GAZ TÜRBİNİ SOĞUTMA KANALLARINDA RİB KULLANIMININ AKIŞ YAPISINA VE ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Doktora Tezi

Yasin ŞÖHRET

Eskişehir, 2017

GAZ TÜRBİNİ SOĞUTMA KANALLARINDA RİB KULLANIMININ AKIŞ YAPISINA VE ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Yasin ŞÖHRET

DOKTORA TEZİ

Uçak Gövde-Motor Bakım Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hikmet KARAKOÇ

Eskişehir
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Ocak, 2017

Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1508F594 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Yasin ŞÖHRET'in "GAZ TÜRBİNİ SOĞUTMA KANALLARINDA RİB KULLANIMININ AKIŞ YAPISINA ve ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL ve SAYISAL YÖNTEMLERLE 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 Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı-Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ	
Üye	Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ	
Üye	Doç. Dr. Can Özgür ÇOLPAN	
Üye	Doç. Dr. Emin AÇIKKALP	
Üye	Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ	

Enstitü Müdürü

ÖZET

GAZ TÜRBİNİ SOĞUTMA KANALLARINDA RİB KULLANIMININ AKIŞ YAPISINA VE ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Yasin ŞÖHRET

Uçak Gövde-Motor Bakım Anabilim Dalı
Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak, 2017

Danışman: Prof. Dr. Hikmet KARAKOÇ

Geçmişten günümüze gaz türbinli motorların verimini artırmak her zaman hedeflenen bir nokta ve üzerine çalışan bir konu olmuştur. Gaz türbinli motor teorisinden de bilindiği üzere gaz türbini giriş sıcaklığı, motorun veriminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenledir ki yanma sonu gazların sıcaklığını artırmaya yönelik çalışmalar gaz türbin soğutma teknolojilerinde de ilerleme sağlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında türbin kanatçığı iç soğutma yöntemlerinden olan rib dizili soğutma kanalı ele alınmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analiz edilen soğutma kanalı ayrıca deneysel yöntemlerle de incelenmiştir. Kanal içerisindeki akış yapısı parçacık görüntülemeyle hız ölçümü (PIV) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinden alınan sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasının bir diğer amacı ise akış yapısını ortaya koyarken riblerden kaynaklı oluşan türbülanslı akış neticesinde oluşan ısı geçişi mekanizmalarını da irdelemektir. RANS türbülans modellerinden k-ω yaklaşımı ile edilen sonuçlar deneysel veriler ile tutarlılık göstermektedir. Bu nedenle rib dizili kanallar içerisindeki fiziksel olayların çözümlemesinde k-ω türbülans modelinin kullanımı uygun bulunmuştur. Diğer yandan, akış içerisinde hız dağılımının ani değişim gösterdiği veya türbülansın yoğun olduğu akışların parçacık görüntülemeyle hız ölçümü yapılırken alınan verilerin işlenmesi için uyarlanabilir PIV yönteminin daha doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Yüksek hızlarda gerçekleşen akışlardaki rib kullanımı için rib adımı tanımı gözen geçirilmelidir. Rib adımı ile rib yüksekliği arasındaki oran artırılmalı ve rib adımı büyütülmelidir. Yüksek hızlarda gerçekleşen akışlarda soğutma yüzeyinde kış bozulmalarının meydana gelmesi için rib engelleme oranı büyük olacak soğutma kanalı tasarımı yapılması önerilmektedir. Bu tez sonucunda elde edilen sonuçların ulusal bilgi birikimine doğrudan ve ülkemizin 2023 hedefleri arasında yer alan yerli ve milli hava aracı ve güç sistemi geliştirme hedeflerine dolaylı olarak katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Gaz türbin soğutma, PIV, Deneysel, Rib, CFD

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND NUMERICAL EVALUATION OF THE RIB APPLICATION IMPACT ON FLOW STRUCTURE AND HEAT TRANSFER WITHIN A GAS TURBINE COOLING PASSAGE

Yasin ŞÖHRET

Airframe Maintenance Department
Anadolu University, Graduate School of Sciences, January, 2017

Supervisor: Prof. Dr. Hikmet KARAKOÇ

From past to the present, enhancing efficiency of aircraft gas turbine engines has been the main goal and hot topic. As known on the basis of gas turbine theory, turbine inlet temperature plays a vital role on engine overall efficiency. Within the scope of this thesis research, rib turbulated cooling passage as one of the turbine blade cooling methods is discussed. Cooling passage is not only analyzed by means of computational fluid dynamics but also investigated experimentally. Flow field through the passage is evaluated using particle image velocimetry. Results obtained from experiments are benefited to compare and validate CFD results. Another objective of the current study is evaluating heat transfer process linked to turbulent flow in addition to presenting flow field within the passage. Results obtained from numerical analysis using k-ω turbulence model as one of the RANS turbulence model agree with experimental data. So, k-ω turbulence model is found to be useful to analyze physical phenomena within the rib roughed cooling passages. On the other hand adaptive PIV approach being used to data processing yields better results under instant velocity alternation or turbulent flow conditions. At high velocities, definition of pitch should be revised. Pitch to rib height ratio must be increased or pitch value should be enhanced. For high velocities design of cooling passages with high blockage ratio is recommended. Results presented in the end of this thesis are thought to contribute national knowledge accumulation directly and development of indigenous and national aerial vehicle and its power system goal as one of the 2023 goals of Turkey implicitly.

Keywords: Gas turbine cooling, PIV, Experimental, Rib, CFD

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimi, akademik kültürün kazanıldığı ve bu yolda devam edecek kişilerin hayatının dönüm noktalarından birisidir. Her süreç gibi doktora öğreniminin de kendi özgü zorlukları olması kişinin gelişimine hayati öneme sahip bir katkı sağlar. Ancak doğru yönlendirme ve sürecin başarıyla sonuçlandırılması yalnızca profesyonel ve örnek alınabilecek niteliklere sahip birisinin yol göstermesiyle mümkündür.

Lisans öğrenimimin devam ettiği dönemlerden bu yana bana başta akademik kültürü ve araştırma becerisini kazanmamda olmak üzere pek çok yönden katkı ve emek veren, süreç boyunca yaşadığım zorlukların üstesinden gelebilmem için moral ve motivasyon sağlayan değerli hocam Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince benimle fikir ve görüşlerini paylaşarak ufkumu açan hocalarım Doç. Dr. M. Ziya SÖĞÜT, Doç. Dr. Can Özgür ÇOLPAN, Doç. Dr. Emin AÇIKKALP, Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ ve Yrd. Doç. Dr. Işıl YAZAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması kapsamında laboratuvar kurulumunda görev alan ve teknik destek sağlayarak bu tez çalışmasının ilerlemesine katkı sağlayan Anadolu Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi teknik personellerine ve Evren Yılmaz YAKIN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana destek olan, moral ve motivasyonumu yüksek tutmamda yardımcı olan arkadaşlarım Seyhun DURMUŞ, Selçuk EKİCİ, Sefa YILMAZTÜRK ve Bora ÖÇAL'a teşekkür ederim.

Ve elbette bugünlere gelmemi sağlayan, bu süreçte her zaman yanımda olan ve hayatım boyunca her konuda destek oldukları için aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2017, Eskişehir

02/01/2017

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.

(İmza)

Yasin ŞÖHRET

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
BAŞLIK SAYFASI	**i**
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	**ii**
ÖZET	**iii**
ABSTRACT	**iv**
TEŞEKKÜR	**v**
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	**vi**
İÇİNDEKİLER	**vii**
TABLOLAR DİZİNİ	**ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ	**x**
GÖRSELLER DİZİNİ	**xv**
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	**xvi**
1. GİRİŞ	**1**
1.1. Gaz Türbinlerinde Soğutma Teknolojileri	**2**
1.2. Rib Dizili Soğutma Yöntemi	**4**
1.3. Önceki Çalışmalar	**6**
1.4. Tezin Yapısı ve Önemi	**11**
2. SOĞUTMA KANALININ MODELLENMESİ	**12**
2.1. Rib Dizili Soğutma Kanalı Tasarımına Etki Eden Değişkenler	**12**
2.2. Boyutsuz Sayılar ve Benzerlik Analizi	**15**
2.3. Rib Dizili Soğutma Kanalının Modellenmesi	**17**
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZLERİ	**19**
3.1. Sınır Koşulları	**20**
3.2. Ağ Oluşturma	**21**
3.3. Sayısal Model	**22**
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	**24**
4.1. Deney Sistemi Tasarımı ve Kurulumu	**24**
4.2. Sistem İşletim Koşulları	**31**
4.3. PIV Yöntemi	**32**
4.3.1. Veri işleme yöntemleri	**34**
4.4. Sıcaklık, Basınç ve Hız Ölçümü	**36**

Sayfa

5. BULGULAR ve TARTIŞMA ……...…... 39

5.1. U= 2 m.s^{-1} Şartlarında Elde Edilen Bulgular ……... 39

5.2. U= 4 m.s^{-1} Şartlarında Elde Edilen Bulgular ……... 49

5.3. U= 6 m.s^{-1} Şartlarında Elde Edilen Bulgular ……... 57

5.4. U= 8 m.s^{-1} Şartlarında Elde Edilen Bulgular ……... 65

5.5. U= 10 m.s^{-1} Şartlarında Elde Edilen Bulgular ……. 73

6. SONUÇ ve ÖNERİLER ……...……..... 82

KAYNAKÇA ……...……...…….. 83

ÖZGEÇMİŞ

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Radyal fanın teknik özelikleri **……...……...** 26

Tablo 4.2. Deneysel çalıştırma şartları **……...……...……** 33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Gaz türbin kanatçıklarında kullanılan soğutma yöntemleri…….. 3
Şekil 1.2. Rib dizili bir soğutma kanalında oluşan akış yapısı …… 5
Şekil 2.1. Rib adımının akış yapısına etkisi..... 13
Şekil 2.2. Başlıca rib yerleşimlerinin şematik gösterimi..... 14
Şekil 2.3. Soğutma kanalına ait teknik resim..... 18
Şekil 2.4. Soğutma kanalına ait katı model..... 19
Şekil 3.1. Soğutma kanalı modeline ait ağ yapısı..... 23
Şekil 4.1. Deney sistemi şematik gösterimi..... 27
Şekil 4.2. Isıtıcı plaka yerleşimi..... 27
Şekil 4.3. PIV çalışma prensibi..... 34
Şekil 5.1. U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası..... 41
Şekil 5.2. U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarında PIV ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası..... 41
Şekil 5.3. U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarında incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası..... 42
Şekil 5.4. U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarında PIV ile elde edilmiş –x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 44
Şekil 5.5. U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarında PIV ile elde edilmiş –y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 44
Şekil 5.6. U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı..... 45
Şekil 5.7. U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarında PIV ile elde edilmiş girdaplılık oranı dağılımı..... 45
Şekil 5.8. U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarında PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı..... 46
Şekil 5.9. U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı..... 47

Sayfa

Şekil 5.10. U= 2 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı..... 48

Şekil 5.11. U= 2 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı..... 49

Şekil 5.12. U= 2 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi..... 49

Şekil 5.13. U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası..... 50

Şekil 5.14. U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası..... 51

Şekil 5.15. U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası..... 51

Şekil 5.16. U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 53

Şekil 5.17. U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 53

Şekil 5.18. U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı..... 54

Şekil 5.19. U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş girdaplılık oranı dağılımı..... 54

Şekil 5.20. U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı..... 55

Şekil 5.21. U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı..... 56

Şekil 5.22. U= 4 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı..... 57

Şekil 5.23. U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı 57

Sayfa

Şekil 5.24. U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi..... 58

Şekil 5.25. U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası..... 59

Şekil 5.26. U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası..... 59

Şekil 5.27. U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası..... 60

Şekil 5.28. U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 61

Şekil 5.29. U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 61

Şekil 5.30. U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı..... 62

Şekil 5.31. U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş girdaplılık oranı dağılımı..... 62

Şekil 5.32. U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı..... 63

Şekil 5.33. U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı..... 64

Şekil 5.34. U= 6 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı..... 64

Şekil 5.35. U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı..... 65

Şekil 5.36. U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi..... 66

Şekil 5.37. U= 8 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası..... 67

Sayfa

Şekil 5.38. U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası..... 67

Şekil 5.39. U= 8 m.s^{-1} şartlarında HAD ile incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası..... 68

Şekil 5.40. U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş–x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 69

Şekil 5.41. U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş–y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 69

Şekil 5.42. U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı..... 70

Şekil 5.43. U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş girdaplılık oranı dağılımı..... 70

Şekil 5.44. U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı..... 71

Şekil 5.45. U= 8 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı..... 72

Şekil 5.46. U= 8 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı..... 72

Şekil 5.47. U= 8 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı..... 73

Şekil 5.48. U= 8 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi..... 74

Şekil 5.49. U= 10 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası..... 75

Şekil 5.50. U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası..... 75

Sayfa

Şekil 5.51. U= 10 m.s^{-1} şartlarında incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası..... 76

Şekil 5.52. U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 77

Şekil 5.53. U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı..... 77

Şekil 5.54. U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı..... 78

Şekil 5.55. U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş girdaplılık oranı dağılımı..... 78

Şekil 5.56. U= 10 m.s^{-1} şartlarında incelenen rib için PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı..... 79

Şekil 5.57. U= 10 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı..... 80

Şekil 5.58. U= 10 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı..... 80

Şekil 5.59. U= 10 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı..... 81

Şekil 5.60. U= 10 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi..... 82

Şekil 0.1. Akış hızı değişimine bağlı olarak rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi..... 82

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 4.1. Radyal fan..... 25

Görsel 4.2. Fan sürücüsü..... 26

Görsel 4.3. Soğutma kanalı boyama uygulaması..... 28

Görsel 4.4. PIV lazer güç kaynağı..... 28

Görsel 4.5. Görüntü almada kullanılan kamera ve üç eksenli hareket sistemi.....

Görsel 4.6. Veri toplama sistemi..... 31

Görsel 4.7. Görüntü kalibrasyon plakası..... 32

Görsel 4.8. Soğutma kanalı taban yüzeyinde ısıl çift uygulaması..... 38

Görsel 4.9. Termal kamera uygulaması..... 38

Görsel 4.10. Kullanılan toplam ve statik basınç probları..... 39

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\mathbf{C_f}$	:	Yüzey sürtünmesi
$\mathbf{c_p}$	:	Sabit basınç altındaki özgül ısı ($kJ.kg^{-1}.K^{-1}$)
D	:	Çap (m)
$\mathbf{D_h}$	:	Hidrolik çap (m)
E	:	Enerji (kJ)
h	:	Isı taşınım katsayısı ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
HAD	:	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
k	:	Isı iletim katsayısı ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Nu	:	Nusselt sayısı
$\mathbf{Nu_0}$	:	Pürüzsüz akışın Nusselt sayısı
P	:	Basınç (Pa)
PIV	:	Parçaçık görüntülemeyle hız ölçümü
Pr	:	Prandtl sayısı
Re	:	Reynolds sayısı
T	:	Sıcaklık (K)
t	:	Zaman (s)
U	:	Akış hızı ($m.s^{-1}$)
u	:	Akış hızının –x bileşeni ($m.s^{-1}$)
α	:	Isı yayınım katsayısı ($m^2.s^{-1}$)
μ	:	Dinamik viskozite ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
ν	:	Kinematik viskozite ($m^2.s^{-1}$)
ρ	:	Yoğunluk ($kg.m^{-3}$)
τ	:	Kayma gerilmesi

1. GİRİŞ

Günümüzde hava aracı güç sistemlerinde ciddi gelişmeler yaşanıyor olsa da, gaz türbinli motorlar büyük yolcu uçakları ve ticari uçakların ana güç ünitesi özelliğini korumaktadır. Her ne kadar gaz türbinli motor teknolojisinde gözle görülür gelişmeler kaydediliyor olsa dahi gaz türbinli motorlar temelde Brayton çevrimi adı verdiğimiz termodinamik çevrim prensiplerine göre çalışmaktadır. Özellikle malzeme ve havacılık malzemelerinin dayanımını artıran teknolojilerle gaz türbinli motor çevriminin çıkabileceği sıcaklık ve basınç değerleri yükseltilmekte ve buna bağlı olarak çevrimin dolayısıyla da motorun verimi artırılmaktadır. Brayton çevrimi dikkate alındığında yanma odası çıkış sıcaklığı ya da türbin giriş sıcaklığı motorun veriminde etkin rol oynamaktadır (Horlock vd., 2001). Bilindiği üzere, türbin giriş sıcaklığında 56 K sıcaklık artışı elde edilen gücün %13 artışına başka bir deyişle de motorun veriminin % 4 artmasını sağlamaktadır (Cho vd., 2011). Ancak malzemelerin dayanımında iyileştirme yapılmasına rağmen yüksek sıcaklıklara çıkılıyor olması daha iyi ve verimli bir soğutma yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Bir gaz türbinli motorun üç temel bileşeninden birisi olan gaz türbini, motorda gücün üretildiği ve itkinin elde edilmesini sağlamaktadır. Yanma odasından çıkarak türbine giren sıcak gazlar, burada genişleyerek hem motorun ihtiyaç duyduğu mekanik gücün üretilmesini hem de türbinden çıktıktan sonra da itkinin oluşmasını sağlamaktadır. Bu durumda gaz türbininde meydana gelen ısıl gerilimlerin azaltılması, kullanım ömrünün uzatılması gibi nedenlerden dolayı türbin kanatçıklarında soğutma yapılmaktadır (Holland ve Thake, 1980; Horlock, 2001).

Kanatçıklarda soğutma amacıyla kullanılan hava ve miktarı çevrimdeki pek çok değişkene de etki etmektedir. Bu nedenle, kullanılacak soğutma yöntemi, soğutmada kullanılacak hava miktarı, kompresörün hangi kademesinden alınacağı vb. hususlar, motorun ön tasarımı aşamasında kararlaştırılmalıdır. Bu karar verilirken, motorun verimliliğini yükseltmenin yanı sıra, ekonomik ve çevresel değerlendirmesi de yapılmalıdır (Han vd., 2013).

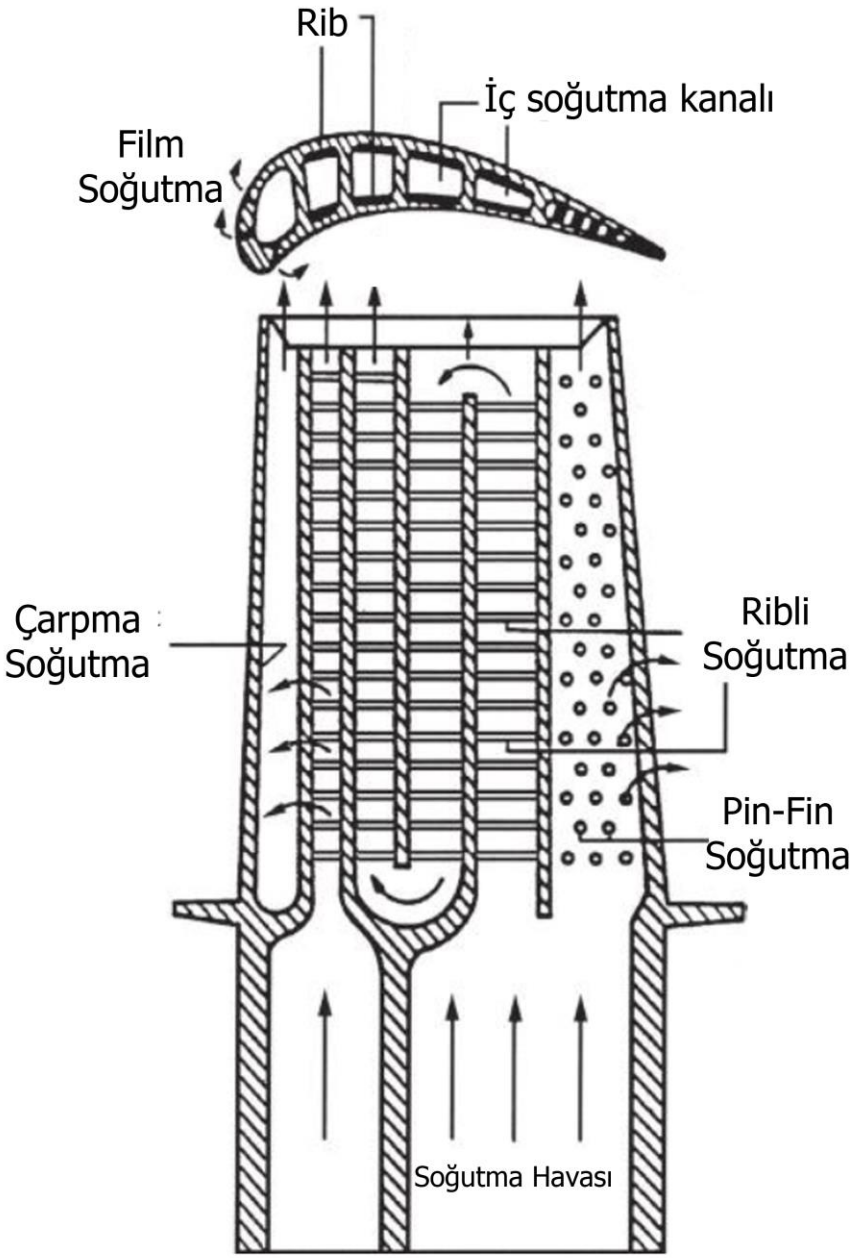
1.1. Gaz Türbinlerinde Soğutma Teknolojileri

Gaz türbinli motorlardan beklenen küçük, hafif ve verimlilik özelliklerini karşılamak için en basit ve kolaycı çözüm olarak türbin giriş sıcaklığının artırılması görülmektedir. Bu durum, türbin teknolojisinde pek çok yeniliğe yol açmıştır. Bir türbin kanatçığının maruz kaldığı sıcaklığın artması bazı durumlarda kullanım ömrünün yarı yarıya azalmasına dahi yol açabilmektedir. Oluşabilecek yapısal değişiklik ve malzeme hasarlarının tespiti için bölgesel ısı geçişlerinin belirlenmesi ve bu bölgelerdeki yüksek sıcaklıklı ısı geçişlerinin önüne geçilmesi en akılcı yoldur. Bu nedenle bir gaz türbininin emniyetli ve güvenli bir şekilde işletilmesi için soğutma yapılması gerekmektedir (Han vd., 2013).

Gaz türbin soğutma teknolojisinin gelişimi 1920'li yıllara dayanmaktadır. Kanatçıkları iç akışla soğutulan ilk gaz türbini II. Dünya Savaşı döneminden de önce savaş uçaklarının motorlarında kullanılmıştır. Günümüze kadar sürdürülen çalışmalar sonucunda ise türbin giriş sıcaklığında ciddi bir artış sağlanmıştır. Bu noktada türbin soğutma teknolojisinde kaydedilen aşamanın önemi göz ardı edilemeyecek boyuttadır (Han vd., 2013).

Temel olarak kullanılan iki soğutma yöntemi vardır. Bunlardan ilki, iç soğutma diğeri ise dış soğutmadır. İç soğutma yönteminde kompresörün kademelerinden çekilen havanın türbin kanatçıklarının içerisindeki kanallardan geçirilmesi sayesinde soğutma sağlanır. İç soğutma yönteminde de taşınım yoluyla soğutma ve çarpma soğutma olmak üzere iki farklı yaklaşım söz konusudur (Han vd., 2013).

Taşınım yoluyla soğutma yöntemleri pürüzsüz kanal soğutma, rib dizili soğutma ve pin-fin soğutma olarak gruplandırılır. Pürüzsüz kanal ile soğutma en basit ve temel yöntemdir. Kanal içerisinden geçen soğutucu hava kanatçık yüzeyinden ısı çekerek soğumasını sağlar. Rib dizili soğutma yönteminde ise riblerin oluşturduğu engelden dolayı akış yapısı bozularak türbülanslı akış bölgeleri oluşur. Bu durum zorlamış taşınımı artırır ve bu sayede yüzeyden daha fazla ısı çekmek mümkün olur. Rib dizili soğutma yöntemi kanalın tamamında kullanılabilirken, pin-fin soğutma yöntemi kanatçığın kuyruk bölümünde uygulanmaktadır (Han vd., 2013).



Şekil 1.1. *Gaz türbin kanatçıklarında kullanılan soğutma yöntemleri*

Kaynak: *Han vd., 2013*

Bir diğer iç soğutma yöntemi olan çarpma soğutma yönteminde akıştan yararlanma biçimi biraz daha farklıdır. Jet etkisinden yararlanılan bu yöntemde bölgesel olarak sıcaklığın yüksek olduğu noktaların soğutulması sağlanır. Soğutma amacıyla yönlendirilen hava belirlenen noktaya doğru yüksek basınç ve hızla yönlendirilir ve bu noktada kanatçık yüzeyindeki deliklerin vasıtasıyla jet etkisi elde

edilir. Burada deliklerin dizilimi ve yerleşimi soğutmanın etkinliği bakımından belirleyicidir. Şekil 1.1'de gaz türbin kanatçığı soğutma yöntemlerinin şematik gösterimi verilmiştir.

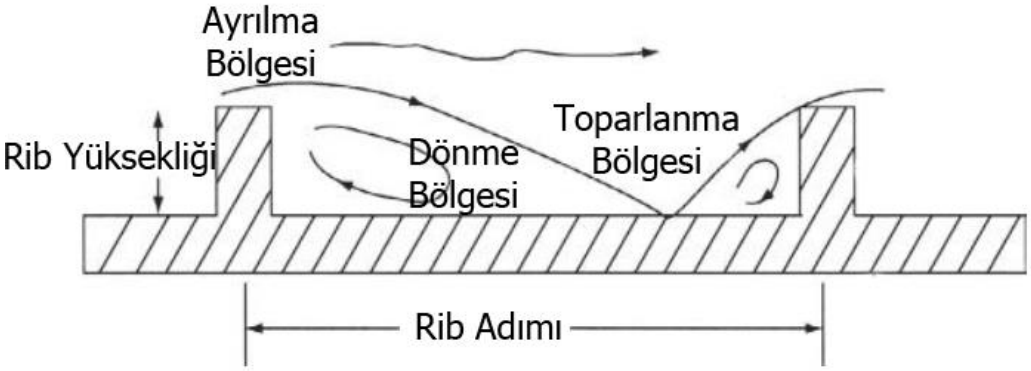
Gaz türbin kanatçıklarında kullanılan dış soğutma yöntemlerinden birisi film soğutmadır. Bu yöntemde kanatçık dış yüzeyine açılmış olan deliklerden geçen soğutma havası kanatçığın dış yüzeyini ince bir zar ya da film şeklinde bir tabaka oluşturarak sarar. Oluşan bu tabaka kanatçığı yüksek sıcaklık etkilerinden korumaktadır. Bu soğutma yönteminde kanatçığın tasarımıyla doğrudan ilişkilidir. Kanatçığın geometrisi ve aerodinamik özelliklerine delik çapına, soğutma havası ve türbin içerisindeki sıcak gazın hızlarına bağlı olarak soğutma etkinliği değişiklik gösterir. Uygulanan bir diğer dış soğutma yöntemi ise film soğutmanın gelişmiş hali olan transpirasyon soğutmadır. Kanatçığın içerisine ve yüzeyine çok küçük çaplarda delikler açılır. Soğutma havası çok sayıda ve küçük çaplardaki bu deliklerle oluşturulan gözenekli yüzeyden geçer. Film soğutmadakinin benzeri biçimde bir süre sonra soğutma havası kanatçığın tamamını kaplayan bir ince bir tabaka oluşturur. Böylelikle türbin kanatçığı sıcaklıktan kaynaklı etkilerden korunmuş olur. Transpirasyon soğutmanın diğer soğutma yöntemlerine göre daha iyi bir soğutma sağladığı bilinse de yapısal açıdan pek çok soruna yol açtığı da bilinmektedir (Han vd., 2013).

1.2. Rib Dizili Soğutma Yöntemi

Rib dizili soğutma yönteminde kullanılan ribler, akışın oluştuğu kanalın iç yüzeyine akış yolu boyunca yerleştirilmiş çıkıntılar biçimindeki engellerdir. Kimi uygulamalarda kanalın karşılıklı iki yüzeyine yerleştirilirken kimi zaman da tek yüzeyde bulunurlar. Buradaki amaç ısı transferini artırmaktır. Karşılıklı yüzeylere yerleştirilen ribler, soğutma havasıyla yüzey arasındaki etkileşimi artırmakta ve türbin kanatçığının daha fazla soğutulmasını sağlamaktadır. Tek yüzeye rib yerleştirilen uygulamalarda ise dış akıştan kaynaklı ısıl yüklerin dengelenmesi gerekliliği söz konusudur. Basınç ve akış yönü farklılığından kaynaklanan bu ısıl yüklerin dengelenmesi sayesinde akışkanın yüzeye temas ettiği yerlerde kayma gerilmelerinin oluşmasıyla ısı geçişi artırılmış olur. Tek yüzeyde rib kullanımı

durumunda bu nedenlerden ötürü rib yüksekliği, rib adımı, ribin akışa temas eden (hücum) açısı önem kazanmaktadır. Eğer uygun rib kullanımı elde edilecek olursa, kanal içerisindeki basınç düşümleri azaltılır ve ısı geçişi bakımından daha fazla verim elde edilebilir (Han vd., 1985).

Ribler genellikle akış yönüne dik yerleştirilir. Uygulamalarda farklılıklar rib yerleşim açısının değiştirilmesi ya da rib hücum açısının değiştirilmesiyle elde edilmektedir. Bu etkenlerin belirlenmesi istenilen ve hedeflenen ısı geçişi iyileştirmesine ulaşılıp ulaşılamadığına göre belirlenir. Rib kullanımının en temel görevi pürüzsüz akışta oluşan sınır tabakaların bozulmasını ve akışın yüzeye tutunması önlemektir. Ribin engel teşkil etmesi nedeniyle akış ribe çarparak ayrılmakta ve türbülans oluşturmaktadır. Ribten belirli bir mesafe sonra ise akış toparlanarak tekrar yüzeye tutunma eğilimi gösterir. Akış içerisinde gelişen ayrılma ve toparlanma olayları nedeniyle sınır tabaka dağılmaktadır. Burada oluşan türbülanslı akış bölgeleri yüzeyden ısı alarak ilerlemekte olan akışın bozulmamış olan ana akışla karışmasına yol açmaktadır. Böylelikle yalnızca kanalın soğutulacak yüzeyine yakın geçen akışkan değil kanal içerisinde hareket eden tüm akışkan soğutmaya katkı vermektedir (Han vd., 1985). Ribin engel oluşturmasına bağlı olarak oluşan akış yapısı Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. *Rib dizili bir soğutma kanalında oluşan akış yapısı*

Kaynak: *Han vd., 2013*

Bir rib etrafında oluşan akış pek çok girdap (re-sirkülasyon) bölgesinden oluşur. Bu girdaplar kesme gerilmelerine, akışın karışmasına ve yeni akım hatları

oluşmasına neden olur. Böylelikle bölgesel olarak türbülans ve ısı geçişi artar. Hatta ısı bu artış pürüzsüz kanaldaki artışın dört katı bile olabilmektedir. Bu artışın en büyük nedeni ise ribin hemen önünde ve arkasında oluşan girdap bölgeleridir (Han vd., 1985). Soğutma kanallarında kullanılan ribler, farklı en-boy oranına sahip dikdörtgen ya da kaare kesitli olabilmektedir. Dikdörtgen kesitli riblerde ısı geçişinde sağlanabilecek iyileştirme; ribin boyutları, şekli, geometrisi, yerleşimi, hücum açısı gibi özelliklerine göre değişiklik gösterir. Rib adımının fazla olması halinde taşınım için sağlanan yüzey alanını artırırken, rib adımının küçük olması halinde ise akıştan kaynaklı olarak daha etkin bir ısı geçişi sağlanabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı ribin özelliklerinin ve rib adımının en uygun değeri belirlenmelidir. Böylelikle ısı geçişinin en iyileştirilmesi mümkün olacaktır (Han vd., 1985; Florschuetz vd., 1981).

1.3. Önceki Çalışmalar

Ribler ilk olarak türbülans sağlayıcı olarak iç kanal akışlarında ısı geçişinin artışını sağlamak amacıyla ortaya çıkmıştır. Akış yönüne dik olacak şekilde belirli bir açıyla yerleştirilen ribler soğutulacak yüzeyin, yani kanatçığın, bir parçası olarak yekpare üretilir. Günümüze kadar riblerin boyutlandırılması ve geometrileri üzerine pek çok çalışma yürütülmüştür. Tezin bu bölümünde, günümüze kadar yapılmış ve erişilebilir veri tabanlarından derlenmiş olan rib dizili kanal içi akış üzerine çalışmalar ele alınmıştır. Söz konusu çalışmaların bir kısmı akış yapısını irdelerken, diğerleri ısı geçişine de değinmiştir. Teorik, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanan veya deneysel olarak yürütülen çalışmalar bir arada olup, tarih sırasına göre yer almıştır.

