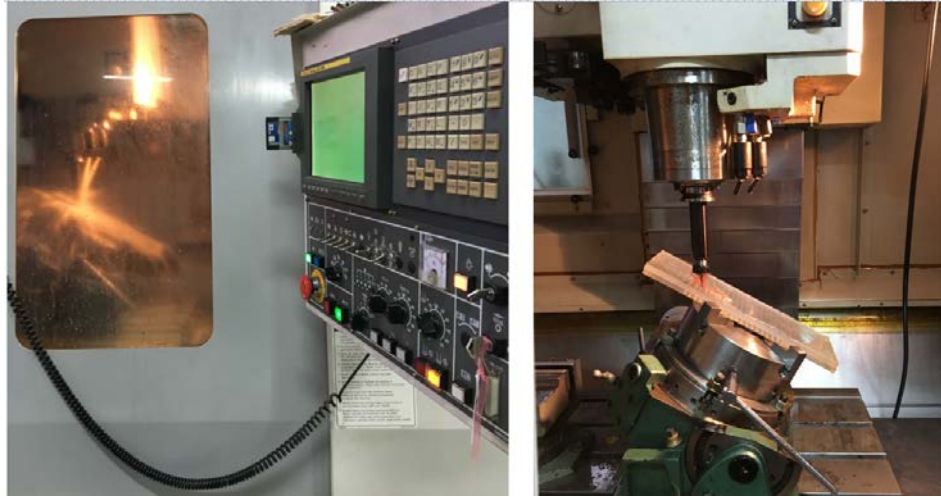
Kompresörden çıkan soğuk hava 2 ayrı şebekeye bölünmüş ve 10 mm’lik hava boruları ve iğneli vanalarla debimetrelerden geçirilip debi değerleri ayarlandıktan sonra tünel altında bulunan film ve efüzyon için bölünmüş 2 ayrı dinlenme odasına girişi sağlanmıştır. Dinlenme odasına giren havanın delik çapı küçük tutularak gelen havanın burada jet etkilerinden türbülansdan ayrılmış düzenli bir akış sağlanıp tünele soğuk hava beslemesi yapması sağlanmıştır. Pleksiglass malzemenin ısı iletkenlik katsayısı 0.2 W/mK iken poliüretan levha test plakasının ısı iletkenlik katsayısı 0,024 W/mK olup pleksi plakaya göre çok düşük bir ısı iletkenlik değerine sahiptir. Böylece iletim ile ısı transferinden kaynaklı kayıplar minimize edilmiştir. Isı iletkenliğin düşük olması malzeme içindeki sıcaklık gradyanında daha homojen bir dağılımın ortaya çıkması sağlanmaktadır. Görsel 4.8.’de poliüretan levhadan üretilmiş dinlenme odası gösterilmiştir. Poliüretan levhaya sonradan 2 ayrı 10 mm’lik hava hortum giriş dişleri açılmış ve kompresörden gelen soğuk hava hortum bağlantılarının girişi sağlanmıştır. Ayrıca yanma odası dış cidar çalışmalarına benzetim açısından hata oluşmasını ve çapraz akış etkileri net şekilde çalışılabilir ve incelenebilir diye dinlenme odası çıkışındaki soğuk havanın tahliyesi sağlanmıştır. Böylece yanma odası dış cidarını sembol eden bir plaka üzerinde alttan soğuk hava üstten sıcak hava geçirilerek çapraz akışta jet etkileşimlerinin birebir incelenmesine deneysel olanak sağlanmıştır.



Görsel 4.8. *Poliüretan Levhadan Üretilmiş Dinlenme Odası*

4.7. Hava Tüneli ve Test Kısmı

30 derecelik açılı 2.25 mm'lik 210 delikten oluşan efüzyon plakasının üretimi için öncelikle 2.25 mm çapında özel üretim freze başlıkları üretilmiştir. Sonrasında Anadolu Üniversitesi Torna Atölyesi'nde bulunan 4 eksenli CNC (Computer Numerical Control) kontrollü makineler ile kesimi yapılarak üretilmiştir. Görsel 4.9.'da torna atölyesi bünyesinde yapılan işlemlerle ilgili açılı pleksi plaka üzerinde 30 derecelik 2.25 mm'lik delik açma ve kesim yapma görüntüleri bulunmaktadır.



Görsel 4.9. *Test Plakalarının 4 Eksenli CNC'de Kesimi*

Değişik kalınlıklarda pleksiglass levhalar hava tüneli tasarımına uygun ölçülerde 1000 mm uzunluğunda kesilmiştir. 6 mm'lik pleksiler yan ve üst duvarlarda kullanılırken 10 mm'lik pleksiler alt plakalarda kullanılmıştır. Tünel kare kesitli bir tünel olup iç kesit uzunluğu 140 mm'dir. Şekil 4.3.'te tünel ön kesit şeması verilmiştir.



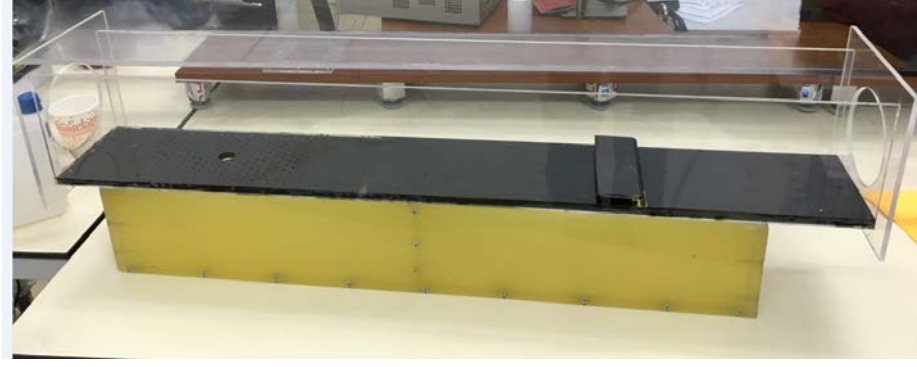
Şekil 4.3. *Optik Hava Tüneli Kesit Görünümü*

Kesimi yapılan plakalar pleksi yapıştırıcı (kloroform) aracılığıyla birbirine kaynaştırılmış 1 metre uzunluğunda ve 14 cm açıklığa sahip rijit kare kesitli optik bir pleksiglass malzeme test tüneli imal edilmiştir. Görsel 4.10.'da optik hava tünel montajı verilmiştir. Tünelin giriş ve çıkışlarına nozul ve egzoz bağlantıları yapılabilsin diye hidrolik çaplarda ortası oyulmuş pleksiglass bağlantılarıyla flanşlar yapılmıştır.



Görsel 4.10. *Optik Hava Tünel Montajı*

Plenum ile optik hava tünelinin montajı Görsel 4.11.'de verilmiştir. Dinlenme odasına sonradan 10 mm'lik hava hortum girişleri ve soğuk havanın egzoz işlemleri uygulanmıştır.



Görsel 4.11. *Dinlenme Odası ve Hava Tüneli*

4.8. PIV Lazer-Kamera Sistemi

Anadolu Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi bünyesinde bulunan Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Cihazının bileşenleri hakkında detay bilgiler aşağıda verilmiştir. Mevcut PIV sistemi; lazer, yüksek hızlı kamera ve lensler, zamanlayıcı (senkronizer), sistem bilgisayar, paket yazılımı (Dynamic studio), tohumlayıcılar (duman ve sıvı parçacık jeneratörü), hareket sistemleri (traverse) ve tamamlayıcı sistemlerden(90 derecelik ayna ünitesi, kalibrasyon plakası) oluşur.

Parçacık görüntülemeli hız ölçüm sisteminin üstünlükleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Yüksek Hızlı PIV: Ses hızına yakın ve ses üstü hızlarda çalışmaya uygun 1000 Hz frekansı sahip güçlü bir lazer mevcuttur.
- Zaman Çözünürlüklü PIV: Yüksek çözünürlük kameralar CMOS tipi sensörlerle desteklendiğinden zamana bağlı ölçüm alan (Time Resolved) TR-PIV'dir.
- Stereo PIV (2D3C): Scheimpflug bağlantı mekanizmasıyla iki farklı kameranın aynı kesite odaklanmasıyla ve görüntü işleme yazılımının (Dynamic Studio) yardımıyla kesitten alınan 2D vektörlerden paket yazılıma gömülü korelasyonlarla 3. Vektör(3C) bileşenini çıkarabilen sistemdir.

Lazer: Litron LDY-304 PIV

Lazerin temel özellikleri aşağıdadır.

- 527nm de 1kHz'de atım başına lazer kafası başına enerji: 30(mJ)
- Pulse - atım stabilitesi ($\pm\%$): 1

- Işın çapı (mm): 5 mm
- Işın diverjansı : <3 mrad
- Atım genişliği @ 1kHz: ~ 150 (ns)
- M2Y M2Y : 12,8
- Çift kaviteli / tek kafalı,
- Her kavite için 527nm dalga boyu,
- Her kavite en az 1000 Hz frekansa,
- Her kavite için en az 30mJ güce
- Nd-YLF (Neodymium-doped yttrium lithium fluoride) tip

Görsel 4.12.'de Litron LDY 304 modeli lazer görülmektedir. Lazer makaslı bir platform üzerinde kurulu olup gerektiğinde yükselip alçaltma olanağı bulunmaktadır. Ayrıca lazere bağlı 90 derecelik ayna ünitesiyle lazer ışığının istenilen doğrultuda verilme olanağını sağlar.



Görsel 4.12. Litron LDY 304 Lazer

Görsel 4.13.'te Phantom v641 yüksek hızlı kamera ile ilgili bir görsel verilmiştir. *Yüksek Hızlı Kamera Marka Modeli: Phantom v641:*

- 4 MP (2560 x 1600 pixels) çözünürlüktedir.
- CMOS sensörleri mevcuttur.
- Saniye 6 Gigapixels'den daha fazla veri sağlar.
- Asgari düzeyde 1 μ s (10^{-6} s) pozlama sağlar.
- Piksel boyutu 10 mikrometre düzeydedir.
- Görüntü derinliği 12 bittir.



Görsel 4.13. Phantom v641 Yüksek Hızlı Kamera

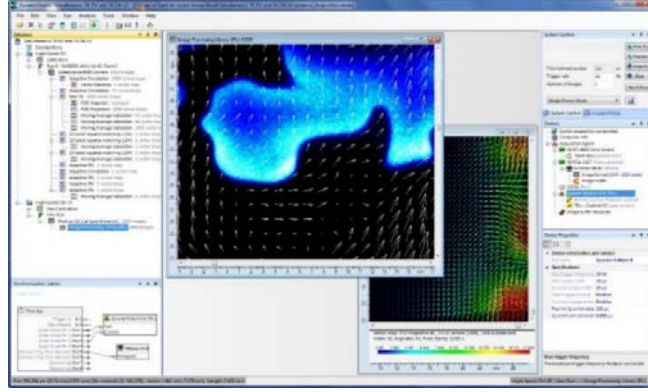
Zamanlayıcı (Senkronizer): Senkronizer, PIV sisteminde gerekli başlatma sinyali oluşturup, lazer ve kamera sisteminin eş zaman uyumlu (senkronize) çalışmasını sağlayarak sistemin bağlı olduğu bilgisayarda ve kontrol yazılımına eş zamanlı bilgi aktarır. Zamanlayıcı devre dışı bırakılırsa kamera ve lazer birbirinden bağımsız çalışıp ikisi de işlevsiz hale gelir.

Tablo 4.2.'de kamera çözünürlük ve saniye başına alabileceği kareler (FPS) ile ilgili tablo verilmiştir. Çözünürlük düştükçe kameranın FPS değeri artmaktadır.

Tablo 4.2. Kamera Çözünürlük ve Saniye Başına Alabileceği Kareler (FPS).

Çözünürlük	Saniye Başına Kare (FPS)
2560 x 1600	1450
1920 x 1080	2560

Dynamic Studio Paket Yazılımı: Dynamic Studio akışkanlar dinamiği, katı mekanik, mikro akışkanlar, spre / parçacık analizi, karıştırma ve yanma teşhisi analizleri dâhilinde çok parametrelili ölçümler alır ve bu ölçümleri işleme olanağı sunar. Yazılımın gelişmiş ön-işleme için görüntü işleme kütüphanesi mevcuttur. Yazılım, partikül eşitsizliği ve korelasyon tepe (peak) yükseklik oranına dayalı belirsizlik tahmini yapar. Tanılama yöneticisi (acquisition manager) otomatik kalibrasyon, ölçüm ve veri analizi olanakları sağlar. Yazılımda geniş kapsamlı imaj işlemek için farklı post-proses yöntemleri ve haritalama seçenekleri mevcuttur. Şekil 4.4.'te Dynamic Studio paket yazılımı ara yüzü ile ilgili bir şekil verilmiştir.



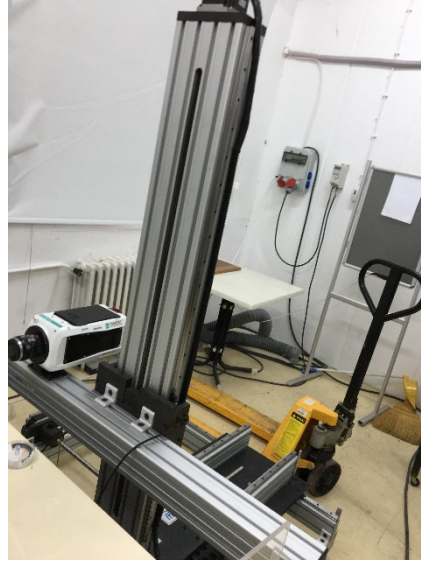
Şekil 4.4. *Dynamic Studio Paket Yazılımı*

Sıvı parçacık ve duman jeneratörü: Sıvı parçacık jeneratörü parafin, zeytinyağı gibi sıvıları atomize ederek akış alanına tohumlama yaparken sis jeneratörü de su ile gliserin bazlı kimyasallar ile tohumlayıcı duman üretir. Genel olarak yüksek hızlarda sis jeneratörü düşük hızlarda ise sıvı parçacık jeneratörü daha doğru sonuçlar vermektedir. Duman tohumlayıcıların yüksek hızlarda hareketi takip etmesi daha kolaydır. Dumanın çapı 1 mikrometrenin altında iken sıvı parçacık jeneratöründe değişik yağların çapı 0.5 mikron ile 5 mikron arası değişir. Atölyede mevcut olan ve Görsel 4.14.'te gösterilen sıvı parçacık jeneratörü haznesine zeytinyağı eklendiğinde $\sim 3 \mu\text{m}$ çapına sahip akış tohumlayıcı yağ damlacıkları üretir.



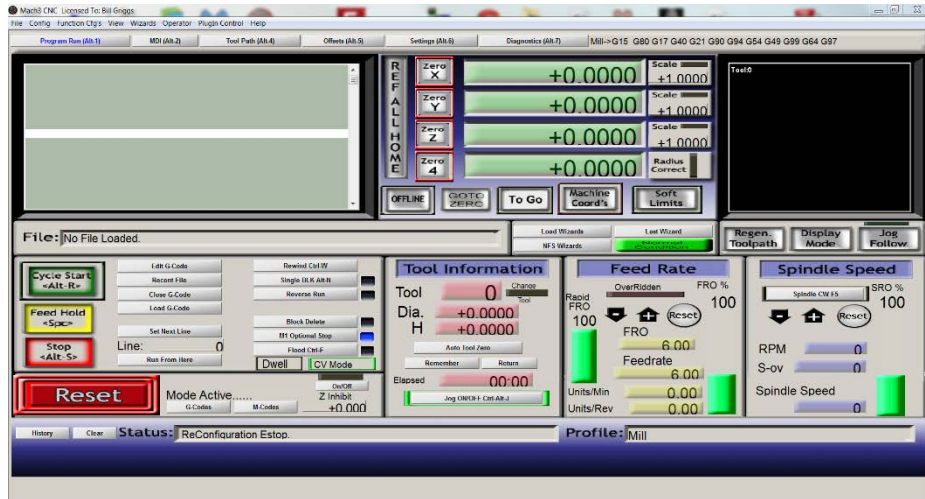
Görsel 4.14. *Sıvı Parçacık Jeneratörü ve Duman Jeneratörü*

Travers sistem: 3 boyutlu eksen (x, y, z) virgülden sonra 4 basamağa kadar (100 mikron) hassas bir şekilde üzerine takılı cihazları hareket ettirir. Travers sistem özellikle kameranın hassas hareketi ve pozisyonlanması ile eksenel ya da yanal tarama yapması için ideal bir bileşke hareket olanağı sağlar. Bu sayede basınç farklarından elde edilen hız değerleri PIV ölçümleriyle teyit ettirilebilir.



Görsel 4.15. *Travers Hareket Sistemi*

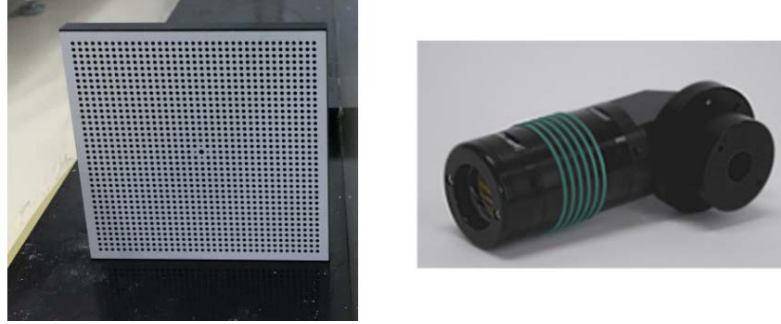
Görsel 4.15.'te 3 eksenli travers hareket sistemi ile ilgili bir görsel verilmiştir. Travers sistem bağımsız ayrı servo motorun kendi üzerine monte edilmiş hareket kollarını CNC kontrol mantığıyla 3 boyutlu eksenle hassas bir şekilde hareket etmesini sağlar. Şekil 4.5.'te travers sistemin kontrol yazılımı ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 4.5. *Travers Sistem Kontrol Yazılımı*

Kalibrasyon Plakası: Kameranın odağını yakalamak için ölçüm alınacak düzleme plaka yerleştirilerek lazerin bu yüzeyi tam aydınlatması istenir. Bu iki ayarlama yapılmadan alınan ölçümler hep hatalı çıkacaktır. Bunun yanı sıra Stereo-PIV uygulamalarında 2 kameranın aynı düzleme odaklanması için kalibrasyon plakası olmazsa olmaz bir öneme sahiptir.

90 Derecelik Ayna Ünitesi: Ayna ünitesi lazerin ışığını 90 derece yanlara ya da aşağıya ve yukarıya yansıtması için kullanılmaktadır. Özellikle ölçüm alınan kesit (radyal ya da eksenel) lazeri düzleme göre ayarlamak için 90 derecelik ayna ünitesi hayati önem sahiptir. Görsel 4.16.'da kalibrasyon plakası ve 90 derecelik lazer ayna ünitesi verilmiştir.



Görsel 4.16. Kalibrasyon Plakası ve 90 Derecelik Lazer Ayna Ünitesi

4.9. Termal Kamera ve IR Camlar

FLIR (Forward Looking InfraRed) ileri bakan kızılötesi anlamına gelip elektromanyetik spektrumda kızılötesi aralığa tekabül eden radyasyona duyarlı sensörlerden oluşan görüntüleme sistemidir. FLIR temel prensip olarak cisimlerden yayılan ısı enerjisinin hassas sensörlerce ölçülüp bilgisayar aracılığıyla yapay olarak renklendirilerek eşzamanda görüntüye dönüştürülmesi prensibini kullanır. Görsel 4.17.'de plakadan tepeden görüntü alan termal kamera tripod bağlantısı görülmektedir.



Görsel 4.17. FLIR A655sc Termal Kamera

Kızılötesi radyografi tekniğinde kullanılan kameranın marka modeli FLIR A655sc olup spektral çalışma aralığı 7.5-14.0 μm 'dir. Yüksek çözünürlüklü bilimsel sınıf, uzun dalga boylu kızılötesi (LWIR) kamera olan A655sc, mühendisler, araştırmacılar ve bilim adamlarının ekipman, ürün ve süreçlerdeki termal kalıpları, sızıntıları, dağılımı ve diğer ısı ile ilgili etkenleri gerçek zamanlı olarak görüp doğru bir şekilde ölçmelerine yardımcı olur. Kameranın maksimum çözünürlüğü 640 $\times$ 480 piksel olup 640 $\times$ 240 ya da 640 $\times$ 120 gibi alt pencere çözünürlükleri de kullanıcılar tarafından seçilebilir. Kameranın tam pencere kare hızı 50 Hz olup 640 $\times$ 120 alt pencere modunda maksimum kare hızı 200 Hz civarındadır. Kameranın zaman sabiti 8 ms'den küçük olup dinamik derinlik aralığı 14-bit'ttir. Kamera kumanda ve kontrolü gigabit ethernet ve USB bağlantılarıyla bilgisayar üzerinden yapılmaktadır. Tablo 4.3.'te FLIR A655sc'nin optik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3. FLIR A655sc Optik Veriler

ÖZELLİK:	OPTİK VERİLER
Görüş Alanı (FOV)	45 ° $\times$ 34 ° (55 ° çapraz)
Minimum Odak Mesafesi	150 mm (5.91 inç)
Odak Uzaklığı	13.1 mm (0.52 inç)
Çözünürlük (IFOV)	1.30 mrad
Objektif Sayısı	3
F Numarası	1.0
Bozulma	% 3

Kameranın standart ölçüm aralığı -40 °C ila 150 °C aralıklarında olup 100 °C ila 650 °C sıcaklık aralıklarında da çalışabilir. Ayrıca ek lens desteğiyle mevcut kamera sıcaklık aralığı 2000 °C'ye kadar çıkarılabilir. Kameranın doğruluk okuma değeri ± 2 °C'dir. Kamera ile beraber, 13.1 mm odak uzaklığı olan 45 derecelik lens ile 24,6 mm odak uzaklığı olan 25 derecelik lensler de atölyede de mevcuttur. IR camlar olarak çinko selenoid camlar kullanılmış olup, camlar bu kapaklara açılan deliklere monte edilmiştir. Bu sayede siyaha boyanmış ve emisivesi 1 olan efüzyon ve dilüsyon plakalarından

temassız yüzey sıcaklıkları 640x480 piksel matrislerinde veri girdisi alınabilir. Görsel 4.18.'de infrared termal kameranın tripoda montajı ve tünele tepeden baktırılması ile ilgili bir görsel verilmiştir. Kamera üstten bakmak kaydıyla ve IR camlardan geçmek suretiyle alt plakadan topladığı temassız sıcaklık değerlerinden soğuk jetler ve ana akımda bulunan sıcak havanın plaka üzerinde oluşturduğu soğutma etkinlik değerleri hesaplanmıştır. Termal kamera temassız ölçüm yöntemi olmasına karşın lens gördüğü ilk katı yüzeyden kamera sensörüne bilgi aktarır. Bu yüzden IR camlardan alt plakayı ölçmek isterken kenarlarda çıkan sıcaklık pikselleri de üst plakaya ait değerlerdir. Veri işleme sırasında istenmeyen yerlerden alınan matris değerleri yok sayılarak infrared camların gördüğü sıcaklık piksel değerlerine ait sıcaklık değerleri Matlab ile işlenmiştir.



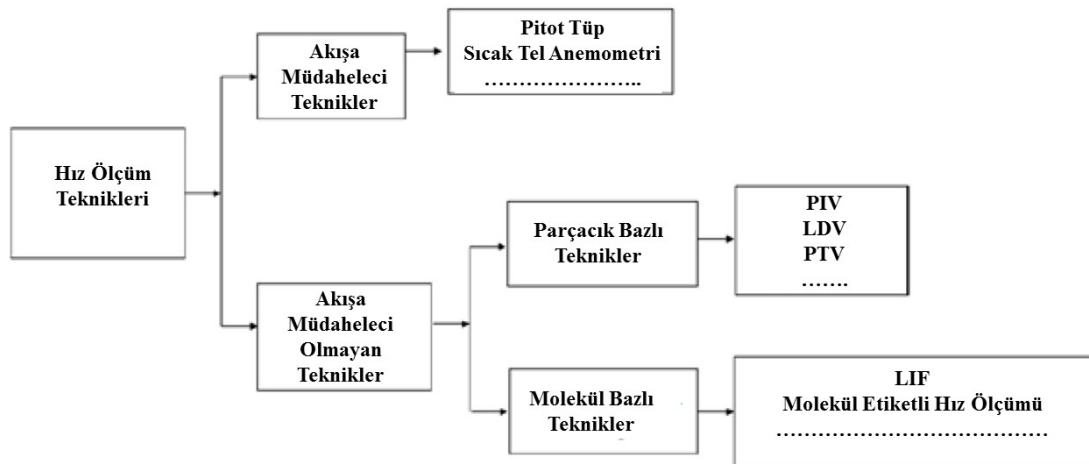
Görsel 4.18. IR Kamera ve Termal Test Düzeneği

5. YÖNTEM

Deney düzeneğinde akış alanı hakkında fikir edinmek için PIV sistemi kullanılmıştır. Yöntemsel olarak tünele tohumlayıcı partiküller gönderilmiş, akış ölçülecek alana lazer ışık hüzmesi yönlendirilerek kameranın buradan görüntü alması sağlanmış ve alınan imajlar işlenerek hız profilleri, türbülans karakteristikleri, girdaplılık varyans, Reynolds gerilmeleri vb. akış karakteristikleri hakkında fikir edinilmiştir. Infrared Termografi ısıtıcıdan gelen ana akım havasıyla kompresörden gelen ve deliklerden geçerek soğutucu film ve efüzyon plaka jetlerinin plakada nasıl bir film etkinlik oranı oluştuğunu yüksek çözünürlükte gözlemlemek için plaka üzerinde oluşan sıcaklık piksellerini sayısal olarak işleme olanağı sağlamıştır. Rüzgâr tüneline statik ve toplam basınç ölçümleri için basınç problemleri, basınç sensörleri ve veri toplama modülleri kullanılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak RANS türbülans modelleriyle yapılan HAD analizleri de yapılan çalışmayı valide etmek ve ölçüm alınamayan bölgeler için de full karakteristiklerini elde etmek için kullanılmıştır.

5.1. PIV ve Ölçüm İlkeleri

Akış hızı ölçüm teknikleri en genel şekliyle akışa müdahale eden (intrusive) temaslı ölçüm teknikleriyle akışa müdahale etmeyen (non-intrusive) temassız ölçüm teknikleri olarak ikiye ayrılır. Basınç problemleriyle alınan akış hızı ölçümleri, prob akış alanı içerisinde veri aldığından, bu tekniklerle gerçekleştirilen hız ölçümlerinde akışa müdahale edilmektedir. Pitot statik tüp probu, sıcak tel anemometresi gibi ölçüm teknikleri akışa müdahale eden (intrusive) temaslı ölçüm teknikleridir. Akışa müdahale etmeyen (non-intrusive) temassız ölçüm teknikleri de partikül bazlı ve moleküler bazlı olmak üzere ikiye ayrılır. Laser Doppler Velocimetry (LDV), Planar Doppler Velocimetry (PDV), Particle Tracking Velocimetry (PTV) ve Particle Image Velocimetry (PIV) partikül bazlı akışa müdahale etmeyen yöntemlerken lazerle uyarılmış floresan ve moleküler etiketleme hız ölçümü moleküler bazlı akışa müdahale etmeyen akış ölçüm yöntemlerindendir. Euler akış tanılamasında akışta göz önüne alınan zamanda ve konumdaki bir parçacıkla ilgilenir. PIV akış alanının Eulerian tipte konum (x,y,z) ve zaman bakımından akışı tanımlar yani bir zaman diliminde (t) alınan sabit bir kesit için hız ölçümü yapar. Particle Tracking Velocimetry (PTV) ise parçacığın hareket ettiği varsayımıyla parçacık takibine dayalı Lagrangian tipte akış tanılaması yapar.

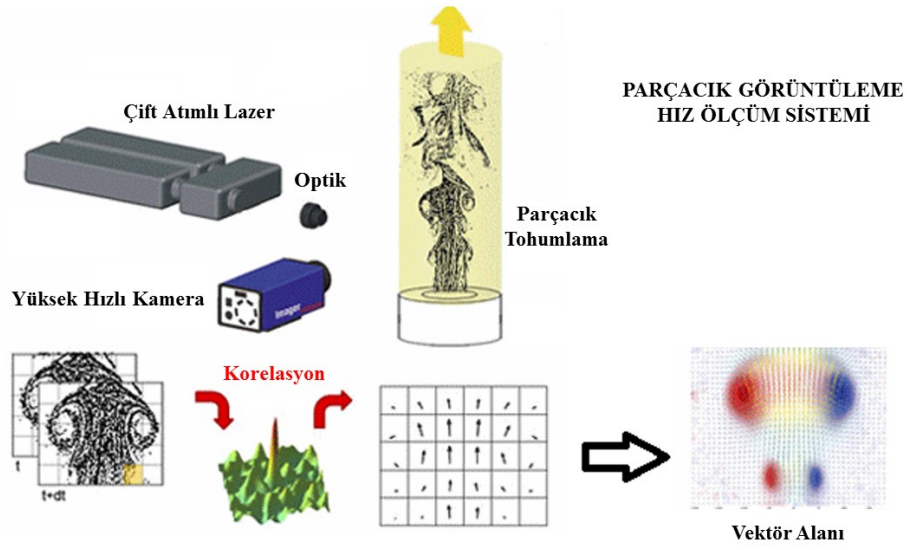


Şekil 5.1. Hız Ölçüm Teknikleri Sınıflandırma

Kaynak: Jensen, 2004'ten revize edilmiştir.

Şekil 5.1.'de hız ölçüm teknikleri ile ilgili bir sınıflandırma yapılmıştır. Noktasal ölçümler dışında bütün akış alanını ölçebilmek için, birden fazla noktadan ölçüm almak için sıralı basınç problemleri ve sıcak tel anemometresi problemleri kullanılmıştır. Birden fazla noktadan sıralı ölçüm olarak akış alanı hakkında fikir edinilse de daha iyi sonuçlar arayış ihtiyacı için ilk olarak LDV tekniğini doğurmuştur. Bu sayede girdap alanı ölçümü zamanla değişen testlerde ölçülme imkânı bulmuştur. LDV'de akış alanında noktasal ölçüm alınırken, PIV'de akış alanında düzlemsel tüm alan (whole field) için ölçümler alınır.

Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) lazer atımlarıyla kısa süre aralığında akışkanla taşınan aydınlatılmış parçacıklarının art arda iki görüntüsünü alıp, bu süre aralığında parçacıkların dolayısıyla akışın kat ettiği mesafeyi hesaplayarak akış alanında hız ölçümü yapan optik bir teknolojidir. Şekil 5.2.'de parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PIV) tekniği ile ilgili öz bir şekil verilmiştir. Burada tohumlayıcı akışı takip etmek için parçacık üretirken lazer bu parçacıkları aydınlatıp kamera tarafından algılanmasını sağlar. Yüksek hızlı kamera ise görüntülerin zaman diliminin çok küçük kesitlerinde yüksek çözünürlükte alınmasını ve kaydedilmesini kolaylaştırma işini yapar. Yüksek hızlı kameralar kaydettiği imajlar arasında alt pencerelerde (interrogation windows) yaptığı istatistiksel korelasyonlarla akış alanının hız ve türbülans karakteristiklerini çıkarıp akış alan (u , v , türbülans yoğunluğu, vortisite, diverjans, kayma gerilmesi du/dx , dv/dy vb.) haritaları, hız vektör haritaları gibi farklı analiz sonuçları elde etmeyi sağlar.

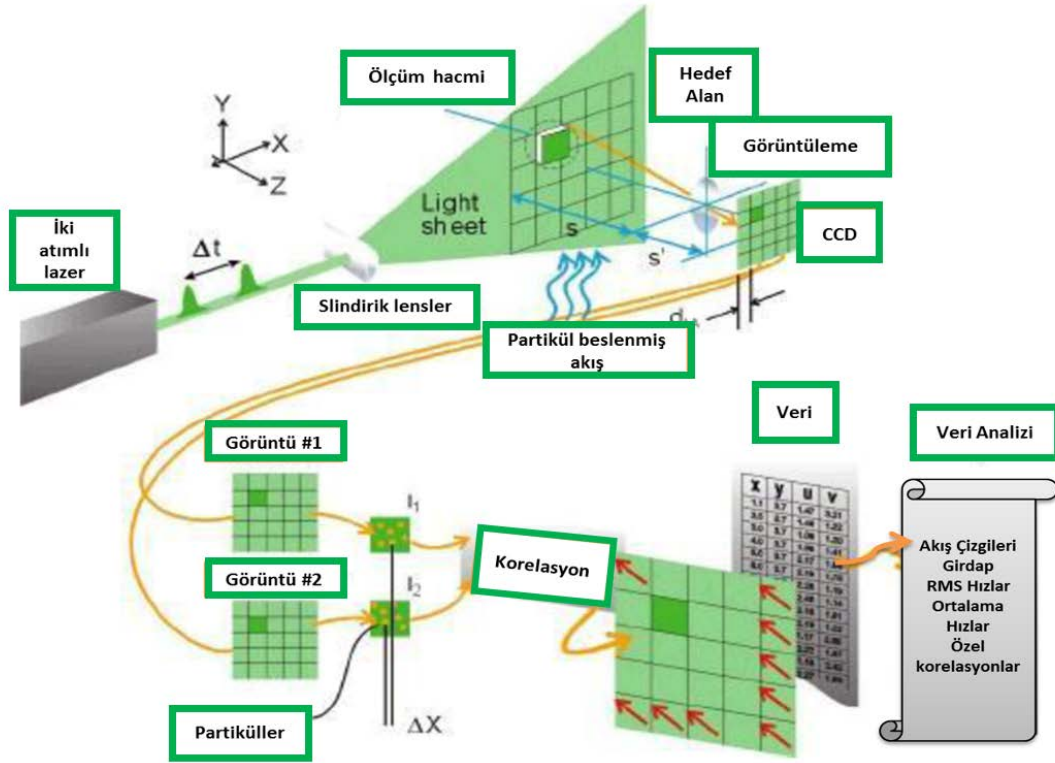


Şekil 5.2. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm (PIV) Tekniği

5.2. PIV ile Görüntü Edinme

PIV tekniğinde akışa karıştırılan ve ışık altında yansıma yapan tohumlayıcıların hızlarının ölçülmesi prensibine dayanır. PIV tekniğinde, ölçüm alanına lazer hüzmeleri gönderilir ve tohumlayıcı parçacıkların görünür hale gelmesi sağlanır ve elde edilen görüntüler kamera vasıtasıyla kamera belleğine ya da harici disklerle kaydedilir. Tohumlayıcı parçacıkların yer değişimleri peş peşe alınmış görüntülerle belirlenerek ilgili alanda hız vektör hesapları elde edilir.

Tohumlama, lazer hüzmeleriyle 2 kere aydınlatma ve yer değiştiren görüntülerin peş peşe alınması ve kaydedilmesi PIV tekniğinin alt işlemidir. Alınan imajlar PIV veri havuzunda toplanır ve veri işleme yöntemleriyle anlamlı hale getirilir. Şekil 5.3'te PIV datası için gerekli alt sistemler gösterilmiştir. Tohumlayıcı parçacıklardan saçılan ışık, yüksek çözünürlüklü lensler yardımıyla akış alanını aydınlatır. Kamerada bulunan CMOS ya da CCD gibi kamera sensörlerinin yardımıyla bu imajlar dijital kameralara kaydedilir. Alınan kayıtlar tarayıcı ile dijital sensörlerin yardımıyla bilgisayara direkt olarak aktarılmaktadır. İmaj işleme ise tamamen bir işlem sonrası (post-process) aşama olup yazılım dışında harici ortamlarda imaj işleme yapılabilir. Dynamic Studio paket yazılımı görüntüleri alt pencerelere bölünerek ve istatistiksel korelasyonlar uygulanarak verilerle sayısal değerler haline gelir. Daha sonra yazılım bu değerleri işleyerek türbülans ve hız haritaları, akış vektörleri ve skaler akış türevleri şeklinde kullanıcıya sunar.



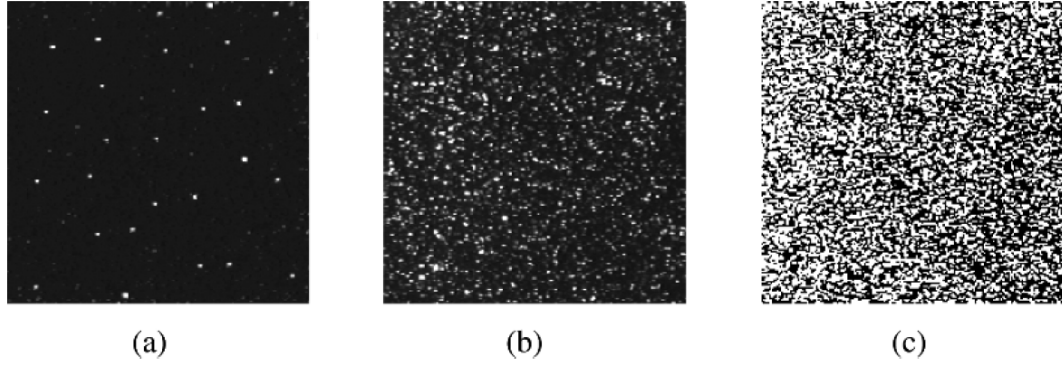
Şekil 5.3. PIV Sistemi ve Veri İşleme Prosesi

Kaynak: <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>,

Alınan kayıtların akış alanları, küçük alt alanlara (interrogation areas) bölünerek bu alt alanlar arasında işleme yapmak kaydıyla parçacık görüntülerinin yerel (lokal) hız vektörleri, her bir alt alanda istatistiksel yöntemlerle kullanılarak belirlenir. Burada, bir alt alandaki bütün partiküllerin iki ışık hüzmesi arasında homojen olarak hareket ettiği varsayılmaktadır. Burada belirleyici unsurlar kayıt modunun tekli yapı (single frame) ya da çiftli yapıda (double frame) olması alınan imaj sayısı, iki lazer atım arasındaki zaman ve alınan imajlar arasındaki zaman gibi girdiler PIV datalarını etkileyen temel parametrelerdir.

5.2.1. Tohumlama (seeding)

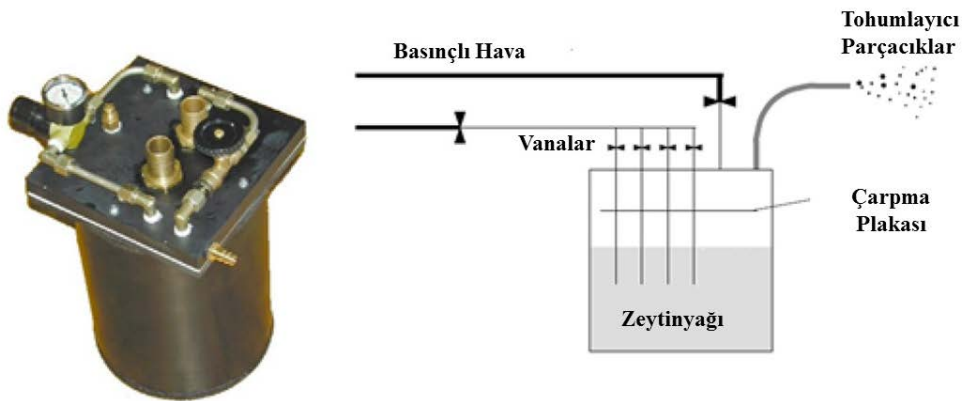
PIV ile akış alanını görüntülemek için, akışa beslenen parçacıkların akış alanına gönderilen lazer ışığını yansıtması gerekmektedir. Tohumlayıcı parçacıkların akışı takip edecek kadar küçük olması ve aynı zamanda da ışığı yansıtabilecek kadar da büyük olması istenmektedir. Tohumlayıcı seçiminde çalışılan ortam (hava, su vb.), tohumlanın yapılacağı hacim, akış hızı, parçacığın ışığı saçma özelliği, parçacık boyutu ve maliyet gibi unsurlar değerlendirilir. Genel olarak 5-100 μm çapında tohumlayıcılar tercih edilir. Şekil 5.4.'te 3 farklı tohumlayıcı yoğunluğa sahip akış alanının gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.4. Farklı Çaplara ve Yoğunluklara Sahip Tohumlama Parçacıkları

Kaynak: Raffel vd., 2013

Sıvı damlacık jeneratörü parafin, zeytinyağı gibi sıvıları atomize ederek akış alanına tohumlama yaparken sis jeneratörü su ile glikol veya gliserin bazlı kimyasallar ile tohumlayıcı duman üretir. Genel olarak yüksek hızlarda sis jeneratörü parçacıkları daha kolay taşındığından duman ile çalışma tercih edilirken düşük hızlarda ve Reynolds Sayılarında ise sıvı parçacık jeneratörünün ürettiği tohumlayıcı parçacıklar tercih edilmektedir. Dumanın çapı 1 mikrometrenin altında iken sıvı parçacık jeneratöründe değişik yağların çapı 0.5 mikron ile 1 mikron arası değişir. En iyi tohumlayıcı kriterleri toksik olmayan, kimyasal olarak atıl olan ve ucuz olan tohumlayıcılardır. Şekil 5.5.'te sıvı parçacık jeneratörünün çalışma prensibi ile ilgili bir şema verilmiştir. Sıvı parçacık jeneratörünün parçaladığı tohumlayıcılar duman jeneratörüne göre daha hantal olduğundan düşük Reynolds Sayılarına daha gerçekçi tohumlama olanağı sağlar.



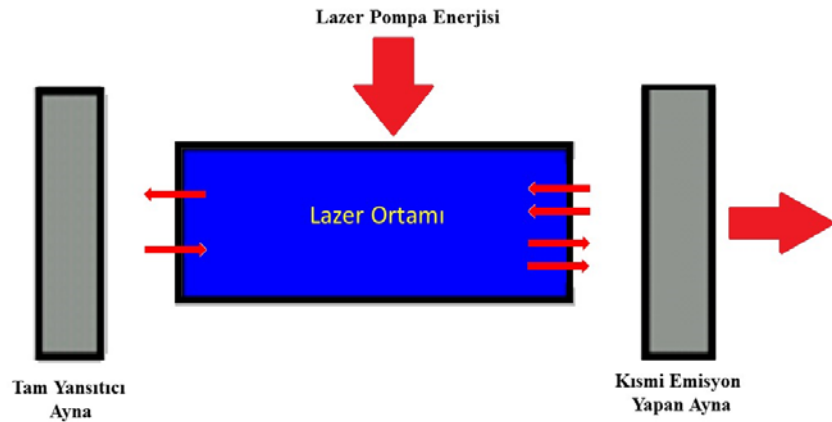
Şekil 5.5. Sıvı Parçacık Jeneratörünün Çalışma Prensibi

Kaynak: Raffel vd., 2013'ten revize edilmiştir.

Tohumlamada kullanılan büyük parçacıklar daha güçlü saçılma, daha iyi izleme yeteneği ve yüksek uzaysal çözünürlük sağlar. Daha parlak parçacıklar, daha yüksek izleme yeteneği kazandırırken göreceli olarak daha pahalıdır. Daha fazla parçacık uzaysal/zamansal çözünürlüğü artırırken akış alanına müdahaleci olup imajdaki gürültüyü artırır.

