

Hava Yönlendirici Kanat Üzerinde Bulunan Deliklere Uygulanan Köşe Yuvarlatma
İşleminin Akışa Etkisinin Araştırılması

Volkan Tatar

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2015

The Investigation of Break Edge Operation Effect Over
Anti-Icing System of Static Air Guiding Vane

Volkan Tatar

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Mechanical Engineering

February 2015

Hava Yönlendirici Kanat Üzerinde Bulunan Deliklere Uygulanan Köşe Yuvarlatma İşleminin
Akışa Etkisinin Araştırılması

Volkan Tatar

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Haydar Aras

Bu Tez BAP tarafından 2013/15022 no'lu proje çerçevesinde desteklenmiştir

Şubat 2015

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Volkan Tatar'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Hava Yönlendirici Kanat Üzerinde Bulunan Deliklere Uygulanan Köşe Yuvarlatma İşleminin Akışa Etkisinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Haydar Aras

İkinci Danışman : -

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Haydar Aras

Üye : Prof. Dr. L. Berrin Erbay

Üye : Prof. Dr. Ramazan Köse

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan Yamık

Üye : Yrd. Doç. Dr. Levent Bilir

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Haydar ARAS danışmanlığında hazırlamış olduğum “Hava Yönlendirici Kanat Üzerinde Bulunan Deliklere Uygulanan Köşe Yuvarlatma İşleminin Akışa Etkisinin Araştırılması” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 24/02/2015

Volkan Tatar

İmza

ÖZET

Uçak motorunda buzlanma oluşumu, uçuş güvenliğini tehdit eden en ciddi meteorolojik tehlikelerden biridir. Motor üreticileri sertifikasyon sürecinde motorun buzlanmaya karşı korumalı olduğunu ispat etmekle yükümlüdürler. Bu çalışmada buzlanma tehlikesi ile karşı karşıya olan ön yatak taşıyıcı parça ele alınacaktır. Çalışmanın amacı, ön yatak taşıyıcı parçada buzlanma riskini arttıran köşe yuvarlatma işleminin etkisinin araştırılmasıdır. Buzlanma, parça üzerinde bulunan kanatçıklarda meydana gelmektedir. Buzlanma sisteminde bulunan deliklerin çevresinde meydana gelen yüksek sıcaklık farkları ve deliklerin işlenmesi sonucunda oluşan keskin köşeler yüksek stres yoğunluğuna neden olur. Olası çatlak başlangıcını engellemek için deliklere köşe yuvarlatma işlemi uygulanması kaçınılmazdır. Fakat bu işlem buzlanma önleyici sistemin etkinliğini azaltmaktadır. Deliklere uygulanan köşe yuvarlatma değerinin üst limitinin belirlenmesi, bu araştırmanın temel amacını oluşturmaktadır. Çalışmada 4 farklı köşe yuvarlatma değeri için sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kanatçık üzerinde bulunan 15 delik 3 gruba ayrılarak incelemeler gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen veriler deneysel verilerle ilişkilendirilmiştir. Hız vektörleri, kayma gerilmeleri, yüzey üzerindeki jet akış izleri incelenmiş ve belirlenen kriterlere göre delik grupları için köşe yuvarlatma değerlerinin üst limitleri bulunmuştur. Literatürde yer alan akış görüntüleme yöntemlerinden farklı bir yöntem kullanılarak belirli aero profile sahip kanatçık firar kenarındaki hava jet etkinliği araştırılmıştır. Belirlenen aralıkta köşe yuvarlatma değeri ve bunun fonksiyonu olan jet akış etki alanı arasındaki eşitlikler herbir delik için hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bilgiler uçak motor parça tasarım ve imalat faaliyetlerinde önemli bir girdi olarak kullanılması beklenmektedir. Ayrıca çalışma kapsamında uygulanan akış görselleştirme yöntemi geliştirilerek benzer çalışmalarda kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Uçak motorunda buzlanma, Köşe yuvarlatma, Ön yatak taşıyıcı parça

SUMMARY

Icing is one of the serious meteorological event which threatens flight security. Aircraft engine manufacturers have to assure that engine has protection system against icing during the certification of the engine. Front bearing chamber where icing may occur is held in this study. Purpose of the study is to investigate the effect of break edge operation which increases icing risk on the part. The icing occurs on vanes of the part. High thermal gradient and sharp edges occurring after manufacturing of the holes cause stress concentration near the holes. In order to prevent probable crack initiation, break edge operation has to be applied to the holes. However, this operation reduces icing system efficiency. Determining upper limit of the break edge operation is the main aim of this study. Both numerical analyses and flow visualization experiments have been performed for 4 different break edge operations. All break edge operations have been investigated at different flow conditions. There are 15 holes on a vane and they divided 3 groups for the investigation. Outcomes of the numerical analysis are compared with experimental. Velocity vectors, shear stresses, thickness of effected area by jet flow are analyzed and upper limit of the break edge operation for all group of the vane are defined according to determined criteria. Jet flow effectiveness of leading edge of the vane having specified aero profile is researched by using a different flow visualization method from the methods available in literature. Equations between break edge operation and jet flow effective area which is function of break edge operation are calculated for each hole. Obtained data is expected to use for design and manufacturing of the engine component as important input. On the other hand, the flow visualization method used in this study can be improved and used for similar studies.

Keywords: Icing on the aircraft engines, Break edge operation, Front bearing chamber

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarında bana danışmanlık ederek, bilgisini ve deneyimlerini her zaman çok cömertce paylaşan ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Prof. Dr. Haydar Aras'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarda kullanılan parçaların imalatında ve kullanımında, deneylerin gerçekleştirilmesinde destek veren Tusaş Motor Sanayii'ne teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince burs desteği sağlayan TÜBİTAK'a sonsuz teşekkür ederim.

Desteğinin hiç esirgemeyen ve her türlü zorluğun üstesinden gelmeme yardımcı olan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
GİRİŞ	1
1. UÇAK MOTORUNDA BUZLANMA.....	8
1.1 Ön Yatak Taşıyıcı Parça	9
1.2 Kanatçık Profili	11
1.3 Buzlanma Önleyici Sistem	12
2. PROBLEMİN TANIMLANMASI	14
2.1 Yöntem Ve Amaç	14
2.2 Çözüm Yaklaşımı	15
3. SINIR ŞARTLARININ BELİRLENMESİ	16
3.1 Tahliye Delikleri ve Gruplandırılması	16
3.2 Ana Akış Ve Jet Akış Sınır Şartları	18
3.3 Köşe Yuvarlatma İşlemi	19
4. SAYISAL MODEL VE İLGİLİ DENKLEMLER	20
4.1 Hazırlık İşlemleri.....	20
4.2 İlgili Denklemler	21
4.3 Akış Çözücü Ayarları	22

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)**Sayfa**

5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZ SONUÇLARI	26
5.1 Kayma Gerilmeleri	26
5.2 Hız Vektörleri	27
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	30
6.1 Akış Görüntüleme Yöntemi	30
6.1.1 Literatürdeki çalışmalarında yer alan yöntemler	30
6.1.2 Çalışma kapsamında kullanılan yöntem	31
6.2 Deney Düzenegi	31
6.2.1 Rüzgâr tüneli	32
6.2.2 Bağlantı elemanları ve diğer bileşenler	33
6.2.3 Jet akış hava basınçlandırma hattı	35
6.2.4 Ana akış hattı	36
6.2.5 Tiner besleme hattı	37
6.2.6 Ölçüm araçları	38
6.3 Deney Sırasında İzlenecek Adımlar	38
7. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	40
8. DOĞRULAMA ÇALIŞMASI VE JET ETKİNLİĞİ	50
9. KRİTİK KÖŞE YUVALATMA DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ	54
9.1 Grup 1 Delikleri	54
9.2 Grup 2 Delikleri	55
9.3 Grup 3 Delikleri	57
10. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	59
11. KAYNAKLAR	70

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
EK AÇIKLAMA-A	74
A.1. Ağ Yapısı.....	74
A.2. Ağ Yapısı Kalitesi	84
EK AÇIKLAMA-B	86
EK AÇIKLAMA-C	95
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Kanat üzerinde buzlanma oluşumu (Banke, J., 2012).....	9
1.2. Ön yatak taşıyıcı parçanın tipik bir turboprop motordaki konumu	10
1.3. Ön yatak taşıyıcı parça (önden görünüm)	11
1.4. a) Kanatçık üzerindeki dekiklerin görünümü b)kanatçık profilinin görünümü.....	11
1.5. Buzlanma önleyici sistemin a) 2 Boyutlu görünümü b) 3 Boyutlu görünümü	12
1.6. Basitleştirilmiş buzlanma önleyici sistemin 2 Boyutlu görünümü.....	13
2.1. Köşe yuvarlatma işleminin uygulandığı bölge.....	14
3.1. Deliklerin gruplandırılması	18
3.2. Sınır şartlarının rüzgâr tüneli üzerinde temsili gösterimi.....	18
3.3. Köşe yuvarlatma işlemi uygulaması	19
4.1. Sayısal model	21
4.2. Sayısal model ve akış yönleri.....	23
4.3. Sınır şartlarının kodlanma biçimi.....	25
5.1. Delik 3 hız vektörleri (sol; A1A, sağ; A4A)	28
5.2. Delik 8 hız vektörleri (sol; A1A, sağ; A4A)	28
5.3. Delik 13 hız vektörleri (sol; A1A, sağ; A4A)	29
6.1. Rüzgâr tüneli	32
6.2. Deney düzeneğinin tasarlanması ve teknik resmi	33
6.3. Alt parçanın görünümü	34
6.4. Üst parçanın görünümü	34
6.5. Kanatların deney düzeneğine yerleştirilmesi	35
6.6. Jet akış basınçlandırma hattı	35
6.7. Basınç regülatörü	36
6.8. Radyal Fan	36
6.9. Tiner deposu.....	37
6.10. Tiner atomizasyon hattı.....	37
6.11. Pitot tüpünün görünümü.....	38
6.12. Deney sırasında izlenecek adımlar	39
7.1. Deney öncesi firar kenarının boyanmış hali.....	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.2. Uygunsuzluğa sahip delikler	41
7.3 Deneysel sonuçları (T1A-x, T2A-x, T3A-x ve T4A-x).....	42
7.4 Deneysel sonuçları (T1A, T2A, T3A ve T4A).....	42
7.5 Kalınlık ölçümleri (T1A, T2A, T3A ve T4A).....	43
7.6. Deneysel sonuçları (T1B, T2B, T3B ve T4B).....	44
7.7. Kalınlık ölçümleri (T1B, T2B, T3B ve T4B).....	44
7.8. Deneysel sonuçları (T1C, T2C, T3C ve T4C).....	45
7.9 Kalınlık ölçümleri (T1C, T2C, T3C ve T4C).....	46
7.10. Kalınlık ölçümleri (T1A, T1B ve T1C)	46
7.11 Kalınlık ölçümleri (T2A, T2B ve T2C)	47
7.12 Kalınlık ölçümleri (T3A, T3B ve T3C)	48
7.13 Kalınlık ölçümleri (T4A, T4B ve T4C)	49
8.1. Kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı (A1A)	50
8.2. T1A ve A1A kalınlık sonuçlarının karşılaştırılması	51
A.1. Global ağ ayarları.....	75
A.2. “Relavence” değeri.....	76
A.3. Periyodik yüzeylerin görünümü	77
A.4. Ağ yapısı ayarlarının görünümü.....	78
A.5. Geometri üzerinde tetra yapının görünümü.....	79
A.6. Ağ yapısı özellikleri	79
A.7. Geometri üzerinde kesit alınan bölgeler.....	80
A.8. Kesit-A ağ yapısı mesh görünümü	81
A.9. Kesit-A yakınlaştırılmış ağ yapısı görünümü.....	81
A.10. Kesit B yakınlaştırılmış ağ yapısı görünümü	82
A.11. Kesit-B delik civarı ağ yapısı görünümü.....	82
A.12. Kesit-C ağ yapısı görünümü.....	83
A.13. Kesit-C delik çevresi ağ yapısı görünümü	84
A.14: Ağ yapısı kalite aralığı	85
B.1. Grup 1 delikleri kayma gerilme bölgeleri.....	86

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
B.2. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 1).....	86
B.3. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 2).....	87
B.4. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 3).....	87
B.5. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 4).....	88
B.6. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 5).....	88
B.7. Grup 2 delikleri kayma gerilme bölgeleri	89
B.8. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 6).....	89
B.9. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 7).....	90
B.10. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 8).....	90
B.11. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 9).....	91
B.12. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 10).....	91
B.13. Grup 3 delikleri kayma gerilme bölgeleri.....	92
B.14. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 11).....	92
B.15. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 12).....	93
B.16. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 13).....	93
B.17. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 14).....	94
B.18. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 15).....	94
C.1. Hız vektörleri (Delik 1).....	95
C.2 Hız vektörleri (Delik 2).....	96
C.3. Hız vektörleri (Delik 3).....	96
C.4. Hız vektörleri (Delik 4).....	97
C.5. Hız vektörleri (Delik 5)	97
C.6. Hız vektörleri (Delik 6)	98
C.7. Hız vektörleri (Delik 7).....	98
C.8. Hız vektörleri (Delik 8).....	99
C.9. Hız vektörleri (Delik 9).....	99
C.10. Hız vektörleri (Delik 10).....	100
C.11. Hız vektörleri (Delik 11).....	100
C.12. Hız vektörleri (Delik 12).....	101

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
C.13. Hız vektörleri (Delik 13).....	101
C.14. Hız vektörleri (Delik 14).....	102
C.15. Hız vektörleri (Delik 15).....	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Deliklerin kanatçık yüzeyine açıldığı uzunluklar.....	16
4.1. Jet giriş basınç etkisinin belirlenmesi için seçilen sınır şartları	24
4.2. Ana akış giriş koşulunun etkisinin belirlenmesi için seçilen sınır şartları	24
4.3. Analiz sınır şartlarının geometrilere uygulanması ve kodları	25
4.4. Test sınır şartlarının geometrilere uygulanması ve kodları	25
6.1. Akış görüntüleme teknikleri.....	30
8.1. Köşe yuvarlatma yapılmayan modelde film kalınlığı karşılaştırılması.....	51
8.2. Farklı köşe yuvarlatma değerleri için jet etkinliği	53
9.1. Deneysel sonuçlara göre kriterlerin uygunluğu (Grup 1).....	54
9.2. Analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (0.74xD)	55
9.3. Deneysel sonuçlar ile kriterlerin uygunluğu (Grup 2)	56
9.4. Analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (0.74xD)	56
9.5. Deneysel sonuçlar ile kriterlerin uygunluğu (Grup 3)	57
9.6. Analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (0.74xD)	57
10.1. Köşe yuvarlatma olmayan durum için kalınlık değerleri (Grup 1)	60
10.2. Köşe yuvarlatma olmayan durum için kalınlık değerleri (Grup 2)	60
10.3. Köşe yuvarlatma olmayan durum için kalınlık değerleri (Grup 3)	61
10.4. Köşe yuvarlatma 0.35xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 1)	61
10.5. Köşe yuvarlatma olmayan durum için kalınlık değerleri (Grup 2)	62
10.6. Köşe yuvarlatma 0.35xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 3)	62
10.7. Köşe yuvarlatma 0.74xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 1)	63
10.8. Köşe yuvarlatma 0.74xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 2)	64
10.9. Köşe yuvarlatma 0.74xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 3)	64
10.10. Köşe yuvarlatma 0.87xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 1)	65
10.11. Köşe yuvarlatma 0.87xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 2)	65
10.12. Köşe yuvarlatma 0.87xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 3)	66
10.13. Köşe yuvarlatma ile jet etkinliğinin değişimi (Grup 1).....	66
10.14. Köşe yuvarlatma ile jet etkinliğinin değişimi (Grup 2).....	67
10.15. Köşe yuvarlatma ile jet etkinliğinin değişimi (Grup 3).....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
10.16. Köşe yuvarlatma değerine bağlı kalınlık değişimi	68
10.17 Köşe yuvarlatma değeri üst limit değerleri	69
A.1. Sınır tabaka bölgelerinin hücre ayarları	78
A.2. Eğrilik için seçilen değerleri	84
A.3. Ortogonal kalite özellikleri.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
ρ	yoğunluk
τ	kayma gerilmesi
u	-x yönü hız bileşeni
v	-y yönü hız bileşeni
w	-z yönü hız bileşeni
μ	vizkozite
k	ısı transferi katsayısı
T	sıcaklık
φ	viskoz yıkılım terimi
S	kaynak terim
p	basınç
h_0	entalpi
R	evrensel gaz sabiti
λ	viskoz stres bileşeni
V	hız
t	zaman
D	delik çapı
L	Uzunluk
K	Yüzeyden kaldırılan boya kalınlığı

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
FHK	Federal Havacılık Kuralları
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
RANS	Reynolds-ortalama Navier-Stokes
UHUD	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi

GİRİŞ

Uçak motorları, uçuş zarfına göre farklı irtifa, basınç ve sıcaklık koşullarında çalışmak üzere tasarlanmaktadır. Hava şartları, iklim ve bölgelere göre değişiklik göstermektedir. Bundan dolayı uçak motoru, seyir sırasında yüksek veya düşük sıcaklığa sahip hava akımı ile karşılaşmaktadır. Havanın sıcaklığı donma noktasının altına düştüğü ve nemin yağış şekline dönüştüğü veya yoğunlaştığı durumlarda uçak gövdesinde ve motor alığında buzlanma meydana gelebilir. Ayrıca dış ortam sıcaklığı donma noktasının üzerinde bile olsa, eğer uçak yüzeyindeki sıcaklık donma noktasının altındaysa ve havada nem varsa buzlanma meydana gelebilmektedir. Uçak motorunda buzlanma oluşumu, uçuş güvenliğini tehdit eden en ciddi meteorolojik tehlikelerden biridir ve aşağıda belirtilen olumsuz sonuçlara sebep olabilir;

- Bir akışkan içinde hareket eden cisim üzerinde kritik hücum açısının geçilerek cismin akışkan içinde tutunamaması
- Sınır tabakanın bozulması ve akışın yüzeyi takip edememesi
- Motor hava giriş alanının kapanması
- Basınç kaybı meydana gelmesi
- İtme kaybı meydana gelmesi
- Birikmiş buzların kırılması, motor arızalarına ve motor susmalarına neden olur
- Yakıt sarfiyatının artması
- Pervane pali gibi dönen parçaların asimetrisini bozar ve şiddetli sarsıntılara sebep olarak kontrolü zorlaştırır.

Buzlanma, son yıllarda gerçekleşen uçak kazalarının artışı ile önem kazanan bir konudur. Motor üreticileri sertifikasyon sürecinde motorun buzlanmaya karşı korumalı olduğunu, belirtilen kurallar çerçevesinde ispat etmekle yükümlüdürler. Federal Havacılık İdaresi yönetmeliğinin Federal Havacılık Kuralları (FHK-29) dökümanında belirlenen kuralların Ek-C bölümünde ve Avrupa Havacılık Emniyet Ajansı'nın sertifikasyon şartnamesinde uçak motor buzlanma gerekliliklerinden bahsedilmektedir. Buna ek olarak, son zamanlarda yürürlüğe girecek olan Ek-O ve Ek-P kuralları, sertifikasyon otoritelerinin buzlanma konusunu önemseyişinin bir göstergesidir.

Uçak motorlarında genellikle hava alığından sonra konumlanan ve yapısal yükleri karşılayan “ön yatak taşıyıcı parça” bulunmaktadır. Soğuk hava, ilk önce motor alığı ve ön yatak taşıyıcı parça ile doğrudan temas etmektedir. Bundan dolayı buzlanma açısından en kritik kısımlar giriş bölgesindedir. Tez kapsamında, ön yatak taşıyıcı parça için buzlanma açısından risk teşkil eden köşe yuvarlatma işleminin etkisi araştırılmıştır.

Ön yatak taşıyıcı parça sabit ve üzerinde çevresel olarak konumlanmış kanatçık sistemi bulundurmaktadır. Parçanın orta kısmında mil yataklanmıştır ve üzerindeki kulakçıklar vasıtası ile motor gövdesine bağlanmaktadır. Kanatların görevi havayı kompresöre düzgün bir şekilde yönlendirilmesini sağlamaktır. Buzlanma, genellikle kanatçıklar üzerinde meydana gelmektedir. Hava içindeki nem, buzlanma şartlarında soğuk kanatçık yüzeyi ile karşılaştığında buz fazına dönüşerek yüzeye tutunmaktadır. Zamanla büyüyen buz kütlesi, daha önce belirtilen olumsuz sonuçlara neden olarak uçuş güvenliği için bir risk oluşturur. Bu riskin ortadan kaldırılması için buzlanma önleyici sistemler kullanılır. Tez konusu parçada; kompresörden çekilen sıcak havanın kanatlardan geçirilmesi ile buzlanma oluşumu önlenmektedir. Kanat içine açılan kanallar vasıtası ile sıcak hava kanat içinde dolandırılarak firar kenarına yakın bölgedeki deliklerden tahliye edilir. Kanat yüzeyine ısı transeri gerçekleştirilerek buzlanma oluşumu önlenmiş olur. Buzlanma önleyici sistem açık olduğu durumda; kanat içindeki sıcak hava ve kanat dışından geçen soğuk hava parça üzerinde sıcaklık farkının oluşmasına ve delik çevresinde strese neden olur. Ayrıca deliklerin işlenmesi sonucunda keskin köşe oluşmaktadır. Keskin köşeler de yüksek stres yoğunluğuna neden olmaktadır. Bu iki durumun etkisi ile parçanın ömrü azalmakta ve delik kenarında çatlak başlayabilmektedir. Olası çatlakların başlamasını engellemek için deliklere köşe yuvarlatma işlemi uygulanması kaçınılmaz hale gelmektedir. Fakat bu işlem buzlanma önleyici sistemin etkinliğini azaltmaktadır. Stres açısından köşe yuvarlatma çapının büyük olması pozitif etki yaratırken, termal açıdan kötü sonuçlar doğurabilmektedir. Köşe yuvarlatma çapı fazla olması durumunda havanın yüzeyden ayrılması söz konusudur ve bu durumda buz önleyici sistemin etkinliğini azaltmaktadır. Bu işlemi otomatik proseslerle kontrol altına almak zor olduğundan köşe yuvarlatma limitlerinin araştırılması ve belirlenmesi önem arz etmektedir. Deliklere uygulanan köşe yuvarlatma ölçüsünün üst limitinin belirlenmesi, bu araştırmanın temel amacını

oluşturmaktadır. Tusaş Motor Sanayii A.Ş. firması ile işbirliği içinde akış davranışının belirlenebilmesi için deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 4 farklı köşe yuvarlatma ölçüsü ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Ana akış ve jet akış için farklı sınır şartları kullanılarak deney verileri elde edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında köşe yuvarlatma işleminin akışa etkisi nümerik olarak da araştırılmıştır. Buzlanma oluşumunu önleyecek sıcak havanın yüzeyde tutunacağı bir tasarım oluşturulması için köşe yuvarlatma ölçüsünün üst limiti belirlenmiştir. Literatürdeki benzer problemlerin çözüm yöntemleri araştırılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analiz sonuçları ile deney verilerinin ilişkilendirilerek çalışma sonuçlandırılmıştır.

Deneysel çalışmada 15 tahliye deliğine sahip kanatçık kullanılmıştır. Delikler, buzlanma sistemi açısından uygun olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu geometrilere ağ yapısı oluşturulmuş ve deney sınır şartları ile akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı ana ve jet akış şartları farklı köşe yuvarlatma değerleri için analizler edilmiştir.

Literatür araştırmasında söz konusu çalışmaya benzer olarak delikten çıkan akışın ısıtma, soğutma etkinliğinin araştırıldığı çalışmalara rastlanılmış olup deliklere uygulanan köşe yuvarlatma işleminin etkisini inceleyen bir çalışma bulunamamıştır. Bu araştırmanın literatürdeki boşluğu doldurması ve bilime katkı sağlaması beklenmektedir. Literatürde araştırma konusuna benzer çalışmalar incelenmiş olup aşağıda başlıca çalışmalar özetlenmektedir;

Bogard ve Thole (2006), gaz türbininde film ısıtma konusunu araştırmıştır. Makalenin planlanan çalışma ile ilgisi yaptıkları deneylerde deliklerin açığa bağlı değişimini inceledikleri bölümdür. Ana akışa ile delik arasındaki açı 0° ve 60° olacak şekilde deney verileri elde edilmiştir. Etkinliğin, açı ile değişimi grafiklerle ortaya konulmuştur. Tez çalışmasında köşe yuvarlatma işlemi akış çıkış açısını değitirdiği için sözkonusu makaledeki bilgilerden yararlanmak mümkündür.

Vu (2008), yüksek lisans çalışmasında HAD analiz aracı kullanarak soğutma deliklerinin yüzeye 30° , 45° , 90° olacak şekilde açılmasıyla ana akışa karıştığı noktada

yüzeyden ayrılmasını ve film etkinliğini araştırmıştır. Bu çalışmada akış ile yüzey arasındaki açının azalması ile akışın daha fazla yüzeye tutunabildiği nümerik olarak doğrulanmıştır.