Kanal içerisine yerleştirilen ardışık iki ribin hücum kenarları arasındaki mesafenin adı olan rib adımı kavramı ilk kez Han vd. (1978) tarafından incelenmiştir. Girdap bölgelerinin, akış ayrılmalarının ve yeniden birleşmenin oluşumuna ciddi etkisi olan rib adımının rib yüksekliğine oranı değerinin ısı geçişi bakımından 10 olması gerektiği çalışma sonucunda bulunmuştur. Aynı çalışmada daha düşük oranlarda akışın yeniden birleşmesinin takip edilemediği ve mümkün olmadığına da değinilmiştir.

Han (1988) yaptığı çalışmasında dik ribleri ve farklı açılarda yerleştirilmiş ribleri incelemiştir. Çalışma neticesinde dik riblerin, diğer adıyla 90° açılı riblerin, ısı geçişi bakımından daha etkin olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışmanın devamı niteliğinde Han ve Park (1988) ile Park vd. (1992) tarafından yapılan iki araştırmanın sonucu da destekleyici niteliktedir.

Liou vd. (1990) yaptıkları çalışma ile rib adımının rib yüksekliğine oranı için en iyi değerin 10 olduğunu bularak Han vd. (1978) tarafından bulunan sonucu doğrulamışlardır.

Bunker ve Metzger (1990) yaptıkları çalışmada pürüzsüz kanal içi akışla soğutmada ısı geçişini olayını termal boya kullanarak incelemişlerdir. Sonuç olarak kanal içi akış hızı artışına bağlı olarak ısı geçişinin iyileştiğini belirtmişlerdir.

Liou ve Wu (1993) tarafından yürütülen bir çalışmada ise çift taraflı rib dizili dikdörtgen kesitli bir kanal içerisindeki akış yapısı LDV kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Re=33.000 koşulunda yapılan deneysel çalışmada ribler arası mesafenin etkisine bakılmıştır. Netice olarak akış hızının yer yer azaldığı ya da arttığı belirlenmiştir. Ayrıca irdelenen ribin arkasında oluşan akış toparlanma noktası ile rib önündeki akış toparlanma noktasının kendilerinden önceki riblere olan mesafeleri farklıdır. bu durumun 3-4 rib sonra ortadan kalktığı ve akış yapısının sürekliliğini koruduğu ortaya konulmuştur.

Bir diğer çalışmada dikdörtgen kesitli rib dizili bir kanalda ısı geçişinin etkinliğini tartışılmıştır. Çalışma sonucunda rib dizli kanal ile boş kanalı Stanton sayısı bakımından kıyaslamış ve rib dizili kanalın Stanton sayısı daha büyük bulunmuştur (Zhang vd. 1994).

Taslim vd. (1996) çalışmalarında farklı geometrilerdeki rib kullanımının etkilrini ele almıştır. Çalışma neticesinde kare ve yamuk kesitli riblerin ısı geçişi etkinliği bakımından daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

İki geçişli kare kesitli rib dizili soğutma kanalının incelendiği çalışmada 90°, 60° ve V şekilli ribler konu edinilmiştir. Belirli aralıklarla yerleştirilen riblerin laminar tabakayı bozduğu ve yüzeyde bölgesel girdaplar oluşturduğu, akışta kopma ve birleşme bölgelerinin meydana geldiği bulunmuştur. Böylelikle ısı geçişinin iyileştiği, hatta riblerin hemen üzerinde Nusselt sayısının en yüksek değere ulaşırken riblerin önünde ve arkasında ise en düşük değerlerde olduğu anlaşılmıştır (Ekkad, 1997).

Çakan vd. (1998), Re=30.000 koşullarında rib dizili bir kanal içerisindeki akış ve ısı geçişini LDV ölçümleri yaparak incelemişlerdir. Tek ve çift taraf rib dizili durumları ayrı ayrı ele alan araştırmacılar, riblerin önünde ve arkasında akış kopmaları ve girdaplar olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca iki taraflı rib dizili durumda kanal eksenine göre düşeyde simetrik bir akış yapısı oluştuğu da belirtilmiştir. Bir diğer önemli bulgu ise basınç katsayısının rib önünde artması ve rib arkasında azalmasıdır. Isı geçişinin en yüksek olduğu bölgeler olarak da rib önü ve akışın yeniden toparlandığı bölgeler bulunmuştur.

Rau vd. (1998), rib dizili bir soğutma kanalındaki ısı geçişini incelerken rib yüksekliği ile soğutma kanalı hidrolik çapı arasındaki ilişkiyi ön planda tutmuştur. Çalışma neticesinde rib yüksekliğinin soğutma kanalı hidrolik çapına oranının düşük olduğu duruma özgü geliştirilen korelasyonun, yüksek oranlar için geçersiz olduğu belirlenmiştir.

Çakan ve Arts (1999) PIV yöntemini kullanarak Re=6,500 ve Re=30.000 koşullarında rib kullanımında akış yapısını incelemişlerdir. Çalışma neticesinde akışın belli bölgelerde hızının düştüğünü, arttığını ve ayrılmaların oluştuğu bulunmuştur. Bunun dışında girdap bölgelerinin oluşumu da not edilmiştir. Akışın tekrar birleşme bölgesinin Reynolds sayısı değişimiyle değişmediği de ortaya konulmuştur.

Bir diğer çalışmada ise (Kiml vd., 2001) rib yerleşiminin dikdörtgen kesitli bir kanal içerisindeki ısı geçişi ve akış yapısına etkisi irdelenmiştir. Çalışma kapsamında 2:1 en- yükseklik oranına sahip 90°, 75°, 60° ve 45° açılı ribler ele alınmıştır. Sonuç olarak, ana akıştan ayrılan ikincil akışın ısı geçişine katkı sağlayacağı şekilde rib diziliminin yapılması gerektiği ve 60° açılı ribin ısı geçişi etkinliği bakımından daha iyi olduğu ortaya konulmuştur.

Deneysel olarak yapılan bir araştırma kapsamında genişleyen, daralan ve sabit kesitli olmak üzere üç farklı rib dizili kanal içerisinde türbülanslı akışın gelişimine bağlı olarak bölgesel ısı geçişleri ve basınç düşümleri izlenmiştir. Deneysel çalışma neticesinde genişleyen kesitli kanalın ısı geçiş performansı en yüksekken, daralan kesitli kanalın ısı geçiş performansı en düşük olarak belirlenmiştir (Wang vd., 2001).

Buchlin (2002) yaptığı araştırmada delikli rib kullanımını incelemiştir. Farklı kesitlerde ve geometrilerde deliklerin açıldığı bir ribi kanal içerisine yerleştirerek ısı geçişinin en iyi olduğu delik modelini belirlemeyi hedeflemiştir. Kızıl ötesi kamera

kullanarak rib etrafındaki ısı geçişi bölgesinin sıcaklıklarını ve ısı geçiş katsayısını belirlemiştir. Çalışmada göze çarpan en önemli sonuç ise Re=20.000 durumunda ısı geçiş etkinliğinin ciddi oranda iyileşmesidir.

Chandra vd. (2003), yaptıkları araştırmada dört yüzüne de 90° açılı riblerin yerleştirildiği bir kare kesitli kanalda ısı geçişini ve kayma gerilmelerini irdelemiştir. 10.000-80.000 Reynolds sayısı aralığında yapılan deneysel çalışmada rib bulunan yüzeylerde basınç düşümünün arttığı ve ısı geçişi etkinliğinin kötüleştiği ortaya konulmuştur.

Akış yapısının PIV ile incelendiği rib dizili iki geçişli soğutma kanalını ele alan bir çalışma Elfert vd. (2004) tarafından yürütülmüştür. Re=40.000 koşulunda gerçekleştirilen deneyde PIV'nin yanı sıra akış görselleştirme yöntemi olarak yağ da kullanılmış ve yüzeydeki akım iplikçikleri de çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda özellikle 180° dönüş bölgesinde türbülans oluşumu ve akış ayrılmaları gözlemlenmiştir.

Bir diğer çalışmada ise dokuz farklı şekil ve geometriye sahip rib dizili kanal içerisindeki akış hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle incelenmiştir. Deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında k-ω çözüm modelinin daha doğru sonuç verdiği ve deneysel sonuçlarla eşleştiği çalışma sonucunda ortaya konulmuştur (Chaube vd., 2006).

Kumar ve Amano (2006) yaptıkları çalışmada kare kesitli bir kanalın tek yüzeyinde V şekilli ve kırık V şekilli rib kullanımını ikincil akışları da dikkate alarak incelemişlerdir. LES/RANS hibrit çözüm yönteminin kullanıldığı çalışma ile kanal içerisindeki ısı geçiş mekanizmalarını ortaya koymuşlardır.

Rolls-Royce bünyesindeki bir çalışmada ise türbin kanatçığı rib dizili soğutma kanalındaki akış yapısı ve ısı geçişi mekanizmaları SST-SAS çözüm yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak LES yönteminin SST-SAS yöntemine göre daha doğru sonuçlar verdiği ancak SST-SAS yönteminin de RANS yöntemine nazaran daha iyi olduğu belirlenmiştir (Zacharzewski vd., 2016).

Başka bir çalışmada ise 45° açılı rib dizili bir kanaldaki ısı geçişi mekanizmaları TLC yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sistem Re=18,428 ile Re= 28,327 çalışma aralığında işletilmiş ve kanaldaki basınç düşümleri ölçülmüştür. Elde edilen deneysel veriler k-ω çözüm yöntemiyle elde edilmiş olan nümerik sonuçların doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca farklı rib geometrileri ve yerleşimleri

nümerik olarak ele alınmış fakat deneysel olarak incelenmemiştir. Sonuç olarak içerideki akışta oluşan girdaplar ısı geçişi etkinliğini ciddi ölçüde artırıcı etken olarak belirlenirken basınç düşümünün de sebebi olarak ortaya konulmuştur (Luan vd., 2016).

Zeng vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada soğutma kanallarında nemli hava kullanımı farklı rib hücum açıları bakımından hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın temel hedefi ikincil akışların ısı geçişine etkisinin belirlenmesi olarak açıklanmıştır. RANS çözüm yönteminin kullanıldığı araştırmada elde edilen sonuçlardan Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi deneysel olarak doğrulanmış ve teyit edilmiştir.

Wang ve Chedevergne (2016) tarafından yürütülen araştırmada iki geçişli döner bir soğutma kanalında ısı geçiş etkinliği ele alınmıştır. Deneyler Re=15.000, Re=25.000 ve Re= 35.000 için gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde ise k-ω-SST modeli tercih edilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlarının eşleştiği çalışma sonucunda ortaya konulmuştur. Dönme etkisinin ısı geçişi etkinliği ciddi oranda etkilediği de ayrıca not edilmiştir.

Pierce vd. (2016) bilgisayar ortamında yaptıkları çalışmada soğutma havası giriş hızının ve rib yerleşiminin ısı geçişi etkinliğine etkisini ele almışlardır. Üç geçişli olan soğutma kanalında 45° açılı ribler kullanılmış olup, 180° açılı dönüşler bulunmaktadır. RANS modeli ile analizlerin gerçekleştirildiği çalışma sonucunda ilk geçiş kanalındaki ısı geçişinde hava giriş hızının büyük bir etkisi olduğu bulunmuştur.

Önceki çalışmalara bakıldığında, rib dizili soğutma kanalları üzerine yürütülen çalışmalarda yoğun olarak düşük hızlardaki akışlar incelenmiştir. Ancak bu yürütülen çalışmalarda yüksek hız değerleri irdelenmediği gibi akış yapısı ve ısı geçişini birlikte alan çalışmaların da az olduğu görülmektedir. Bu açılardan bakıldığında söz konusu tez çalışması mevcut bilgi birikimindeki açığı akış yapısını PIV yöntemiyle incelerken aynı zamanda da rib dizili soğutma kanalında meydana ısı geçişini inceleyerek kapatmayı hedeflemiştir.

1.4. Tezin Yapısı ve Önemi

Daha önce de bahsedildiği üzere, gaz türbinli motorların verimliliğinin artırılması gaz türbini giriş sıcaklığına bağımlıdır. Türbin giriş sıcaklığının yüksek tutulabilmesi için yaygın olarak kullanılan rib dizili soğutma uygulaması, bu tez çalışması kapsamında irdelenmiştir.

Tez çalışması, rib dizili kanal tasarımının yapılması, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri, deneysel çalışma ve doğrulama olmak üzere üç ana işlem basamağını içermektedir. Bu kapsamda tezin ilerleyen bölümlerinde bunlara ilişkin detaylar verilmiştir.

Daha önce yapılmış olan çalışmalar göz önüne alındığında bu tez çalışmasını diğerlerinden ayrıştıran ve çalışmanın özgünlüğünü ortaya koyan özellikleri şöyledir:

- 90° açılı rib dizili bir soğutma kanalı içerisindeki akış yapısı hem hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak hem de PIV tekniği ile deneysel olarak incelenmiştir.
- 90° açılı rib dizili bir soğutma kanalı içerisinde meydana gelen ısı geçişi hem hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak hem de deneysel olarak incelenmiştir.

Böylelikle ilk defa rib dizili soğutma kanalı içerisindeki ısı geçişi olayları ve akış yapısı bir arada, PIV tekniğinin de kullanıldığı bir çalışmada ele alınmıştır.

2. SOĞUTMA KANALININ MODELLENMESİ

2.1. Rib Dizili Soğutma Kanalı Tasarımına Etki Eden Değişkenler

Daha önce de değinildiği üzere ilk gaz türbinli motorlarda gaz türbinlerinin kanatçıklarındaki iç soğutma kanalları pürüzsüz ve tek geçişli olarak kullanılmıştır. Daha sonrasında çok geçişli kanallar ve rib kullanımına başlanmıştır. Bunun neticesinde gaz türbini soğutma etkinliği ve buna bağlı olarak motor verimi artırılmıştır. Rib dizili soğutma kanalı tasarımı yapılırken soğutma etkinliğinin yüksek tutulabilmesi için aşağıda sıralanan değişkenler göz önünde bulundurulmalıdır (Han vd., 2013):

- Kanal geometrisi ve kesiti
- Rib kesiti
- Engelleme oranı
- Rib adımı ve rib yüksekliği
- Rib hücum açısı
- Rib yerleşimi

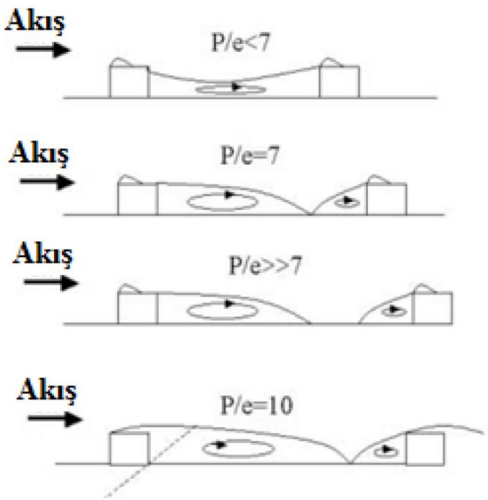
Gaz türbin kanatçıklarında kullanılan soğutma kanallarının geometrisi belirlenirken kanatçık geometrisi büyük bir etkendir. Kanatçığın hücum kenarına yakın bölge eşkenar üçgen benzetimli iken arka uca yakın bölgeler yamuk kesitlidir. Kanatçığın ortasına denk gelen bölgelerde ise soğutma kanalı kesiti farklı en boy oranlarında dörtgenlerdir. Buradan da anlaşılacağı üzere, kanatçık soğutmanın çalışılacağı bölgeye göre kanal kesit geometrisi belirlenmeli ve modellenmelidir. Ancak, daha önce verilen önceki çalışmalarda da görüldüğü üzere soğutma kanalları üzerine yapılan araştırmalarda çoğunlukla dörtgen kesitli kanallar irdelenmiştir. Bunun sebebi, özellikle de deneysel çalışmalarda, araştırmacıya kolaylık sağlamasıdır (Han vd., 2013).

Gerçek bir gaz türbin kanatçık tasarımı üzerinden bir soğutma etkinliği araştırması yürütülecek ise, kanatçığın farklı bölgeleri için kanal geometrilerinin belirlenmesi ve her bölgedeki soğutma etkinliğinin incelenmesi daha doğru ve gerçekçi sonuçlar ortaya koyacaktır.

İç soğutma kanallarında kullanılan riblerin temel kullanım amacı kanal içerisindeki akış yapısını bozarak türbülans oluşturarak ısı geçişi etkinliğini

artırmaktır. Bu amaçla kullanılan ribler kare, dikdörtgen, üçgen, dairesel kesitlerde olabilmektedir. Rib kesitleri kıyaslandığı zaman keskin kenarlara sahip riblerin akış ayrılmalarına daha fazla imkan verdiği ve bu nedenle ısı geçişi etkinliğini artırdığı bilinmektedir. Diğer yandan dairesel kesite sahip, keskin kenarlara sahip olmayan, riblerin kullanımında ise daha az basınç düşümü gerçekleşmektedir (Han vd., 2013).

Engelleme oranı olarak adlandırılan bir diğer etken rib yüksekliğinin soğutma kanalı hidrolik çapına oranı olarak tanımlanır. Düşük değerlerdeki engelleme oranı özellikle Reynolds sayısının yüksek olduğu koşullarda soğutma etkinliğine etki etmektedir. Daha yüksek ribler, alçak riblere göre daha fazla akış ayrılmalarına ve türbülansa yol açtığından yüksek engelleme oranı akışın bozulması için istenilen bir durumdur. Fakat yüksek engelleme oranlarında sürtünme oranları arttığından soğutma etkinliği üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır (Han vd., 2013).

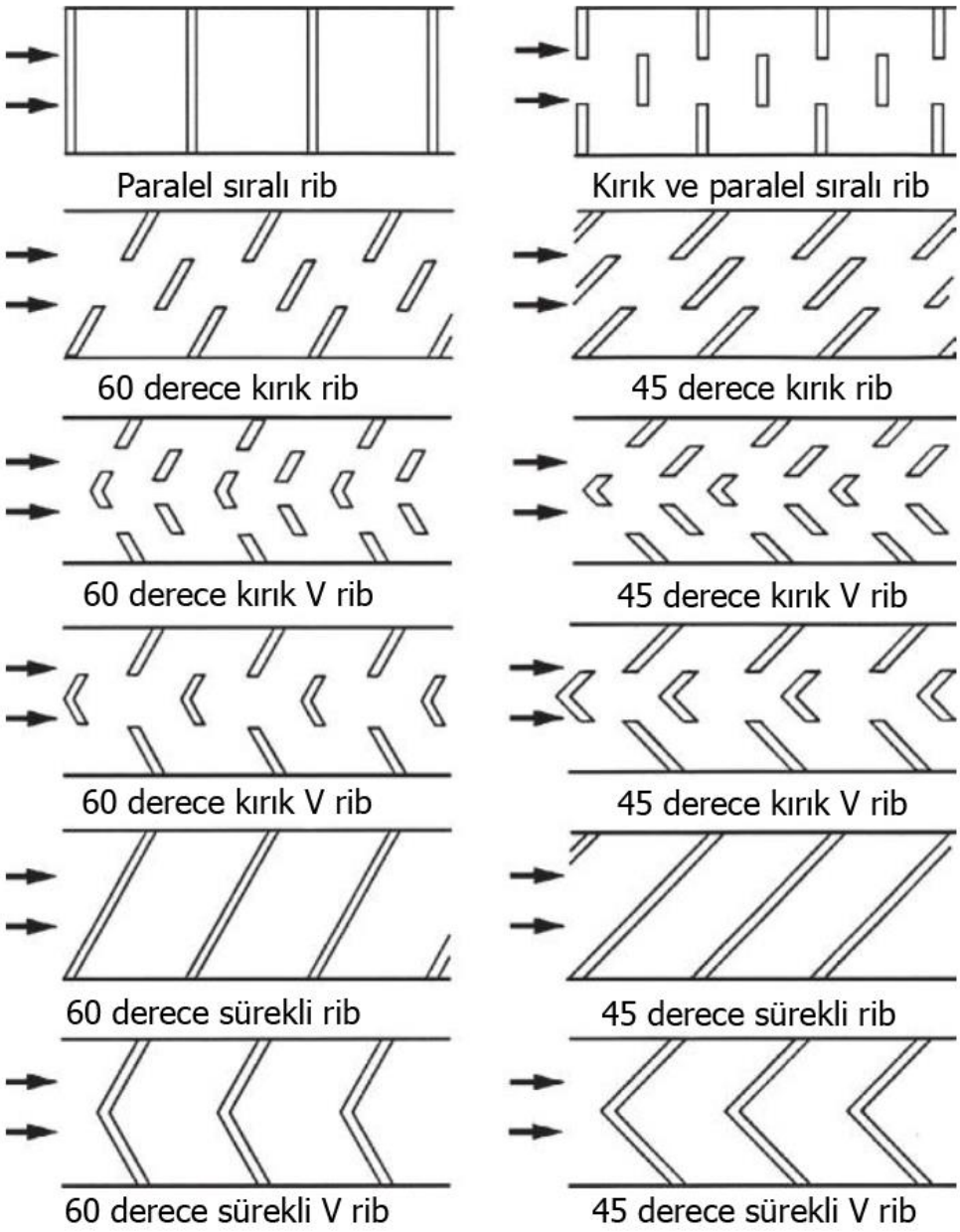


Şekil 2.1. *Rib adımının akış yapısına etkisi*

Kaynak: *Han vd., 2013*

Ardışık yerleştirilen iki ribin hücum kenarları arasındaki mesafe olarak tanımlanan rib adımı kavramı, soğutma etkinliği üzerinde en önemli etkenlerden birisidir. Bu etki, rib adımının rib yüksekliğine oranı üzerimden değerlendirilir. Rib adımının rib yüksekliğine oranı akış yapısına Şekil 2.1'de gösterildiği gibi etki etmektedir. Bu oranın düşük olması halinde, rib etkisiyle ayrılan akışın tekrar toparlanabileceği bir bölge oluşamamaktadır. Bunun sebebi ise rib arkasında girdap bölgesinin oluşamamasıdır. Oranın yüksek olması halinde ise yeniden birleşen, yani toparlanan, akış belirli bir noktadan sonra sınır tabaka gelişimine imkan

sağlamaktadır. Bu durum rib etkisini ortadan kaldırmaktadır. Dörtgen kesitli soğutma kanalları için en iyi sonuç oranın 10 olması halinde elde edilmiştir.



Şekil 2.2. *Başlıca rib yerleşimlerinin şematik gösterimi*

Kaynak: *Han ve Zhang, 1992*

Rib hücum açısı, ribin yatay ile yaptığı açıdır. Temelde rib hücum açısı ribin kanal içerisindeki yerleşimine de bağlıdır. Önceki çalışmalarda rib hücum açısı yoğun bir şekilde çalışılmıştır. Sonuç olarak 30°, 45° ve 60° açılı riblerin 90° açılı riblere göre daha iyi soğutma etkinliği sağladığı belirlenmiştir.

Rib yerleşimi bakımından farklı uygulamalar söz konusudur. Paralel yerleşimli, kesik yerleşimli ve açılı yerleşimli rib yerleşimleri mevcuttur. Şekil 2.2'de başlıca rib yerleşim alternatifleri gösterilmiştir.

2.2. Boyutsuz Sayılar ve Benzerlik Analizi

Akışkanlar mekaniği ve ısı geçişinin incelenmesinde pek çok karmaşık fiziksel olay irdelenir. Bu olayların incelenmesinde de pek çok fiziksel büyüklüğün birbiriyle etkileşimi değerlendirilir. Fiziksel olayın çözümlenmesi sırasında kullanılan diferansiyel denklemlerde kolaylık sağlamak amacıyla fiziksel büyüklüklerin arasındaki ilişkiler boyutsuz sayılar ile ifade edilir.

Akış yapısında yüzeye yakın bölgelerde sürtünme kuvvetleri yüksek olup, akış hızı düşüktür. Yüzeyden uzak bölgelerde serbest akış söz konusu olup, burada atalet kuvvetleri viskoz kuvvetlere göre daha baskındır. Akışkanlar mekaniğinde en yaygın kullanılan boyutsuz ifadelerden birisi olan Reynolds sayısı, atalet kuvvetler ile viskoz kuvvetler arasındaki ilişkiyi ifade eder (Çengel ve Cimbala, 2013):

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} = \frac{UD}{\nu} \tag{2.1}$$

Reynolds sayısı aynı zamanda akışın laminer ya da türbülanslı olduğunun bir göstergesidir. Reynolds sayısının küçük olduğu durumda sürtünme kuvvetleri atalet kuvvetlerine göre baskındır ve akışta bozulmalar gözlemlenmez. Ancak, Reynolds sayısının büyümesi sürtünme kuvvetlerinin atalet kuvvetlerinden küçük olduğu anlamına gelir. Bu durumda akışta çalkalanmalar başlar ve zamanla türbülanslı akışa geçilir. Akışın laminerden türbülanslı akışa geçtiği andaki Reynolds değeri kritik Reynolds sayısı olarak adlandırılır.

Prandtl sayısı, akış içerisinde oluşan hız sınır tabaka ile ısıl sınır tabakanın kalınlıklarının kıyaslanması için önemli bir boyutsuz sayıdır ve momentum yayınımın ısıl yayınımına oranı şeklinde ifade edilir (Çengel ve Cimbala, 2013):

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \tag{2.2}$$

Gaz akışkanların Prandtl sayısı ortalama olarak 1'e yakındır. Bu durum gaz akışları içerisinde momentum ve ısıl yayınımın aynı hızlarda gerçekleştiğini gösterir.

Bir diğer önemli boyutsuz ifade ise Nusselt sayısıdır. Isı geçişi olan bir ortamda taşınım yoluyla gerçekleşen ısı geçişi ile iletim yoluyla gerçekleşen ısı geçişi arasındaki orandır (Çengel ve Cimbala, 2013):

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \tag{2.3}$$

Bu ifadeden de görüldüğü üzere, Nusselt sayısının büyük olması taşınım yoluyla ısı geçişi miktarının fazla olduğu anlamına gelir. Başka bir deyişle Nusselt sayısı artışı ısı geçişinde iyileşme olduğunun bir göstergesidir.

Mühendislikte ele alınan, tasarlanan ve geliştirilen sistemler fizik teorilerine dayalıdır. Deneysel çalışmalarda çoğu zaman, bir sistemi birebir ölçülerinde incelemek mümkün değildir. İncelenen olayın gerçekleştiği sistem asıl cisim olarak adlandırılırken, sistemin laboratuvar koşullarındaki fiziksel benzerine model adı verilir. Asıl cismin kimi zaman daha küçük kimi zaman ise daha büyük ölçekte modeli oluşturulur. Modelin oluşturulmasında benzerlik oranı adı verilen kavramdan yararlanılır. Benzerlik oranı asıl cisimde gerçekleşen fiziksel olayın karakteristiğini belirten değerin modeldeki fiziksel olayın karakteristiğine oranıdır. İncelenen fiziksel olaya ve asıl cisme uygun olacak şekilde fiziksel benzerlik oranı, geometrik benzerlik oranı ya da kinematik benzerlik oranı tanımlanması gereklidir. Fiziksel benzerlik durumunda asıl cisimde ve modeldeki fiziksel büyüklüklerin oranı birbirine karşı gelen tüm noktalarda aynı olmalıdır. Geometrik benzerlik ise asıl cisim ve modelde örtüşen noktaların koordinatlarının arasında bir oran korunarak sağlanır. Fiziksel ve geometrik benzerlik yaygın olarak bir cismin maketinin yapımında tercih edilir. Bu durumda geliştirilen modelde ile asıl cisimde meydana gelen fiziksel olaylar benzerdir fakat aynı değildir. Kinematik benzerlikte model ve asıl cisimde gözlemlenen fiziksel olaylar büyüklük bakımından da aynıdır. Kinematik benzerliğin sağlandığı durumda hem geometrik hem de zamansal benzerlik söz konusudur (Langhaar, 1946; Butterfield, 2001) .

Mevcut tez çalışmasında rib dizili bir soğutma kanalı içerisindeki akışın yapısı ve ısı geçişi olayları incelendiği için kinematik benzerliğe dayalı model oluşturulmuştur. Isı geçişi olayları da akış yapısına bağlı geliştiğinden, akış yapısının birebir aynı olabilmesi için Reynolds sayısına dayalı benzetim yolu izlenmiştir

2.3. Rib Dizili Soğutma Kanalının Modellenmesi

Yukarıda açıklanan soğutma kanalı tasarımına etki eden parametreler dikkate alınarak, bu tez çalışması kapsamında 90° açılı rib dizili bir soğutma kanalı üzerinde çalışılması uygun bulunmuştur. Öncelikle 80 mm eninde ve 80 mm yüksekliğinde kare kesitli bir soğutma kanalı tasarlanmış, fakat deneysel çalışmalar sırasında yaşanan zorluklar nedeniyle soğutma kanalının büyütülmesine karar verilmiştir. Bu nedenle nihai olarak 150 mm en ve yüksekliğe sahip olan kare kesitli bir soğutma kanalı tasarımı gerçekleştirilmiştir.

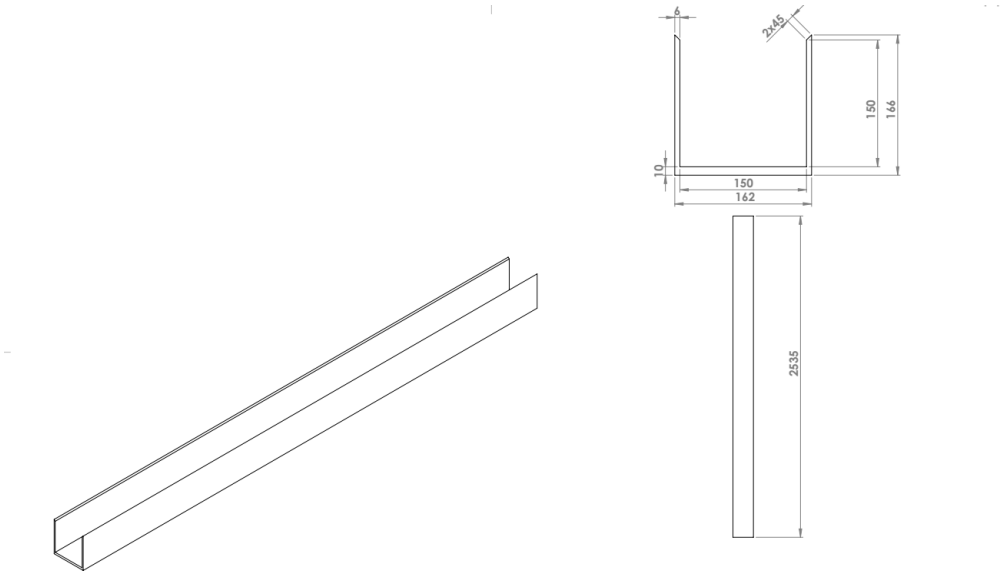
Kanal içerisine ardışık olarak 6 rib yerleştirilerek rib etkisinin tam olarak incelenebileceği daha önceki çalışmalar doğrultusunda araştırmacı tarafından belirlenmiştir. Bu kapsamda, engelleme oranı etkisi de göz önüne alınmış ve 0.1 engelleme oranı değeri seçilmiştir. Hidrolik çapın 150 mm olması nedeniyle rib yüksekliği 15 mm olarak hesaplanmıştır.

Tasarımda dikkate alınan bir diğer etken ise rib adımıdır. Rib adımının rib yüksekliğine oranı 9 olarak alınmış ve rib adımı 135 mm olacak şekilde 6 sıralı rib yerleşimi planlanmıştır. Soğutma kanalı girişi, rib adımları ve rib kesitinin eni dikkate alınarak soğutma kanalı boyu 1035 mm olarak hesaplanmıştır.

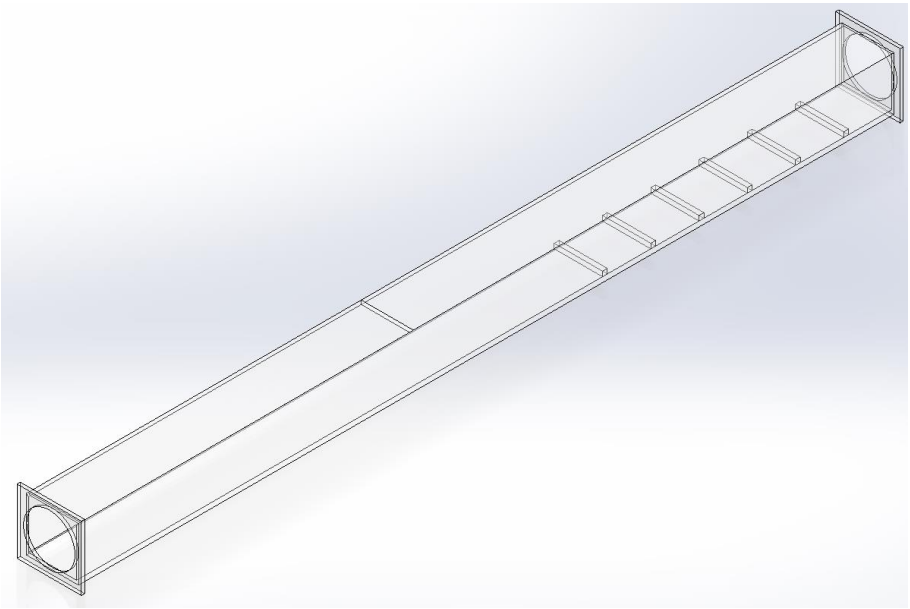
Bilindiği üzere, bir kapalı kanal içerisindeki düzgün laminer akışın tam gelişmiş olması için kanal boyunun hidrolik çapa oranı en az 10 olmalıdır. Bu etken de göz önünde bulundurularak, soğutma kanalı önünde akışın gelişebilmesi amacıyla giriş kanalı ya da dinlenme odası olarak adlandırılan 1500 mm boyunda ve 15 mm kenara sahip kare kesitli bir kanal oluşturulması gerektiği belirlenmiştir.