5.2.2. Aydınlatma (illumination) ve optik lensler

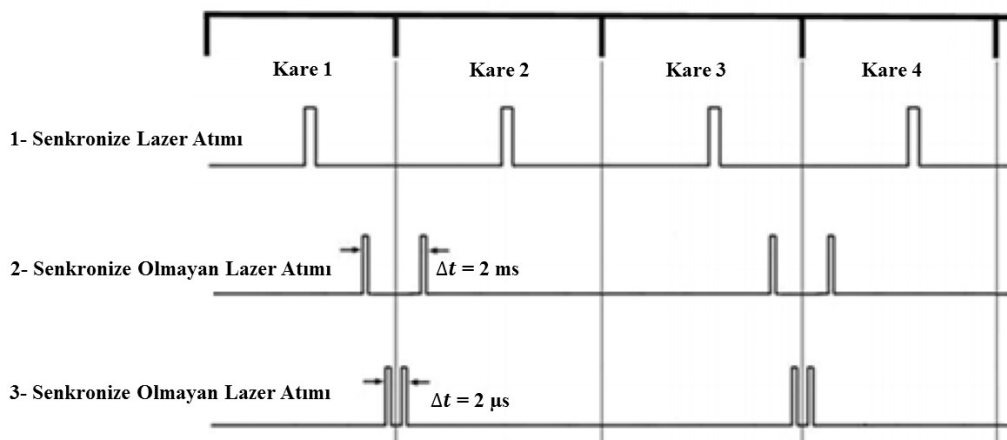
Lazerler, çok çeşitlilik arz ettiklerinden ve çok değişik kullanım alanlarına sahip olduklarından bunları kategorize etmek oldukça zordur. En temelde sınıflandırmak gerekirse lazerde kullanılan materyal (gaz, katı), pompa güç kaynağı (elektromanyetik, kimyasal) ve ayna, lens vb. optik düzenlemeler olarak üç ayrı kategoriye ayrılabilir. Materyale göre sınıflandırma yaptığımızda helyum-neon, argon iyon lazerle gaz tipi lazerlerken Ytium Lityum Florite(YLF) ve Ytrium Aliminyum Garnet(YAG) katı tip lazerlerdir. Işık kaynağı olarak lazerler, tek renkli (monokromatik) ışığı yüksek enerji yoğunluğuyla yayabilme özelliklerinden dolayı PIV ölçümlerinde en yaygın ışık kaynakları olarak kullanılırlar. Lazerler pompadan aldıkları enerjiyi lazerleme ortamında tam yansıtıcı aynalar değişik optiklerle lazer ışığını ortama salar. Lazer ışık levha optikleri olarak genelde değişik odak uzunluğuna sahip silindirik mercekler kullanılır. Silindirik merceklerin yanı sıra küresel merceklerde kullanılmaktadır. Değişik optik merceklerle lazer ışığının incelik ya da kalınlık ayarını merceklerin ışığın yakınsama (divergence) ya da ıraksama (convergence) özelliğine göre sağlayabilir. Şekil 5.6.'da lazerin temel çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 5.6. Lazerin Temel Çalışma Prensibi

Lazer enerjisinin temeli için Planck denkleminde ($E = h \cdot f$) bakmak gerekmektedir. Burada h Planck sabiti olarak bilinirken enerji nicelleştirmesinden kaynaklanan bağlanma enerjisi (E) ve frekans (f) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Fotonlar elektromanyetik radyasyonlarla farklı enerji düzeyleri arasında emilim, yayılma ve uyarılmış yayılma gibi farklı etkileşimler yaparlar.

Zamanlama modu açısından lazerler sürekli dalgali ve atımlı lazerler olarak sınıflandırılabilir. Argon-ion lazerleri sürekli Nd-YAG lazerleri atımlı lazerler dalgali lazerlerdir. Atımlı lazerler, enerjiyi tam istenilen anda depolayabildiklerinden ve aktarabildiklerinden dolayı PIV ölçümleri için daha uygundur. Atımlı lazerlerinin avantajı, iki lazer atımı arasındaki birkaç nano-saniyelik kısa sürede atım yapmasıdır. Şekil 5.7.'de görüldüğü üzere, ikinci lazerden gerçekleşen atım zinciri rastgele küçük zaman aralıkları (Δt) oluşturabilir. Senkronizer (zamanlayıcı) burada gerekli başlatma sinyali oluşturarak lazer, kamera ve sistem bilgisayarı vb. cihazların senkronize çalışmasını sağlar. Arka arkaya atım yapan 2 lazer atım hüzmelerinin test düzeneğinde üst üste gelmesi (overlap) çok önemlidir. Şayet, ışık hüzmeleri aynı bölgeyi aydınlatmazsa, zayıf korelasyonlar oluşturarak akış alanında doğru ölçüm alınmasını zora sokar (Adrian ve Westerweel, 2011). Dynamic Studio yazılımı lazer atımlarının arasında kalan atım sürelerinin ara yüzden takip edilmesi olanağı sağlar. Arayüzde bulunan atım aralığı takibinden lazerlerin arka arkaya çakıp çakmadığını böylece lazerin aydınlattığı iki bölge arasındaki aydınlanma farkı olup olmadığı da takip edilebilir. Arka arkaya çakan lazerler aynı bölgeyi aydınlatıyorsa ölçümler alınabilir.



Şekil 5.7. PIV Ölçümü için Başlatılmış Atım Zinciri

Kaynak: Dabiri, 2006'dan revize edilmiştir.

5.2.3. Görüntü işleme ve kaydetme

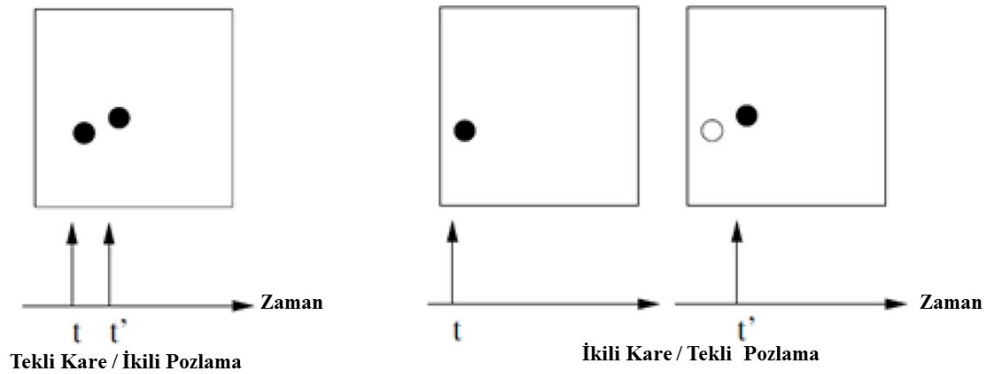
PIV sisteminde görüntü yakalamak için yüksek saniye başına kare (Frame Per Second, FPS) alan kameralar kullanılmaktadır.

PIV sisteminde yaygın kullanılan kameralar iki çeşittir:

- *CCD (Charge-Coupled Device)*
- *CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)*

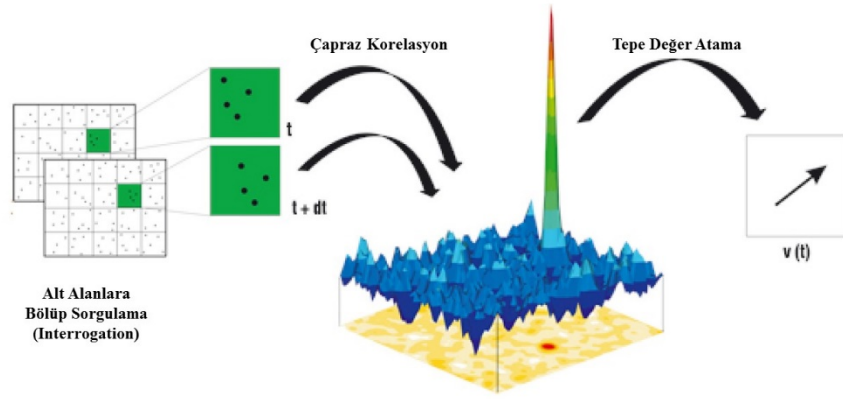
CCD (Charge-coupled device): Bir tabakanın üstüne dizilmiş ışığa duyarlı foto diyotların ışığı elektrik gerilimine çevirir. CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor): Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken bir tümleşik devre üretim teknolojisi olup aktif piksel sensörlerine sahiptir.

Günümüzde kullanılan dijital devrelerin neredeyse tamamı CMOS teknolojisi ile üretilir. Bu teknolojinin yaygın olarak kullanılmasının nedeni, bu teknolojinin birim silisyum alanda en fazla transistor gerçekleşmesini olanaklı kılması, gerçekleşen devre açık durumda fakat işlem yapmazken neredeyse güç tüketmemesi gibi önemli özelliklerdir. CMOS sensörleri gürültüyü de yoğun oranda imaja kaydetme açısından olumsuz olsa da görüntü sinyal deformasyonuna izin vermediği için CCD'ye üstünlük sağlar. İmaj kaydetme etken parametreler çözünürlük, alan derinliği (odağa düşme) görüntünün büyüklüğü, lensin büyütme gücü ve kayıt sistemi (HDD, SSD vb.) gibi parametrelerdir. PIV'de imaj kaydı yapılırken tekli kare (single frame) ya da çoklu kare (double frame) şeklinde ölçümler alınabilir. Bunun yanı sıra tekli pozlama ya da belirli bir zaman farkı sonra tekrar pozlama yapmak kaydıyla çoklu pozlama ile görüntü kaydı yapılabilir. Şekil 5.8.'de tekli/çoklu kare ve pozlama ilgili bir şema verilmiştir.



Şekil 5.8. Tekli/Çoklu Kare ve Pozlama
Kaynak: Raffel vd., 2013'ten revize edilmiştir.

İmaj işlemede belirli bir Δt zaman farkıyla alınan iki ayrı görüntünün her biri alt pencerelere (interrogation windows) bölünerek pencere başına düşen partiküllerin bu alt pencerelerde her birinin birbiriyle eşleşme durumları, çapraz korelasyon yöntemiyle, iteratif olarak ele alınır. Bu alt pencerelerde çapraz korelasyon yöntemiyle eşleşme olasılığı en yüksek parçacıklar bulunur ve bu parçacığın Δt zaman aralığında aldığı yol bulunarak ilgili parçacıkların hızları hesaplanır. Şekil 5.9.'da PIV görüntü işleme şematik gösterimi verilmiştir. Görüntü alma sırasında tohumlayıcının yoğunluğuna göre uzaysal alanda meydana gelen yüksek sinyal/ görüntü oranları alt pencerelerde yüksek tepe değeri oluşturarak iyi korelasyonlarla akış alanının doğru sonuçlar vermesini sağlar.



Şekil 5.9. PIV Görüntü İşleme Şematik Gösterimi

Alt pencerelere düşen parçacık konsantrasyonu az ise kötü sinyal-gürültü oranı (SNR) olduğundan alınan ölçümlerde çapraz korelasyon güvenilir olmayan sonuçlar verir. Oysa Adaptif PIV değişken hız oranları için çapraz korelasyona göre daha doğru sonuçlar veren bir görüntü işleme yöntemidir.

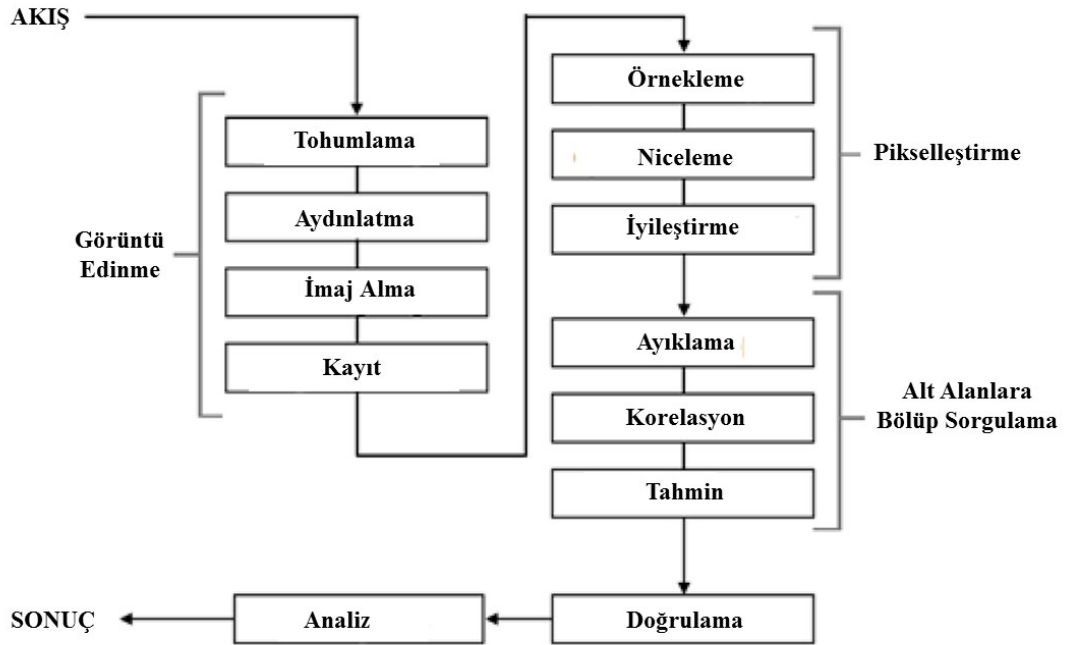
5.3. PIV ile Görüntü İşleme

PIV’de veri işleme genel olarak 4 temel kategoride işlenmektedir.

- 1- Veri Edinme
- 2- Pikselleştirme
- 3- Alt Alanlara Bölüp Sorgulama
- 4- Doğrulama ve Analiz

Veri ya da görüntü edinme kendi içinde 4 işlemten oluşur. Bunlar tohumlama, aydınlatma, görüntü işleme ve kaydetme gibi alt işlemlerden oluşur. Veri edinme tek

başın yetersiz kalmaktadır. Çünkü analog ortamlardan dijital ortamlara geçirilen imajlar gürültü (noise) içerir. Görüntü işleme bu hataları düzeltmek için kullanılabilir. Şekil 5.10.'da PIV alt işlemler algoritması ile ilgili detay bir şema verilmiştir. Bu şema deney alanından görüntü alınıp sonuç işlemeye kadar olan bütün alt prosesler hakkında fikir verir. Bu işlemlerin büyük bir çoğunluğu aynı zamanda analog imajların dijital görüntülere dönüştürülürken yapılan alt işlemlerdir. İmajlar görüntü edinme ve pikselleştirme işlemlerinden sonra alt alanlara bölünüp sorgulama işlemlerine tabi olurlar. Burada önce parçacık ayıklama yapılır sonra alt bölgeler arasında korelasyonlar kurularak istatistiksel tahmin yöntemleriyle tahminleme en son da doğrulama işlemi yapılır.

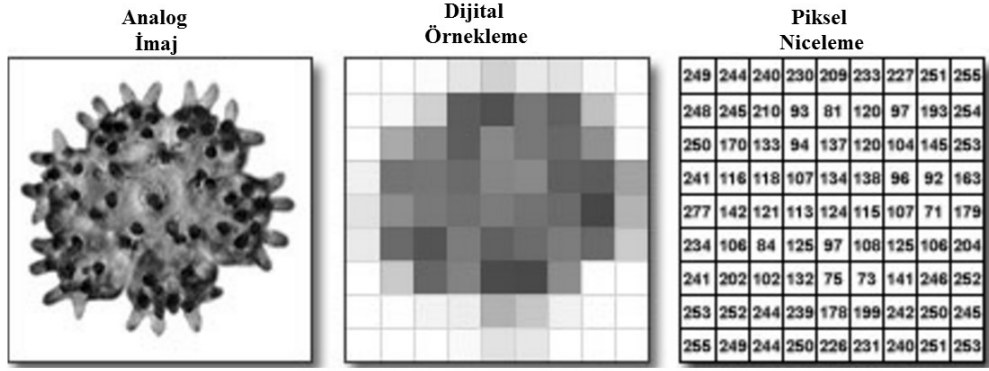


Şekil 5.10. PIV Alt İşlemler Algoritması

Kaynak: Westerweel, 1997'den revize edilmiştir.

5.3.1. Dijital imaj işlemenin temelleri

Veri edindikten sonra alınan verinin pikselleştirme işlemi uygulanır. Pikselleştirme, örnekleme, niceleme ve iyileştirme gibi alt işlemde oluşur. Örneklemede görüntü piksellere bölünür. Nicelemede ise görüntüye piksel başına düşen bit derinlik değeri ataması yapılır. Şekil 5.11.'de analog imajın dijital imaja dönüşümü verilmiştir. Dijital imajlar, görüntünün ayrıksallaştığı her piksel değeri için sayısal değer matrisleri atar ve bilgisayarın bunu işleyebileceği dile çevirir.



Şekil 5.11. Analog İmajların Dijital İmaja Dönüşümü

Dijital görüntü sayısal değerlerden oluşur. 1 ve 0'lardan oluşan sayısal görüntü yapısı $a[m,n]$, 2 boyutlu dünyadan elde edilen $a(x,y)$ fonksiyonundan *örnekleme* tekniği kullanılarak oluşturulur. Sayısal görüntü M ve N sayılarında satır ve sütunlardan oluşur ve satır ve sütunların kesiştiği her bölgeye piksel denir. Bir pikseldeki, x ve y pikselin bulunduğu matris değerinin, z derinliğin, λ rengi ve t zamanı temsil eder. Böylece bir pikselin değer fonksiyonu $f(x, y, z, \lambda, t)$ şeklinde ifade edilebilir.

Uzaysal çözünürlük (Spatial Resolution): Bir resmin detaylanabilir en küçük parçasıdır yani bir resmin 1 pikselinin fiziksel büyüklüğünü ifade eder. Görüntünün piksel değerlerinin belirli aralıklarda olması, meydana gelen görüntünün *niteliğini* değiştirir. Örneğin 0 beyazı ve n-1 de siyahı temsil ederse ve bu değerler arası gri tonlarını ifade eder. Niteliklendirme yapılırken burada $n = 2^b$ olmak üzere, b değeri görüntünün 1 pikselini ifade etmek için gereken bit sayısıdır. Örneğin b=8 ise 256 adet gri tonu bulunmaktadır.

Filtreleme resmin üzerinde bir filtre varmış gibi düşünüp her piksel değerinin yeniden hesaplanmasıdır. Gaussian ve median filtreleme en yaygın filtreleme teknikleridir. Görüntü alırken istenmeyen yansımalar vb. işlemler sonucuma etkilemesi diye maskelemeye tabii tutarız. *Maskeleme*, resmin istenen bölgesinin kesip çıkartılması ve elde edilmesidir. Alt bölgelere ayırma ise seçme, korelasyon kurma ve tahmin etme gibi alt işlemlerden oluşmaktadır.

En küçük kareler eşleşmesi, adaptif korelasyon, ortalama korelasyon ve adaptif PIV yöntemleri, belli varsayımlara dayanan veri işleme yöntemleridir.

5.3.2. En küçük kareler eşleşmesi

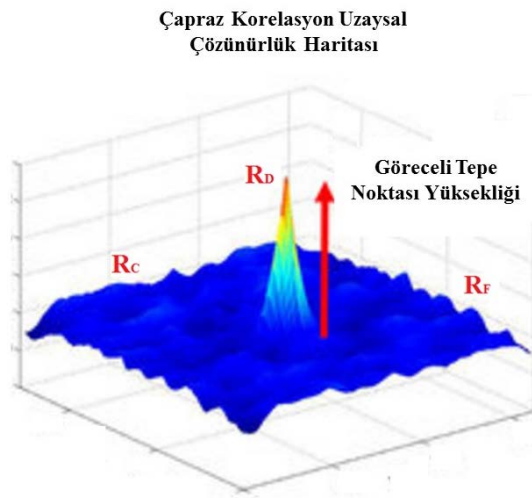
Klasik PIV korelasyon tekniklerinde iki boyutlu çapraz korelasyonlar, akış yönündeki sıfırıncı mertebe hız bileşenlerini çıkartarak ve daha yüksek mertebeli dönme ve deformasyon terimlerini dikkate almayarak uygulanırlar. Bu varsayım, aslında, akış alanının çok düzgün olduğu ve dönme-kayma yer değişimlerinden çok fazla etkilenmediği varsayımıdır.

5.3.3. Çapraz korelasyon

PIV verileri, genellikle, tek pozla çekim yapılmış ikili yapıların (single exposure, double frame) yerel çapraz korelasyonları hesaplanarak değerlendirilirler. Partikül görüntüleri akış ile hareket eden bir şablon olarak düşünüldüğünde, iki partikül görüntü şablonunun en iyi şekilde eşleştirilmesi $R(s)$ ile tanımlanan uzaysal korelasyon yöntemiyle belirlenmektedir.

$$R(s) = R_C(s) + R_F(s) + R_D(s) \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’de $R_C(s)$ ortalama arkaplan korelasyonu, $R_D(s)$ yer değişimi korelasyon tepciğini ve $R_F(s)$ gürültü terimi temsil etmektedir. Ortalama görüntü yoğunluklarının, görüntü verisinden çıkartılmasıyla, uzaysal korelasyonun hesaplanması öncesi, $R(s)$ Ortalama arkaplan korelasyonu ve $R_F(s)$ Gürültü terimi temsil etmektedir etkileri minimize edilmektedir. Şekil 5.12.’de çapraz korelasyonda uzaysal çözünürlüğün bileşenleri ile ilgili bir şema verilmiştir.

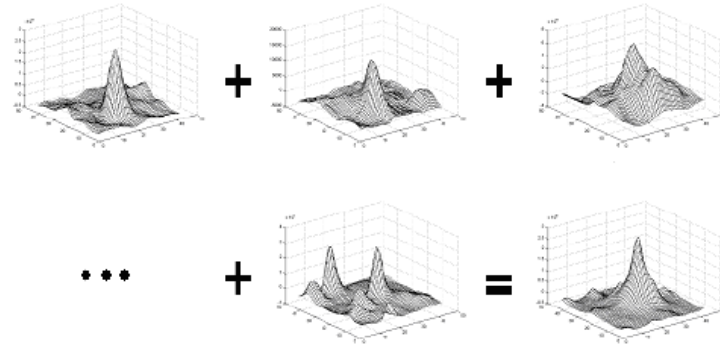


Şekil 5.12. Çapraz Korelasyonda Uzaysal Çözünürlüğün Bileşenleri

Kaynak: Raffel vd.,2013'ten revize edilmiştir.

5.3.4. Ortalama korelasyon

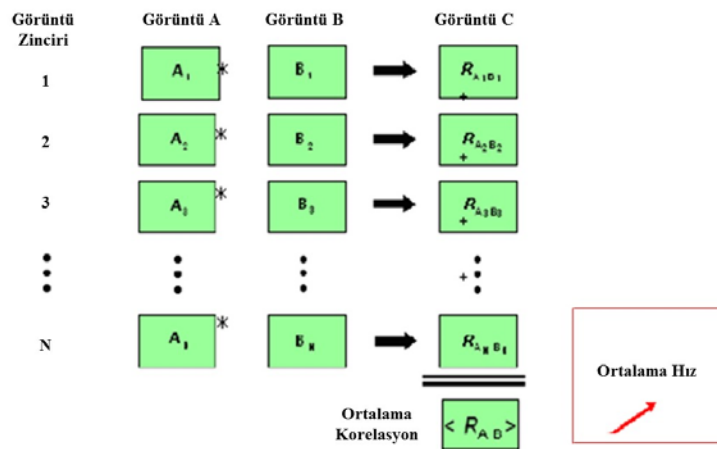
Bir akışta alt alanlarda bir korelasyon oluşturabilecek az sayıda partikül varsa ortalama korelasyon ile ortalama akış alanı hesabı yapılarak iyi bir korelasyon tepesi oluşturulur. Ortalama korelasyonda, her bir alt alanın ortalama fonksiyonunun, bütün görüntüler için her bir bölgede ortalaması alınır. Ortalama korelasyon, sinyal-gürültü oranını kayda değer ölçüde iyileştirerek, net korelasyon tepeleri oluşturur. Şekil 5.13.'te ortalama korelasyon tepeciklerinin toplamı ile ilgili bir şema verilmiştir.



Şekil 5.13. Ortalama Korelasyon Tepeciklerinin Toplamı

Kaynak: Dynamic Studio User's Guide, 2015

Süperpozisyon tekniğiyle alt alanların birbirine eklenmek kaydıyla oluşan yağı Şekil 5.14.'te gösterilmiştir. Birinci ve ikinci lazer atımında, A yapısındaki (frame A) alt alanlar (interrogation areas) korele edilmektedir. Korelasyon fonksiyonları üst üste toplanıp, sonrasında tepecikler değerlendirilmektedir.



Şekil 5.14. Ortalama Korelasyon Akış Şeması

Kaynak: Dynamic Studio User's Guide, 2015

Ortalama ve çapraz korelasyonları karşılaştırmak gerekirse oto korelasyonda sadece single frame gerekirken çapraz korelasyonda en az ikili çerçeve gerekmektedir. Oto korelasyonda yön belirsizliği varken çapraz korelasyonda böyle bir belirsizlik söz konusu değildir. Oto korelasyonda düşük ve sıfıra yakın hızlar problemken ve uzaysal çözünürlük giderek düşerken çapraz korelasyonda bu tarz hatalarla karşılaşılmaz.

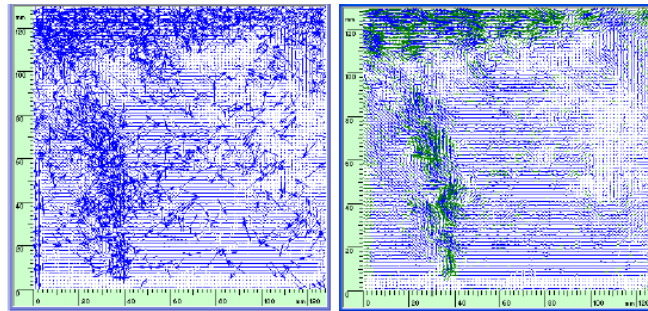
5.3.5. Adaptif PIV

Adaptif PIV yöntemi partikül görüntülerine göre hız vektörlerini hesaplayan otomatik ve adaptif bir yöntemdir. Alt pencerelerin iteratif olarak deforme edilmesiyle (Adaptif PIV), aynı düzlemdeki hız gradyen farkları ve tepelik genişleme etkisi azaltılabilir. Böylelikle, alt pencere boyutlarının sabit tutularak elde edilen çapraz korelasyonlara göre, sınır tabaka, girdap ve türbülanslı akış koşullarında çok daha güvenilir ve hassasiyeti çok daha iyi olan sonuçlar elde edilir. R_{II} : Uzaysal çapraz korelasyonu (sonlu eleman gösterimi) Denklem 5.2’de verilmiştir.

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j) I'(i + x, j + y) \quad (5.2)$$

Bu işlem, çoğunlukla iki-üç iterasyondan sonra, alt pencere boyutlarını optimize ederek, çoğu düzlemsel partikül hareketi için başarılı olarak yakınsamaktadır

Adaptif korelasyon metodu, ilk ve son alt alan boyutlarını çaprazlar ve alt alan boyutu finalize olana kadar, ara sonuçları kendisinden sonra gelen daha küçük boyuttaki alt alanlara besleyerek, hız vektörlerini hesaplar. Şekil 5.15.’te, sağda, adaptif korelasyon sonucu, akış alanındaki yeşil vektörlerin oluşturulduğu ve bunun, soldaki çapraz korelasyon sonucu elde edilen düzensiz vektörlere göre, akışı daha iyi temsil ettiği gösterilmektedir.

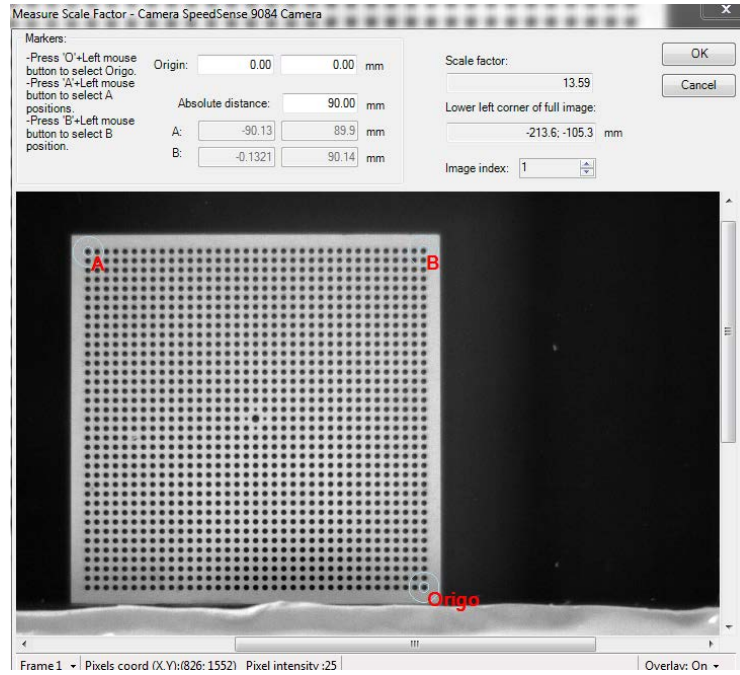


Şekil 5.15. Sırasıyla Çapraz ve Adaptif Korelasyon Hız Dağılımı.

Kaynak: Dynamic Studio User's Guide, 2015

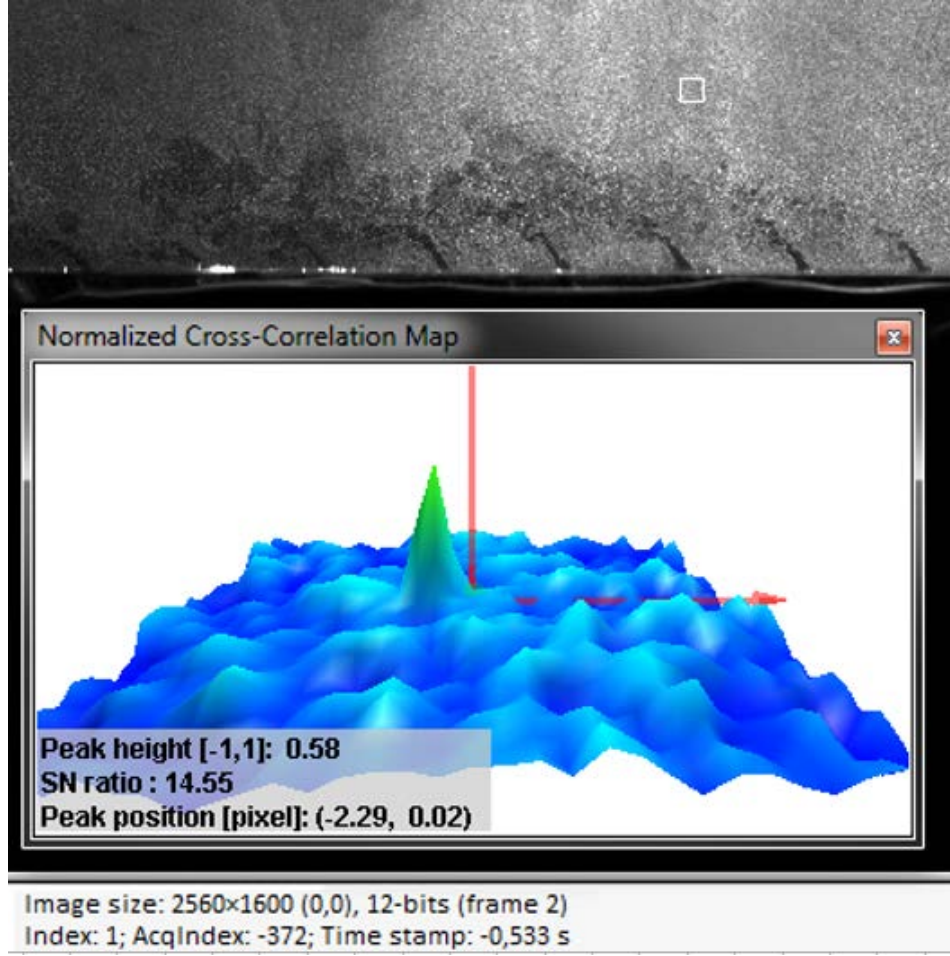
5.4. PIV Deneyleri ve Akış Kinematiki

PIV deneyleri için 6ncesinde lazerin test d6zeneğinde hangi b6lgeyi aydınlatıldığını bulmak gerekir. Bunun için Lazer ışını kalibrasyon plakasını teğet geçecek yani plakayı yalayacak şekilde düzgünce yerleştirilir. Kalibrasyon plakası kullanılarak kameranın odak ve diyafram ayarlarıyla oynanarak kameranın ilgili b6lgede en net imaj alması için kamerada netlik ayarı yapılır. Bu işlemler tamamlandığında kalibrasyon imajı paket yazılıma kalibrasyon görüntüsü olarak kaydedilir. Yazılım sonrasında koşturma işlemleri için alacağı görüntülerde bu imajı baz alarak boyutsal analizler yapacaktır. 90 mm uzunluğunda olan kalibrasyon plakasında akış yönüne bağılı olarak bir orijin noktası tanımlanır ve maksimum çözünürlükte (2560x1600) düşey ve yatay eksenlere denk gelen pikseller uzunluk cinsinden de hesaplanabilir. Şekil 5.16.'da kamera kalibrasyonu ve kalibrasyon imaj yer değıştirme ölçekleme takibi ilgili bir imaj verilmiştir.



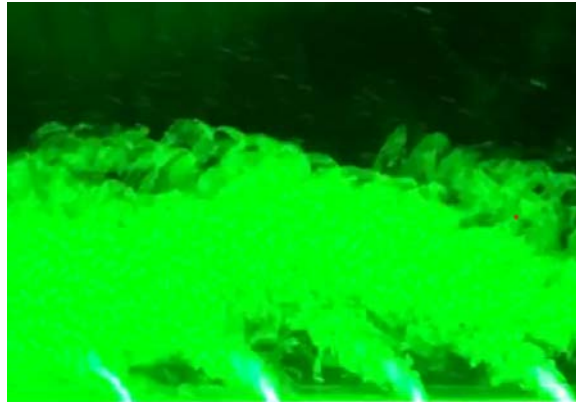
Şekil 5.16. Kamera Kalibrasyonu ve Deplasman Ölçekleme

Şekil 5.17.'de 6apraz korelasyon sinyal gürültü oranları tepe değeri ile ilgili bir ekran alıntısı verilmiştir. 6apraz korelasyon haritalarından Sinyal/ Gürültü (S/N) oranı takibi yaparak deney sırasında ölçölmek istenen alanda yüksek bir sinyal ya da düşük bir gürültü olup olduğı takip edilebilir. Sinyal/ Gürültü (S/N) oranı kötüyse tohumlayıcı debisiyle oynanarak testlerin tekrarı gerçekleştirilir.



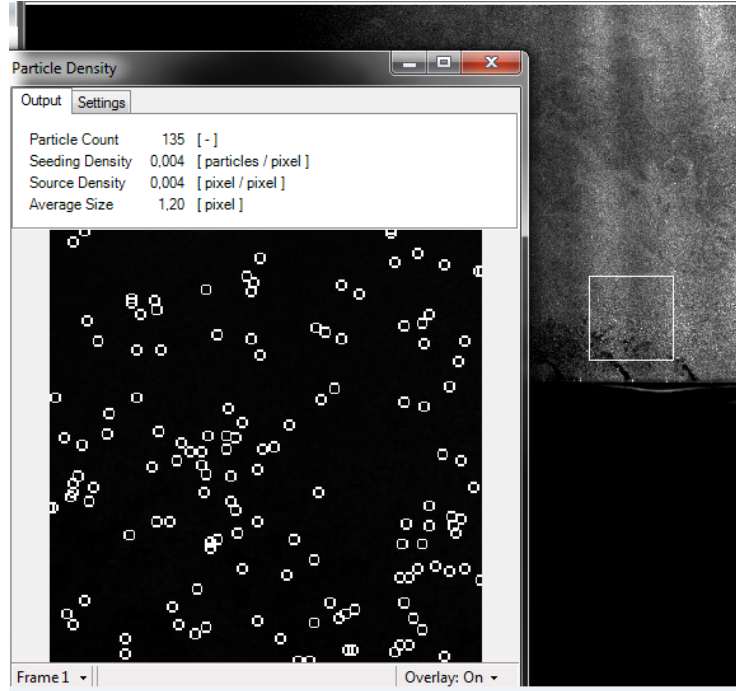
Şekil 5.17. Çapraz Korelasyon Haritası ve Sinyal Gürültü Oranı Tepe Değeri

Görsel 5.1.'de delik çıkışlarında lazer ile aydınlatılmış tohumlayıcılar ilgili bir görsel verilmiştir. Kameranın lazer ışığı dışındaki yabancı ışık kaynaklardan ışık almasını diye kameranın başlığına sadece lazerin yeşil ışığını geçiren filtre takılır.



Görsel 5.1. Jet Çıkışları ve Lazer ile Aydınlatılmış Tohumlayıcı

İmaj kalibrasyonu bittikten sonra PIV ölçümlerine başlamadan önce her bir test ve görüntü kaydı öncesinde kamera kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Tekli ve çoklu frameelerde serbest koşturma (free run) ve ön-izleme (preview) gibi seçeneklerde pozlama süresi, lazer tetikleme oranı vb. birkaç düzenlemeyle kamera kalibrasyonu tamamlanır. Şekil 5.18.'de testler sırasında alınan gerçek bir imaj üzerindeki tohumlayıcı parçacık yoğunluğu ilgili bir şema verilmiştir.



Şekil 5.18. Tohumlayıcı Parçacık Yoğunluğu

Testler sırasında bakılan alana ve tohumlayıcının yoğunluğuna bağlı olarak hem lazer gücü ayarlanır hem de tohumlayıcı debisi görüntü edinmenin altında yer alan önizleme (preview) pozisyonundayken ekrandan bakılan sinyal/ gürültü oranından (S/N ratio) tepe değerler yakalandığından imajları bilgi tabanına kaydeder. Burada ikili frame'de görüntü alınmışsa iki çerçeve arasında lazerin aydınlattığı bölgenin eş bölgeler olduğundan emin olunmalıdır. Kameranin lazerin ışığından etkilenmemesi ve harici ışıkları alıp gürültü oluşturmaması için sadece lazer ışığını algılayan bir filtre kamera başlığına takılmalıdır.

PIV yazılımı skaler olarak hızlar, hız varyansları, türbülans yoğunluk oranları gibi değerler ile skaler türevler olarak girdaplılık, kayma oranları, diverjans ve hız türevleri gibi değerleri haritada görüntüleme ve nümerik olarak dışa aktarma ve işleme imkanı

verir. Aşağıda, PIV'den işlenebilen vektör büyüklükleri ve türevleri ile ilgili akış kinematığı aşağıda verilmiştir.

Girdaplılık (Vortisite): Tüm girdaplılık ve z yönündeki girdaplılık eşitlikleri Denklem 5.3 ve 5.4'te verilmiştir.

$$\vec{\omega} = \text{rot}(\vec{U}) = \text{curl}(\vec{U}) = \nabla \times \vec{U} = \left(\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (5.3)$$

$$\omega_z = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \quad (5.4)$$

Kayma Oranları (Shear): Bir noktadaki hız kesme tensörü hız gradyenlerinden türetilir. Kayma oranı eşitliği Denklem 5.5'te verilmiştir.

$$\vec{\tau} = \left(\frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (5.5)$$

Burada her terim sırasıyla yz-, zx- ve xy-düzlemlerine paralel kesilimi tanımlamaktadır. z-yönündeki düzlemsel veri gradyenleri hesaplanamazken, sadece xy-düzlemine paralel kesilme saptanabilir. Z yönündeki kayma oranı eşitliği Denklem 5.6'da verilmiştir.

$$Kayma_z = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \quad (5.6)$$

Diverjans: Akışın 2-boyutlu olmadığı (yani düzlem dışı hızlar içerdiği) alanları göstermek için düzlemsel veri sıfır olmayan sapma değerleri kullanılabilir.

U gibi bir 3B vektör alanının ayrılması Denklem 5.7'deki gibi tanımlanır:

$$\text{div}(\vec{U}) = \nabla \cdot \vec{U} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \quad (5.7)$$

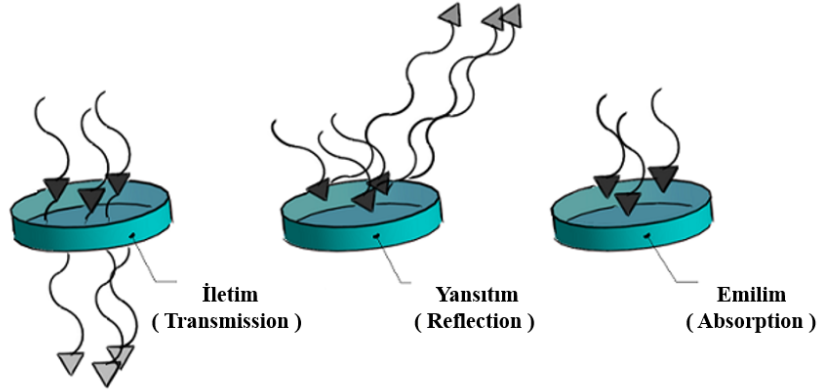
Z-yönündeki düzlemsel veri gradyenleri hesaplanırsa diverjans Denklem 5.8'deki gibi tanımlanır.

$$Diverjans_{UV} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \quad (5.8)$$

5.5. Infrared Termografi Tekniği

Mutlak sıfır sıcaklık noktası (0 Kelvin = -273 °C), haricinde her nesne insan gözünün göremediği infrared (IR) ışın yayar. Termal kamera detektörlerinin IR ışınlarının yoğunluğuna bağlı olarak, nesnenin yüzey sıcaklığını belirlemesi ve insan gözünün

görebileceği şekilde, bir termal görüntü olarak görünür haline getirmesi sürecine infrared termografi denir. Şekil 5.19.'da ışığın madde üzerindeki üç değişik tavrı gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Işığın Madde Üzerindeki Üç Değişik Tavrı

Toplam Enerji = Emilen Enerji + İletilen Enerji + Yansıtılan Enerji

- Yayılan Enerji: Genellikle ölçülmek istenilen enerjidir.
- İletilen Enerji: Uzak bir termal kaynaktan gelip içinden geçen enerji
- Yansıtılan Enerji: Uzak bir termal kaynaktan gelip cismin yüzeyinden yansıyan enerji

Nesnenin kara bir cisim gibi hareket etmesini engelleyen üç faktör vardır. Bu faktörler, nesne tarafından emilen ışıının oranı (α), cisim tarafından yansıyan ışıının oranı (ρ) ve nesne içine iletilen ışıının oranı (τ) şeklindedir. Toplam radyasyon kanunu, bu değerlerin dalga boyuna bağlı olduğunu ve aşağıdaki gibi gösterildiğini gösteren alt simge (λ) içeren üç faktörün ilişkisini gösterir.

$$1 = \alpha\lambda + \rho\lambda + \tau\lambda \quad (5.9)$$

Her bir değer 0 ila 1 arasında bir değer alır. Örneğin kara cisim için. $\alpha = 1$, $\rho = 0$ ve $\tau = 0$ 'dır. Opak cisimler için iletilme iletilen radyasyon terimi düşürerek Denklem 5.9 aşağıdaki şekle düşer.

$$1 = \alpha\lambda + \rho\lambda \quad (5.10)$$

Bir termal kamera tarafından kaydedilen ışıının, termal kameranın görüş alanındaki nesnelerden yayılan infrared ışının emisyonu, iletimi ve yansımından oluşur. Termal kamerayı etkin bir şekilde kullanabilmek için, bu üç terimin arkasında ne olduğu hakkında az da olsa bir fikir sahibi olmak gerekir. İletim bir malzemenin IR ışınlarının

geçmesine izin verme yeteneğidir. Örneğin ince bir plastik levha, çok yüksek bir geçirgenliği vardır bunun anlamı eğer birisi bir ev duvarının önünde asılı ince bir plastik levhanın sıcaklığını bir termal kamera kullanarak kaydetmek isterse, ilk olarak bu levhayı değil duvarın sıcaklığını ölçmelisiniz. Ancak, bu çok nadir olur. Birçok malzeme, IR ışınlarının geçmesine izin vermez, bu yüzden iletim derecesi yaklaşık olarak 0'dır ve dolayısıyla ihmal edilebilir. Emisyon bir malzemenin IR ışınımını yayma yeteneğidir ve emisivite düzeyi ile ifade edilir. Emisivite malzemenin kendisine ve yüzey yapı özelliklerine bağlıdır. Güneş %100 emisivite değerine sahiptir. İyi bir termal görüntü elde etmek için, termal kameraya emisivite ve yansıyan sıcaklık değerlerini girmeliyiz. Her materyalin ayrı bir emisivite değeri bulunmaktadır. Bu değer 0.00 (iletimsiz) ile 1.00 (tam iletimli) arasında değerlendirilmektedir. Deneyler sırasında sıcaklık ölçümü yapılırken kameraya plakanın yüzeyinin emisivite değeri ve kameranın plakaya olan uzaklık değerleri girilmiştir.