Jung ve Lee (2000) tarafından delik açısının jet akış ile ana akış etkileşimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı jet akış hızı/ana akış hızı oranlarında sonuçların nasıl olduğu üzerinde durulmuştur. Çalışmanın bu kısmı söz konusu araştırma ile benzerlik göstermektedir.

Colban (2005) tarafından fan şeklinde yüzeye açılan delikler ile silindirik şekilde açılan deliklerin soğutma etkinliği araştırılmıştır. Fan şeklinde açılan delikler, silindirik deliklere göre daha etkin bir film soğutma sağladığı belirlenmiştir. Fan şeklinde açılan yüzey akışın yüzeyi takip etmesini kolaylaştıracak etkisi ile bu durum açıklanabilir. Tez konusu çalışmada yapılan köşe yuvarlatma işlemi deliğin hücum kenarına bakan köşesine uygulandığı için bu etkinin tam tersi olacağı öngörülmektedir.

Hui vd. (2010) jet akış ile ana akışın yaptıkları açı değiştirilerek ana akış ve jet akışın birbirleri ile etkileşimi araştırılmıştır. Ana akış özellikleri HAD aracı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda ana akış ile jet akış arasındaki açının azalması ile soğutma etkinliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

Lu vd. (2010) tarafından türbin kanadı üzerindeki film soğutma etkisi deneysel olarak çalışılmıştır. Beş kanatlı kaskat sistemi kullanılarak test gerçekleştirilmiştir. Kord uzunluğu ve çıkış sıcaklığına bağlı olan düşük Reynolds sayısında (634,000) test gerçekleştirilmiştir. Soğutma bölgesindeki akış alanı ve ısı transferi nümerik olarak iki farklı türbülans modeli için elde edilmiştir. Nümerik sonuçlar ile test sonuçlarının film soğutma etkinliğini açısından tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Gomes ve Niehuis (2011) tarafından yüksek hız türbin kanat kaskat sistemi rüzgâr tüneline test edilmiştir. Çalışmanın başlıca amacı akışın yüzeyden ayrıldığı bölgedeki ısı transferi ve soğutma etkinliğini araştırmaktır. Akış hücum kenarında yüzeyden ayrılmaya zorlanmıştır ve daha sonrasında aksiyel kord uzunluğunun yarısında yeniden yüzeye tutunması sağlanmıştır. “Reynolds-ortalımalı Navier Stokes” (RANS) ve

Büyük Girdap Simülasyon sonuçları kullanılarak ticari yazılım sonuçları test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Li vd. (2011) tarafından türbin rotorunda soğutma etkinliği araştırılmıştır. Reynolds sayısı aksiyel kord boyunca 370,000'dir. Soğutucu ve ana akış yoğunluk oranı gerçek motor şartlarını yansıtacak şekilde 1.5 ile 2 arasında kullanılmıştır. Sonuçlar, firar kenarı ile düzgün olmayan çevrintinin soğutma etkinliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca daha yoğun bir akışkan kullanıldığı durumda firar kenarındaki yüzeyde daha etkin bir film soğutma olduğu sonucuna varılmıştır. Planlanan projede iki akış etkileşimi söz konusu olduğundan aralarındaki yoğunluk etkileşimi bu çalışma ile ilişkilendirilebilir.

Baldauf ve Scheurlen (2002) tarafından yapılan çalışmada film soğutma etkinliği, yoğunluk oranı, momentum oranı, türbülans yoğunluğu ve jet çıkış açısı gibi parametreleri incelenerek araştırılmıştır. 30°, 60°, 90° olmak üzere üç farklı jet çıkış açısı değeri incelenmiştir.

Dhungel (2007) tarafından yapılan tez çalışmasında düz bir plaka üzerinde farklı delik geometrileri kullanarak film etkinliği araştırılmıştır. Bu çalışmada deliklerin etrafına jet etkinliğini arttırmak için delik çiftleri farklı pozisyonlarda yerleştirilmiştir. Düşük hız rüzgâr tüneli kullanılarak elde edilen sonuçlar referans geometri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda anti vorteks deliklerinin varlığı, ana akışın momentumunu azalttığı ve jet etki alanını iyileştirdiği görülmüştür.

Colban, Thole ve Bogard (2011) tarafından yapılan çalışmada düz bir plaka üzerinde şekil verilmiş deliklerin film hava soğutma etkinliği için matematiksel ilişkiler öne sürülerek varolan deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda matematiksel ilişkilerin tahminleme kapasitesinde önemli bir artış olduğu belirtilerek geçerli parametre aralığının genişletildiği gösterilmiştir.

Alert, Bogard, Cunha (2004) tarafından yapılan çalışmada adyabatik soğutma etkinlik ve ısı transferi katsayısı farklı film soğutma konfigürasyonları için çalışılmıştır.

Kanatçık hücum kenarındaki deliklerin adyabatik etkinliği ve genel soğutma etkinliği yapılan deneylerde ölçülmüş ve aralarında büyük farklılık bulunmuştur.

Facchini vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada basınca hassasiyeti olan boya kullanılarak adyabatik etkinlik dağılımı araştırılmıştır. Farklı soğutucu ve ana akış koşulları için testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar 2 Boyutlu harita olarak gösterilmiştir. Soğutucu-ana akış kütle debi oranı etkisi tartışılmıştır.

Cheng vd. (2012) tarafından kimyasal ısı kaynağı ile film soğutma etkisi araştırılmıştır. Had analizi gerçekleştirilerek farklı ana akış-soğutucu akış oranlarında incelenmiştir. Delik ile yüzey arasındaki açı 30° olarak kullanılmıştır. Önerilen yöntem geleneksel yöntemle göre yüksek film etkinliğinin yanında daha geniş jet alanı sağlamıştır.

Paregouda ve Rao (2013) tarafından yapılan çalışmada farklı delik konfigürasyonları araştırılmıştır. Ansys Fluent programı ile düz plaka üzerinde ısı transferi katsayısı tahminlenmeye çalışılmıştır. Yüzey ile delik arasındaki açı 35° olarak modellenmiştir. K-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Yüzeyde film hava sağlanamamasına rağmen 30° için elde edilen sonuçlara göre daha düşük yüzey sıcaklığı elde edilmiştir. Bunun nedeni soğutucu jet akışın ana akışı daha fazla etkilemesi ve geniş karışım bölgesi oluşturması olarak açıklanmıştır.

Chen vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada üç farklı şekildeki orifisten çıkan jet akış ile ana akış arasındaki etkileşim araştırılmıştır. Akış görselleştirme yöntemi olarak Schlieren fotoğraflama kullanılmıştır. Düz plaka üzerinde akış ayrılma bölgeleri ve yeniden tutunma bölgeleri elde edilmiştir.

Wilfert, Fottner (1996) tarafından gerçekleştirilen çalışmada türbin kaskad sisteminde emme yüzeyindeki bir sıra delik etrafındaki jet akış ana akış karışım süreci incelenmiştir. Deney sırasında basınç, pinomatik, hot-wire problemleri ile ölçümler gerçekleştirilmiş ve akış görselleştirmeden yararlanılmıştır. Jet akış/ana akış oranı

düşük olduğunda karışım sınır tabaka içinde olabilmekte fakat bu oran arttığında jet akış ana akış içinde daha derin bölgelere yayılabilmektedir.

Johnson vd. (2014) tarafından düz bir plaka üzerine yerleştirilen silindirik deliklerden çıkan jetin soğutma performansı deneysel olarak çalışılmıştır. Partikül izleme yöntemi kullanılarak akış alanı çıkartılmış ve basınç duyarlı poya ile adyabatik film soğutma etkinliği ölçülmüştür. Özellikle yoğunluk oranına bağlı olarak akış etkileşimi incelenmiştir.

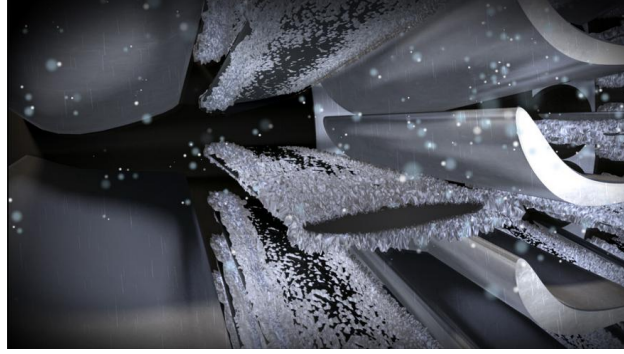
Zhang vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada RNG k-epsilon modeli kullanılarak düz plaka üzerinde film soğutma akış ve ısı transferi karakteristiği araştırılmıştır. Delik şekilleri değiştirilerek jet-ana akış etkisi incelenmiştir. Koni şeklindeki delik için optimum jet-ana akış oranında en yüksek soğutma etkinliği elde edilmiştir.

Yapılan çalışma kapsamında kullanılan basınç, hız, köşe yuvarlatma bilgileri TEI firmasının gizlilik politikası gereğince açık bir şekilde ifade edilmemektedir ve boyutsuz olarak verilmektedir.

1. UÇAK MOTORUNDA BUZLANMA

Ses altı hızlarda, yaklaşık 26.800 ft altındaki irtifada bulut içinde uçmakta olan uçakların kritik aerodinamik yüzeylerinde buzlanma meydana gelebilmektedir. Buzlanma koşulları, hava sıcaklığı donma noktasının altına düştüğünde, nemin yağış şekline dönüştüğü veya yoğunlaştığı zaman beklenebilir. Bununla beraber dış ortam sıcaklığı, donma noktasının üzerinde bile olsa, eğer uçak yüzeyindeki sıcaklık donma noktasının altındaysa ve havada nem varsa buzlanma meydana gelebilir. Bu durum uçak kontrolünün zorlaşmasına ve aerodinamik performansının bozulmasına yol açmaktadır. Buz birikimi tipik olarak küçük boyutlu ve donma sıcaklığının altındaki parçacıkların yüzey üzerinde birikmesi ile gerçekleşir. Son zamanlarda büyük parçacıkların da güvenlik sorunu oluşturduğu ortaya çıkmıştır (Michael Papadakis, vd., 2008).

Uçaklarda yüzlerce kaza ve olaya neden olan uçuş sırasındaki buzlanma, temel güvenlik konularından biridir. Buzlanma yüzey pürüzlülüğünü ve yüzeyin şeklini değiştirmektedir, bunun sonucunda sürüklenme kuvvetinde artış ve kaldırma kuvvetinde azalma, hücum açısında azalma meydana gelebilir (Pellissier, 2010). Motor üreticileri, kritik bölgelerde buz oluşumunu engelleyebilmek için önlemler almalıdırlar. Bu durum hem tasarım hem de sertifikasyon açısından motor üreticilerini zorlayan bir durumdur. Buzlanma, buz önleyici ve buz çözücü sistemler kullanılarak engellenebilmektedir. Bu sistemlerin doğru çalışması için oluşabilecek buz miktarını ve şeklini hesaplamaya çalışan programlar mevcuttur. Ayrıca uçakta buzlanma birçok araştırmacı tarafından hem deneysel hem de sayısal olarak çalışılan bir konudur. Özellikle Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (UHUD) araştırma merkezinde bu konu üzerine yoğun çalışmalar bulunmaktadır. UHUD tarafından çalışılan ve donmuş kristallerin motor içine girdiği durum Şekil 1.1 gösterilmektedir (Banke, J., 2012).



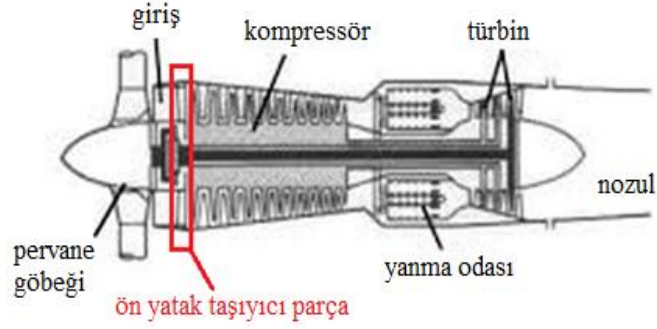
Şekil 1.1. Kanat üzerinde buzlanma oluşumu (Banke, J., 2012)

Uçak motoru kazaları hakkındaki çalışmalar, motor buzlanmasının 1980'den beri 140'dan fazla motorda güç kaybına sebep olduğunu ortaya koymuştur (Mazzawy, 2009).

Uçak motorlarında buzlanmanın oluşabileceği kritik bölgeler genellikle metal sıcaklığının düşük olduğu motor bloğunun giriş bölümündeki parçalardır. Söz konusu çalışmada incelenen parça soğuk hava ile doğrudan temas halinde bulunan “ön yatak taşıyıcı parça” olarak adlandırılan parçadır ve ilerleyen bölümlerde parça detaylı olarak tanımlanmaktadır.

1.1 Ön Yatak Taşıyıcı Parça

Ön yatak taşıyıcı parça hava alığı ile kompresör arasında konumlanmış olup, gövdesinde rulman yataklanmaktadır. Şekil 1.2'de tipik bir ön yatak taşıyıcı parçanın uçak motorundaki konumu gösterilmektedir.

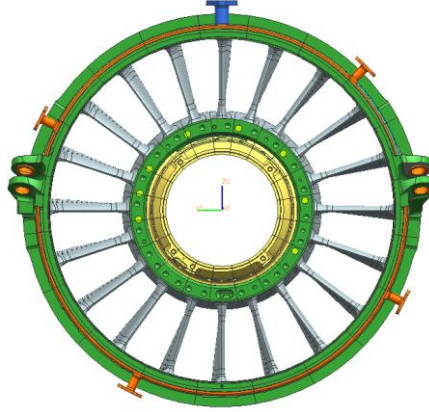


Şekil 1.2. Ön yatak taşıyıcı parçanın tipik bir turboprop motordaki konumu
(http://www.456fis.org/JET_ENGINS.htm)

Üzerinde 20 adet sabit kanatçık bulunduran parçanın görevleri şöyle sıralanabilir;

- Kanatçıklar vasıtası ile havayı kompresöre yönlendirmek
- Rulman ve sızdırmazlık elemanının yağlanması sağlamak
- Motor yapısal yüklerini taşımak

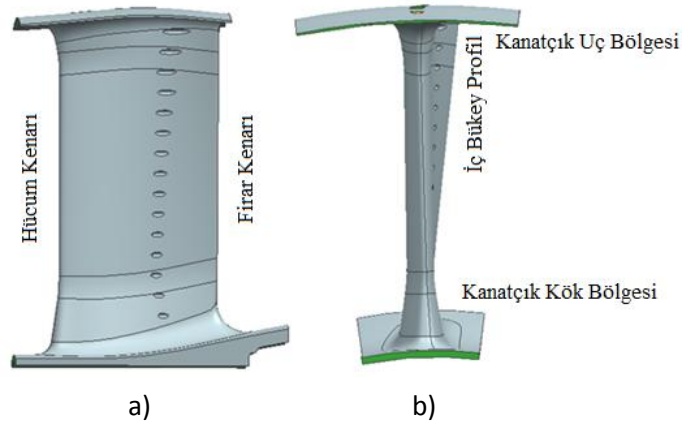
Buzlanma olayı, soğuk hava ile doğrudan karşılaşan sabit kanatçıklar üzerinde meydana gelir. Literatür araştırmasında da elde edilen sonuçlara göre buzlanma önleyici bir sistem kullanılmadığı takdirde özellikle hücum ve firar kenarında buz birikimi gerçekleşmektedir (Tatar ve Kaçar, 2014). Uçuş güvenliğini tehlikeye sokabilecek; motor giriş bloğunun kapanması, yanma odasında alev sönmesi, kompresör bıçaklarının zarar görmesi gibi istenmeyen durumlarla sonuçlanabilmektedir. Araştırma kapsamında kullanılan parça ve üzerindeki kanatlar Şekil 1.3’de gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Ön yatak taşıyıcı parça (önden görünüm)

1.2 Kanatçık Profili

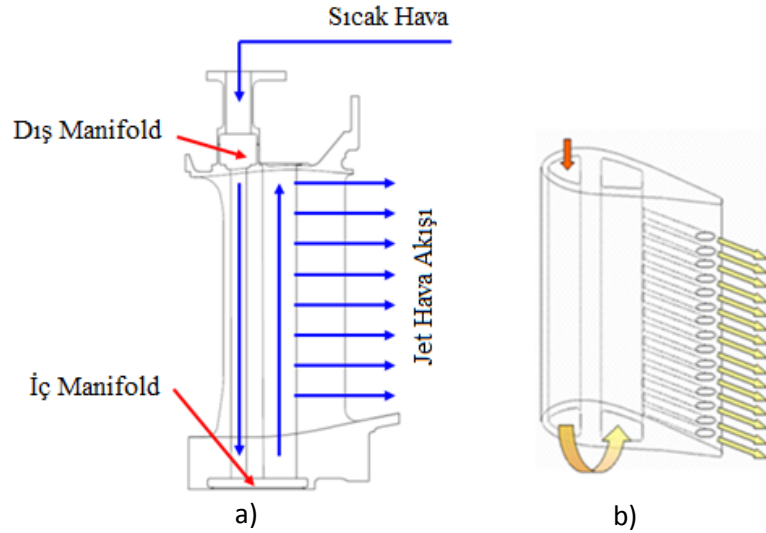
Kanatçık profili aero performansı göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Kanatçığın uç bölge tarafı iç bükey ve kök bölge tarafı daha düz bir profile sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Kanatçık kök ve uç bölgelerinde radyusa sahiptir. Ayrıca kanatçıkların iç halka tarafında iç manifold ve dış halka tarafında dış manifold konumlandırılmıştır ve ısıtma havası, kanatçıklara bu manifoldlar ile dağıtılmaktadır. Her bir kanat üzerinde 15 adet hava tahliye deliği bulunmaktadır. Şekil 1.4’de bir kanat profili gösterilmektedir.



Şekil 1.4. a) Kanatçık üzerindeki dekilerin görünümü b) kanatçık profilinin görünümü

1.3 Buzlanma Önleyici Sistem

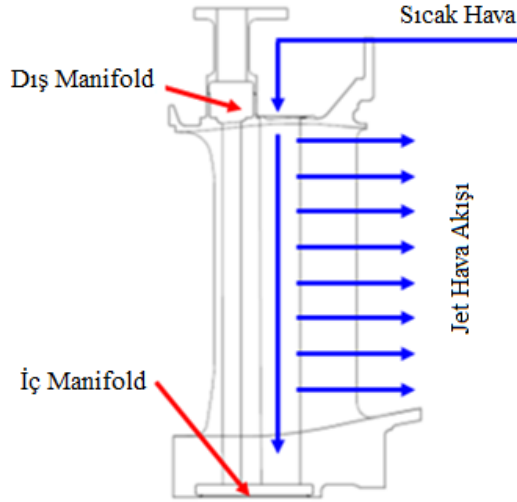
Genellikle buzlanma ile mücadelede iki tür sistem kullanılmaktadır; bunlardan birincisi buz giderme sistemleri, ikincisi buz önleme sistemleridir. Bu çalışmaya konu olan parçada buzlanma önleyici sistemlerden biri olan hava ile ısıtma yöntemi kullanılmaktadır. Kompresör kademesinden çekilen sıcak hava, kanat içinde bulunan kanal içinden geçirilerek firar kenarına yakın bölgeden ana akışa tahliye edilir. Hücum ve firar kenarına yakın yüzeyler ısıtılarak metal sıcaklığının artırılması amaçlanmaktadır. Firar kenarında yüzey üzerinde hava filmi oluşturulması ile sıvı parçacıkların yüzeye tutunması zorlaşmaktadır. Böylece hem hava filmi hem de iletim ile gerçekleşen ısı transferi ile buz birikimi engellenmektedir. Şekil 1.5’de buzlanma sistemi mekanizması gösterilmektedir. Pişkin ve Ortiz, 2011 tarafından yapılan çalışmada bahsedilen buzlanma önleyici sistem tasarımı anlatılmıştır.



Şekil 1.5. Buzlanma önleyici sistemin a) 2 Boyutlu görünümü b) 3 Boyutlu görünümü

Deliklerin konumu belirlenirken iki kısıtlama hesaba katılmıştır. Bu kısıtlamalar; delik çevresindeki stres yoğunluğu ve firar kenarında buzlanmadır. Stress açısından deliğin hücum kenarına doğru açılması gerekirken, termal açıdan deliğin firar kenarına doğru açılması gerekmektedir. Hesaplamalar ve değerlendirmelerle herbir

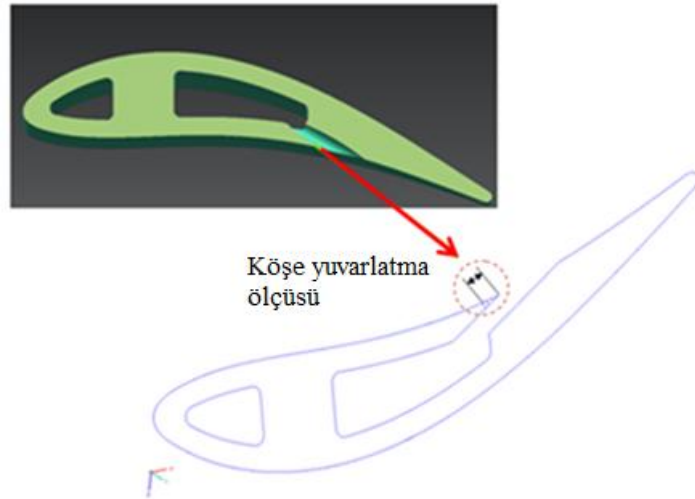
delik için özel konum belirlenerek delik konumları tasarlanmıştır. Hucüm kenarı ve kanadın orta bölgesi kanallar vasıtası ile ısıtıldığından bu bölgelerde buz oluşumu gözlemlenmemektedir. Bundan dolayı bu çalışmada firar kenarında oluşan buzlanmanın önlenmesine odaklanılmıştır. Özellikle bu bölgedeki buzlanma önleyici sistemin çalışmasını etkileyen faktörlerden biri olan delik köşe yuvarlatma işlemi incelenmektedir. Analiz ve deneyler için sistemde basitleştirmeye gidilerek hava kanatçığın uç bölgesinden arka kanala doğrudan ve ön kanala geçiş önlenmiştir. Şekil 1.6'da basitleştirilmiş durum için havanın izlediği yol gösterilmektedir. Bu basitleştirme rüzgâr tüneline parçaların yerleşimi göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.6. Basitleştirilmiş buzlanma önleyici sistemin 2 Boyutlu görünümü

2. PROBLEMİN TANIMLANMASI

Kanat üzerindeki tahliye deliklerinde imalat sonrası meydana gelen keskin köşelerin oluşturduğu stres yoğunluğu nedeni ile Şekil 2.1’de gösterilen bölgeye köşe yuvarlatma işlemi uygulanması gerekmektedir. Böylece hem sıcaklık gradyeninin hem de keskin köşenin neden olabileceği olası çatlakların önüne geçilerek parça ömrünün azalması engellenmiş olacaktır. Daha önce bahsedilen iki kısıt göz önüne alındığında; köşe yuvarlatma işlemi uygulanırken alt limit stres yoğunluğuna ve üst limit buzlanma önleyici sistemin etkinliğine göre belirlenmesi gerekmektedir. Fazla malzeme kaldırılması durumunda jet akışın yüzey ile yapacağı açı ve buna paralel olarak yüzeye tutunan buz miktarı artacaktır. Otomatik olarak yapılmayan ve hataların meydana gelebildiği köşe yuvarlatma işlemi için üst limit belirlenerek kontrol altına alınması, buzlanma sistemi gereksinimlerinin karşılanması bakımından önemlidir.



Şekil 2.1. Köşe yuvarlatma işleminin uygulandığı bölge

2.1 Yöntem Ve Amaç

Araştırma sayısal ve deneysel olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Sayısal çalışmalar kapsamında belirlenen sınır şartlarında HAD analizleri gerçekleştirilerek

köşe yuvarlatma işlem etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. HAD analizleri kapsamında başlıca incelenecek parametreler;

- Köşe yuvarlatma ölçüsü
- Jet akış giriş basıncı
- Ana akış giriş basıncı

Bu parametrelerin incelenebilmesi ve karşılaştırmalarının yapılabilmesi için;

- Duvar kayma gerilmelerinden (τ)
- Hız vektörlerinden
- Jet akış etki alanı kalınlığından (K)
- Jet etkinliğinden (μ)

faaydanılacaktır. Elde edilen sonuçların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi ve grafiksel yöntemlerle bölgesel olarak akış davranışının ortaya konulması planlanmıştır.

Deneysel araştırmalar kapsamında rüzgâr tüneline gerçekleştirilen deneyler ile olayın fiziği incelenecektir. Parça ile ilgili önceki tecrübeler ve imalat kabiliyeti göz önünde bulundurularak deneyler sırasında kullanılacak köşe yuvarlatma işlemi değerleri belirlenecektir. Boya ile akış görüntüleme yöntemi kullanılan deneylerde hava film etkinliği, yüzeye tutunan boya kalınlığı ile ilişkilendirilerek sunulacaktır. Son olarak deney sonuçları ile sayısal sonuçlar ayrıntılı olarak incelenecek ve bölgelere ayrılan deliklerin köşe yuvarlatma işlemi için izin verilebilen üst limit değerleri belirlenecektir.