İlk olarak, giriş kanalı ve soğutma kanalı ayrı parçalar olarak tasarlanarak üretilmiştir. Fakat aradaki bağlantının flanşla sağlanmasına rağmen basınç düşümü ve kayıpların sıfırlanması hedeflenerek toplam uzunluğu 2535 mm olan yekpare bir kanal tasarlanarak üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda kolaylık sağlanabilmesi için her iki kanal bölgesinin üst bölümleri kapaklı olarak tasarlanmıştır. Bu kapakların

kanalla arasındaki sızdırmazlığı iyileştirmek amacıyla örtüşen yüzeyler 45° pahlı tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu detay Şekil 2.3'te görülmektedir. Ayrıca soğutma kanalı katı modelinin nihai hali Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.3. *Soğutma kanalına ait teknik resim*



Şekil 2.4. *Soğutma kanalına ait katı model*

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZLERİ

Mühendislikte, bir sistemi irdelerken deneysel, analitik ya da sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Ancak deneysel çalışmaların maliyetli olması, zaman alması ve detaylı sonuçlar almak güç olduğundan analitik veya sayısal yöntemler çoğunlukla tercih edilir. Bunun yanı sıra birçok sistemin deneysel olarak incelenmesi de mümkün olmamaktadır. Bu nedenlerden ötürü tercih edilen sayısal çözümleme mutlak sonuç vermemektedir. Bu nedenle sayısal yöntemlerle yapılan incelemeler deneysel ya da analitik yöntemlerden elde edilen bulgular kullanılarak doğrulanmaya gerek duyar. Yaklaşık çözüm vermesine rağmen sayısal yöntemler, günümüzde ulaşılan yüksek bilgisayar teknolojisinin sonucunda kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Sayısal yöntem olarak kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ile çok karmaşık görünen pek çok fiziksel olay incelenebilmektedir. Özellikle iç içe geçmiş olan akış fiziği ve ısı geçişi gibi kendi içerisinde bile pek çok fiziksel olayı barındıran fiziksel olgular yaklaşık olarak da olsa detaylı olarak açığa çıkarılabilmektedir. Diğer yandan sayısal yöntemlerle değişken tabanlı çalışmalar yapılabilmekte ve olayın fiziğine etki eden değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkileri de belirlenebilmektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılmadan önce sistemin katı modeli geliştirilir. Geliştirilen bu katı modele bağlı olarak fiziksel olayların gerçekleşeceği hacim bölgelere ayrıştırılır. Buradaki amaç, fiziksel olayın farklı etkileşimler gösterdiği ve farklı davranışlar sergilediği bölgelerin her birisinin kendi içerisinde ele alınması sağlamaktır. Daha sonra her bir bölge ağlarla örülerek, kontrol hacminin tamamı ağlarla kaplanır. Ağ örme işlemi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde büyük önem taşımaktadır. Kontrol hacminin ağ yapısı analizin kalitesini ve elde edilecek sonuçları doğrudan etkilemektedir (Blazek, 2015).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde ağlarla kaplanan kontrol hacmi için aşağıda verilen temel korunum denklemleri kullanılarak çözümleme yapılır (Blazek, 2015):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} = 0 \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[u_j(\rho E + p)\right] - \frac{\partial}{\partial x_j}\left[k\frac{\partial T}{\partial x_j}\right] - \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{u_j\left[\mu\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k}\right) - \frac{2}{3}\mu\delta_{kl}\frac{\partial u_m}{\partial x_m}\right]\right\} = 0 \quad (3.3)$$

Burada sırasıyla verilen süreklilik, momentum ve enerji denklemleri görüldüğü üzere diferansiyel ifadelerdir. Çözümleme sırasında bu diferansiyel ifadeler öncelikle doğrusal denklemlere dönüştürülür ve tüm kontrol hacmi için uygulanır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde pek çok yaklaşım söz konusudur. Tüm yaklaşımlar temelde süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini kullansa da incelenen kontrol hacmine uygun yaklaşım (model) kullanılarak daha doğru sonuçlar elde etmek mümkündür. Bu tez çalışması kapsamında, rib dizili soğutma kanalı içerisindeki akışın analizinde RANS türbülans modeli kullanılmıştır. RANS türbülans modelleri LES (Large Eddy Simulation), V2f ve Reynolds gerilmeleri modeli olmak üzere üç sınıftadır. Daha önceki yapılan çalışmalardan yola çıkılarak rib dizili soğutma kanalı için LES yaklaşımının daha uygun olduğu anlaşılmaktadır. LES yaklaşımıyla türbülanslı akış analizlerinde aşağıdaki modeller kullanılmaktadır:

- Standart k-ε türbülans modeli
- Realizable k-ε türbülans modeli
- Re-normalizasyon k-ε türbülans modeli
- Standart k-ω türbülans modeli
- Shear Stress Transport (SST) k-ω türbülans modeli

3.1. Sınır Koşulları

Daha önceki bölümde detayları verilerek katı modeli geliştirilen rib dizili soğutma kanalı, 150x150 mm^2 kare kesitli olup, 2.035 mm uzunluğa sahiptir. Giriş havasının sıcaklığı 292,15 K olarak alınmış ve hava giriş hızı değişimiyle farklı

Reynolds sayılarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sınır koşulu olarak giriş hızı ve çıkış için ise çıkış basıncı tanımlanmıştır. Bunun nedeni, deneysel çalışmada söz konusu fiziksel büyüklüklerin ölçülebilmesidir. Isı transferi mekanizmasının incelenmesi amacıyla kanal modelinin tabanı ve tabana yerleştirilmiş olan ribler 500 W/m^2 sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Daha doğru sonuç alabilmek için soğutma kanalının malzeme özellikleri ise pleksiglass temel alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda malzeme yoğunluğu 1,180 $kg.m^{-3}$, özgül ısı 1,47 $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ve ısı iletim katsayısı 0,2 $W.m^{-2}.K^{-1}$ olarak tanımlanmıştır.

3.2. Ağ Oluşturma

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde ağ oluşturma analizlerin doğruluğu bakımından önem taşımaktadır. Ağ sayısının fazla olması analizin doğruluğunu artırırken çözüm süresinin de uzamasına neden olmaktadır. Sınır tabaka oluşumunun gözlemlendiği duvar yüzeyleri, ribler ve yakın bölgelerinde ağların sıklığı analizi iyileştirmektedir. Aşağıdaki bağıntılar yardımıyla yüzeyde iyi bir ağ sıklığı elde etmek için gereken mesafe belirlenebilir:

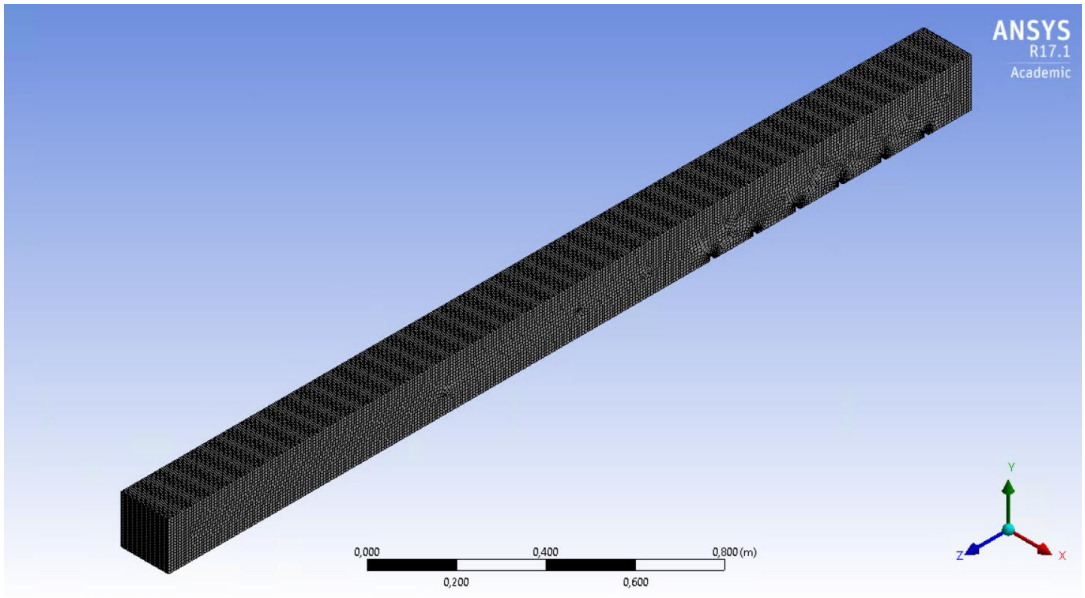
$$C_f = [\log(Re^2) - 0.65]^{-2.3} \tag{3.4}$$

$$\tau = 0.5\, C_f \rho U_0^2 \tag{3.5}$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \tag{3.6}$$

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho u^*} \tag{3.7}$$

Burada C_f yüzey sürtünmesi, τ kayma gerilmesi, ρ akışkanın yoğunluğu, U_0^2 serbest akışkanın hızı, u^* ise yüzeydeki akışkan hızıdır. Tüm bunlara ve y^+ değerine bağlı olarak yaklaşık mesafe hesaplanabilir. Bu çalışmada iyi bir ağ sıklığı elde edebilmek amacıyla y^+ değeri 0,2 olarak alınmıştır. Şekil 3.1'te rib dizili soğutma kanalı modelinin ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 3.1. *Soğutma kanalı modeline ait ağ yapısı*

3.3. Sayısal Model

Bu tez çalışmasında rib dizili soğutma kanalının hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için Standart k-ω türbülans modeli kullanılmıştır. Özellikle düşük Reynolds sayıları için uygun olan bu modelin daha önceki yürütülen çalışmalarda daha doğru sonuç vermesidir. Bu yöntemde, taşıma denklemleri türbülans kinetik enerjisi ve spesifik disipasyon oranlarının bulunmasında kullanılır (Blazek, 2015):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) - G_k + Y_k - S_k = 0 \qquad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) - G_\omega + Y_\omega - S_\omega = 0 \qquad (3.9)$$

Burada G_k ve G_ω sırasıyla ortalama hız gradyanlarının türbülans kinetik enerjisi ve türbülans çalkanlamalarından kaynaklanan spesifik yayınım oranıdır. Y_k ve Y_ω ise türbülans kinetik enerjisi ve spesifik yayınım oranına ait disipasyon oranlarını göstermektedir. Γ_k türbülans kinetik enerjisinin efektif yayınımını temsil ederken Γ_ω ise spesifik yayınım oranına ait efektif yayınımdır. Bu değerlerin hesabında ise aşağıdaki ifadeler kullanılır (Blazek, 2015):

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \tag{3.10}$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \tag{3.11}$$

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \tag{3.12}$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan soğutma kanalı performans ölçümleri için kurulan deney seti, kullanılan teknik açıklanmıştır.

4.1. Deney Sistemi Tasarımı ve Kurulumu

Daha önce Bölüm 2.3'te tasarım aşamasından bahsedilen soğutma kanalından ölçümler alınmak üzere, Anadolu Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi'nde ve Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Destekleme Programı kapsamında yürütülen proje desteğiyle laboratuvar kurulmuştur. Bu laboratuvarda akış yapısının incelenmesi için PIV cihazı, basınç ve sıcaklık ölçümlerinin de takibini yapmak üzere veri toplama sistemi, gerekli hava akışını sağlayabilmek için fan ve veri işlemek amacıyla bir adet iş istasyonu bulunmaktadır.



Görsel 4.1. *Radyal fan*

Deneysel çalışmalarda soğutma kanalı içerisindeki hava akışını sağlamak içi n Görsel 3.1'de görülen radyal salyangoz fan kullanılmıştır. Kullanılan fanın bağlantısı sırasında elektrik panosundan 380 Volt'luk elektrik beslemesi yapılmıştır. Söz konusu fana ait özellikler Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1. *Radyal fanın teknik özelikleri*

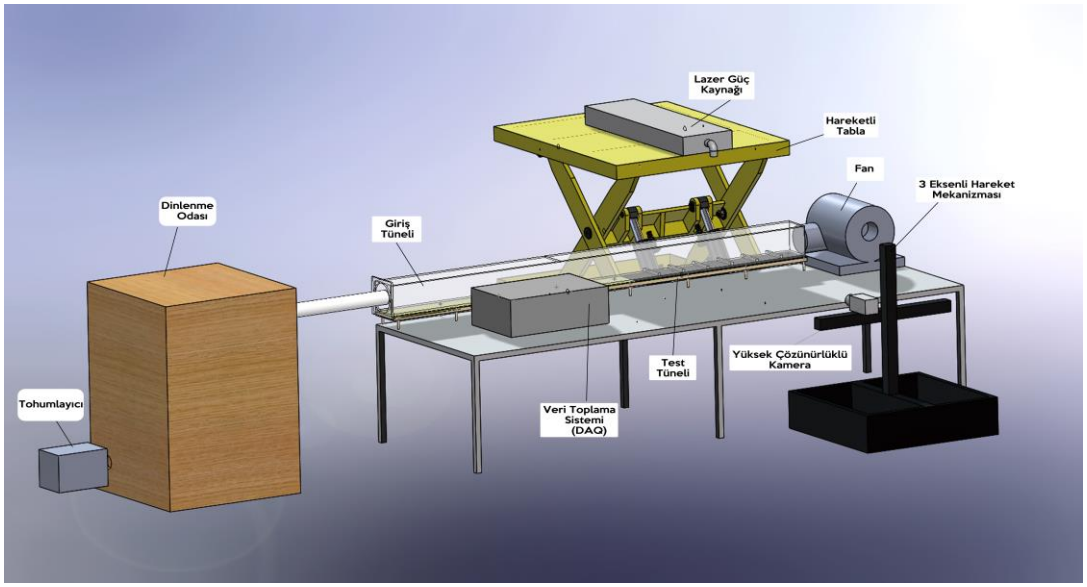
Voltaj	:	380 V
Güç	:	2,2 kW
Maksimum debi	:	0,4 $kg.s^{-1}$
Basınç	:	1.800 Pa
Maksimum devir	:	2.850 dak^{-1}

Fanın kontrolü fan sürücüsü yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Söz konusu fan sürücüsü 0-50 Hz aralığında değişen frekanslar için fanın besleme yaptığı hava hızı takip edilmiştir. Görsel 4.2'de fanın kontrolünde kullanılan fan sürücüsü görülmektedir.



Görsel 4.2. *Fan sürücüsü*

Toplam uzunluğu 2535 mm olan soğutma kanalı PIV ölçümleri sırasında lazer ışığının geçirgenliğini görüntü almaya imkan verebilmesi amacıyla pleksiglas malzemeden Anadolu Üniversitesi imalat atölyelerinde üretilmiştir. Sabit bir masa üzerinde alçaltılıp yükseltilmesine imkan verecek şekilde bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 4.1'de deney setinin bilgisayar ortamında oluşturulmuş modeli görülmektedir.

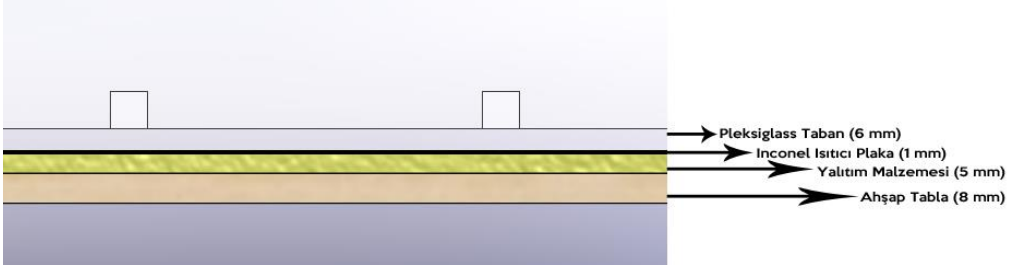


Şekil 4.1. *Deney sistemi şematik gösterimi*

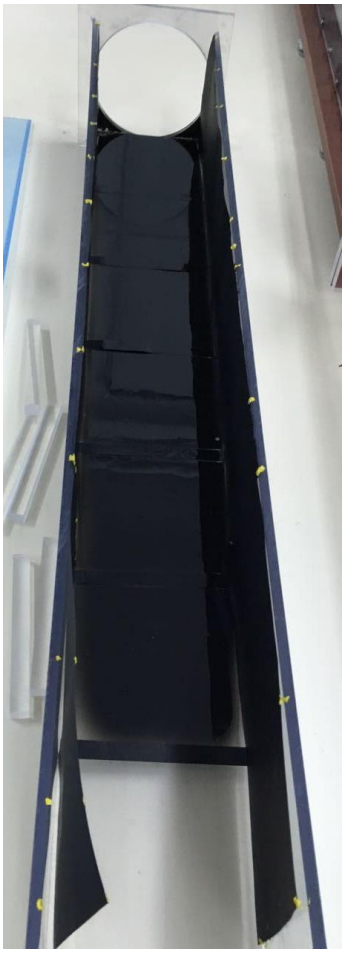
Kanalın giriş ağzına PIV ölçümünde kullanılacak tohumun (seed) homojen olarak akışa karışabilmesine olanak sağlayan bir dinlenme odası yerleştirilmiştir. Tohumlayıcı olarak bir duman jeneratörü kullanılmış ve dinlenme odasında hava ile dumanın karışımı sağlanmıştır. Kanalın çıkış tarafında ise kanal ile fanın bağlantısı sağlanmıştır. Fan burada emiş yaparak kanal içerisinde akışı sağlamaktadır.

PIV ölçümü sırasında lazer ışığının dağılmasını önlemek amacıyla montaj öncesinde kanalın tabanı mat siyah boya ile boyanmıştır. Görsel 4.3'te boyama esnasında çekilmiş bir fotoğraf verilmiştir. Benzer uygulama kameranın karşısına gelen yan yüzeyde ve üst kapakta lazer ışığının geçmesine imkan verecek şekilde gerçekleştirilmiştir.

Soğutma kanalında ısı geçişini incelemek amacıyla kanalın altına Şekil 4.2'de da görüldüğü gibi ısıtıcı plaka ve yalıtım malzemesi yerleştirilmiştir.



Şekil 4.2. *Isıtıcı plaka yerleşimi*



Görsel 4.3. *Soğutma kanalı boyama uygulaması*



Görsel 4.4. *PIV lazer güç kaynağı*

Mevcut PIV sistemi lazer güç kaynağı, yüksek hızlı kamera ve lensler, zamanlayıcı tohumlayıcı hareket sistemleri, 90° ayna ünitesinden meydana gelmektedir. Söz konusu PIV sistemi, ses hızına yakın ve ses üstü hızlarda çalışmaya uygun 1000 Hz frekansı sahip bir lazer barındırmaktadır. Ayrıca, CMOS tipi sensörlerle desteklenen yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılmıştır. Scheimpflug bağlantı mekanizması sayesinde mevcut PIV sisteminde iki kameranın aynı kesite odaklanması mümkün olup, elde edilen iki boyutlu vektör dağılımından üçüncü boyuttaki vektörler çıkarılabilmektedir.

Deney setinde lazer güç kaynağı ile kameranın eş zamanlı çalışmasını sağlayan ve her ikisinin de iş istasyonu üzerinden kontrolünü sağlamak için bir zamanlayıcı ulunmaktadır. Böylelikle ilk sinyali oluşturarak lazer güç kaynağı, kamera ve iş istasyonunun birbirileriyle zaman uyumlu olarak çalışması sağlanır. Lazerin ışığını 90° açıyla yönlendirmek için 90° ayna ünitesinden faydalanılmıştır. Böylelikle lazerin farklı açılardan soğutma kanalına yönlendirilmesi mümkün olmuştur. Görsel 2.4'te lazer güç kaynağı ve 90° ayna ünitesi görülmektedir.

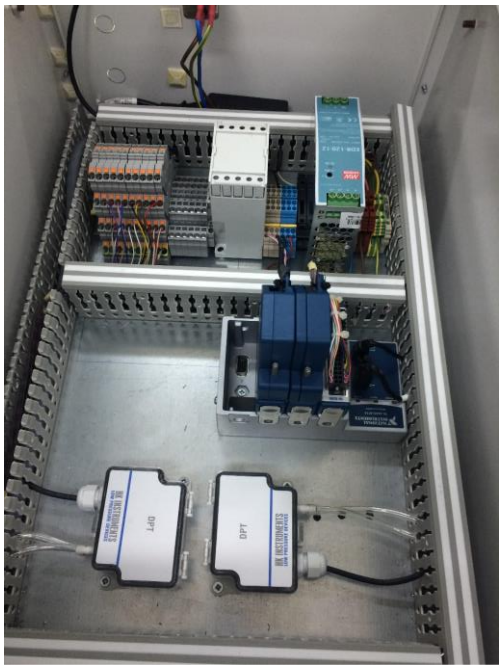
Lazer güç kaynağı her üç eksende de hareket kabiliyetine sahip bir tabla ile hareket ettirilebilmektedir. Soğutma kanalı içerisinde giriş yönüne göre dördüncü sıradaki rib etrafındaki akış incelenmek üzere lazer üstten kanalın akış yönünde merkezine odaklanmıştır. Hareket kolaylığı sağlamak üzere üç eksenli bir hareket sistemine bağlanmış olan kameranın baktığı yön ile yukarıdan gelen lazer ışığının izlediği yol 90° açı yapacak şekilde çakıştırılmıştır. Görsel 2.5'te de hareket sistemi ve üzerine yerleştirilmiş kamera görülmektedir.



Görsel 4.5. *Görüntü almada kullanılan kamera ve üç eksenli hareket sistemi*

PIV ölçümleri esnasında sistem kontrolü ve veri toplama amacıyla bir iş istasyonu kullanılmıştır. Aynı iş istasyonunda aynı zamanda hareket sistemi mekanizmasının bilgisayarlı kontrolüne imkan veren bir yazılım da bulunmaktadır.

Deneysel çalışma kapsamında akış hızının takibi amacıyla giriş kanalı ile soğutma kanalının geçiş noktasında basınç ölçümü gerçekleştirilmiştir. Aynı noktadan eş zamanlı olarak hem toplam basınç hem de statik basınç takip edilmiştir. Böylelikle aradaki farktan yararlanarak dinamik basınç ve akış hızı belirlenmiş ve deney süresince takip edilmiştir. Veri toplama sistemi iş istasyonuna bağlanarak iş istasyonunda oluşturulan LabView tabanlı yazılım ile anlık veri takibi sağlanmıştır. Görsel 4.6'da da görüldüğü üzere veri toplama sisteminde, fark basınç sensörleri, sıcaklık ölçüm modülü, güç ünitesi ve bilgisayar bağlantısında kullanılan kart bulunmaktadır.



Görsel 4.6. *Veri toplama sistemi*

PIV ölçümü ilk bakışta kolay gibi görünse de akışın sırasıyla aşağıdaki işlemler yapılarak veri toplanmaktadır:

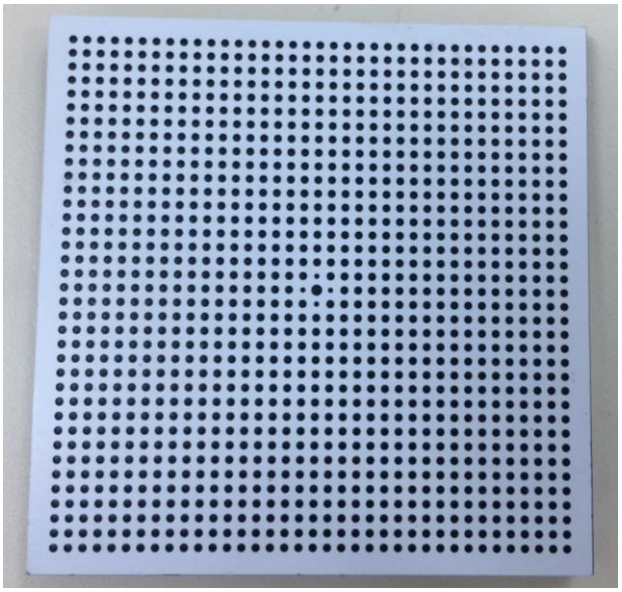
- Kamera ve lazer ışığının ölçüm alınacak noktada çakıştırılması
- Lazer gücünün ve çıkış açısının ayarlanması
- Kamera iç kalibrasyonunun yapılması
- Görüntü kalitesi kalibrasyonunun yapılması
- Kanal içerisinde akışın sağlanması
- Örnek görüntü alınarak veri kalitesinin kontrol edilmesi
- İşlenebilir verinin alınması

PIV ölçümü yapılırken, sistemin temel çalışma prensibine uygun şekilde lazer ışığının izlediği yol ile kameranın bakış açısı birbiriyle dik olacak şekilde kesişmelidir. Bu koşul travers yardımıyla kameranın hareket ettirilmesi ya da lazerin kanalla aynı hareket ettirilerek sağlanır. Bu esnada lazer başlığından yapılan ince ayarlar ile lazerin çıkış açısı ayarlanmalıdır. Bu işlemin tamamlanmasının ardından yazılım ara yüzünden değişkenler tamamlanarak kamera içerisinde bulunan ışık sensörü başta olmak üzere pek çok bileşenin kalibrasyonu gerçekleştirilir.

Kamera kalibrasyonunun tamamlandığından emin olunduktan sonra ise görüntü kalibrasyon plakası görüntülerin toplanacağı noktaya yerleştirilerek görüntü

kalibrasyonuna başlanır. Görsel 4.7'de görülen görüntü kalibrasyon plakasının üzerinde bulunan noktalar net olarak görüntülenecek şekilde kameranın yakınlaşma, diyafram, optik ayarları yapılır. Plaka üzerindeki noktaların net olduğundan emin olunduktan sonra alınan kalibrasyon görüntüsü üzerinde uç noktalarda bulunan iki nokta arası mesafe yazılımda tanımlanır. Böylelikle yazılımın görüntü işlemede kullanacağı referans mesafe belirlenmiş olur. Görüntü işleme aşamasında bu değer kullanılarak parçacıkların yer değiştirme miktarları belirlenebilecektir.

Tüm bu ön işlemlerin ardından soğutma kanalı içerisinde istenilen koşulda akışın gelişmesine imkan verilir. Deney setinin devreye alınmasının ardından PIV tekniği ile örnek görüntü alınır. Bu görüntüde tohum dağılımı, görüntü netliği ve lazer aydınlatma şiddeti incelenerek işlenebilirliğine karar verilir. Eğer görüntünün işlenebilir olmadığı düşünülüyorsa gerekli ayarlar yapılarak görüntü iyileştirilir. Eğer görüntünün işlenebilir ve kullanılabilir olduğu kararına varılırsa, görüntü serisi toplanarak kaydedilir.



Görsel 4.7. *Görüntü kalibrasyon plakası*

4.2. Sistem İşletim Koşulları

Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda, rib dizili soğutma kanalı işletim koşulları Tablo 3.2'de toplu olarak verilmiştir. Benzetim modeline dayanarak sistemin U= 2 $m.s^{-1}$, U= 4 $m.s^{-1}$, U= 6 $m.s^{-1}$, U= 8 $m.s^{-}1$ ve U= 2 $m.s^{-1}$ çalıştırılmasına

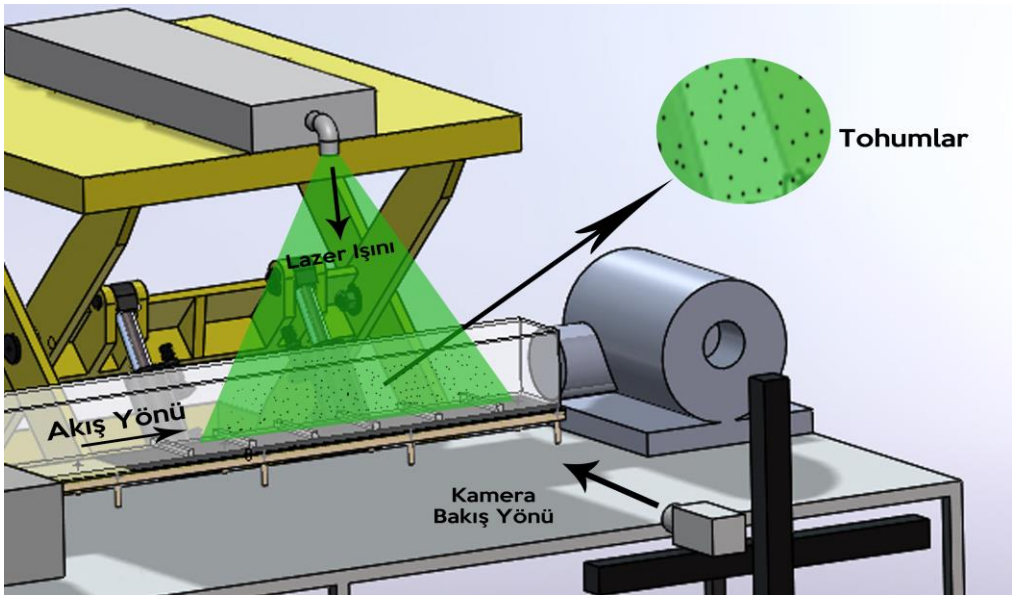
karar verilmiştir. Böylelikle rib kullanımının düşük ve yüksek hızlardaki akışa nasıl etki ettiği ortaya konulabilmiştir.

Tablo 4.2. *Deneysel çalıştırma şartları*

	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Re	20.000	40.000	60.000	80.000	100.000
U_0 (m.s^{-1})	2	4	6	8	10
T_0 (K)	292,15	292,15	292,15	292,15	292,15
P_0 (kPa)	101,70	101,70	101,70	101,70	101,70

4.3. PIV Yöntemi

PIV yöntemi, son yıllarda gelişen görüntüleme ve kamera teknolojisinden yararlanmaktadır. PIV ölçümü esnasında en önemli nokta akış içerisinde tohumların homojen olarak karışmış olmasıdır. Akış içerisindeki bu parçacıkların bölgesel akımlarla beraber hareket edebilecek kadar küçük olduğu kabul edilmektedir. Akış içerisinde ölçüm alınacak bölgeye gönderilen ışık hüzmesi akışla beraber hareket eden parçacıklarda parlama etkisi oluşturur. Parlak ve aydınlanmış olarak görülen parçacıkların hareketleri kamera ile kaydedilir. Kaydedilen görüntüler kullanılarak parçacıkların yer değişimleri ve buna bağlı olarak da hızları belirlenebilir. Yöntemin adı da buradan gelmekte olup parçacık görüntülemeyle hız ölçümüdür (Raffel ve Willert, 2013). Bu tez çalışmasında kurulan deney setine ait PIV şematiği ve çalışma prensibi Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. *PIV çalışma prensibi*

Bir görüntü çiftini incelerken parçacığın izlediği yolu belirlemek mümkündür. Lazerin iki atışı arasında geçen sürenin de bilinmesi halinde parçacık hızı hesaplanabilir. Buradaki iki lazer atışı arasındaki süre ortalama akış hızı ve kameranın özelliklerine göre ayarlanabilmektedir. Bu sürenin kısa olması halinde parçacık görüntüleri üst üste düşebilir. Eğer iki lazer atışı arasındaki süre gereğinden fazla uzunsa da görüntü yakalanamadan parçacık aydınlatılan bölgenin dışına çıkacaktır. Bu her iki durumda istenmeyen koşullar olup, yer değiştirmenin ve hızın belirlenmesini engeller (Raffel ve Willert, 2013).

Bir görüntü çiftinin analizinde, öncelikle görüntüler küçük bölgelere ayrılır, ki bu bölgelere inceleme dilimleri demek mümkündür. Bu bölgelerin boyutlarını belirlerken dikkat edilmesi gereken husus, görüntüde gözle takip edilebilen bir parçacığın iki karedeki yer değişiminin inceleme dilimi içerisinde kalıp kalmadığıdır. Kare olarak ayrılan sorgu dilimi içerisinde kalmasıyla parçacığın yer değişiminin hesaplanması daha olasıdır. Her bir inceleme dilimi için ayrı ayrı korelasyonlar çözülür. Daha sonra, inceleme dilimlerinin boyutları büyütülerek tüm görüntüdeki parçacıkların yer değişimleri beraber hesaplanır(Raffel ve Willert, 2013).