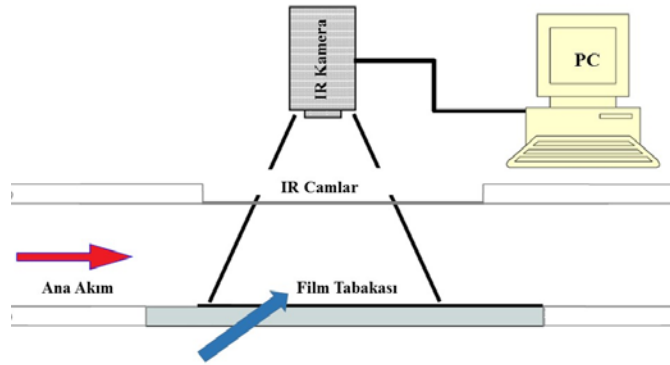
Kızılötesi Termografinin Dezavantajları:

- Diğer yüzeylerden meydana gelen yansımalar doğru sıcaklık ölçümlerini engellenmektedir.
- Sadece düz yüzey sıcaklığını ölçebilir. Derinlik algısı yoktur.

5.5.1. IR camların tünele montajı ve veri işleme yazılımı

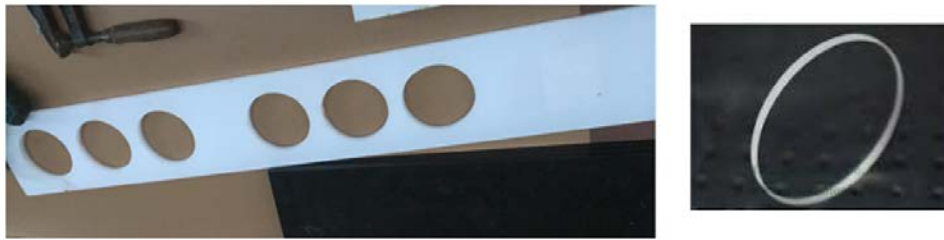
Termometreler, termokupllar, termistörler, direnç sıcaklık detektörü (RTD), pirometre ve infrared termografi sıcaklık ölçen cihazlardır. Bunlar arasında termokupllar, termistörler, direnç sıcaklık detektörü (RTD) temaslı sıcaklık ölçerken pirometre ve infrared termografi temassız sıcaklık ölçer. Infrared kameradan çıkan ışınlar ilk gördüğü yüzey üzerindeki sıcaklık değerlerini temassız olarak kameraya aktarır. Peki, termal görüntüleme işlemi nasıl işliyor: Öncelikle özel bir lens, görüş alanındaki tüm nesnelerin yaydığı kızılötesi ışığı bir yere odaklıyor. Lensin odakladığı kızılötesi ışık, kızılötesi detektör elemanlarından oluşan aşamalı bir sıra dizi ile taranır. Detektör elemanları, içinde termogram olarak adlandırılan çok ayrıntılı bir sıcaklık model dizisi oluşturur. Detektör elemanı için termogram model dizisi yapmak sıcaklık bilgisini elde etmek yalnızca saniyenin otuzda bir süresini alır. Bu bilgi, detektör dizisi açısından birkaç bin noktadan elde edilir. Detektör elemanları tarafından oluşturulan termogram sonrasında elektriksel uyarılara dönüştürülür. Elektriksel uyarılar bir sinyal işleme birimine gönderilir, sonra buradaki bilgiler ekrandaki verilere dönüştüren özel bir yongalı bir devre

kartıdır. Sinyal işleme ünitesi, bilgiyi, kızılötesi emisyon yoğunluğuna bağlı olarak çeşitli renklerde görüldüğü ekrana gönderir. Ekranın gösterdiği termal imaj bütün unsurlardaki tüm elektriksel uyarıların birleşiminden meydana gelir. Hülasa termal kamera camları kapalı bir yerdeki bir plakadan ölçüm alacaksa üst cama monte edilerek kızılötesi ışınların o camı pas geçerek sonrasında odaklandığı ilk katı yüzeyden kameraya elektriksel uyarı göndererek temassız bir şekilde plaka yüzey sıcaklıklarının dağılımını gösterir. Şekil 5.20.'de genel ölçüm düzeni görülmektedir.



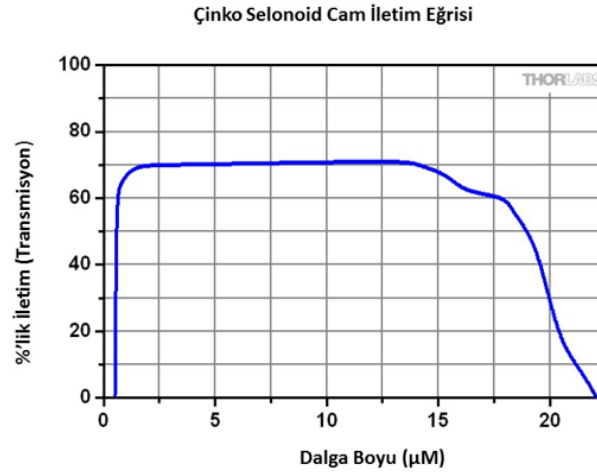
Şekil 5.20. İnfrared Termografi Genel Ölçüm Şeması

IR Camlar tünelin üst plakasına montaj edilmiş olup montaj yapılırken kameranın 50 cm uzaklıkta bakarken tünelin alt yüzeyinden alınan sıcaklıkların birbirini doğrulaması için üst üste alınan (overlap) piksellerden kesintisiz bir sıcaklık ölçümü alınmıştır. Görsel 5.2.'de üst kapak oyukları ve IR camlar ile ilgili bir görsel verilmiştir.



Görsel 5.2. Tünel Üst Kapak Oyukları ve IR Cam

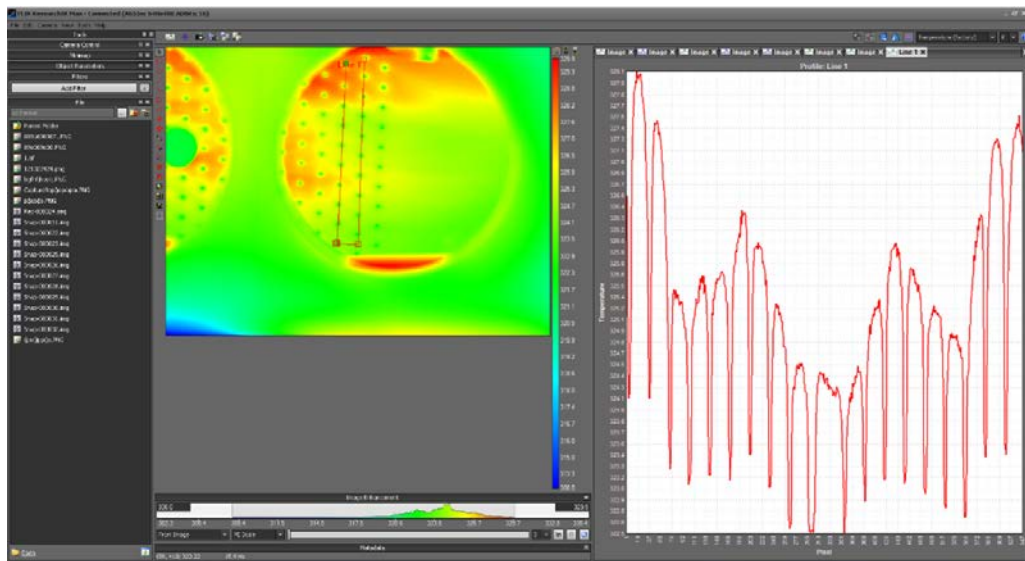
Şekil 5.21.'de görülen çinko selenoid IR camın değişik dalga boylarında iletim (tranmission) eğrisi, normal insidansa sahip, kaplanmamış, 6.3 mm kalınlığında bir ZnSe substratı aracılığıyla ölçülmüş ve grafik oluşturulmuştur. Mevcut deneylerde kullanılan ZnSe camın kalınlığı ise 5 mm'dir.



Şekil 5.21. Çinko Selonoid Camın İletim-Dalgaboyu Eğrisi

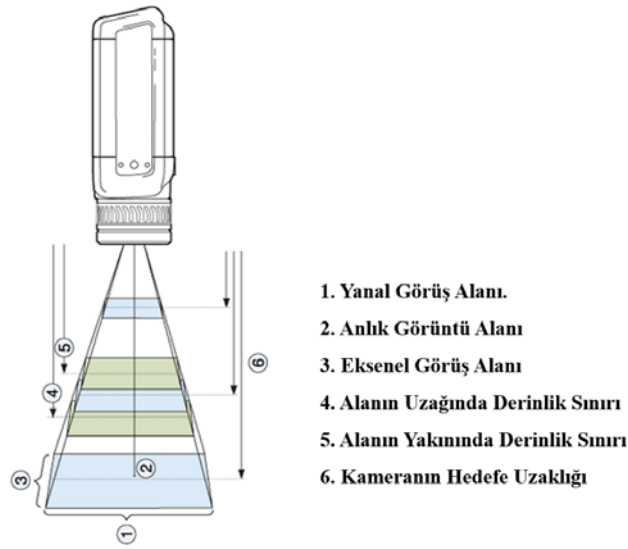
5.5.2. IR termografi ile sıcaklık karakteristiklerinin görüntülenmesi

Plakadan alınan sıcaklık dataları gerçek zamanlı olarak yazılım ekranından takip edilip tanımlanan herhangi bir geometri boyunca sıcaklık eğrileri oluşturabilir. Gelişmiş görüntü analizi ve işleme ResearchIR yazılımını doğrudan MathWorksR'ye data aktarıp Matlab üzerinde 640x480 piksel değerleri için sıcaklık matrisi datası atar. Şekil 5.22.'de deneysel sırasında yazılımdan alınan bir ara yüz gösterilmektedir. Görüntü üzerine çizilen geometrik çizimlerin (çizgi, daire, elips vb.) anlık sıcaklık profil takip eğrilerini yazılım çizebilir.



Şekil 5.22. Gerçek Zamanlı Sıcaklık Takibi

Tünel üst delikleri açılırken kameranın plakadan uzaklığı 0.5 m uzakta tutulmuştur. 14 cm tünel yüksekliği olduğundan kamera tünele 36 cm uzaktan tutulmuştur. Bu mesafede 25'lik lens ile 22 cm yatay ve 17 cm dikey görüntü ve 42 cm yatay ve 31 cm dikey elde edilmiştir. Burada 640 piksel 22 cm'e ve 480 pikselde 17 cm'e tekabül etmektedir. Görüntülerin kesintisiz kaydı için yaklaşık 40 piksel (18 mm) değerinde üst üstte binme (overlap) mantığıyla görüntüler birleştirilmiştir. Şekil 5.23.'te test plakasına bakan termal kamera uzaklığı ve görüş alanı ile ilgili bir şekil verilmiştir.



Şekil 5.23. Termal Kamera Görüş Alanı

İki farklı kamera lensi kullanılarak tünel üst plakada termal kamera oyukları açılmıştır. Bu oyuklar açılırken Tablo 5.1. ve Tablo 5.2.'deki farklı uzaklıklar için termal kameranın yanal ve eksenel görüş alan bilgilerinden faydalanılmıştır.

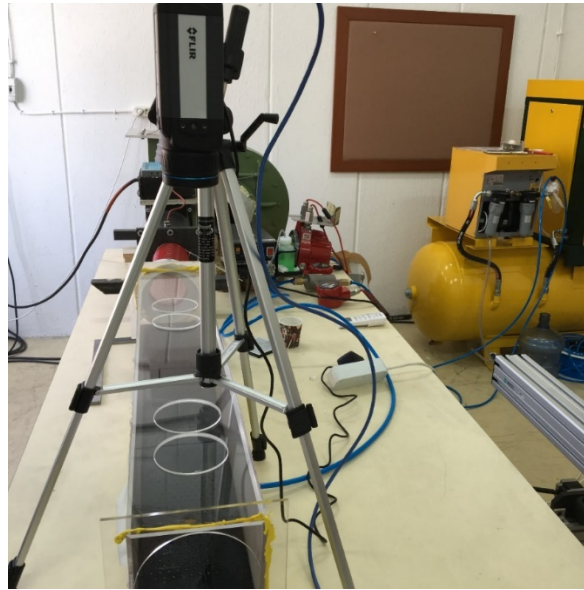
Tablo 5.1. 25'lik Lensin Farklı Uzaklıklar için Görüş Alanı

Kameranın Hedefe Olan Uzaklığı	0.50	1.00	2.00	5.00	m
Yanal Görüş Alanı	0.22	0.44	0.88	2.21	m
Eksenel Görüş Alanı	0.17	0.33	0.66	1.66	m
Alan Yakın Derinliği	0.49	0.95	1.82	4.02	m
Alan Uzak Derinliği	0.51	1.05	2.22	6.62	m
Anlık Görüntü Alanı	0.35	0.69	1.38	3.46	mm

Tablo 5.2. 45'lik Lensin Farklı Uzaklıklar için Görüş Alanı

Kameranın Hedefe Olan Uzaklığı	0.50	1.00	2.00	5.00	m
Yanal Görüş Alanı	0.42	0.83	1.66	4.15	m
Eksenel Görüş Alanı	0.31	0.62	1.25	3.11	m
Alan Yakın Derinliği	0.46	0.85	1.49	2.69	m
Alan Uzak Derinliği	0.55	1.21	3.05	35.3	m
Anlık Görüntü Alanı	0.65	1.30	2.60	6.49	mm

Görsel 5.3.'te infrared camların dört oyuklu üst plaka da camların görünümü ilgili bir görsel verilmiştir. Burada 25 derecelik lens kullanıldığından kameranın görüş mesafesi azalacağından 3 delik kullanmak yerine üst plakada 2 delik kullanmak yeterli olmuştur. Üst kapak oyuk kesimleri de ona göre değiştirilmiştir.



Görsel 5.3. IR Camların Yerleşimi

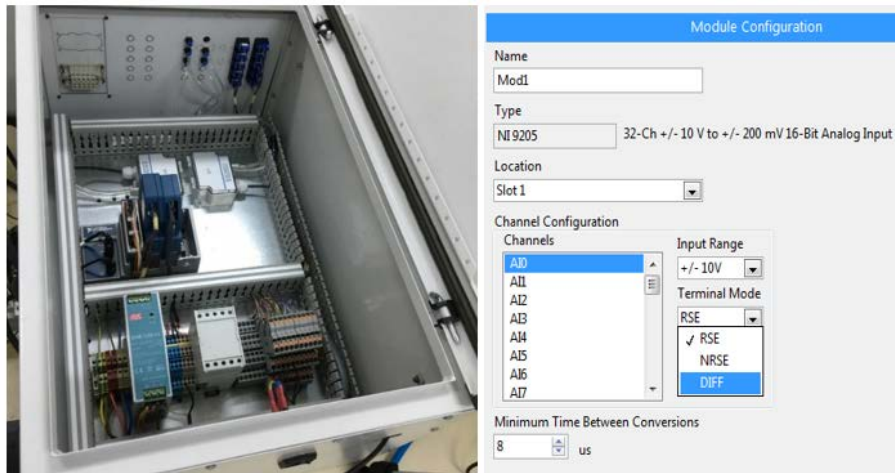
Termal kamera görüntülerinden alınan 640 X 480 piksel boyutundaki matrisler Matlab ile işlenmiş ve eksenel ortalama film etkinlik katsayıları belirlenmiştir. Bu sayede hibrit etkilerin plaka soğutma etkinlik katsayısına nasıl etkidiğiyle ilgili sonuçlara ulaşılmıştır.

5.6. Basınç Ölçümleri

Basınç sensörü olarak DPT 250-R8 tip diferansiyel fark ölçüm basınç sensörleri kullanılmış olup NI 9205 Modülü ile Labview'e gerçek zamanlı basınç ölçümlerini atacak şekilde sistem tünele bağlanmıştır. DPT250-R8 diferansiyel fark ölçüm basınç sensörleri ± 25 , ± 50 , ± 100 , ± 150 Pa 25, 50, 100, 250 Pa gibi değerlerde jumperlar vasıtasıyla ölçülen fark basınçları için gereken jumperlar takılarak farklı basınç ölçümlerine uyarlama yapılır. Görsel 5.4.'te fark basınç sensörü DPT 250-R8 ve basınç toplama (Ni-9205) modülü ile ilgili görsel aşağıda verilmiştir. Görsel 5.5.'te ise veri toplama panosu ve veri toplama ara yüzü verilmiştir.



Görsel 5.4. Basınç Sensörü ve Veri Toplama Modülü (NI 9205)



Görsel 5.5. Veri Toplama Panosu ve Veri Toplama Ara Yüzü

0.73 kg/dak debideki efüzyon plakası için giriş statik basıncı yaklaşık 2.3 Pa olarak ölçülmüştür. Bu değer profil boyunca giderek azalır. Film slot çıkışında statik basınç 9 Pa olarak ölçülmüştür. Delik çıkışlarında -4 Pa olarak ölçülen statik basınç efüzyon plakasının sonuna doğru -25 Pa değerlerini görmüştür. Efüzyon plakası negatif statik basınç oluşmasına yol açar. 0.48 kg/dak debideki tünelde giriş basıncı 0.72 kg/dak debi girişiyle benzer olurken efüzyon plakası slot film çıkışında statik basınç değeri 4.4 Pa olarak ölçülmüştür. Tünel boyunca giderek azalan statik basınç değeri yine efüzyon plakasında negatif değerlere düşer. Efüzyon plakasında son delikte bu değer yaklaşık -12 Pa'dır. 0.24 kg/dak debideki tünelde giriş basıncı diğer debi girişlerine göre düşük statik basınçla girerken (1.5 Pa) efüzyon plakası slot film çıkışında statik basınç değeri yaklaşık -1 Pa civarında olur. Görsel 5.6.'da daldırma tip toplam ve statik basınç problemleri gösterilmektedir.

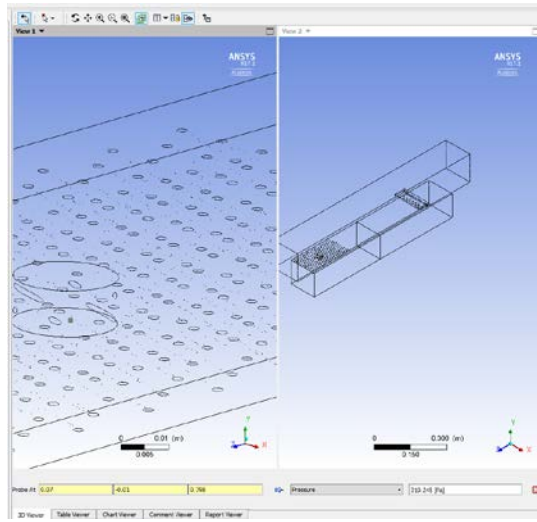


Görsel 5.6. Daldırma Tip Toplam Basınç ve Statik Basınç Problemleri

Tünel boyunca azalan basınç efüzyon deliklerinden sonra iyice düşerek -8 Pa değerini görür. Dilüsyon plakasının bağlı olduğu tünelde 1.06 kg/dak üfleme oranında Tünel giriş basıncı 6.5 Pa olarak ölçülürken tünel boyunca giderek azalır. Dilüsyon deliği çok ciddi basınç düşümlerine yol açarken delik öncesi statik basınç artarken delik sonrasında statik basınçlar. -19 Pa değerlerini görür. Yine 0.2 kg/dak slot film tabakasında 16 Pa basınç ölçülür. 0.69 kg/dak üfleme oranında tünel girişinde 4.5 Pa basınç ölçülürken bu değer tünel boyunca giderek azalır dilüsyon deliği girişinde statik basınç artarken

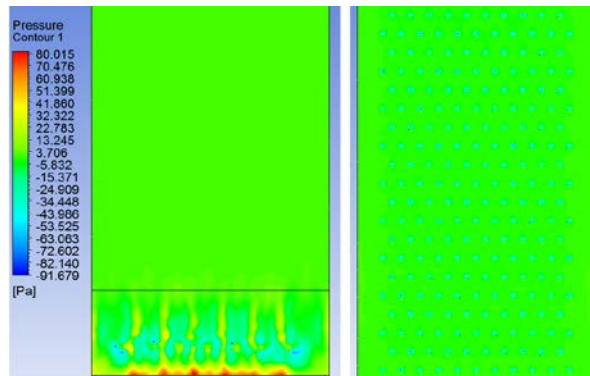
dilüsyon deliğinden sonra -9 Pa değerlerine kadar düşer. Yine 0.2 kg/dak slot film delik çıkışında statik basınç 7 Pa olarak ölçülür. 0.35 kg/dak efüzyon debisinde giriş basıncı 2.5 Pa olurken bu değer tünel boyunca -1 Pa görecekle ilerlerken dilüsyon deliği öncesinde 2 Pa sonrasında ise -2 Pa şeklinde ölçülmüştür. Yine 0.2 kg/dak slot film deliğinde basınç 0.5 Pa olarak ölçülmüştür.

CFD Post'ta nümerik olarak istenilen noktaya atanan prob ile statik basınç ölçümleri yapıp deneysel olarak ölçülen değerlerin validasyonu yapılabilir. Şekil 5.24.'te CFD Post statik basınç ölçümleriyle ilgili bir ekran alıntısı imaj verilmiştir.



Şekil 5.24. CFD Post Statik Basınç Ölçümleri

Şekil 5.25.'te CFD Post slot film ve efüzyon plaka basınçları verilmiştir. Slot yuvasında pozitif statik basınç değerlerine ulaşılırken efüzyon plakasında negatif statik basınçlar okunur.



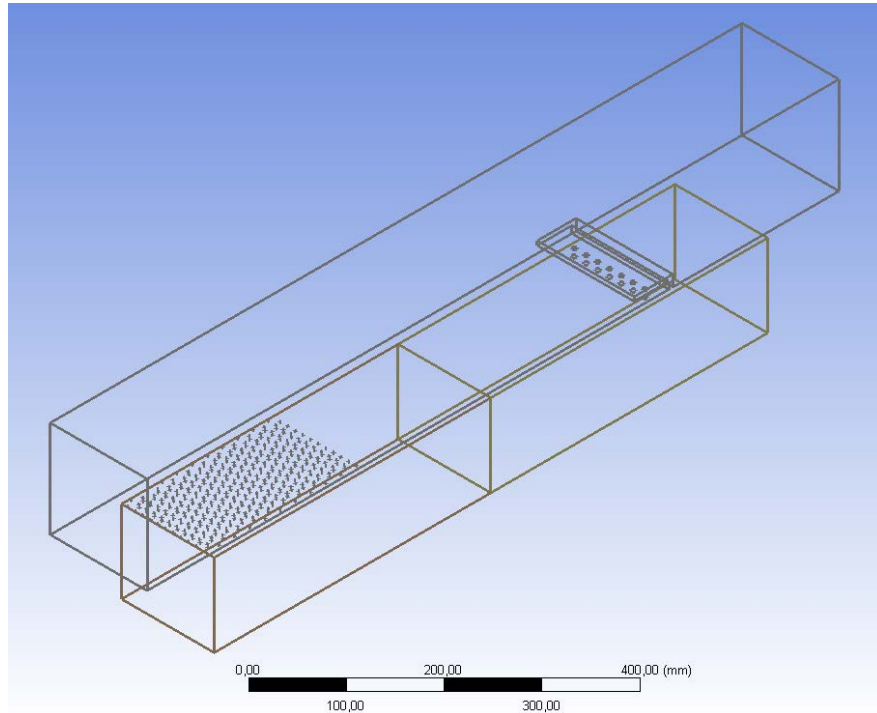
Şekil 5.25. CFD Post Slot Film ve Efüzyon Plaka Basınçları

5.7. Sayısal Modelleme, HAD Analizlerin Yapılması

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), ısı transferi ve akışkanlar dinamiği alanlarında karmaşık akış ve ısı transfer benzetim problemlerinin çözümü için geliştirilmiş modelleme yapma, sayısal ağ yaratma ve analiz yapma sistemidir. Tez kapsamında üretilen Plenum ve hava tüneline basınç, sıcaklık, debi vb. gerçek test sınır koşul girdileri verilerek ANSYS Fluent ile HAD analizler yapılmıştır.

5.7.1. CAD Model

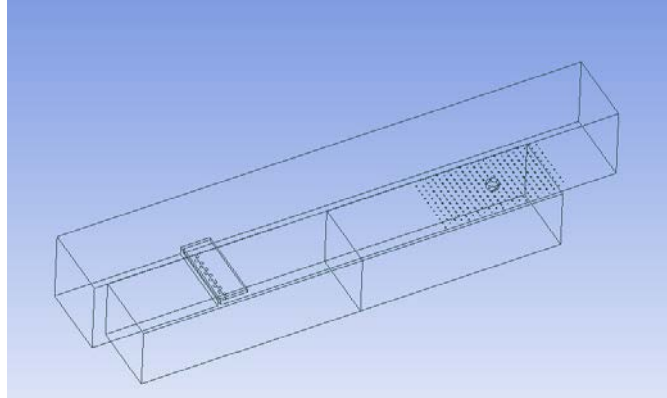
Hibrit soğutma plakalarında oluşan CAD modeller 1000 mm'lik hava tüneli ve 800 mm'lik plenumdan oluşmaktadır. Giriş kısmında 200 mm'lik inlet, sonrasında 400 mm'lik efüzyon plakası ve 400 mm'lik slot film plakası art arda eklenmiştir. Şekil 5.26.'da slot film+ efüzyon plakalı konfigürasyon için hava tüneli ve dinlenme odası verilmiştir.



Şekil 5.26. Hava Tüneli ve Dinlenme Odası (Slot + Efüzyon Plakası)

Efüzyon plakasına açılan 22 mm'lik dilüsyon deliğiyle ayrı bir plaka oluşturulmuş ve 400 mm'lik slot film plakası ve 400 mm'lik dilüsyon plakası ve art arda eklenmiş ve hibrit soğutma etkilerinin sayısal olarak gözlemlenmesine olanak tanınmıştır. Şekil

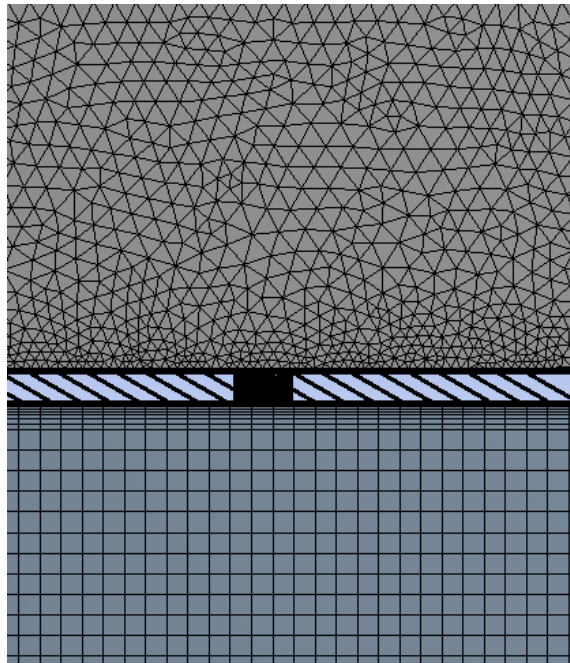
5.27.'de slot film + efüzyon plakalı konfigürasyon için hava tüneli ve dinlenme odası düzeneği beraber verilmiştir.



Şekil 5.27. Hava Tüneli ve Dinlenme Odası (Slot + Dilüsyon Plakası)

5.7.2. Ağ (mesh) ve sınır koşulları

CAD modellere ağları atmak için ANSYS Meshing kullanılmıştır. Ağ atılırken delik çıkışına en 100 hücre gelecek şekilde ve delik giriş ve çıkışındaki duvar etkisinden ve düzensiz jet çıkışlarından kaynaklı akış düzensizlikleri önlemek için daha sık ağ atılmış ve her bir model için 15 milyon hücrenin (cell) üzerinde ağ atılmıştır. Şekil 5.28.'de atılan ağın gösterimi ve sıklığı ile ilgili Ansys Meshing'te bir ekran alıntısı verilmiştir.

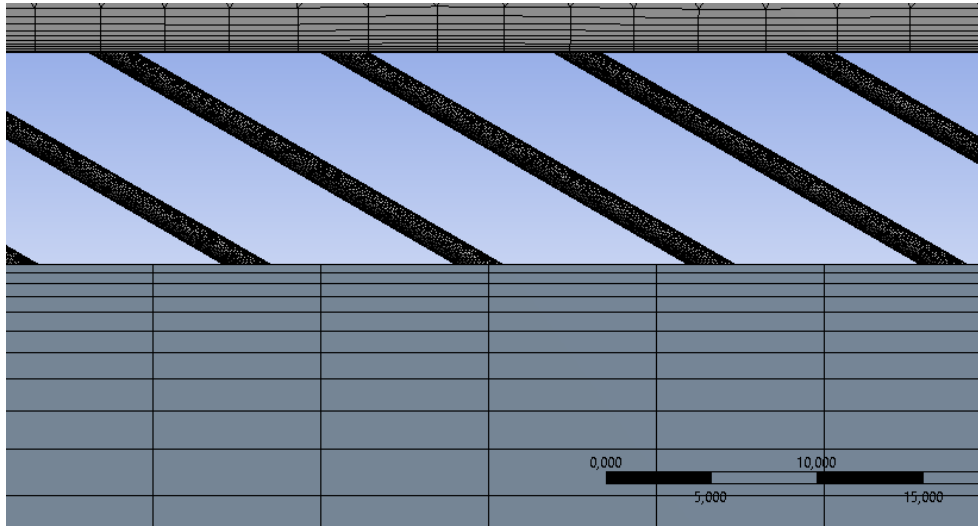


Şekil 5.28. Ağın Gösterimi ve Sıklığı

Duvarla sınırlanmış bir akış için boyutsal olmayan bir duvar uzaklığı şu şekilde tanımlanabilir:

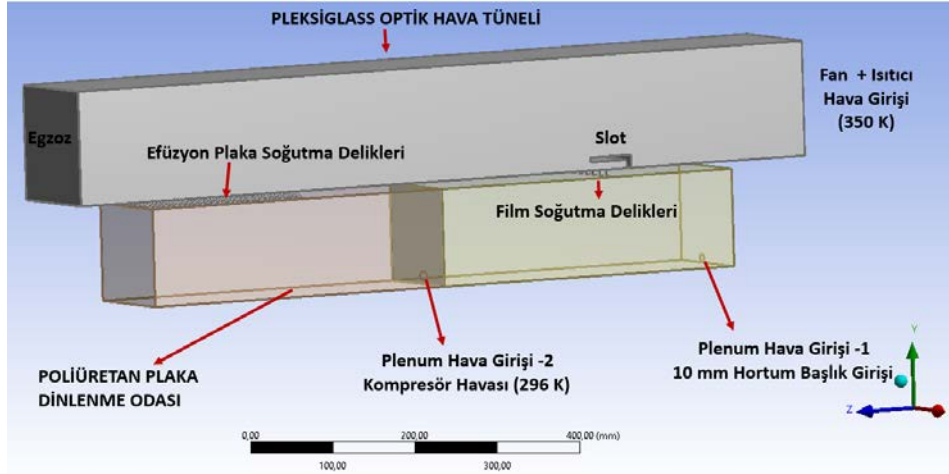
$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad (5.11)$$

Burada en yakın duvardaki sürtünme hızı u_* , en yakın duvara olan mesafe y ve akışkanın sıvının lokal kinematik viskozitesi ν 'dir. y^+ değeri genellikle y artı olarak adlandırılır ve sınır tabaka teorisinde ve yakın duvar etkilerinin indirmek için duvarın yasasını tanımlarken yaygın olarak kullanılır. Bütün ağ çözümlerinde duvar etkilerini indirmek için y^+ değeri 1'den küçük alınmıştır. Şekil 5.29.'da duvar etkilerinin indirgenmesi ile ilgili Ansys Meshing'te atılan ağla ilgili bir ekran alıntısı verilmiştir.



Şekil 5.29. Duvar Etkilerinin İndirgenmesi

İkinci bir modelde farklı üfleme oranlarının etkilerini incelemek için yanlara simetri sınır koşulu verilmiştir. Simetri düzlemi soğutma jet çıkışının duvar etkilerinden bağımsız şekilde incelenmesi için gereklidir. Simetri düzleminden alınan sıcaklık konturleri farklı üfleme oranlarının etkilerini gözlemlemek için en ideal metottur. Şekil 5.30.'da hava tüneli ve dinlenme odasına ait sınır koşulları verilmiştir. Hava ideal gaz olarak seçilmiştir. İdeal gaz koşullarından dolayı tüm giriş koşulları debi girişi şeklinde verilmiştir. Kanalın hidrolik çapı ve deneysel verilerden alınan statik basınç değerleri ANSYS Fluent'te tanıtılmıştır. Çıkışlara basınç çıkışı (pressure outlet) verilmiştir. Özgül ısı, termal iletim katsayısı gibi hava özelliklerinin sıcaklıkla değişimi (296 K – 350 K) lineer parçalı (piecewise linear) olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.30. Hava Tüneli Modeli ve Sınır Koşulları

Duvarlar öncelikle adyabatik duvar ve kaymama koşulu (no slip condition) ile çözdürülürken sonradan iletim kayıplarını göz önünde bulundurmak için duvardan negatif ısı akı değerleri girilip sayısal çözümlerin gerçekçi olması sağlanmıştır. Bütün çözümler ikinci dereceden (second order) verilmiş olup çift hassasiyetle (double precision) çözülmüştür. Tablo 5.3.'te pleksiglas ve poliüretan malzeme için Fluent kullanıcı tanımlı malzeme özellik değer girişi verilmiştir.

Tablo 5.3. Fluent Kullanıcı Tanımlı Malzeme Değer Girişi

Özellik/Malzeme	Pleksiglas	Poliüretan
Yoğunluk (kg/m ³)	1180	1110
Özgül ısı (J/kgK)	1470	1800
Isıl iletkenlik katsayısı (W/(m ² K))	0.2	0.024

5.7.3. Türbülans analiz modelleri

Türbülans analiz modeli olarak Reynolds Ortalama Navier Stokes (RANS)'ın birinci dereceden bir çözüm modeli olan ve giderek geliştirilen transition kt-kl- ω modeli kullanılmıştır. Transition kt-kl- ω modeli düşük Reynolds Sayılarında özellikle delik çıkışlarında jetleri doğru modellemek için seçilmiştir. RANS temelli türbülans model denklemleri, orijinal Navier-Stokes denklemlerine ortalaması alınmış hız ve zamana bağlı hız dalgalanma terimlerinin eklenmesiyle elde edilir. Bu modelleme terimleri sayesinde

türbülans dalgalanmalarının etkileri de sayısal çözüme katılabilmektedir. LES ve DNS modelleri küçük türbülans skalası ölçmek için yetersiz kalırken, RANS temelli modeller türetilen ekstra denklemler sayesinde tüm türbülans ölçeklerinde modelleme olanağı sağlar. Menter (2003) tarafından geliştirilen Transition kt-kl- ω modeli, Standart k- ϵ modelini Standart k- ω modeline dönüştürerek türbülans kayma gerilmelerinin taşınımını yüksek hassasiyette hesaplar. Model böylece eğimli yüzeylerdeki akışta ve ters basınç gradyeni altındaki ayrılmış akışlarda daha hassas sonuçlar verir.

Walters ve Cokljat (2008) mevcut k- ω 'ya dayalı üç eşitlikli bir eddy-viskozite türbülans modeli geliştirmişlerdir. Bu model türbülanslı akışa geçişten önce gelen düşük frekanslı dalgalanmaları hesaba katan laminar kinetik enerjiyi (k_L) hesaplamak için üçüncü bir taşıma denklemi içerir. Walters ve Cokljat, bu modeli, tam gelişmiş kanal akışını, düz plaka geçişini (basınç gradyanlı ve basınç düşüşü olmaksızın) ve çok sayıda kanat profili içeren çoklu test durumlarıyla doğrulamışlardır. Türbülanslı kinetik enerji taşıma denklemleri Denklem 5.12'de, laminar kinetik enerji taşıma denklemi Denklem 5.13'te ve son olarak kinetik enerjinin üretimini, yıkımını ve değişim derecesini tanımlayan ve ölçek belirleyici bir değişken olan ω teriminin zamana bağlı değişimi Denklem 5.14'te verilmiştir. Walters ve Cokljat, $\omega = \epsilon / k_T$ olarak tanımlarlar, burada ϵ , k- ϵ türbülans modellerinde yaygın olarak kullanılan izotropik dağılımdır. Bu üç denklemden k_T , k_L ve ω terimleri hakkında verilen türbülans kinetik enerji üretimini, imha edilmesini ve difüzyonu hakkında fikir verir.

$$\frac{Dk_T}{Dt} = P_{k_T} + R_{BP} + R_{NAT} - \omega k_T - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\alpha_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right] \quad (5.12)$$

$$\frac{Dk_L}{Dt} = P_{k_L} - R_{BP} - R_{NAT} - D_L + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial k_L}{\partial x_j} \right] \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\omega}{Dt} = & C_{\omega 1} \frac{\omega}{k_T} P_{k_T} + \left(\frac{C_{\omega R}}{f_W} - 1 \right) \frac{\omega}{k_T} (R_{BP} + R_{NAT}) - C_{\omega 2} \omega^2 + C_{\omega 3} f_\omega \alpha_T f_W^2 \frac{\sqrt{k_T}}{d^3} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\alpha_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (5.14)$$

Ek.1'de kt-kl- ω türbülans modeli hakkında diğer yardımcı denklemler ve model sabitlerle detaylı şekilde verilmiştir.

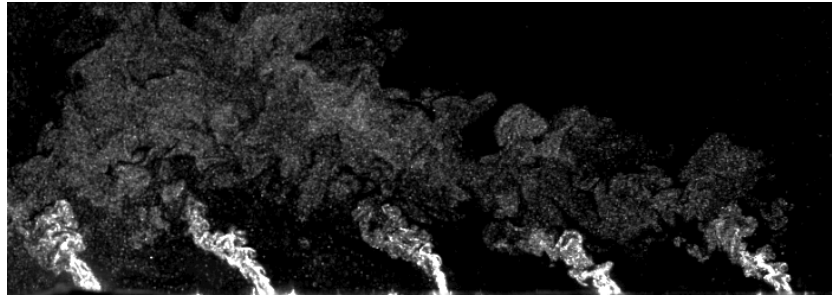
5.8. Analiz ve Ölçümlerin Doğruluğu

PIV ölçümlerinden alt bölgeler (interrogation windows) piksel hassasiyetinde sinyal tepe noktalarının hesaplanması sırasında meydana gelen hatalar, türbülanslı akışın dönmesinden ve deformasyonundan kaynaklanan gradyen hataları ve anlık Euler akış hızının tahmin edilebilmesi için yapılan Lagranian-Euler dönüşümü formülasyonlarının kullanılması temel PIV hatalarıdır. Termal ölçümlerde kullanılan FLIR A655sc temassız infrared ölçümü $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hassasiyet ile sonuç verir. Hava Isıtıcı: Hava ısıtıcı sabit bir fan debisinden ± 0.2 C salınım yapar. Bu da 77 derecedeki ölçümlerin 76.8 ile 77.2 arasında salınım yapmıştır. DPT 250-R8 Fark Basınç sensörleri ± 1.5 Pa hassasiyet ile ölçüm alır. Basınç sensörü ± 25 Pa jumper için pozitif basınç ölçümleri için 1.375 Pa negatif basınç ölçümleri için 0.625 Pa hata marjı vardır. Debimetre okuduğu değer binde beşi oranında hata verir. Tezdeki hesaplarda debi değerleri virgülden sonra 3 haneye kadar alınmıştır. Sierra 780 i ± 0.5 hassasiyetle çalışır. Dinlenme odası, hava tüneli ve bağlantı elemanlarında hava kaçakları ve sızdırmazlık kayıpları ± 1 civarında kabul edilebilir. HAD analizlerinde atılan ağ (mesh) hataları, duvar etkileri ($y^+ < 1$) ve Reynolds Ortalama Navier Stokes (RANS) yaklaşımı zamana göre ortalananmış denklemler ve ek ampirik modelleme ve çözümleme de temel HAD hatalarıdır. Adyabatik duvar koşulu ile nümerik olarak çözdürülen test düzeneğinde gerçekçi şartlara aykırıdır. Çünkü gerçekte hem iletim ısı transferinden dolayı iletim ısı kayıpları hem de malzeme etkisinden kaynaklı konjuge ısı transfer etkisinden kaynaklı termal sınır tabakanın gelişimi farklılaşır. Bu etkiler HAD analizlerinin sonunda ayrıca gerçeğe yakın olsun diye ısı kayıplar ve konjuge etkiler ayrıca nümerik olarak incelenmiştir.

6. BULGULAR ve DEĞERLENDİRMELER

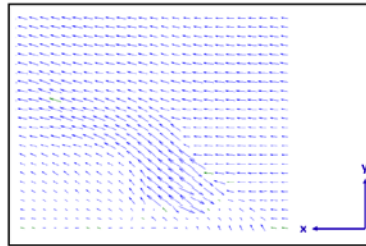
6.1. PIV Akış Analizi Sonuçları

PIV ölçümleri için öncelikle tohumlayıcı ana akıma karıştırılmadan sadece dinlenme odasına gönderilmiş ve jet çıkış hızlarını yakalayan debi değerleri debimetreden okunmuştur. Bu sayede hem ana akım ve hem de soğutucu akım için hız oranlarıyla beraber üfleme oranlarının da takibi yapılmıştır. Şekil 6.1.'de dinlenme odasına gönderilmiş tohumlayıcı jet çıkışlarından PIV yöntemiyle alınmış ham bir imaj görülmektedir.