2.2 Çözüm Yaklaşımı


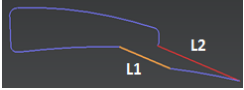
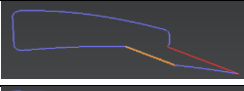
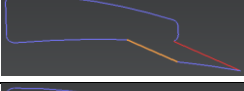
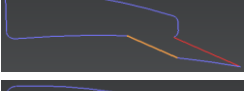
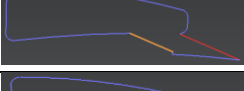
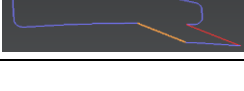
Buzlanma ve geometri özellikleri göz önünde bulundurularak delikler 3 bölgeye ayrılmıştır. Herbir bölgede 5 adet delik bulunmaktadır (Bölüm 3’de detaylı olarak anlatılmaktadır). Köşe yuvarlatma değerleri belirlenerek Unigraphichs programında geometriler oluşturmuştur. Bir sonraki adım akış koşullarının belirlenmesi ve analiz matrisinin oluşturulmasıdır. Analizlere paralel olarak deneysel çalışma yapılmış ve akış fiziksel olarak da incelenmiştir. Deney ve analiz sonuçlarına göre deliklere uygulanması gereken köşe yuvarlatma üst limit değeri nihai sonuç olarak belirlenecektir. Analiz ve deney sırasında yapılan kabüller ilerleyen bölümlerde açıklanmaktadır.

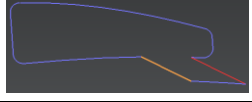
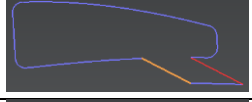
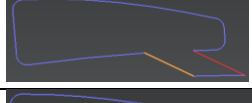
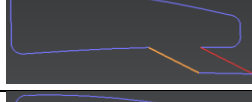
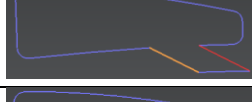
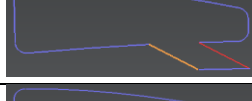
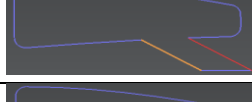
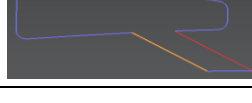
3. SINIR ŞARTLARININ BELİRLENMESİ

3.1 Tahliye Delikleri ve Gruplandırılması

Bir kanatçık üzerinde bulunan 15 adet deliğin çapları aynıdır fakat hem firar kenarına uzaklıkları hem de kanatçık profili düşünüldüğünde delik uzunlukları farklıdır. Delik uzunlukları çap ile orantılı olarak Çizelge 3.1’de gösterilmektedir. Deliğin hücum kenarı tarafına açıldığı uzunluk L1, deliğin firar tarafına doğru açıldığı uzunluk L2 olarak gösterilmektedir. Bu çalışmanın kapsamında yer almayan L1 ve L2 uzunlukları parçalarda aynıdır ve fikir vermesi amacıyla gösterilmektedir. Ayrıca dikkat edilmesi gereken diğer bir konu da kanatçık profilinden dolayı L2 uzunluğunun başlangıç noktası kanalın farklı bölgelerine denk gelmesidir. Başlangıç noktası birinci delikten onbeşinci deliğe doğru kanalın köşesinden orta bölgeye doğru kaymaktadır. Bu durum akış içinde dönümlü bölgelerin oluşmasına ve farklı bir şekilde yönleneşine neden olabilir.

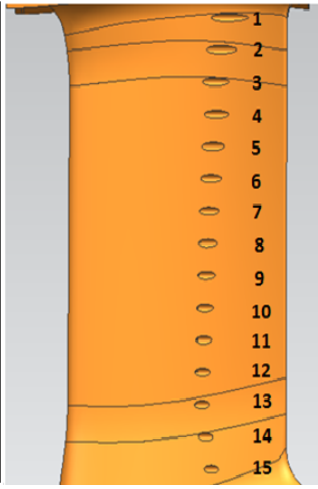
Çizelge 3.1. Deliklerin kanatçık yüzeyine açıldığı uzunluklar

Delik No.	L1/D	L2/D	Geometri Kesitleri
1	3.83	7.12	
2	3.41	5.54	
3	3.14	4.59	
4	2.96	3.90	
5	2.46	3.40	
6	2.67	3.08	
7	2.55	2.87	

8	2.45	2.69	
9	2.36	2.55	
10	2.28	2.43	
11	2.21	2.33	
12	2.16	2.25	
13	2.12	2.21	
14	2.69	2.85	
15	3.65	3.80	

Delikler, buzlanma açısından incelendiğinde ilk 5 delik birinci grubu oluşturmaktadır. Sonraki 5 delik kanadın orta bölgesinde ve buzlanma açısından kritik olabilecek bölgede olduğu için ikinci grup ve son 5 delik üçüncü grup olarak gruplandırılmıştır. L/D oranlarına bakıldığında gruplandırmanın benzer şekilde yapılabileceği görülebilmektedir. Delik bölgeleri Şekil 3.1’de özetlenmiştir.

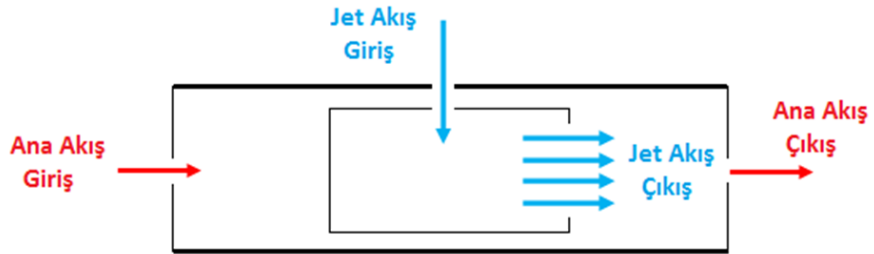
Delik No.	Grup No.
1	Grup 1
2	Grup 1
3	Grup 1
4	Grup 1
5	Grup 1
6	Grup 2
7	Grup 2
8	Grup 2
9	Grup 2
10	Grup 2
11	Grup 3
12	Grup 3
13	Grup 3
14	Grup 3
15	Grup 3



Şekil 3.1. Deliklerin gruplandırılması

3.2 Ana Akış Ve Jet Akış Sınır Şartları

Rüzgâr tüneline ana akış için hız kontrolü ve jet akış için basınç kontrolü yapılabildiğinden analizler sırasında bu durum göz önünde bulundurularak sınır şartları belirlenmiştir. Ana akış giriş hızı için V , $2xV$ ve $4xV$ (m/s), jet akış giriş basıncı için P ve $1.14xP$ (kPa) olarak sınır şartları belirlenmiştir. Şekil 3.2'de ana akış ve jet akış sınır şartları şematik olarak gösterilmektedir. Bu sınır şartlarının seçilmesinde önemli etkenlerden birisi rüzgâr tüneline kapasitesidir.



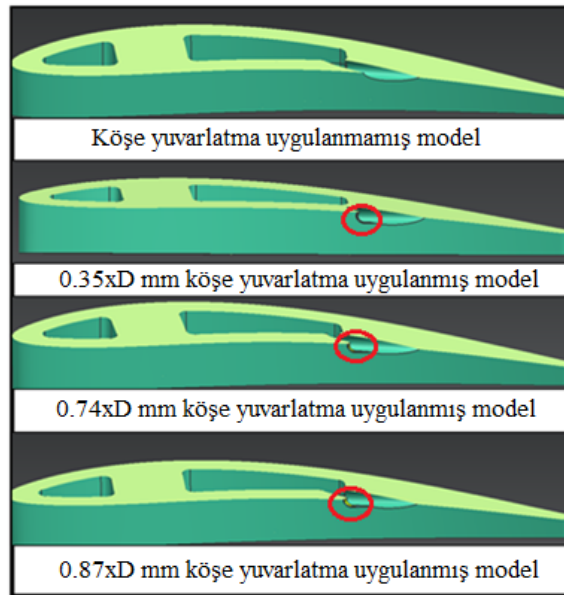
Şekil 3.2. Sınır şartlarının rüzgâr tüneline üzerinde temsili gösterimi

3.3 Köşe Yuvarlatma İşlemi

Köşe yuvarlatma işlemi için delik çapı ile orantılı olacak şekilde 4 değer belirlenmiştir;

- Köşe yuvarlatma olmayan geometri
- $0.35xD$
- $0.74xD$
- $0.87xD$

Köşe yuvarlatma değerleri ve üç boyutlu model üzerindeki uygulama bölgesi Şekil 3.3'da gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Köşe yuvarlatma işlemi uygulaması

4. SAYISAL MODEL VE İLGİLİ DENKLEMLER

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için gerekli üç ana adım bulunmaktadır;

- 1) Sayısal model ve ağ yapısının hazırlanması
- 2) Akış alanının çözümlenmesi
- 3) Veri işleme

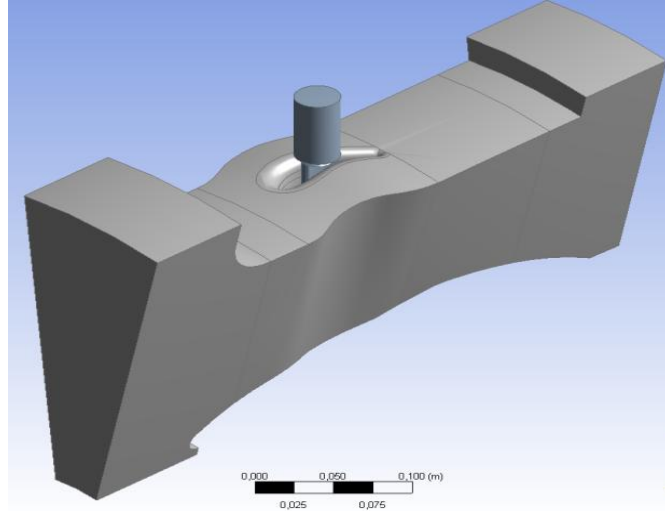
Bu bölümde oluşturulan sayısal model, ilgili denklemler ve çözücü ayarlarından bahsedilecektir. Verilerin işlenmesi sonuç kısmında ele alınacaktır.

4.1 Hazırlık İşlemleri

Bu çalışmada, köşe yuvarlatma işleminin etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Uygun bir sayısal modelin oluşturulması gerekmektedir. Bu adımda iki önemli nokta vardır; bunlardan birincisi geometri büyüklüğünün tanımlanması, ikincisi ise hücre yapısının yoğunluğu ve kalitesidir.

Geometrinin büyüklüğü çözüm alanını belirlemektedir ve bundan dolayı ne kadar küçük yapılırsa çözüm için gereken süre azalacaktır. Diğer bir yandan büyüklüğü kanatçık çevresindeki ve içindeki akış alanını hesaplayabilecek kadar büyük olmalıdır.

Kanatçık, kanatçık içerisindeki kanal, delikler ve jet akış giriş bölgesi sayısal olarak modellenmiştir ve Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Sayısal model bütün geometrinin 1/20'sini oluşturmaktadır ve periyodik olarak tanımlanacaktır.



Şekil 4.1. Sayısal model

Yüksek kalitede hexahedral hücre yapısı kullanılarak farklı köşe yuvarlatma değerine sahip 4 model oluşturulmuştur. Ağ yapısı, Ek Açıklamalar-A bölümünde detaylı bir biçimde açıklanmaktadır.

4.2 İlgili Denklemler

Zamana bağlı sıkıştırılabilir Newtonyen akış denklemlerinin genel hali aşağıdaki denklemlerde verilmektedir;

Kütle:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

x- momentum:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2)$$

y- momentum:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (3)$$

z- momentum:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (4)$$

Enerji :

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h_0 \vec{V}) = -p \nabla \cdot \vec{V} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \varphi + S_{Mx} \quad (5)$$

Denge denklemi:

$$p = \rho RT \quad (6)$$

Yoğunluk ρ , hız bileşenleri u, v ve w, hız vektörü \vec{V} , basınç P, kaynak terim S ve viskoz stres bileşen λ olarak Newtonyen akışkan için tanımlanmıştır.

$$\partial \tau_{xx} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (7)$$

$$\tau_{yy} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

$$\tau_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (9)$$

$$\partial \tau_{xy} = \partial \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (10)$$

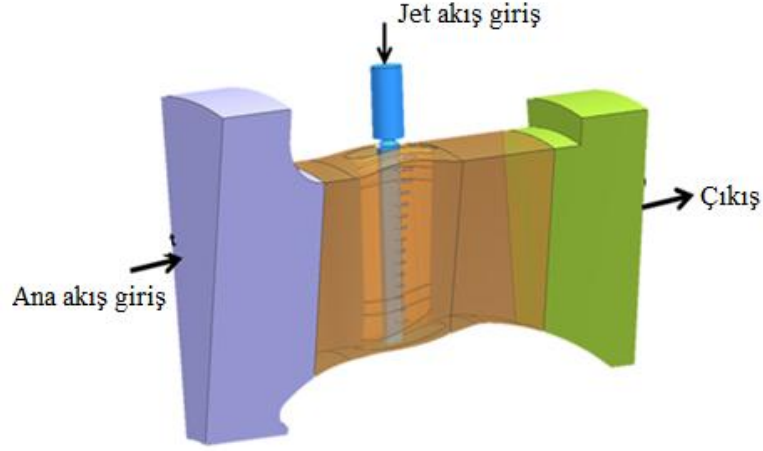
$$\partial \tau_{xz} = \partial \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (11)$$

$$\partial \tau_{yz} = \partial \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (12)$$

Analizler ve deneyler sırasında ısı transferi olayları göz önünde bulundurulmadığı için enerji denklemleri çözümlenmeyecektir.

4.3 Akış Çözücü Ayarları

Sayısal model 1/20 adet kanatçığa sahip periyodik bir modeldir. Sayısal model üzerinde ana akış ve jet akış yönleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Akış analizler için ticari Ansys Fluent 14 (3B versiyon) programı kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Sayısal model ve akış yönleri

Analizler sırasında kullanılan sınır şartları aşağıdaki maddelerde özetlenmektedir;

- Ana hava akış ve jet hava akışı sıkıştırılabilir ideal gaz olarak tanımlanmıştır.
- Sayısal modelde RANS denklemleri çözümlenmiştir, duvarda kaymama koşulu uygulanmıştır (bütün duvarlarda; $u=v=w=0$).
- “Pressure-based segregated” çözücü ve ikinci dereceden ayrıklaştırma şeması ile kullanılmıştır.
- Türbülans modeli için yaygın olarak kullanılan ve problemin çözümü için yeterli olabilecek “k- ϵ realizable” modeli kullanılmıştır.
- Duvara yakın bölgeler “genişletilmiş duvar fonksiyonu” ile çözümlenmiştir. Yüksek kalitede nümerik sonuçlar elde etmek için sınır tabakada ağ çözünürlüğü yeterli olmalıdır. Viskoz alt tabaka bölgesini çözümlenebilecek ağ yapısı oluşturulmuştur ve bu durum için y^+ değeri 1’e yakın alınır.
- Ana akış için hız giriş koşulu seçilmiştir. Bunun nedeni test sırasında giriş hız değerinin kaydedilmesidir. Çıkış da ise çıkış basınç koşulu uygulanmıştır. Jet akış girişi için basınç giriş şartı uygulanmıştır.
- İteratif çözümler nümerik hatanın en aza indirilmesi için yeterince uzun koşturulmalıdır. Program tarafından ön tanımlı yakınsama kriterleri her durumda yeterli olmayabilir. Yakınsama kriterinin altına inerse bile daha fazla iterasyona gereksinim duyulabilir ve dikkat edilmelidir. Çalışmada artık

değerlerin 1×10^{-4} altına düşmesi yakınsama kriteri olarak kabul edilmiştir. Bunun yanında jet akış giriş debisi takip edilmiş ve yakınsama durumu kontrollü bir şekilde gözlemlenmiştir.

- Önemli konulardan biri de ağ yapısından bağımsızlıktır. Sayısal model daha yoğun bir ağ yapısı ile koşturulduğunda farklı sonuçlar veriyorsa ağ yapısından bağımsız olabilmesi için daha yoğun bir ağ yapısı tercih edilmelidir. Bu çalışma kapsamında gerek rüzgâr tüneli gerekse de kanatçık etrafına yeterince yoğun ağ yapısı örülerek ağ yapısına bağımlılık ortadan kaldırılmıştır. Ek Açıklamalar-A'da ağ yapısından detaylı bir şekilde bahsedilmektedir.

Üç farklı ana akış giriş koşulu ve iki farklı jet basınç giriş koşulu için sayısal model üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle ana akış giriş basıncı sabit tutularak belirlenen iki jet akış giriş basıncı için analiz sonuçları incelenmiştir. Çizelge 4.1'de sınır şartları gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Jet giriş basınç etkisinin belirlenmesi için seçilen sınır şartları

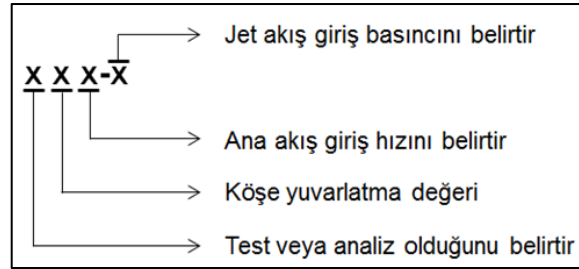
Ana Akış Giriş Hızı (m/s)	Jet Akış Giriş Basıncı (kPa)
4xV	P
4xV	1.14xP

Daha sonra jet giriş basıncı sabit tutularak ana akış giriş hız sınır şartının değiştirildiği durum incelenmiştir (Çizelge 4.2). Böylece seçilen aralıkta hem ana akış hem de jet akış koşullarının etkilerinin belirlenebilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 4.2. Ana akış giriş koşulunun etkisinin belirlenmesi için seçilen sınır şartları

Ana Akış Giriş Hızı (m/s)	Jet Akış Giriş Basıncı (kPa)
4xV	P
2xV	P
V	P

Belirlenen sınır şartları bütün geometrilere uygulanmış ve olası karışıklığı engellemek için test matrisi oluşturularak analiz ve testler kodlanmıştır. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4, analiz ve test şartları için belirlenen kodları göstermektedir. Sınır şartlarının kodlanma biçimi Şekil 4.3’de gösterilmektedir ve analiz sonuçları tartışılırken bu kod isimleri kullanılacaktır.



Şekil 4.3. Sınır şartlarının kodlanma biçimi

Çizelge 4.3. Analiz sınır şartlarının geometrilere uygulanması ve kodları

Köşe yuvarlatma değeri (mm)	4xV (m/s)		2xV (m/s)	V (m/s)
	P (kPa)	1.14xP (kPa)	P (kPa)	P (kPa)
Köşe yuvarlatma yok	A1A	A1B-x	A1B	A1C
0.35xD	A2A	A2B-x	A2B	A2C
0.74xD	A3A	A3B-x	A3B	A3C
0.87xD	A4A	A4B-x	A4B	A4C

Çizelge 4.4. Test sınır şartlarının geometrilere uygulanması ve kodları

Köşe yuvarlatma değeri (mm)	4xV (m/s)		2xV (m/s)	V (m/s)
	P (kPa)	1.14xP (kPa)	P (kPa)	P (kPa)
Köşe yuvarlatma yok	T1A	T1A-x	T1B	T1C
0.35xD	T2A	T2A-x	T2B	T2C
0.74xD	T3A	T3A-x	T3B	T3C
0.87xD	T4A	T4A-x	T4B	T4C

5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZ SONUÇLARI

Analiz sonuçları incelenirken kayma gerilmeleri, hız vektörlerinden yararlanılmıştır. Bu bölümde elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

5.1 Kayma Gerilmeleri

Kaya gerilmesi yüzey üzerinde akış etkisinin görülebilmesi açısından yararlı bir parametredir. Kayma gerilmesi duvardan uzaklaştıkça meydana gelen hız gradyeni ve akışkan vizkozitesi ile orantılıdır. Kayma gerilmesinin yüksek olması jet akışın etkisinin yüksek olması anlamına gelmektedir. Farklı köşe yuvarlatma değerlerine sahip geometriler için bütün deliklerde kayma gerilmeleri grafiksel olarak elde edilmiştir. Grafiklerde kayma gerilmeleri, deliğin orta noktasından firar kenarına kadar olan -x koordinatı boyunca gösterilmektedir (Şekil B.1, Şekil B.7, Şekil B.13). Kayma gerilmeleri değerleri A1A, A2A, A3A ve A4A koşulları için Ek Açıklamalar-B bölümünde gösterilmektedir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde;

Şekil B.2, B.3, B.4, B.5 ve B.6'da Grup 1 deliklerindeki kayma gerilme değişimi gösterilmektedir. Grup 1 deliklerinde kanatçık profilinden dolayı kayma gerilme değerleri yüksektir. Bunun nedeni jet akışın yüzeyi takip edebilmesi ve yüksek hız gradyeninin oluşmasıdır. Özellikle delik 1, 2, 3'de köşe yuvarlatma değerinin artmasının pozitif bir etki yarattığı söylenebilir. Bu durum delik 4 ve 5'de tersine dönmekte ve köşe yuvarlatma değeri arttıkça kayma gerilmesinin azaldığı görülmektedir.

Şekil B.8, B.9, B.10, B.11 ve B.12'de Grup 2 deliklerindeki kayma gerilme değişimi gösterilmektedir. Grup 2 deliklerindeki sonuçlar incelendiğinde, delik 6, 7, 8'de kayma gerilme değerlerinin, köşe yuvarlatma değeri arttıkça azalmakta olduğu gözlemlenmektedir. Delik 9 ve 10'da aradaki farklar azalmaktadır. Dikkat çekici bir nokta delik çıkışından hemen sonra en yüksek köşe yuvarlatma değerinde kayma gerilmesi değeri diğerlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu bölgede jet

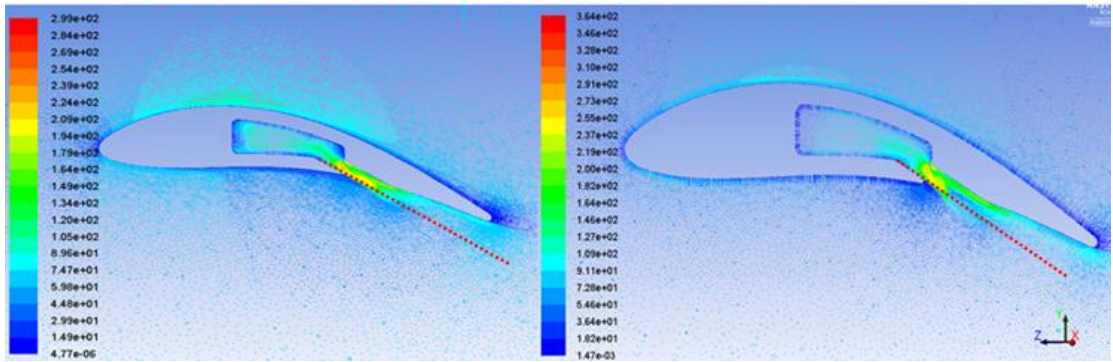
akışın yüzeyden uzaklaştığı ve duvara yakın bölgede düşük hızda hava akışı bulunduğu anlamına gelmektedir. Bu bölge sıvı parçacıklarının daha fazla ulaştığı bölgedir ve bu yüzden buzlanma riski diğer bölgelere göre daha fazladır.

Şekil B.13, B.14, B.15, B.16, B.17’de Grup 3 deliklerindeki kayma gerilme değişimi gösterilmektedir. Grup 3 deliklerindeki sonuçlar incelendiğinde, delik 11, 12, 13’de kayma gerilmelerindeki fark azdır fakat eğilim köşe yuvarlatma değeri arttıkça azalma yönündedir. Delik 14 ve 15’de durum tersine dönerek köşe yuvarlatması yüksek olan deliklerde artmakta olduğu söylenebilir. Bu gruptaki kayma gerilme değerleri diğer gruptakilerden daha az olduğu gözlemlenmektedir. Akış ayrılmalarının ve bozunmaların görülebilmesi için deney verileri dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Genel olarak sonuçlara bakıldığında firar kenarına yakın bölgelerde akışın tekrar yüzeye tutunarak kayma gerilmelerinde artışa neden olduğu söylenebilir. Bu sonuçlar ilerleyen bölümlerde deneysel sonuçlardan elde edilen verilerle daha detaylı incelenecektir.