Parçacıkların akış içerisinde homojen dağılması durumunda parçacık hareketini takip etmek her zaman için daha kolaydır. Bir parçacığın akış içerisindeki hareketi Bassett-Boussinesq-Oseen denklemiyle açıklanabilir (Corrsin ve Lumley, 1956):

$$\frac{du_p}{dt} + au_p + c\int_{t_0}^{t} \frac{du_p/d\tau}{\sqrt{t-\tau}}\,d\tau - \frac{du_a}{dt} + au_a - c\int_{t_0}^{t} \frac{du_a/d\tau}{\sqrt{t-\tau}}\,d\tau = 0 \qquad (4.1)$$

Burada p ve a alt indisleri sırasıyla parçacık ve akışı göstermektedir. Söz konusu denklemdeki sabitler aşağıdaki bağıntılardan bulunur:

$$a = \frac{18\upsilon}{d_p^2\left(\frac{\rho_p}{\rho_a} + \frac{1}{2}\right)} \qquad (4.2)$$

$$b = \frac{1.5}{\left(\frac{\rho_p}{\rho_a} + \frac{1}{2}\right)} \qquad (4.3)$$

$$c = \frac{9\sqrt{\upsilon/\pi}}{d_p^2\left(\frac{\rho_p}{\rho_a} + \frac{1}{2}\right)} \qquad (4.4)$$

LDV, sıcak tel anemometresi gibi akış ölçüm tekniklerinin tersiene parçacık görüntülemeyle hız ölçümü anlık olarak hız dağılımı ve akış yapısı hakkında fikir vermektedir. Parçacık görüntülemeyle hız ölçümünde çözünürlük kameraya bağlıdır ve sınırlıdır (Raffel ve Willert, 2013).

4.3.1 Veri İşleme Yöntemleri

Parçacık görüntülemeyle hız ölçümünde alınan görüntüler en küçük kareler metodu, ortalama korelasyon, uyarlanabilir PIV gibi pek çok yöntemle incelenebilir. Burada esas olan matematiksel yaklaşımla parçacığın yer değiştirme mesafesinin hesaplanmasıdır. Daha önce de değinildiği üzere, bir görüntü çifti öncelikle inceleme dilimlerine bölünür. İnceleme dilimleri içerisindeki parçacıklar ayrı ayrı birbirleriyle eşleştirilir. Çapraz korelasyon yöntemi yaygın olarak görüntü çiftlerinin işlenmesinde kullanılır. Görüntü çiftinde yer alan parçacıklar eşleştirilerek hareket incelenir. Burada aşağıda verilen ifadeden yararlanılır (Raffel ve Willert, 2013):

$$(s) = \int \tau_1(X)\tau_2(X+s)\,dX \qquad (4.5)$$

Çok sayıda görüntü çiftlerinin işlenmesinde ise görüntülerin ışık şiddetiyle orantılı olarak tanımlanan inceleme dilimlerinde aşağıdaki bağıntılar kullanılır:

$$\tau_1(X) = W_1(X - X_{I1})I_1(X) \; ve \; \tau_2(X) = W_2(X - X_{I2})I_2(X) \tag{4.6}$$

$$I_1(X) = \langle I_1 \rangle + \Delta I_1(X) \; ve \; I_2(X) = \langle I_1 \rangle + \Delta I_1(X) \tag{4.7}$$

$$R(s) = R_C(s) + R_F(s) + R_D(s) \tag{4.8}$$

$$R_C(s) = \int W_1\,(X) W_2(X + s) \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle dX \tag{4.9}$$

$$R_F(s) = \int W_1\,(X) W_2(X + s) [\langle I_1 \rangle \Delta I_2(X + s) + \langle I_2 \rangle \Delta I_1(X)] dX \tag{4.10}$$

$$R_D(s) = \int W_1\,(X) W_2(X + s) \Delta I_1(X) \Delta I_2(X + s) dX \tag{4.11}$$

Ortalama korelasyon yöntemi akış içerisinde parçacık yoğunluğunun düşük olduğu durumlar için kullanışlıdır. . Ortalama korelasyonda, her bir inceleme dilimine ait ortalama fonksiyon belirlenir ve daha sonra üst inceleme dilimlerinin ortalaması inceleme dilimlerinin ortalamasına göre hesaplanır. Görüntüdeki parçacık yoğunluğunun zirveler belirlenir ve inceleme dilimlerinde anlamlı hızlar olduğu anlamına gelir. Yeterli sayıda görüntü alınması halinde anlamlı sonuçlar vermesi mümkündür (Raffel ve Willert, 2013).

Uyarlanabilir PIV yöntemi, inceleme dilimlerinin parçacık yoğunluğunun ve hız dağılımlarının farklı olduğu koşullar için uygundur. Bu yöntemde inceleme dilimlerinin büyüklükleri otomatik olarak ayarlanır ve uyarlanır. Görüntülerdeki parçacık yoğunluğu histogram üzerinden incelenecek olursa zirve oluşumlarının normalde olması gerekenden farklı olduğu ve görüntünün pek çok yerinde farklı hareketlerde bulunan parçacıklar olduğu anlaşılır. Burada, I ve I' görüntü çiftinin

parçacık yoğunluğu olmak üzere aşağıda verilen değiştirilmiş çapraz korelasyon ifadesi kullanılır (Raffel ve Willert, 2013):

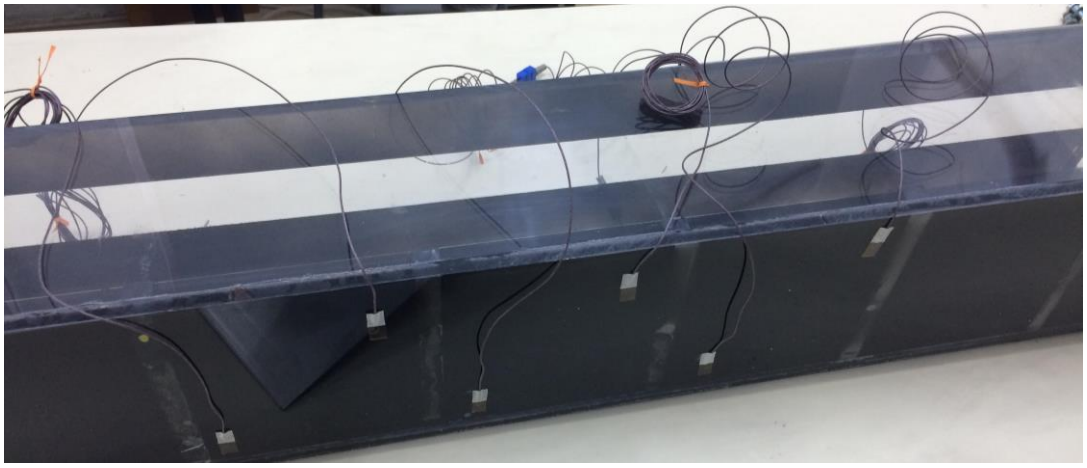
$$R(x,y) = \sum_{i=-K}^{K} \sum_{j=-L}^{L} I(i,j)I'(i+x, j+y) \tag{4.12}$$

Temelde görüntü işleme için kullanılan çapraz korelasyon ile hız bileşenleri çıkartılırken sıfırıncı mertebedeki denklem terimleri kullanılır fakat yüksek mertebeli terimlerden gelen girdap ve akış bozulması bileşenler dışarıda bırakılır. Bu yaklaşımla akışın tam olarak laminer olduğu düşünülür. En küçük kareler metodunda ise akış içerisindeki parçacık gerekli durumlarda girdap etkisine, kayma etkisine maruz bırakılır ve bu şekilde görüntü işlenir (Raffel ve Willert, 2013).

Bu tez çalışması kapsamında incelenen rib dizli soğutma kanalı iç akışında çok fazla girdap bölgesi oluşumu ve hız profilinin ani değişim göstermesi ön görüldüğünden uyarlanabilir PIV yöntemi ile görüntü işlemenin uygun olduğuna karar verilmiştir.

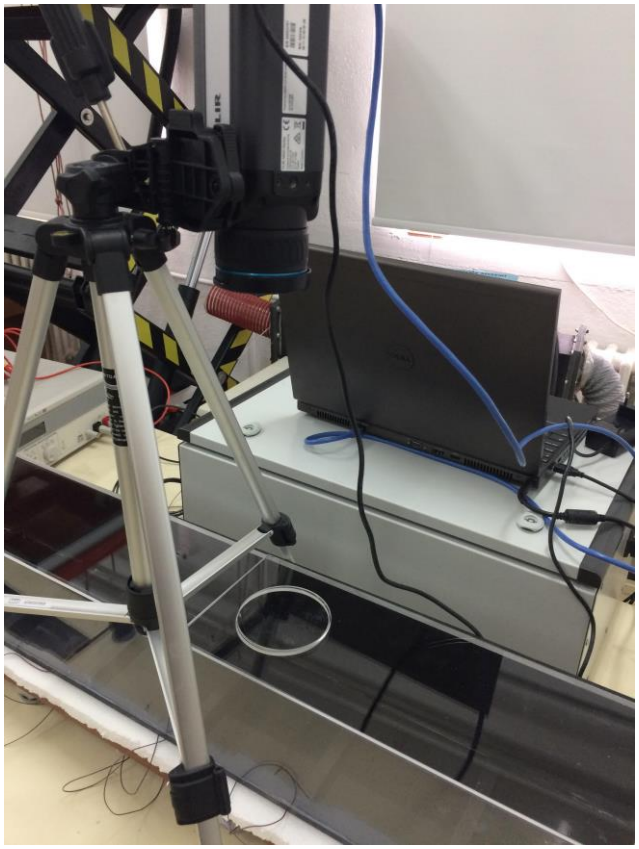
4.4. Sıcaklık, Basınç ve Hız Ölçümü

Soğutma kanalında meydana ısı geçişini incelemek amacıyla sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu amaçla T tipi ısıl çiftlerden yararlanılmıştır. Görsel 4.8'de görüldüğü biçimde ısıl çiftler soğutma kanalı taban yüzeyine yerleştirilmiştir. Isıl çiftler ile yapılan ölçümün esas amacı yüzeydeki sıcaklık dağılımının homojenliğini takip etmektir.



Görsel 4.8. *Soğutma kanalı taban yüzeyinde ısıl çift uygulaması*

Isı geçişi olayını derinlemesine inceleyebilmek için soğutma kanalı tabanında termal kamera ile sıcaklık taraması da yapılmıştır. Bu amaçla kullanılan termal kamera ve camı Görsel 4.9'da görülmektedir.



Görsel 4.9. *Termal kamera uygulaması*

Soğutma kanalı içerisinde basınç düşümünü takip edebilmek amacıyla giriş kanalı çıkışında ve test kanalı çıkışından basınç ölçümleri alınmıştır. Bu noktalardan alınan toplam ve statik basınç ölçümleri ile test kanalı girişi ve çıkışındaki akış hızları da aşağıdaki bağıntılar kullanılarak belirlenebilmiştir(Çengel ve Cimbala, 2013):

$$P_{toplam} = P_{statik} + P_{dinamik} \tag{4.13}$$

$$P_{dinamik} = 0.5\rho U^2 \tag{4.14}$$

Görsel 4.10'da statik ve toplam basınç ölçümünde kullanılan problar görülmektedir.



Görsel 4.10. *Kullanılan toplam ve statik basınç probları*

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, bir türbin kanatçığı soğutma kanalı içerisinde 90° açılı rib dizilimi uygulamasının akış yapısı üzerine etkileri ele alınmıştır. Bu kapsamda hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve deneysel yöntemlerle kanal içerisindeki akış yapısı incelenmiştir.

Tezin bu bölümünde, öncelikle hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinden elde edilen bulgular, daha sonra ise parçacık görüntülemeyle hız ölçümü tekniği kullanılarak elde edilen bulgular her bir çalışma koşulu için ayrı ayrı tartışılacaktır.

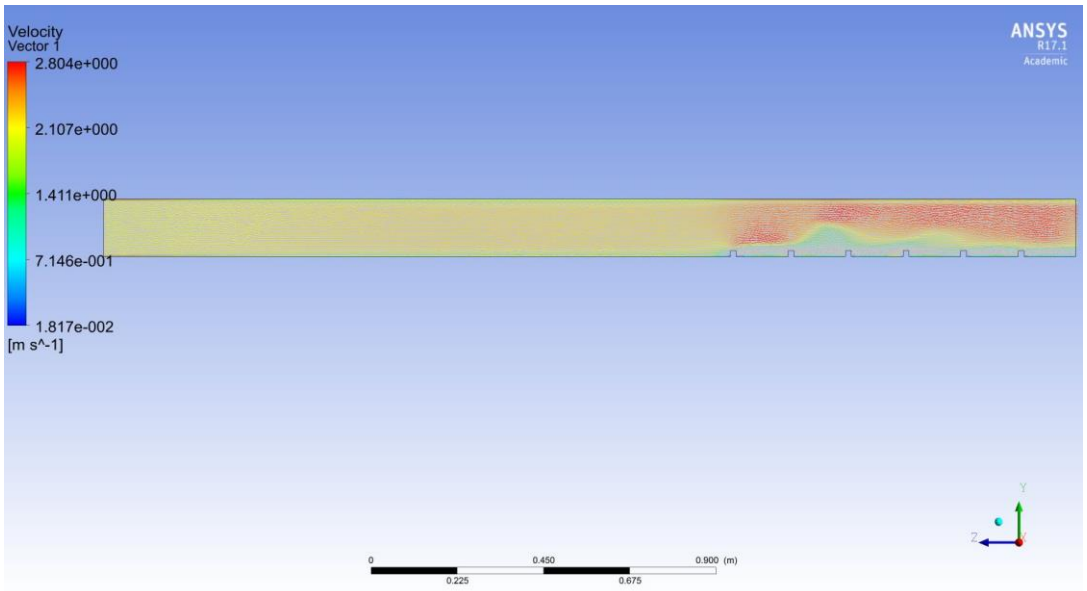
5.1. U= 2 $m.s^{-1}$ Şartlarında Elde Edilen Bulgular

Re=20.000 koşulunda hava akışının kanala giriş hızı 2 $m.s^{-1}$ olarak daha önce deney sistemi işletim koşulları başlığı altında belirtilmişti. Şekil 5.1'de de görüldüğü üzere, akış öncelikle giriş kanalından geçmekte olup, burada düzenli rejime kavuşmaktadır. Giriş kanalından soğutma kanalı geçiş noktasındaki akım çizgileri bunun bir göstergesidir. İlk ribin engelleme etkisi sonucunda akışta bozulma meydana gelmekte ve 2 $m.s^{-1}$ mertebesindeki akış hızı –y ekseninin merkezinde 2.8 $m.s^{-1}$ seviyelerine çıkmaktadır. Rib etkisi ile oluşan ikincil akışlar, serbest akışı tamamen bozarak girdaplar oluşturmakta ve kanal çıkışına kadar bu durum diğer riblerden kaynaklı olarak artarak devam etmektedir.

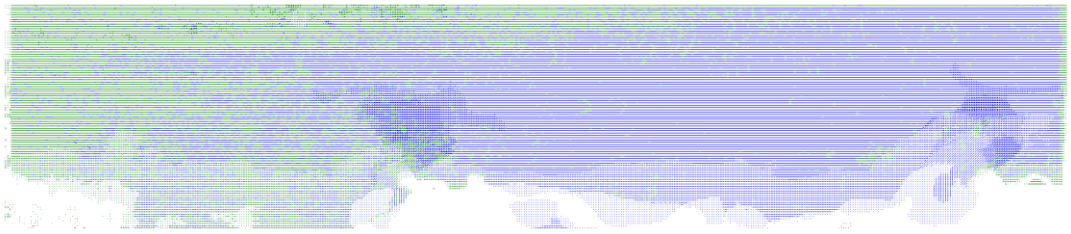
Tablo 4.2'de verilen 1 numaralı çalıştırma koşulları altında yapılan deneyde fan sürücüsünün frekans değeri 3.5 Hz'e ayarlanarak rib dizili soğutma kanalı girişinde 2 $m.s^{-1}$ hıza ulaşılmıştır. Aynı tabloda verilen sıcaklık değeri laboratuvarda bulunan iklimlendirme cihazı ile sağlanmış ve T tipi ısıl çift kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 5.2'de verilen akış alanı ve vektör haritası görüntü işleme sonucunda elde edilmiştir. Bu ölçüm sırasında kameranın görüntü kalibrasyonu giriş yönüne göre dördüncü sıradaki rib pozisyonu için yapılmıştır. Şekil 4.11'de verilen akış alanı Şekil 4.1 ve 4.2'deki hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlemesinden elde edilmiş olan vektör haritalarını doğrulamaktadır.

Şekil 5.3'te giriş giriş yönüne göre dördüncü ve beşinci ribler arasında kalan bölge yakından görülmektedir. Dördüncü ribin ön ünde küçük, arka tarafında ise daha büyük bir girdap bölgesi bulunduğu görülmektedir. Bu girdaplar serbest akışta daha önceki riblerden kaynaklı bozulmalar sonucunda oluşan ikincil akışlarla birleşmekte

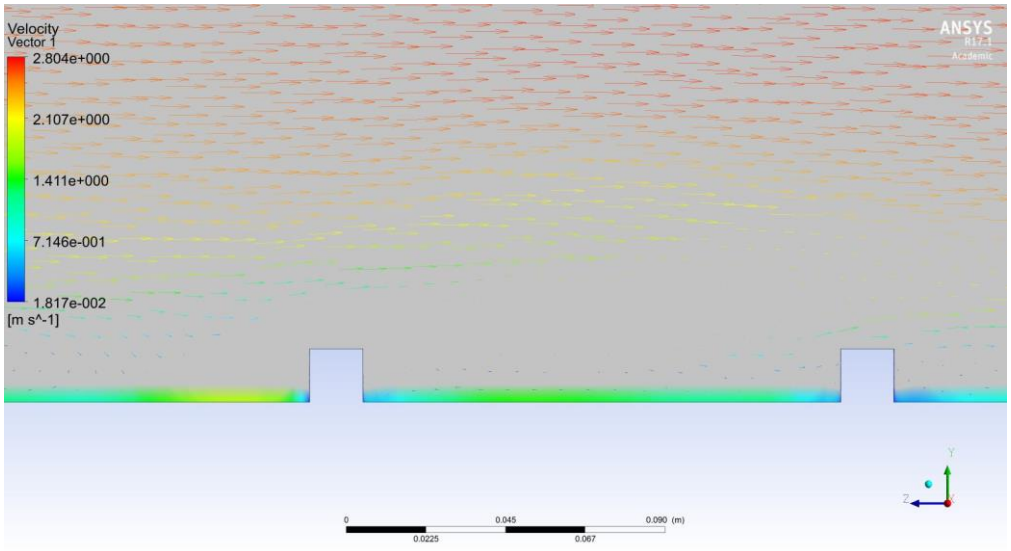
ve üst bölgelerdeki havanın da alt bölgelere inmesini sağlamaktadır. Alta doğru hareket eden akışlar yeniden birleşme ve toparlanma bölgesinde tam olarak karışmakta dır. Böylelikle kanalın üst bölgelerinden geçen hava akışı da soğutma sürecine katılmaktadır. Kanalın alt yüzeyinde ise akış durma noktasına gelmekte ve hız neredeyse sıfırlanmaktadır.



Şekil 5.1. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası*



Şekil 5.2. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası*



Şekil 5.3. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası*

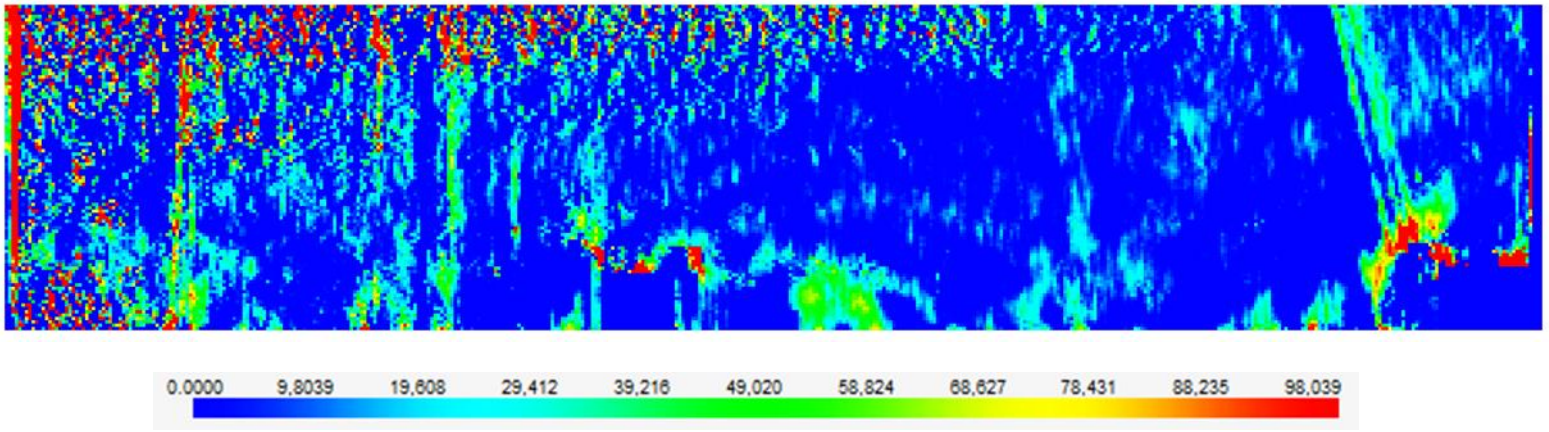
Şekil 5.4'te kanal içerisindeki akışın –x ekseni yönündeki bileşeni olan u'nun değişimini göstermektedir. Beklendiği gibi burada, akış hızı yüzeye yakın olduğu bölgede neredeyse durma noktasına gelmektedir. Benzer şekilde akışın rib üzerinden sıçrama yaptığı noktalarda da hızlandığı kırmızı ile boyalı olarak gösterilmiştir. İkincil akışların oluştuğu ve kopmaların olduğu bölgelerde ise renk gösteresinin ara değerleri görülmektedir. Şekil 5.5 ise akışın –y yönündeki bileşeninin değişimini ortaya koymaktadır. Şekil 5.4 için ortaya konan fikirler benzer şekilde Şekil 5.5 için de ortaya konulabilir.

Kanal içerisindeki akışın bileşke hızının büyüklüğü Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Burada da yüzeye yakın olan noktalarda hızın sıfır olduğu ve serbest akışa doğru –y ekseninde ilerledikçe hız büyüklüğünün artışı görülmektedir. Kademeli olarak pozitif –y ekseni yönünde artan akış hızı beklendik bir durumdur.

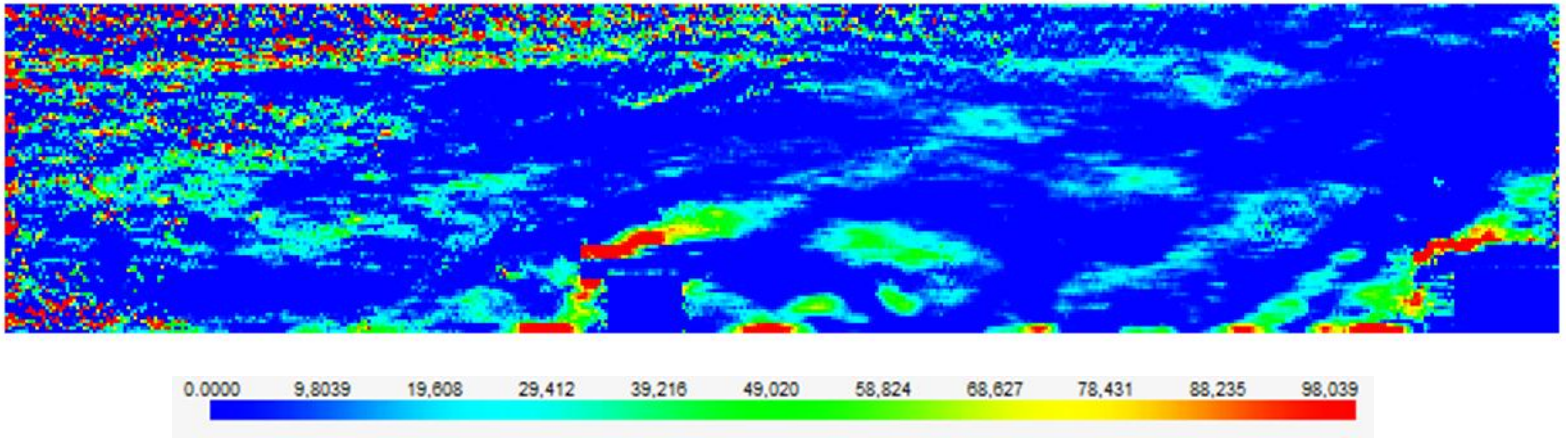
Şekil 5.7'de verilen dağılım ise akış içerisindeki girdap oranını vermektedir. Kırmızı ile gösterilen bölgeler akış içerisinde girdap oluşumunu temsil etmektedir. Burada alt bölgelerde oluşan girdaplar beklendik bir durumken yukarıdaki kırmızı bölgeler ise ikincil akış oluşumlarını belirtmektedir.

Bilindiği gibi riblerin kullanım amacı akış yapısının bozulmasıdır. Şekil 5.8'de akışın nasıl bozulmaya uğradığının bir göstergesi olarak türbülans yoğunluğu gösterilmiştir. Dikkat edilirse riblerin neden olduğu girdaplar ve ikincil akışların izlediği akım çizgileri boyunca türbülans yoğunluğu yüksektir. Akışın serbest akışa

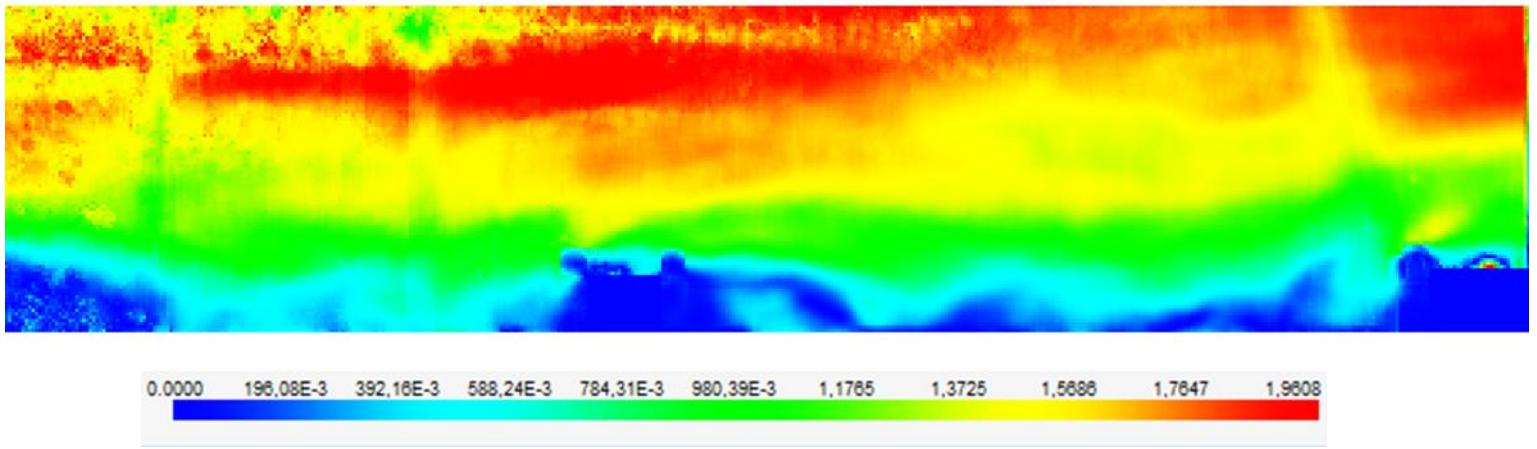
dönüşmeye başladığı bölgelerde ise türbülans yoğunluğunun da düşük olduğu anlaşılmaktadır.



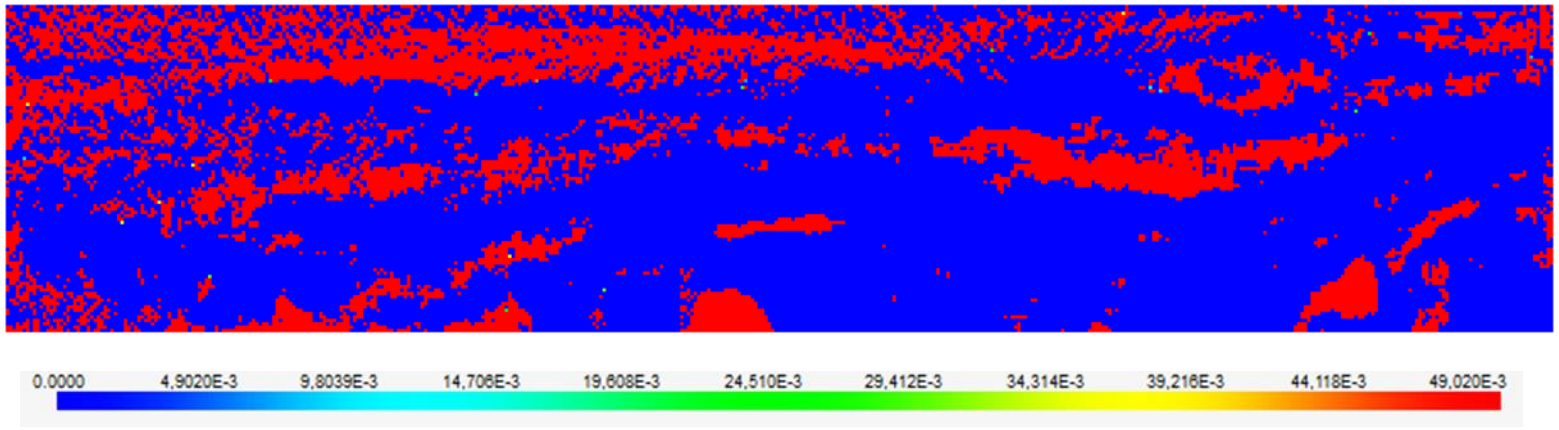
Şekil 5.4. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



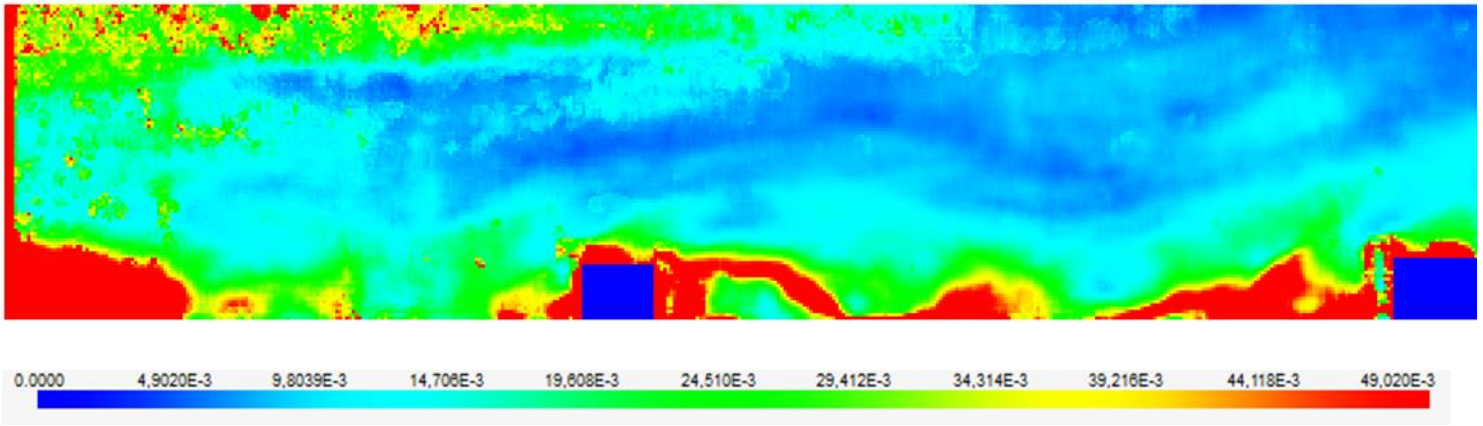
Şekil 5.5. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



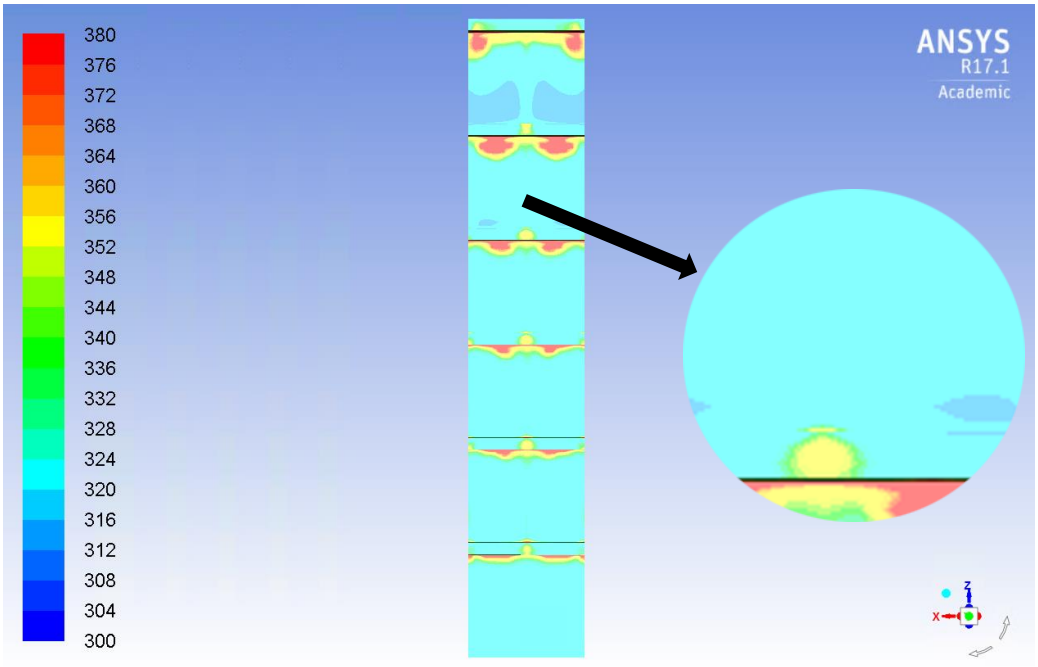
Şekil 5.6. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı*