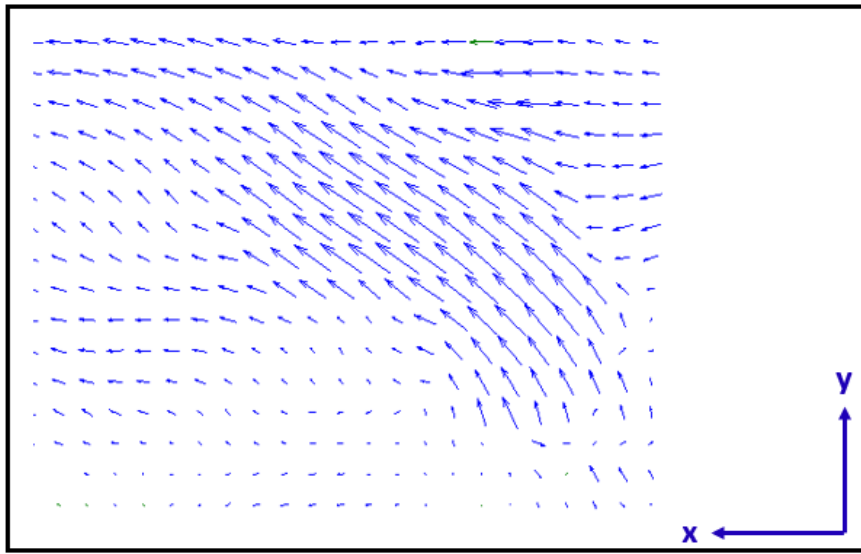
Şekil 6.1. Tohumlayıcı Jet Çıkışı Ham İmaj

Slot plaka + efüzyon plakası için 2 m/s jet çıkışı hızı için debi değeri 0,238 kg/dak, 4 m/s hız değeri için 0,479 kg/dak ve 6 m/s hız değeri için debi değeri 0,719 kg/dak olarak okunmuştur. Slot film plaka + dilüsyon + efüzyon plakası için 2.25 mm'lik deliklerden geçen 2 m/s jet çıkış hızı için debi değeri 0,352 kg/dak 4 m/s için 0,695 kg/dak ve 6 m/s jet çıkış hızı için debi değeri 1.056 kg/dak olarak okunmuştur. Film soğutma slot çıkışlarında slot film deliklerine gönderilen debi değeri efüzyon plakalı düzenek için 0,201 kg/dak olarak dilüsyon plakasında ise 0,223 kg/dak olarak okunmuş ve bu değerler tüm deneyler için sabit tutulmuştur. Şekil 6.2.'de jet ve ana akım hız vektörleri ve jet akış yukarı (lift off) etkisi verilmiştir.



Şekil 6.2. Jet Akış Yukarı (Lift Off) Etkisi

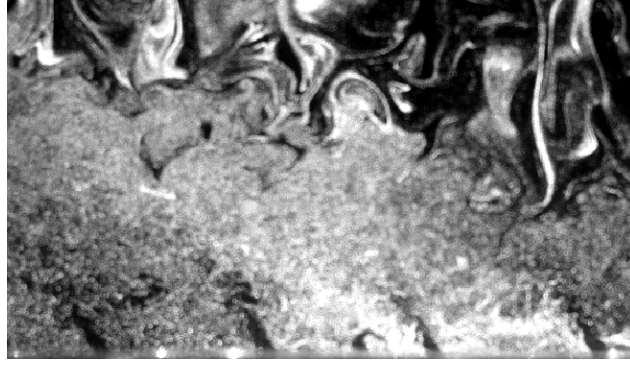
Akım karşılaşmasında hızlar çok ani değiştiğinden PIV’de analiz metodu olarak ortalama ve çapraz korelasyonlar kullanılmamıştır. Ölçüm sonuçlarını almak için iyileştirilmiş sonuçlar veren Adaptif PIV yöntemi kullanılmıştır. Ana akım hızı 2 m/s jet çıkış hızı 6 m/s olan bir test koşulu için Adaptif PIV yöntemiyle ile alınmış hız vektörleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Burada jetler hızlı olduğu için jet lift off mekanizması devreye girmiş ve soğutucu akım yüzeye tutunmak yerine yukarı tırmanıp ana akıma baskın gelmeye çalışmıştır. Jetler belirli bir yüksekliğe kadar çıkıp sonradan ana akımla karıştıktan sonra düzenli bir akış seyrinde aksel ilerlemelerine devam ederler.



Şekil 6.3. Hız Vektörü ve Resirkülasyon Baloncuğu

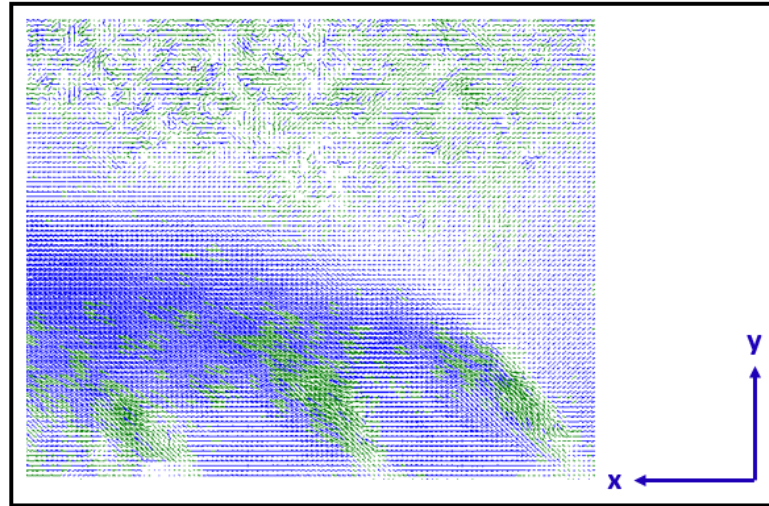
Ana akım hızı 2 m/s jet çıkış hızı 4 m/s olan bir test koşulu için Adaptif PIV ile alınmış jet ve ana akım hız vektörleri Şekil 6.3.’te gösterilmiştir. Jetler, jet lift off yerine ana akıma yenik düşen jet akış aşağı eğilimine girer. Jetler ana akıma karışmak isterken sıcak ana akım jetlere doğru sokulduğunu karışım bölgesinde kidney ve anti kidney vortislerinin oluşturduğunu da söyleyebiliriz. Yine akışı takip eden alt bölgelerde oluşan resirkülasyon baloncuğu oluşur. Burada akış vektörleri çok küçük şiddetlerde olup bu bölgelerde ters akışlar ve vorteks hücreleri oluşmuştur.

İkinci deneyde PIV ölçümleri için tohumlayıcı slot film deliklerinden gönderilmiştir. Böylece film deliklerinin akım izlerinin ana akıma karışmasıyla oluşan türbülanslı bölgelerin takibi yapılmıştır. Jet çıkışlarından alınan türbülans yoğunluk değerleri daha sonra HAD analizlerine girdi olarak kullanılmıştır. Şekil 6.4.’te slota gönderilen tohumlayıcı için ham bir imaj verilmiştir.



Şekil 6.4. *Slota Gönderilen Tohumlayıcı Ham İmaj*

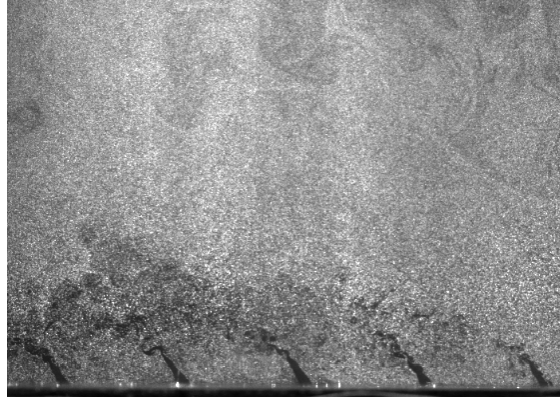
Şekil 6.5.'te slota gönderilen tohumlayıcı için vektör haritası verilmiştir. Burada ana akımda meydana gelen ediler üst bölgede gözlemlenirken alt bölgelerde ise çapraz akış jet karışım fiziği hâkimdir.



Şekil 6.5. *Slota Gönderilen Tohumlayıcı için Vektör Haritası*

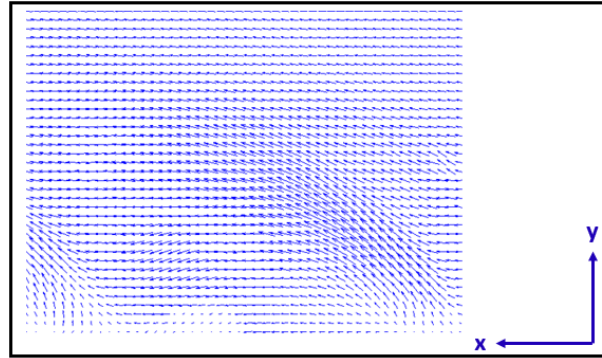
Slot film deliklerinden çıkan akış ana akımda yüksek türbülans düzeyleri oluşturur. Şekil 6.5.'te Adaptiv PIV'nin akış alanındaki yeşil vektörlerin oluşturması hız değişimlerinin ani olmasından ve tohumlayıcıların yetersiz olmasından kaynaklanır. Çapraz korelasyon sonucu elde edilen düzensiz vektörlere göre, Adaptiv PIV'nin akışı daha iyi temsil ettiğini analiz sonuçlarından ne şekilde gözlemlenebilir.

Üçüncü deneyde PIV ölçümleri için tohumlayıcı direkt olarak fan girişine verilmiş ve ana akımdaki girdaplılığın takibi sağlanmıştır. Şekil 6.6.'da ana akıma gönderilen tohumlayıcı ve jet çıkışları verilmiştir.



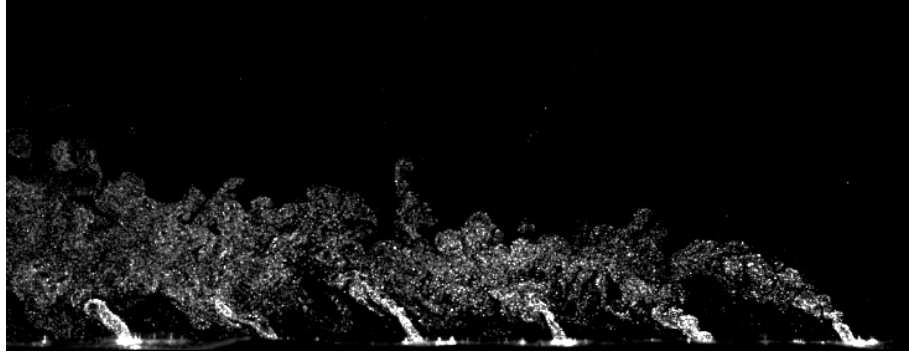
Şekil 6.6. Ana Akıma Gönderilen Tohumlayıcı ve Jet çıkışları

Ana akıma gönderilen tohumlayıcı sayesinde ana akım hızları ve jet karışımında meydana gelen hız sapmaları, girdaplılık, türbülans yoğunluğu gibi değerler ana akım baz alınarak çıkarılmıştır. Buradaki engel, jet çıkışlarında tohumlayıcı olmadığından oluşan düşük korelasyonlardan ötürü jetlerle ana akımı aynı anda takip etmenin olanaksız olmasıdır. Ama bu metot; ana akımla ilgili değerleri, jetlerin u , v hız değerlerinin eksenel ve dikey yayılımlarını izlemek için ideal bir metottur. Şekil 6.7.'de jetler arasında oluşan akış vektör bölgelerinin gösterimi verilmiştir. Vektör şiddetlerinin çok küçük olduğu dip bölgelerde ters akışlar ve vorteks hücreleri oluşur.



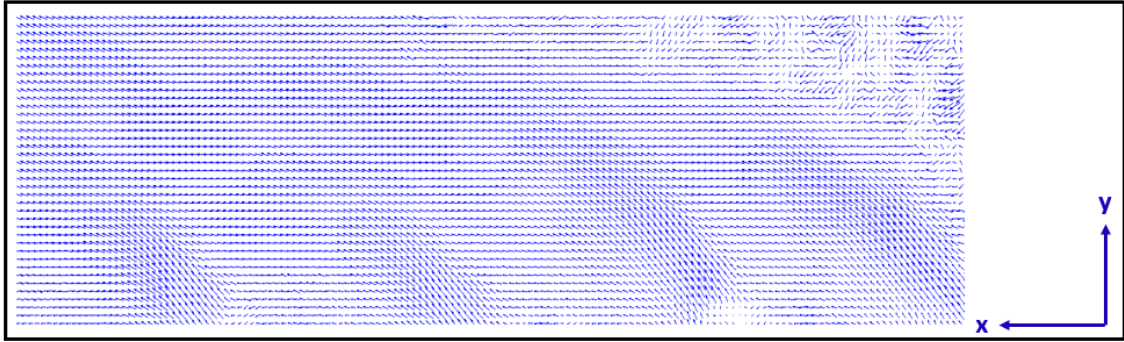
Şekil 6.7. Jetler Arasında Oluşan Resirkülasyon Bölgelerinin Gösterimi

Deneyler ilgili imajlar alındıktan ve adaptif PIV ile görüntüler analiz edildikten sonra analizlere ekstradan vektör istatistiği de uygulanmıştır. Böylece, ister skaler büyüklük analizlerinden (u , v , bileşke hız şiddeti, türbülans yoğunluğu, vb.) ister skaler türev (du/dy , dv/dx , girdaplılık, kayma oranları, diverjans vb.) analizlerinden işlenmek istenen değerler hakkında analiz sonuç haritaları alınabilir.



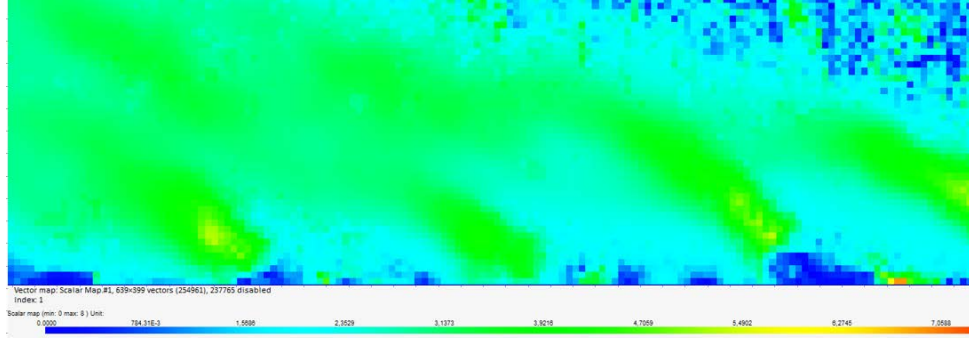
Şekil 6.8. Efüzyon Jet Çıkışları PIV Ham İmajlar ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)

0.24 kg/dak debi için tohumlayıcılar efüzyon jetlerine gönderildiğinde oluşan ham imaj (raw image) Şekil 6.8.'de verilmiştir. 0.24 kg/dak debi için Adaptif PIV metoduyla oluşturulmuş vektör haritası Şekil 6.9'da verilmiştir. Belirli debilerde dinlenme odasına gönderilmiş tohumlayıcı DOT olarak ana akıma gönderilmiş tohumlayıcılar ise AAT olarak kısaltılmıştır. Aksi belirtilmedikçe verilen sonuçlar dinlenme odasına gönderilmiş tohumlayıcı ile ilgili sonuçlardır. Jet çıkışlarının dip noktasının önünde ve arkasında yanıl bölgede oluşan vektör boşluğu at nalı girdaplarından kaynaklıdır.



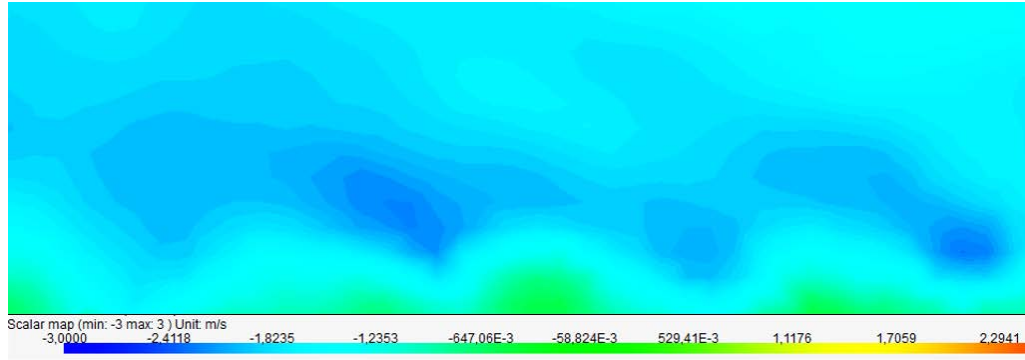
Şekil 6.9. Vektör Haritası ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, DOT)

PIV'de $\dot{m}=0.48$ kg/için oluşturulmuş vektör şiddet haritası Şekil 6.9.'da verilmiştir. Jet çıkışlarındaki hızların yaklaşık 4 m/s olduğu vektör şiddet haritasından görülebilir. Jetleri takip eden bölgelerde ise göreceli düşük hızlar gerek resirkülasyon gerekse ana akım hızının jet hızından göreceli küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 6.10.'da ($\dot{m}=0.48$ kg/dak) efüzyon jet çıkış hız vektörlerinin gösterimi verilmiştir. Jetleri takip eden bölgelerde hız büyüklüğü 4 m/s bandında seyrederken mavi bölgeler ise at nalı girdapları ve resirkülasyon baloncuklarından kaynaklı akışın durağan olduğu bölgelerdir.



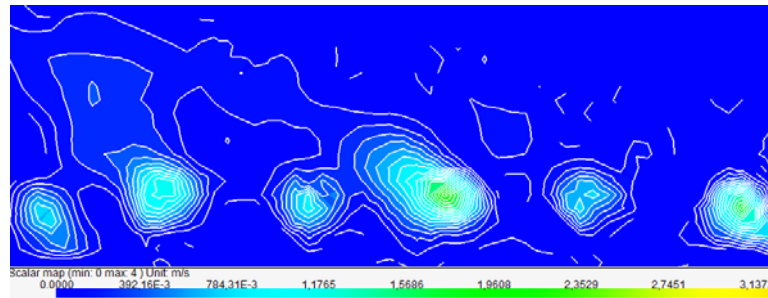
Şekil 6.10. *Efüzyon Jet Çıkış Hız Vektörlerinin Gösterimi ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)*

Şekil 6.11.'de x yönünde hız bileşeni olan u hız bileşenine ait konturleri görülmektedir. Jetleri takip eden alt bölgelerdeki yeşil bölgeler akışın sağında ve solunda oluşan at nalı girdapları ile jetlerin iz bölgesinde oluşan resirkülasyon bölgelerini temsil etmektedir.



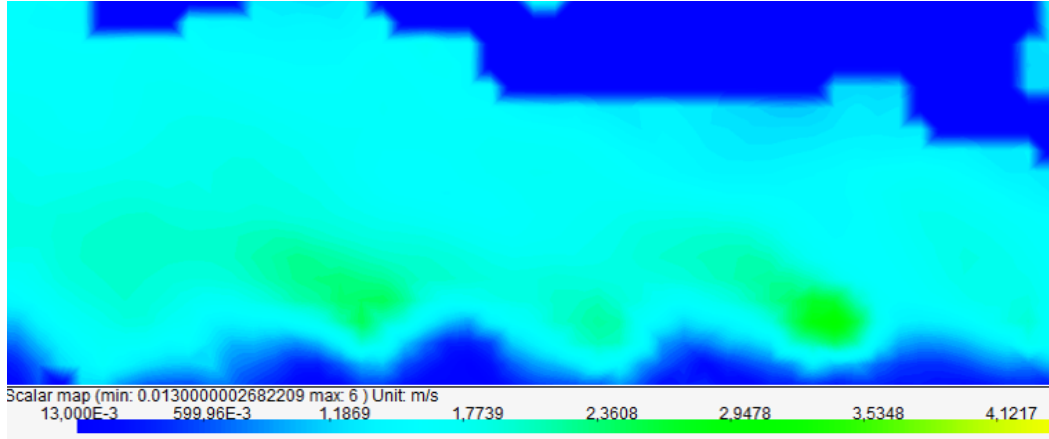
Şekil 6.11. *U Hız Bileşeni Kontur Haritası ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)*

Şekil 6.12.'de y yönünde hız bileşeni olan v hız bileşenine ait konturler görülmektedir. Şekilden jet çıkış çekirdeğinden yüksek hızda çıkan jetler yükselip ana akımla karşılaşınca hız keser. Ayrıca jet deliklerinden çıkan tohumlayıcılar üniform yapıda olmadığından v hız bileşenine ait konturların girdaplılık etkileri farklı çıkmıştır.



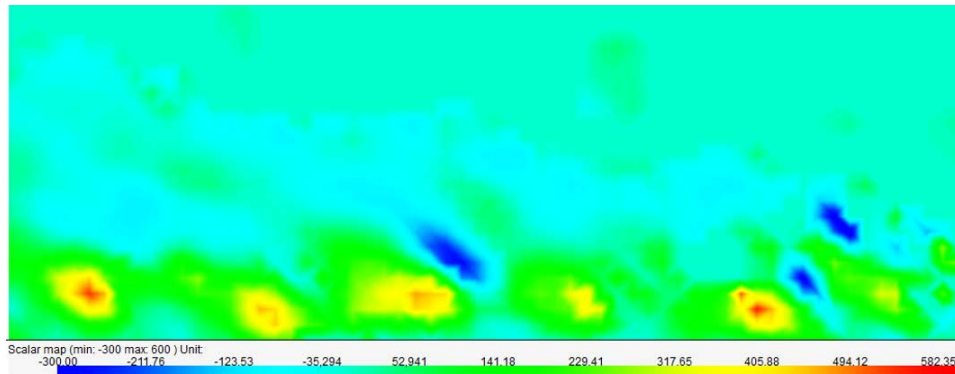
Şekil 6.12. *V Hız Bileşeni Kontur Haritası ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)*

Şekil 6.13.'te hız büyüklükleri (şiddet, length) görülmektedir. $\dot{m}=0.24$ kg/dak debi değerinde ana akışa hâkim olan jetlerin oluşturduğu hız sınır tabaka içerisinde ortalama hızı 2 m/s civarında iken jet çıkış çekirdeklerinde ani çıkış hız değerleri biraz daha yüksektir. Şekilde açık mavi bölgelerin arasında kalan koyu mavi bölgeler resirkülasyon baloncuklarının yol açtığı iz bölgelerini gösterir.



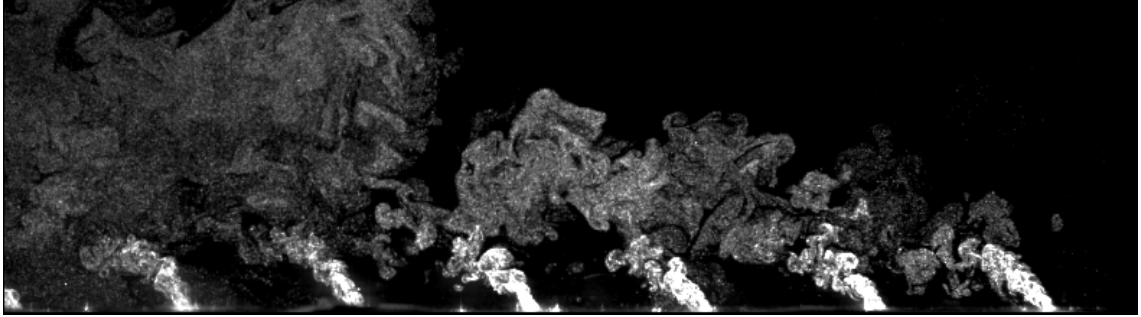
Şekil 6.13. Efüzyon Jet Çıkış Hız Şiddet Konturleri($\dot{m}=0.24$ kg/dak)

Şekil 6.14.'te akış alanına ait girdaplılık (vortisite) konturleri görülmektedir. Şekilde koyu mavi bölge ile gösterilen bölgelerde jet çıkışlarında hızlı bir türbülans yoğunluğu ve girdaplılık alanı oluşurken jetleri takip eden sarı bölgelerde ise resirkülasyon bölgelerine ait ters akışlardan kaynaklı oluşan vorteks hücreleri görülmektedir. Kontur çizgileriyle verilen vorteks hücrelerinde saat yönünde (CW) oluşan mavi renkli vortisiteler negatif saat tersi yönde (CCW) oluşan sarı kırmızı renkli vortisteler ise pozitif işaretlidir



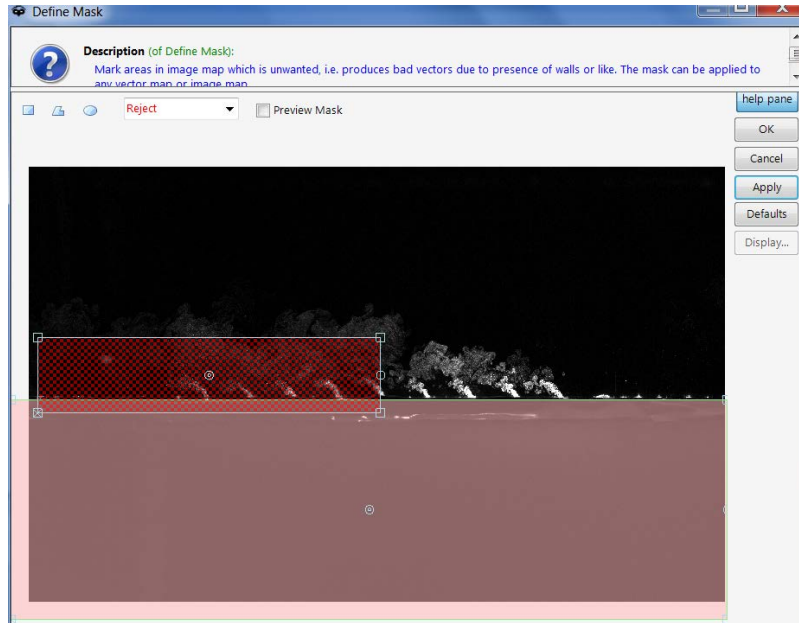
Şekil 6.14. Girdaplılık Haritası ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)

$\dot{m}=0.72$ kg/dak debi değeri için tohumlayıcı plenumdan efüzyon jetlerine gönderildiğinde PIV'den alınan ham imaj Şekil 6.15.'te görülmektedir.



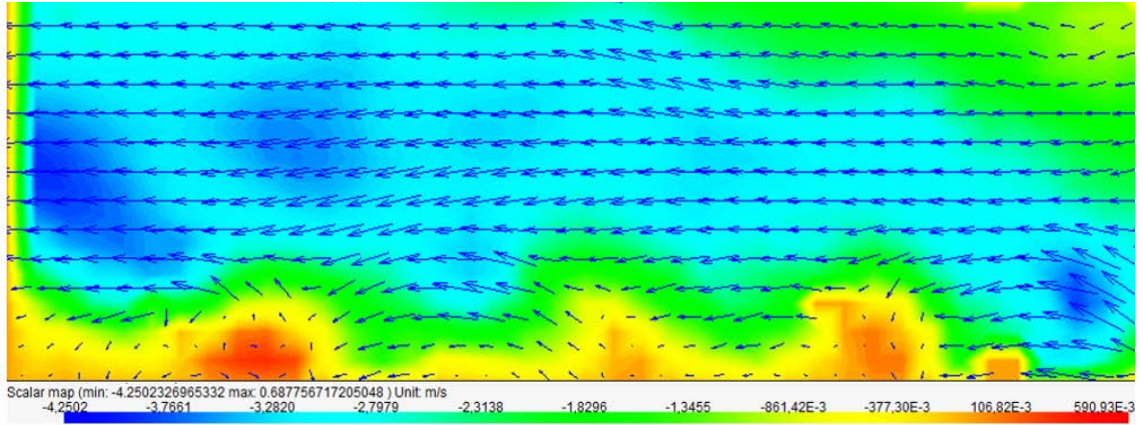
Şekil 6.15. Efüzyon Jet Çıkışları PIV Ham İmaj ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)

Şekil 6.16.'da Dynamic Studio paket programına ait imaj maskeleme ara yüzü görülmektedir. Kameranın görüş alanında akışın olmadığı alanlara (duvarlar, dış ortam), tohumlayıcının yetersiz kaldığı alanlara ya da testler sırasında alınan kötü imajların kısmi bölümlerine maskeleme uygulanır. Maskeleme sayesinde akışın olmadığı alanlarda ya da tohumlayıcının yetersiz olduğu yerlerde programın rasgele ve bozuk vektörler atanmasının önüne geçilir. Maskeleme sayesinde akışın olmadığı alanlarda programın sonuç haritalarını çıkarmak için ekstra işlemci gücü harcamasını önleyerek zamandan ve işlemci gücünden tasarruf sağlar.



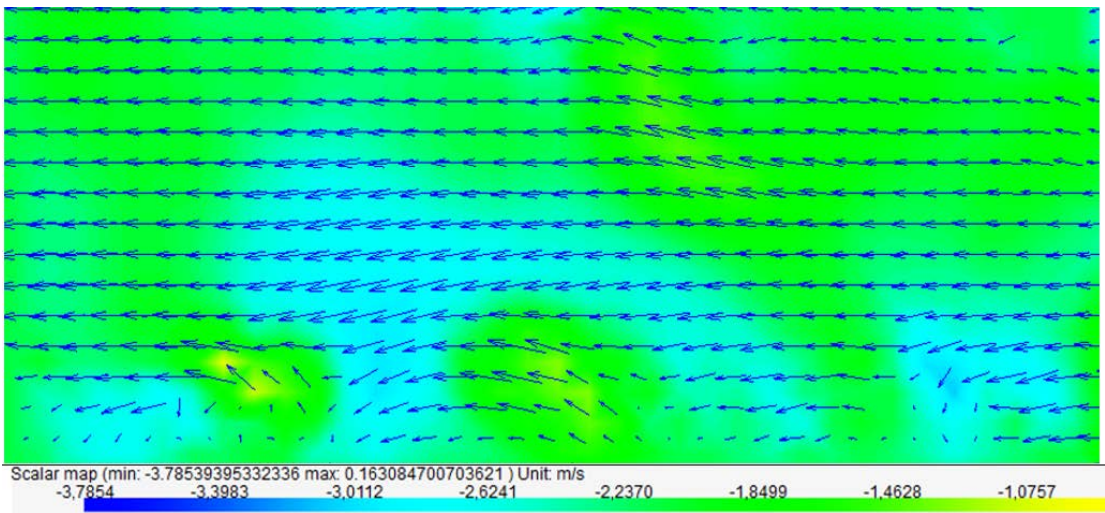
Şekil 6.16. Dynamic Studio ile İmaj Maskeleme

Şekil 6.17.'de x yönünde hız bileşeni olan u hız bileşenine ait konturler hız vektörleriyle birlikte verilmiştir. Jetleri takip eden alt bölgelerdeki turuncu bölgeler akışı takip eden ve komşu jetlerin orta kısmında kalan ters akışların olduğu ve akış vektörlerinin sapma yaparak oluşturduğu resirkülasyon bölgelerini temsil etmektedir. Buralarda hem akış vektör şiddetleri düşer hem de küçük vorteks hücreleri oluşur.



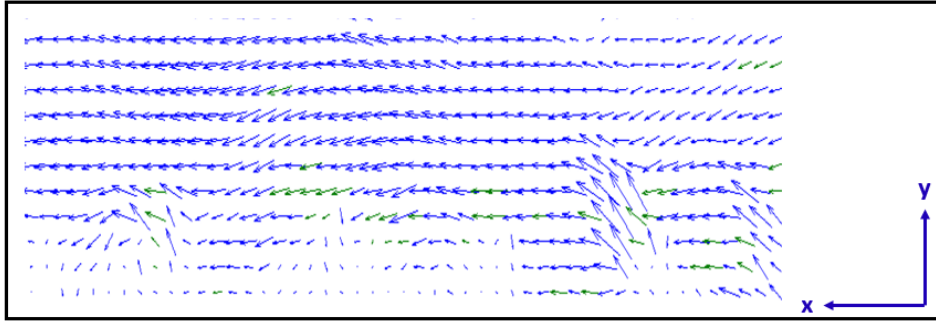
Şekil 6.17. U Hız Bileşenine Ait Konturler ve Hız Vektörleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)

Şekil 6.18.'de y yönünde hız bileşeni olan v hız bileşenine ait konturler hız vektörleriyle birlikte görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere açık mavi bölgelerde akış aşağı yönde ($-v$) hareket ederken yeşil bölgelerde akış yukarı yönde ($+v$) hareket etmektedir. Jetler delik çıkışlarında başta akış yukarı hareket ederken ana akımla karşılaştıktan sonra jetler akış yukarı aşağı yönde hareket edebilir.



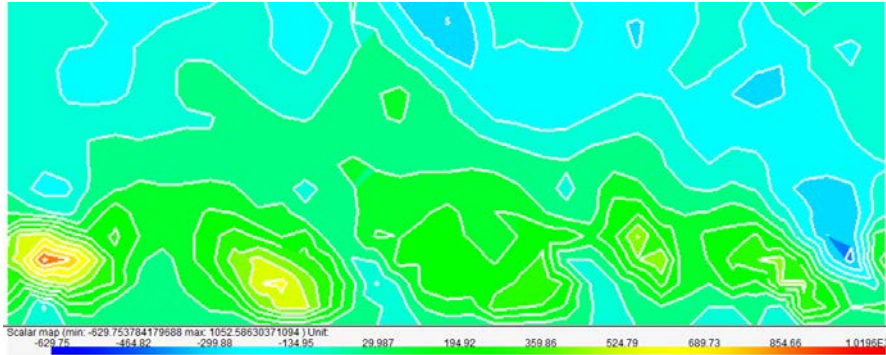
Şekil 6.18. V Hız Bileşenine Ait Konturler ve Hız Vektörleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)

Dynamic studio yazılımında yer alan Adaptif PIV yöntemi özellikle hızların çok çabuk değiştiği uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 6.19'da görülen yeşil renkli oklar akışa ait Adaptif PIV yönteminin çıkarttığı ek validasyon vektörleridir. Bu vektörler düşük sinyal/gürültü oranlarında akışın alt bölgelerde zayıf korelasyonlar oluşturduğu Adaptif PIV yöntemi üst üste bindirme yöntemiyle bu vektörler de iyileşme yaparak akış alanına yeşil vektörlerle kazandırır. Adaptif PIV'den alınan vektörler, vektör istatistiği yöntemiyle x eksenini ve y ekseninde U , U_{piksel} , U_{RMS} , V , V_{piksel} , V_{RMS} ve vektör şiddeti (length) değişik ölçekler için hız haritaları çıkarılabilir. Şekil 6.19.'da Adaptif PIV yöntemiyle alınan bir hız alanında iyileştirme vektörlerinin gösterimi yeşil renkli vektörlerle yapılmıştır.



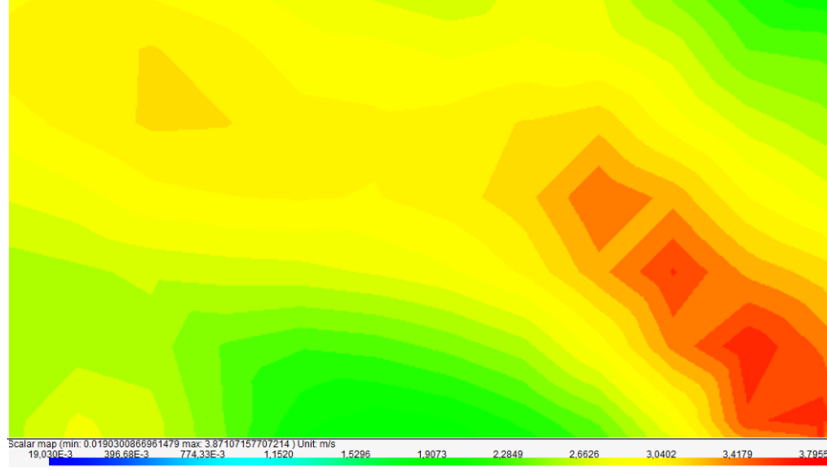
Şekil 6.19. Adaptif PIV Doğrulama Ek Vektörleri

Şekil 6.20.'de akış alanına ait girdaplılık (vortisite) konturleri görülmektedir. Şekilde turuncu bölge ile gösterilen bölgelerde jet çıkışlarında hızlı bir türbülans yoğunluğu oluşurken jetleri takip eden açık mavi bölgelerde ise resirkülasyon bölgelerine ait vorteks hücreleri kontur çizgileriyle beraber verilmiştir. saat yönünde (CW) oluşan vortisiteler negatif saat tersi yönde (CCW) oluşan vortisiteler ise pozitif işaretlidir.



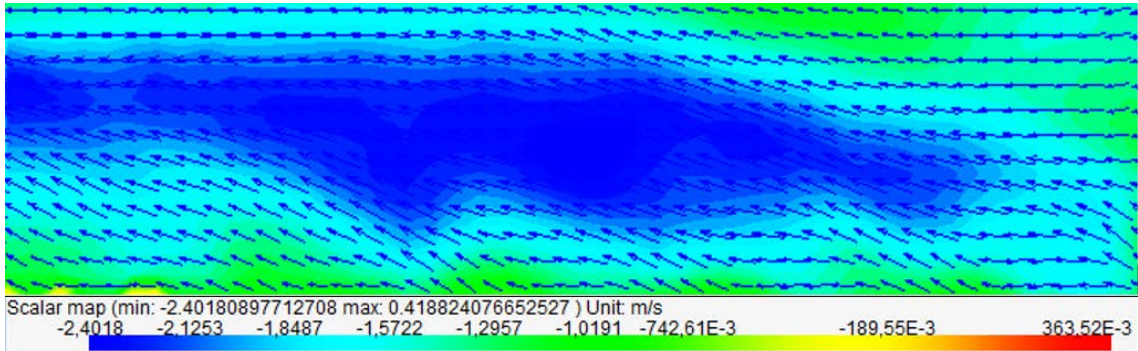
Şekil 6.20. Girdaplılık (Vortisite) Konturleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)

Şekil 6.21.'de $\dot{m}=0.48$ kg/dak debisinde bir soğutma deliği çıkışında jete ait hız şiddetleri verilmiştir. Jet yaklaşık 4 m/s değerinde bir hızla akış yukarı çıkıp 2 m/s değerindeki ana akımla karşılaşır. Zıt yönlü dönen girdap çiftleri jet ana akım karışımı sağlar. İz bölgesinde sarı renkle gösterilen bölge ise yaklaşık 4 m/s değerlerindedir. Jeti takip eden yeşil iz bölgesinde göreceli düşük hızlar okunmaktadır.



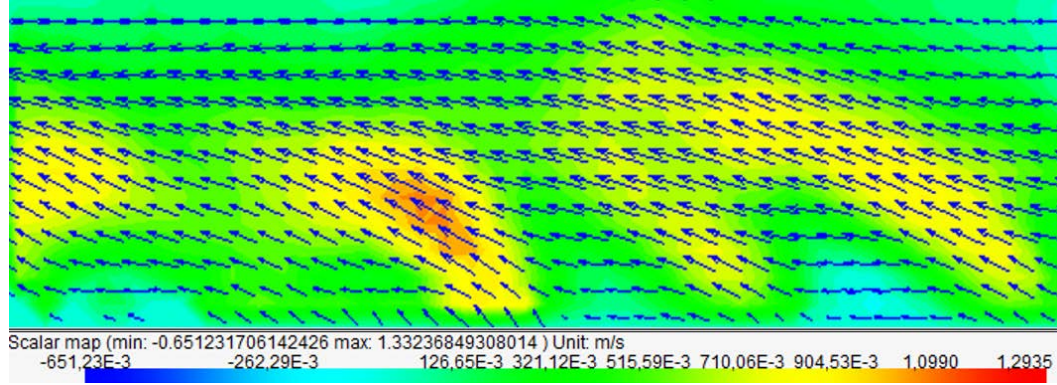
Şekil 6.21. Soğutma Jeti Hız Şiddetleri ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)

Şekil 6.22.'de x yönünde hız bileşeni olan u hız bileşenine ait konturler hız vektörleriyle birlikte verilmiştir. Jetleri takip eden alt bölgelerdeki açık yeşil bölgeler resirkülasyon bölgelerini temsil ederken açık mavi bölgeler de CRVP etkisinden kaynaklı oluşan karışım hız bölgelerine ait u bileşen hızlarını verir. U hız bileşeni CRVP ekseninde (koyu mavi bölgeler) süperpozisyon etkisiyle de x yönünde zamana bağlı düzenli bir akış yapısı sağlar.



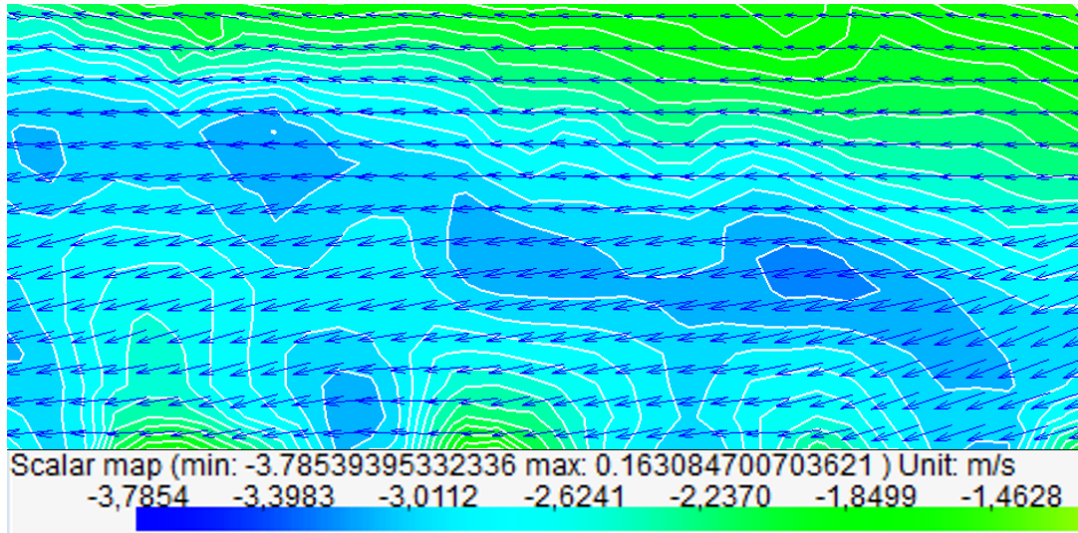
Şekil 6.22. U Hız Bileşenine Ait Konturler ve Vektörler ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)

Şekil 6.23.'te y yönünde hız bileşeni olan v hız bileşenine ait konturler hız vektörleriyle birlikte verilmiştir. Duvara yakın açık mavi bölgede resirkülasyona bağlı akış aşağı yapı etkisi gösterirken Jet çıkışlarında sarı-turuncu bölgede jet akış yukarı mekanizmasının etkisiyle akış yukarı akış yapısı gözlemlenmektedir.



Şekil 6.23. V Hız Bileşenine Ait Konturler ve Vektörler ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)

Şekil 6.24.'te x yönünde hız bileşeni olan u hız bileşenine ait konturler hız vektörleriyle birlikte verilmiştir. Jetleri takip eden alt bölgelerdeki açık yeşil bölgeler U hız bileşeni CRVP ekseninde ve delik jet çıkışındaki (koyu mavi bölgeler) komşu jetlerin etkileşimleri ile de x yönünde hız konturleri oluşmasına yol açmıştır.