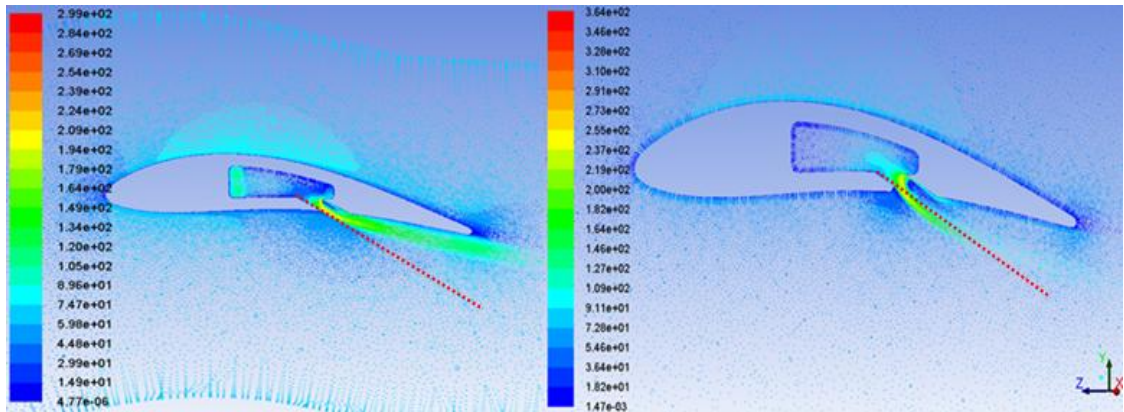
5.2 Hız Vektörleri

Delik çıkışındaki hız vektörleri jet akışın nasıl yönlendiği konusunda fikir vericidir. Köşe yuvarlatma uygulanmayan model (A1A) ile $0.87 \times D$ köşe yuvarlatılmış model (A4A) sonuçları hız vektör değişimini görmek için kullanılmıştır. Bu karşılaştırma ile akışın delik çıkışındaki davranışı göreceli olarak incelenebilmektedir. Herbir gruptan bir delik seçilerek (delik 3, 8 ve 13) hız vektörleri karşılaştırılmıştır ve Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3’de gösterilmektedir. Hız vektörleri incelenirken oluşturulan düzlem, deliklerin orta noktasından geçen ve -y eksenini kesen düzlemdir.



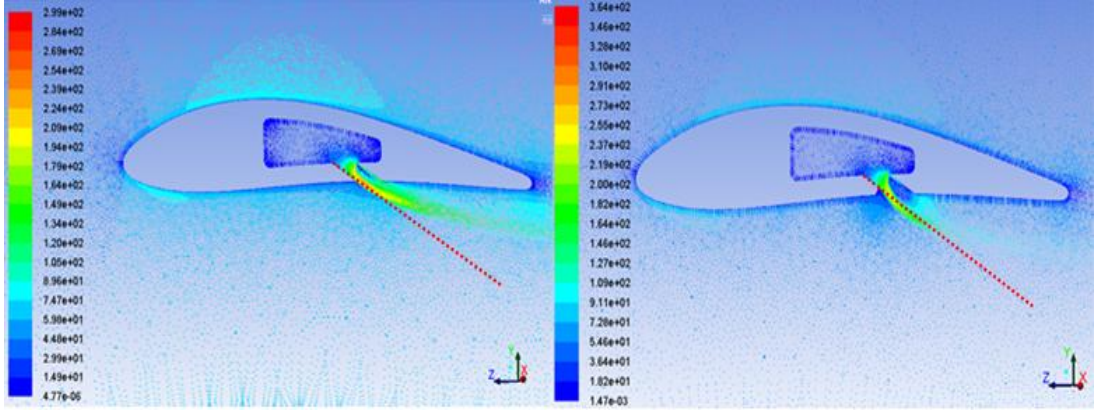
Şekil 5.1. Delik 3 hız vektörleri (sol; A1A, sağ; A4A)

Ana akışa açılan deliğin hücum kenarı tarafına delik kesitini takip eden kırmızı çizgi referans olarak eklenmiştir. Delik 3’de köşe yuvarlatmanın fazla olduğu durumda akışın az da olsa dışarı yönlendiği görülebilmektedir.



Şekil 5.2. Delik 8 hız vektörleri (sol; A1A, sağ; A4A)

Delik 8 hız vektörlerine bakıldığında fark iyice ortaya çıkmaktadır. A4A durumunda akışın referans çizginin ötesine geçtiği görülmektedir. Bu durumda akışın yüzeyde tutunması zorlaşmaktadır.



Şekil 5.3. Delik 13 hız vektörleri (sol; A1A, sağ; A4A)

Delik 13 hız vektörleri incelendiğinde benzer durum gözlemlenmektedir. A1A koşulu için delik 8 ve 13 karşılaştırıldığında; delik 13’de akışın yüzeye daha yakın olduğu görülmektedir.

Genel ifade ile köşe yuvarlatma işlemi uygulandığında akış kanatçık yüzeyinden uzaklaşmaktadır. Bu durum akış ayrılmasına ve film hava etkinliğinin sürdürülememesine neden olmaktadır. Ayrıca deliğin iç kanala açıldığı bölgede akış hızlanarak dışarı doğru yönlendiği sonuçlardan çıkarılabilmektedir. Diğer delikler için elde edilen hız vektörleri Ek Açıklamalar-B bölümünde detaylı bir şekilde verilmektedir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmanın temel amacı farklı akış sınır şartları için akış fiziğinin değerlendirilmesi ve HAD çalışmalarına yol gösterici olmasıdır. Akış görüntüleme deneyi ile akışın yüzeyden ayrıldığı bölgeler incelenebilecek ve böylece köşe yuvarlatma etkisi daha iyi anlaşılacaktır. Literatürde uygulanan akış görüntüleme teknikleri incelenmiş ve araştırma konusuna özgün bir yöntem belirlenmiştir. Literatür araştırması, belirlenen yöntem, deney düzeneği, deneyin uygulanması gibi bilgiler bu bölümde paylaşılacaktır.

6.1 Akış Görüntüleme Yöntemi

6.1.1 Literatürdeki çalışmalarında yer alan yöntemler

Rüzgâr tüneline uygulanan değişik akış görüntüleme yöntemleri mevcuttur. Kline (1969) bu yöntemleri şöyle gruplamıştır; optik olmayan (işaretleyici) yöntem, optik yöntem, yüzey takip, çift kırınım, kendiliğinden görülebilir yöntemler. Çizelge 6.1’de bu gruplama gösterilmektedir.

Çizelge 6.1 Akış görüntüleme teknikleri

AKIŞ GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİ	
METOT	Ölçüm
İŞARETLEYİCİ METOTLAR	
Boya veya duman	Niteliksel
Yüzey tozu	Niteliksel
Nötr yoğunluk parçacıkları	Nicel
Spark deşarjı	Niteliksel
Hidrojen kabarcığı	Nicel
Alüminyum tanecikleri	Niteliksel
Fotokataliz	Niteliksel
Elktro kimsaysal ışıltama	Niteliksel
OPTİK METOTLAR	
Rintgen filmi	Nicel
Schlieren	Nicel
İnterferometre	Nicel

YÜZEY TAKİ METOTLARI	
İpçik	Hız yönü, geçiş, ayrılma, yeniden tutunma
Buharlaştırma ve kimyasal değişim	Hız yönü, geçiş, ayrılma, yeniden tutunma
KENDİLİĞİNDEN GÖRÜLEBİLİR	
Aydınlık	Niteliksel
Faz arabirimi	Arabirim değişimi

6.1.2 Çalışma kapsamında kullanılan yöntem

Deney yöntemi olarak yüzeyden boya kaldırma yöntemi kullanılmıştır. Özellikle bu çalışmaya özel bir teknik geliştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer almadığı için çalışmanın özgün tarafı olarak nitelendirilebilir. Kanatçığın dikey profili boyunca firar kenarı sentetik boya ile boyanmaktadır. Jet akış içerisinde atomize olmuş haldeki tiner ilave edilerek boyanın yüzeyden kaldırılması amaçlanmaktadır. Böylece jet akışın hangi bölgeleri ne ölçüde etkilediği belirlenebilecektir. Bu yöntem 4 farklı köşe yuvarlatma konfigürasyonuna sahip kanat için uygulanmıştır. Deney sonuçlandırıldığında panoramik olarak fotoğraflanarak kayıt altına alınır.

6.2 Deney Düzenegi

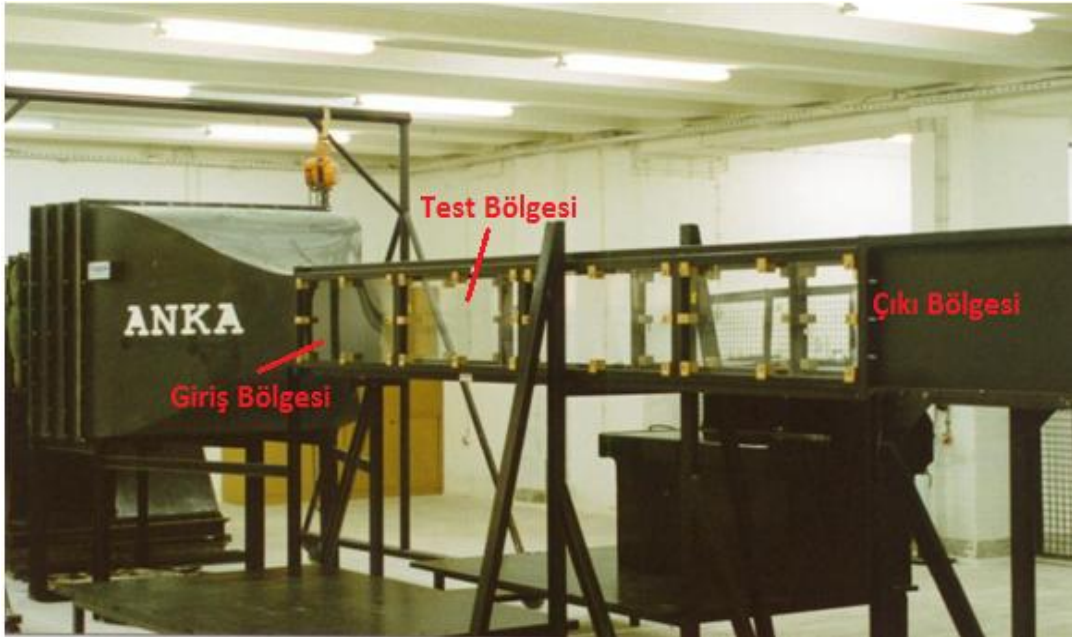
Buzlanmayı önleyici sistem için değişik pah ölçülerine göre jet akış performansının test edildiği çalışmada deney düzenegi genel olarak aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır:

- Ana akışı sağlayan ve test edilecek modellerin monte edildiği rüzgâr tüneli
- Küçük tiner tankı
- Tiner tankının basınçlandırılmasını ve jet akışını sağlayan vidalı hava kompresörü
- Kompresörden gelen havanın basıncının ayarlanmasını sağlayan iki regülatör
- Tinerin atomize olmasını sağlayan tabanca
- Boya kaldırıcı kimyasalın yoğunlaşmasını önlemek için gerektiğinde kullanılmak üzere ısıtıcı sistem

- Performansı test edilecek olan 4 farklı köşe yuvarlatma değerine sahip kanatçıklar ve kanatçıkların rüzgâr tüneline sabitlenmesini sağlayan montaj elemanları
- Tünel hızını set edebilmek ve kanatçıktaki deliklerden çıkan havanın hız profilini çıkarabilmek için kullanılan pitot tüpleri
- Pitot tüpleriyle ölçüm alınabilmesini sağlayan U-manometre
- Kimyasallar

6.2.1 Rüzgâr tüneli

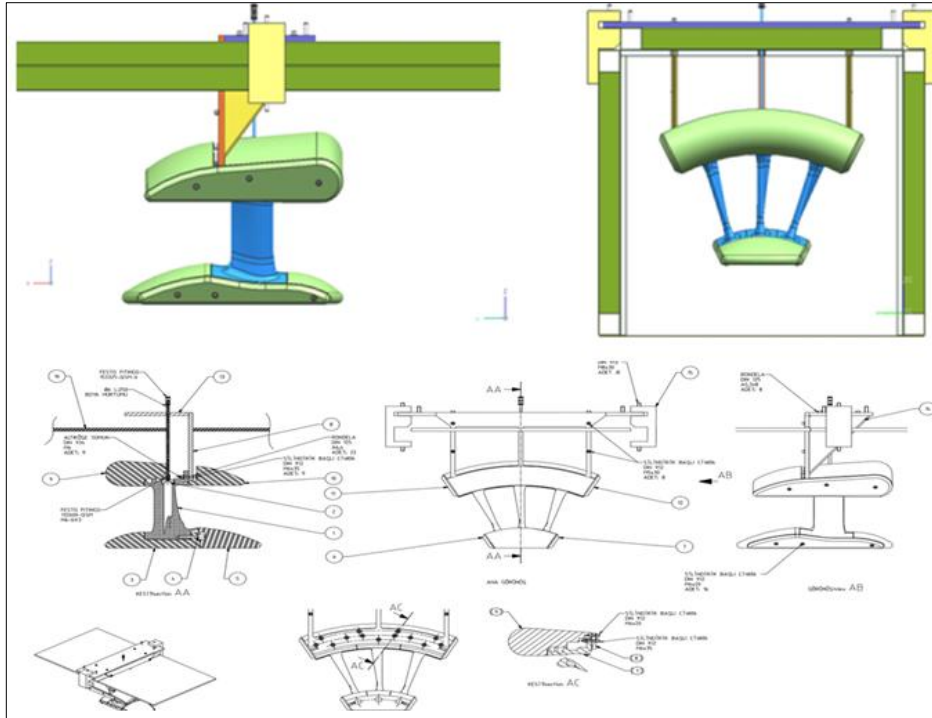
Deneyler, açık rüzgâr tüneli içerisine yerleştirilen kanatçık geometrisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1’de deney faaliyetleri kapsamında kullanılan rüzgâr tüneli gösterilmektedir. Giriş bölgesi 1.5 m, test bölgesi 1.2 m ve atmosfere açılan çıkış bölgesi 4 m uzunluğundadır. Test bölgesinin en kesit ölçüleri $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ ‘dir.



Şekil 6.1. Rüzgâr tüneli

6.2.2 Bağlantı elemanları ve diğer bileşenler

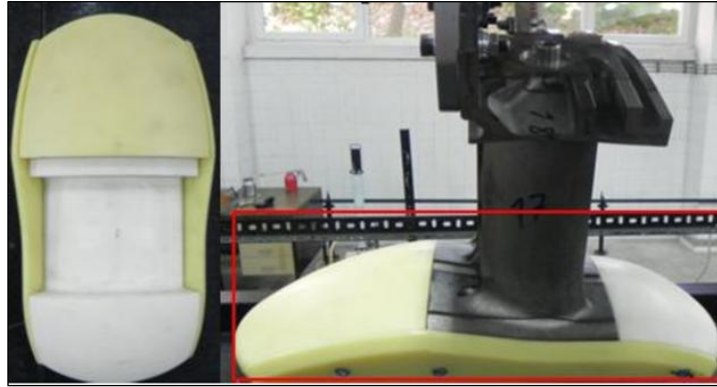
Deney düzeneği bileşenleri, rüzgâr türbini boyutları esas alınarak tasarlanmış ve teknik resme yansıtılmıştır (Şekil 6.2). Düzeneğin sisteme dâhil edilmesi için kullanılan bağlantı elemanları ve diğer bileşenler teknik resimde detaylı bir şekilde belirtilmiş ve üretilmiştir.



Şekil 6.2. Deney düzeneğinin tasarlanması ve teknik resimi

Üç kanatçık yerleşimi sağlanacak şekilde düzenek oluşturulmuştur. Ölçümler ortadaki kanatçıktan alınacak olup yanındaki kanatlar akış yolunun temsil edilebilmesi için dâhil edilmiştir. Kanatçıkların üst ve altındaki parçalar hafif olması açısından poliüretan malzemeden yapılmıştır. Bu parçalar akışın daha yumuşak bir geçişle kanatçık yüzeyine gelmesini sağlamak amacı ile konumlandırılmıştır (Şekil 6.3, Şekil 6.4). Alt ve üst parça tipik bir uçak motor geometrisi göz önünde bulundurularak

tasarlanmıştır. Ayrıca titreşimlerin engellenmesi için düzenek alt bölgesinden sabitleyici bir parça ile dengelenmiştir.



Şekil 6.3. Alt parçanın görünümü



Şekil 6.4. Üst parçanın görünümü

Kanatçıkların deney düzeneğine yerleşimi Şekil 6.5’de gösterilmektedir. Ayrıca ortadaki kanatçığın kanalı ile jet hava besleme hattının bağlantısı da görülebilmektedir. Üst parçanın yerleşimi ile bu parça hareketi engellenmektedir. Kanatçıklar, civatalar vasıtası ile rüzgâr tüneline yerleştirilen ana çerçeveye bağlanmıştır.



Şekil 6.5. Kanatların deney düzeneğine yerleştirilmesi

6.2.3 Jet akış hava basınçlandırma hattı

Jet akış için vidalı hava kompresörü kullanılmıştır. Hava tanklarına sıkıştırılan hava zamanla jet akış hattına verilmektedir. Devamlı olarak 30 dakika boyunca hava sağlayabilen 8 bar büyüklüğüne kadar basınçlı hava sağlayabilen bir kompresördür. Şekil 6.6'da vidalı hava kompresörü ve havanın depolandığı basınç tankını gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Jet akış basınçlandırma hattı

Basınç ölçümünün kontrollü olabilmesi için basınç regülatörü kullanılmaktadır ve Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Basınç regülatörü

6.2.4 Ana akış hattı

Ana akış radyal fan ile sağlanmaktadır. Sisteme maksimum 43 m/s hızında hava sağlayabilmektedir. Radyal fan Şekil 6.8’de gösterilmektedir.



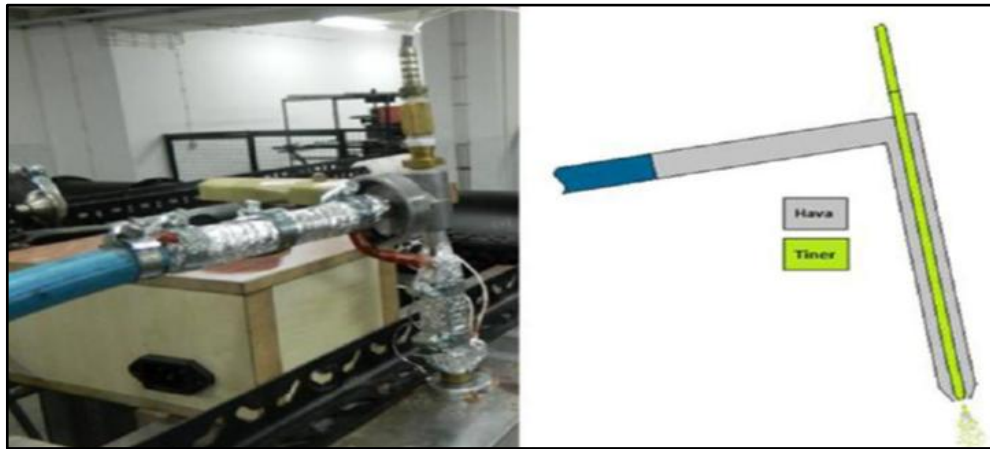
Şekil 6.8. Radyal Fan

6.2.5 Tiner besleme hattı

Sentetik boyanın yüzeyden kaldırılabilmesi için tiner kullanılmaktadır. Böylece jet akışın içerisindeki atomize halindeki tiner partikülleri yüzey ile etkileşim halinde olduğunda boyanın yüzeden ayrıldığı bölgeler saptanabilecektir. Tiner sisteme entegre edilmesi için kullanılan alüminyum tiner deposu ve atomizasyonunu sağlayan tabanca Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'de gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Tiner deposu



Şekil 6.10. Tiner atomizasyon hattı

6.2.6 Ölçüm araçları

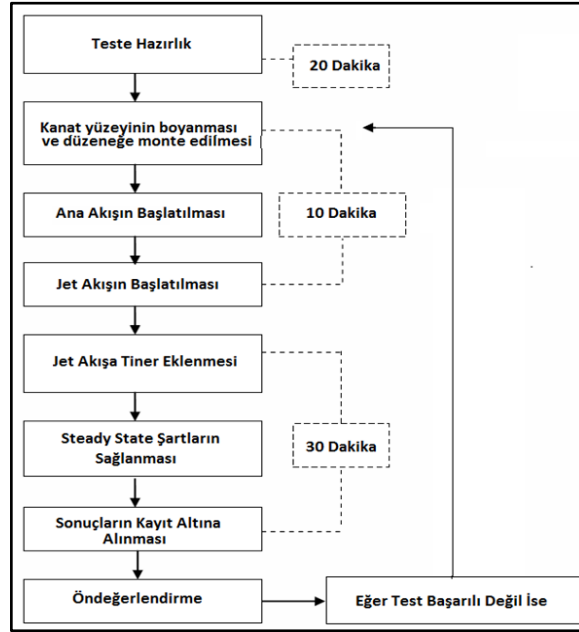
Ana akış ve jet akışı için gerekli bilgiler pitot tüpü yardımı ile elde edilmiştir. Şekil 6.11’de gösterilen pitot tüpü U manometresine bağlıdır. Böylece akışın toplam basıncı ile statik basıncı farkından yararlanılarak hız bilgisi elde edilebilmektedir.



Şekil 6.11. Pitot tüpünün görünümü

6.3 Deney Sırasında İzlenecek Adımlar

Deney sırasında izlenecek adımlar belirlenerek şematik olarak Şekil 6.12’de verilmektedir. Sistemin ilk çalıştırması yapılarak belirlenen adımların tutarlılığı, bütün deney setleri için aynı işlemlerin uygulanabilirliği açısından gözlemlenmiştir. Özellikle testlerin tekrarlanabilirliği açısından önem taşımaktadır.



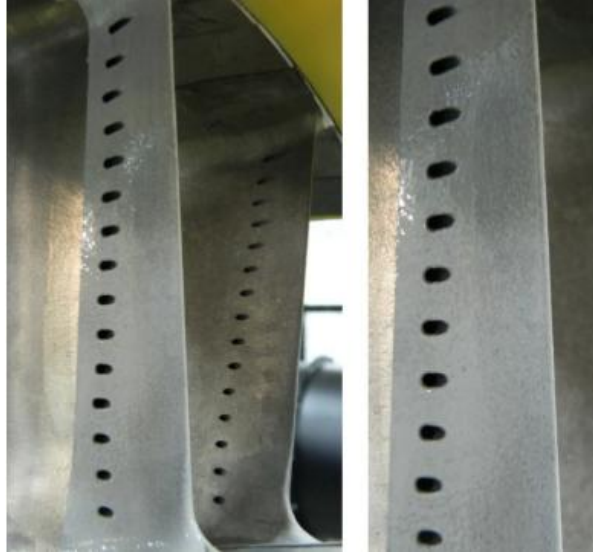
Şekil 6.12. Deney sırasında izlenecek adımlar

Test hazırlık sürecinde bağlantıların kontrol edilmesi, rüzgâr türbininin ve kanatçıkların temizlenmesi, yan kanatçıkların yerleştirilmesi, boyanın hazırlanması, tinerin deposunun doldurulması gibi hazırlık aşamaları bulunmaktadır. Tahmini 20 dk içerisinde hazırlık süresi tamamlanabilmektedir. Verilerin alınacağı kanatçık boyanarak hızlı bir şekilde yerine monte edilir ve ana akış başlatılır. Pitot tüpü ile ana akış hızı istenen değere sabitlenerek jet akışı başlatılır ve basınç regülatörü istenilen basınç değerine ayarlanır. Tahmini 10 dk sonunda jet akışa tiner eklenmeye başlanır bu sırada düzgün dağılımlı akış sağlanmıştır ve 30 dk boyunca deney devam eder. Deney sonunda sonuçlar panoromik fotoğraflama ile kayıt altına alınır ve ön inceleme gerçekleştirilir. İnceleme sonucunda belirsizlik ve kontrol dışı gelişen bir durum yok ise deney başarılı sayılır. Eğer bir sorun ile karşılaşırsa deney, boyanın temizlenme aşamasından tekrar başlatılır.

Deneyin başarılı olarak kabul edilebilmesi için Şekil 6.12’deki adımlar takip edilmesi, deney sonucunu etkileyebilecek bir durumla karşılaşılmamış olması, parça yüzeyindeki boya durumunun incelenerek doğruluğundan şüphe duyulan bir durumun oluşmaması gerekmektedir.

7. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

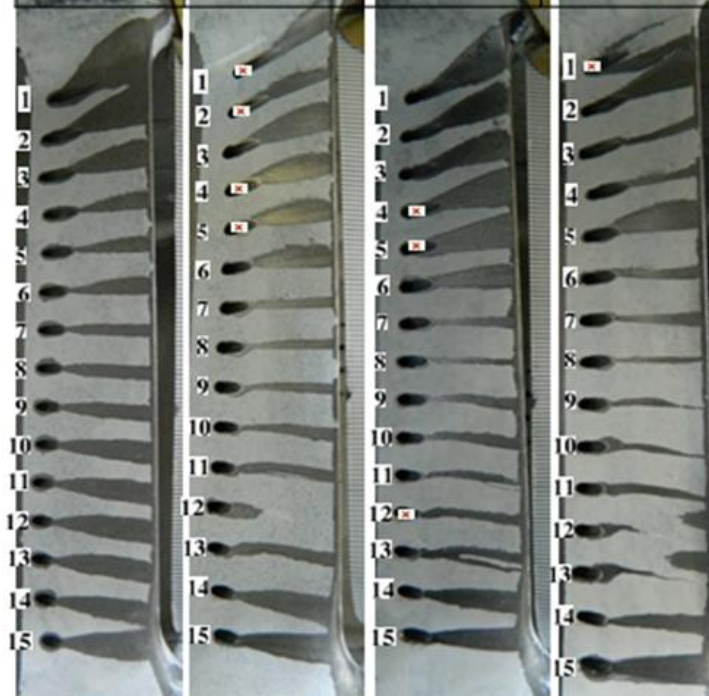
Bu bölümde deneysel çalışma sonucunda 4 farklı köşe yuvarlatma değerine sahip kanatçıkların yüzeyinde elde edilen sonuçlardan bahsedilecektir. Toplam 16 deney adet deney yapılmıştır. Beyaza boyanan firar kenarına (Şekil 7.1) tiner-hava karışımı temas ettiğinde boya yüzeyden ayrılmakta ve yüzeyde jet akışın etkisinin görülebildiği bölge oluşmaktadır. Deneylerin tekrarlanabilirliğinin gösterilebilmesi için herbiri 3 kez tekrarlanmıştır. Böylece rastgele ve şans eseri oluşabilecek durumların önüne geçilmiştir. Deney sonuçları fotoğraflanarak jet akış etki alanı için gerekli kalınlık ölçümleri kaydedilmiştir.