Şekil 5.7. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş girdaplılık oranı dağılımı*

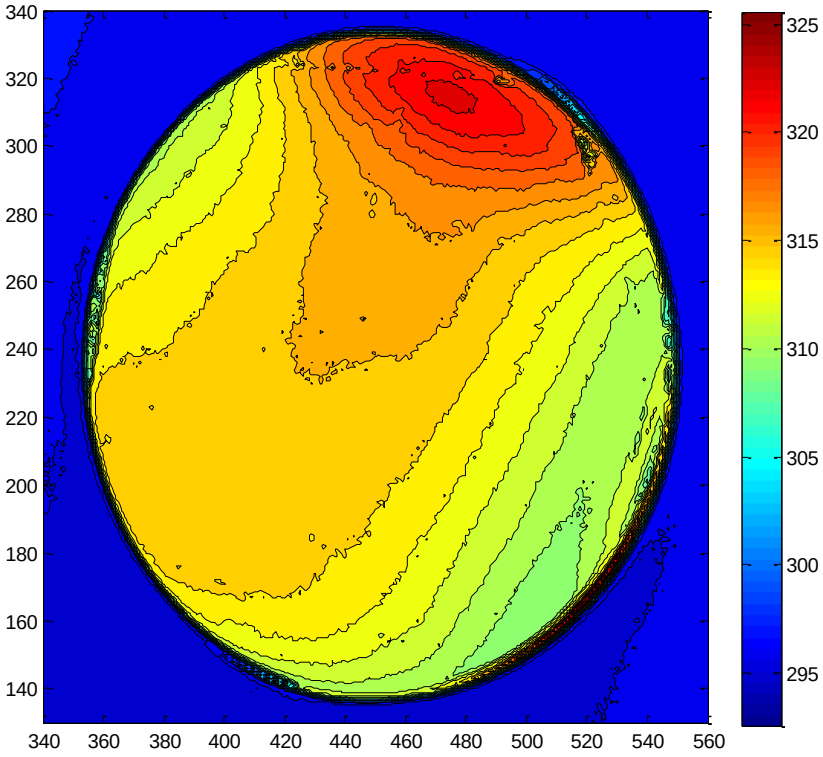


Şekil 5.8. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı*



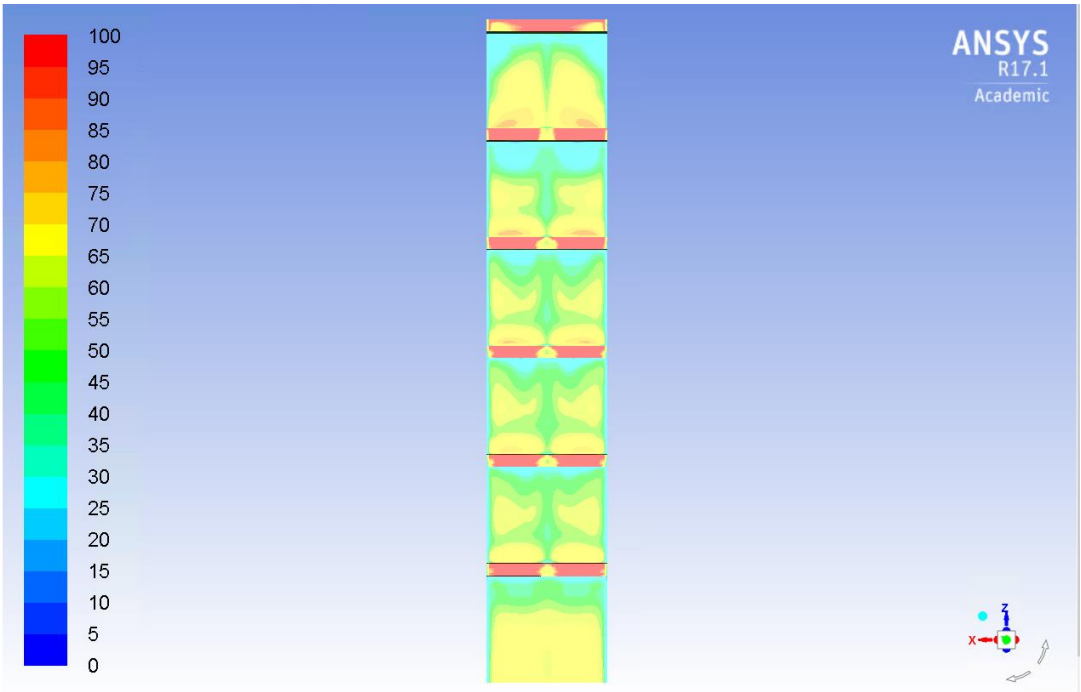
Şekil 5.9. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı*

Şekil 5.9'da rib dizili soğutma kanalı tabanındaki sıcaklık dağılımı görülmektedir. PIV ile incelenen dördüncü ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin termal kamera ölçüm sonucu ise Şekil 5.10'da görülmektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve deneysel sonucun detaylı karşılaştırması sonucunda sıcaklık dağılımının dördüncü ve beşinci ribler arasında kalan bölgede ortalama olarak 315 K düzeyinde olduğu görülmektedir. Şekil 5.10'da 325 K sıcaklığa kadar çıkan bölge Şekil 5.9'dan da anlaşılacağı üzere dördüncü rib olup, soğutma havası akışına temas etmediği anlaşılmaktadır.

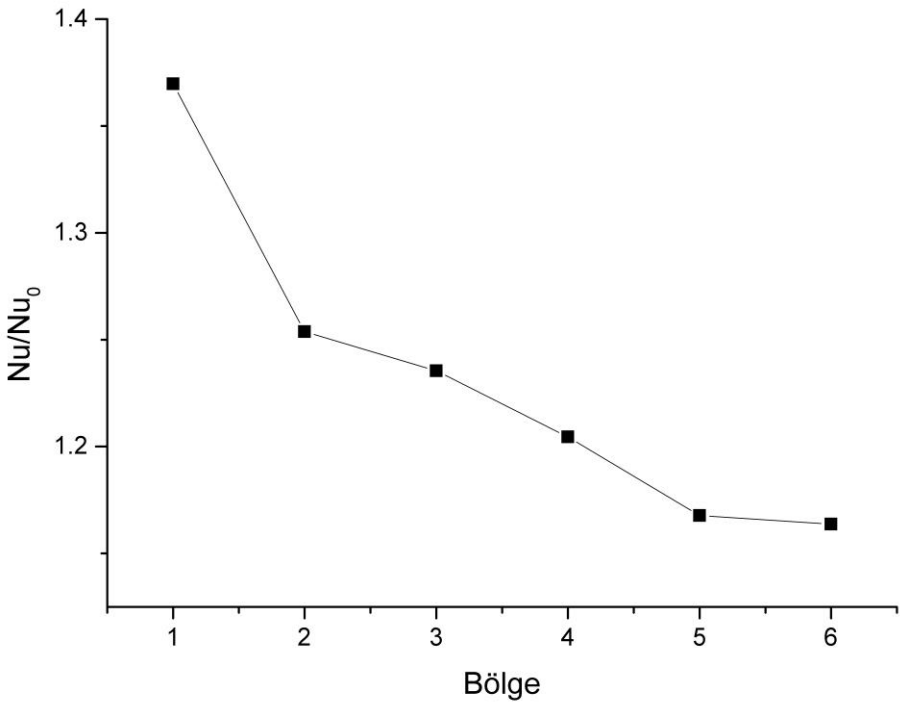


Şekil 5.10. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı*

Şekil 5.11'de ise Nusselt sayısının taban yüzeyinde nasıl bir değişim gösterdiği görülmektedir. İndirgenmiş Nusselt sayısının birinci ribten başlayarak bölgelere ayrılan taban yüzeyindeki değişimi ise Şekil 5.12'de daha iyi bir gösterim amacıyla verilmiştir. Burada her bir bölge için ortalama Nusselt sayısı hesaplanmış ve daha sonra pürüzsüz akıştaki Nusselt sayısına göre indirgenmiştir. Diğer taraftan bu değişim grafiği U= 2 m.s^{-1} akış şartlarında rib kullanımı ile ısı geçişinin ne derece iyileştiğinin de bir göstergesidir.



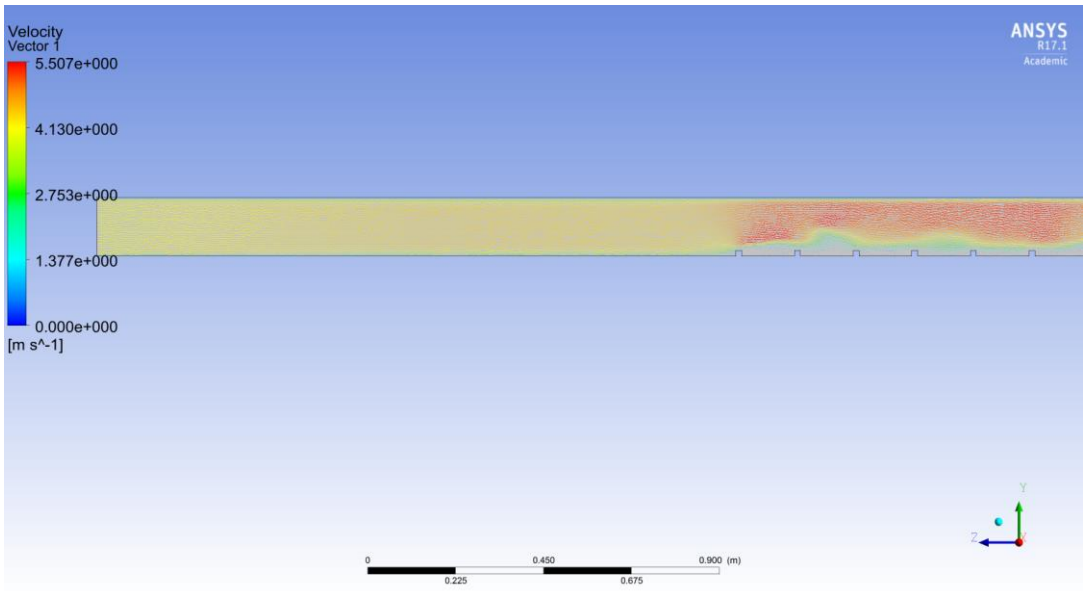
Şekil 5.11. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı*



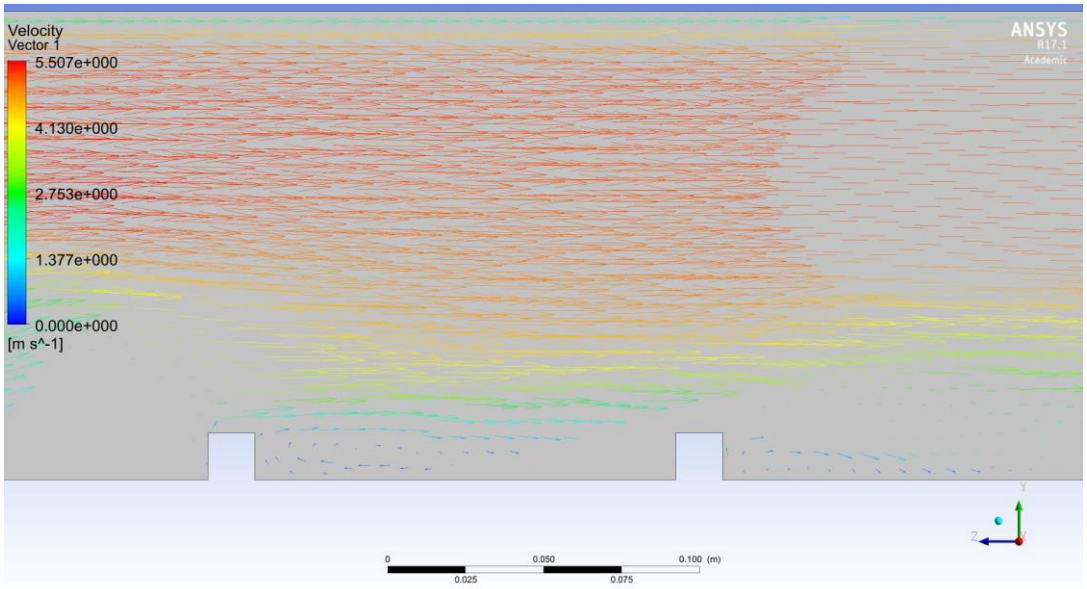
Şekil 5.12. *U= 2 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi*

5.2. U= 4 m.s^{-1} Şartlarında Elde Edilen Bulgular

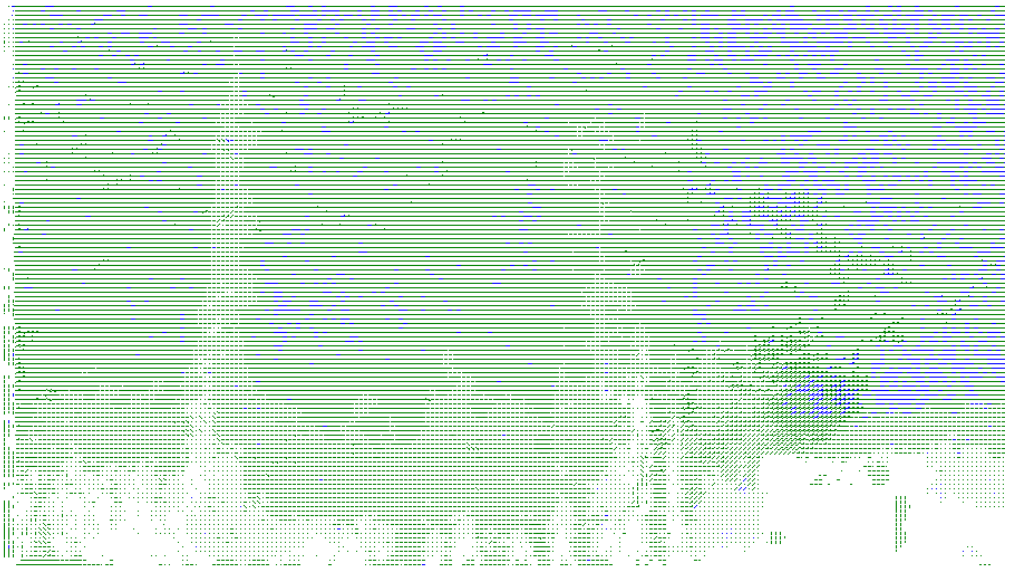
U= 4 m.s^{-1} için yapılan analizler neticesinde elde edilen hız dağılımı ve akış yapısı Şekil 5.13'te görülmektedir. Burada serbest akışın U= 2 m.s^{-1} koşullarına benzer davranış sergilediği görülmektedir. Akış hızının daha yüksek olması sebebiyle bozulan akışta 5 m.s^{-1} hızlara ulaşıldığı görülmektedir. Bu akış koşulları altında gözlemlenen bir diğer nokta ise riblerin arkasında oluşan girdapların daha görülür olduğudur. Ancak bununla beraber, rib önünde girdap oluşumunda azalma söz konusudur. Bu tespiti Şekil 5.14'ten yapmak mümkündür. Bunun nedeni olarak serbest akış bölgesindeki hava hızının daha yüksek olmasından dolayı yeniden birleşen akışın serbest akışa dahil olarak ribi atlama eğiliminin artmasıdır.



Şekil 5.13. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası*



Şekil 5.14. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası*

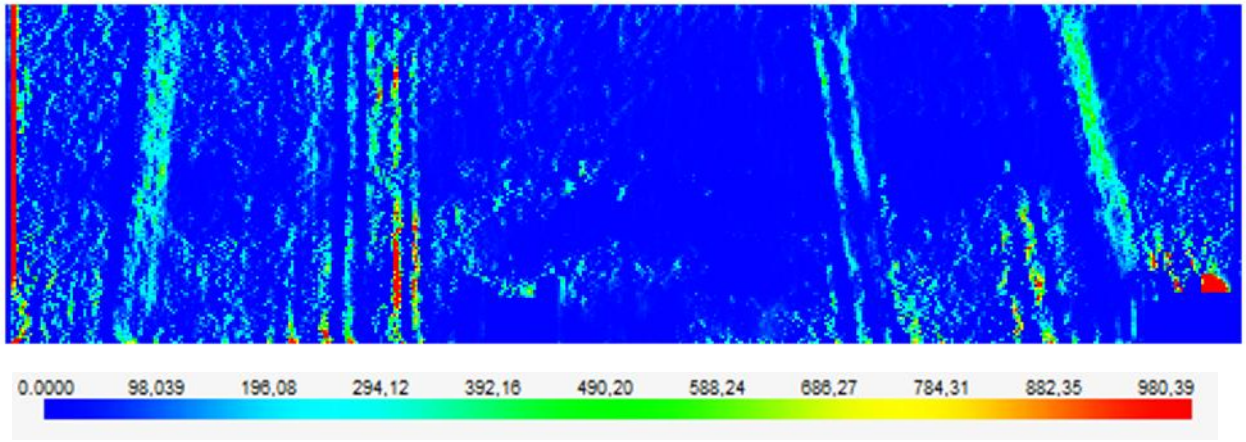


Şekil 5.15. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası*

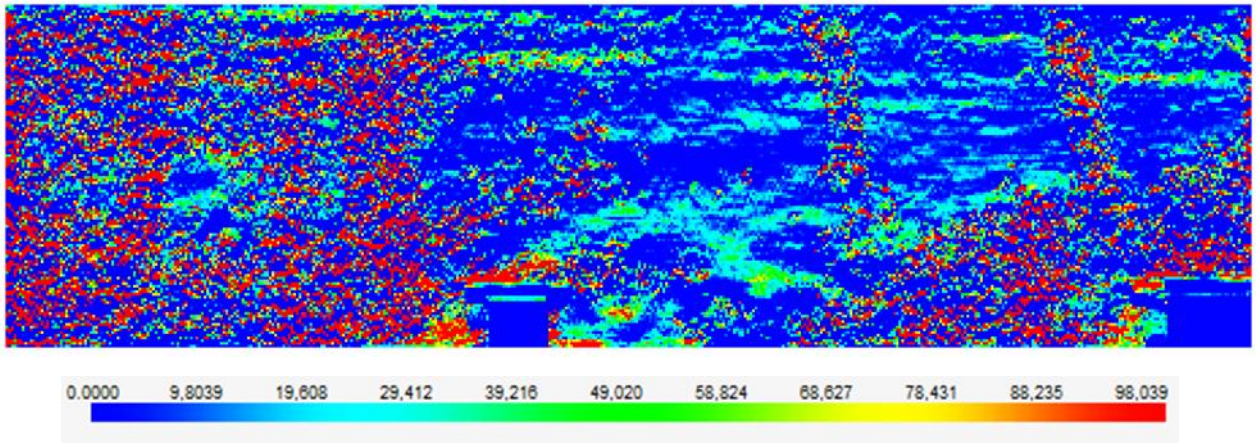
Deneysel çalışma esnasında fan sürücüsü 5.4 Hz frekansa ayarlanmış ve 4 m.s^{-1} hıza ulaşılmıştır. Oda sıcaklığı ve hidrolik çap dikkate alındığında Reynolds sayısı istenen düzeye yani 40.000'e gelmiştir. Şekil 5.15'te giriş yönüne göre dördüncü sırada bulunan ribin önünde ve arkasında oluşan akış yapısı görülmektedir. Şekil 5.14 ile kıyaslaması vektörlerin nümerik değer dağılımları ile yapılmış ve doğrulama sağlanmıştır.

Şekil 5.16 ve 5.17 sırasıyla akış hızı vektörlerinin u ve v bileşenlerinin eksenel yöndeki değişimlerini ortaya koymaktadır. Daha önce Şekil 5.4 ve 5.5 için yapılan değerlendirmeler burada da geçerlidir. Ancak Şekil 5.17'de dikkat çeken bir nokta dördüncü rib önündeki kırmızı işaretlemelerin yoğunlaşmasıdır. Bunun nedeni olarak girdap oluşumuna bağlı olarak akışın hızlanması gösterilebilir. Benzer şekilde –x yönündeki hız bileşenindeki değişimler de riblerin önünde ve arkasında artmaktadır.

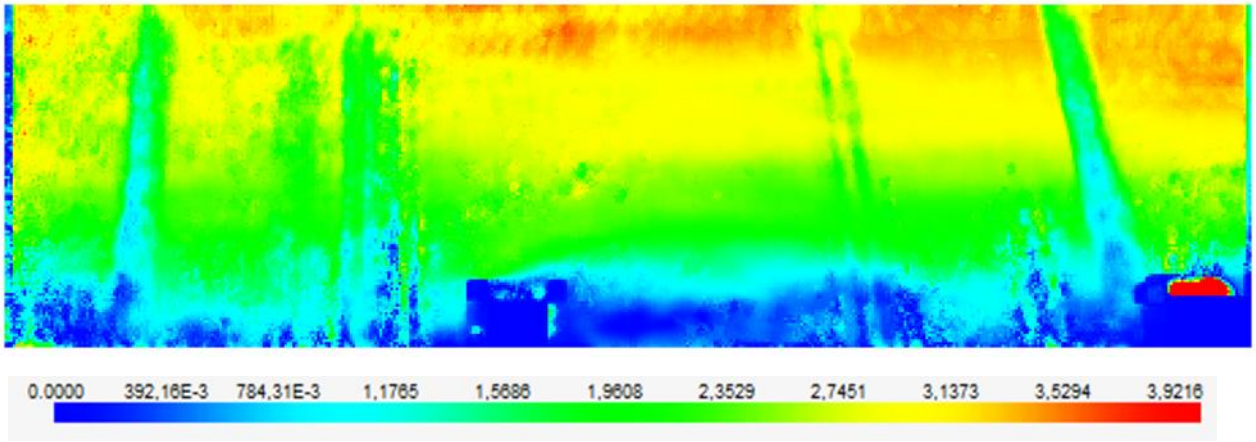
Şekil 5.18'e bakacak olursak, daha önceki U= 2 $m.s^{-1}$ şartlarındaki geçiş bölgesine göre daha geniş bir geçiş bölgesi görmek mümkündür. Bir diğer göze çarpan nokta ise beşinci ribin hemen üzerinde bozulan akışın bir göstergesi olan bölgesel yüksek hızdır. Beşinci rib etrafında hızın neredeyse sıfırlandığı bir bölgede serbest akış hızına yakın bir hız değeri görülmektedir. Şekil 5.19'da verilmiş olan girdaplılık oranı dağılımına bakılacak olursa, dördüncü rib öncesinde akışta pek çok yerde girdap oluşumlarının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde dördüncü ve beşinci riblerin arasında kalan ve akışın yeniden toparlanma bölgesine denk düşen yerde de girdap oluşumu oldukça yoğundur. Rib etkisiyle bozulan akışın izlediği yol boyunca türbülans yoğunluğunun yüksek olduğu Şekil 5.20'den görülmektedir. Girdap yoğunluğunun fazla görüldüğü bölgelerde türbülans yoğunluğunun da artmış olması beklendik bir durumdur.



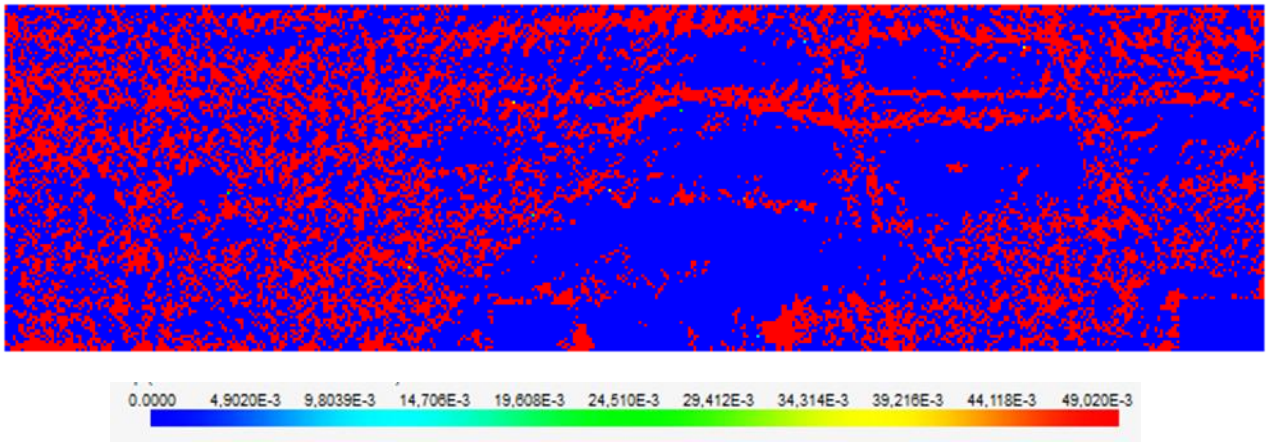
Şekil 5.16. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



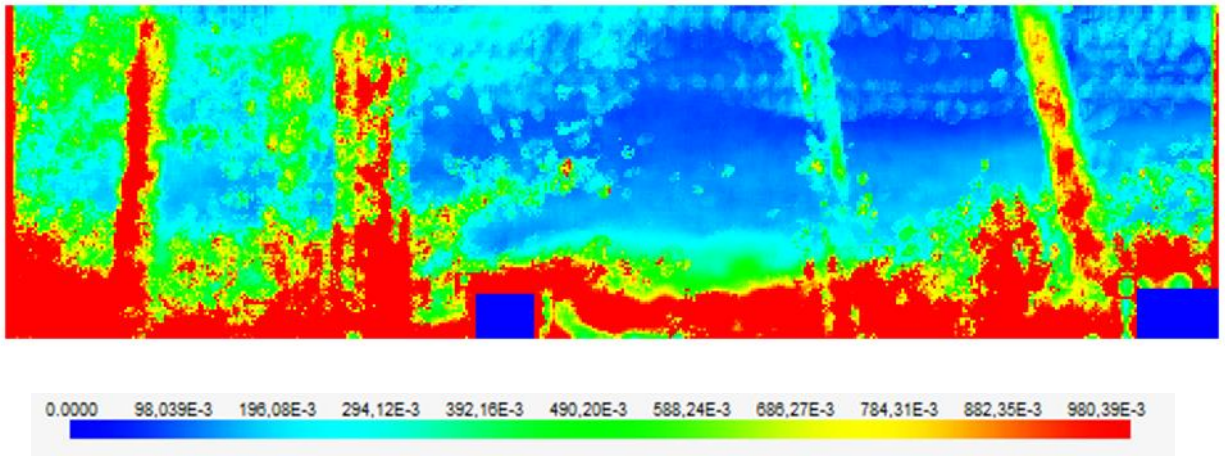
Şekil 5.17. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



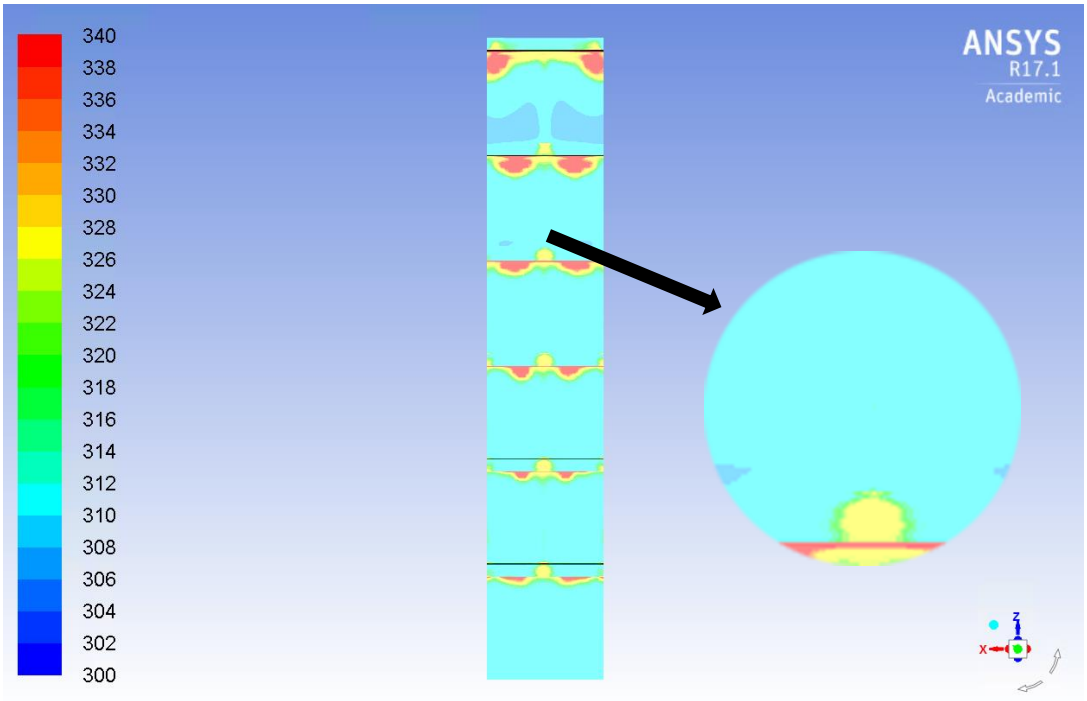
Şekil 5.18. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı*



Şekil 5.19. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş girdaplılık oranı dağılımı*

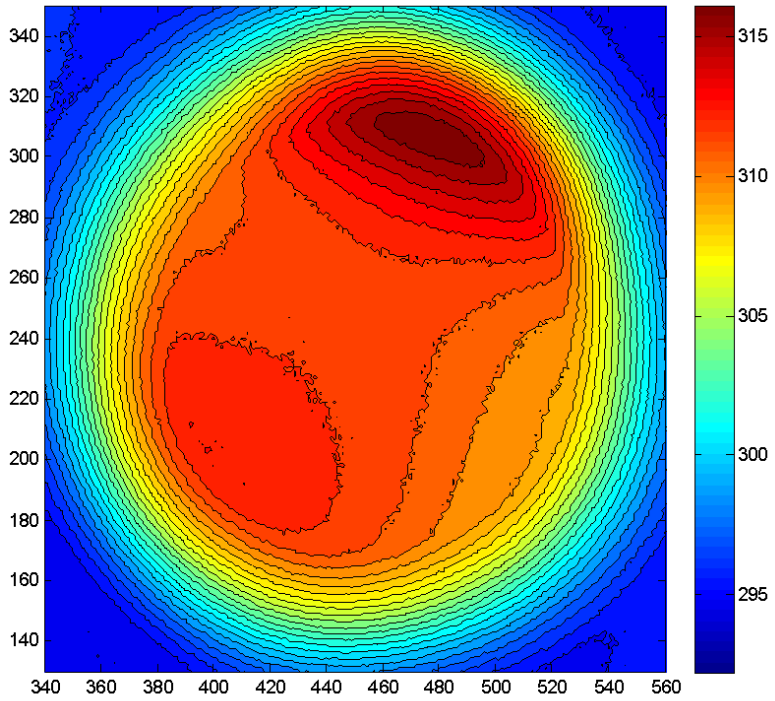


Şekil 5.20. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı*

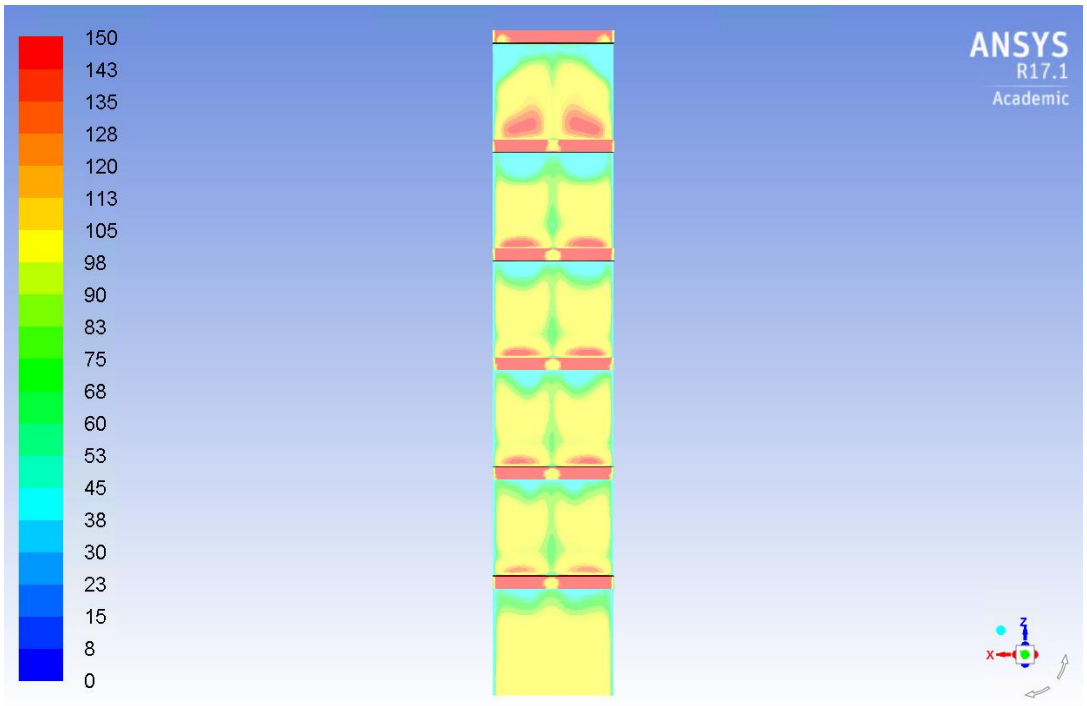


Şekil 5.21. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı*

Şekil 5.21'de U= 4 m.s^{-1} akış şartlarında rib dizili soğutma kanalı tabanındaki sıcaklık dağılımı görülmektedir. PIV ile incelenen dördüncü ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin termal kamera ölçüm sonucu ise Şekil 5.22'de görülmektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve deneysel sonucun detaylı karşılaştırmasıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarının deneysel verilerle doğrulaması sağlanmıştır.