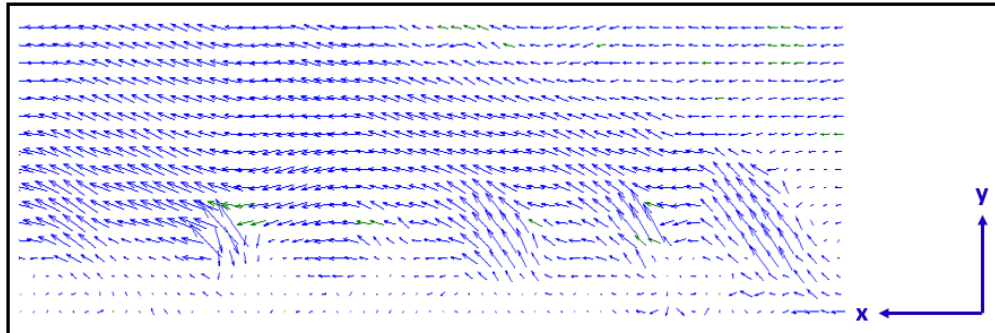
Şekil 6.24. U Hız Bileşenine Ait Konturler ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)

Belirli debilerde dinlenme odasına gönderilmiş tohumlayıcı DOT olarak ana akıma gönderilmiş tohumlayıcılar ise AAT olarak kısaltılmıştır. Şekil 6.25.'te $\dot{m}=0.48$ kg/dak debisinde ana akıma gönderilmiş tohumlayıcılar için PIV ile alınmış ham imaj görülmektedir. Bundan sonraki efüzyon plakası debilerinde tüm vektör ve analizler ana akıma gönderilmiş tohumlayıcılar için alınmıştır.



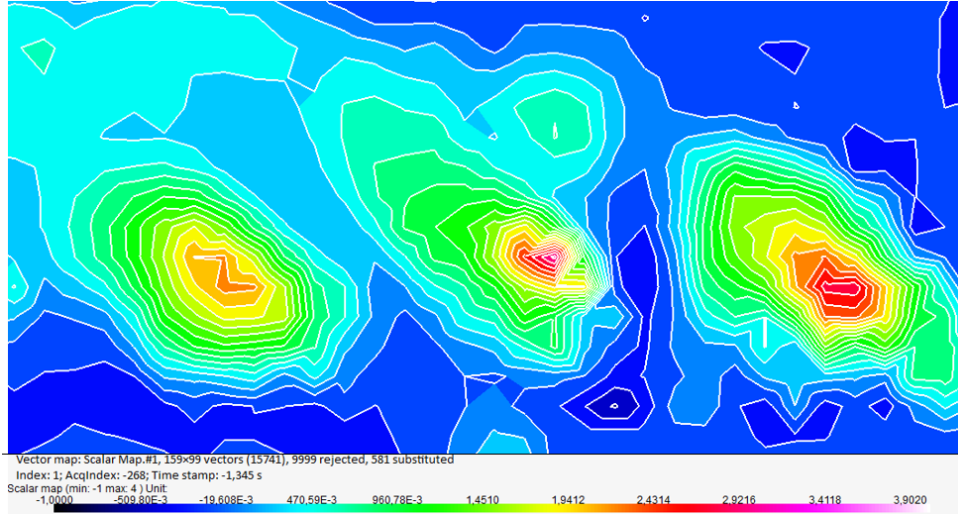
Şekil 6.25. Ana Akıma Gönderilmiş Tohumlayıcı ($\dot{m}=0.48$ kg/dak, AAT)

Adatif PIV'den alınan vektörler, vektör istatistiği yöntemiyle x eksenini ve y ekseninde değişik ölçekler için hız haritaları çıkarılabilir. Ana akıma gönderilmiş tohumlayıcılar için jet deliklerinde az tohumlayıcı olduğundan PIV, tohumlayıcı parçacıkların takibini yapamayacaktır. Dynamic Studio yazılımı bu bölgelere yeşil renkli vektör haritaları atayarak akışın düzgün şekilde analiz edilmesine olanak sağlar. Şekil 6.26.'da ana akıma gönderilmiş tohumlayıcılar için Adaptif PIV yöntemiyle alınan bir hız alanında iyileştirme vektörlerinin gösterimi verilmiştir.



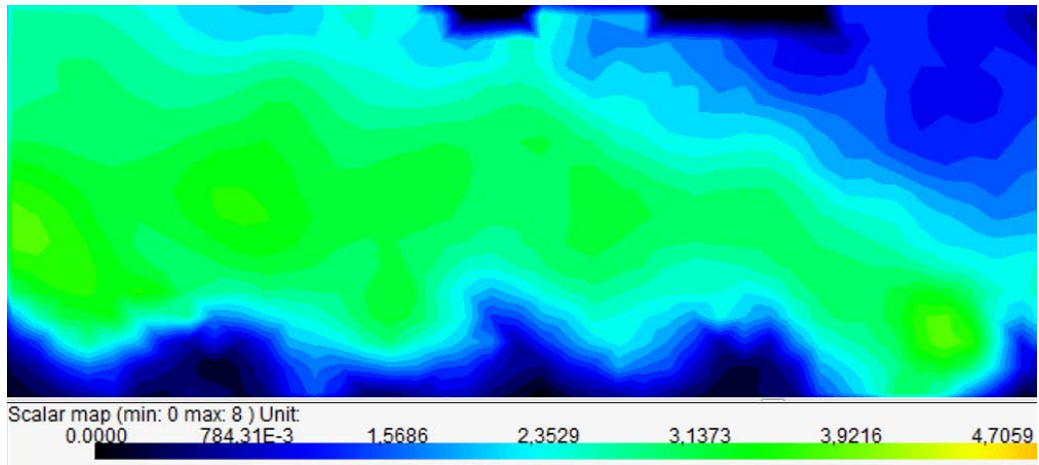
Şekil 6.26. Hız Vektörleri($\dot{m}=0.48$ kg/dak, AAT)

$\dot{m}=0.48$ kg/dak debisinde v hız bileşenine ait konturleri (AAT) gökkuşağı dışı bir renk ölçeği olan renk küpü (colorcube) renk ölçeği konturleriyle birlikte Şekil 6.27.'de verilmiştir. Bu debi değerinde jet çıkış hızının yaklaşık 4 m/s değerlerinde iken V hız değeri yaklaşık 3 m/s değerlerinde seyreder. Tünel boyunca yükseklik arttığında V hız değeri 1.5 m/s değerlerine kadar düşer.



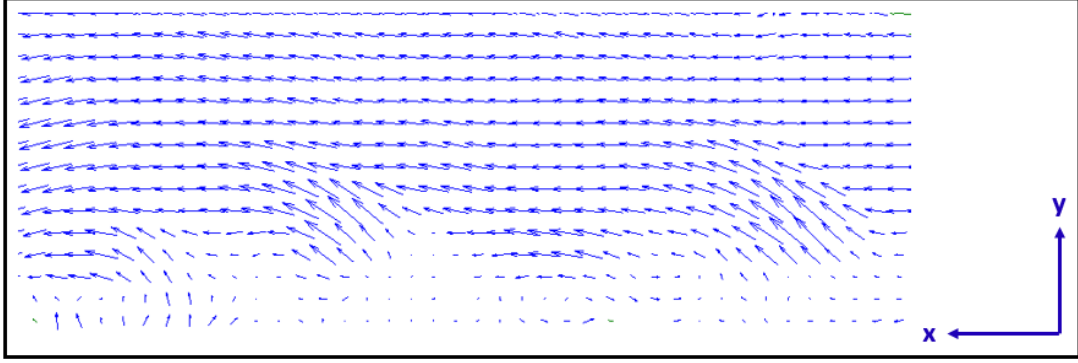
Şekil 6.27. V Hız Bileşeni ($\dot{m}=0.48$ kg/dak, AAT)

$\dot{m}=0.48$ kg/dak hız şiddet konturleri Şekil 6.28.'de verilmiştir. Bu debi değerinde jet çıkış hızının yaklaşık 4 m/s olduğu söylenebilir. Yine jetleri takip eden koyu mavi bölgelerde resirkülasyon baloncukları olduğundan hız şiddet konturleri renk skalasından takip edilebilir.



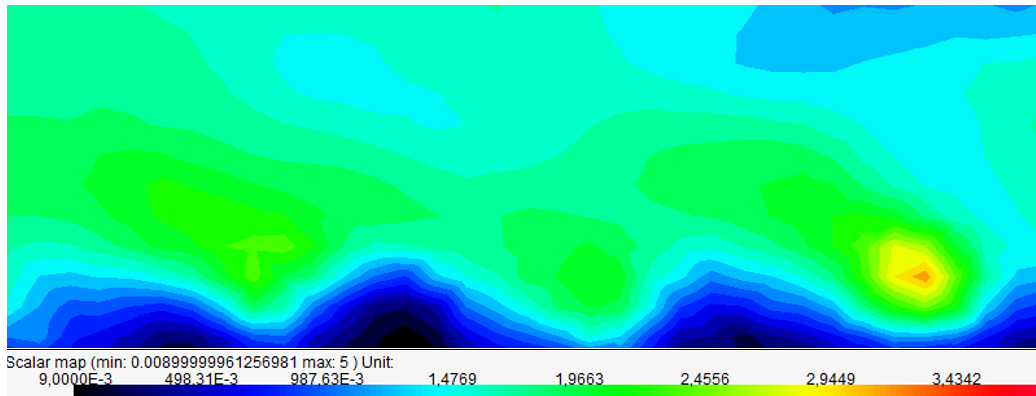
Şekil 6.28. Hız Şiddet Konturleri ($\dot{m}=0.48$ kg/dak, AAT)

Adaptif PIV’de işlenmiş ve vektör istatistiği yardımıyla karekök hız değerleriyle oluşturulan x eksenini U ve y eksenini U_{RMS} değerleri olan hız vektörü aşağıda Şekil 6.29.’da verilmiştir. Böylelikle vektörlerin aşağı doğru olduğu bölgelerde yani akış aşağı bölgelerde resirkülasyon baloncucu olduğu söylenebilir.



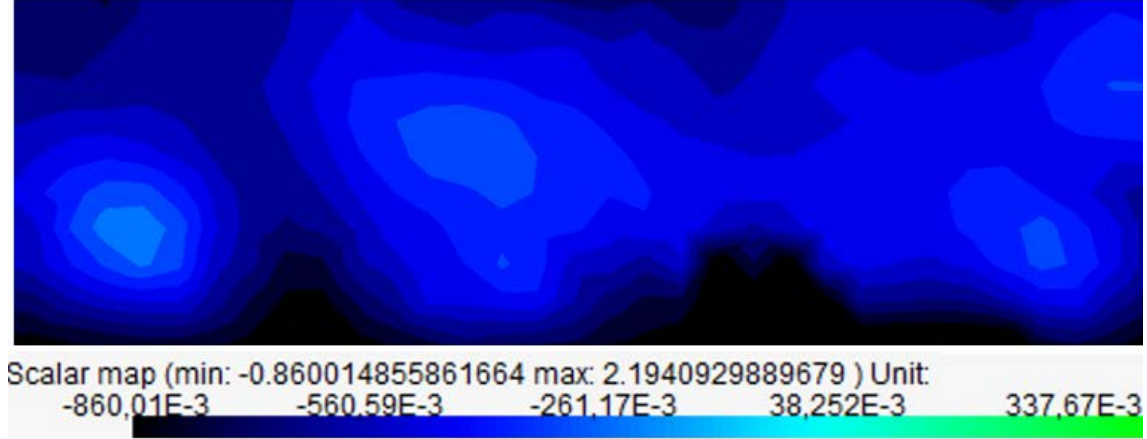
Şekil 6.29. U/U_{RMS} Hız Vektörleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, AAT)

Ana akıma gönderilen tohumlayıcıya $\dot{m}=0.24$ kg/dak efüzyon üfleme debi değerinde oluşan hız şiddetleri Şekil 6.30.’da verilmiştir. Jet çıkışlarında jet şiddetleri yüksek iken jeti takip eden bölgede oluşan resirkülasyon bölgeleri yüzünden vektör şiddetleri sıfıra yakın değerlerde çıkmıştır. Ayrıca jet ile ana akım karşılaştığında jetin hız kestiğini ve aksenal yönde yayılım gösterdiği söylenilebilir. Hız şiddet konturlerinden çıkarılabilecek bir diğer çıkarım ise jet çıkışlarında üniform değerlerin oluşmadığıdır. Bu düzensizlik; delik kanalındaki pürüzlülük etkisiyle, tohumlayıcı dağılımıyla ya da jet çıkışında pleksiglass malzemeye delinen delik çaplarının değişkenliği (delme hassasiyet payı) ile ilgili olabilir.



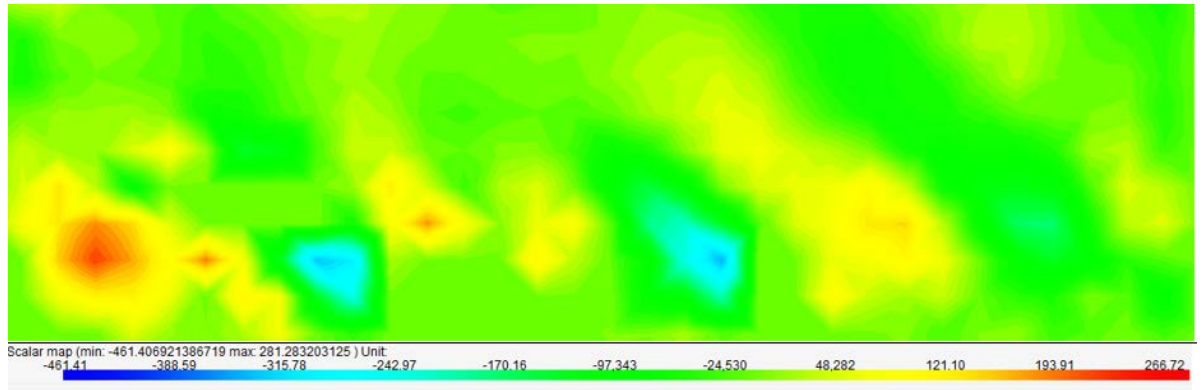
Şekil 6.30. Hız Şiddetleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, AAT)

Şekil 6.31.'de $\dot{m}=0.24$ kg/dak debisinde y yönünde duvara çok yakın bölgelerdeki yükselti ($y=0.1$ mm) için V hız bileşen değişimi konturleri verilmiştir. Burada koyu mavi bölgelerde resirkülasyona bağlı akış aşağı hareket ve açık mavi olan bölgelerde ise jet çıkışına bağlı akış yukarı jet yapısı olduğu söylenilebilir.



Şekil 6.31. V Hız Değişimi Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, AAT)

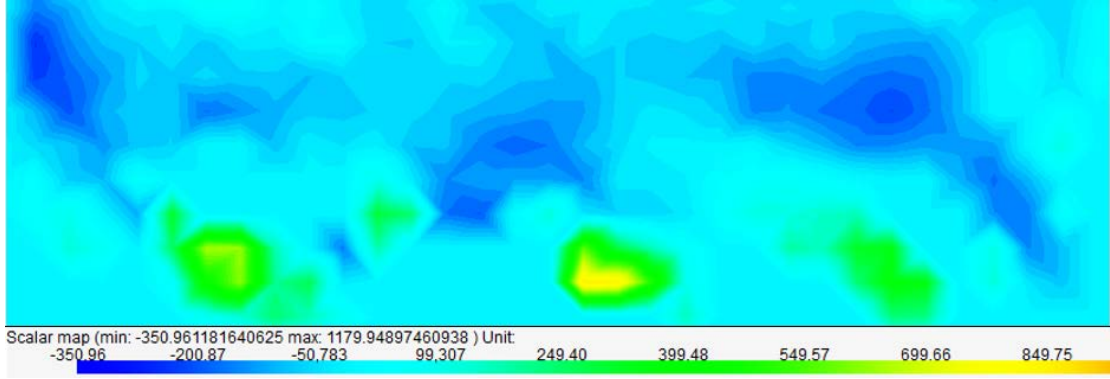
Dv/Dx hız türev konturleri Şekil 6.32.'de verilmiştir. Resirkülasyona bağlı açık mavi olan bölgelerde akış aşağı hareket gözlenirken ve ise jet çıkışına bağlı sarı turuncu bölgelerde ise akış yukarı jet yapısı olduğu söylenilebilir.



Şekil 6.32. Dv/Dx Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, AAT)

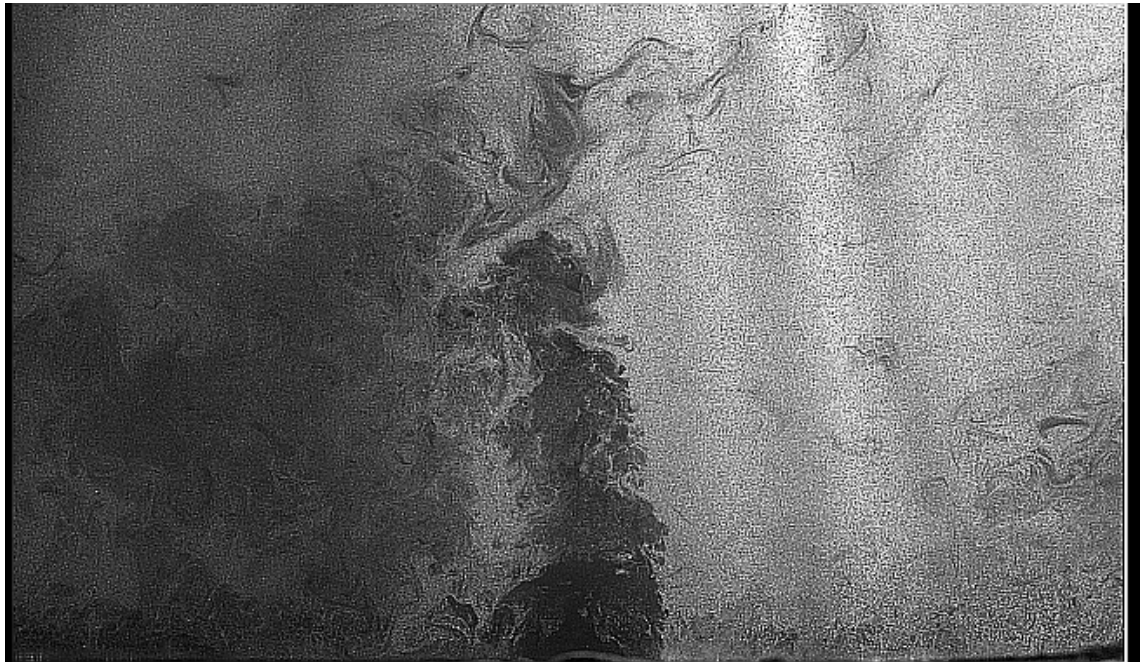
Diverjans, vektör hesaplamasında, her noktada bir vektör alanı kaynağının sapma, miktarını veren vektör operatörüdür. Diverjans (vektörel sapma) belirli bir noktanın etrafındaki sonsuz küçük hacimden vektör alanının dışı olan akısının akış yoğunluğunu temsil eder. Diverjans akış vektör alanını genliğinin yani akış vektörlerinin alandan uzaksayıp yakınsadığı hakkında fikir verir. Şekil 6.33.'te $m=0.24$ kg/dak debi ile üflenilen

efüzyon plakada diverjans konturleri verilmiştir. Koyu yeşil bölgeler pozitif diverjansa sahip olup akış vektörlerinin bu kaynaktan yayıldığı anlamına gelir. Koyu mavi bölgeler ise zıt yönlü dönen girdap çiftlerinin akışı belirli bir kaynaktan toplamaya çalıştığı söylenebilir.



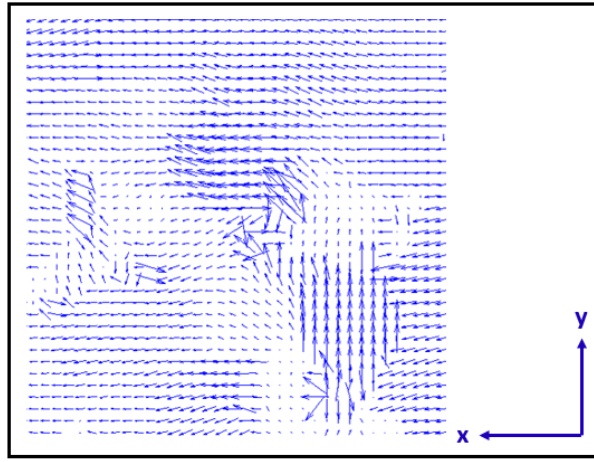
Şekil 6.33. Diverjans Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak, AAT)

Şekil 6.34.'te $\dot{m}=0.48$ kg/dak debisinde ana akıma gönderilmiş tohumlayıcılar için PIV ile alınmış ham imaj görülmektedir. Dilüsyon jetinin ana akıma gönderilmiş tohumlayıcıların önünü nasıl kestiği ve arkasında nasıl bir iz bölgesi oluşturduğu ham şekilden de yorumlanabilir. Sonraki işlemlerde tüm vektör ve analizler ana akıma gönderilmiş tohumlayıcılar (AAT) için alınmıştır.



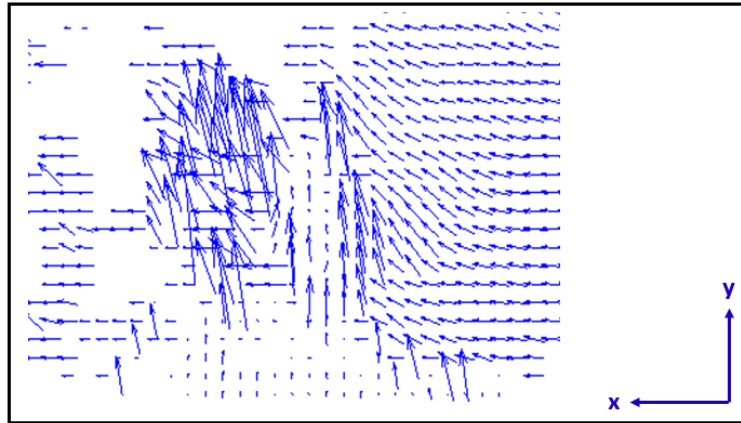
Şekil 6.34. Dilüsyon Deliği Çıkış Jeti ($\dot{m}=1.05$ kg/dak, AAT)

Şekil 6.35.'te $\dot{m}=1.05$ kg/dak dilüsyon jet vektörleri görülmektedir. Vektör görünümünden anlaşılacağı üzere jet çıkışında akış tamamen baskınken jeti takip eden bölgede yay şeklinde bir resirkülasyon bölgesi olduğundan ok şiddetleri küçülür. Jetin uç bölgesinde jet ana akımla karşılaşan jetlerin bir kısmı akış aşağı yönde hareket eder. Yine jetin ana akımla karşılaştığı bölgenin gerisinde (dilüsyon jetinin sağında) ekstra bir resirkülasyon bölgesi oluşmuştur. Dilüsyon jetinin çıkış bölgesinde at nalı girdapları oluştuğundan vektör haritasında vektörel bir boşluk oluşmuştur.



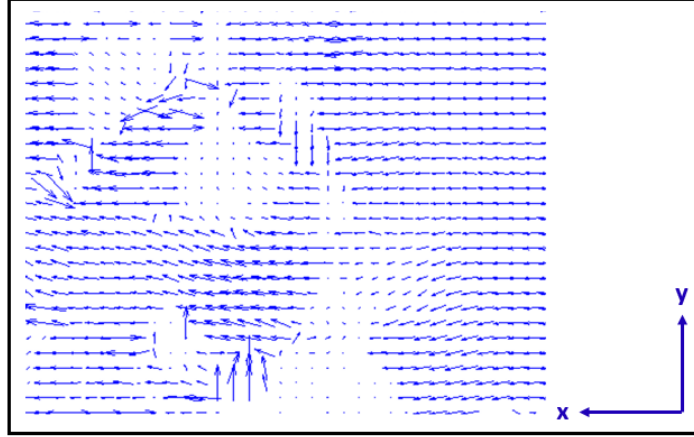
Şekil 6.35. Dilüsyon Jet Vektörleri ($\dot{m}=1.05$ kg/dak, AAT)

Dilüsyon vektör haritalarına değişik debiler için vektör istatistiği uygulanıp U/U_{RMS} ve V/V_{RMS} vektör haritaları elde edilmiştir. Şekil 6.36.'da dilüsyon jet çıkışında V/V_{RMS} vektör haritası verilmiş olup boşluklu bölgeler resirkülasyon ve akış aşağı oluşan bölgeleri gösterir.



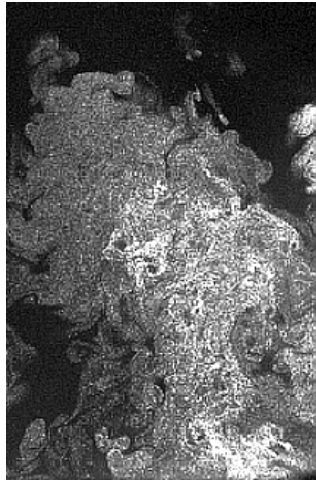
Şekil 6.36. Dilüsyon V/V_{RMS} Jet Vektörleri ($\dot{m}=0.69$ kg/dak, AAT)

Şekil 6.37.'de $\dot{m}=0.69$ kg/dak debi değeri için vektör istatistiği uygulanıp U/U_{RMS} haritası elde edilmiştir. U hızı sadece ters akışlarda yön değiştireceğinden en üstte görülen ters vektörler CRVP etkisinin yol açtığı ters yönlü vektörlerdir. CRVP bölgesinin çekirdek yapısında ise resirkülasyon bölgeleri ters akışları tetiklemiştir. Jet çıkışın dip noktasının sağında at nalı girdapları aksel hızın düşmesini sağlamıştır.



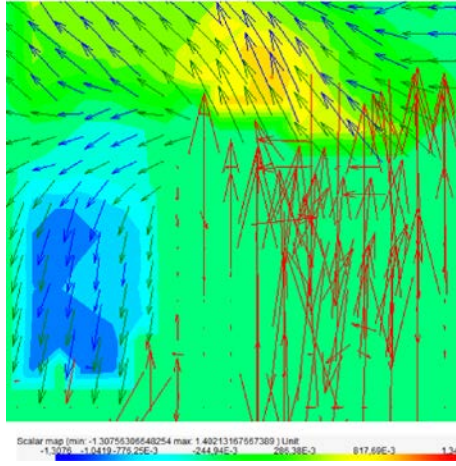
Şekil 6.37. Dilüsyon U/U_{RMS} Jet Vektörleri ($\dot{m}=0.69$ kg/dak, AAT)

Şekil 6.38.'de $\dot{m}=0.35$ kg/dak debisinde doğrudan dinlenme odasına gönderilmiş tohumlayıcılar için PIV ile alınmış ham imaj görülmektedir. Dinlenme odasına gönderilmiş tohumlayıcı tezde DOT olarak kısaltılmıştır. Ham imajdan jet gerisinde oluşan at nalı girdabı ve jeti takip eden bölgede görülen resirkülasyon bölgesinin takibi yapılabilir.



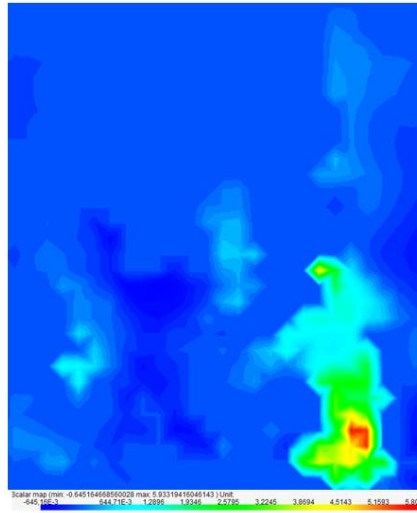
Şekil 6.38. Dilüsyon Çıkış Jeti Ham İmaj ($\dot{m}=0.35$ kg/dak, DAT)

Şekil 6.39.'da dinlenme odasına gönderilmiş tohumlayıcıdan alınan dilüsyon çıkış jetinin çapraz korelasyon analiziyle elde edilmiş bir vektör haritası verilmiştir. Vektör haritasından anlaşılacağı üzere ani hız değişimlerinde vektörleri yakalayan Adaptif PIV çoğu zaman çapraz korelasyon analiz yöntemine üstünlük sağlar. Vektör haritasının arka planında ise akış aşağı ve akış yukarı yönünde fikir veren Dv/dx hız türevinin konturleri gökkuşağı renk ölçeğinde verilmiştir.



Şekil 6.39. Dilüsyon Deliği Hız Vektörleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak, DAT)

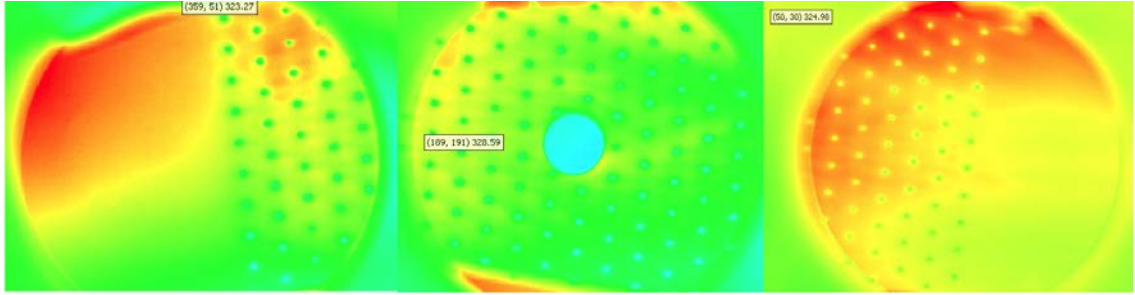
Şekil 6.40.'ta dinlenme odasına gönderilmiş tohumlayıcıdan alınan dilüsyon jetine ait V hız konturleri gökkuşağı renk ölçeğinde verilmiştir. Dilüsyon jeti 6 m/s değerinde tünele girerken yukarı çıkıp ana akımla karşılaştığından hız keser.



Şekil 6.40. Dilüsyon Deliği ve Hız Konturleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak, DAT)

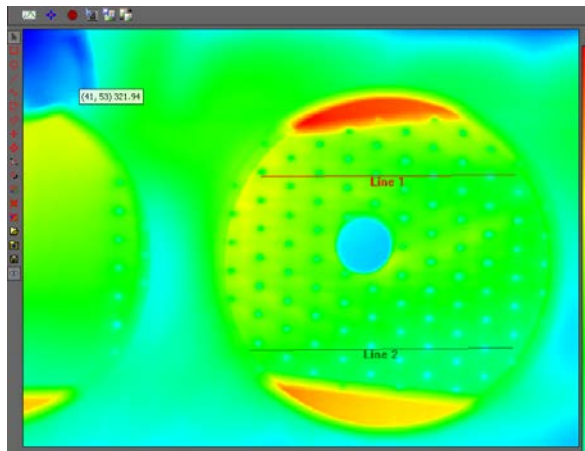
6.2. Termal Analizler ve Film Etkinlik Oranı Sonuçları

Testler sırasında ana akış sıcaklığı (T_{ms}) 77 °C (350 K), soğutucu sıcaklığı (T_c) ise 23 °C (296 K) olarak ayarlanmıştır. Film soğutma testleri sırasında yüzey sıcaklık dağılımları termal kamera kullanılarak deney düzeneğindeki üç farklı pencereden alınmış ve görüntüler veri işleme esnasında birleştirilmiştir. Üç pencereden alınan örnek bir görüntü Şekil 6.41.'de verilmiştir.



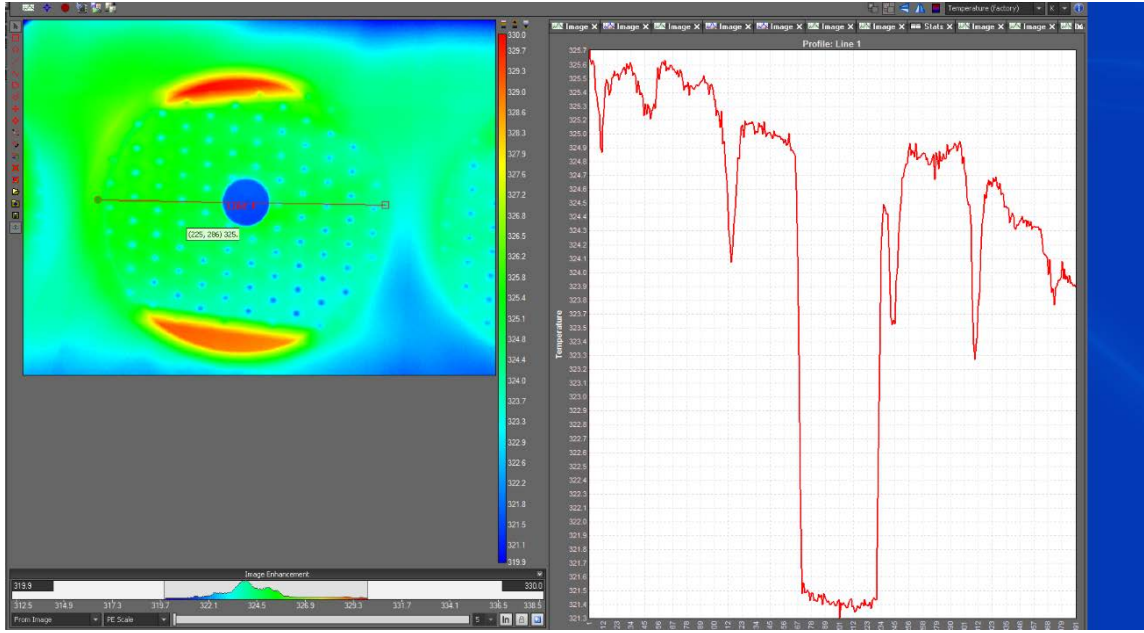
Şekil 6.41. Ham Sıcaklık Dağılımı ($\dot{m}=0.35$ kg/dak)

Her bir pencereden alınan sıcaklık dağılımları kullanılarak akış yönündeki ortalama soğutma etkinliği hesaplanmıştır. Hesaplamalarda her bir konum için görüntülerin orta bölgesinde tünel genişliğindeki 100 değer göz önünde bulundurulmuştur. Çizilen çizgiler sayesinde plaka yüzeyinden 100 farklı değer okunmuştur. Şekil 6. 41.'de üç farklı ölçüm penceresinden alınan test plakası yüzey sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Duvar etkilerini elimine etmek amacıyla akış yönündeki ortalama soğutma etkinliği Şekil 6.42.'de görülen duvardan uzak bölgeden alınmış düz çizgilerle yapılmıştır.



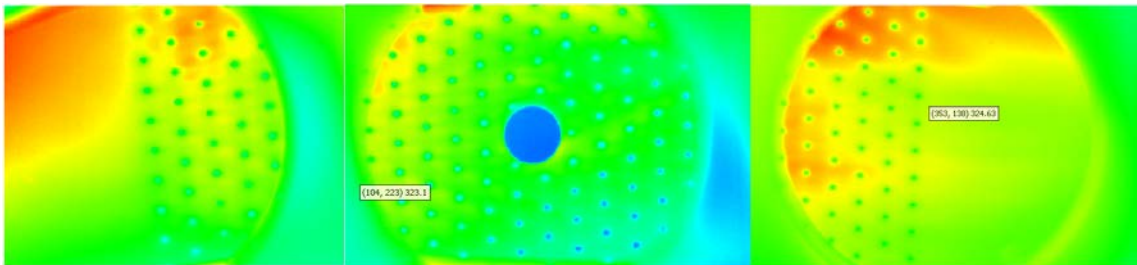
Şekil 6.42. Akış Yönünde Film Soğutma Etkinliği Dağılımı

Ayrıca IR pencereden alınan görüntülerin başlangıç ve bitiş bölgelerinde tekrarlanan (overlap) bölgelerde ölçüm takibi yapılmıştır. Bu sayede görüntüler birbirine rahatlıkla eşleştirilmiştir. Şekil 6.43.'te 326 K değerlerinde seyreden plaka efüzyon deliklerinde 324 K düzeylerine düşerken dilüsyon deliklerinde 320 K düzeylerine kadar düşmektedir.



Şekil 6.43. Research IR Sıcaklık Değişim Eğrisi ($\dot{m}=1.05$ kg/dak)

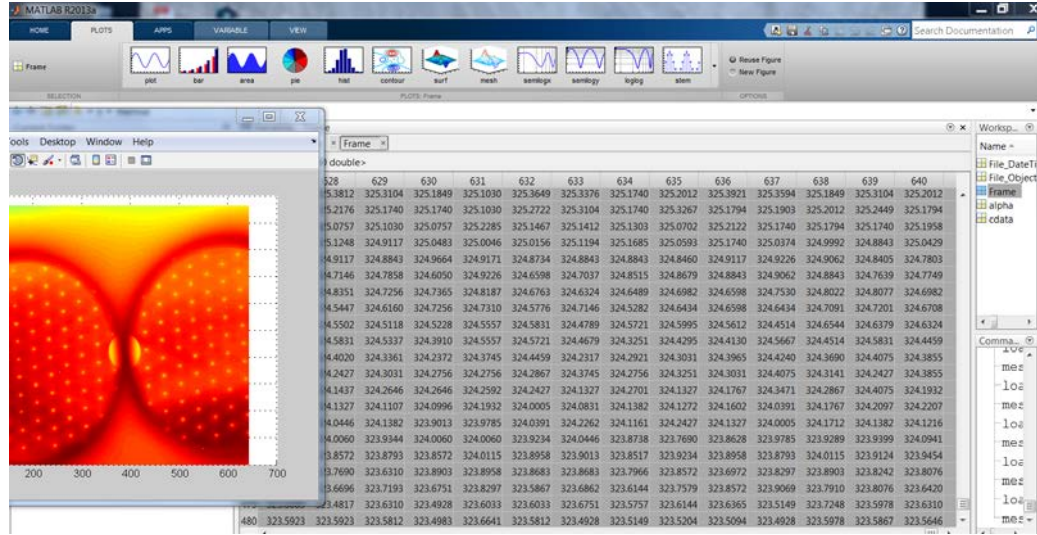
Şekil 6.44.'te 0.69 kg/dak soğutucu hava debisi için 3 farklı IR penceresinden alınmış akış yönündeki ortalama dilüsyon deliğinde oluşan film etkinliği değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Soğutma etkinliği ilk üç sıra delikten sonra düşmekte ve sonrasında son sıra deliklere kadar yükselerek maksimum değerini kazanmaktadır.



Şekil 6.44. Termal Kamera Ham İmajları ($\dot{m}=0.69$ kg/dak)

Şekil 6.44.'te üç farklı soğutucu debisine ait dilüsyon soğutma etkinlikleri gösterilmektedir. İlk üç sıra delikten sonra soğutma etkinliğinde ani bir düşüş ve

sonrasında yükseliş üç farklı soğutucu debisi için de gözlemlenmiştir. Soğutucu debisindeki artış soğutma etkinliğinde de artış sağlamış fakat bu artış debi oranlarından daha az gerçekleşmiştir. Şekil 6.45.'te Research IR programından export edilip Matlab ile import edilen termal imajın (640X480 Matris) Matlab'te işlenirken alınmış bir ekran alıntısı görülmektedir.

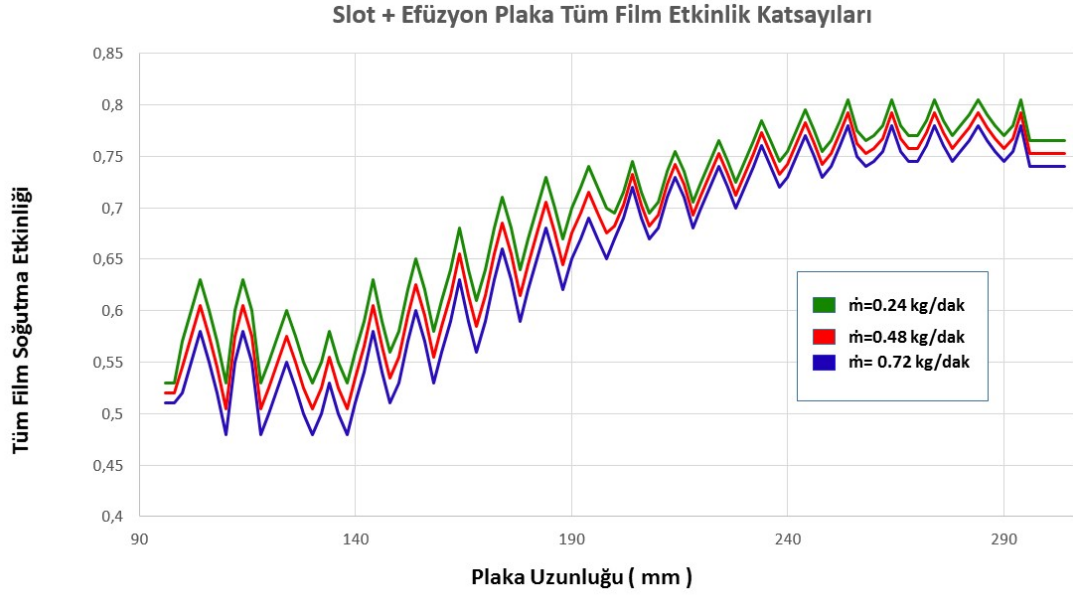


Şekil 6.45. Termal İmajların (640x480 Matris) Matlab ile İşlenmesi

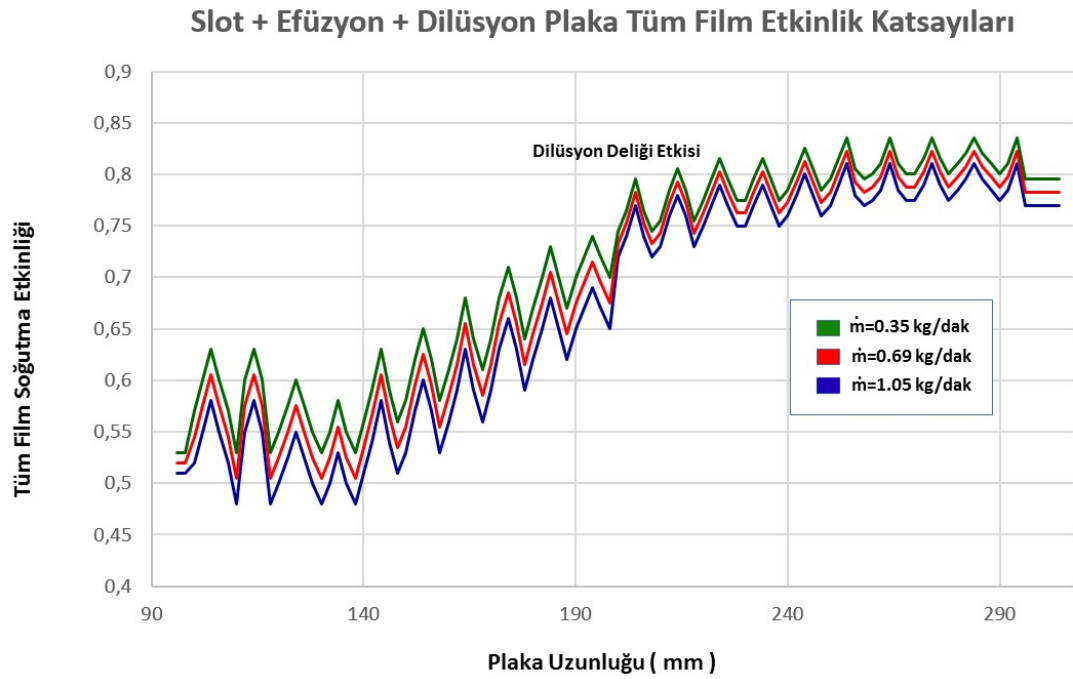
Yüzey sıcaklık dağılımları, yüzeye yakın bölgedeki ana akış sıcaklığı ve soğutucu akışkan sıcaklığı kullanılarak film soğutma etkinliği (film cooling effectiveness) değeri hesaplanmıştır. Hesaplamalar her kamera görüntüsü için ayrı ayrı yapılmıştır. Soğutma etkinliği her piksel için öncelikle hesaplanmış sonrasında ise akış yönünde sabit mesafede olan değerlerin ortalaması alınmıştır. Daha sonra ana sıcaklık 350 K ve soğutucu akışkan 296 K olmak kaydıyla alınan ortalama sıcaklık değerlerinden lokasyona bağlı olarak tüm film soğutma etkinliği hesaplanmıştır. Elde edilen soğutma etkinlik değerlerinin ortalaması alınarak farklı soğutma debileri için ortalama etkinlik değerinin nasıl değiştiği hesaplanmıştır. Efüzyon plakası için 0.24 kg/dak değerinde ve dilüsyon plakasında soğutucu akışkan debisinin 0.35 kg/dk olduğu durumlar için en ideal tim film soğutma etkinliğinin elde edilmiştir.