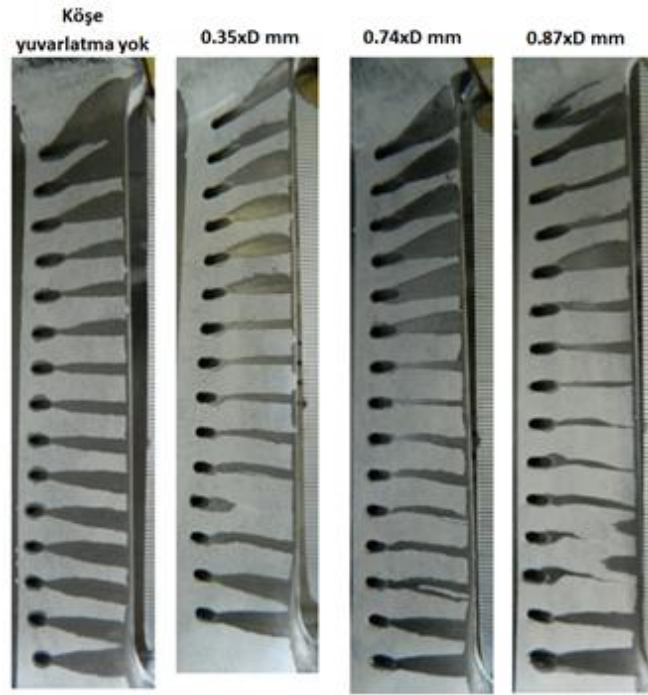
Şekil 7.1. Deney öncesi firar kenarının boyanmış hali

Bazı deliklere uygulanan köşe yuvarlatma işlemleri istenilen ölçüde değildir ve bu delikler belirlenerek inceleme sırasında dikkat edilmesi gerekmektedir. Uygunsuz olan delikler Şekil 7.2’de gösterilmektedir. 0.35xD mm köşe yuvarlatma uygulanan parçada; delik 1, 2, 4, 5, 0.74xD mm köşe yuvarlatma uygulanan parçada; delik 4, 5, 12 ve

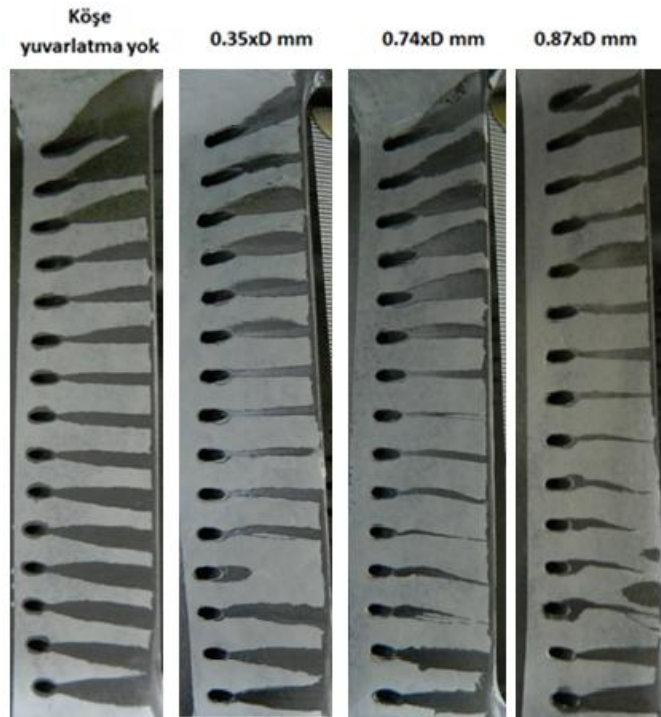
0.87xD mm köşe yuvarlatma uygulanan parçada; delik 1'de uygunsuzluk bulunmaktadır. Ayrıca 0.35xD mm köşe yuvarlatma uygulanan parçada; delik 12 de akış etkileyecek bir durum meydana gelmiştir ve değerlendirmelerde göz önünde bulundurulmayacaktır.



Şekil 7.2. Uygunsuzluğa sahip delikler

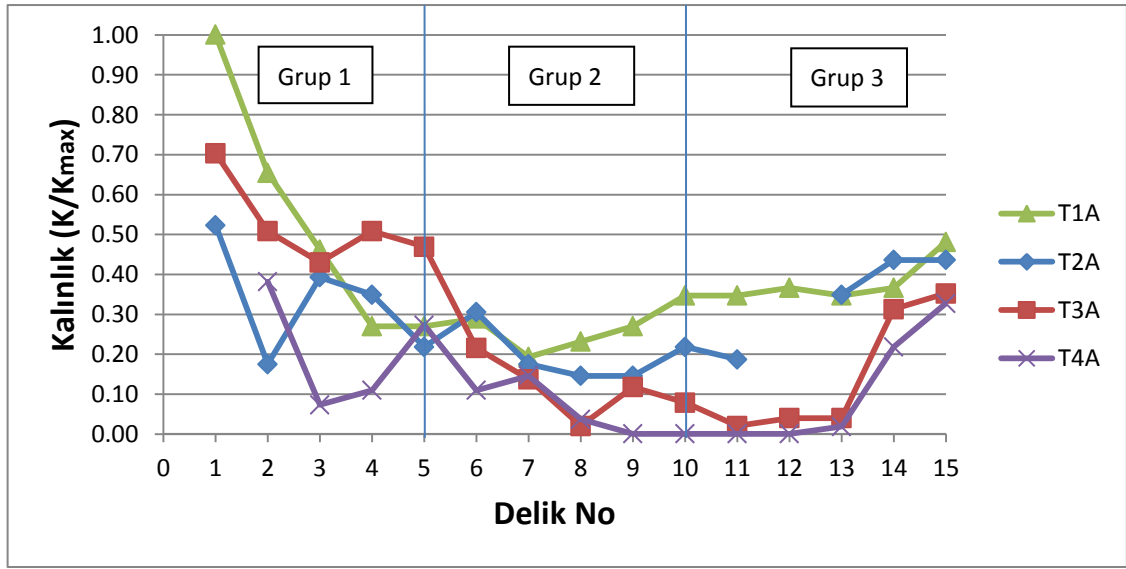


Şekil 7.3 Deney sonuçları (T1A-x, T2A-x, T3A-x ve T4A-x)



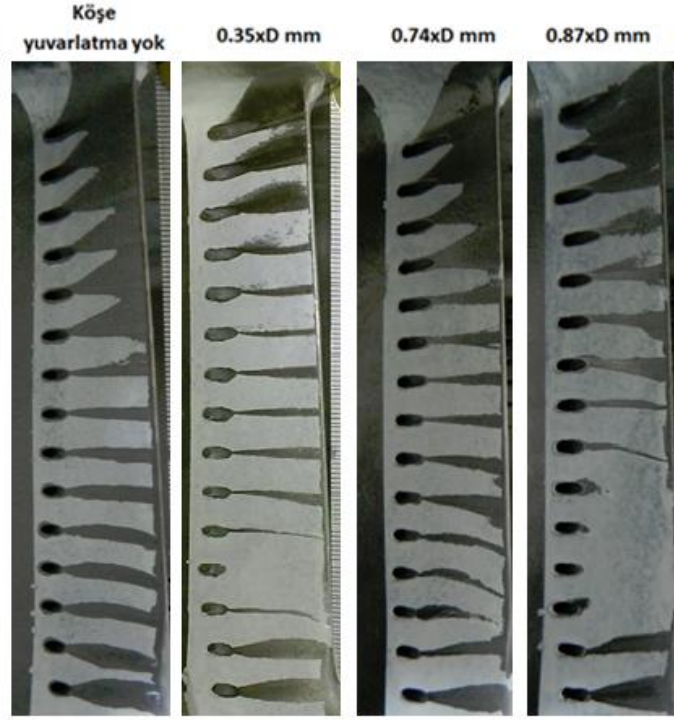
Şekil 7.4 Deney sonuçları (T1A, T2A, T3A ve T4A)

Şekil 7.4’de T1A, T2A, T3A ve T4A deneylerinin sonuçları gösterilmektedir. Daha önceden belirtildiği gibi iki farklı jet giriş şartında deneyler bütün köşe yuvarlatma değerleri için gerçekleştirilmiştir. Belirlenen jet akış giriş basınç aralığında sonuçlarda farklılıklar gözlemlenmemiştir. Bundan dolayı deneylere düşük jet giriş basınç değeri kullanılarak devam edilmiştir.



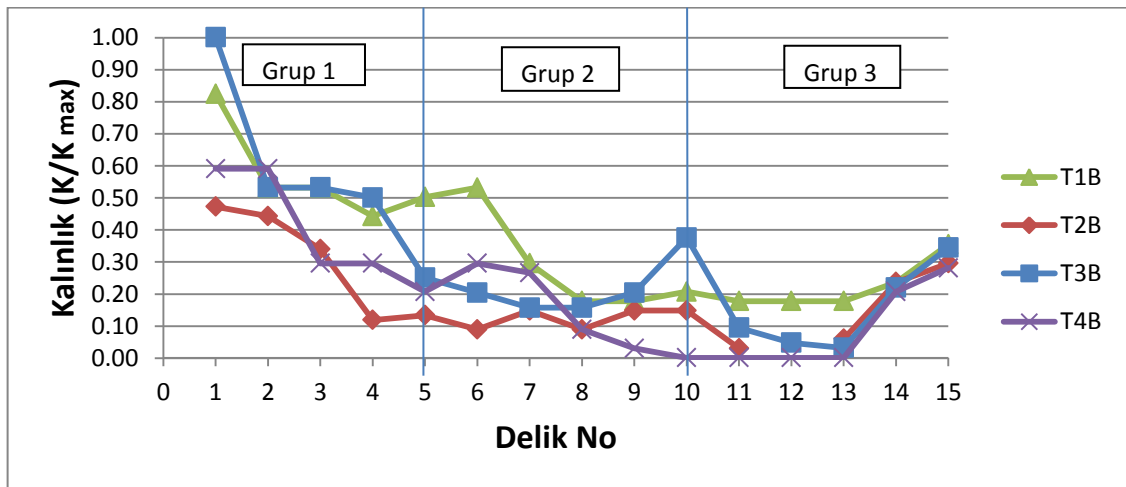
Şekil 7.5 Kalınlık ölçümleri (T1A, T2A, T3A ve T4A)

Şekil 7.5’deki grafik, yüzeyde elde edilen kalınlıkların T1A, T2A, T3A ve T4A koşullarında deliklere göre değişimini göstermektedir. Genel itibari ile köşe yuvarlatma değeri arttıkça akış etkinliğinin düştüğü kalınlık ölçüm değerlerinden çıkarılabilmektedir. Akış debi dağılımı, delik karakteristiği, parça profili gibi durumlar göz önünde bulundurulduğunda bazı bölgelerde bu durumun aksi sonuçlarla karşılaşılabilmektedir.



Şekil 7.6. Deneysel sonuçları (T1B, T2B, T3B ve T4B)

Şekil 7.6’de T1B, T2B, T3B ve T4B deneylerinin sonuçları gösterilmektedir. Ana akış hız giriş koşulunun değiştirilmesi ile ana akış ve jet akışı arasındaki momentum oranı da değişmektedir. Böylece bu değişimin etkisi incelenebilecektir.



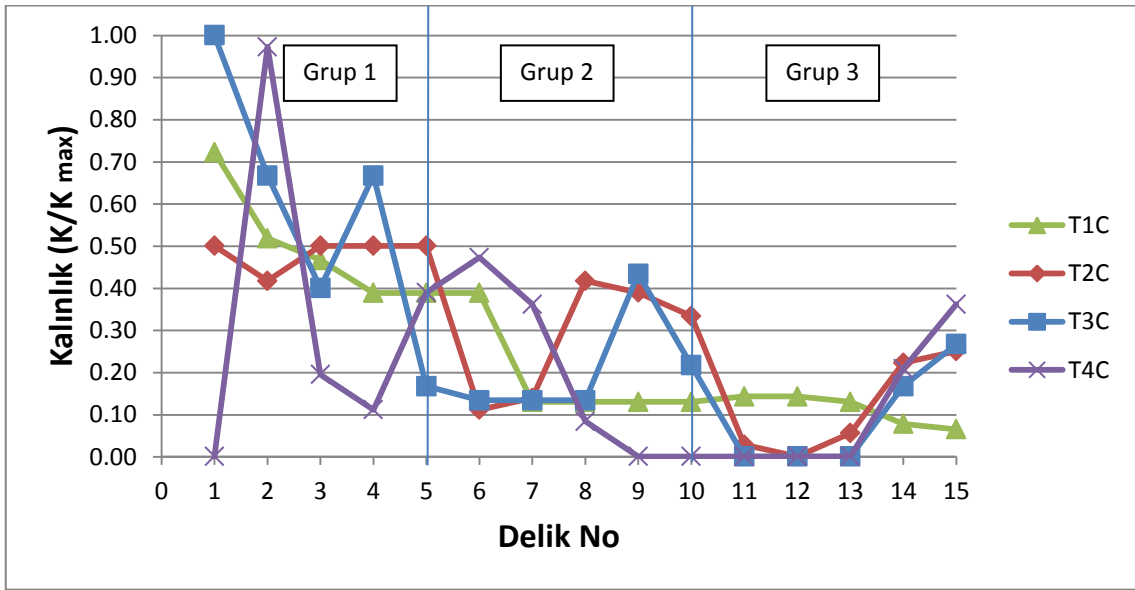
Şekil 7.7. Kalınlık ölçümleri (T1B, T2B, T3B ve T4B)

Şekil 7.7'deki grafik, kalınlıkların deliklere göre değişimi T1B, T2B, T3B ve T4B durumları için göstermektedir.



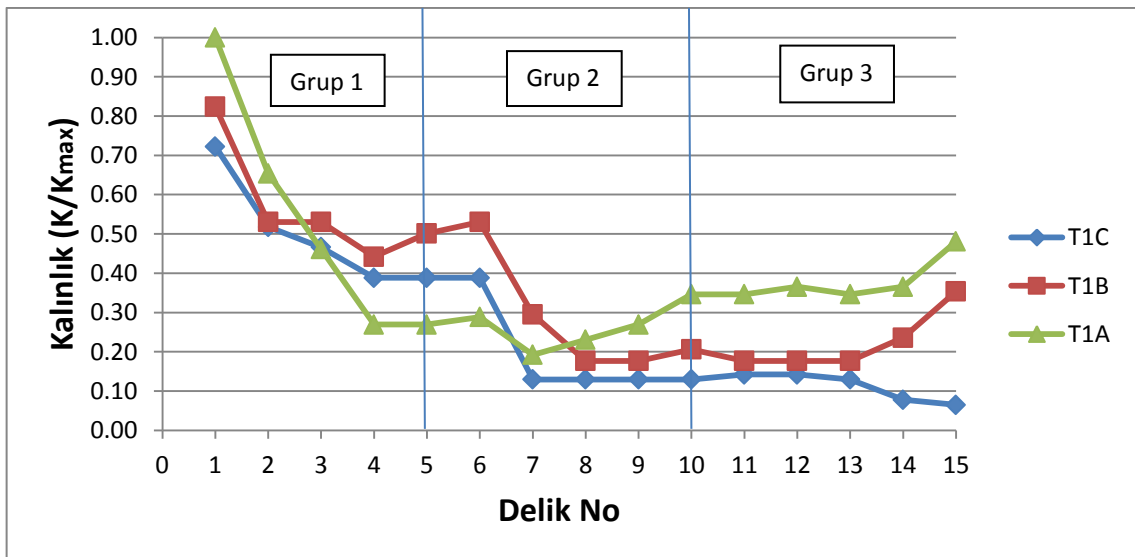
Şekil 7.8. Deneysel sonuçları (T1C, T2C, T3C ve T4C)

Şekil 7.8'de T1C, T2C, T3C ve T4C deneylerinin sonuçları gösterilmektedir. Ana akış azaldıkça akışta düzensizlik arttığı söylenebilir. İleri bölümlerde daha detaylı bir şekilde incelenecektir.



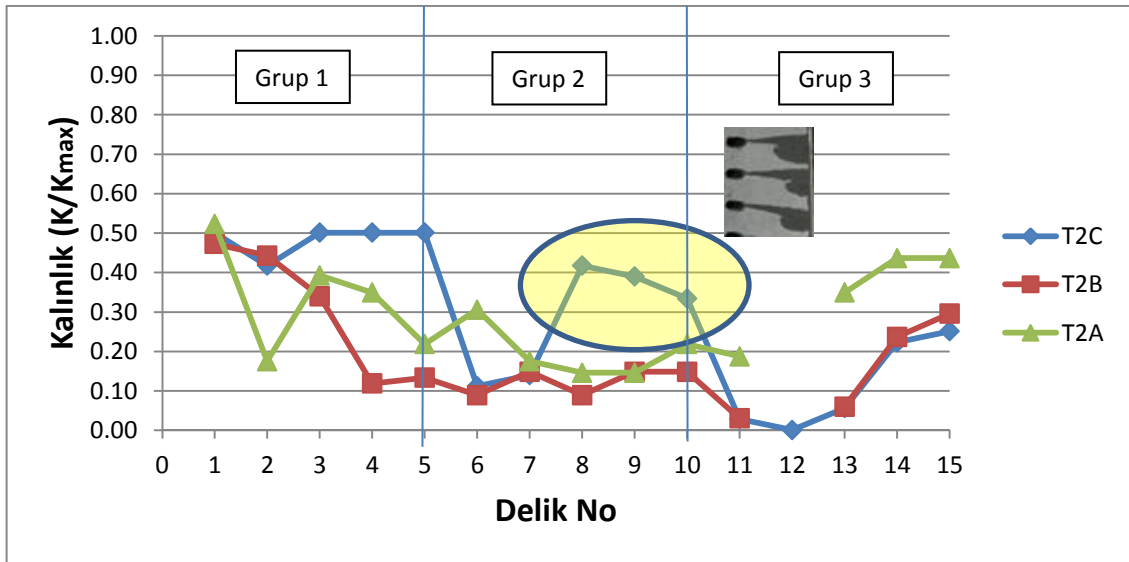
Şekil 7.9 Kalınlık ölçümleri (T1C, T2C, T3C ve T4C)

Şekil 7.9'deki grafik, kalınlıkların deliklere göre değişimi T1C, T2C, A3C ve T4C durumları için göstermektedir.



Şekil 7.10. Kalınlık ölçümleri (T1A, T1B ve T1C)

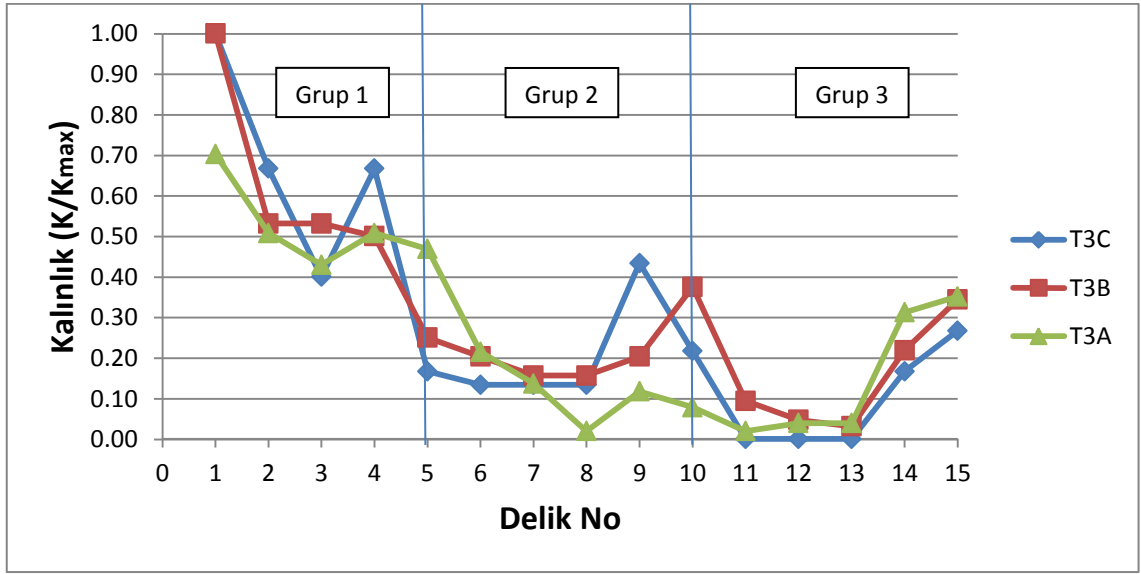
Köşe yuvalatma uygulanmayan parça için T1A, T1B ve T1C sonuçları Şekil 7.10'de gösterilmektedir. Bu parçadaki durum buzlanma sistemi için ideal durum olarak kabul edilmektedir. Grup 1 deliklerine bakıldığında akışın yüzeyi yüzey üzerinde tutunabildiği ve yüzeyden kaldırdığı boya kalınlığının fazla olduğu görülebilmektedir. Bu durum ana akış hızı azaldıkça artış göstermektedir. Grup 2 deliklerinde belirli bir bölgeden sonra ana akış hızına bağlı değişim tersine dönmektedir. Grup 3 deliklerinde kalınlığın fazla olduğu durum ana akışın en hızlı olduğu durumda gözlemlenmektedir. Köşe yuvarlatma uygulanmayan parçadan alınan ölçüm sonuçları diğer parçalardan alınan sonuçlar için referans olarak kullanılacaktır.



Şekil 7.11 Kalınlık ölçümleri (T2A, T2B ve T2C)

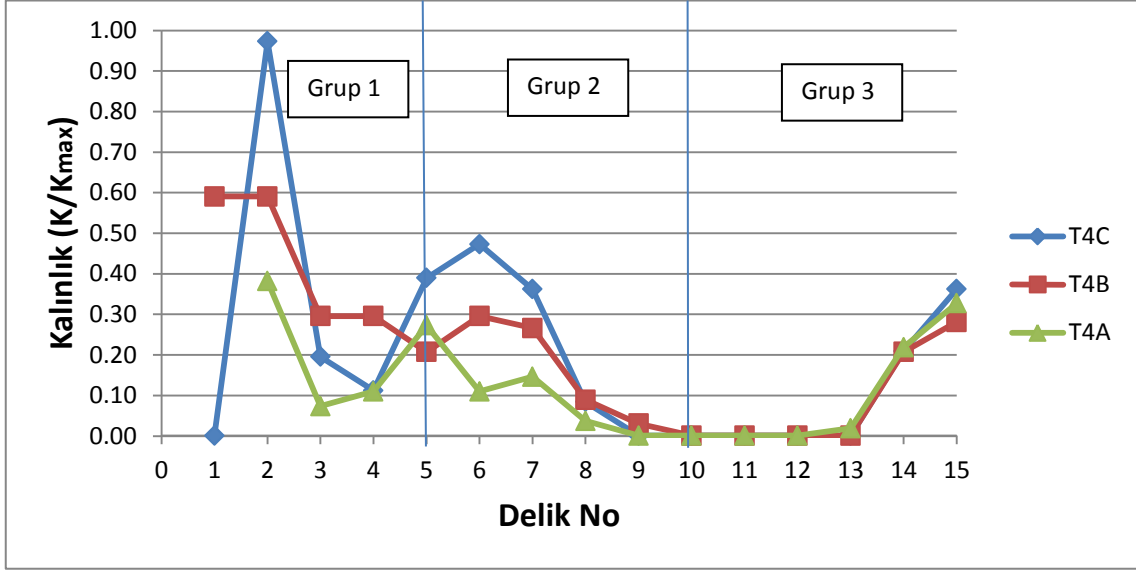
0.35xD köşe yuvarlatma uygulanmış parça için T2A, T2B ve T2C sonuçları Şekil 7.11'de gösterilmektedir. Bu parçadan alınan sonuçlar incelenirken dikkat edilmelidir çünkü deliklerdeki uygunsuzluklar sonuçları etkileyebilmektedir. Özellikle T2C şartında gerçekleştirilen deney için elde edilen sonuçlarda jet akışında bozunmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yüzey üzerinde girdap oluşumları gözlemlenmektedir. Genel anlamda akışın yüzeyde tutunması Grup 1 için yeterlidir.