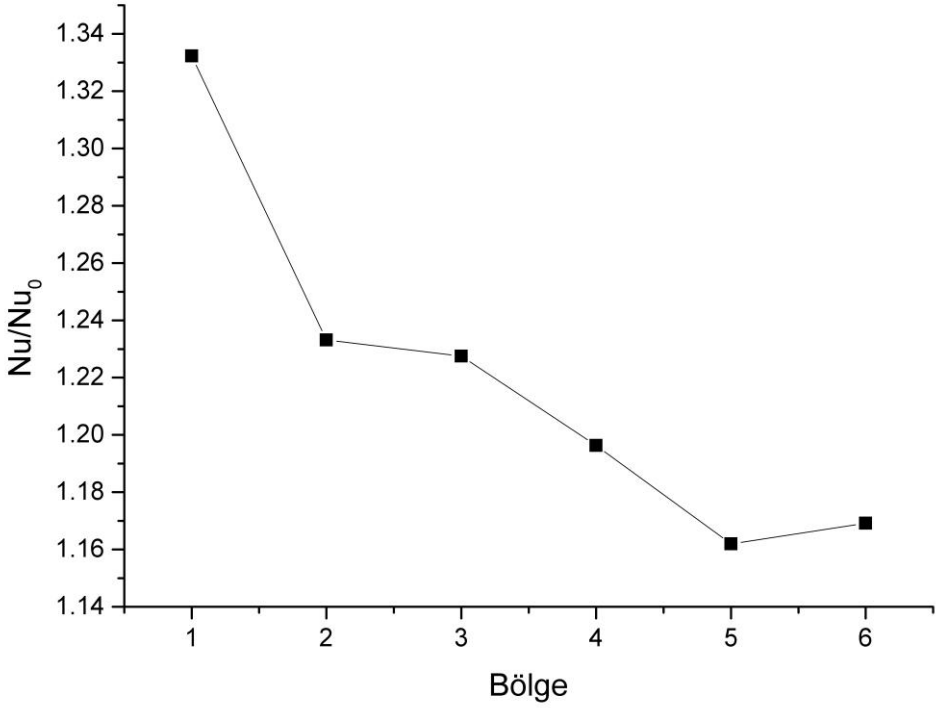


Şekil 5.22. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı*



Şekil 5.23. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı*

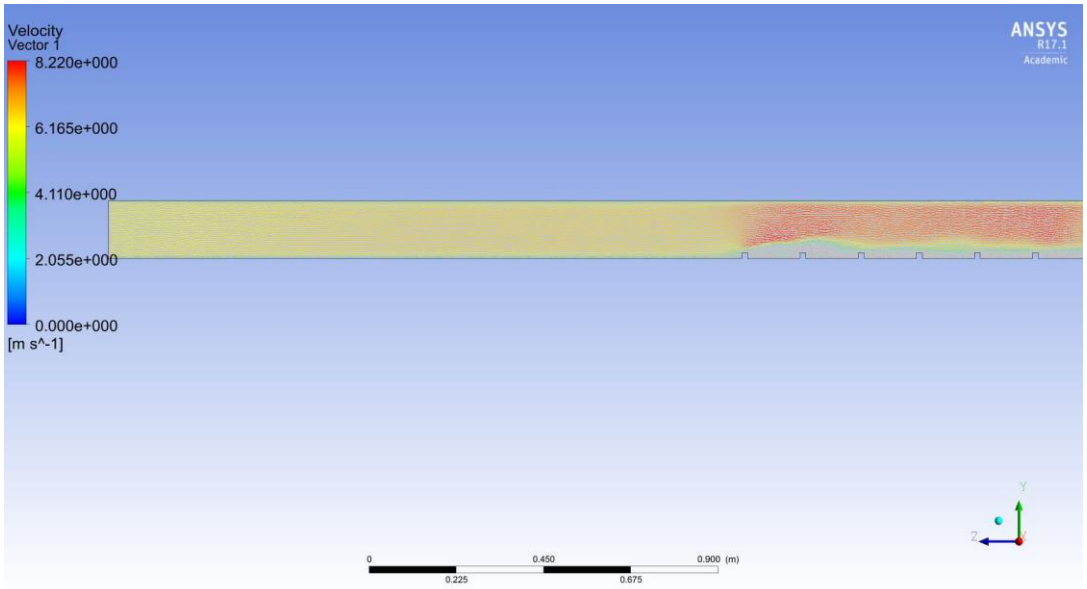
Şekil 5.23'te ise Nusselt sayısının taban yüzeyinde nasıl bir değişim gösterdiği görülmektedir. İndirgenmiş Nusselt sayısının taban yüzeyindeki değişimi ise Şekil 5.24'te verilmiştir. Burada her bir bölge için ortalama Nusselt sayısı hesaplanmış ve daha sonra pürüzsüz akıştaki Nusselt sayısına göre indirgenmiştir.



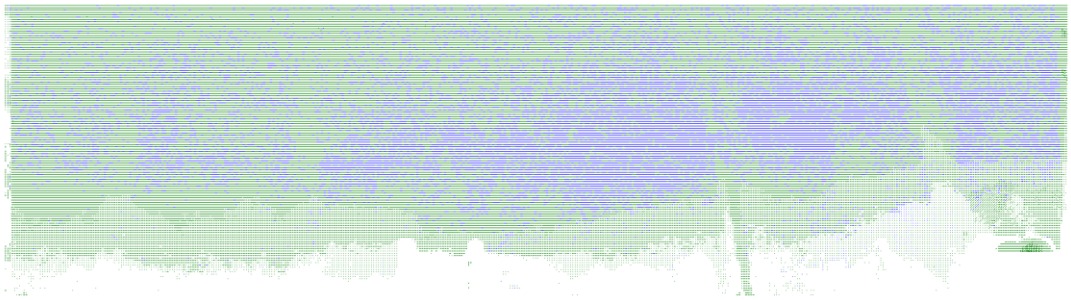
Şekil 5.24. *U= 4 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi*

5.3. U= 6 m.s^{-1} Şartlarında Elde Edilen Bulgular

Şekil 5.25'te ve 5.26'da görüldüğü üzere U= 6 m.s^{-1} hızındaki hava akış giriş kanalında düzenli rejime kavuşmakta ve tam gelişmiş olmaktadır. Giriş kanalından soğutma kanalı geçiş noktasındaki akım çizgileri bunun bir göstergesidir. İlk ribin engelleme etkisi sonucunda akışta bozulma meydana gelmekte ve 6 m.s^{-1} düzeylerindeki serbest akış hızı 8 m.s^{-1} düzeyine kadar çıkmaktadır. Rib etkisi ile oluşan ikincil akışlar, serbest akışı tamamen bozarak girdaplar oluşturmakta ve kanal çıkışına kadar bu durum diğer riblerden kaynaklı olarak artarak devam etmektedir.

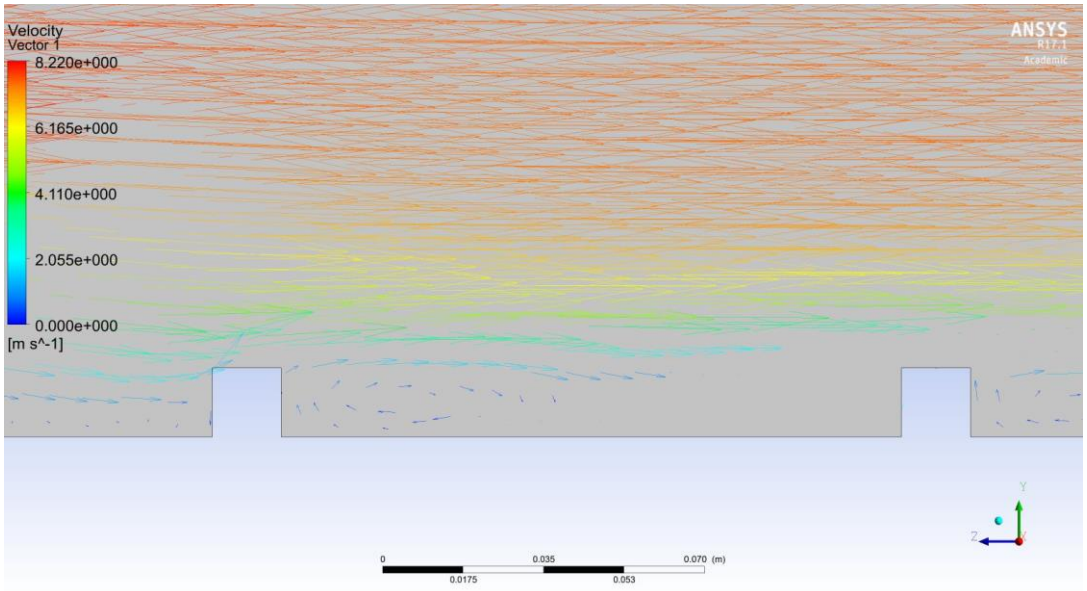


Şekil 5.25. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası*



Şekil 5.26. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası*

Şekil 5.27'de de görüldüğü üzere serbest akış hızının ani sıçraması alt bölge ile üst bölgedeki hava akımının birbiriyle karışmasının önüne geçmektedir. Yalnızca rib arkasında oluşan girdaptan dolayı alt bölgedeki akış ikincil akışları tetiklemekte ve serbest akışa karışmaktadır. Ancak serbest akışın soğutma işlemini gerçekleştiren alt bölgedeki hava akışına katılması az olmaktadır. Giriş yönüne göre dördüncü ve beşinci ribler arasında kalan bölge yakından incelendiğinde bu durum kolaylıkla anlaşılmaktadır. Dördüncü ribin önünde küçük, arka tarafında ise daha büyük bir girdap bölgesi bulunduğu görülmektedir. Beşinci ribin önünde ise neredeyse akış görülmemektedir. Bunun nedeni toparlanmak üzere olan akışın ikincil akışlarla karışarak ribi atlamasıdır.

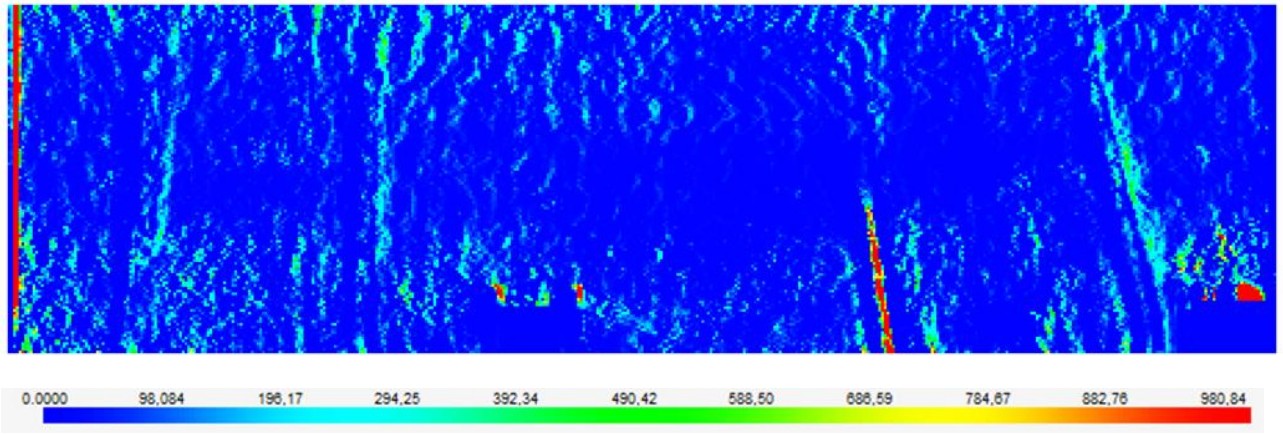


Şekil 5.27. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası*

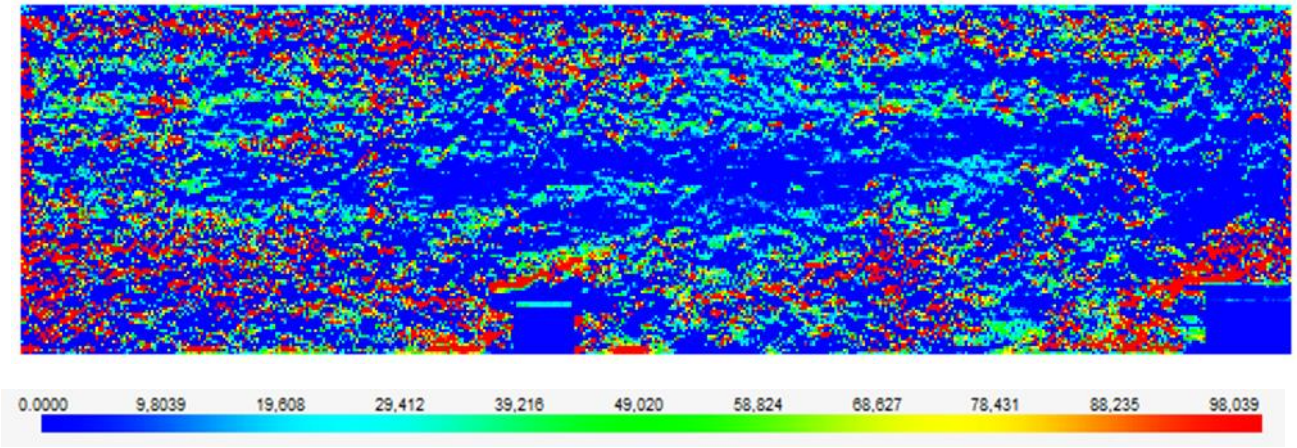
Şekil 5.28'te ve 5.29'da sırasıyla –x yönündeki ve –y yönündeki hız vektör bileşenlerinin eksenel değişimleri gösterilmiştir. Ribin etkisiyle bozulan akış yapısının bir sonucu olarak riblerin etrafında hız değişimleri kayda değerdir. Özellikle hızın v bileşeni riblerin önünde sıçrama etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Şekil 5.30'da verilen hız vektörü büyüklüğü dağılımı incelenecek olursa akış hızının önceki çalıştırma koşullarına göre yüksek olmasının neticesinde daha hızlı bir vektör büyüklüğü değişimi –y ekseni boyunca görülmektedir. Dördünc rib önünde oluşan girdabın bir etkisi olarak o bölgede düşük hızlı hava akışının –y ekseni boyunca yukarı hareketi yani ikincil akış oluşumu açıkça görülmektedir.

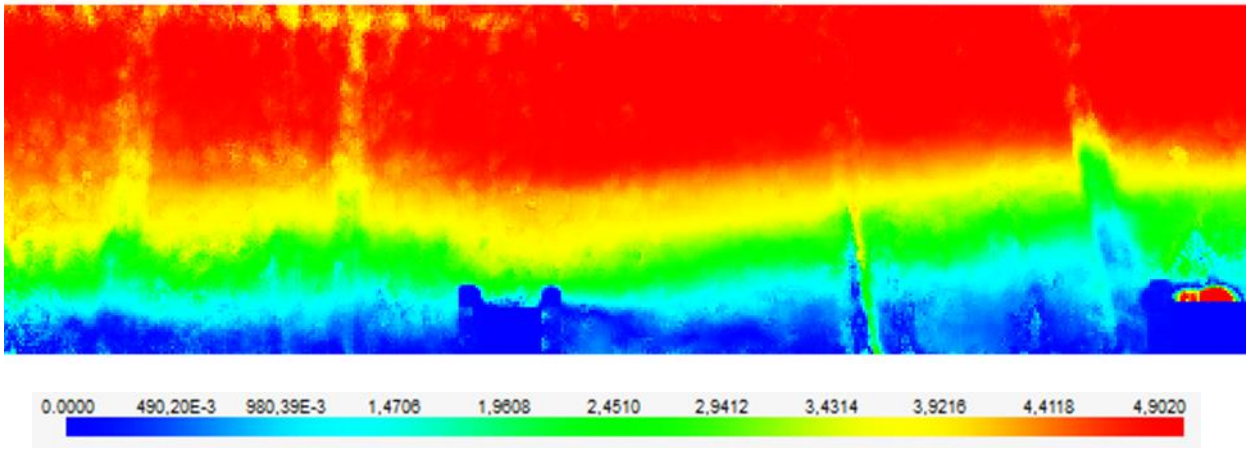
Şekil 5.30 ve 5.31 beraber değerlendirilecek olursa, akışın rib etkisiyle bozulduğu, kopmaların yaşandığı veya yeniden birleşmelerin gözlemlendiği bölgelerde girdaplılık ve türbülans yoğunluğunun yüksek olduğu belirlenmektedir.



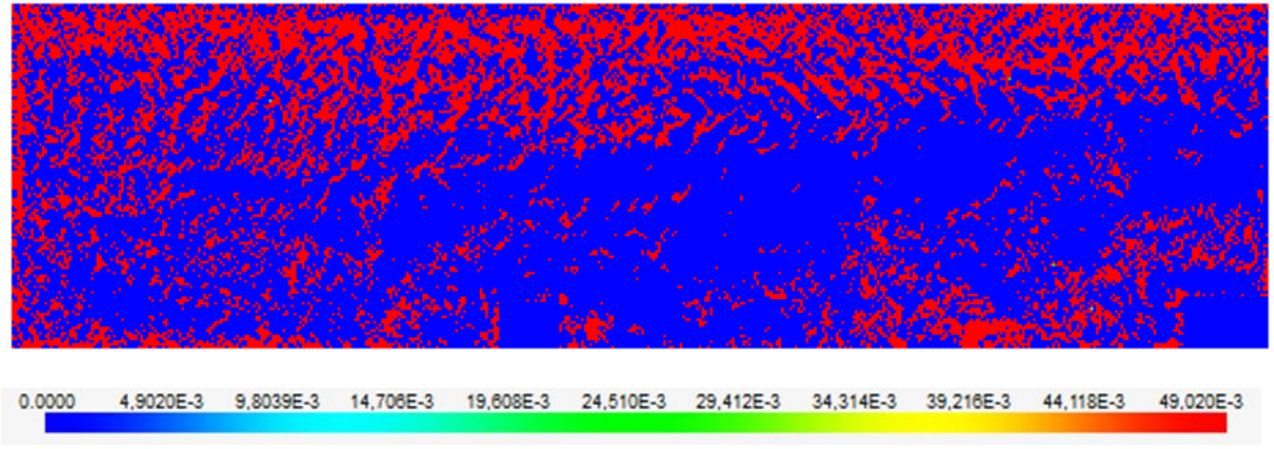
Şekil 5.28. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



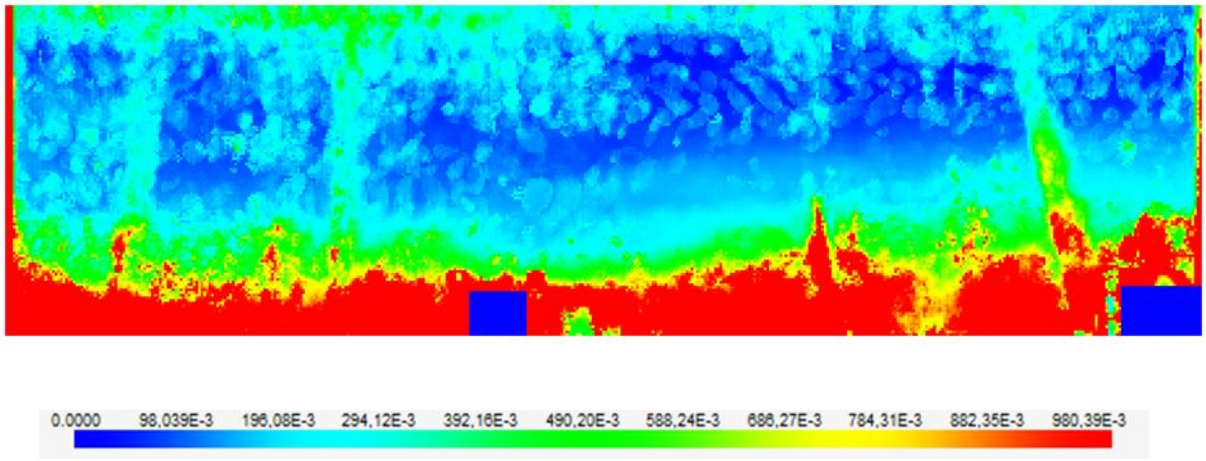
Şekil 5.29. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



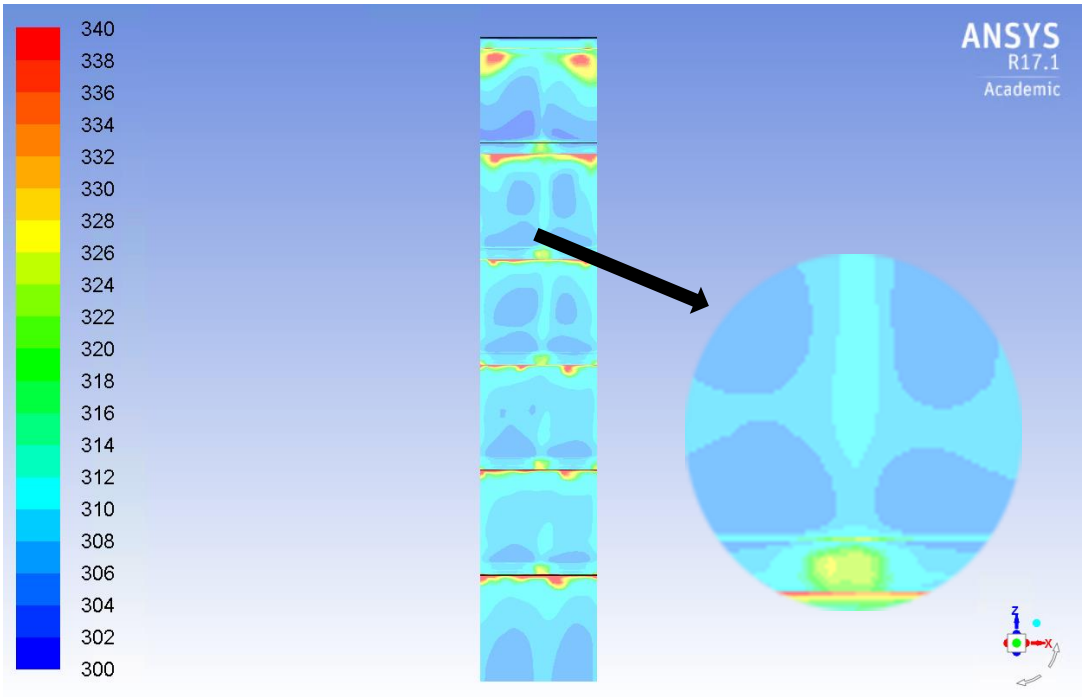
Şekil 5.30. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı*



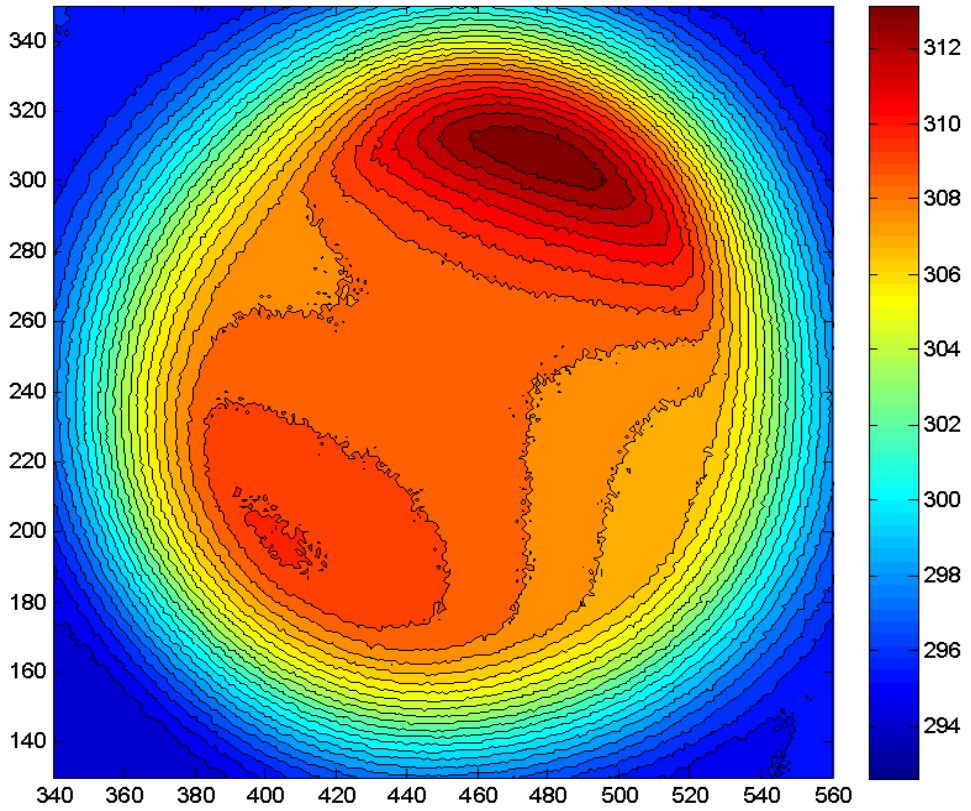
Şekil 5.31. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş* girdaplılık oranı dağılımı



Şekil 5.32. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı*

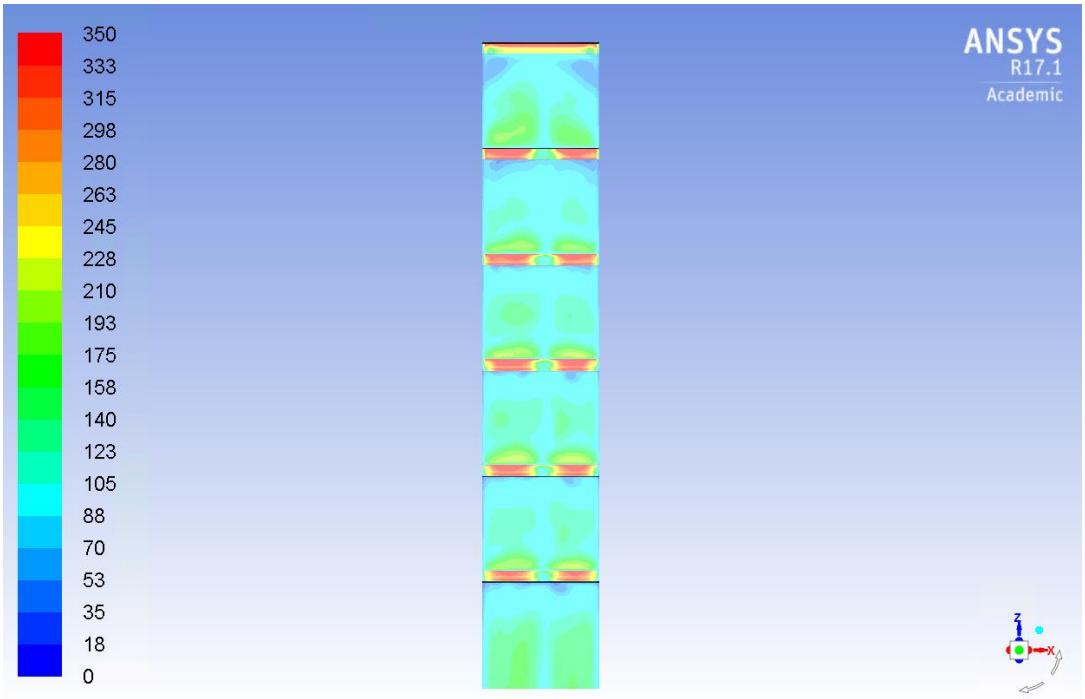


Şekil 5.33. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı*



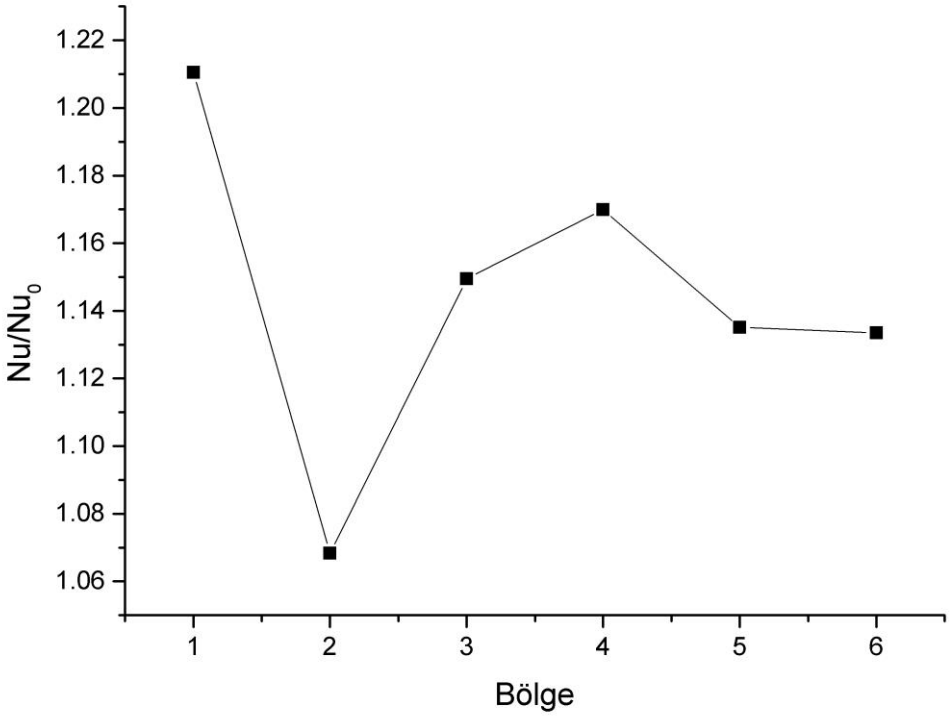
Şekil 5.34. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı*

Şekil 5.33 ve 5.34 birlikte irdelendiğinde soğutma kanalı taban yüzeyinde elde edilen sıcaklık dağılımı hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarında ve deneysel verilerde tutarlılık göstermektedir. Bu durum kullanılan türbülans modelinin ne kadar doğru seçildiğinin bir göstergesidir. Özellikle rib etkisinin tam olarak görüldüğü bölgede sıcaklık değeri 305 K ile 312 K arasında değişmektedir. Sıcaklığın yüksek olduğu bu bölgelerden biri dördüncü ribin arkasını işaret ederken, sıcaklığın yükseldiği bir diğer bölge ise akışın yeniden birleşme bölgesine denk düşmektedir. Bu durum söz konusu bölgelerde soğutma etkinliğinin düşük olduğunun bir göstergesidir. Benzer olarak Şekil 5.35'ten de görüldüğü üzere aynı noktalarda Nusselt sayısının değerinde de düşüş gözlemlenmektedir.



Şekil 5.35. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı*

Şekil 5.36'da irdelenen akış koşullarında rib kullanımının soğutma etkinliğini ortaya koyan değişim grafiği verilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere özellikle dördüncü bölgede soğutma etkinliğinde bir iyileşme söz konusudur.