Slot, film ve dilüsyon hibrit plaka ölçümlerinde eksenel ısıl etkinlik oranları açısından bakıldığında en etkin üfleme oranları efüzyon plakası için 0.24 kg/dak, dilüsyon plakası için de 0.35 kg/dak üfleme oranlarına denk gelen test koşullarında oluşmuştur.

Şekil 6.46.'da efüzyon plaka ortalama soğutma etkinliği dağılımı ve Şekil 6.47.'de dilüsyon plaka ortalama soğutma etkinliği dağılımı verilmiştir.



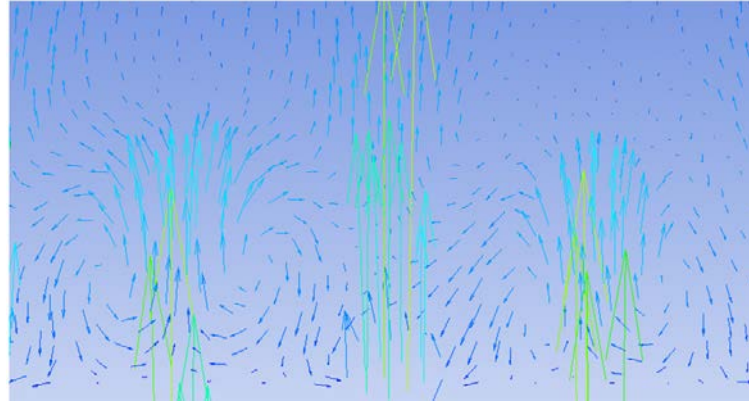
Şekil 6.46. Efüzyon Plaka Tüm Film Soğutma Etkinlik Değerleri



Şekil 6.47. Dilüsyon Plaka Tüm Film Soğutma Etkinlik Değerleri

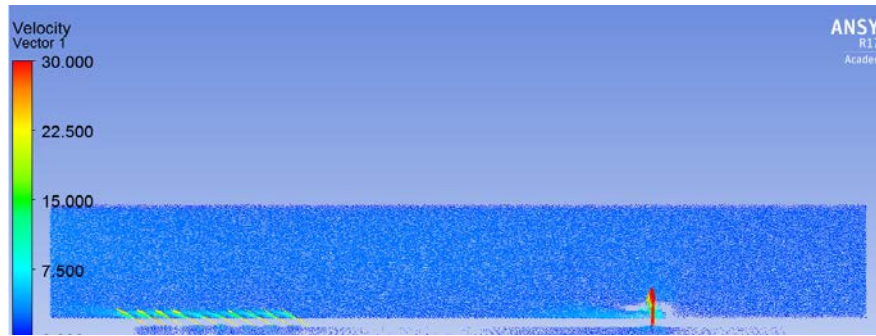
6.3. HAD Analizleri Sonuçları

Efüzyon plakasında ortadan alınan enine kesitte staggered dizili deliklerden çıkan jetler Şekil 6.48.'de görülmektedir. Altta dinlenme odası çıkışında üniform hız vektörleri görülürken çapraz akışta jet karışımında zıt yönlü dönen girdap çiftleri (CRVP) görülmektedir. CRVP'ler normal koşullarda soğutma delik jetiyle ana akım karşılaşması durumunda oluşur. Fakat mevcut yapıda komşu jetler ile etkileşimden kaynaklı resirkülasyon bölgeleri oluşur.



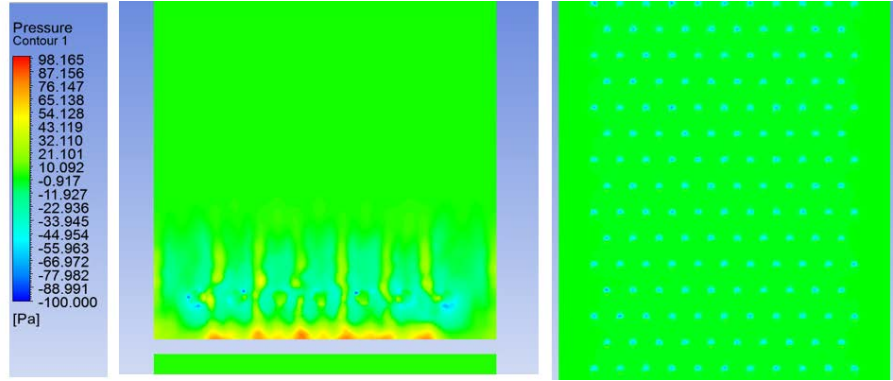
Şekil 6.48. Zıt Yönlü Dönen Girdap Çiftlerinin Görünümü

Akışa yandan baktığımızda sağ tarafta film soğutma deliklerinden giren jet hızlı bir şekilde film delikleri için oluşturulan slota çarparak slot üzerinde jet soğutma (impingement) etkisi yaratır ve çarpma etkisiyle de alt plakaya doğru yönelir. Sol tarafta ise efüzyon jetlerinin hız vektörleri görülmektedir. Burada birikme (süperpozisyon) etkisinden kaynaklı dolayı jetlerin soğutma plakasına etkisi giderek artmaktadır. $\dot{m}=0.24$ kg/dak için jet çarpması ve efüzyon jetlerinin gösterimi Şekil 6.49.'da verilmiştir.



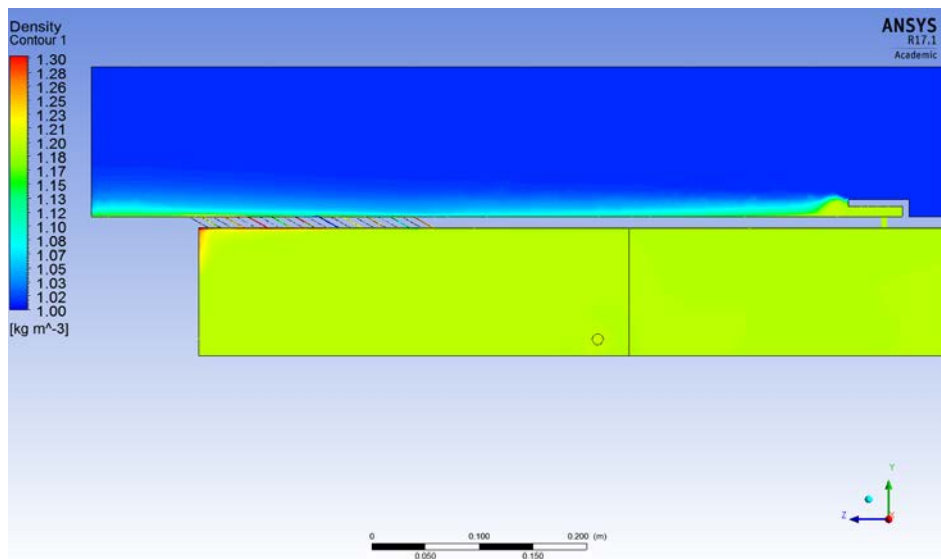
Şekil 6.49. Jet Çarpması ve Efüzyon Jetlerinin Gösterimi ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)

Slot film jet çıkışlarında anlık olarak statik basınçlar üniform olsa da çıkışta bu değer yaklaşık olarak 9 Pa civarındadır. Efüzyon plakasında statik basınç değerleri -25 Pa negatif değerlerdedir ve bu basınçlar plakada emme (suction) kenarı gibi davranır. Şekil 6.50.'de $\dot{m}=0.48$ kg/dak debide. plaka üzerindeki statik basınçların dağılımı verilmiştir.



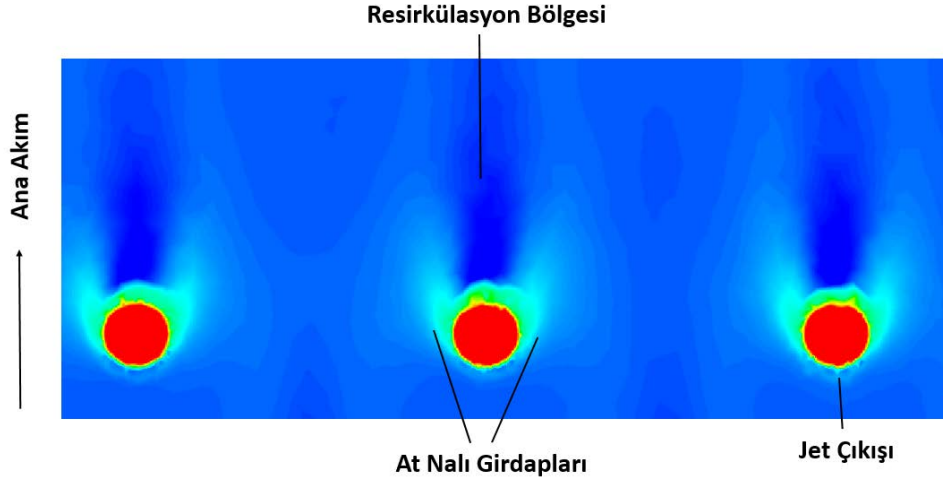
Şekil 6.50. Plaka Üzerindeki Statik Basınçların Dağılımı ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)

Kompresörden gelen plenum havası yaklaşık 1.18 kg/m^3 değerinde iken ana akımdan gelen yoğunluk değeri 1.008 kg/m^3 değerindedir. Basınç değişimleri çok küçük değerlerde olduğundan ve akışkan ideal gaz ($P=\rho RT$) olarak çözdürüldüğünden yoğunluk konturlarıyla sıcaklık konturları paralellik göstermektedir. Şekil 6.51.'de $\dot{m}=0.72$ kg/dak plenum ve tünelde yoğunluk dağılımları verilmiştir.



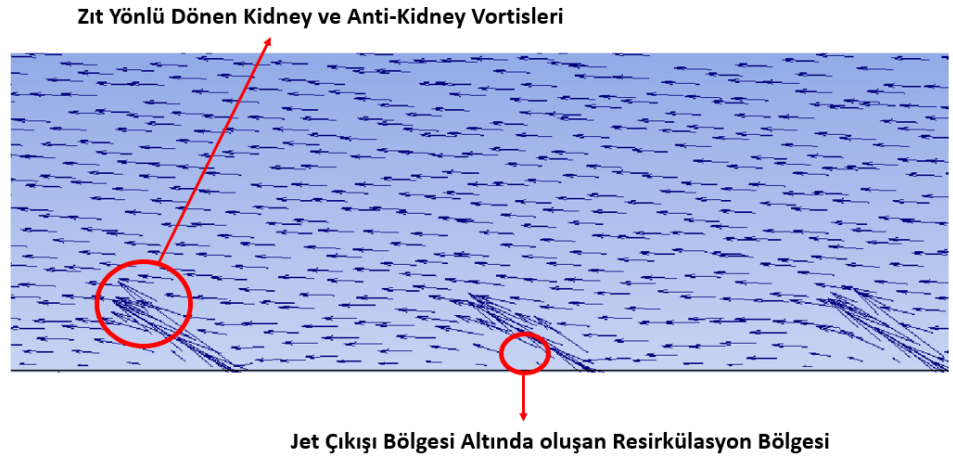
Şekil 6.51. Plenum ve Tünelde Yoğunluk Dağılımları ($\dot{m}=0.72$ kg/dak.)

Jet çapraz akış etkisinden dolayı jetlerin sağında ve solunda zıt dönen kidney vortisleri oluşur. Alt bölgede çapraz akış yapısına bağlı olarak at nalı girdapları görülmektedir. Çapraz akış yapısına bağlı olarak jet deliklerini takip eden bölge de resirkülasyon baloncuğu oluşur. Şekil 6.52.'de delik çıkışlarında dip noktadaki hız konturleri ve akış profili gösterilmiştir.



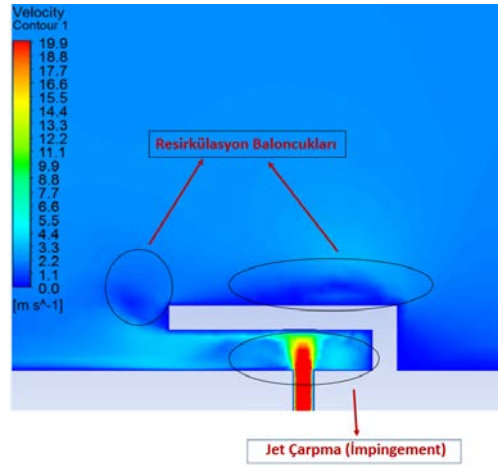
Şekil 6.52. Jet Çıkış Dip Noktadaki Akış Profili

Ana akışa yandan bakıldığından zıt yönlü dönen vorteks çiftlerini gözlemlemek imkânsızdır. Çift yönlü dönen vorteks çiftlerinin gözlemlenmesi için akışa kesit olarak bakmak gerekir. Yukardaki akış yapısına deneysel olarak bakılmış Parçacık Görüntüleme Velosimetri tekniği ile resirkülasyon bölgeleri ve jet kalkış etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 6.53.'te yan kesitten alınan hız vektörleri verilmiştir.



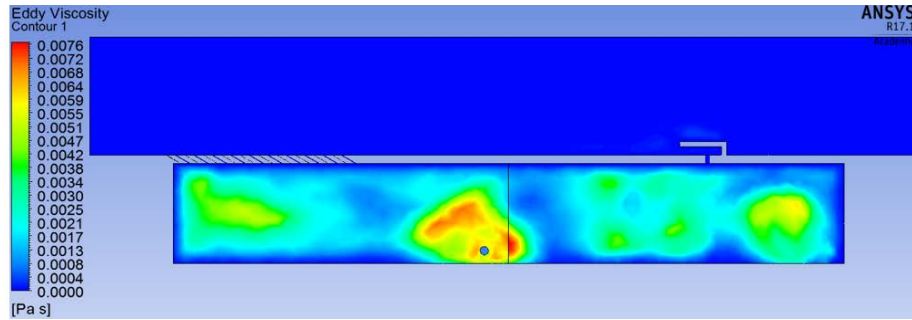
Şekil 6.53. Yan Kesit Hız Vektörleri

90 derecelik film deliklerinden çıkan jetler akış yukarı etki ile slot yuvasına çarparak slot yuva üzerinde çarpma (impingement) etkisi yaratarak slot yuvarının soğumasını da sağlar. Slot duvarına çarpan ana akım slot üzerinden resirkülasyon bölgesi oluşturur. Slot bitiminde ana akım jetleri aşağı doğru hareket eder. Ayrıca alttan gelen soğutucu hava jeti slot duvarına çarpıp film tabaka oluşumunu güçlendirici yönde duvara doğru yönelir. Şekil 6. 54.'te slot yuvası ve jet çıkış hız konturleri verilmiş ve akış yapısı gösterilmiştir.



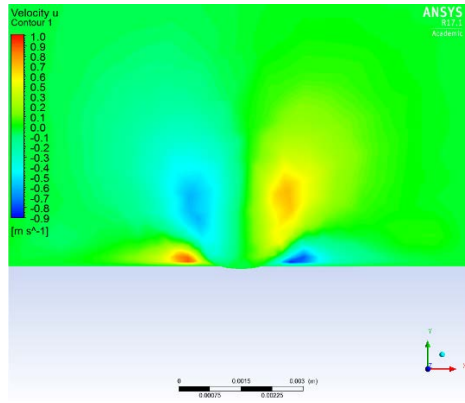
Şekil 6.54. Slot Yuvası Akış Karakteristikleri

Kompresörden gelen ve dinlenme odasına giren hava yüksek hızda girdiğinden jet çıkışlarına doğru hız değerlerinin uniform olması, ölçümlerin nümerik validasyonu için kaçınılmazdır. Şekil 6.55.'ten görüldüğü üzere dinlenme odasına yüksek girdaplı edillerde giren hava jet deliklerin yakın yerlerde durma derecesine gelir ve efüzyon deliklerine doğru tekrar hızlanır. Jetlere yakın bölgelere şişirme (inflation) ağ verildiğinden soğutma delik girişlerinde durma durumuna yakın uniform ve laminar bir akış elde edilmiştir.



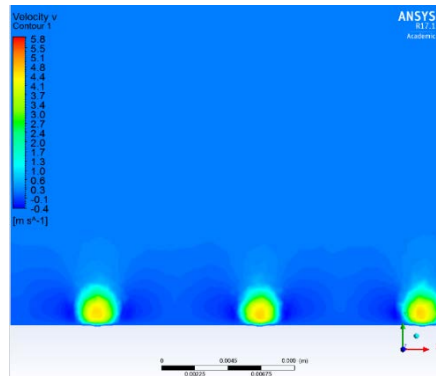
Şekil 6.55. Dinlenme Odası ve Delik Girişlerindeki Eddy Viskozite

Akış kesitinden alınan hız konturlerinden x doğrultusundaki hız bileşeni (u) Şekil 6.56.'da verilmiştir. Jet çıkışının sağ üst tarafında hızın u bileşeni artarken duvara yakın bölgede ters akıılardan kaynaklı hız düşer. Jet çıkışının sol üst tarafında ters akıılardan kaynaklı hızın u bileşeni düşerken duvara yakın bölgede yine hız artar. Bu etki tamamen kidney ve anti-kidney vorteks çiftlerinin etkisiyle gerçekleşir. Mavi ve sarı bölgelerinde arasında kalan bölgede ise resirkülasyondan kaynaklı hız sıfırdır ve akış durma noktasındadır.



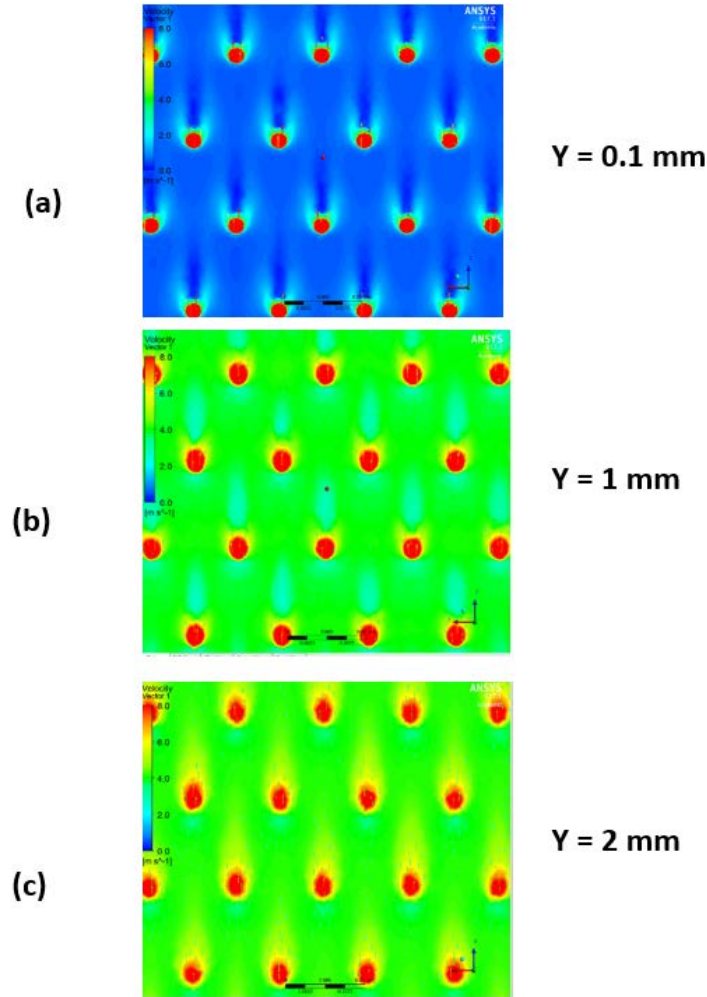
Şekil 6.56. Akış Kesiti U Hızı ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)

Akış kesitinden alınan hız konturlerinden y doğrultusundaki hız bileşeni (v) Şekil 6.57.'de verilmiştir. Jet çıkışının sağ ve sol taraflarında hızın v bileşeni zıt yönlü dönen vorteks çiftlerinin etkisiyle jetler akış aşağı yönde hareket ettiğinden azalır. Yan yana dizili 2 jetin birinin sağında diğerrinin solunda oluşan kidney vorteksleri yaklaşık delik çapı kadar bölgede etki gösterir. 2 jetin orta kısmında kalan dar bir bölge ana akım hızına yakın değerlerde seyreder.



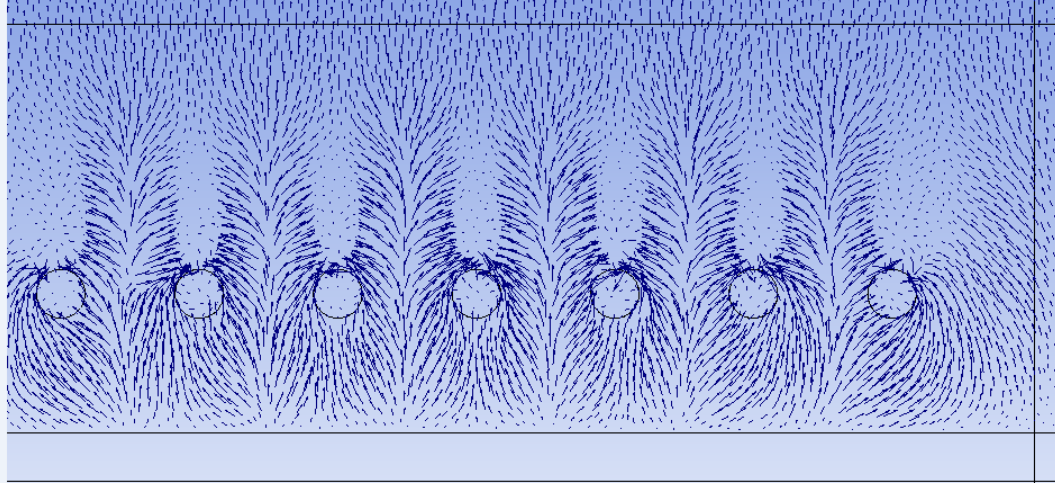
Şekil 6.57. Akış Kesiti V Hızı ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)

Tünele üstten baktığımızda değişik yüksekliklerdeki ($y=0.1$ mm, $y=1$ mm, ve $y=2$ mm) hızların aksenel ve yanal değişimi Şekil 6.58.'de gösterilmiştir. $y=0.1$ yükseklik değerindeki hızlarda jet çapraz akış etkisinden dolayı jetlerin sağında ve solunda zıt dönen girdap çiftlerinin sebep olduğu akış yapısına bağlı olarak gözlemlenen at nalı girdapları görülmektedir. Jet deliklerini takip eden iz bölgesinde oluşan resirkülasyondan kaynaklı akış yapısı oluşmaz. Yükseklik arttıkça ($y=1$) at nalı girdaplarının yok olduğu ve resirkülasyon baloncuğunun etkisinin giderek azaldığı fakat iz bölgesinden 2D kadar bir aksenel mesafede 2 katı hızların ana akım hızının yarısı değerlerinde hissedildiği gözlemlenmiştir. Jet yüksekliği arttıkça ($y=2$ mm) resirkülasyon bölgesi etkisinin tamamen yok olduğu zıt yönlü dönen girdap çiftlerinin etkisine bağlı olarak jet çıkış iz bölgesinde ana akımdan güçlü akış bölgesi oluşmaktadır.



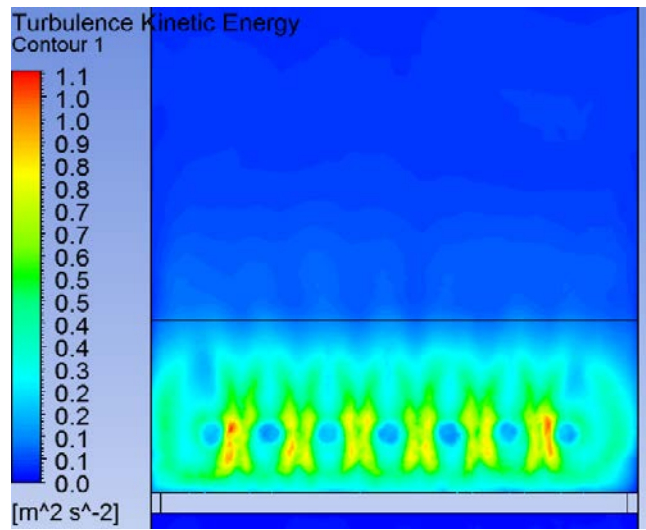
Şekil 6.58. Farklı Yüksekliklerdeki Jetlerin Tepeden Görünümü

Slot film deliklerinden çıkan jetler slot yuvasında olduğundan ana akımla hiçbir müdahalesi olmamasına karşın komşu jetler ile etkileşerek at nalı girdapları oluştururlar. Bu etki yan duvara yakın iki delikte zayıf şekilde gözlenir. Jetleri film çıkış deliklerinin yaklaşık 2.5 D iz bölgesi mesafesinde resirkülasyon baloncuğu oluştuğundan akış vektörleri oluşmaz. Şekil 6.59.'da film delik çıkış hız vektörleri verilmiştir.

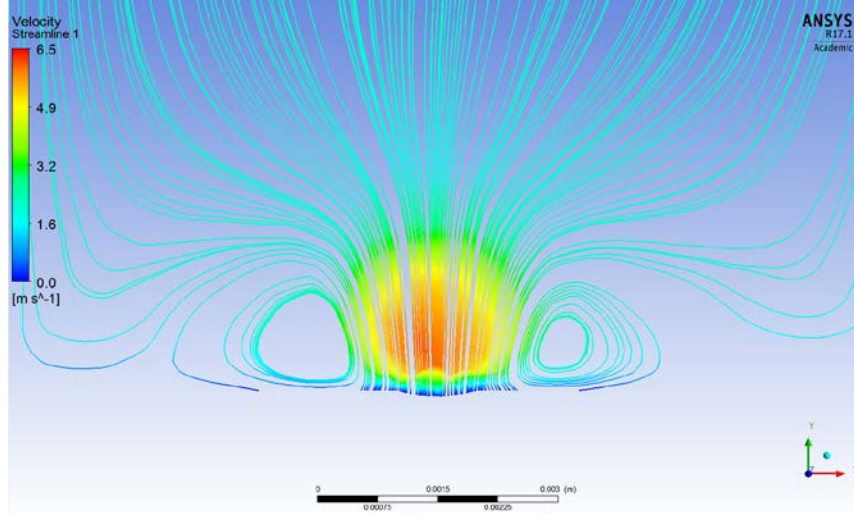


Şekil 6.59. Film Soğutma Delik Çıkış Hız Vektörleri

Komşu jetler ile etkileşip at nalı girdapları oluşturan deliklerin arasındaki jetlerde güçlü türbülans kinetik enerjisi oluşur. Slot yuvası ve film deliklerinden kaynaklı oluşan türbülans kinetik enerji konturları Şekil 6.60.'ta verilmiştir.

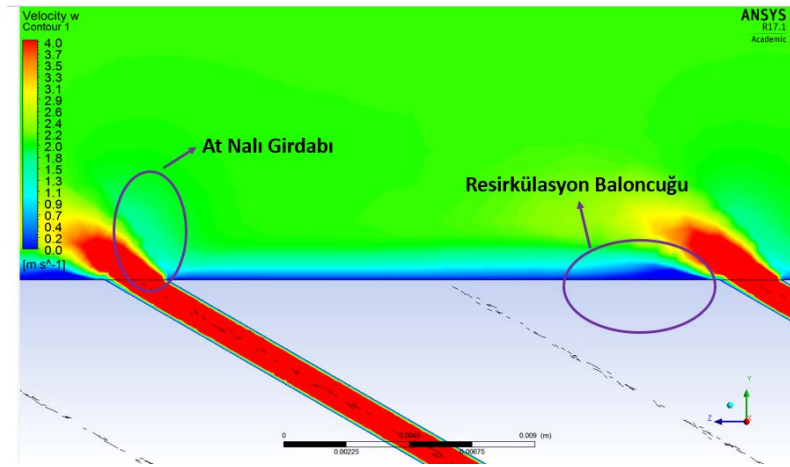


Şekil 6.60. Film Delik TKE Konturları



Şekil 6.61. Akış Kesiti Akım Çizgileri

Şekil 6.61.'de akış kesitten alınan akım çizgisel (streamline) hızlar değişken hızlarda renkli hız ölçeğinde verilmiştir. Jetlerin sağında ve solunda belirgin yapıda resirkülasyon baloncuk yapıları ve zıt yönlü dönen vorteks hücreleriyle beraber gözlemlenebilmektedir.

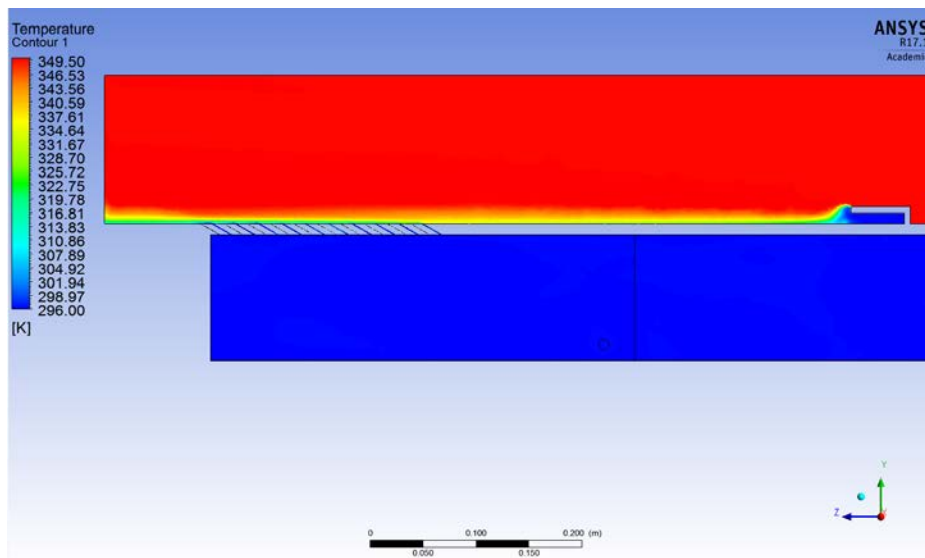


Şekil 6.62. Orta Yanal Kesitte w Hız Konturleri

Orta yanal kesitte z yönündeki hız bileşeni olan w hız konturleri Şekil 6.62.'de verilmiştir. Ana akımla karışan jetlerin hız değerleri sonradan kademeli olarak düşme etkisi gösterir. Jet çıkışının ön bölgesinde at nalı girdap yapısı gözlemlenirken jet çıkışını takip eden 2D kadar mesafede resirkülasyon baloncuğu oluşur. Bu bölgede soğutma jetleri film plaka ile soğutma tampon bölge oluşturamazken akış yapısı oluşmadığı için sıcak ana akımdan korunur.

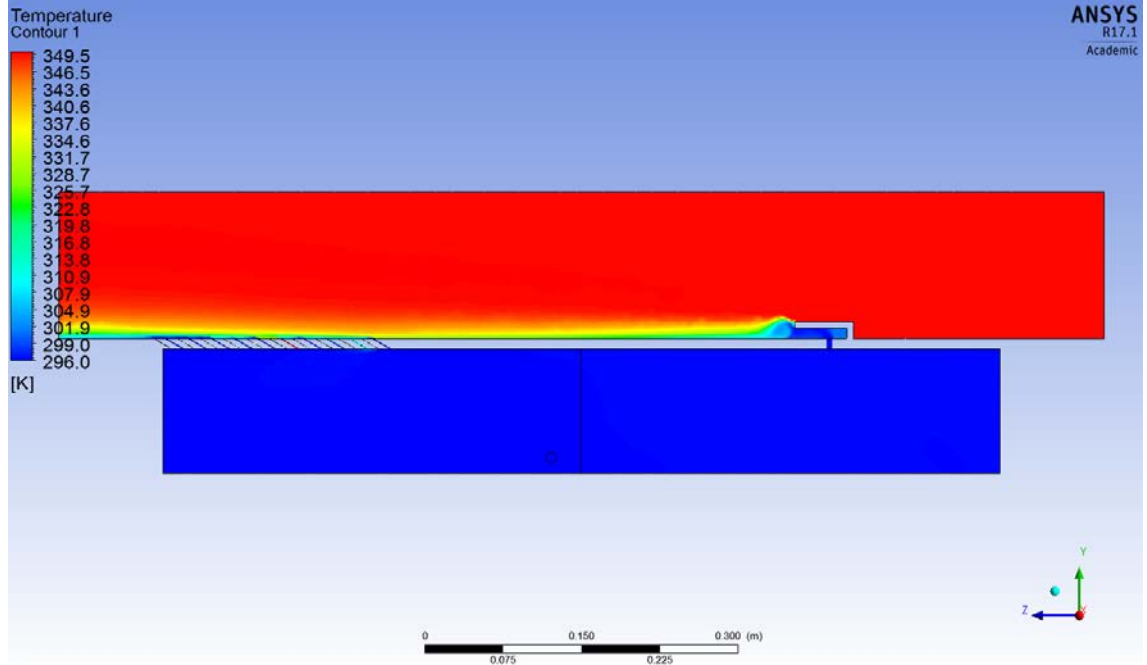
140 mm'lik kare kesitli tünelde 350 K ile giren hava öncelikle slot çıkışında 10 mm'lik bir film plakasıyla karşılaşır. Film tabaka kalınlığı giderek küçülüp yok olmak üzere iken ($x/D=10$) efüzyon deliklerinden çıkan jetler film tabaka kalınlığını plaka sonunda yaklaşık 15 mm düzeylerine kadar çekmiştir. Tünelin orta kesitinden alınmış ve yandan baktığımızda film tabaka kalınlıkları hakkında fikir veren sıcaklık konturleri Şekil 6.63'te verilmiştir. Soğuk hava plakaya ne kadar temas ederse o kadar soğutma etkinliği oluşturur. Plakaya temas etmek yerine ana akıma karışarak jet yukarı akış etkisi gösterirse de plaka üzerindeki soğutma etkinliği o derece düşer.

HAD kabullerinden biri de adyabatik duvar olduğundan nümerik yoldan hesaplanan etkinlik değerleri de hep adyabatik film etkinlik değeridir ve ısı kayıplar ve konjuge etkiler göz ardı edilerek çözdürülmüş değerlerdir. Duvarlar öncelikle adyabatik duvar ve kaymama koşulu (no slip condition) ile çözdürülmüştür. Bu sayede ölçülen film etkinlik değerleri adyabatik film etkinlik değerleri olup tüm film etkinlik değerlerinden görece yüksek değerlerdir. Ama iletim kayıpları için duvar yüzeylerinden negatif ısı akı değeri girilip sayısal çözüm sonuçlarının deneysel çözümlerle paralellik göstermesi ve gerçekçi olması sağlanmıştır. Bu sayede termal kamera ölçümlerinden değerleri okunamayan diğer kısımlar hakkında fikir sahibi olunup sonuçlar yorumlanmıştır. Adyabatik duvar koşulu haricinden doğrudan test plakası üzerinden okunan sıcaklık değerlerinden elde edilen etkinlik oranı tüm film etkinlik oranı diye geçer.

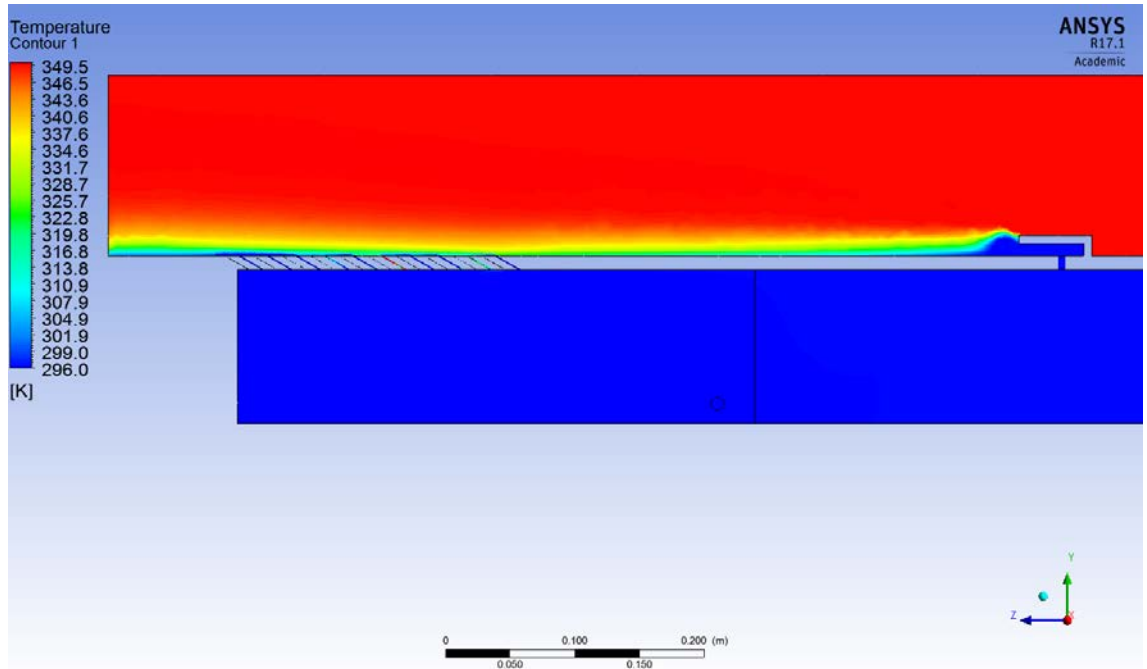


Şekil 6.63. Slot +Efüzyon Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)

Şekil 6.64.'te ve Şekil 6.65.'te sırasıyla $\dot{m} = 0.48$ kg/dak ve $\dot{m} = 0.72$ kg/dak için slot + efüzyon plakasının ortasından alınmış yanal kesitte sıcaklık konturleri verilmiştir.

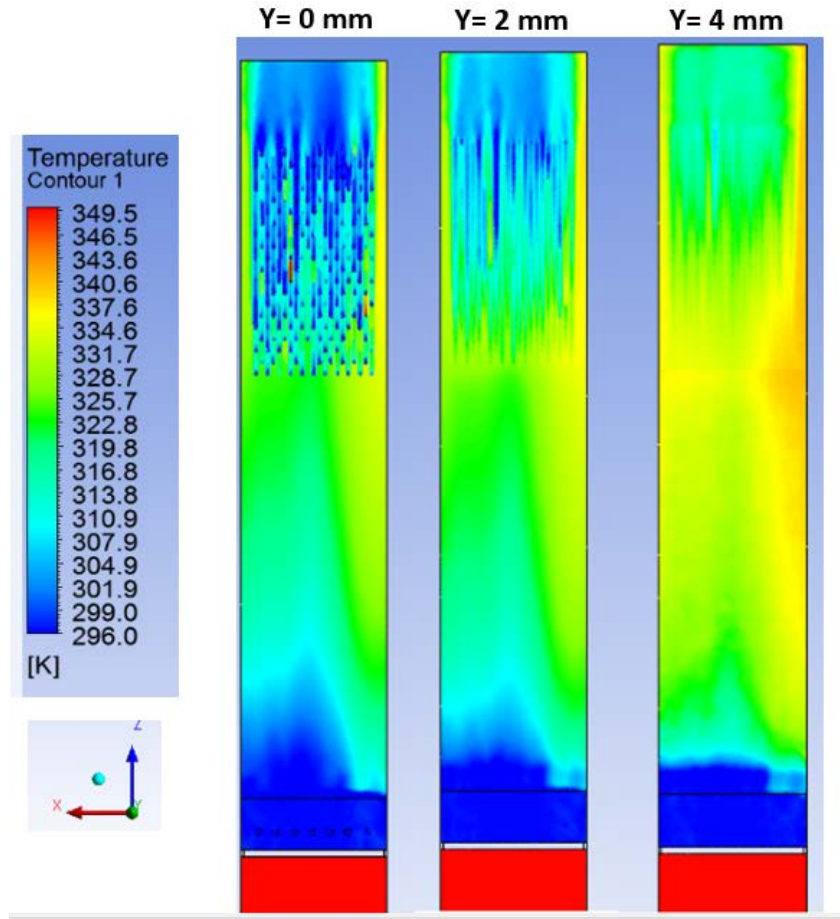


Şekil 6.64. Slot +Efüzyon Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)



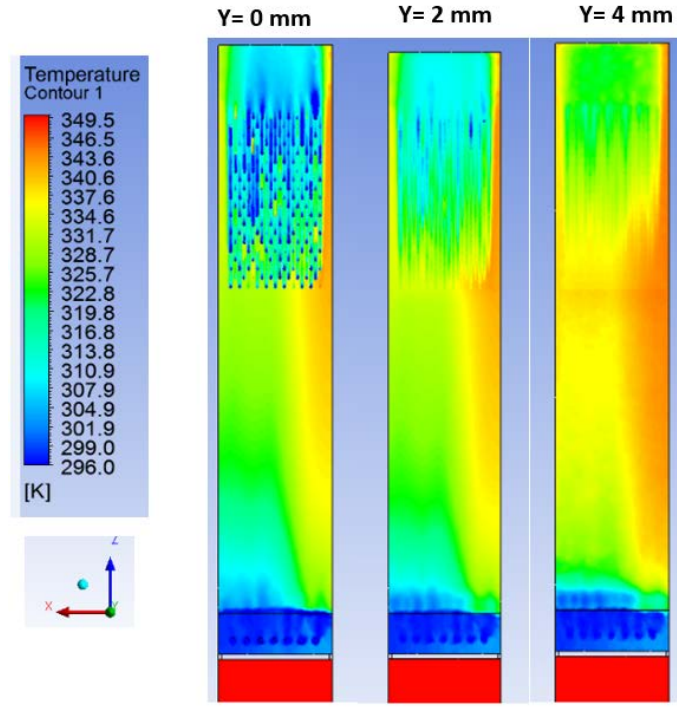
Şekil 6.65. Slot +Efüzyon Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)

Kare kesitli tünelde 350 K ile giren hava öncelikle slot çıkışında 10 mm'lik bir film plakasıyla karşılaşır. Film tabaka kalınlığı ve adyabatik film soğutma etkinliği slot film plakası boyunca giderek azalmaya başlar. Plaka yüzeyinde yerel sıcaklıklar 305 K ile 335 K değerlerinde oynama yapar. Efüzyon plakasında staggered dizili soğutma delikleri peşe peşe soğutma jetlerinin etkisiyle yaptıkları soğutmada efüzyon plakasında film tabaka kalınlığını giderek artırır. Duvarlara yakın bölgelerde film tabakası kalınlığı ve adyabatik film soğutma etkinliği giderek düşer. Aşağıda Şekil 6.66.'da sırasıyla $y=0$ mm, $y=2$ mm ve $y=4$ mm değerlerinde plakaya paralel düzlemsel sıcaklık konturleri verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere yan duvar etkileri soğutma deliklerine rağmen en alt yükseklikteki plakada bile etkisini hissettirir.