Grup 2 için yeterli olduğu söylenemez ve ana akış hızı azaldıkça bu durum açık bir hale gelmektedir. Grup 3 deliklerinden son iki delikte jet akış yeterli bulunmaktadır. Fakat delik 11’de akışın yüzeyden ayrılması söz konusudur. Ana akışın hızının en yüksek olduğu durum kalınlıklarda daha homojen bir yayılım göstermektedir.



Şekil 7.12 Kalınlık ölçümleri (T3A, T3B ve T3C)

0.74xD mm köşe yuvarlatma uygulanmış parça için T3A, T3B ve T3C sonuçları Şekil 7.12’de gösterilmektedir. Grup 1 için elde edilen veriler bütün ana akış hızları için yeterlidir. Bu grupta ana akış hızı azaldıkça jet akışını yüzeyde daha iyi yayılabildiği gözlemlenmektedir. Grup 2 deliklerinde belirli bir noktaya kadar ana akış hızı pozitif etki yaratırken bu durum tersine dönmektedir. Grup 3 deliklerinde yeniden ana akış hızının pozitif etki yarattığı gözlemlenmektedir. Özellikle delik 11, 12 ve 13’de akışın yüzeyden ayrıldığı görülebilmektedir.

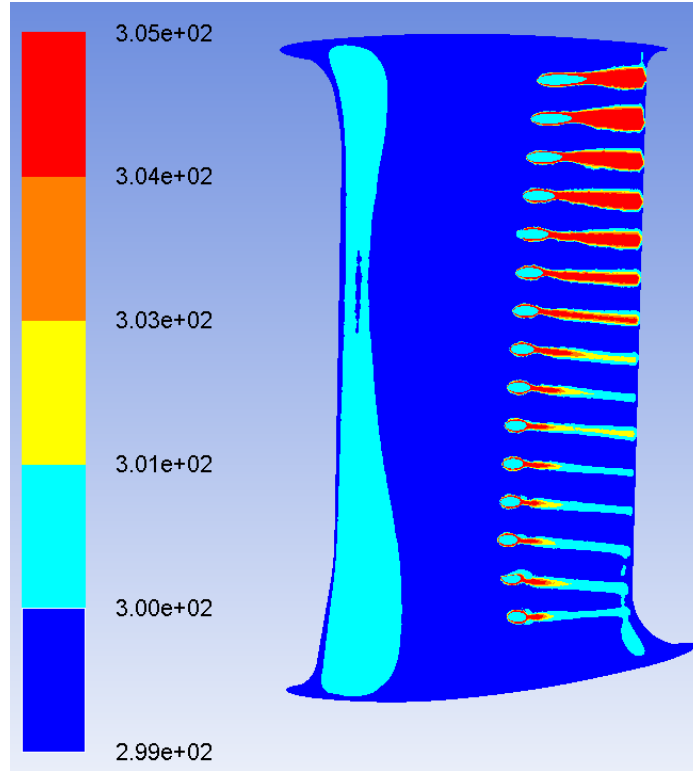


Şekil 7.13 Kalınlık ölçümleri (T4A, T4B ve T4C)

0.87xD mm köşe yuvarlatma uygulanmış parça için T4A, T4B ve T4C sonuçları Şekil 7.13'de gösterilmektedir. Akıştaki düzensizlikler açık bir şekilde bu parçanın sonuçlarında görülebilmektedir. Grup 1 deliklerin akış yetersiz hale gelmektedir. Grup 2 deiklerinde girdap oluşumu meydana gelmiştir. Grup 3 deliklerinde akış yüzeyden tamamen ayrılarak etkinliğini kaybetmiştir. Ana akış hızının yüksek olduğu durumda bile jet akışı yetersiz kalmaktadır.

8. DOĞRULAMA ÇALIŞMASI VE JET ETKİNLİĞİ

Doğrulama çalışması kapsamında A1A analiz sonucu ile T1A deney sonucu karşılaştırıldı. Nümerik analizlerde jet akışının yüzeydeki etkisinin rahat bir şekilde görüntülenebilmesi için akış özelliği bozulmayacak şekilde sıcaklığı arttırılmıştır (20 °C) ve Şekil 8.1’de kanatçık yüzeyi üzerinde oluşturduğu etki alanı gösterilmektedir.



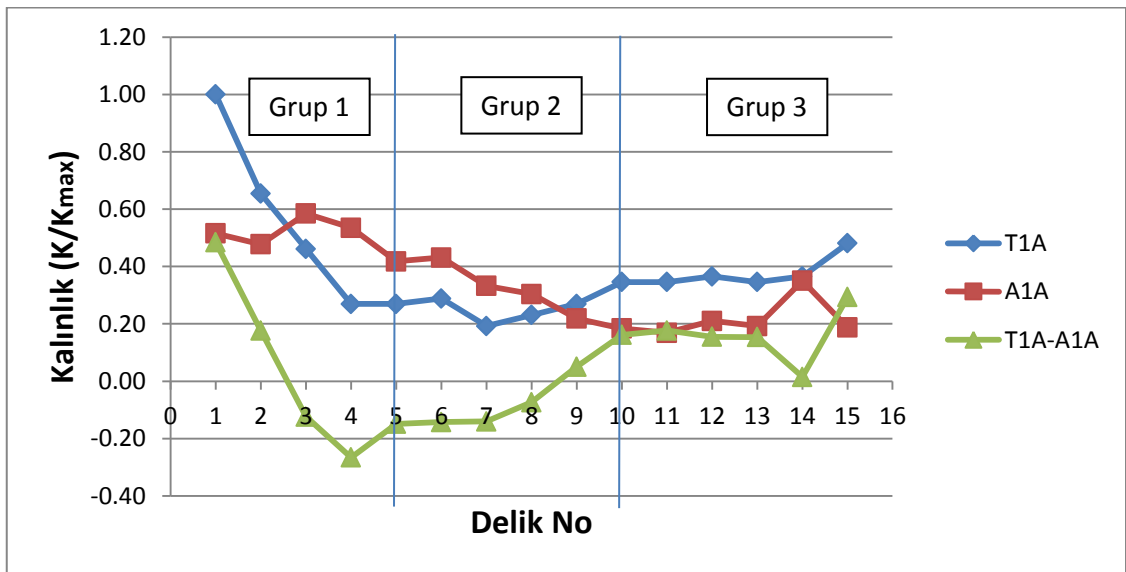
Şekil 8.1. Kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı (A1A)

Kanatçık profilinden dolayı 1. Grupdaki deliklerde akışın etkilediği bölge daha fazla olduğu analiz sonucundan çıkarılabilmektedir. Karşılaştırma kanatçık üzerinde jet akışın oluşturduğu hava filminin kalınlığı esas alınarak yapılmıştır. Analiz verilerinden kalınlık verisi alınırken sıcaklık farkının olduğu noktalar arası hassas olarak ölçülmüştür. Test ve analiz için firar kenarına yakın bölgede elde edilen veriler ve

farkları bütün delikler için Çizelge 8.1’de verilmiştir. Kalınlıklar deneyler sırasında elde edilen en yüksek kalınlık ile oranlanarak (K/K_{max}) verilmiştir.

Çizelge 8.1. Köşe yuvarlatma yapılmayan modelde film kalınlığı karşılaştırılması

FİLM HAVA KALINLIĞI (K/K_{max})			
Köşe Yuvarlatma Uygulanmamış Parça			
DELİK NO	T1A	A1A	T1A-A1A
1	1,00	0,52	0,48
2	0,65	0,48	0,18
3	0,46	0,58	-0,12
4	0,27	0,53	-0,27
5	0,27	0,42	-0,15
6	0,29	0,43	-0,14
7	0,19	0,33	-0,14
8	0,23	0,30	-0,07
9	0,27	0,22	0,05
10	0,35	0,18	0,16
11	0,35	0,17	0,18
12	0,37	0,21	0,15
13	0,35	0,19	0,15
14	0,37	0,35	0,01
15	0,48	0,19	0,29



Şekil 8.2 T1A ve A1A kalınlık sonuçlarının karşılaştırılması

Test ve analiz karşılaştırılması (Şekil 8.2) sonucunda elde edilen bulgular şöyle özetlenebilir;

- Delik 2-14 arasında film kalınlık değerlerinin test verileri ile +/- 0.20 bandı arasında farklılık göstermektedir. En yüksek değer birinci ve onbeşinci deliklerde gözlemlenmiştir. Bu kısımlar uç noktalarda olduğu için deneyde oluşan etkiler nümerik analizlerde yakalanamaması mümkündür.
- Analizlerde jet akışa tiner ilave edilmemiştir çünkü gerekli denklemlerin gerçeği yansıtmayıp yansıtmayacağı ve ilave analiz süresi düşünüldüğünde makul bulunmamaktadır.
- Test sırasında oluşan girdap akış bölgelerinin ve akışın türbülans özelliğinin nümerik analiz ile birebir yakalanması mümkün olmasa da analiz sonuçları gerçek durumu yeterince yansıtmaktadır.

Jet etkinliğinin incelenebilmesi köşe yuvarlatma uygulanman parçanın ölçüm sonuçları en ideal durum olarak kabul edilmiş ve diğer köşe yuvarlatma değerlerinin değişimi incelenmiştir. Uçak motor şartlarına yakın olan 4xV m/s hızında yapılan deneyler göz önünde bulundurulmuştur. Jet etkinliği şöyle tanımlanmaktadır;

$$\mu_i = \left(\frac{K}{K_{T1A}} \right)_i \quad (13)$$

Delik jet etkinliği μ , köşe yuvarlatma uygulanmayan parçanın yüzeyden kaldırdığı bölgenin kalınlığı K_{T1A} , farklı köşe yuvarlatma değerindeki kalınlık değeri K ve 1 ile 15 arasında değişen delik numarası i indisi şeklinde tanımlanmıştır. Bu denklem bütün deliklere karşılık gelen kalınlık değerleri için gerçekleştirilmiş ve Çizelge 8.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.2. Farklı köşe yuvarlatma değerleri için jet etkinliği

	μ (jet etkinliği)			
	T1A	T2A	T3A	T4A
1	1,00	0,52	0,70	-
2	1,00	0,27	0,78	0,58
3	1,00	0,85	0,93	0,16
4	1,00	1,29	1,89	0,40
5	1,00	0,81	1,74	1,01
6	1,00	1,06	0,74	0,38
7	1,00	0,91	0,71	0,75
8	1,00	0,63	0,08	0,16
9	1,00	0,54	0,44	0,00
10	1,00	0,63	0,23	0,00
11	1,00	0,54	0,06	0,00
12	1,00	-	0,11	0,00
13	1,00	1,01	0,11	0,05
14	1,00	1,19	0,85	0,60
15	1,00	0,91	0,73	0,68

Çizelge 8.2’de gösterilen değerlerin 1’den büyük olması ideal durumdan daha fazla etkinliğe sahip olduğunu 1’den küçük olması daha az etkinliğin olduğunu ifade etmektedir. Köşe yuvarlatma işleminin jet hava akış etkinliğine olan etkisi görülebilmektedir.

9. KRİTİK KÖŞE YUVALATMA DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu bölümde deney ve sayısal analizlerle elde edilen sonuçlar değerlendirilerek bütün gruplar için kritik köşe yuvarlatma üst limitleri belirlenecektir. Köşe yuvarlatma değeri için belirlenen kriterler şöyledir;

- 1) Jet akışın boya kaldırdığı alanın kalınlığı (K) en az delik çapı (D) kadar olmalıdır ($K \geq D$).
- 2) Akışta bozunma veya yüzeyden ayrılma durumu gerçekleşmemiş olması

Bu kriterler çerçevesinde bütün gruplar için değerlendirme yapılmıştır. Bir uçak motoru yüksek ana akış hızlarında uçmaktadır ve bundan dolayı değerlendirmeler genellikle en yüksek ana akış hızında gerçekleştirilen (4xV) durum göz önünde bulundurularak yapılacaktır.

9.1 Grup 1 Delikleri

Grup 1 delikleri incelendiğinde kanatçık profilinin etkisi ile akışın yüzeye iyi bir şekilde tutunabildiği sonucu çıkarılmaktadır. Ana akış hızının 4xV olduğu durumda elde edilen değerler Çizelge 9.1’de değerlendirilmiştir.

Çizelge 9.1. Deneysel sonuçlara göre kriterlerin uygunluğu (Grup 1)

Delik No	T1A	T2A	T3A	T4A
1	+	+	+	
2	+	+	+	+
3	+	+	+	-
4	+	+	+	-
5	+	+	+	+

(+): kriterlere uygun durum

(-) : kriterlere uygun olmayan durum

Bütün köşe yuvarlatma değerleri incelendiğinde köşe yuvarlatma uygulanmayan, 0.35xD (T2A), 0.74xD (T3A) değerleri için elde edilen sonuçlar kriterleri sağlamaktadır ve uygulanabilir. Fakat 0.87xD (T4A) için elde edilen değerlere bakıldığında Delik 3 ve Delik 4 sonuçları kriterlere uymamaktadır. Analizler incelendiğinde; 0.87xD köşe yuvarlatma şartında delik 4 ve 5'te kanlınlık değerlerinde farkedilir derecede düşüş gözlemlenmektedir. Analizler kısmen de olsa deneysel verileri desteklemektedir. Grup 1 için **0.74xD** değeri kritik üst limit olarak belirlenmiştir. Köşe yuvarlatmanın 0.74xD olduğu durumdaki test analiz karşılaştırması Çizelge 9.2'de Grup 1 için gösterilmektedir.

Çizelge 9.2. Analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (0.74xD)

FİLM HAVA KALINLIĞI (K/K_{max})			
0.74xD Köşe yuvarlatma değeri			
DELİK NO	T3A	A3A	T3A-A3A
1	0,70	0,38	0,32
2	0,51	0,35	0,16
3	0,43	0,40	0,03
4	0,51	0,38	0,13
5	0,47	0,20	0,27

Analiz deney karşılaştırmasından jet akışın yüzeyden kaldırdığı boyanın kalınlığının deneyde elde edilen verilerden daha düşük tahminlendiği gözlemlenmektedir.

9.2 Grup 2 Delikleri

Grup 2 delikleri için kriterlerin uygunluğu değerlendirilmiş olup Çizelge 9.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 9.3. Deneysel sonuçlar ile kriterlerin uygunluğu (Grup 2)

Delik No	T1A	T2A	T3A	T4A
6	+	+	+	-
7	+	+	-	-
8	+	+	-	-
9	+	+	-	-
10	+	+	-	-

(+): kriterlere uygun durum

(-) : kriterlere uygun olmayan durum

Çizelge 9.3'te görüldüğü gibi 0.35xD (T2A) köşe yuvarlatma durumundan sonraki değerlerde istenilen kriterler sağlanamamaktadır. Analizler incelendiğinde; delik 6, 7, ve 8 için deneysel verilere benzer durum olduğu söylenebilir. Özellikle delik 9'da A4A koşulunda yüzeyden ayrılma olacağını destekleyen bulgular mevcuttur. Delik 10 için kayma gerilmesi değerleri arasında büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Grup 2 delikleri için **0.35xD** değeri üst limit olarak belirlenmiştir. Köşe yuvarlatmanın 0.35xD olduğu durumdaki test analiz karşılaştırması Çizelge 9.4'de Grup 2 için gösterilmektedir.

Çizelge 9.4. Analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (0.74xD)

FİLM HAVA KALINLIĞI (K/K_{max}) 0.35xD Köşe yuvarlatma değeri			
Delik No	T2A	A2A	T2A-A2A
6	0,30	0,24	0,07
7	0,17	0,18	0,00
8	0,15	0,24	-0,10
9	0,15	0,17	-0,02
10	0,22	0,10	0,12

Karşılaştırma sonucuna göre analiz ve deney arasında en fazla fark delik 8 ve 10'da meydana gelmiştir. Genel olarak analizlerde boyanın kaldırılacağı bölge iyi tahminlenmiştir.

9.3 Grup 3 Delikleri

Grup 3 delikleri için kriterlerin uygunluğu değerlendirilmiş olup Çizelge 9.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 9.5. Deneysel sonuçlar ile kriterlerin uygunluğu (Grup 3)

Delik No	T1A	T2A	T3A	T4A
11	+	+	-	-
12	+		-	-
13	+	+	-	-
14	+	+	+	+
15	+	+	+	+

(+): kriterlere uygun durum

(-) : kriterlere uygun olmayan durum

Köşe yuvarlatma değeri $0.35xD$ (T2A) değerinden sonra 11, 12, 13 nolu deliklerde istenilen kriterler sağlanamamaktadır. Akışta yüzeyden ayrılmalar meydana gelmekte ve bunun neticesinde minimum gerekli kalınlık değerinin sağlanamaması söz konusudur. Sonuç olarak Grup 3 delikleri için **0.35xD** değeri üst limit olarak belirlenmiştir. Köşe yuvarlatmanın $0.35xD$ olduğu durumdaki test analiz karşılaştırması Çizelge 9.6'da Grup 3 için gösterilmektedir.

Çizelge 9.6. Analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması ($0.74xD$)

FİLM HAVA KALINLIĞI (K/K_{max})			
0.35xD Köşe yuvarlatma değeri			
Delik No	T2A	A2A	T2A-A2A
11	0,19	0,14	0,05
12	-	-	-
13	0,35	0,18	0,17
14	0,44	0,15	0,29
15	0,44	0,14	0,29

Analiz ve deney karşılaştırmasına göre jet akışın yüzeyden kaldırdırabileceği boya kalınlığı analizlerde daha az tahminlenmiştir.

Analizlerde yer almayan fakat deneylerde kullanılan tinerin etkisi, üretilen parçaların nümerik modellerle birebir eşleşmemesi ve nümerik hatalar düşünüldüğünde analiz ve deneyler arasında farklılıklar oluşması doğal bir sonuçtur. Fakat olayın fiziğinin anlaşılması ve değerlendirmelerin yapılabilmesi açısından iki çalışmanın önemi büyüktür.

10. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Çalışmada, özellikle kanatçık firar kenarında oluşan buzlanmaya etki eden faktörlerden biri olan köşe yuvarlatma değeri incelenmiştir. Çalışma özellikle 4 farklı köşe yuvarlatma durumu için gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sayısal analizlerle desteklenerek akışın farklı durumlarda nasıl davranabileceği ortaya konulmuştur. Çalışmanın asıl amacı olan köşe yuvarlatma işleminin üst limitinin ortaya konulabilmesi için belirlenen kriterler çerçevesinde sonuçlar incelenmiştir. Analizlerden elde edilen veriler deneyleri desteklemesi ve problemin daha iyi anlaşılabilmesi açısından önemlidir. Deney sonuçlarından elde edilemeyen bilgiler analiz sonuçlarından detaylı bir şekilde irdelenebilmektedir. Bunun aksine deney sırasında gözlemlenen girdap bölgeleri, akış ayrılmaları analizlerde kolay bir şekilde gözlemlenmemektedir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular bu bölümde özetlenmiştir. Öncelikli olarak köşe yuvarlatma değerleri için herbir grup ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Değerlendirme hem deneysel hem de sayısal analiz verilerinden yararlanılarak yapılmıştır. Daha sonrasında en yüksek ana akış hızında köşe yuvarlatma değerleri ile jet akışın yüzeydeki etki alanı arasındaki değişim incelenmiştir. Son olarak belirlenen kriterler çerçevesinde herbir grup için üst limitler belirlenmiştir.

➤ Köşe yuvarlatma uygulanmayan parçanın değerlendirilmesi;

Grup 1:

Analizler ve deneysel sonuçlarda jet akışın yüzeyi takip edebildiği gözlemlenmiştir. Kanatçık iç bükey profili bu sonucun elde edilmesinde büyük paya sahiptir. Deneysel sonuçlara göre; ana akış hızı azaldığında delik 3, 4 ve 5’de jet akışın yüzeyden kaldırdığı boya kalınlığında artma, delik 1 ve 2’de kanlınlıkta azalma gözlemlenmektedir (Çizelge 10.1).

Çizelge 10.1. Köşe yuvarlatma olmayan durum için kalınlık değerleri (Grup 1)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T1A	T1B	T1C
1	1,00	0,82	0,72
2	0,65	0,53	0,52
3	0,46	0,53	0,47
4	0,27	0,44	0,39
5	0,27	0,50	0,39

Grup 2:

Ana akış hızı ile kalınlık değişimi Çizelge 10.2’de görülebilmektedir. Delik 6 ve 7’de akış hızı $2xV$ olduğunda kalınlık değerleri artmakta ve daha sonra azalmaktadır. Delik 8, 9, 10’da ana akış hızı azaldıkça kalınlık değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 10.2. Köşe yuvarlatma olmayan durum için kalınlık değerleri (Grup 2)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T1A	T1B	T1C
6	0,29	0,53	0,39
7	0,19	0,29	0,13
8	0,23	0,18	0,13
9	0,27	0,18	0,13
10	0,35	0,21	0,13

Grup 3:

Ana akış hızı azaldığında jet akışın yüzeyden kaldırdığı boya kalınlığı azalmaktadır (Çizelge 10.3). Özellikle delik 14 ve 15’de ana akış hızının en düşük olduğu durumda kalınlık değeri en az seviyeye inmektedir.

Çizelge 10.3. Köşe yuvarlatma olmayan durum için kalınlık değerleri (Grup 3)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T1A	T1B	T1C
11	0,35	0,18	0,14
12	0,37	0,18	0,14
13	0,35	0,18	0,13
14	0,37	0,24	0,08
15	0,48	0,35	0,06

➤ Köşe yuvarlatma değeri $0.35xD$ olan parçanın değerlendirilmesi;

Grup 1:

Gerek analizlerde gerekse deneysel sonuçlarda jet akışın yüzeyi takip edebildiği gözlemlenmiştir. Bu gruptaki deliklerden 1, 2, 4 ve 5'te imalat sırasında uygunsuzluk olduğu gözlemlenmiştir ve bu deliklerde beklenenden biraz daha farklı sonuçların çıkması doğal karşılanmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde ana akış hızının en az olduğu durumda genel olarak yüksek kalınlık değerleri elde edildiği gözlemlenmektedir. Bu durum jet akışın delikten çıkarken daha iyi yayılması ve yüzeye tutunması ile açıklanabilmektedir.

Çizelge 10.4. Köşe yuvarlatma $0.35xD$ durumu için kalınlık değerleri (Grup 1)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T2A	T2B	T1C
1	0,52	0,47	0,50
2	0,17	0,44	0,42
3	0,39	0,34	0,50
4	0,35	0,12	0,50
5	0,22	0,13	0,50

Grup 2:

Delik 6, 7 de ana akış hızı arttıkça jet akışın yüzeyden kaldıracabildiği boyanın kalınlığı artmaktadır (Çizelge 10.5). Delik 8, 9, 10'da bu durum tersine dönerek en düşük ana

akış hızında yüksek kalınlık değerleri elde edilmiştir. Bunun nedeni ana akış hızının en düşük olduğu durumda oluşan girdapların yüzeydeki boyayı etkin bir şekilde kaldırmamasıdır (bkz. Şekil 7.11). Bu istenilen bir durum olmamasına rağmen sonuçlara böyle yansımaktadır.

Çizelge 10.5. Köşe yuvarlatma olmayan durum için kalınlık değerleri (Grup 2)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T2A	T2B	T2C
6	0,30	0,09	0,11
7	0,17	0,15	0,14
8	0,15	0,09	0,42
9	0,15	0,15	0,39
10	0,22	0,15	0,33

Grup 3:

Çizelge 10.6'de grup 3 için elde edilen değerler gösterilmektedir. Delik 12 daha önce bahsedildiği gibi değerlendirilmeden çıkartılmıştı. Diğer deliklerde ana akış hızı azaldığında kalınlık değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Özellikle delik 11 ve 13'de V ve 2xV ana akış hızlarında akışın yüzeyden ayrıldığı gözlemlenmektedir.

Çizelge 10.6. Köşe yuvarlatma 0.35xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 3)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T2A	T2B	T2C
11	0,19	0,03	0,03
12	-	-	-
13	0,35	0,06	0,06
14	0,44	0,24	0,22
15	0,44	0,29	0,25

- Köşe yuvarlatma değeri $0.74xD$ olan parçanın değerlendirilmesi;

Grup 1:

Gerek analizlerde gerekse deneysel sonuçlarda jet akışın yüzeyi takip edebildiği gözlemlenmiştir. Çizelge 10.7’de kalınlık değerleri gösterilmektedir. Deney sonuçlarına $4xV$ ile $2xV$ ana akış hızlarında elde edilen kalınlık değerleri birbirine yakinken ana akış hızı V olduğu durumda diğerlerinden daha fazla olduğu görülebilmektedir ve jet akışın ana akış içine daha geniş bir şekilde yayılabildiği sonucu çıkarılabilir.