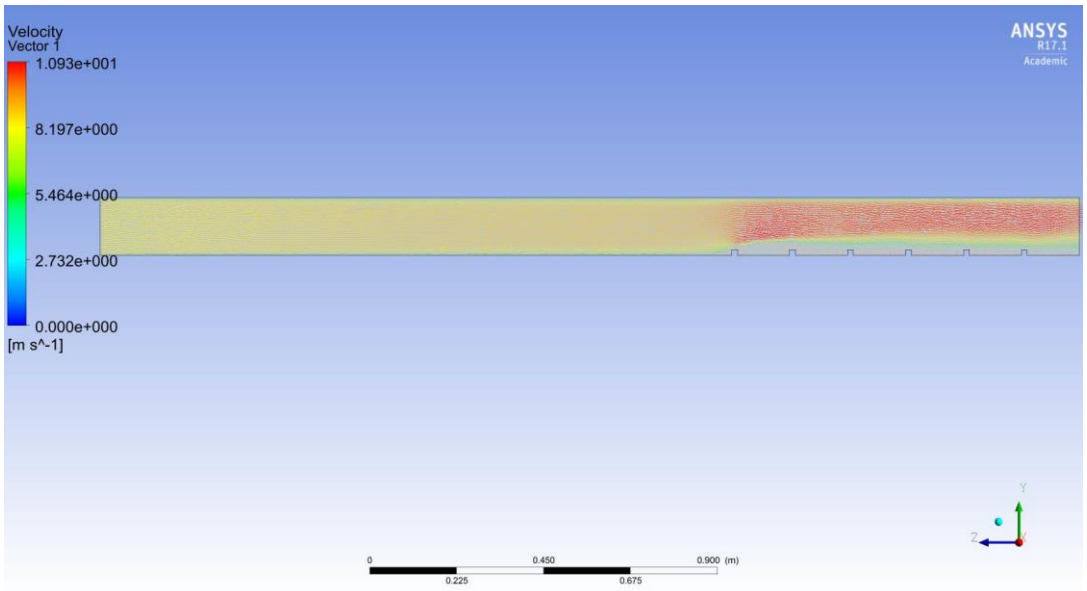


Şekil 5.36. *U= 6 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi*

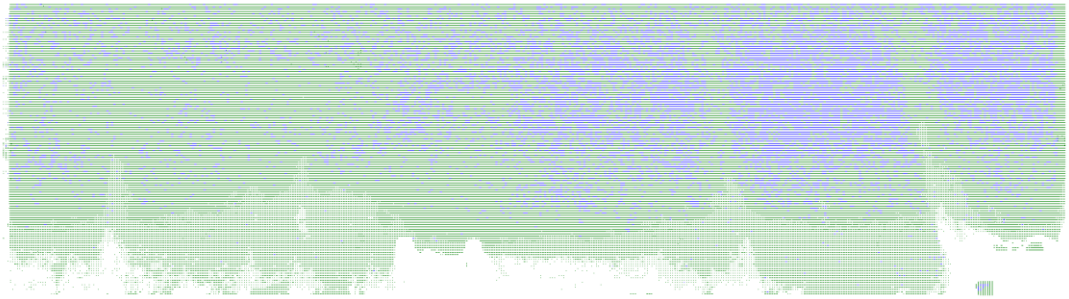
5.4. U= 8 m.s^{-1} Şartlarında Elde Edilen Bulgular

Soğutma kanalı girişinde hava hızının 8 m.s^{-1} olduğu durumdaki akış yapısı ve vektör haritası Şekil 5.37'de ve 5.38'de gösterilmiştir. Akış yapısının ilk bakışta daha önceki koşullarla aynı olduğu düşünülse de akışın yeniden birleşme ve toparlanma bölgesinin yer değiştirdiği Şekil 5.39'da daha net görülmektedir. Dördüncü ribin önünde ve arkasında girdapların oluştuğu görülürken, beşinci ribin yalnızca arkasında girdap oluşmaktadır. Bunun nedeni olarak akışın toparlanma bölgesinin giriş yönüne doğru ilerlemesi düşünülmektedir. Akış daha erken toparlanmakta ve bunun sonucunda rib üzerinden atlama yapmaktadır. Bu durum, beşinci ribin önündeki ölü alanda hava döngüsünün oluşmaması, akışın buradaki yolu izlememesine neden olmaktadır. Başka bir deyişle U= 6 m.s^{-1} akış koşullarındaki durumun benzeri U= 8 m.s^{-1} akış koşullarında da söz konusudur. Burada gözden kaçırılmaması gereken bir diğer konu ise yeniden toparlanma bölgesinin erken oluşması neticesinde ikincil akımlardan ve serbest akıştan kopan akışların da alt

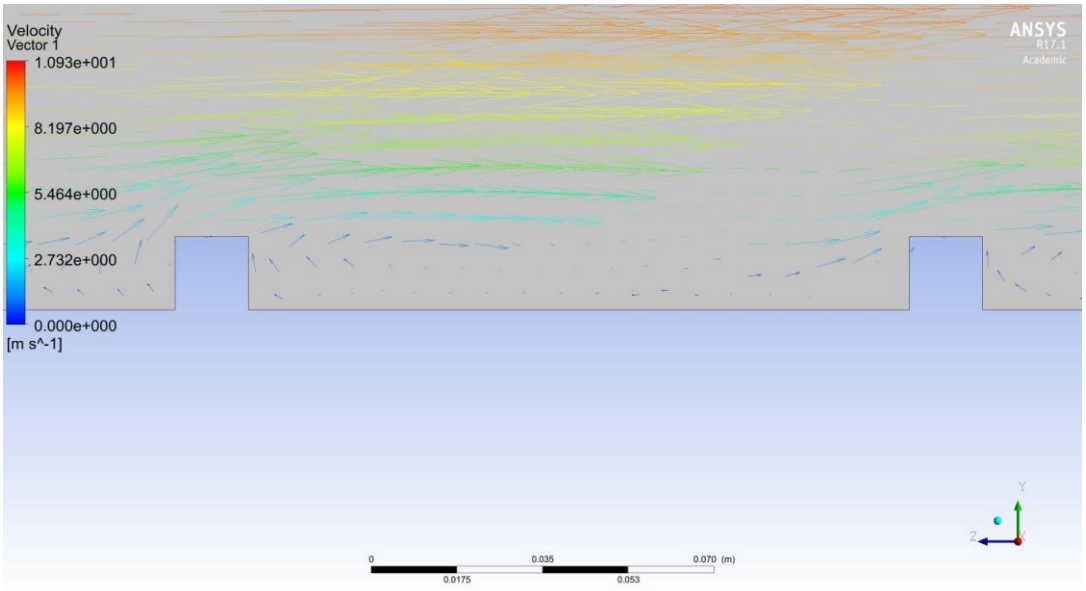
bölgeye yönelmesidir. Böylelikle üst bölgelerdeki hava alt bölgedeki havaya karışmakta ve ribler arası bölgede soğutma sürecine katkı vermektedir.



Şekil 5.37. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası*



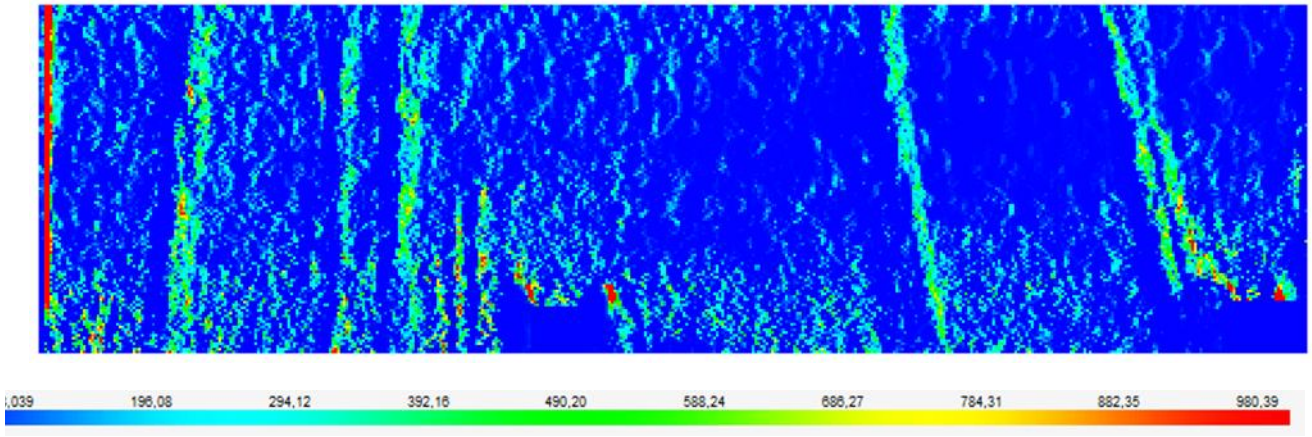
Şekil 5.38. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası*



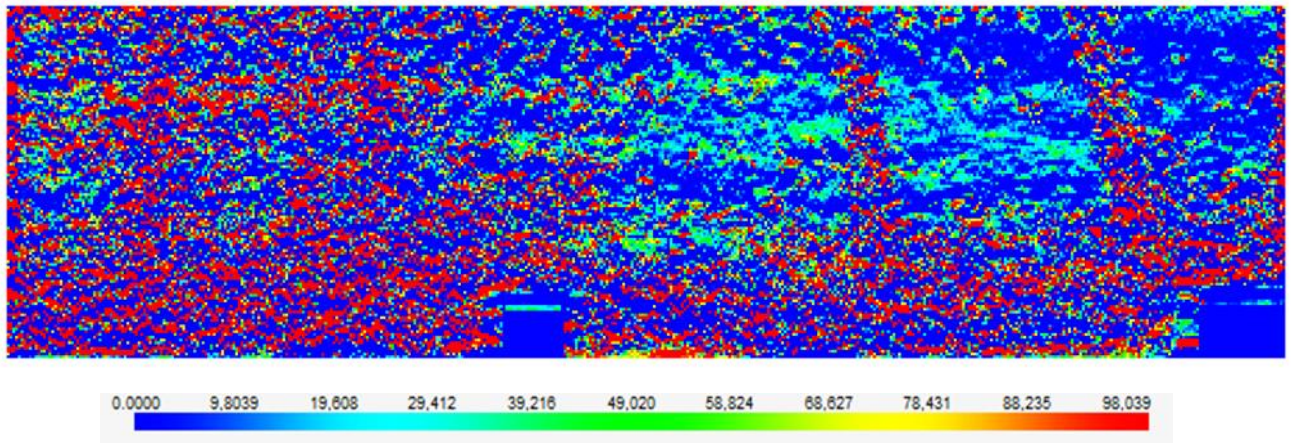
Şekil 5.39. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında HAD ile incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası*

Hız vektörü bileşenlerinin eksenel yöndeki değişimlerini ifade eden Şekil 5.40 ve 5.41'de rib etkilerine bağlı olarak hız değişimleri görülmektedir. Hız vektörünün –y bileşeninde girdap oluşumlarının sonucunda değişimlerin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle riblerin etrafındaki akışlarda ve ikincil akışların oluştuğu bölgelerde hız vektörünün v bileşeni büyüklük bakımından sıçramalar yapmaktadır. Bu sıçramaların yansıması olarak hız vektörü büyüklüğü dağılımında da benzer etkileri Şekil 5.42'den anlamak mümkündür.

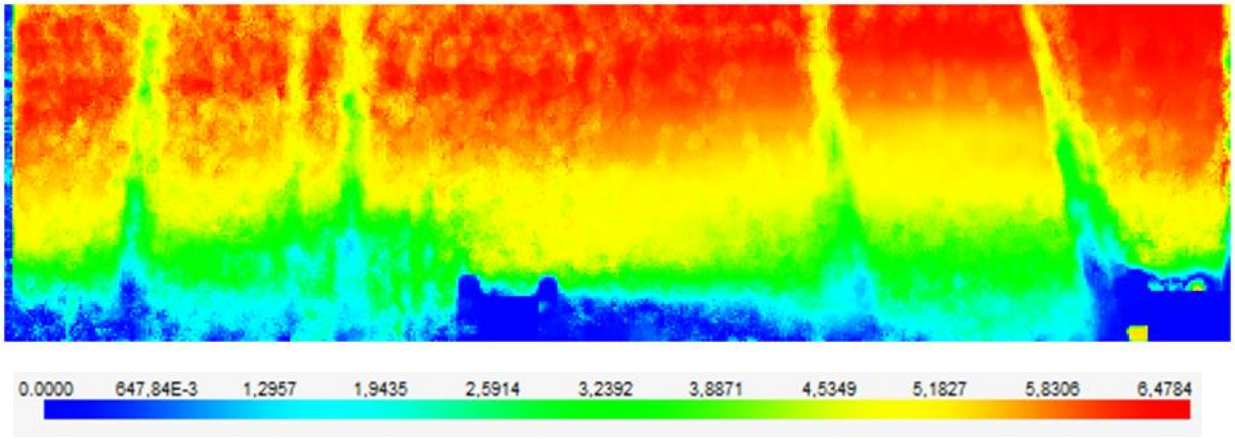
Şekil 5.43 ve 5.44'te girdaplılık ve türbülans yoğunlukları görülmektedir. Serbest akış hızının yükselmesiyle girdap yoğunluğu akışın neredeyse her bölgesine yayılmış ve ikincil akışların etkilerini gözler önüne sermiştir. Türbülans yoğunluğu ise özellikle rib etrafındaki akışta yüksektir.



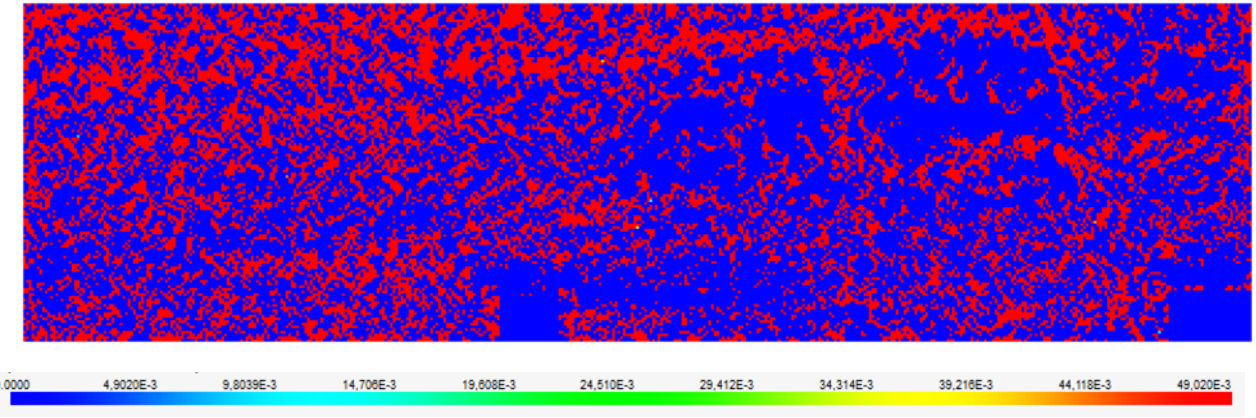
Şekil 5.40. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş–x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



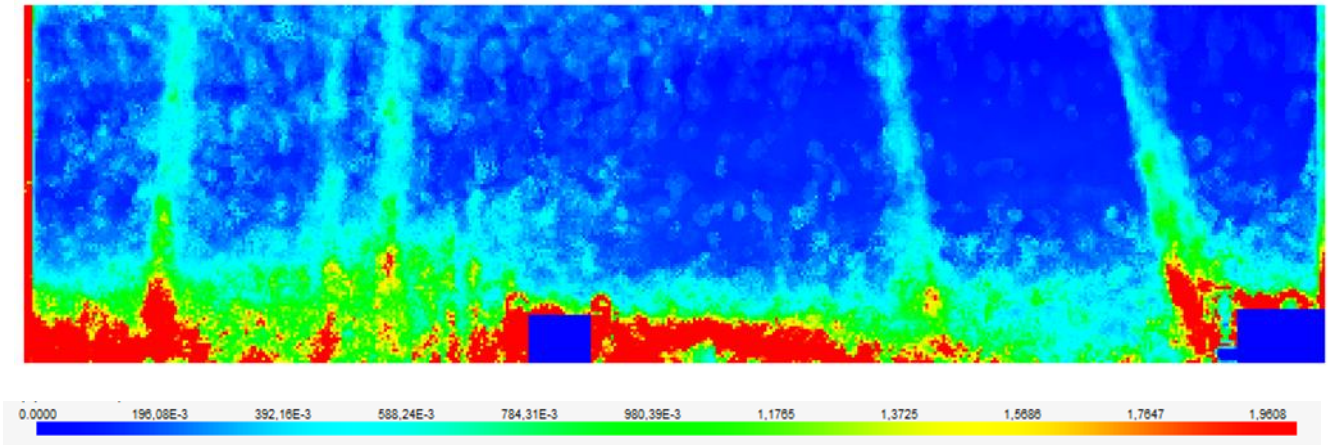
Şekil 5.41. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş–y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



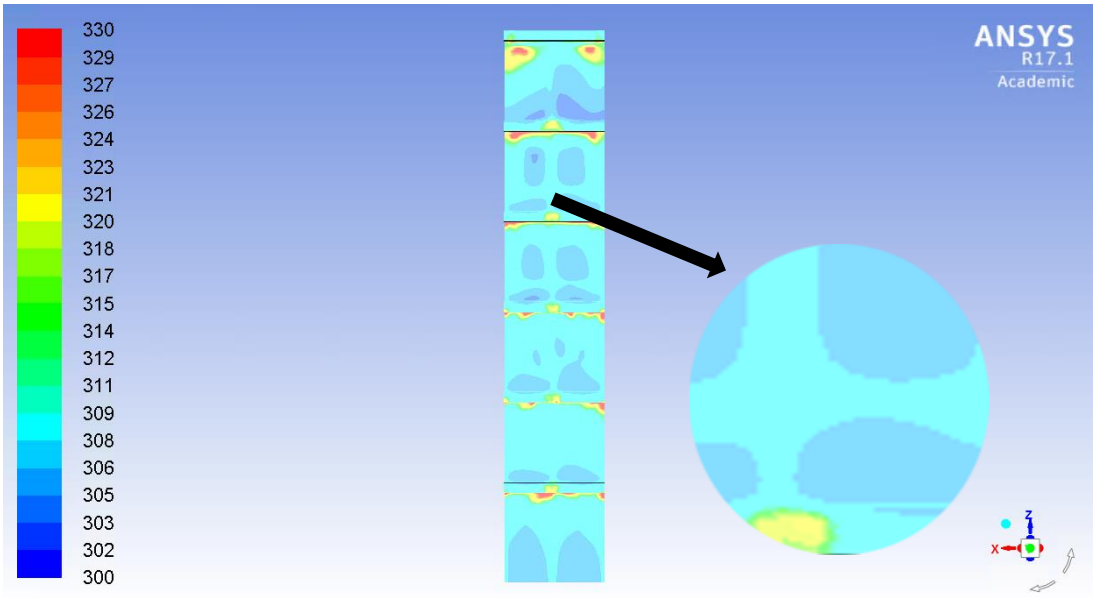
Şekil 5.42. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı*



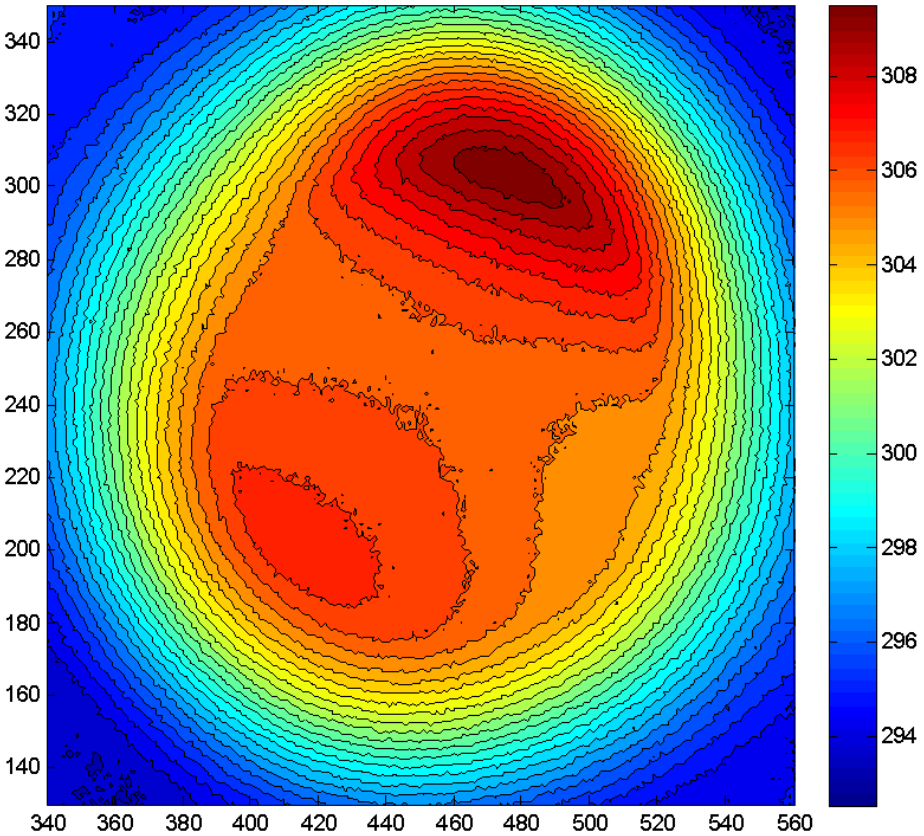
Şekil 5.43. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş girdaplılık oranı dağılımı*



Şekil 5.44. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı*

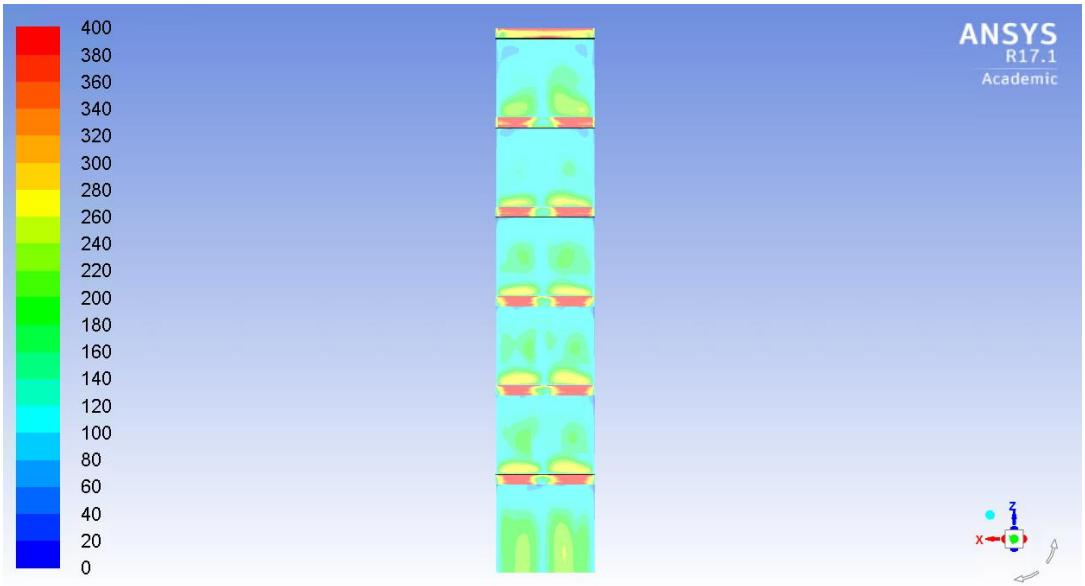


Şekil 5.45. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı*

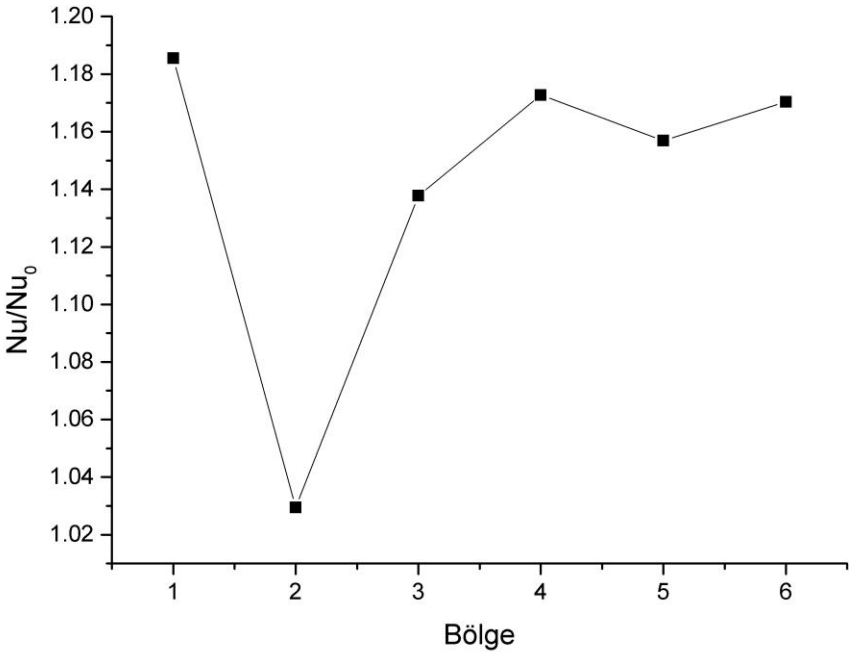


Şekil 5.46. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı*

Soğutma kanalı taban yüzeyinde elde edilen sıcaklık dağılımı bakımından hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçları ve deneysel veriler örtüşmektedir. Özellikle rib etkisinin tam olarak görüldüğü bölgede sıcaklık değeri 302 K ile 308 K aralığında değişmektedir. U= 6 $m.s^{-1}$ şartlarındakine benzer bir biçimde Sıcaklığın yüksek olduğu bu bölgelerden biri dördüncü ribin arkasını işaret ederken, sıcaklığın yükseldiği bir diğer bölge ise akışın yeniden birleşme bölgesine denk düşmektedir.



Şekil 5.47. *U= 8 $m.s^{-1}$ şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı*



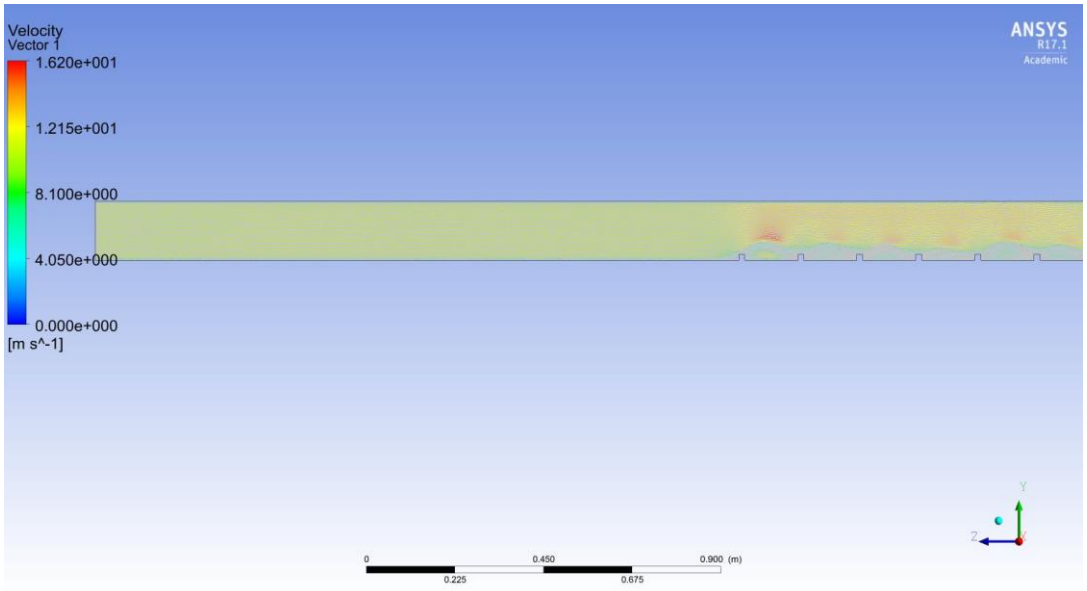
Şekil 5.48. *U= 8 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi*

5.5. U= 10 m.s^{-1} Şartlarında Elde Edilen Bulgular

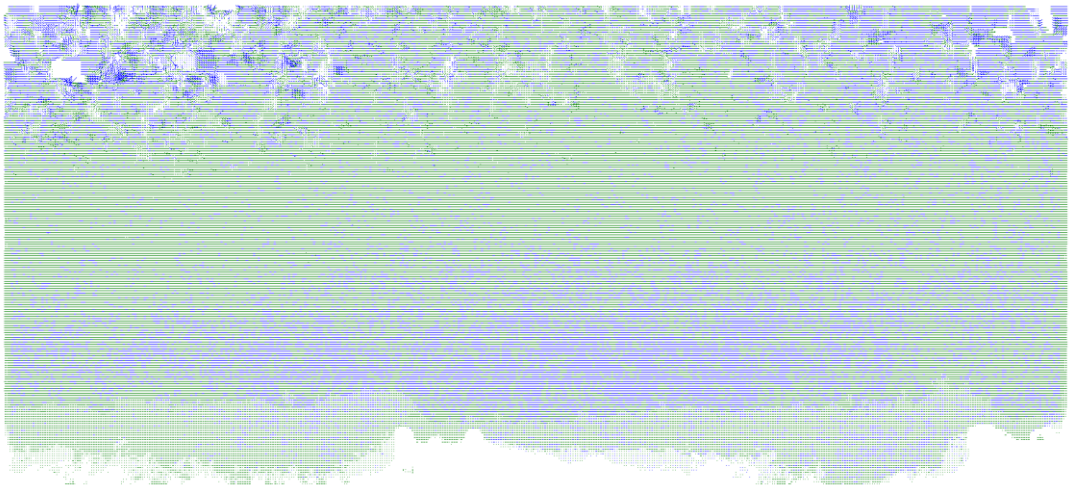
U= 10 m.s^{-1} akış koşullarında soğutma kanalı içerisindeki akış yapısı ve hız dağılımı Şekil 5.49'da gösterilmiştir. Burada ki akış yapısının daha önceki koşullardan farklı olarak rib diziliminden neredeyse etkilenmemesidir. Yalnızca riblerin bulunduğu bölgelerde çok küçük ikincil akışlar ve akış hızında artış görülmektedir. Ancak sözü edilen ikincil akışlar sürekliliğini koruyamamakta ve kanalın çıkış yönüne ilerledikçe etkilerini iyice yitirmektedir. Şekil 5.50'de U= 10 m.s^{-1} çalışma şartları altındaki akışın yapısı verilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerden elde edilen sonuçlara benzer şekilde akış yapısının çoğu yerde bozulmadığı ve serbest akışın ikincil akışlardan etkilenmediği görülmektedir. Ancak rib yüksekliği mesafesinin altında kalan bölgede akış dönmeleri ve burgaçlar kısmen gözlemlenmektedir.

Şekil 5.51 dikkatle incelenecek olursa, düşük hızlarda akışın yeniden birleştiği bölgede girdap oluşumu olduğu görülmektedir. Dördüncü rib arkasındaki girdabın

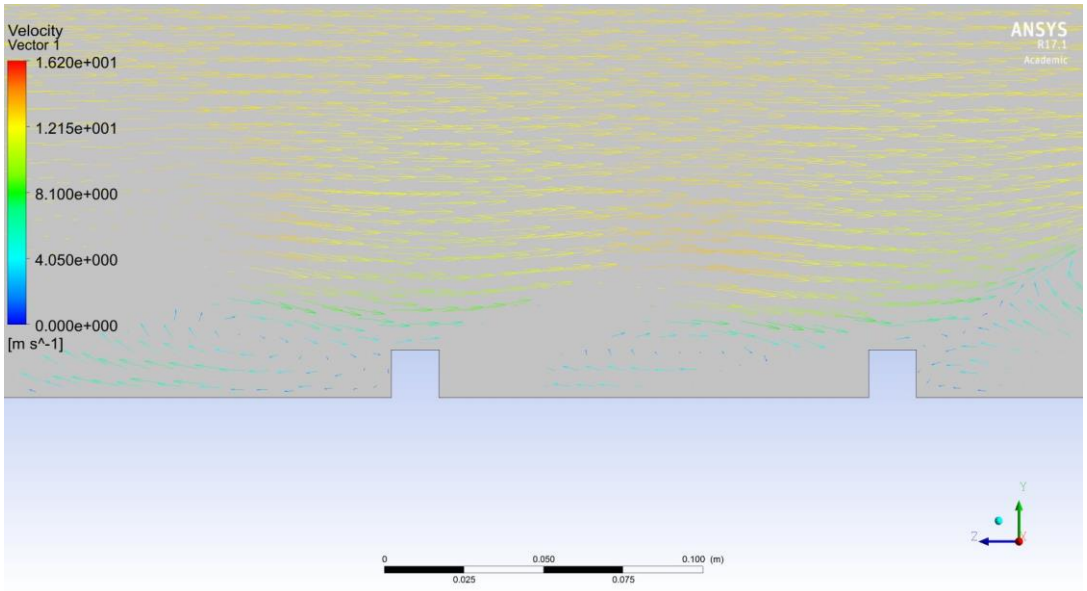
bu bölgeye kayması, yeniden toparlanmanın beşinci ribin arkasına yakın bir bölgede oluşmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak da beşinci ribin hemen arkasında bir girdap daha meydana gelmektedir.