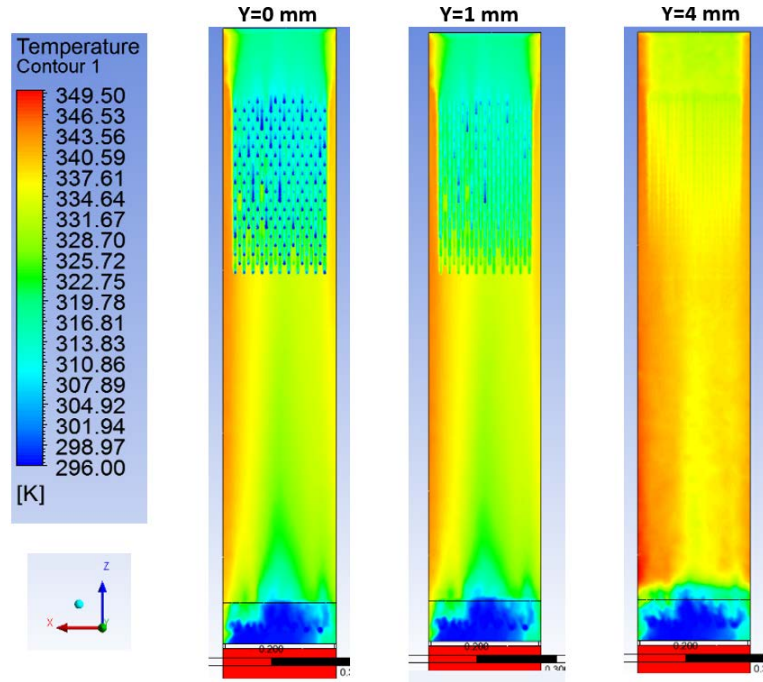
Şekil 6.66. Slot +Efüzyon Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.24$ kg/dak)

Şekil 6.67.'de slot film soğutma +efüzyon plaka soğutma için değişik tünel yüksekliklerinde sıcaklık konturleri ($\dot{m}=0.48$ kg/dak) verilmiştir.



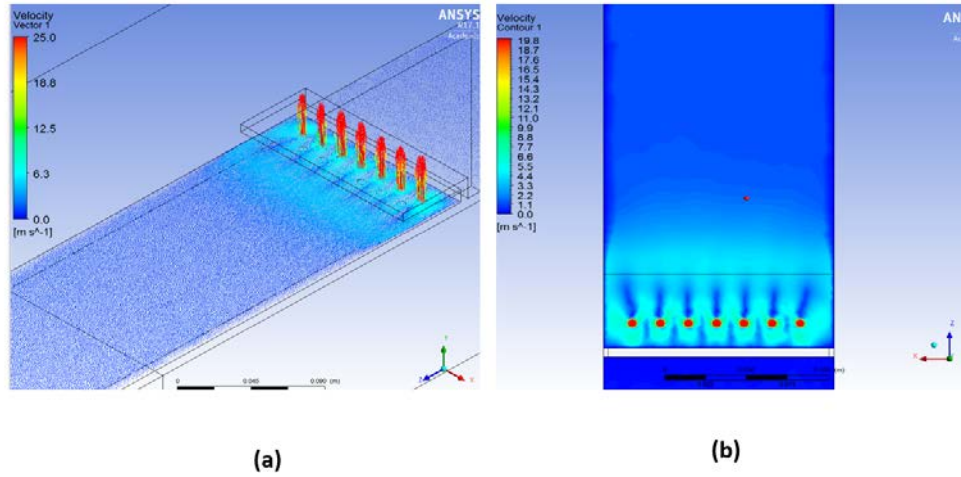
Şekil 6.67. Slot +Efüzyon Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.48$ kg/dak)

Şekil 6.68.'de slot film soğutma + efüzyon soğutma plaka için değişik tünel yüksekliklerinde sıcaklık konturleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak) verilmiştir.



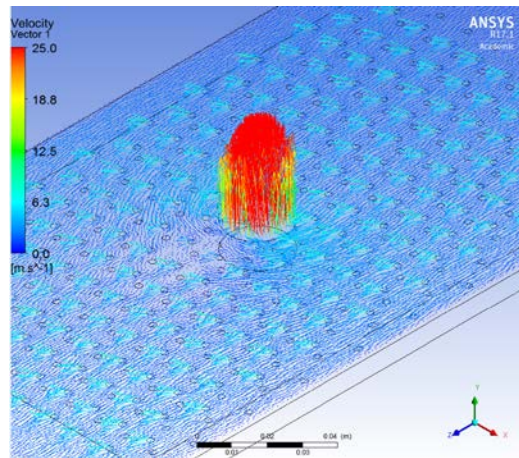
Şekil 6.68. Slot +Efüzyon Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.72$ kg/dak)

Şekil 6.69.'da slot film deliklerinden çıkan jetlerin izometrik ve tepeden görünüm hız bileşenleri verilmiştir. Jetler komşu jetler ile etkileşerek at nalı girdapları oluştururlar. Bu çarpma etkisi aynı zamanda slot yuva üzerinde çarpma (impingement) etkisiyle slot yuvarının çarpma ile soğumasını da sağlar. Jetleri slot çıkış deliklerinin yaklaşık 4 D mesafe kadar akışın olmadığı iz bölgesi oluştururlar.

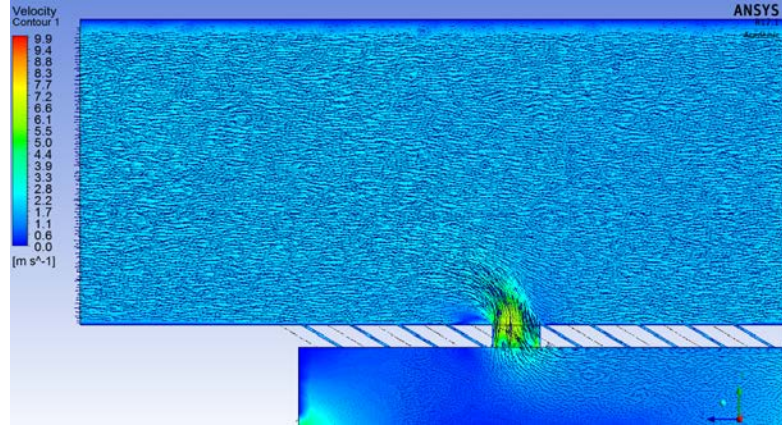


Şekil 6.69. Film Delik Jetlerinin İzometrik ve Tepeden Görünümü

Şekil 6.70.'te efüzyon + dilüsyon jetinin ortak etkileri gözlemlenmektedir. Dilüsyon jeti tünele tamamen hâkim olmakla beraber yan bölgelerde at nalı girdapları efüzyon jetleri etkilemekte ve iz bölgesinde at nalı girdaplarının orta bölgesinde oluşan ve akışın oluşmadığı resirkülasyon bölgesin dilüsyon deliğini takip eden efüzyon jetlerini etkilemektedir.

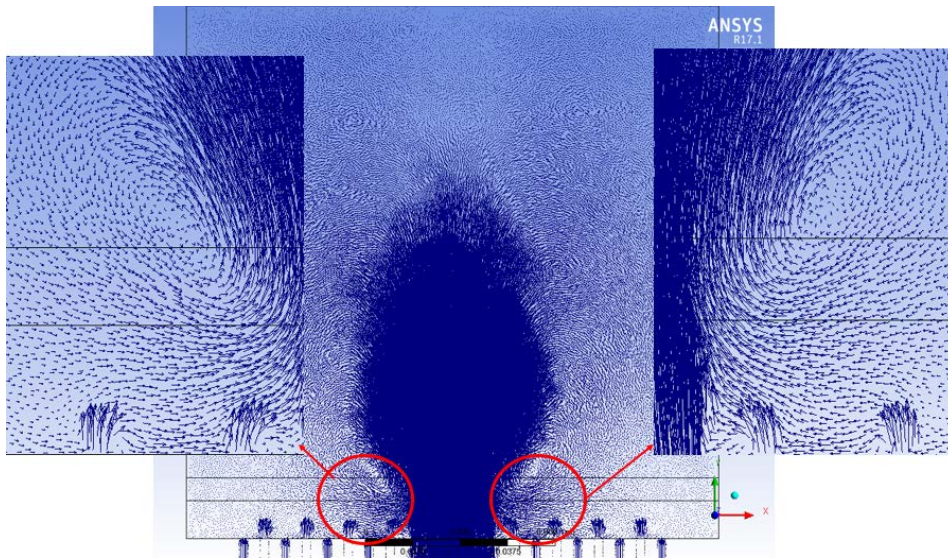


Şekil 6.70. Dilüsyon ve Efüzyon Jetlerinin İzometrik Görünümü

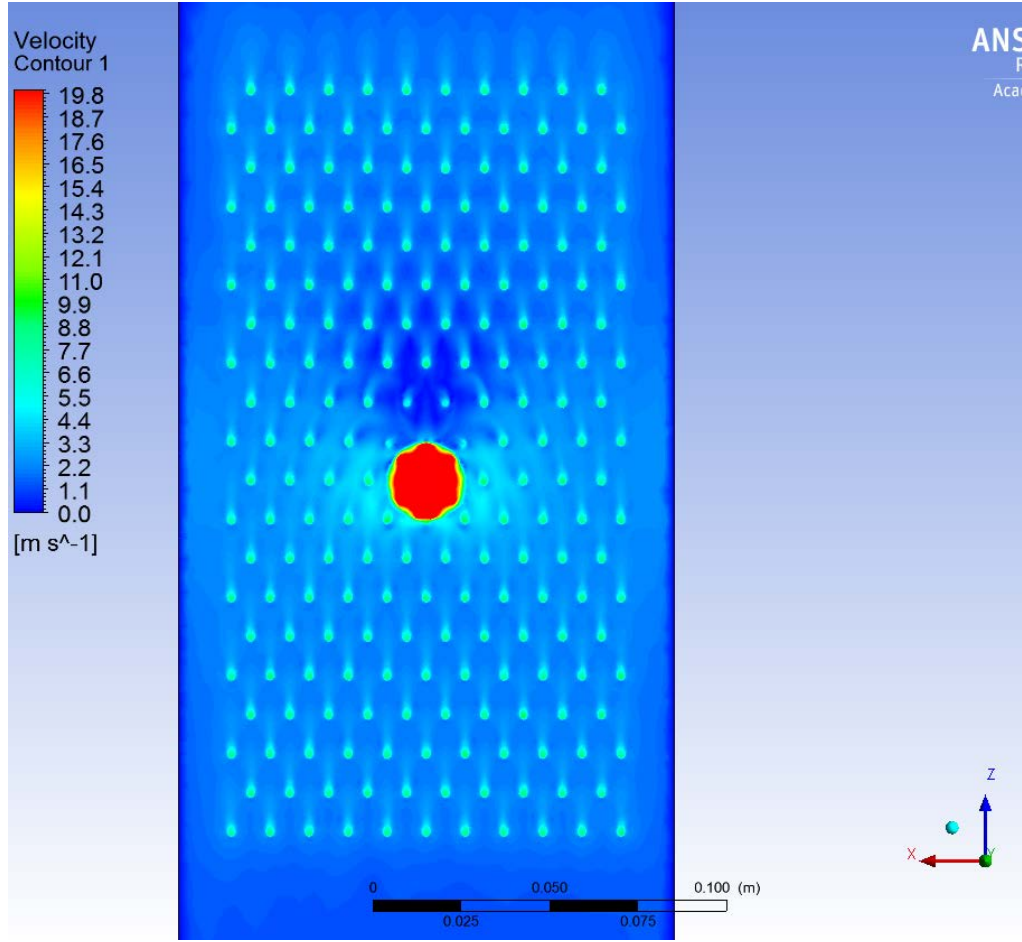


Şekil 6.71. Dilüsyon Jetinin Yandan Görünümü ($\dot{m}=0.35$ kg/dak)

Dilüsyon deliği çıkışındaki jet efüzyon deliğine göre çok baskın bir jet olup yaklaşık efüzyon jetinin 4 katı vektör şiddetinde ve 15 katı kadar bir etkinlik alanına sahip şekilde tünele girer. Dilüsyon jeti tünele girdiğinde tüneldeki tüm akış yapısına baskın gelir ve tünelin orta bölgesinde bir çekirdek akış yapısı oluşturarak akış kesiti boyunca büyükçe bir kidney ve anti-kidney vortisi etkisi gösterir. Dilüsyon bölgesini takip eden bölgede yay şeklinde bir vorteks hücresi Şekil 6.71.'de görülmektedir. Dilüsyon çıkış jetinde yan taraflarda karşılıklı olarak resirkülasyon bölgeleri oluşmuştur. Şekil 6.72.'de bu bölgeler görülebilir. Şekil 6.72'de görüleceği üzere dilüsyon jetinin efüzyon delik çıkışlarındaki jetin resirkülasyon bölgelerine doğru vektörel sapma hareketi yapmasını sağlar.

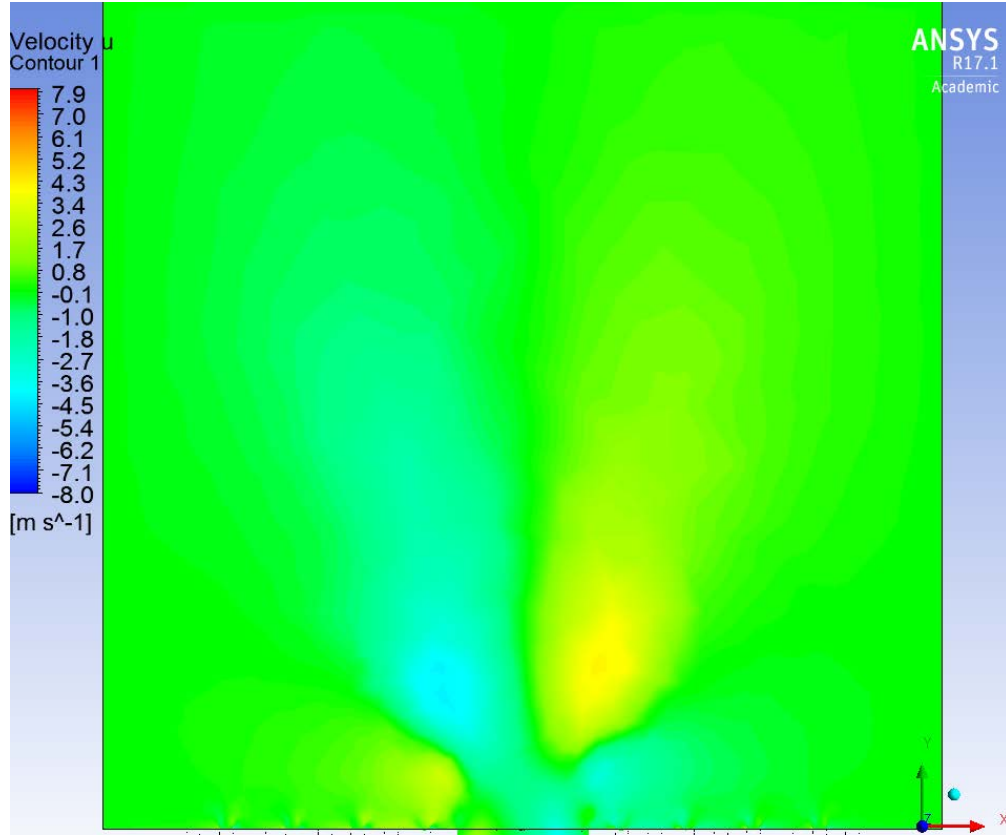


Şekil 6.72. Yanal Kesit Dilüsyon Jet ve Resirkülasyon Bölgeleri



Şekil 6.73. Plaka Üzerinde Dilüsyon Jet Etkilerinin Tepeden Görünümü

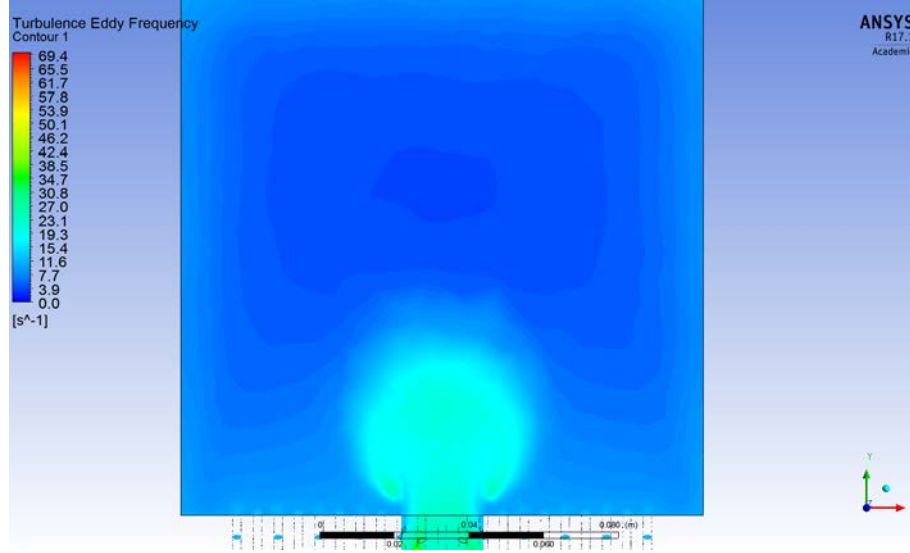
Şekil 6.73.'te efüzyon ve dilüsyon plakasının ortak etkileriyle ilgili tepeden görünüm hız kontur bölgeleri verilmiştir. Dilüsyon jet çıkışının art bölgesinde oluşan Resirkülasyon bölgelerinden kaynaklı akış yapısının olmadığı yerlerde Şekil 6.73'te dilüsyon deliğinin takip eden koyu mavi bölgeler yaklaşık 3D_{dil} kadar bölgede etki bölgesi oluşturarak efüzyon jet yapılarını etkilemektedir. Bu yapı efüzyon çıkışlarındaki resirkülasyon bölgelerini de etkileyerek akışta dilüsyon çap jet iz bölgelerinin dilüsyon jeti yönünde oluşan Resirkülasyon bölgelerine doğru sapma hareketi yapmasını sağlar. Değişik yüksekliklerden alınmış dilüsyon etkisine dair sonuçlar göstermiştir ki bu boyutta bir tünelde dilüsyon etkisinin çalışmanın anlamsız olduğudur. 14 cm kare kesitli mevcut deney düzeneğinde en yüksek üfleme oranında nerdeyse jet tünelin çeyrek yükseklik bölgesine kadar ilerleyeceğinden ve dilüsyon jetinin tüm akış alanını domine etmesinden dolayı ötürü dilüsyon etkilerinin daha sağlıklı ve tümünden incelenmesi için ölçek olarak daha büyük ölçekte test kesiti olan rüzgar tünelleri kullanılmalıdır.



Şekil 6.74. Dilüsyon Jeti Kesit U Hız Konturü

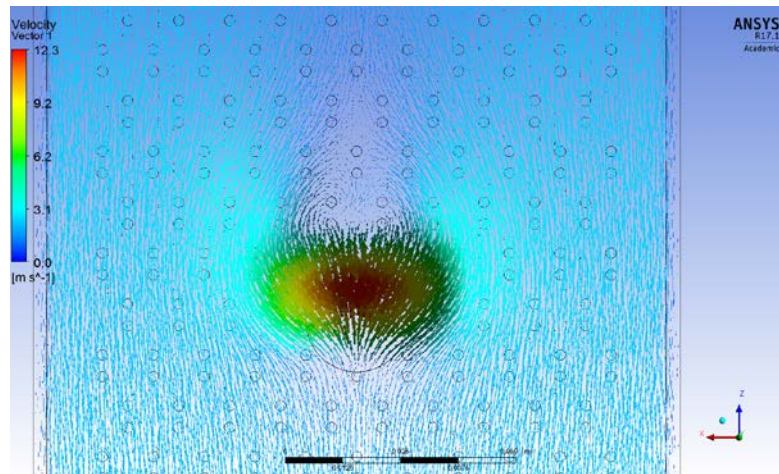
Şekil 6.74.'te efüzyon ve dilüsyon plakasının ortak etkileriyle ilgili kesit görünüm yanal yönde u hız bileşeninin değişimi ile ilgili konturler verilmiştir. U hızı kanal kesitinde yanal yayılımı gösterdiğinden jet çıkışlarındaki yanal yayılımların incelenmesi açısından önemlidir. Yanal yayılımı azaltan etmenler ters akışlar ve resirkülasyon baloncuklarıdır. Dilüsyon jet çıkışından sağ üst bölgede u hızı artarken orta bölgede bir resirkülasyon bölgesi $u=0$ olmakta ve sağ alt bölgede ise u hızı resirkülasyonlardan ve ters akışlardan kaynaklı azalma etkisi gösterir. Hakeza u hızı sol üst bölgede yine ters akışlardan kaynaklı azalırken resirkülasyon bölgesinde $u=0$ olmakta ve sol alt bölgede u hızı yeniden artmaktadır. Eksenel yayılımda at nalı girdapları, Resirkülasyon baloncukları hâkimken yanal yayılımda zıt yönlü dönen vorteks çiftleri ve alt bölgelerde oluşan vorteks hücreleri akışın karakteristiğini belirler. Burada değinilmesi gereken diğer husus da yanal yayılımın üst bölgelerde hidrolik çapın yarısı kadar bir etki alanı oluşturduğudur. Alt bölgelerde oluşan zıt etkiler ise yine efüzyon jet çıkışlarını domine edecek kadar güçlü etkiler oluşturur. Efüzyon jetleri yanal yayılımda ± 1 m/s seyirlerinde ters akış etkileri oluştururken dilüsyon jetleri ± 4 m/s düzeylerinde değişim grafiği çizer.

Şekil 6.75'te dilüsyon jeti kesiti için türbülans edî frekans ölçeğinin (ω) kontur değerlerini izlediğimizde yine ediler bakımından dilüsyon jetinin efüzyon jetlerini domine ettiğini ve sağlı sollu kidney-anti kidney vortislerinin oluştuğu bölgelerde ise güçlü edilerin oluştuğu gözlemlenebilir.



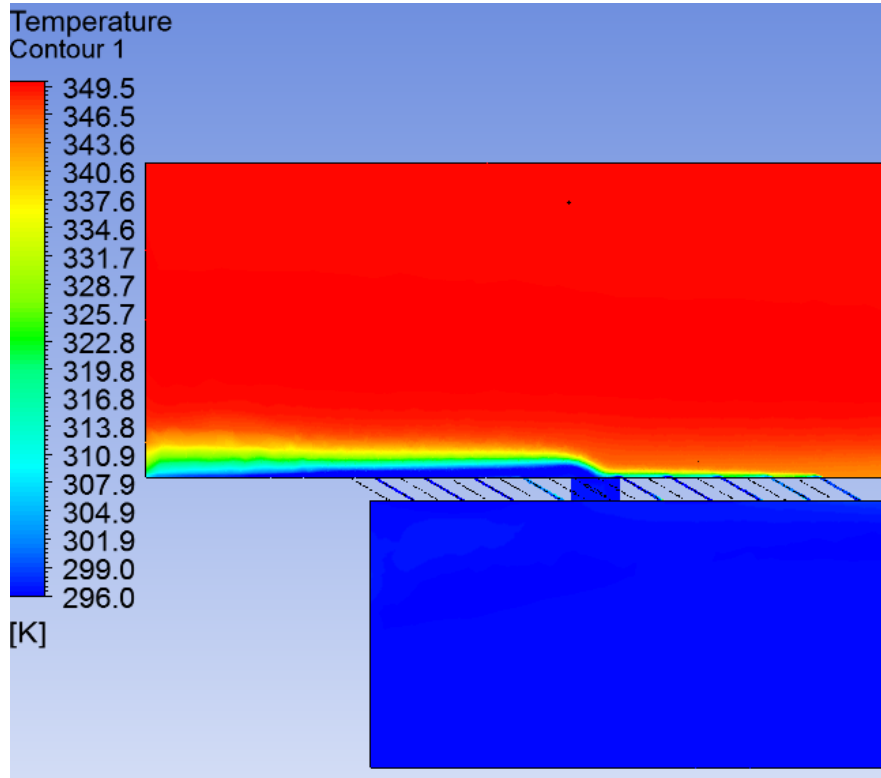
Şekil 6.75. Dilüsyon Jeti Kesit Türbülans Edî Frekans Ölçeği(ω)

Şekil 6.76.'da dilüsyon delik jet çıkışının belli bir y değerinde ($y=8$ mm) tepeden baktığımızda efüzyon jetlerinin ana akışta etkisiz iken, dilüsyon jetlerinin sağında ve solunda at nalı girdapları akış yönüne doğru da CRVP'ler ve resirkülasyon baloncuğu oluşumu gözlemlenebilir.



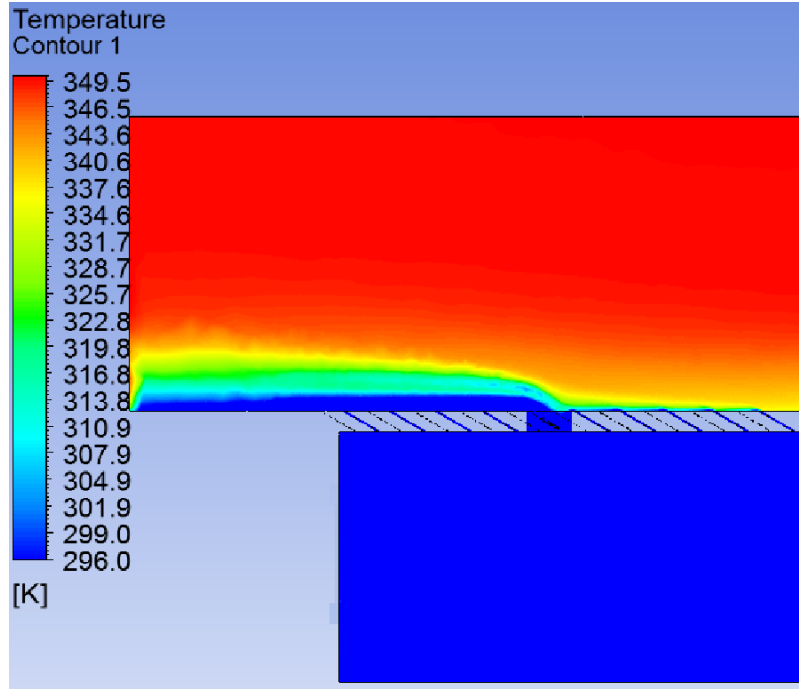
Şekil 6.76. Dilüsyon Jeti Eksenel Yayılımı ($y=8$ mm)

140 mm'lik kare kesitli tünelde 350 K ile giren hava öncelikle slot çıkışında 10 mm'lik bir film plakasıyla karşılaşır. Film tabaka kalınlığı giderek küçülüp yok olmak üzere iken ($x/D=10$) efüzyon deliklerinden çıkan jetler film tabaka kalınlığı artırmıştır. Dilüsyon jeti ise tün tünelle akışına hâkim olmuş ve jeti takip eden bölgede büyükçe bir soğutma çekirdek yapısı oluşturmuştur. Bu soğutma çekirdek yapısı tünelin orta kısmında ayrı bir film tabakası oluşmasına yol açmıştır. Dilüsyon jetinin art bölgesinde oluşan resirkülasyon baloncuğu soğutmayı olumsuz etkilese de efüzyon deliklerinden çıkan soğutma jetleri takviye soğutma yapmıştır. Slot film + efüzyon + dilüsyon plakasında tünelin orta kesitinden alınmış ve film tabaka kalınlıkları hakkında fikir veren sıcaklık konturleri Şekil 6.67'de verilmiştir. Soğuk hava plakaya ne kadar temas ederse o kadar soğutma etkinliği oluşturur. Plakaya temas etmek yerine ana akıma karışarak jet yukarı akış etkisi gösterirse de plaka üzerindeki soğutma etkinliği o derece düşer. Dilüsyon deliğinin amacı yanma odasını seyreltmek olduğundan jet çıkış haricinde soğutmaya pek katkı sağlamaz. Zira çapı efüzyon deliklerine göre büyük olduğundan çıkan jetler duvardan uzaklaşıp çekirdek akış yapısına karışır. Şekil 6.77.'de slot +efüzyon+dilüsyon ara kesit sıcaklık konturleri ($\dot{m} = 0.35$ kg/dak) verilmiştir.

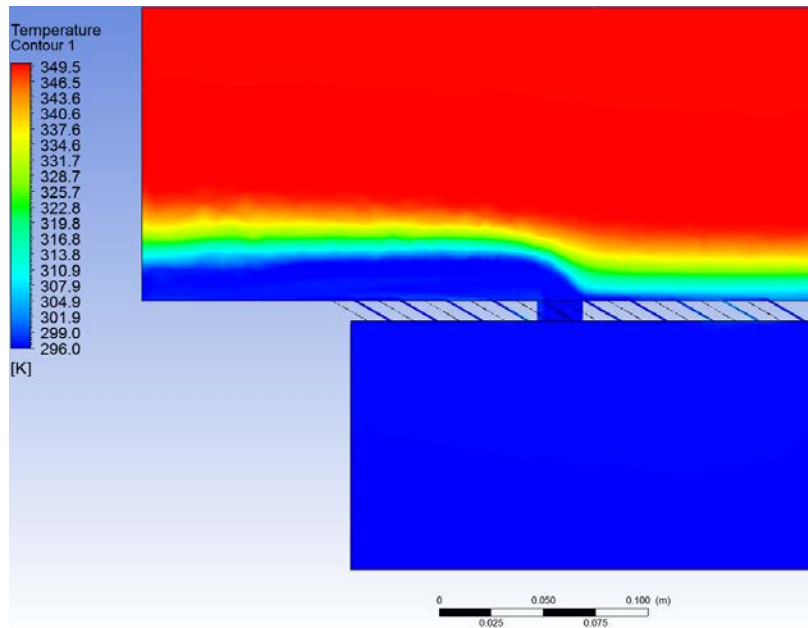


Şekil 6.77. Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak)

Dilüsyon jetlerine tepeden baktığımızda orta bölgede bir ısı çekirdek oluşturduğunu görebiliriz. Bu çekirdek iz bölgesi boyunca dilüsyon etkisi aksenal yönde devam eder. Simetri ekseninde sıcaklık konturleri Şekil 6.78.'de ve Şekil 6.79.'da sırasıyla verilmiştir.

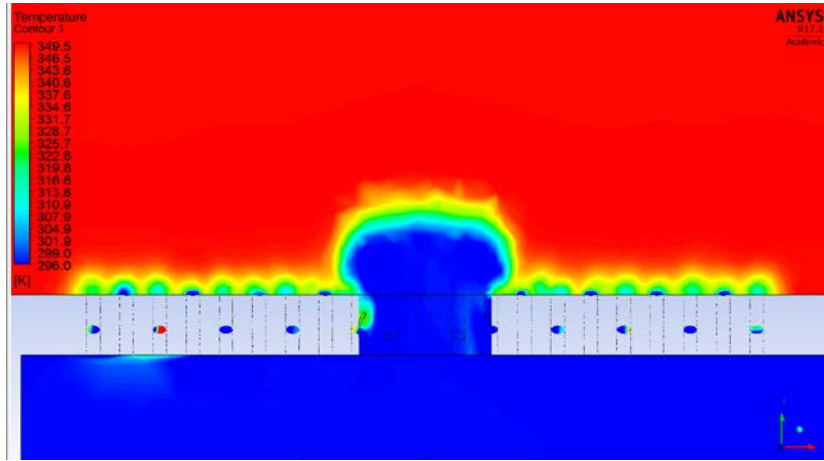


Şekil 6.78. Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.69$ kg/dak)



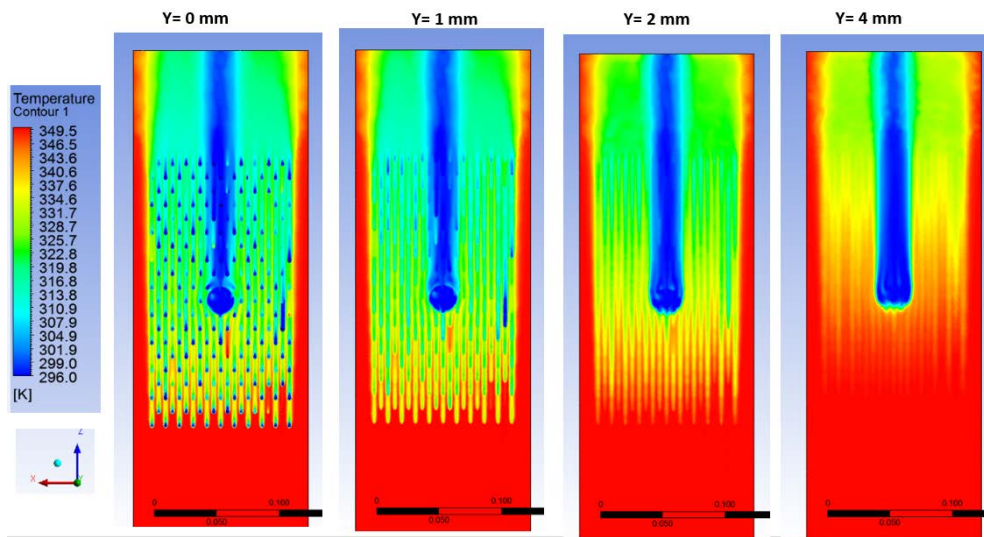
Şekil 6.79. Ara Kesit Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=1.05$ kg/dak)

Dilüsyon deliğine orta kesitten baktığımızda dilüsyon deliğinin yanal yayılımı görebiliriz. Burada efüzyon jet etkileri ve duvar etkileri daha anlaşılır düzeylerdedir. Efüzyon jetleri arasında plaka sıcaklıkları artmış yani film etkinlik değerleri düşmüştür. Yine yan duvarda film etkinlik değerleri plaka üzerinde en kötü değerlere ulaşır. Şekil 6.80.'de akış kesiti üzerinde alınmış sıcaklık konturleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak) verilmiştir.



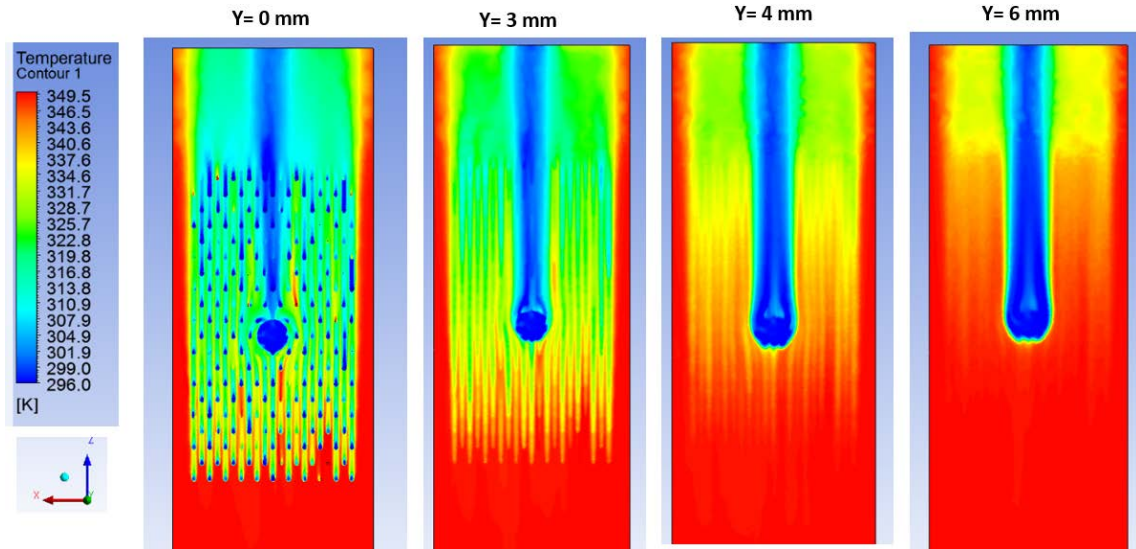
Şekil 6.80. Akış Kesiti Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak)

Şekil 6.81.'de slot etkilerinden bağımsız sadece dilüsyon etkilerini incelemek için slot film soğutmasız efüzyon + dilüsyon plaka için değişik tünel yüksekliklerinde sıcaklık konturlerine ($\dot{m}=0.35$ kg/dak) bakılmıştır.

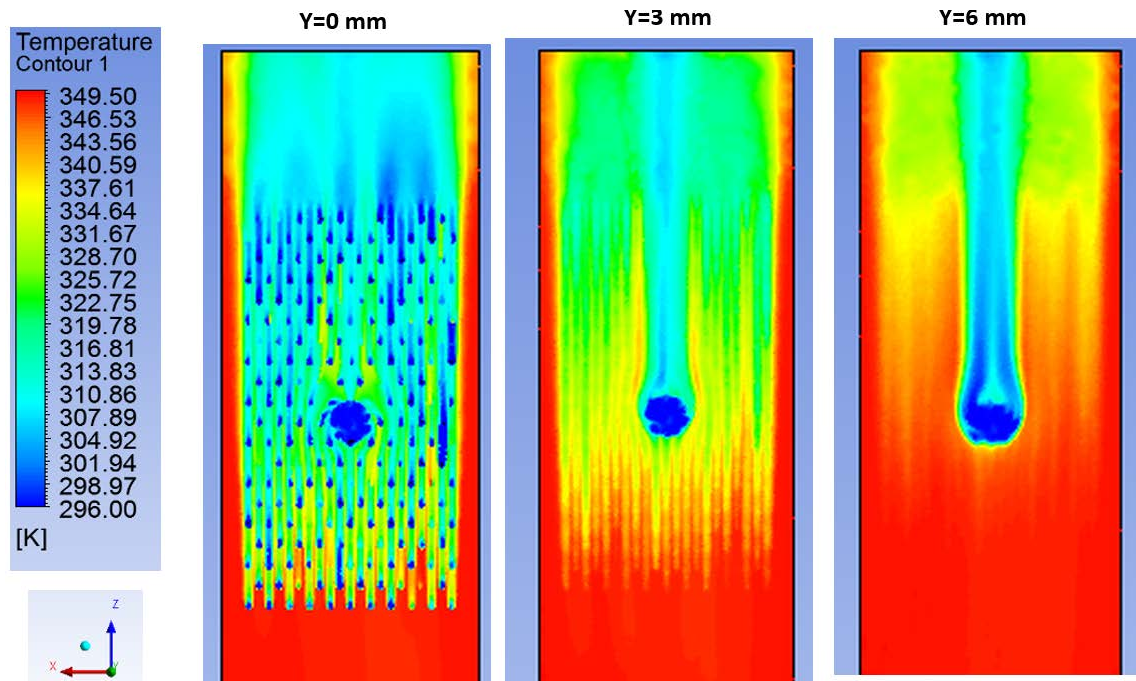


Şekil 6.81. Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.35$ kg/dak)

Şekil 6.82.'de slot film soğutmasız efüzyon + dilüsyon plaka ($\dot{m}=0.69$ kg/dak) için değişik tünel yüksekliklerinde sıcaklık konturleri ve Şekil 6.83.'te slot film soğutmasız efüzyon + dilüsyon plaka ($\dot{m} = 1.05$ kg/dak) için değişik tünel yüksekliklerinde sıcaklık konturleri verilmiştir.



Şekil 6.82. Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=0.69$ kg/dak)



Şekil 6.83. Plaka Sıcaklık Konturleri ($\dot{m}=1.05$ kg/dak)

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Tezin bulgular bölümünde, çapraz akışta jet karışım bölgelerinde meydana gelen jet lift-off, CRVP, at nalı girdapları, kidney vortisleri, resirkülasyon baloncukları gibi yapılar gerek PIV'den gerek de HAD analizlerinden alınan hız ve türbülans haritalarında akış yapıları net şekilde işlenmiştir. Jet çıkışında akışın dip noktalarında sağlı sollu olarak at nalı girdapları ve jeti takip eden eksenel yönde ise resirkülasyon baloncukları gözlemlenmiştir. Ayrıca HAD analizlerinde akış kesitinden alınan bölgelerde ve PIV analizlerinde U hız değişimi ve V hız değişim haritalarında zıt yönlü dönen girdap çiftleri (kidney ve anti kidney vortisleri) net şekilde gözlemlenmiştir.

At nalı girdapları jetlerin yanal yayılımı böylece yanal kesitte ne derece soğutma yapacağı hakkında fikir verirken resirkülasyon baloncukları jetlerin duvarla temasını kestiğinden bir nevi adyabatik duvar etki bölgesi yaratır. Bu baloncuk aynı zamanda sıcak ana akışın da duvar ile temasını sağlaması bakımından cidarın korunmasına pozitif etki eder. Jetler yüksek hızla yukarı çıkarken ana akımla karşılaştıkları bölgede oluşan vortisler yüzünden eksenel yönde ve akış aşağı yönde hareket edebilir. Düşük debili üflemlerde jetler göreceli düşük yüksekliklerde ana akıma yenik düşüp jet aşağı ve eksenel yönde hareket ederken yüksek debilerde jetler ana akımla eş baskın özellikte jet akış yukarı hareketle göreceli yüksek mesafelerde eksenel doğrultuda hareket ederler.

Slot film yuva mekanizmasını üst ve bitim noktasında ana akış çarpmasında resirkülasyon bölgeleri oluşur. Film jetlerinin çıkışında ise ana akımla temas olmamasına karşın slot film jetleri birbiriyle etkileşerek at nalı girdapları oluştururlar. Yine deliğin 3 katı kadar mesafeye kadar resirkülasyon baloncuğu film jetini takip eden iz bölgesinde oluşur. Bunun yanı sıra film deliklerinden (6 mm) efüzyon deliklerine (2.25 mm) göre daha hızlı bir jet girişi olduğundan 10 mm'lik slot yuvasının tepesine yüksek hızda çarpan jetler slot yuvası cidarında çarpma (impingement) soğutma etkisi yapar.

Dilüsyon delikleri akışa hepten baskın gelirken dilüsyon deliğinin etrafında oluşan soğutucu çekirdek mekanizması ikincil bir yanal film tabakası oluşumu tetikler. Bu etki tepeden alınmış sıcaklık konturlerinden net şekilde gözlemlenebilir. Dilüsyon jetleri, daha büyük resirkülasyon bölgeleri oluşturacağından etrafında bulunan efüzyon deliklerini de domine ederek düşük basınç bölgesi etkisiyle jetlerin doğrultularını dilüsyon deliği tarafına çeker. Dilüsyon jeti çevresinde oluşan at nalı girdapları ve kidney vortisleri

efüzyon jetlerinin doğrultularını değiştirir. Yine dilüsyon jet iz bölgesinde sadece efüzyon jet çıkış bölgelerinde kısmi oranda jet çıkışı gözlemlenir. Yani dilüsyon jetini takip eden jetlerin aslında soğutmaya hiçbir katkısı yoktur. Bu da dilüsyon deliklerinin çapı kadar mesafeye efüzyon deliklerini koymanın soğutma bakımından karşılıksız olacağı anlamına gelir.

Akış içerisinde hız dağılımının ani değişim gösterdiği veya türbülansın yoğun olduğu akışların parçacık görüntülemeyle hız ölçümü yapılırken alınan verilerin işlenmesi için Adaptif PIV yönteminin, yaptığı ek validasyonu vektörleriyle ortalama korelasyon ve çapraz korelasyon analiz yöntemlerine göre daha doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir. V/V_{rms} akış haritaları incelendiğinde jetlerin kidney vortisleri ve resirkülasyon bölgelerinde akış aşağı hareket ettiğini ve $-V$ değerleri çıkacaktır. U/U_{rms} akış haritaları incelendiğinde jetlerin resirkülasyon bölgelerinde ters akışlarla aksel yöne aykırı yönde hareket edip $-U$ değerleri oluşmasını sağladığı gözlemlenmiştir.