Çizelge 10.7. Köşe yuvarlatma $0.74xD$ durumu için kalınlık değerleri (Grup 1)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T3A	T3B	T3C
1	0,70	1,00	1,00
2	0,51	0,53	0,67
3	0,43	0,43	0,40
4	0,51	0,51	0,67
5	0,47	0,47	0,17

Grup 2:

Çizelge 10.8’de grup 2 için elde edilen değerler gösterilmektedir. Ana akış hızı $4xV$ ’den $2xV$ olduğunda kalınlık değerleri artmaktadır. Ana akış hızı $2xV$ ’den V olduğu durumda kalınlık değerleri genel olarak düşüş göstermektedir. Ayrıca ana akış hızının $4xV$ olduğu durumda jet akışın yüzeyden ayrılmaya başladığı gözlemlenmektedir. Ana akış hızının V olduğu durumda girdap bölgeleri açık bir şekilde gözlemlenmektedir.

Çizelge 10.8. Köşe yuvarlatma 0.74xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 2)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T3A	T3B	T3C
6	0,21	0,20	0,13
7	0,14	0,16	0,13
8	0,02	0,16	0,13
9	0,12	0,20	0,43
10	0,08	0,38	0,22

Grup 3:

Çizelge 10.9’de grup 3 için elde edilen kalınlık değerleri gösterilmektedir. Genel olarak delik 11, 12, 13’de akış yüzeyde tutunamamaktadır. Delik 14 ve 15’de akış ayrılması gözlemlenmemektedir.

Çizelge 10.9. Köşe yuvarlatma 0.74xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 3)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T3A	T3B	T3C
11	0,02	0,09	0,00
12	0,04	0,05	0,00
13	0,04	0,03	0,00
14	0,31	0,22	0,17
15	0,35	0,34	0,27

- Köşe yuvarlatma değeri 0.87xD olan parçanın değerlendirilmesi;

Grup 1:

Grup 1 için elde edilen kalınlık sonuçları Çizelge 10.10’de gösterilmektedir. Genel olarak ana akış hızı azaldığında kalınlık değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Deney sonuçlarına göre jet akışın yüzeyden boya kaldırma kabiliyetini diğer köşe yuvarlatma durumlarına göre yüksek oranda kaybettiği gözlemlenmiştir. Analizlerden elde edilen veriler de bu durumu desteklemektedir. Delik 4 ve 5 ‘de ana akış hızının V olduğu durumda girdap akış bölgeleri oluşmuştur.

Çizelge 10.10. Köşe yuvarlatma 0.87xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 1)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T4A	T4B	T4C
1	-	-	-
2	0,38	0,59	0,97
3	0,07	0,29	0,19
4	0,11	0,29	0,11
5	0,27	0,21	0,39

Grup 2:

Çizelge 10.11’de grup 2 için kalınlık değerleri gösterilmektedir. Delik 6 ve 7’de ana akış hızı azaldığında kalınlık değerleri artmaktadır. Ayrıca ana akış hızının 4xV olduğu durumda delik 8, 9, 10’da jet akış yüzeyden ayrılmaktadır. Ana akış hızının V olduğu durumda girdap bölgeleri gözlemlenmektedir. Analiz sonuçlarına bakıldığında delik 8, 9, 10 kayma gerilme değerlerinin delik çıkışında diğer köşe yuvarlatma durumlarına göre düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 10.11. Köşe yuvarlatma 0.87xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 2)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T4A	T4B	T4C
6	0,11	0,29	0,47
7	0,15	0,27	0,36
8	0,04	0,09	0,08
9	0,00	0,03	0,00
10	0,00	0,00	0,00

Grup 3:

Grup 3 için elde edilen kalınlık değerleri

Çizelge 10.12’de gösterilmektedir. Deney sonuçlarına göre delik 11, 12, 13’de akış yüzeyde tutunamamaktadır. Delik 14 ve 15’de akışın yüzey üzerinde etkili olduğu

görülmektedir. Analiz sonuçlarında bu durumu desteklemektedir fakat diğer deliklerle olan fark deneysel verilerdeki kadar fazla değildir. Bu farklılık debi dağılımından veya fiziksel modellemeden kaynaklanabilir.

Çizelge 10.12. Köşe yuvarlatma 0.87xD durumu için kalınlık değerleri (Grup 3)

Delik No	Kalınlık (K/K_{max})		
	T4A	T4B	T4C
11	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00
13	0,02	0,00	0,00
14	0,22	0,21	0,21
15	0,33	0,28	0,36

T1A, T2A, T3A ve T4A sonuçlarını içeren deneysel veriler incelendiğinde (bknz. Şekil 7.4), köşe yuvarlatma değerinin jet hava akışına etkisi ana akış hızı sabit tutularak karşılaştırılabilmektedir.

Grup 1:

Çizelge 10.13’de grup 1 için jet etkinliğinin farklı köşe yuvarlatma değerlerinde karşılaştırılması verilmektedir. Delik 1, 2, 3’de köşe yuvarlatma değeri arttıkça jet etkinliği azalmakta olduğu söylenebilir (T2A deliklerinde beklenenden az olması delik 1, 2, 4, 5’de meydana gelen uygunsuzluklardan kaynaklanmaktadır). Delik 4 ve 5’de 0.74xD durumunda (T3A) daha fazla jet etkinliği olduğu görülmektedir, fakat 0.87xD durumunda (T4A) akış etkinliği düşmektedir.

Çizelge 10.13. Köşe yuvarlatma ile jet etkinliğinin değişimi (Grup 1)

	μ (jet etkinliği)			
	T1A	T2A	T3A	T4A
1	1,00	0,52	0,70	-
2	1,00	0,27	0,78	0,58
3	1,00	0,85	0,93	0,16
4	1,00	1,29	1,89	0,40
5	1,00	0,81	1,74	1,01

Grup 2:

Çizelge 10.14'de grup 2 için jet etkinliğinin farklı köşe yuvarlatma değerlerinde karşılaştırılması verilmektedir. Sonuçlar köşe yuvarlatma değeri arttıkça jet etkinliğinin azaldığını göstermektedir. Özellikle delik 8, 9, 10'da 0.87xD köşe yuvarlatma değerinde (T4A) akış yüzeye tutunmamaktadır.

Çizelge 10.14. Köşe yuvarlatma ile jet etkinliğinin değişimi (Grup 2)

	μ (jet etkinliği)			
	T1A	T2A	T3A	T4A
6	1,00	1,06	0,74	0,38
7	1,00	0,91	0,71	0,75
8	1,00	0,63	0,08	0,16
9	1,00	0,54	0,44	0,00
10	1,00	0,63	0,23	0,00

Grup 3:

Deney ve analiz sonuçları köşe yuvarlatma değeri arttıkça jet etkinliğinin azaldığını göstermektedir. Özellikle 11, 12, 13'de 0.74xD ve 0.87xD köşe yuvarlatma değerlerinde akış yüzeye tutunmamaktadır. Analizlerde delik 14 ve 15'de sonuçlar farklılık göstermektedir. Bunun durum, deney esnasından tiner yoğunluğunun delik 14 ve 15'den çıkan tinerin debisini etkilemesi ve analizlerde tinerin modellenmemesi ile açıklanmaktadır.

Çizelge 10.15. Köşe yuvarlatma ile jet etkiliğinin değişimi (Grup 3)

	μ (jet etkinliği)			
	T1A	T2A	T3A	T4A
11	1,00	0,54	0,06	0,00
12	1,00	-	0,11	0,00
13	1,00	1,01	0,11	0,05
14	1,00	1,19	0,85	0,60
15	1,00	0,91	0,73	0,68

Yüzeyden kaldırılan boya kalınlığı (K), köşe yuvarlatma işleminin bir fonksiyonu olarak herbir delik için hesaplanmıştır ve Çizelge 10.16'de gösterilmektedir. Ölçüm yapılan aralıkta elde edilen deney sonuçlarından yararlanılarak eşitlikler oluşturulmuştur.

Çizelge 10.16. Köşe yuvarlatma değerine bağlı kalınlık değişimi

Delik No	Fonksiyon
1	$y = 6.4618x^2 - 13.394x + 13.78$
2	$y = -8.4805x^3 + 29.064x^2 - 26.086x + 9.01$
3	$y = -7.5926x^3 + 20.026x^2 - 12.361x + 6.36$
4	$y = -8.9626x^3 + 23.039x^2 - 11.333x + 3.71$
5	$y = -6.7488x^3 + 19.653x^2 - 12.291x + 3.71$
6	$y = -1.3669x^2 + 1.6002x + 3.9315$
7	$y = 0.4789x^3 - 1.3513x^2 + 0.4621x + 2.65$
8	$y = 1.2541x^3 - 3.3989x^2 + 0.4415x + 3.18$
9	$y = -2.5655x^3 + 7.4188x^2 - 6.4306x + 3.71$
10	$y = -2.3192x + 4.8206$
11	$y = 0.6348x^3 - 1.4733x^2 - 1.9776x + 4.77$
12	$y = 0.426x^2 - 3.3695x + 5.035$
13	$y = 2.977x^3 - 10.25x^2 + 6.3323x + 4.77$
14	$y = -1.8654x^2 + 2.7259x + 5.0297$
15	$y = 0.2098x^3 - 0.8217x^2 - 0.2581x + 6.625$

Belirlenen kriterler çerçevesinde sonuçlar incelenmiş ve Çizelge 10.17’de gösterilen üst limitler belirlenmiştir.

Çizelge 10.17 Köşe yuvarlatma değeri üst limit değerleri

	Köşe yuvarlatma üst limiti
Grup 1	0.74xD
Grup2	0.35xD
Grup3	0.35xD

Yapılan çalışma ile köşe yuvarlatma işleminin buzlanma sistemi üzerine etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Araştırmalar, akış görüntüleme testi ile yüzeyden kaldırılan boya kalınlığının ve sayısal analizler ile hız vektörleri ve kayma gerilmelerinin incelenmesini kapsamaktadır. Araştırma sonucunda herbir grup için köşe yuvarlama işlemi sınırlandırılmıştır. Böylece sabit kanatçık üzerinde bulunan buzlanma sistemini etkileyen faktörlerden biri için literatüre önemli bir katkı sağlanmıştır. Araştırma sonucu ortaya çıkan verilerin uçak motor parçasında tasarım girdisi olarak kullanılması ve parçanın imalatında önemli kriterlerden biri olması beklenmektedir.

11. KAYNAKLAR

- Albert, J., E., Bogard, D., G., 2004, Cunha, F., Adiabatic and overall effectiveness for a film cooled blade, Asme Turbo Expo, GT2004-53998
- Baldauf, S., Schilz, A., Witting, S., 2002, Correlation of Film-Cooling Effectiveness From Thermo-graphic Measurements at Enginelike Conditions, Journal of Turbomachinery, Vol. 124, 686-698.
- Banke, J., 2012, Preps continue for launching engine icing research, NASA, http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/preps_solve_engine_icing.html#.UvTMSfSzJBI, erişim tarihi: 26.01.2015.
- Bogard, D.G., Thole, K., A., 2006, Gas turbine film cooling, Journal of propulsion and power, 22, 249-270.
- Colban, W., F., 2005, A Detailed study of fan-shaped film-cooling for a nozzle guide vane for an industrial gas turbine, Ph.d., Faculty of Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg-Virginia, 174p.
- Colban, W., F., Thole, A., K., Bogard, D., 2011, A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface, Journal of Turbomachinery, Vol. 133, 10p.
- Cheng, K., Zhang, C., Chen, W., Liang, S., Guo, Y., Huai, X., 2012, Numerical investigation of film cooling with chemical heat sink, Frontiers in Heat and Mass Transfer, 6p.
- Dhungel, A., 2007, Film cooling from a row of holes supplemented with anti vortex holes, Thesis of Master Science, Regional Engineering College-Rourkela

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Facchini, B., Picchi, A., Tarchi, L., Ciani, A., Ercole, M., D., Innocenti, L., 2010, Film-cooling adiabatic effectiveness measurements on a real high pressure turbine blade, European Turbomachinery Conference, 13p
- Gomes, R., A., Niehuis, R., 2011, Film cooling on highly loaded blades with main flow separation-part 1: heat transfer, ASME Turbo Expo, GT2011-45476, 10p.
- Lim, C., H., Pullan, G., ve Northall, J., 2010, Estimating the loss associated with film cooling for a turbine stage, Asme Turbo Expo, GT2010-22327, 13p.
- Johnson, B., Tian, W., Zhang, K., Hu, H., 2014, An experimental study of density ratio effects on the film cooling injection from discrete holes by using PIV and PSP techniques, International Journal of Heat and Mass Transfer, 337-349.
- Jung, I. S., Lee, J.S., 2000, Effects of orientation angles on film cooling over a flat plate: boundary layer temperature distributions and adiabatic film cooling effectiveness, Journal of turbomachinery, Vol.122, 153-160.
- Li, S., Chen, P., Luo, S., Ni, Z., 2014, Flow visualization on lateral multiple jet interaction with freestream, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization 7-11.
- Li, S., J., Rallabandi, A., P., ve Han, J., C., 2011, Influence of unsteady wake with trailing edge coolant ejection on turbine blade film cooling, ASME Turbo Expo, GT2011-45925, 11p.
- Lu, Y., Hong, Y., Lin, Z., Yuan, X., 2010, The experimental and numerical research for linear cascade film cooling with different hole shape, ASME Turbo Expo, GT2010-23030, 10p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Mazzawy, R., S., 2009, Technical compendium from meetings of the engine harmonization working group, NASA, No.Dot/FAA/AR-09/13, 80p.
- Papadakis, M., Rachman, A., Wong, S., Yeong, H. , W., Hung, K., E., Vu, G., T. and Bidwell, C., S., 2008, Experimental study of supercooled large drop impingement on ice shapes, DOT/FAA/AR-08/13, 336p.
- Paregouda, S., Rao, T., N., 2013, CFD simulation on gas turbine blade and effect of hole shape on leading edge film cooling effectiveness, Internatioanal Journal of Modern Engineering Reseach, Vol.3, 2066-2072.
- Pellissier, M., P., C., 2010, Optimization via CFD of aircraft hot air anti icing systems, Thesis of Master Science, 89p.
- Pişkin A., Ortiz J.R., 2011, Multi-disciplinary Design of A Turboprop Engine Front Frame Anti-icing System, European Turbomachinery Conference, 11p.
- S. J. Kline, 1969, National Committee for Fluid Mechanics Films for Flow Visualization, Standford University, 21607, 5p.
- Tatar, V., Kaçar., N., 2014, Bir turboprop motora ait kanatçik buzlanma sistemindeki delik çıkış açi toleranslarının belirlenmesi, Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 079, 9s.
- Wilfert, G., Fottner, L., 1996, The aerodynamic mixing effect of discrete cooling hets with mainstream flow on a highly loaded turbine blade, Journal of Turbomachinery, Vol.118, 468-178.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Vu, K., 2008, Steady state heat transfer of a flat plate with cooling hole in a high temperature environment, Thesis of Master Science, Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut, 47p.

Zhang, L., Guo, T., Li, S., Liu, J., 2007, Effects of jet geometries on film-cooling effectiveness, Challenges of power engineering and environment, 1357-1360.

EK AÇIKLAMA-A

A.1. Ağ Yapısı

Ağ yapısı oluşturma, fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Burada amaç, bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Ağ üretirken kullanılan birçok eleman şekli vardır ancak her şekil her türlü tasarım için uygun olmamaktadır. Eleman tiplerinin matematiksel formülasyonu hakkında detaylı bilgiler birçok temel sonlu eleman kitaplarında mevcut olup elemaların şekil fonksiyonlarının oluşturulması gibi matematiksel yaklaşımlar, çalışmanın kapsamı dışındadır.

Oluşturulan ağ yapısında, elemanlar mümkün olduğu kadar düzgün geometride olmalıdır. Kenar oranları büyük, çarpık ve dar açılı elemanlar sonuçları olumsuz etkilemektedir. Üçgen elemanlar eşkenar üçgene, dörtgen elemanlarda mümkün olduğu kadar kareye veya kareye yakın dikdörtgene benzemelidir.

Ağ yapısının büyümesi ile yapılan analizin hassasiyeti arasında doğrudan bir orantı vardır. Ancak, yüksek sonlu eleman sayısı ile yapılan analizler oldukça zaman alıcıdır. Bu nedenle, ağ örülecek alanda, hangi bölgelerin eleman yoğunluğunun fazla olacağına, hangi bölgelerin eleman yoğunluğunun daha az olacağına karar verilmelidir. Genellikle, önemli olduğu veya kendi içinde büyük değişime sahip olduğu bilinen, tahmin edilebilen bölgelerde birim alana daha fazla eleman yerleştirilir.

Çalışmada ağ yapısı oluşturma işlemi Ansys Workbench programında gerçekleştirilmiştir. Belirlenen 4 geometriye benzer hücre yapısı uygulanmıştır. Hekza tipi ağ yapısı söz konusu geometri için uygulanması zor olduğundan tetrahedral tip uygun görülmüştür.

Geometriye ağ örülmesi sırasında takip edilen adımlar şöyledir;

- Ağ yapısı oluşturma metodunun seçilmesi

- Global ağ ayarları
- Lokal ağ ayarları
- Ağ kalitesinin kontrol edilmesi

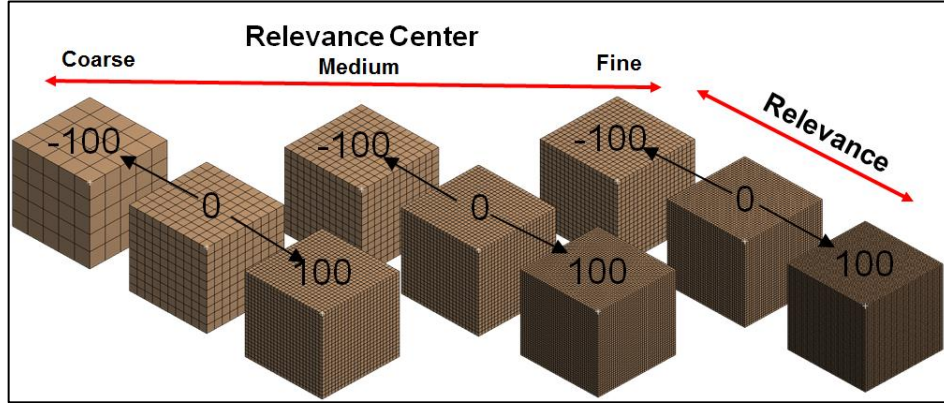
Ağ yapısı metodu olarak Ansys Workbench’de tetrahedron seçilmiştir. Icem HAD algoritması olan “Patch Conforming” kullanılmıştır. Ağ yapısı yüzey ve kenarlardan başlayarak hacimi oluşturacak şekilde örülmüştür.

Global ağ ayarları Şekil A.1’de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Bu ayarlar ağ yapısının oluşturulması sırasında programın dikkate alacağı değerleri göstermektedir ve geometri yapısına uygun olacak şekilde ayarlanmıştır.

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	18,0 °
<input type="checkbox"/> Min Size	2,e-002 mm
<input type="checkbox"/> Max Face Size	6,0 mm
<input type="checkbox"/> Max Size	12,0 mm
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,10
Minimum Edge Length	0,147420 mm

Şekil A.1. Global ağ ayarları

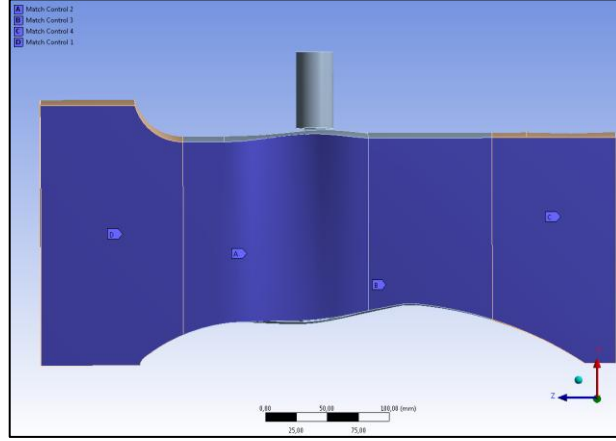
Çözüm Ansys Fluent programı kullanılacak şekilde ayarlanmış ve hücre oranını belirleyen “relevance” değeri için iyi (fine) ve 0 değeri seçilmiştir. Bu değer -100 ile 100 arasında olabilmektedir ve bulunduğu skalada ağ yoğunluğunu değiştirmektedir. Ağ yapısı yoğunluğu üzerindeki etkisi Şekil A.2’de gösterilmektedir.



Şekil A.2. "Relevance" değeri

- Büyüklük fonksiyonu (Size Function) olarak eğrilik (Curvature) seçeneği kullanılmıştır. Bu seçenek kenar ve yüzeylerin normal eğrilik açısına göre belirlenmektedir.
- Yumuşatma (smoothing) seçeneği düğüm noktalarının yerini diğer noktaların konumlarına göre değiştirerek hücre kalitesinin iyileştirmek için kullanılır. Çalışmada, yüksek seçeneği kullanılarak hücre kalitesinin iyi olması amaçlanmıştır.
- Geçiş (transition) seçeneği elementlerin büyümesini kontrol etmektedir. Daha düzgün ağ geçişi için yavaş (slow) seçeneği kullanılmıştır.
- "Span Angle Center" seçeneği kenarlarda eğrilik esaslı iyileştirmeyi kontrol etmeyi sağlar. Modelde düşük açı ile geçişlerin olduğu bilindiğinden "Fine" seçeneği kullanılmıştır. Bu seçenek 360 ve 120 arasındaki eğriliklere göre iyileştirme yapabilmektedir.
- Element büyüklüğü olarak minimum, maksimum ve maksimum yüzey büyüklükleri birkaç iterasyon ile belirlenmiştir. Bu değerler sırası ile 2e-02 mm, 12 mm, 6 mm'dir.

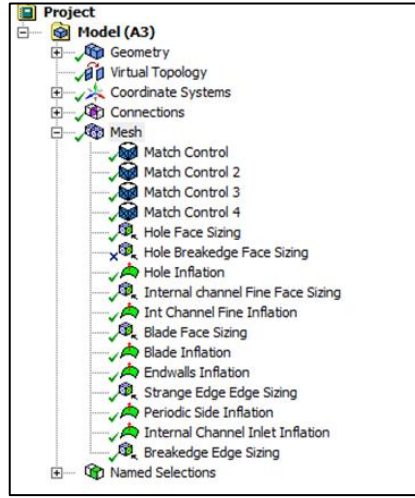
Lokal ağ ayarları incelemenin yapılacağı bölgelere ve özellikle duvar yakınındaki sınır tabaka bölgelerine uygulanmıştır. Akışın periyodik tanımlanabilmesi için Şekil A.3'de mavi ile gösterilen 4 yüzeye "Match Control" tanımlanmıştır.



Şekil A.3. Periyodik yüzeylerin görünümü

Daha sonra lokal olarak büyüme oranları verilecek yüzeyler, kenarlar ve hacimler belirlenmiştir. Özellikle delik yüzeylerinde, köşe yuvarlatma yüzeylerinde, kanat yüzeylerinde lokal olarak ayarlamalar yapılmıştır. Deliklerin ana akışa açıldığı kısımlarda ağ yapısını bozacak şekilde keskin bölgeler ve eğrilikler oluşmaktadır. Bu bölgelerdeki ağ yapısına özellikle dikkat edilmiştir. Asıl incelenmesi planlanan köşe yuvarlatma bölgesinde daha sık bir ağ yapısı için tanımlamalar yapılmıştır.

Sınır tabakanın çözümlenebilmesi için duvar yüzeyleri seçilerek ayrı ayrı sınır tabaka (inflation) özellikleri belirlenmiştir (Şekil A.4).



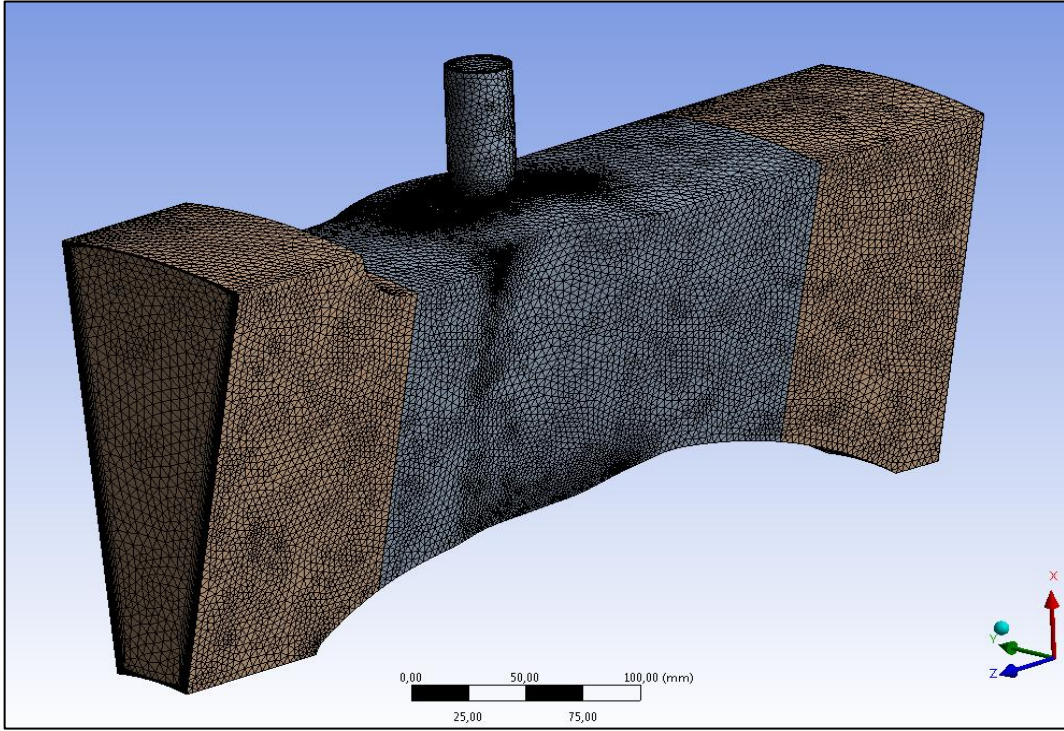
Şekil A.4. Ağ yapısı ayarlarının görünümü

Sınır tabaka için ilk katman yüksekliği seçeneği kullanılmıştır. İlk katman yüksekliği, büyüme oranı, maksimum katman sayısı Çizelge A.1’de özetlenmektedir. Bu değerler birkaç iterasyon yapılarak elde edilen değerlerdir.