Şekil 5.49. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası*



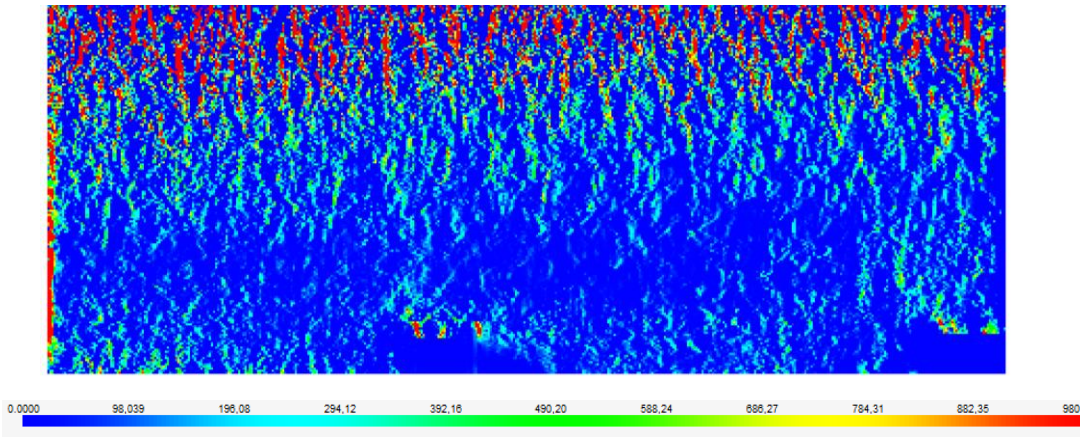
Şekil 5.50. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı içerisinde akış alanı ve vektör haritası*



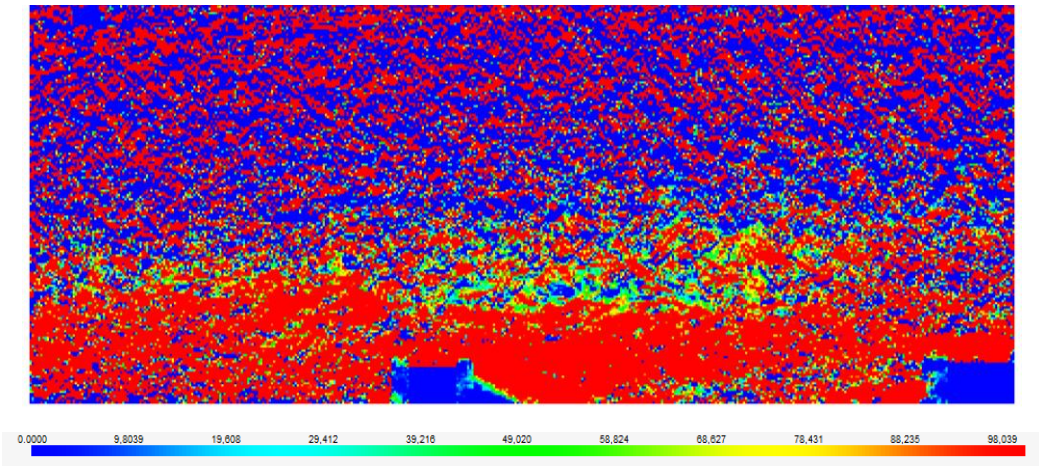
Şekil 5.51. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında incelenen rib etrafındaki akış alanı ve vektör haritası*

Bu durum Şekil 5.52 ve 5.53'te hız vektörü bileşenlerinin değişimleri gösterilmiştir. Şekil 5.54'te ise verilen hız vektörü büyüklüğü dağılımı incelenerek, akış bozulmasının gerçekleştiği bölgede hız düşümü meydana geldiği, 5 m.s-1 değerine kadar düştüğü anlaşılmaktadır.

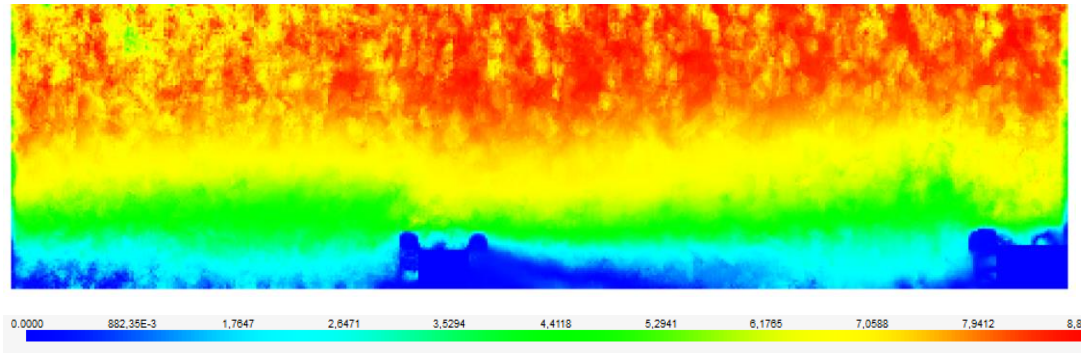
Girdaplılık oranını gösteren Şekil 5.55'den de akış yapısının çok fazla bozulmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.56'da dördüncü rib önünde oluşan akışın türbülans yoğunluğu görülmektedir. Türbülans yoğunluğu şekilden de görüldüğü gibi rib yüksekliğinin altındaki bölgede yüksekken –y ekseninde pozitif yönde ilerledikçe azalmaktadır.



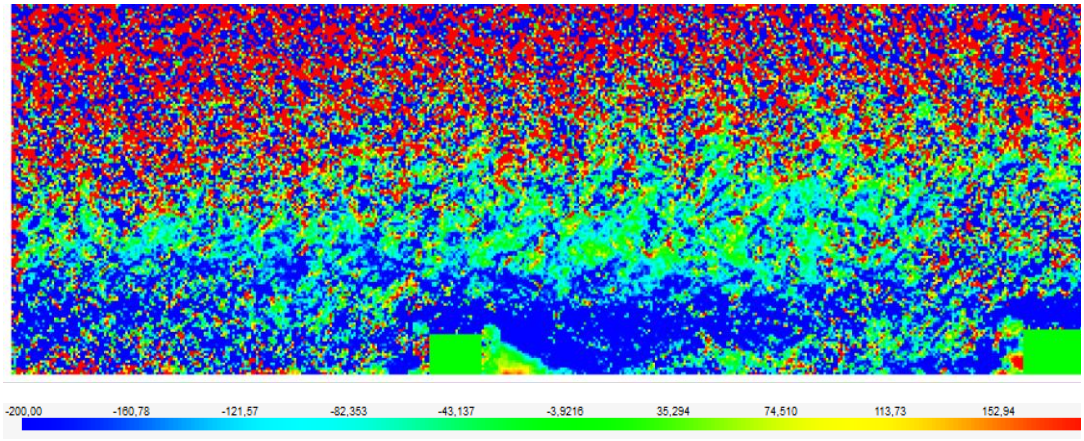
Şekil 5.52. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –x eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



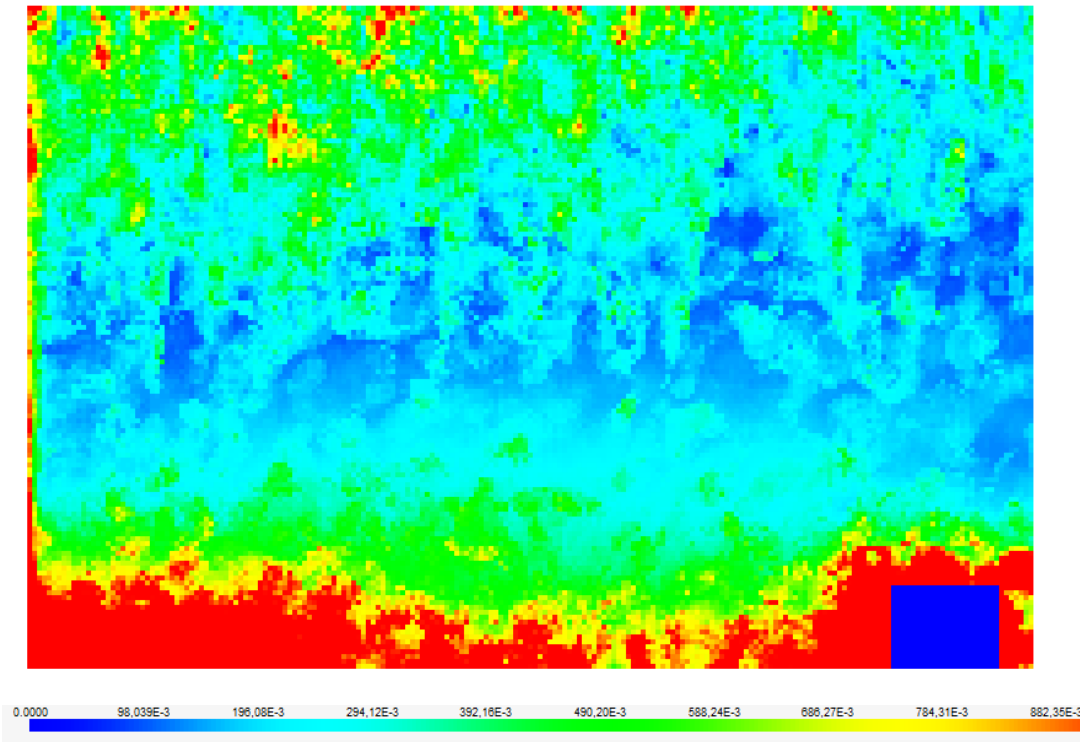
Şekil 5.53. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş –y eksenindeki hız bileşeninin hız gradyanı*



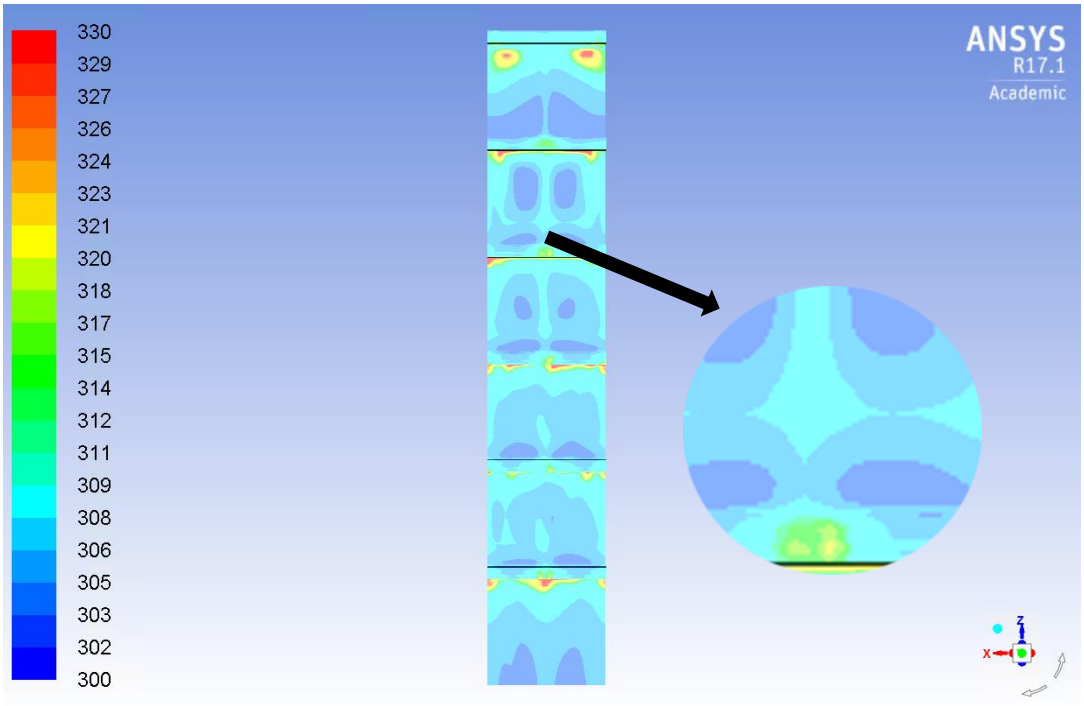
Şekil 5.54. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş hız vektörü büyüklüğü dağılımı*



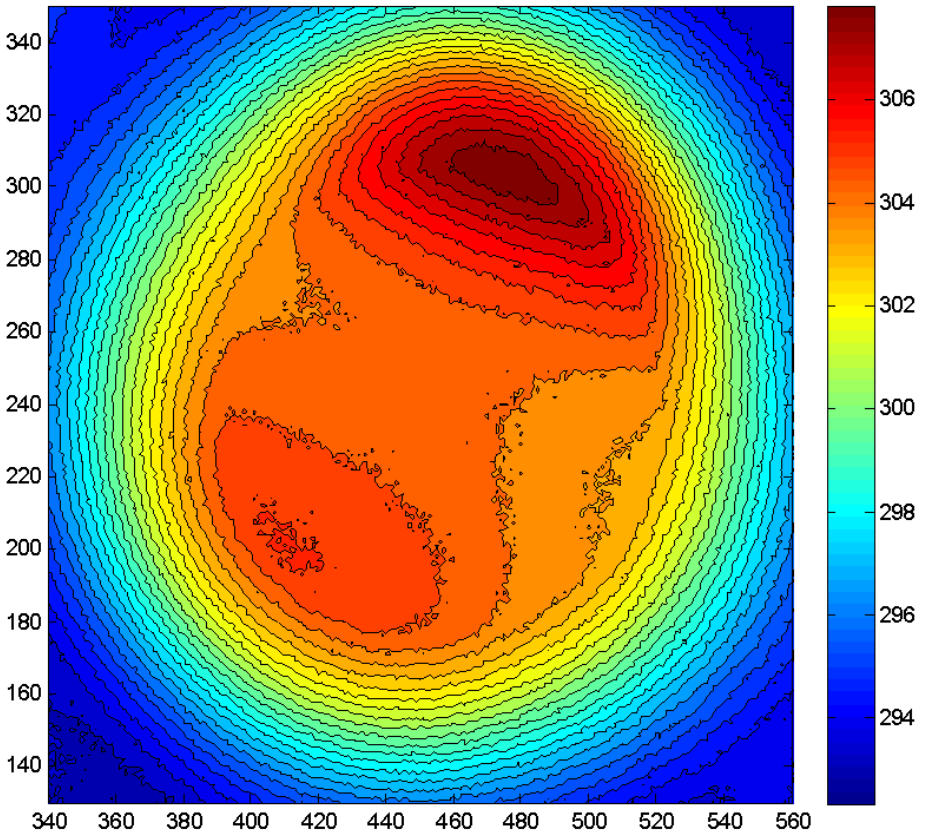
Şekil 5.55. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında PIV ile elde edilmiş girdaplılık oranı dağılımı*



Şekil 5.56. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında incelenen rib için PIV ile elde edilmiş türbülans yoğunluğu dağılımı*

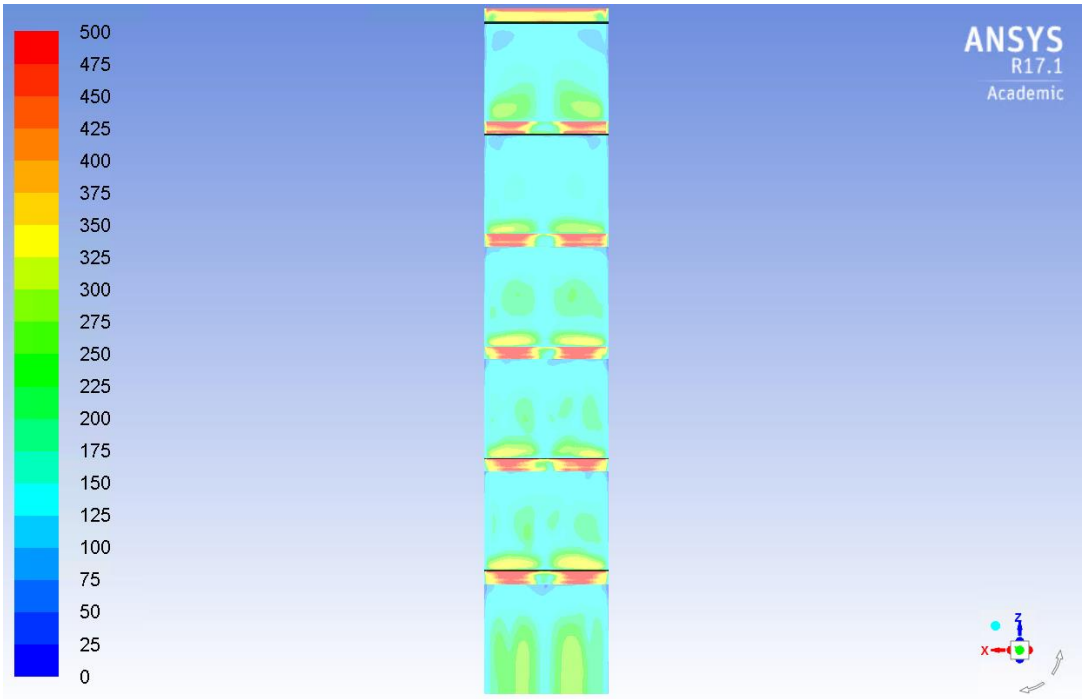


Şekil 5.57. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımı*



Şekil 5.58. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında dört ve beşinci ribler arasında kalan bölgenin sıcaklık dağılımı*

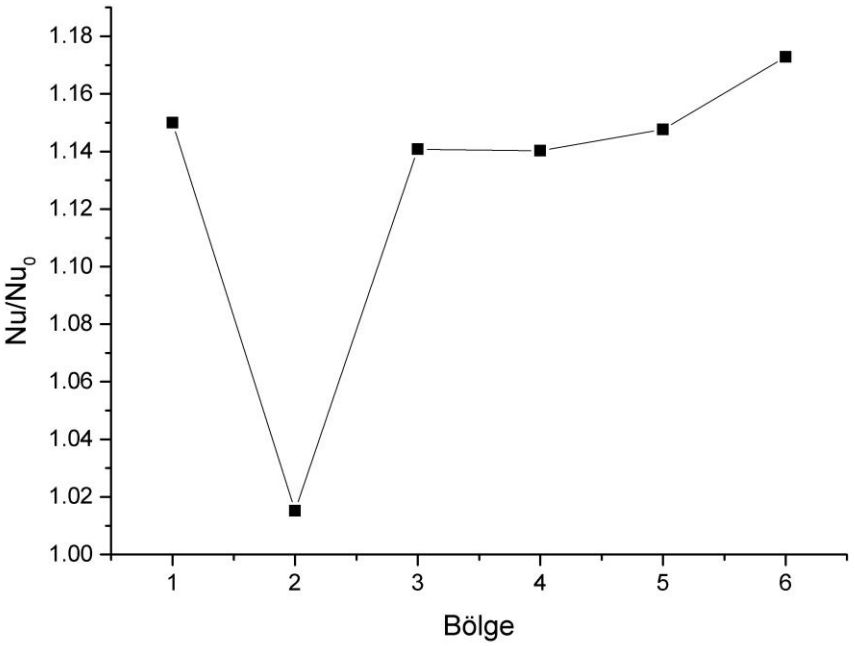
Şekil 5.57 ve 5.58'e bakıldığında soğutma kanalı taban yüzeyindeki sıcaklık dağılımlarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve deneysel yöntemlerle elde edilen verilerle benzeştiği görülmektedir. Özellikle rib etkisinin görülmesi beklenen bölge olan dördüncü ribin arkasında 305-310 K aralığında olduğu görülmektedir.



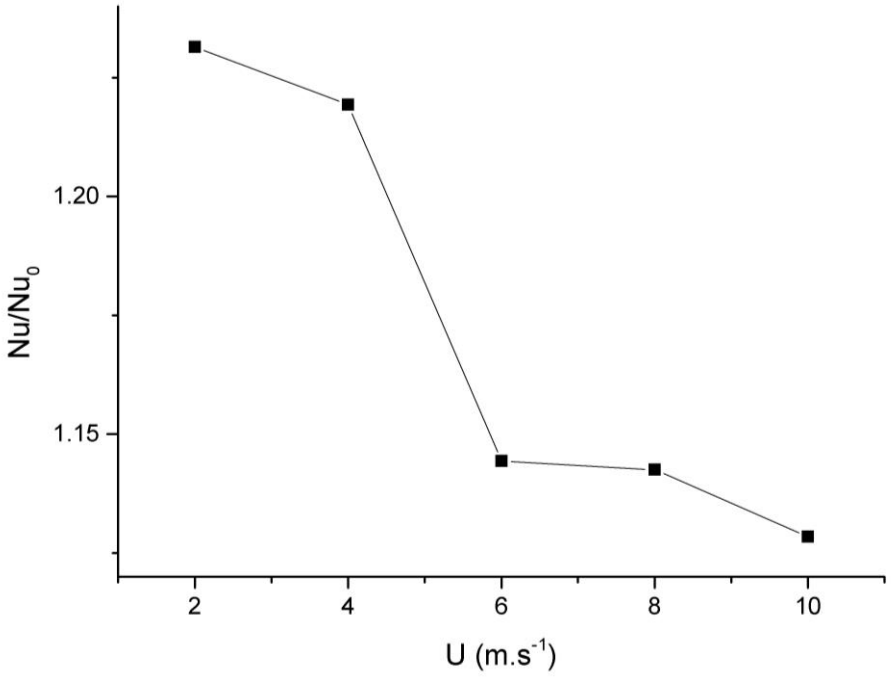
Şekil 5.59. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımı*

U= 10 m.s^{-1} şartlarında soğutma kanalı taban yüzeyindeki Nusselt sayısının dağılımı Şekil 5.59'da ve bölgelere göre değişimi ise Şekil 5.60'da görülmektedir. Diğer akış hızı şartlarına nispeten daha az bir soğutma etkinliği iyileşmesi görülse de, rib etkisinin oluşmaya başladığı dördüncü rib ve sonrası bölgelerde indirgenmiş Nusselt sayısında bir artış görülmektedir.

Şekil 5.61'de ise soğutma havası akış hızı değişimine bağlı olarak soğutma etkinliğinin iyileşme oranları görülmektedir. Buradan da anlaşıldığı üzere çalıştırma koşulları sabit kalmak koşuluyla yalnızca akış hızı değiştirilecek olursa, hızın yükselmesiyle soğutma etkinliğinin kötüye gittiği söylenebilmektedir. Bu durumun rib adım oranı ve rib engelleme oranından kaynaklandığı ön görülmektedir.



Şekil 5.60. *U= 10 m.s^{-1} şartlarında HAD ile elde edilmiş rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi*



Şekil 5.61. *Akış hızı değişimine bağlı olarak rib dizili soğutma kanalı taban yüzeyindeki indirgenmiş Nusselt sayısı değişimi*

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ve deneysel çalışmalar neticesinde, bir gaz türbin kanatçığı iç soğutma kanalında rib kullanımının akış yapısına ve ısı geçişine etkileri farklı akış koşullarında (U= 2 $m.s^{-1}$, U= 4 $m.s^{-1}$, U= 6 $m.s^{-1}$, U= 8 $m.s^{-1}$, U= 10 $m.s^{-1}$) ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgulara dayalı olarak aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- RANS türbülans modellerinden k-ω yaklaşımı ile edilen sonuçlar deneysel veriler ile tutarlılık göstermektedir. Bu nedenle rib dizili kanallar içerisindeki fiziksel olayların çözümlemesinde k-ω türbülans modelinin kullanımı uygun bulunmuştur.
- Akış içerisinde hız dağılımının ani değişim gösterdiği veya türbülansın yoğun olduğu akışların parçacık görüntülemeyle hız ölçümü yapılırken alınan verilerin işlenmesi için uyarlanabilir (adaptive) PIV yönteminin daha doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir.
- Yüksek hızlarda gerçekleşen akışlardaki rib kullanımı için rib adımı tanımı gözen geçirilmelidir. Rib adımı ile rib yüksekliği arasındaki oran artırılmalı ve rib adımı büyütülmelidir.
- Yüksek hızlarda gerçekleşen akışlarda soğutma yüzeyinde kış bozulmalarının meydana gelmesi için rib engelleme oranı büyük olacak soğutma kanalı tasarımı yapılması önerilmektedir.

Bu tez çalışmasının devamı olarak farklı rib adımlarında yüksek Reynolds sayılarındaki akışların incelenmesi ve rib adımı etkisinin en iyileştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca engelleme oranı da farklı rib kesitleriyle düşük Reynolds sayılarındaki akışlarda çalışılması gereken bir diğer konudur.

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen bulguların ilerleyen dönemlerde yapılacak olan çalışmalara katkı sağlayacağı ve temel oluşturacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

Blazek, J. (2015). *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Butterworth-Heinemann.

Buchlin, J. M. (2002). Convective heat transfer in a channel with perforated ribs. *International journal of thermal sciences*, 41(4), 332-340.

Burberi, E., Massini, D., Cocchi, L., Mazzei, L., Andreini, A., & Facchini, B. (2017). Effect of Rotation on a Gas Turbine Blade Internal Cooling System: Numerical Investigation. *Journal of Turbomachinery*, 139(3), 031005.

Butterfield, R. (2001). Dimensional analysis revisited. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 215(11), 1365-1375.

Çakan, M., & Arts, T. (1999). Effect of main and secondary flows on heat transfer in a rib-roughened internal cooling channel. In *International symposium on experimental and computational aerothermodynamics of internal flows*.

Çengel, Y.A., Cimbala, J.M. (2013). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. New York: McGraw Hill.

Chandra, P. R., Alexander, C. R., & Han, J. C. (2003). Heat transfer and friction behaviors in rectangular channels with varying number of ribbed walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(3), 481-495.

Corrsin, S., Lumley, J. (1956). On the equation of motion for a particle in turbulent fluid. *Applied Scientific Research, Section A*, 6(2-3), 114-116.

Ekkad, S. V., & Han, J. C. (1997). Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(11), 2525-2537.

Elfert, M., Jarius, M. P., & Weigand, B. (2004). Detailed flow investigation using PIV in a typical turbine cooling geometry with ribbed walls. *ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and* Air'da sunulan bildiri, Viyana: American Society of Mechanical Engineers.

Elfert, M., Schroll, M., & Förster, W. (2012). PIV measurement of secondary flow in a rotating two-pass cooling system with an improved sequencer technique. *Journal of Turbomachinery*, 134(3), 031001.

Garg, V. K., & Abhari, R. S. (1996). Comparison of predicted and experimental

Nusselt number for a film-cooled rotating blade. *ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*'da sunulan bildiri, Birmingham: American Society of Mechanical Engineers.

Han, J. C. (1984). Heat transfer and friction in channels with two opposite rib-roughened walls. *Journal of heat transfer*, 106(4), 774-781.

Han, J. C., & Chen, H. C. (2006). Turbine blade internal cooling passages with rib turbulators. *Journal of propulsion and power*, 22(2), 226-248.

Han, J. C., Dutta, S., Ekkad, S. (2013). *Gas turbine heat transfer and cooling technology*. CRC Press.

Han, J. C., Glicksman, L. R., & Rohsenow, W. M. (1978). An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21(8), 1143-1156.

Han, J. C., Park, J. S., & Lei, C. K. (1985). Heat transfer enhancement in channels with turbulence promoters. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 107(3), 628-635.

Han, J. C., Zhang, Y. M., & Lee, C. P. (1991). Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs. *Journal of Heat Transfer*, 113(3), 590-596.

Holman, J. P. J. P. (2001). *Experimental methods for engineers*. McGraw-Hill Education.

Horlock, J. H., & Torbidoni, L. (2006). Turbine blade cooling: the blade temperature distribution. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 220(4), 343-353.

Kiml, R., Mochizuki, S., & Murata, A. (2001). Effects of rib arrangements on heat transfer and flow behavior in a rectangular rib-roughened passage: Application to cooling of gas turbine blade trailing edge. *Journal of heat transfer*, 123(4), 675-681.

Kumar, S., & Amano, R. S. (2016). Gas Turbine Blade Cooling Passage With V and Broken V Shaped Ribs. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*'da sunulan bildiri, Seul: American Society of Mechanical Engineers.

Langhaar, H. L. (1946). A summary of dimensional analysis. *Journal of the Franklin Institute*, 242(6), 459-463.

Liou, T. M., Chang, Y., & Hwang, D. W. (1990). Experimental and computational study of turbulent flows in a channel with two pairs of turbulence promoters in tandem. *Journal of Fluids Engineering*, 112(3), 302-310.

Luan, Y., Bu, S., Sun, H., & Sun, T. (2016). Numerical Investigation on Flow and Heat Transfer in Matrix Cooling Channels for Turbine Blades. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*'da sunulan bildiri, Seul: American Society of Mechanical Engineers.

Park, J. S., Han, J. C., Huang, Y., Ou, S., & Boyle, R. J. (1992). Heat transfer performance comparisons of five different rectangular channels with parallel angled ribs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35(11), 2891-2903.

Pearce, R., Ireland, P., McGilvray, M., & Romero, E. (2016). Computational Study of the Effect of Inlet Velocity Profile and Rib Orientation on Heat Transfer in Rotating Ribbed Radial Turbine Cooling Passages. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*'da sunulan bildiri, Seul: American Society of Mechanical Engineers.

Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S., & Kompenhans, J. (2013). *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer.

Rau, G., Cakan, M., Moeller, D., & Arts, T. (1996). The effect of periodic ribs on the local aerodynamic and heat transfer performance of a straight cooling channel. *ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition* 'da sunulan bildiri, Birmingham: American Society of Mechanical Engineers.

Taslim, M. E., Li, T., & Kercher, D. M. (1994). Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped and discrete ribs on two opposite walls. *ASME 1994 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition* 'da sunulan bildiri, Hague: American Society of Mechanical Engineers.

Wang, L. B., Tao, W. Q., Wang, Q. W., & Wong, T. T. (2001). Experimental study of developing turbulent flow and heat transfer in ribbed convergent/divergent square ducts. *International Journal of Heat and fluid flow*, 22(6), 603-613.

Wang, Z., Corral, R., & Chedevergne, F. (2016). Experimental and Numerical Study of Heat Transfer Performance for an Engine Representative Two-Pass

Rotating Internal Cooling Channel. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*'da sunulan bildiri, Seul: American Society of Mechanical Engineers.

Zacharzewski, P., Simmons, K., Jefferson-Loveday, R., & Capone, L. (2016). Evaluation of the SST-SAS model for prediction of separated flow inside turbine internal cooling passages. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*'da sunulan bildiri, Seul: American Society of Mechanical Engineers.

Zeng, J., Gao, T., Li, J., Zhu, J., & Fei, J. (2016). Numerical Investigation on Flow and Heat Transfer Characteristics of Steam and Mist/Steam in Internal Cooling Channels With Different Rib Angles. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*'da sunulan bildiri, Seul: American Society of Mechanical Engineers.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı	:	Yasin ŞÖHRET
Yabancı Dil	:	İngilizce
Doğum Yeri ve Yılı	:	Antalya / 1986
E-Posta	:	ysohret@anadolu.edu.tr

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2017, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Gövde-Motor Bakım Anabilim Dalı
- 2013, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık Anabilim Dalı
- 2010, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- 2016, Öğretim Görevlisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Keçiborlu Meslek Yüksek Okulu

Yayınları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Şöhret, Y., Karakoç, T.H., Turan, Ö. (2016). Using Emission Index to Determine Energy Efficiency and Environmental Parameters of a Turbofan Engine at Various Flight Phases. International Journal of Global Warming, 10(1/2/3), 3-15.
- Şöhret, Y., Söğüt, M.Z., Karakoç, T.H., Turan, Ö. (2016). Customized Application of Exergy Analysis Method to PW120A Turboprop Engine for Performance Evaluation. International Journal of Exergy, 20(1), 48-65.
- Şöhret, Y., Ekici, S., Altuntaş, Ö., Hepbaşlı, A., Karakoç, T.H. (2016). Exergy as a Useful Tool for the Performance Assessment of Aircraft Gas Turbine Engines: A Key Review. Progress in Aerospace Sciences, 83, 57-69.
- Şöhret, Y., Yazar, I., Karakoç, T.H. (2016). Using Some Performance Parameters to Predict Exhaust Gas Emissions of a Turboprop Engine: Adaptive Neuro-Fuzzy Method. International Journal of Sustainable Aviation, 2(1), 1-14.
- Şöhret, Y., Karakoç, T.H. (2016). Gaz Türbinli Motorların Yanma Veriminin Emisyon Verileri Kullanılarak Matris Yöntemi İle Çözümü ve Uygulaması. Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi, 1(1), 40-44.
- Şöhret, Y., Dinç, A., Karakoç, T.H. (2015). Exergy Analysis of a Turbofan Engine for an Unmanned Aerial Vehicle during a Surveillance Mission. Energy, 93(1), 716-729.
- Şöhret, Y., Kıncay, O., Tahir Karakoç, T.H. (2015). Combustion efficiency analysis and key emission parameters of a turboprop engine at various loads. Journal of the Energy Institute, 88(4), 490-499.
- Şöhret, Y., Açıkkalp, E., Hepbaşlı, A., Karakoç, T.H. (2015). Advanced exergy analysis of an aircraft gas turbine engine: Splitting exergy destruction into parts. Energy, 90(2), 1219-1228.

- Şöhret, Y., Karakoç, T.H. (2014). Gaz Türbinli Uçak Motorlarının Termodinamik Modellenmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1(2), 29-36.
- Şöhret, Y., Turan, Ö., Karakoç, T.H. (2015). Analysis of Combustion Efficiency for Turbofan Engine Combustor Using MATLAB. International Journal of Engineering and Technology, 7(2), 86-90.

Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri

- 2015, The Sustainable Aviation Research Society, Türkiye.
- 2015, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, ABD.
- 2013, The Society of Automotive Engineers, ABD.
- 2010, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Türkiye.