Slot, film ve dilüsyon hibrit plaka ölçümlerinde aksel ısıl etkinlik oranları açısından bakıldığında en etkin üfleme oranları efüzyon plakası için 0.24 kg/dak, dilüsyon plakası için de 0.35 kg/dak üfleme oranlarına denk gelen test koşullarında oluşmuştur. Bu da yüksek üfleme oranlarında jetlerin plakaya tutunmak yerine jet akış yukarı mekanizmasıyla yukarı çıkma ve ana akımla karşılaşmasından kaynaklanır. Jet akış yukarı hareket plaka üzerindeki oluşan film tabaka yapısını olumsuz etkiler. Bu etki HAD analizlerinde simetri düzleminden alınan sıcaklık konturleri ve deneysel olarak ölçülen tüm plaka film etkinlik oranlarınca da teyit edilmiştir.

Tünel akışına yandan baktığımızda kidney vortisleri gözlemlenemez. Zıt Yönlü Vorteks Çiftlerinin (CRVP) PIV ile gözlemlenmesi deney düzeneği açısından imkânsızdır. Bunun için kameranın akış kesiti yönünde konulması gerekir. Tohumlayıcı direkt olarak kamera üzerine geleceğinden ve tohumlayıcı olmadan ölçümler alınamayacağından ve bu ölçümlerin deneysel olarak gözlemlenmesinin tek çözümü Stereo PIV ile 3. komponenti istatistiksel korelasyonlarla çıkaran yöntemi kullanmaktır.

RANS türbülans modellerinden transition k-kl- ω yaklaşımı ile edilen sonuçlar jet çıkışlarında düşük Reynolds Sayılarında (efüzyon delik çıkışları) gayet tutarlı sonuçlar vermiştir. Bu nedenle hem düşük Reynolds Sayısı hem de termal çalışılan rüzgar tünellerinde Transition k-kl- ω yaklaşım modelinin kullanımının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

7.2. Öneriler

İki boyutlu PIV’de sadece kameranın baktığı alan için x-y koordinatlarına bağlı olarak u hızı, v hız, vektör haritası, diğer skaler büyüklükler (vektör şiddeti, türbülans yoğunluğu, çarpıklık, basıklık, varyans vb.) ve skaler türevler Du/dx , Dv/dy , Du/dy , Dv/dx , vortisite, diverjans, kayma gerilmesi, girdap gücü, lambda vb. değerler elde edilebilir. Fakat 3. hız bileşeni eksik olacağından 3 boyutlu akış çalışmaları için kalibrasyonu ve deneysel uygulaması daha zor olan Stereo PIV (2D3C) kullanılabilir. Böylece üçüncü hıza ait hız büyüklükleri ve türevleriyle beraber xz ve yz eksenleri için de akış analizleri yapılabilir.

140 mm’lik kare kesitli mevcut deney düzeneğinde en yüksek üfleme oranında nerdeyse jet çeyrek tavan yüksekliğine kadar çıkacağından ve dilüsyon jetinin efüzyon jetlerine göre tüm akış alanını domine ettiğinden ötürü dilüsyon etkilerinin daha sağlıklı ve tümünden incelenmesi için ölçek olarak daha büyük ölçekte test kesiti olan rüzgar tünelleri kullanılmalıdır. Bu da daha büyük fan gücü ve laboratuvar alanı olduğundan devam çalışmalar için ölçekleme yapılacaksa daha maliyetli ve dilüsyon etkilerinin de sağlıklı incelendiği bir optik hava tüneli kurulabilir.

PIV uygulamalarında en zahmetli şey şüphesiz tohumlayıcı debisini ve düzgün dağılımını sağlamaktır. Tohumlayıcılar da pahalı olduğu için ve testler bittikten sonra geri dönüşmediği için testlerin kapalı çevrim rüzgar tünellerinin optik test kısmında yapılması tohumlayıcı israfını önleyeceği gibi akış regüle eden kanatçıklar da tohumlayıcının üniform dağılmasını sağlayarak yüksek korelasyonda ve sinyal/gürültü oranlarında imaj alınma ve gerçeğe yakın akış alanı haritalama olanağını güçlendirir.

Açık çevrim hava tünellerinde tünel akış kesiti yönünde tohumlayıcı da direkt olarak kameraya çarpacağından ve tohumlayıcı olmadan da PIV ile ölçümler alınamayacağından ve bu ölçümlerin deneysel olarak gözlemlenmesinin tek çözümü Stereo PIV metodu (3. Hız bileşenini istatistiksel korelasyonlar çıkaran yöntem) ya da direkt olarak 3. bir kamera ve Hacimsel PIV (Volumetric PIV) yazılım eklentisi alıp deneyleri bu sistemlerde tekrarlamaktır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde çözüm modeli olarak kullanılan RANS modellerin akış ortalamasına ait değerlerde çözüm yapacağından RANS dışında zamana bağlı değişken çözüm olanağı sunan ve daha gerçekçi benzetim olanağı sunan LES ile deney düzeneği sonuçlarının karşılaştırmalı olarak doğrulaması yapılabilir.

KAYNAKÇA

- Abramovich, G. N. (1963). *General properties of turbulent jets*. MIT press.
- Adrian, R. J., & Westerweel, J. (2011). *Particle image velocimetry (No. 30)*. Cambridge University Press.
- Ahn, J., Jung, I. S., & Lee, J. S. (2003). Film cooling from two rows of holes with opposite orientation angles: injectant behavior and adiabatic film cooling effectiveness. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24(1), 91-99.
- Ai, D., Ding, P. P., & Chen, P. H. (2001). The selection criterion of injection temperature pair for transient liquid crystal thermography on film cooling measurements. *International Journal of Heat and mass transfer*, 44(7), 1389-1399.
- Ammari, H. D., Hay, N., & Lampard, D. (1990) The effect of density ratio on the heat transfer coefficient from a film-cooled flat plate. *Journal of Turbomachinery*, 112(3), 444-450.
- Ammari, H. D., Hay, N., & Lampard, D. (1990). Effect of acceleration on the heat transfer coefficient on a film cooled surface. In *ASME 1990 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition* (pp. V004T09A001-V004T09A001). American Society of Mechanical Engineers.
- Andrei, L., Andreini, A., Bianchini, C., Caciolli, G., Facchini, B., Mazzei, L., & Turrini, F. (2014). Effusion cooling plates for combustor liners: Experimental and numerical investigations on the effect of density ratio. *Energy Procedia*, 45, 1402-1411.
- Andrei, L., Andreini, A., Bianchini, C., Facchini, B., Mazzei, L., & Turrini, F. (2015). Investigation on the Effect of a Realistic Flow Field on the Adiabatic Effectiveness of an Effusion-Cooled Combustor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(5), 051501.
- Andreini, A., Bonini, A., Caciolli, G., Facchini, B., & Taddei, S. (2011). Numerical study of aerodynamic losses of effusion cooling holes in aero-engine combustor liners. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133(2), 021901.
- Andreini, A., Caciolli, G., Facchini, B., & Tarchi, L. (2013). Experimental evaluation of the density ratio effects on the cooling performance of a combined slot/effusion combustor cooling system. *ISRN Aerospace Engineering*, 2013.
- Andreini, A., Caciolli, G., Facchini, B., Picchi, A., & Turrini, F. (2015). Experimental investigation of the flow field and the heat transfer on a scaled cooled combustor liner with realistic swirling flow generated by a lean-burn injection system. *Journal of Turbomachinery*, 137(3), 031012.

- Andreini, A., Facchini, B., Picchi, A., Tarchi, L., & Turrini, F. (2014). Experimental and theoretical investigation of thermal effectiveness in multiperforated plates for combustor liner effusion cooling. *Journal of Turbomachinery*, 136(9), 091003.
- Andreopoulos, J., & Rodi, W. (1984). Experimental investigation of jets in a crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*, 138, 93-127.
- Arcangeli, L., Facchini, B., Surace, M., & Tarchi, L. (2008). Correlative analysis of effusion cooling systems. *Journal of Turbomachinery*, 130(1), 011016.
- Azwadi, N., & Kianpour, E. (2014). The Effect of Blowing Ratio on Film Cooling Effectiveness Using Cylindrical and Row Trenched Cooling Holes with Alignment Angle of 90 Degrees. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- Baheri, S., Tabrizi, S. A., & Jubran, B. A. (2008). Film cooling effectiveness from trenched shaped and compound holes. *Heat and Mass Transfer*, 44(8), 989-998.
- Baldauf, S. A., Scheurlen, M., Schulz, A., & Wittig, S. (2002). Correlation of film cooling effectiveness from thermographic measurements at engine like conditions. In *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air* (pp. 149-162). American Society of Mechanical Engineers.
- Barringer, M. D. (2001). *Design and benchmarking of a combustor simulator relevant to gas turbine engines*.
- Behrendt, T., & Hassa, C. (2008). A test rig for investigations of gas turbine combustor cooling concepts under realistic operating conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: *Journal of Aerospace Engineering*, 222(2), 169-177.
- Bell, C. M., Hamakawa, H., & Ligrani, P. M. (2000). Film cooling from shaped holes. *Journal Of Heat Transfer*, 122(2), 224-232.
- Bidan, G., Vézier, C., & Nikitopoulos, D. E. (2013). Study of Unforced and Modulated Film-Cooling Jets Using Proper Orthogonal Decomposition—Part I: Unforced Jets. *Journal of Turbomachinery*, 135(2), 021037.
- Bolchoz, T., Nasir, S., Reagle, C., Ng, W., & Moon, H. K. (2009). An experimental investigation of showerhead film cooling performance in a transonic vane cascade at low and high freestream turbulence. In *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air* (pp. 691-703). American Society of Mechanical Engineers.
- Bons, J. P., MacArthur, C. D., and Rivir, R.B., (1996) “The Effect of High Freestream Turbulence on Film Cooling Effectiveness,” *ASME J. Turbomachinery*, 118, pp. 814-825.
- Bons, J. P., McClain, S. T., (2004) “The Effect of Real Turbine Roughness with Pressure Gradient on Heat Transfer,” *J. of Turbomachinery*, 126, pp. 385-394.

- Boyle, R. J., and Senyitko, R. G., (2003) "Measurements and Predictions of Surface Roughness Effects on Turbine Vane Aerodynamics," *ASME Paper No. GT2003-3858*.
- Brittingham, R.A. J.H. Leylek, (2002) "A detailed analysis of film cooling physics: Part IV—compound-angle injection with shaped holes", *ASME J. Turbomachinery* 122 133-145.
- Bunker, R.S., (2010) "Film Cooling: Breaking the Limits of Diffusion Shaped Holes," *Heat Transfer Research*, v. 41, pp. 627-650.
- Burd, S. W., Kaszeta, R. W., & Simon, T. W. (1998). Measurements in film cooling flows: hole L/D and turbulence intensity effects. *Journal of Turbomachinery*, 120(4), 791-798.
- Busche, M.L., Kingery, J.E., and Ames, F.E., (2014) "Slot Film Cooling in an Accelerating Boundary Layer with High Free-stream Turbulence," *ASME Paper No. GT2014-25360*.
- Cardwell, N. D., Sundaram, N., & Thole, K. A. (2006). Effect of midpassage gap, endwall misalignment, and roughness on endwall film-cooling. *Journal of Turbomachinery*, 128(1), 62-70.
- Ceccherini, A., Facchini, B., Tarchi, L., Toni, L., & Coutandin, D. (2009). Combined effect of slot injection, effusion array and dilution hole on the cooling performance of a real combustor liner. In *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air* (pp. 1431-1440). American Society of Mechanical Engineers.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). *Thermodynamics (in SI Units): An Engineering Approach*.
- Chen, P. H., Hung, M. S., and Ding, P. P., (2001) "Film Cooling Performance on Curved Walls with Compound Angle Hole Configuration," *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 934, pp. 353–360.
- Cho, H. H., Rhee, D. H., & Goldstein, R. J. (2008). Effects of hole arrangements on local heat/mass transfer for impingement/effusion cooling with small hole spacing. *Journal of Turbomachinery*, 130(4), 041003.
- Cho, H. H., Rhee, D. H., & Kim, B. G. (2001). Enhancement of Film Cooling Performance Using a Shaped Film Cooling Hole with Compound Angle Injection. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 44(1), 99-110.
- Coulthard, S.M., Volino, R.J., and Flack, K.A., (2007) "Effect of Jet Pulsing on FilmCooling – Part I: Effectiveness and Flow-Field Temperature Results," *Journal ofTurbomachinery*, Vol. 129 pp 232 – 246.

- Cruz, C. A. (2008). *Experimental and numerical characterization of turbulent slot film cooling*. PhD Dissertation, University of Maryland at College Park.
- Dabiri, D. (2006). Cross-correlation digital particle image velocimetry—a review. *Turbulencia*. ABCM, Curitiba, 155-199.
- Dhungel, A., Lu, Y., Phillips, W., Ekkad, S. V., & Heidmann, J. (2009). Film cooling from a row of holes supplemented with antivortex holes. *Journal of Turbomachinery*, 131(2), 021007.
- Dittmar, J., Schulz, A., & Wittig, S. (2002). Assessment of various film cooling configurations including shaped and compound angle holes based on large scale experiments. In *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air* (pp. 109-118). American Society of Mechanical Engineers.
- Drost, U., Bölcs, A., & Hoffs, A. (1997). Utilization of the transient liquid crystal technique for film cooling effectiveness and heat transfer investigations on a flat plate and a turbine airfoil. In *ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition* (pp. V003T09A006-V003T09A006). American Society of Mechanical Engineers.
- DynamicStudio User's Guide 2015a (2015) *Dantec Dynamics A/S*, Denmark.
- Ekkad, S. V., Zapata, D., & Han, J. C. (1997). Film effectiveness over a flat surface with air and CO₂ injection through compound angle holes using a transient liquid crystal image method. *Journal of Turbomachinery*, 119(3), 587-593.
- Ekkad, S., Mehendale, A., Han, J., and Lee, C., (1997) "Combined Effect of Grid Turbulence and Unsteady Wake on Film Effectiveness and Heat Transfer Coefficient of a Gas Turbine Blade With Air and CO₂ Film Injection," *Journal of Turbomachinery*, 119, pp. 594-600.
- El-Jumamah, A. M. (2014). *Impingement and impingement/effusion cooling of gas turbine components: conjugate heat transfer predictions* (Doctoral dissertation, University of Leeds).
- Ethridge, M. I., Cutbirth, J. M., and Bogard, D. G., (2001) "Scaling of Performance for Varying Density Ratio Coolants on an Airfoil with Strong Curvature and Pressure Gradient Effects," *Journal of Turbomachinery*, 123, pp. 231-23.
- Facchini, B., Tarchi, L., Toni, L., Cinque, G., & Colantuoni, S., (2009) Investigation of Circular and Shaped Effusion Cooling Arrays for Combustor Liner Application—Part 1: Experimental Analysis. In *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air* (pp. 1409-1418). American Society of Mechanical Engineers.
- Florenciano, J. L., & Bruel, P. (2016). LES fluid–solid coupled calculations for the assessment of heat transfer coefficient correlations over multi-perforated walls. *Aerospace Science and Technology*, 53, 61-73.
- Fluent, A. (2015). Theory Guide and User's Guide. *Ansys Inc*, USA.

- Funazaki, K. I., Nakata, R., Kawabata, H., Tagawa, H., & Horiuchi, Y. (2014, June). Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Devices: Part I—Investigations on Capability of a Base-Type Device. In *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition* (pp. V05BT13A023-V05BT13A023). American Society of Mechanical Engineers.
- Gao, Z. (2007). *Experimental investigation of film cooling effectiveness on gas turbine blades*, Doctoral dissertation, Texas A&M University).
- Gharib M., and Dabiri, D. (2000) “Digital Particle Image Velocimetry”, *Flow Visualization, Techniques and Examples*, Ed. Smits A.J. and Lim T.T., Imperial College Press, Singapore.
- Ghorab, M. G. (2011). Adiabatic and conjugate cooling effectiveness analysis of a new hybrid scheme. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(6), 965-983.
- Goldstein, R. J., & Jin, P. (2000). Film cooling downstream of a row of discrete holes with compound angle. In *ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air* (pp. V003T01A054-V003T01A054). American Society of Mechanical Engineers.
- Goldstein, R. J., Eckert, E. R. G., & Burggraf, F. (1974). Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 17(5), 595-607.
- Greiner, N. J. (2014). *Convective Heat Transfer with and without Film Cooling in High Temperature, Fuel Rich and Lean Environments* (No. Afit-Eny-Ds-14-S-28). Air Force Institute Of Technology Wright-Patterson Afb Oh Graduate School Of Engineering And Management.
- Grierson, M. (2004.) *Non-adiabatic Effusion Cooling Performance of Laser Drilled Test Plates Using Infrared Thermography*.
- Gritsch, M., Martiny, M., Schulz, A., Kim, S., & Wittig, S. (1998). Gas Turbine Heat Transfer: Newest Developments in Components Performance. In *Proceedings of Heat Transfer 1998: Proceedings of the 11th International Heat Transfer Conference (IHTC)* (pp. 23-28).
- Gritsch, M., Schulz, A., & Wittig, S. (1997). Adiabatic wall effectiveness measurements of film-cooling holes with expanded exits. In *ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition* (pp. V003T09A029-V003T09A029). American Society of Mechanical Engineers.
- Gustafsson, K. B. (2001). *Experimental studies of effusion cooling*. Chalmers University of Technology.
- Haven, B. A., & Kurosaka, M. (1997). Kidney and anti-kidney vortices in crossflow jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 352, 27-64.

- Hayes, S. A. (2014). *An experimental investigation on the effects of freestream turbulence intensity on film cooling effectiveness and heat transfer coefficient for an anti-vortex hole.*
- Heidmann, J. D., Kassab, A. J., Divo, E. A., Rodriguez, F., & Steinthorsson, E. (2003). Conjugate heat transfer effects on a realistic film-cooled turbine vane. In ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference (pp. 361-371). *American Society of Mechanical Engineers.*
- Hong, S. K., Rhee, D. H., & Cho, H. H. (2007). Effects of Fin Shapes and Arrangements on Heat Transfer for Impingement/ Effusion Cooling with Crossflow. *Journal of heat transfer*, 129(12), 1697-1707.
- Ito, S., Goldstein, R., and Eckert, E., (1977) "Film Cooling of a Gas Turbine Blade," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 113, pp. 476-481
- Itzel, G. M. (2008). *U.S. Patent Application No. 12/054,535.*
- Jabbari, M. Y., & Goldstein, R. J. (1978). Adiabatic wall temperature and heat transfer downstream of injection through two rows of holes. *Journal of Engineering for Power*, 100(2), 303-307.
- Jackson, D. J., Lee, K. L., Ligrani, P. M., & Johnson, P. D. (2000). Transonic aerodynamic losses due to turbine airfoil, suction surface film cooling. *Journal of turbomachinery*, 122(2), 317-326.
- Jahanmiri, M. (2011). *Particle image velocimetry: Fundamentals and its applications.* Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.
- Jenkins, S., Varadarajan, K., & Bogard, D. G. (2004). The effects of high mainstream turbulence and turbine vane film cooling on the dispersion of a simulated hot streak. *Journal of turbomachinery*, 126(1), 203-211.
- Jensen, K. D. (2004). Flow measurements. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26(4), 400-419.
- Jia, R, B Sunden, P Miron, and B Leger. (2005) " Numerical and Experimental Investigation of the Slot Film Cooling Jet with Various Angles." *Journal of Turbomachinery* 127, 635-645.
- Jia, R., Sundén, B., Miron, P., & Léger, B. (2003). Numerical and experimental study of the slot film cooling jet with various angles. In *ASME 2003 Heat Transfer Summer Conference* (pp. 845-856). American Society of Mechanical Engineers.
- Johnson, J. J. (2012). *Genetic algorithm optimization of a film cooling array on a modern turbine inlet vane* (No. Afit/Ds/Eny/12-02). Air Force Inst Of Tech Wright-Patterson Afb Oh Graduate School Of Engineering And Management.

- Johnson, R., G., (2008) “*Experimental Study of the Effect of Oscillating Stagnation Line on Overall Cooling Performance on a Leading Edge with One Row of Cooling.*”
- Jumper, G. W., Elrod, W. C., & Rivir, R. B. (1991). Film cooling effectiveness in high-turbulence flow. *Journal of Turbomachinery*, 113(3), 479-483.
- Jung, K., & Hennecke, D. K. (2003). Curvature effects on film cooling with injection through two rows of holes. Darmstadt Univ Of Technology (Germany) *Gas Turbines And Flight Propulsion*.
- Kadotani, K., and Goldstein, R.J., (1979) “On the Nature of Jets Entering a Turbulent Flow Part A–Jet-Mainstream Interaction,” *ASME J. Turbomachinery*, 101, pp. 459-465.
- Khosravy el_Hossaini, M. (2013). Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines. *Progress in Gas Turbine Performance*, 978-953.
- Kim, Y. J., & Kim, S. M. (2004). Influence of shaped injection holes on turbine blade leading edge film cooling. *International journal of heat and mass transfer*, 47(2), 245-256.
- Kingery, J. E. (2015). *An Experimental Investigaton Into the Effects of High Freestream Turbulence on Full Coverage Shaped Hole Film Cooling in an Accelerating Boundary Layer* MS Thesis.
- Koç, I. (2007). Experimental and numerical investigation of film cooling effectiveness for rectangular injection holes. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 79(6), 621-627.
- Kruse, H. (1985). Effects of hole geometry, wall curvature and pressure gradient on film cooling downstream of a single row. In *AGARD conference proceedings*(No. 390, pp. 8-1). AGARD.
- Kusterer, K., Bohn, D., Sugimoto, T., & Tanaka, R. (2007). Double-jet ejection of cooling air for improved film cooling. *Journal of Turbomachinery*, 129(4), 809-815.
- LeBlanc, C., Narzary, D. P., & Ekkad, S. (2013). Film-Cooling Performance of Antivortex Hole on a Flat Plate. *Journal of Turbomachinery*, 135(6), 061009.
- Lee, H W, J J Park, and J S Lee. (2002) "Flow Visualization and Film Cooling EffectivenessMeasurements around Shaped Holes with Compound angle Orientations." *Int.Journal of Heat and Mass Transfer* 45(1), 145-156.
- Lee, K. D., & Kim, K. Y. (2014). Film cooling performance of cylindrical holes embedded in a transverse trench. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 65(2), 127-143.

- Li, S. J., Yang, S. F., & Han, J. C. (2014). Effect of coolant density on leading edge showerhead film cooling using the pressure sensitive paint measurement technique. *Journal of Turbomachinery*, 136(5), 051011.
- Li, X. (2010). Numerical Simulation on Fluid Flow and Heat Transfer of Film Cooling with Backward Injection. In *2010 14th International Heat Transfer Conference* (pp. 257-265). American Society of Mechanical Engineers.
- Li, X., & Wang, T. (2006). Simulation of film cooling enhancement with mist injection. *Journal of Heat transfer*, 128(6), 509-519.
- Li, X., & Wang, T. (2007). Effects of various modeling schemes on mist film cooling simulation. *Journal of heat transfer*, 129(4), 472-482.
- Ligrani, P. M., Ciriello, S., & Bishop, D. T. (1992). Heat transfer, adiabatic effectiveness, and injectant distributions downstream of a single row and two staggered rows of compound angle film-cooling holes. *Journal of Turbomachinery*, 114(4), 687-700.
- Ligrani, P. M., Wigle, J. M., Ciriello, S., & Jackson, S. M. (1994). Film-Cooling From Holes With Compound Angle Orientations: Part 1—Results Downstream of Two Staggered Rows of Holes With 3d Spanwise Spacing. *Journal of Heat Transfer*, 116(2), 341-352.
- Ligrani, P., Goodro, M., Fox, M., & Moon, H. K. (2012). Full-Coverage Film Cooling: Film Effectiveness and Heat Transfer Coefficients for Dense and Sparse Hole Arrays at Different Blowing Ratios. *Journal of Turbomachinery*, 134(6), 061039.
- Lin, Y., Song, B., Li, B., Liu, G., & Wu, Z. (2003). Investigation of film cooling effectiveness of full-coverage inclined multihole walls with different hole arrangements. In *ASME Turbo Expo 2003*, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference (pp. 651-660). American Society of Mechanical Engineers.
- Liu, C. L., Zhu, H. R., Bai, J. T., & Xu, D. C. (2011). Film cooling performance of converging-slot holes with different exit-entry area ratios. *Journal of Turbomachinery*, 133(1), 011020.
- Liu, K. (2012). *Parametric Study of Gas Turbine Film-Cooling* (Doctoral dissertation, Texas A&M University).
- Liu, X., & Zheng, H. (2015). Influence of Deflection Hole Angle on Effusion Cooling in a Real Combustion Chamber Condition. *Thermal Science*, 19(2), 645-656.
- Lu, X., Jiang, P., Sugishita, H., Uechi, H., & Suenaga, K. (2006). Conjugate heat transfer analysis of film cooling flows. *Journal of Thermal Science*, 15(1), 85-91.
- Lu, Y. (2007). *Effect of hole configurations on film cooling from cylindrical inclined holes for the application to gas turbine blades* (Doctoral dissertation, Louisiana State University).

- Maiteh, B. Y., & Jubran, B. A. (2004). Effects of pressure gradient on film cooling effectiveness from two rows of simple and compound angle holes in combination. *Energy Conversion and Management*, 45(9), 1457-1469.
- Makki, Y. H., & Jakubowski, G. S. (1986). An experimental study of film cooling from diffused trapezoidal shaped holes. In *4th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference* (Vol. 1).
- Marek, C. J., & Tacina, R. R. (1975). Effect of free-stream turbulence on film cooling. *NASA Techincal Note D-7958*.
- Martiny, M., Schulz, A., & Wittig, S. (1995). Full-coverage film cooling investigations: adiabatic wall temperatures and flow visualization. *ASME paper*, (95-WA).
- Mayhew, J. E., Baughn, J. W., and Byerley, A. R., (2003) "The effects of free-stream turbulence on film cooling adiabatic effectiveness", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, No. 5, pp. 669-679.
- Mayhew, J. E., Baughn, J. W., and Byerley, A. R.,(2002) "The Effect of Freestream Turbulence on Film Cooling Adiabatic Effectiveness," *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2002*, paper GT2002-30172.
- Mayhew, J.E., Baughn, J.W., and Byerley, A.R., (2004) "The Effect of Free-Stream Turbulence on Film Cooling Heat Transfer Coefficient and Adiabatic Effectiveness using Compound Angle Holes," *ASME Paper No. GT2004-53230*.
- Mazur, Z., Hernández-Rossette, A., García-Illescas, R., & Luna-Ramírez, A. (2006). Analysis of conjugate heat transfer of a gas turbine first stage nozzle. *Applied Thermal Engineering*, 26(16), 1796-1806.
- McGhee, S. K. (2000). *Evaluation of an Uncooled Focal Plane Array Thermal Imaging Camera for Effusion Cooling Research*. National Library of Canada
- Menter, F., Ferreira, J. C., Esch, T., Konno, B., & Germany, A. C. (2003). *The SST turbulence model with improved wall treatment for heat transfer predictions in gas turbines*. In *Proceedings of the international gas turbine congress* (pp. 2-7).
- Muldoon, F., & Acharya, S. (1999). Dynamics of large-scale structures for jets in a crossflow. *Journal of turbomachinery*, 121(3), 577-587.
- Na, S., & Shih, T. I. (2007). Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp. *Journal of heat transfer*, 129(4), 464-471.
- Nadali N., H. (2015). *On Film Cooling of Turbine Guide Vanes: From Experiments and CFD-Simulations to Correlation Development* PHD Dissertations.
- Narzary, D. P. (2009). *Experimental Study of Gas Turbine Blade Film Cooling and Heat Transfer* (Doctoral dissertation, Texas A&M University).

- Narzary, D. P., Liu, K. C., Rallabandi, A. P., and Han, J. C., (2012) "Influence of Coolant Density on Turbine Blade Film-Cooling Using Pressure Sensitive Paint Technique," *Journal of Turbomachinery*, 134, pp. 031006-031015.
- Nguyen, C. Q. (2010). *Interaction Between Secondary Flow & Film Cooling Jets of a Realistic Annular Airfoil Cascade (High Mach Number)* (Doctoral dissertation, University of Central Florida Orlando, Florida).
- Oates, G. C. (1989). *Aircraft propulsion systems technology and design*. Aiaa.
- Oguntade, H. I., Andrews, G. E., Burns, A. D., Ingham, D. B., & Pourkashanian, M. (2015). The Influence the Number of Holes on Effusion Cooling Effectiveness for an X/D of 4.7. In *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition* (pp. V05AT10A002-V05AT10A002). American Society of Mechanical Engineers.
- Okita, Y., & Nishiura, M. (2007). Film effectiveness performance of an arrowhead-shaped film-cooling hole geometry. *Journal of Turbomachinery*, 129(2), 331-339.
- Ou, S., & Rivir, R. B. (2001). Leading edge film cooling heat transfer with high free stream turbulence using a transient liquid crystal image method. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 22(6), 614-623.
- Para, S. R., Li, X., & Subbuswamy, G. (2009). Numerical study of mist film cooling in combustor at operating conditions. In *ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (pp. 2179-2188). American Society of Mechanical Engineers.
- Plesniak, M. W. (2006). Noncanonical short hole jets-in-crossflow for turbine film cooling. *Journal of Applied Mechanics*, 73(3), 474-482.
- Raffan, M., F. (2016). *Slot Film Cooling: A Comprehensive Experimental Characterization* (Doctoral dissertation).
- Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S., & Kompenhans, J. (2013). *Particle image velocimetry: a practical guide*.
- Rhee, D. H., Choi, J. H., & Cho, H. H. (2003). Flow and heat (mass) transfer characteristics in an impingement/effusion cooling system with crossflow. *Journal of turbomachinery*, 125(1), 74-82.
- Rhee, D. H., Lee, Y. S., and Cho, H. H., (2002) "Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer of Rectangular-Shaped Film Cooling Holes," *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2002*, paper GT2002-30168.
- Rolls Royce. (2015). *The jet engine*. John Wiley & Sons.

- Sargison, J. E., Guo, S.' M., Oldfield, M. L. G., Lock, G. D., and Rawlinson, A. J. , (2002) "A converging slot-hole film-cooling geometry - part 1 : low-speed flat-plate heat transfer and loss", *Journal of Turbomachinery*, vol. 124, pp. 453-460.
- Saumweber, C, and A Schulz. (2004) "Interaction of Film Cooling Rows: Effects of HoleGeometry and Row Spacing on the Cooling Performance Downstream of theSecond Row of Holes." *ASME Journal of Turbomachinery* 126, 237-246.
- Saumweber, C., Schulz, A. and Wittig, S., (2003) "Free-stream turbulence effects on film cooling with shaped holes", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 125, pp. 65-73.
- Schmidt, D. L., Sen, B., & Bogard, D. G. (1996). Film cooling with compound angle holes: adiabatic effectiveness. *Journal of Turbomachinery*, 118(4), 807-813.
- Schroeder, R. P. (2015). *Influence of In-Hole Roughness and High Freestream Turbulence on Film Cooling From a Shaped Hole* .Doctoral dissertation, The Pennsylvania State University.
- Schroeder, R.P., and Thole, K.A., (2014) "Adiabatic Effectiveness Measurements for a Baseline Shaped Film Cooling Hole," *ASME Paper No. GT2014-25992*.
- Scrittore, J. (2008). *Experimental study of the effect of dilution jets on film cooling flow in a gas turbine combustor*. PhD Dissertation Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Scrittore, J. J., Thole, K. A., & Burd, S. W. (2005). Experimental characterization of film-cooling effectiveness near combustor dilution holes. In *ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air* (pp. 1339-1347). American Society of Mechanical Engineers.
- Scrittore, J. J., Thole, K. A., & Burd, S. W. (2007). Investigation of velocity profiles for effusion cooling of a combustor liner. *Journal of Turbomachinery*, 129(3), 518-526.
- Sen, B., Schmidt, D. L., & Bogard, D. G. (1996). Effects of surface roughness on film cooling. *American Society of Mechanical Engineers*
- Sen, B., Schmidt, D.L., and Bogard, D.G., (1996) "Film Cooling with Compound Angle Holes: Heat Transfer," *Journal of Turbomachinery*, vol. 118, pp. 800 – 806.
- Silieti, M. K. (2004). *Inverse Boundary Element/Genetic Algorithm Method For Reconstruction Of Multi-Dimensional Heat Flux Distributions With Film Cooling Applications*(Doctoral dissertation, University of Central Florida, Orlando, Florida).
- Simon, F.F, (1986) "Jet Model for Film Cooling With Effect of Free-Stream and Coolant Turbulence," *NASA Technical Paper* 2655.

- Sinha, A. K., Bogard, D. G., & Crawford, M. E. (1991). Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio. *Journal of Turbomachinery*, 113(3), 442-449.
- Subbuswamy, G. (2012). "Numerical and Experimental Study of Film Cooling with Backward Injection Angle", Doctoral Dissertation, Lamar University, Texas.
- Bolchoz, T., Nasir, S., Reagle, C., Ng, W., & Moon, H. K. (2009). An experimental investigation of showerhead film cooling performance in a transonic vane cascade at low and high freestream turbulence. In *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air* (pp. 691-703). American Society of Mechanical Engineers.
- Takeishi, K., Kitamura, T., Komiyama, M., Oda, Y., & Mori, S. (2009). Study on the thermal and flow fields of shaped film cooling holes. *Ichmt Digital Library Online*.
- Takeishi, K., Komiyama, M., Oda, Y., Mori, S., & Kitamura, T. (2011). Study on the thermal and flow fields of shaped film cooling holes. *Heat Transfer Research*, 42(1), 83-100.
- Tarchi, L., Facchini, B., Maiuolo, F., & Coutandin, D. (2012). Experimental investigation on the effects of a large recirculating area on the performance of an effusion cooled combustor liner. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 134(4), 041505.
- Taslim, M. E., Spring, S. D., & Mehlman, B. P. (1992). Experimental investigation of film cooling effectiveness for slots of various exit geometries. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 6(2), 302-307.
- Thole, K. A., & Knost, D. G. (2005). Heat transfer and film-cooling for the endwall of a first stage turbine vane. *International journal of heat and mass transfer*, 48(25), 5255-5269.
- Thole, K. A., Sinha, A., Bogard, D. G., & Crawford, M. E. (1992). Mean temperature measurements of jets with a crossflow for gas turbine film cooling application. *Rotating Machinery Transport Phenomena*, 69-85.
- Thole, K., Gritsch, M., Schulz, A., and Wittig, S., (1998) "Flowfield Measurements for Film-Cooling Holes with Expanded Exits," *Journal of Turbomachinery*, 120, pp. 327-335.
- Vakil, S. S., & Thole, K. A. (2003). Flow and Thermal Field Measurements in a Combustor Simulator Relevant to a Gas Turbine Aero-Engine. In *ASME Turbo Expo 2003*, collocated with the 2003 *International Joint Power Generation Conference* (pp. 215-224). American Society of Mechanical Engineers.
- Voigt, S., Noll, B., & Aigner, M. (2012). Development of a macroscopic CFD model for effusion cooling applications. In *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical*

- Conference and Exposition* (pp. 1235-1243). American Society of Mechanical Engineers.
- Walters D. K. and Cokljat D., A Three-Equation Eddy-Viscosity Model for Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations of Transitional Flow. *Journal of Fluids Engineering* 130 (2008)
- Wang T., Chintalapati S., Bunker R., and Lee CP, (2002) "Jet Mixing in a Slot," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22, pp. 1-17.
- Waye, S. K., and Bogard, D. G., (2007) "High-Resolution Film Cooling Effectiveness Measurements of Axial Holes Embedded in a Transverse Trench with Various Trench Configurations," *Journal of Turbomachinery*, 129, pp. 294-302.
- Welsh, W. E. (1961). *Review of Results of an Early Rocket-engine Film-cooling Investigation at the Jet Propulsion Laboratory*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- Westerweel, J. (1997). *Fundamentals of digital particle image velocimetry. Measurement science and technology*, 8(12), 1379.
- Wieghardt, K. (1946). *Hot-air discharge for de-icing*. Wright Field, Air Materiel Command.
- Wright, M.W., McClain, S.T., and Clemenson, M.D., (2011) "PIV Investigation of the Effect of Free-Stream Turbulence Intensity on Film Cooling from Fan-Shaped Holes," ASME Paper No. GT2011-46127.
- Wu, C. Y., & Miao, J. M. (2006). Numerical Visualization of Conjugate Heat Transfer of a Fan-Shaped Film-Cooled Concave Composite Plate. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 13(4).
- Wurm, B., Schulz, A., Bauer, H. J., & Gerendas, M. (2012). Impact of swirl flow on the cooling performance of an effusion cooled combustor liner. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 134(12), 121503.
- Xue, S., Newman, A., Ng, W., Moon, H. K., & Zhang, L. (2013). Heat transfer performance of a showerhead and shaped hole film cooled vane at transonic conditions. *Journal of Turbomachinery*, 135(3), 031007.
- Xue, S., Newman, A., Ng, W., Moon, H. K., & Zhang, L. (2013). Heat transfer performance of a showerhead and shaped hole film cooled vane at transonic conditions. *Journal of Turbomachinery*, 135(3), 031007.
- Yu, Y., Yen, C-H., Shih, T. L-P., Chyu, M. K., Gogineni, S., (2002) "Film cooling effectiveness and heat transfer coefficient distributions around diffusion shaped holes", *Journal of Heat Transfer*, Vol: 5, , pp. 820-827.

Zhang, L., Yin, J., & Moon, H. K. (2012). The Effect of Compound Angle on Nozzle Suction Side Film Cooling. In *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition* (pp. 1269-1278). American Society of Mechanical Engineers.

Zhong, F. (2007). *An experimental and DNS numerical study of multi-hole cooling*.

Zuniga, H. A., (2007) “Study of Discharged Coefficient and Trends in Film Cooling Effectiveness of Conical Holes with Increasing Diffusion Angles”, MS Thesis.

<http://www.3dmaterialtech.com/>

(Erişim Tarihi: 26. 10. 2016)

http://www.civil.ist.utl.pt/~ruif/SUMMER_SCHOOL/presentations/PIV_basics_correlation_final.pdf.

(Erişim Tarihi: 30.08.2016)

<http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>

(Erişim Tarihi: 15.08.2016)

<http://www.dantecdynamics.com/particle-image-velocimetry>

(Erişim Tarihi: 15.08.2016)

EKLER

Transition K-KI- ω Denklikleri

$$P_{k_T} = \nu_{T,s} S^2 \quad (\text{E.1.1})$$

$$P_{k_L} = \nu_{T,1} S^2 \quad (\text{E.1.2})$$

$$\nu_{T,s} = f_\nu f_{INT} C_\mu \sqrt{k_{T,s}} \lambda_{eff} \quad (\text{E.1.3})$$

$$\lambda_{eff} = \min(C_\lambda d, \lambda_T) \quad (\text{E.1.4})$$

$$k_{T,s} = f_{ss} f_w k_T \quad (\text{E.1.5})$$

$$\lambda_T = \frac{\sqrt{k_T}}{\omega} \quad (\text{E.1.6})$$

$$f_w = \left(\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_T} \right) \quad (\text{E.1.7})$$

$$f_\nu = 1 - \exp\left(-\frac{\text{Re}_T}{A_\nu}\right) \quad (\text{E.1.8})$$

$$\text{Re}_T = \frac{f_w^2 k_T}{\nu \omega} \quad (\text{E.1.9})$$

$$f_{ss} = \exp\left[-\left(\frac{C_{ss} \nu \Omega}{k_T}\right)^2\right] \quad (\text{E.1.10})$$

$$C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_s \left(\frac{S}{\omega} \right)} \quad (\text{E.1.11})$$

$$f_{INT} = \min \left(\frac{k_L}{C_{INT} k_{TOT}}, 1 \right) \quad (\text{E.1.12})$$

$$k_{T,1} = k_T - k_{T,s} \quad (\text{E.1.13})$$

$$\nu_{T,1} = \min \left\{ f_{\tau,1} C_{11} \left(\frac{\Omega \lambda_{eff}^2}{\nu} \right) \sqrt{k_{T,1}} \lambda_{eff} + \beta_{TS} C_{12} \text{Re}_{\Omega} d^2 \Omega, \frac{0.5(k_L + k_{T,1})}{S} \right\} \quad (\text{E.1.14})$$

$$\text{Re}_{\Omega} = \frac{d^2 \Omega}{\nu} \quad (\text{E.1.15})$$

$$\beta_{TS} = 1 - \exp \left(- \frac{\max(\text{Re}_{\Omega} - C_{TS,crit}, 0)}{A_{TS}} \right) \quad (\text{E.1.16})$$

$$f_{\tau,1} = 1 - \exp \left[- C_{\tau,1} \frac{k_{T,1}}{\lambda_{eff}^2 \Omega^2} \right] \quad (\text{E.1.17})$$

$$D_T = \nu \frac{\partial \sqrt{k_T}}{\partial x_j} \frac{\partial \sqrt{k_T}}{\partial x_j} \quad (\text{E.1.18})$$

$$D_L = \nu \frac{\partial \sqrt{k_L}}{\partial x_j} \frac{\partial \sqrt{k_L}}{\partial x_j} \quad (\text{E.1.19})$$

$$\alpha_T = f_{\nu} C_{\mu,std} \sqrt{k_{T,s}} \lambda_{eff} \quad (\text{E.1.20})$$

$$f_{\omega} = 1 - \exp \left[-0.41 \left(\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_T} \right)^4 \right] \quad (\text{E.1.21})$$

$$R_{BP} = \frac{C_R \beta_{BP} k_L \omega}{f_W} \quad (\text{E.1.22})$$

$$R_{NAT} = C_{R,NAT} \beta_{NAT} k_L \Omega \quad (\text{E.1.23})$$

$$\beta_{BP} = 1 - \exp \left(-\frac{\phi_{BP}}{A_{BP}} \right) \quad (\text{E.1.24})$$

$$\phi_{BP} = \max \left[\left(\frac{k_T}{\nu \Omega} - C_{BP,crit} \right), 0 \right] \quad (\text{E.1.25})$$

$$\beta_{NAT} = 1 - \exp \left(-\frac{\phi_{NAT}}{A_{NAT}} \right) \quad (\text{E.1.26})$$

$$\phi_{NAT} = \max \left[\text{Re}_{\Omega} - \frac{C_{NAT,crit}}{f_{NAT,crit}}, 0 \right] \quad (\text{E.1.27})$$

$$f_{NAT,crit} = 1 - \exp \left(-C_{NC} \frac{k_L d}{\nu} \right) \quad (\text{E.1.27})$$

EK-Tablo E.1. *K-kl-Omega Türbülans Model Sabitleri*

$A_0 = 4.04$	$C_{INT} = 0.75$	$C_{\omega 1} = 0.44$
$A_S = 2.12$	$C_{TS,crit} = 1000$	$C_{\omega 2} = 0.92$
$A_v = 6.75$	$C_{R,NAT} = 0.02$	$C_{\omega 3} = 0.3$
$A_{BP} = 0.6$	$C_{11} = 3.4 \times 10^{-6}$	$C_{\omega R} = 1.5$
$A_{NAT} = 200$	$C_{12} = 1.0 \times 10^{-10}$	$C_{\lambda} = 2.495$
$A_{TS} = 200$	$C_R = 0.12$	$C_{\mu,std} = 0.09$
$C_{BP,crit} = 1.2$	$C_{\alpha,\theta} = 0.035$	$Pr_{\theta} = 0.85$
$C_{NC} = 0.1$	$C_{SS} = 1.5$	$\sigma_k = 1$
$C_{NAT,crit} = 1250$	$C_{\tau,1} = 4360$	$\sigma_{\omega} = 1.17$