Çizelge A.1. Sınır tabaka bölgelerinin hücre ayarları

Duvar Bölgeleri	Sınır Tabaka Özellikleri		
	İlk Katman Yüksekliği	Maks. Katman Sayısı	Büyüme Oranı
Delik	0.002	22	1.195
İç Kanal	0.002	22	1.185
Kanat	0.0018	22	1.24
Üst ve Alt	0.008	22	1.2
Periyodik Bölge	0.01	22	1.2
İç Kanal Giriş	0.004	22	1.26

Bütün sınır şartları belirlendikten sonra geometri için hücre yapısı tamamlanmıştır. Şekil A.5’de görüldüğü gibi bütün yapı için tetrahedron ağ oluşturulmuştur.



Şekil A.5. Geometri üzerinde tetra yapının görünümü

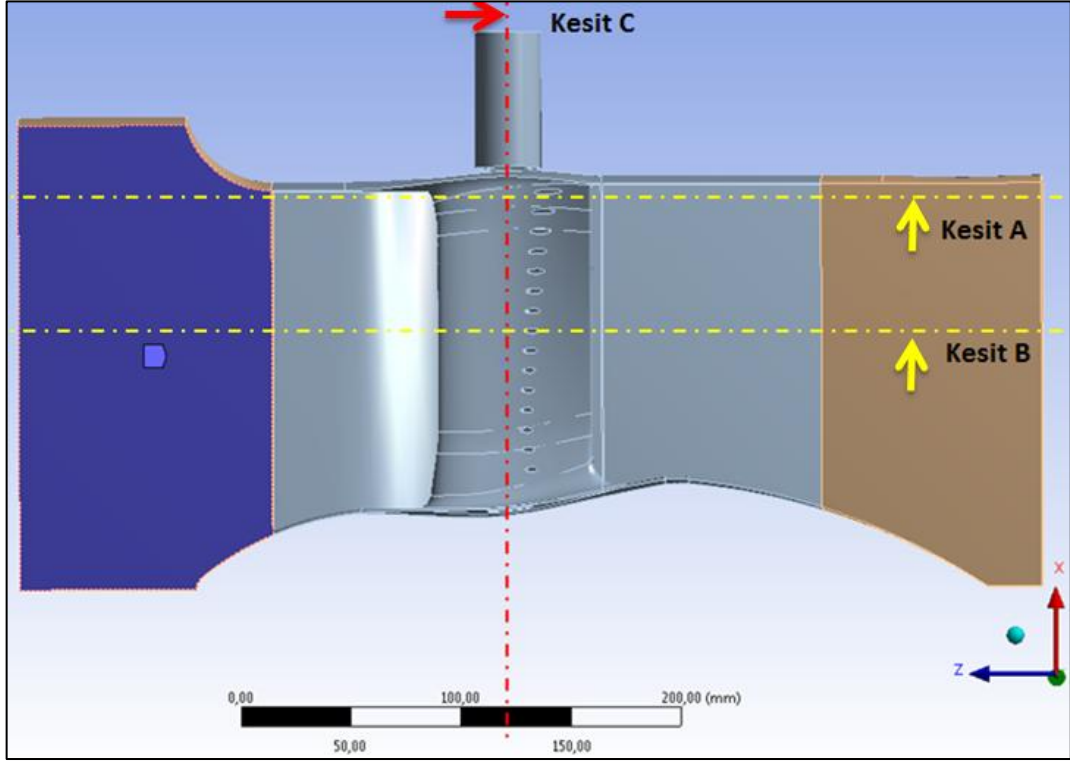
Oluşturulan ağ yapısında toplam 13,282,692 element ve 4,617,792 düğüm noktası bulunmaktadır (Şekil A.6).

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	4617792
<input type="checkbox"/> Elements	13282692

Şekil A.6. Ağ yapısı özellikleri

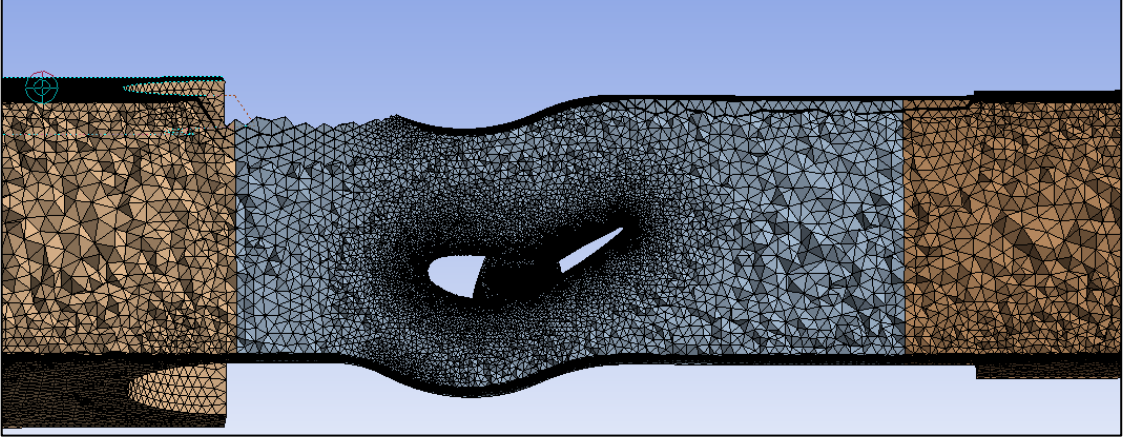
Ağ yapısı incelemesi için Şekil A.7’de gösterilen A, B ve C kesitleri alınmıştır. Oklar alınan kesitlere bakış yönünü göstermektedir. Genel amaç sınır tabaka ağ

yapısının uygunluğunun kontrol edilmesi, büyüme oranının ağ yapısına nasıl yansıdığına görülebilmesi ve kötü geçiş bölgelerinin belirlenebilmesidir.

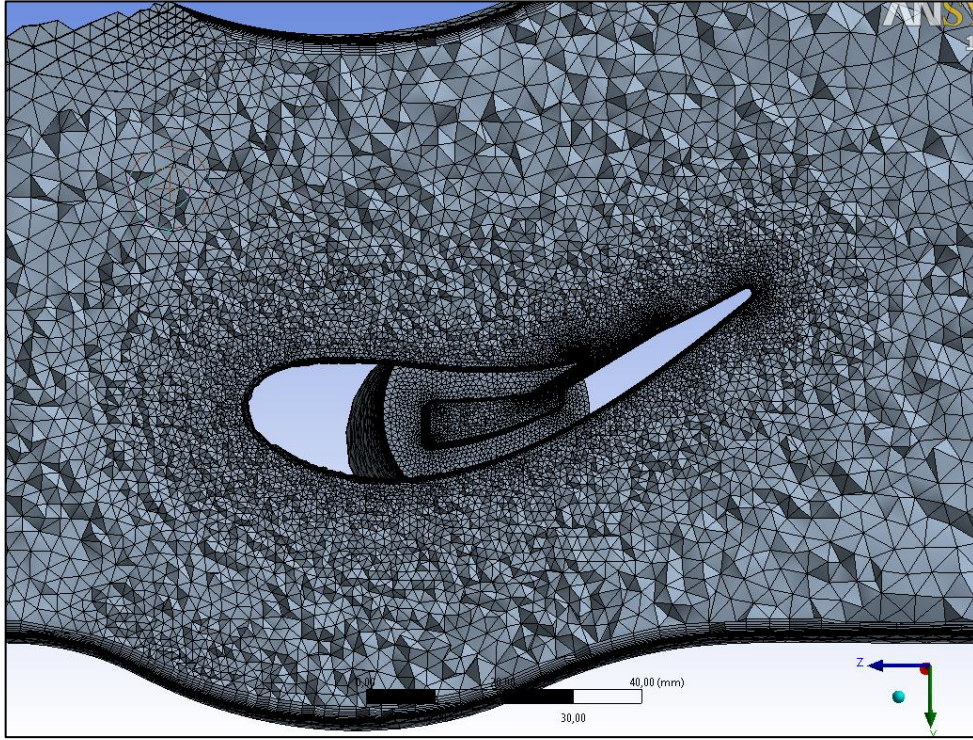


Şekil A.7. Geometri üzerinde kesit alınan bölgeler

Şekil A.8 ve Şekil A.9'da ağ yapısının Kesit A'dan görüntüsü verilmiştir ve hacimsel mesh yapısı görülebilmektedir. Kanalın bulunduğu bölgede hücre daha sık uygulanmış ve büyüme oranı kullanılarak çevre bölgelere hücre yapısının belirli bir oranda büyüterek geçiş yapması sağlanmıştır.

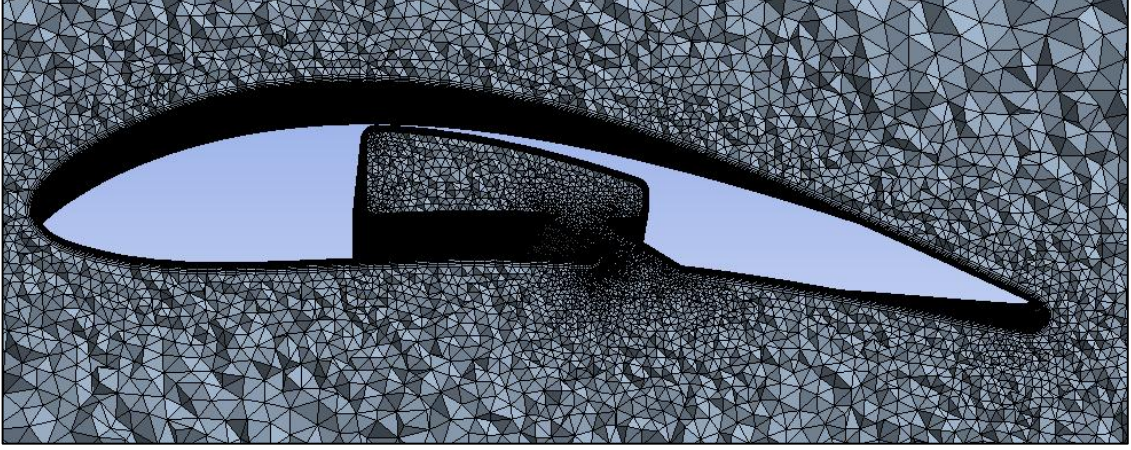


Şekil A.8. Kesit-A ağ yapısı mesh görünümü



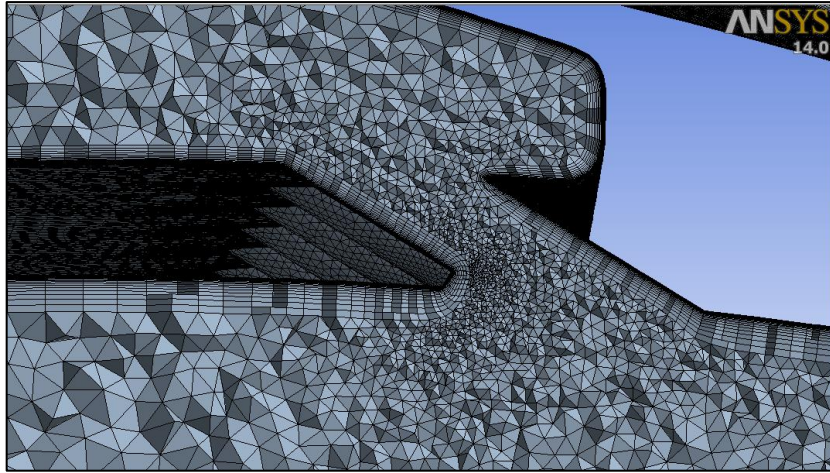
Şekil A.9. Kesit-A yakınlaştırılmış ağ yapısı görünümü

Şekil A.10'da B kesitinden alınan ağ yapısı görüntüsü gösterilmektedir. Kanal geometrisi ve kanat ağ yapısı görülebilmektedir.



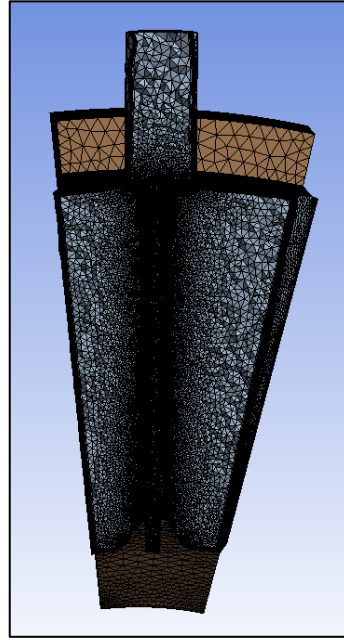
Şekil A.10. Kesit B yakınlaştırılmış ağ yapısı görünümü

Şekil A.11’de B kesidine daha yakından bakıldığında bir deliğin içindeki ağ yapısı görülmektedir. Delik etrafındaki sınır tabaka yapısı ve köşe yuvarlatmanın uygulandığı bölgeler görülebilmektedir. Özellikle köşe yuvarlatma bölgesine daha sık ağ örülmüştür.

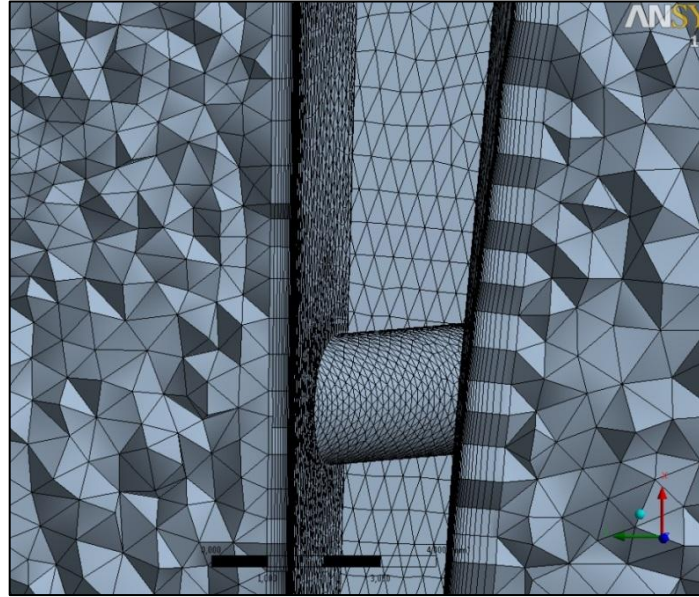


Şekil A.11. Kesit-B delik civarı ağ yapısı görünümü

Şekil A.12 ve Şekil A.13’de jet akış sağlayan kanal kesiti (Kesit C) gösterilmektedir. Delik etrafındaki ve jet akışının bulunduğu bölgedeki ağ yapısı görülebilmektedir.



Şekil A.12. Kesit-C ağ yapısı görünümü



Şekil A.13. Kesit-C delik çevresi ağ yapısı görünümü

A.2. Ağ Yapısı Kalitesi

Hücre kalitesinin belirlenebilmesi için hücrelerin “skewness” ve “orthogonal” kalitesi değerlendirilmiştir (Çizelge A.2, Çizelge A.3).

Çizelge A.2. Eğrilik için seçilen değerleri

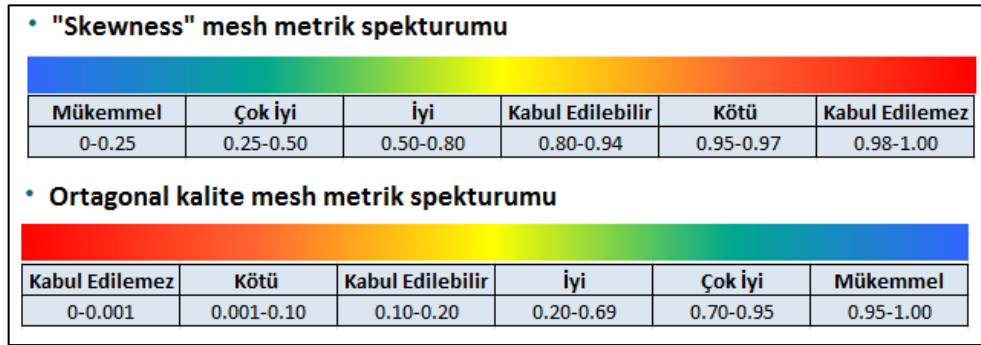
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	4,38007334047086E-05
<input type="checkbox"/> Max	0,921189538615584
<input type="checkbox"/> Average	0,205850010318768
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,118146419680768

Çizelge A.3. Ortogonal kalite özellikleri

Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	1,29860690112593E-02
<input type="checkbox"/> Max	0,999998582483497
<input type="checkbox"/> Average	0,887759702738167
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,120368377839546

Ortogonal kalite incelendiğinde 2638 element 0.1 altında yer almaktadır ve minimum 0.01 değeri elde edilmiştir. Bunlar skalada kötü anlamına gelmektedir fakat bu elementler akış alanını bozmadığından ve bütüne bakıldığında sayısı az olduğundan kabul edilebilir durumdadır.

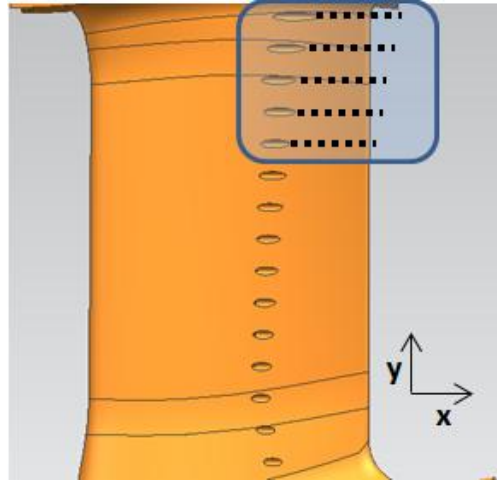
Skewness değerleri incelendiğinde maksimum değer 0.92 olduğu görülmektedir. Bu değer Fluent programı için kabul edilir bir seviyededir.



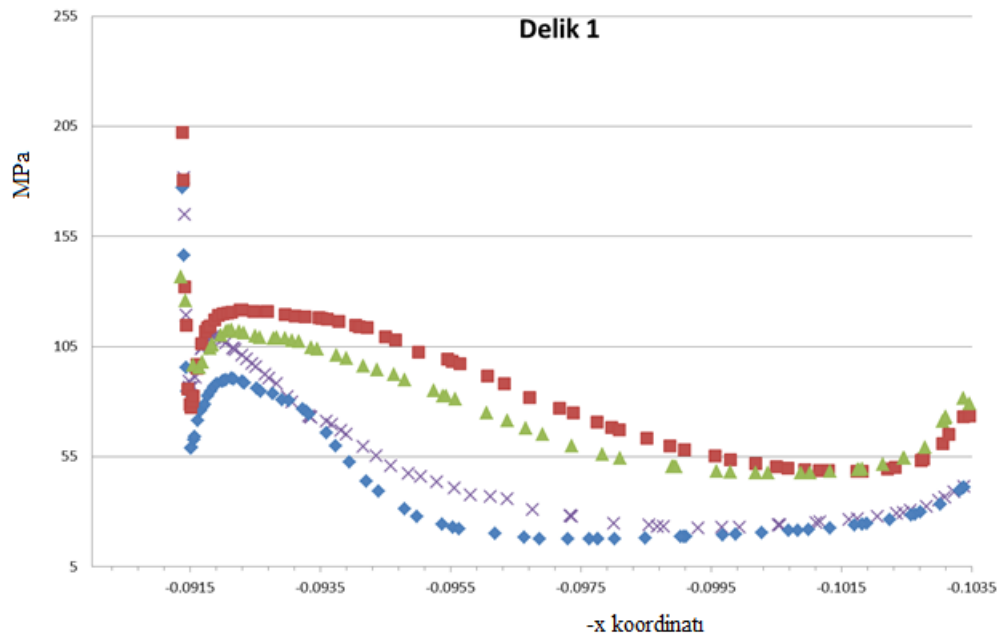
Şekil A.14: Ağ yapısı kalite aralığı

Şekil A.14'de gösterilen ağ yapısı kalite aralığı incelendiğinde elde edilen hücre yapısının kalitesinin yeterli seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Böylece 4 farklı geometri için benzer ağ yapısı uygulanmış olup akış analizlerine hazır hale getirilmiştir.

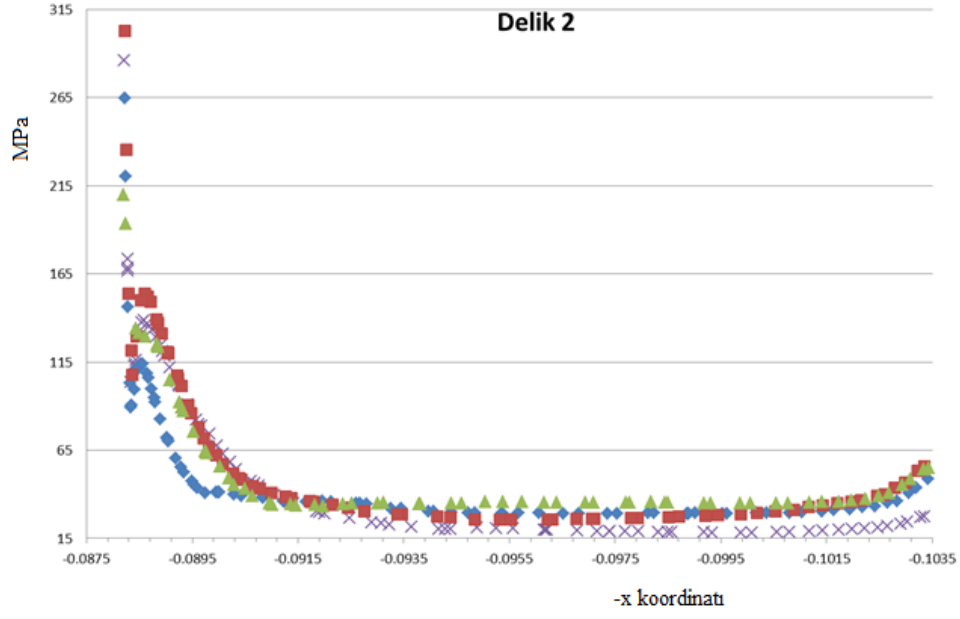
EK AÇIKLAMA-B



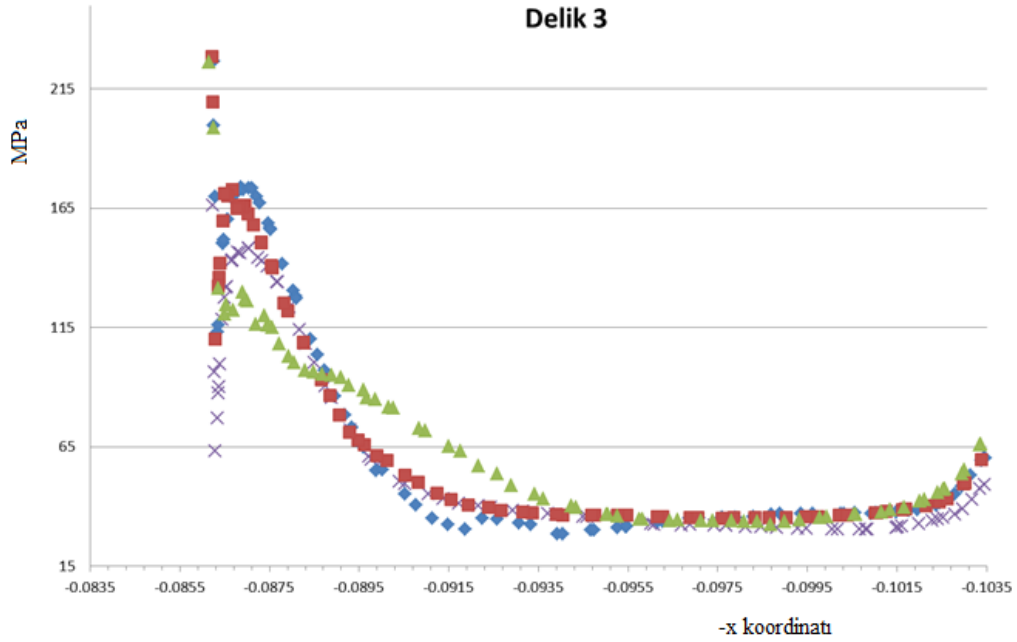
Şekil B.1. Grup 1 delikleri kayma gerilme bölgeleri



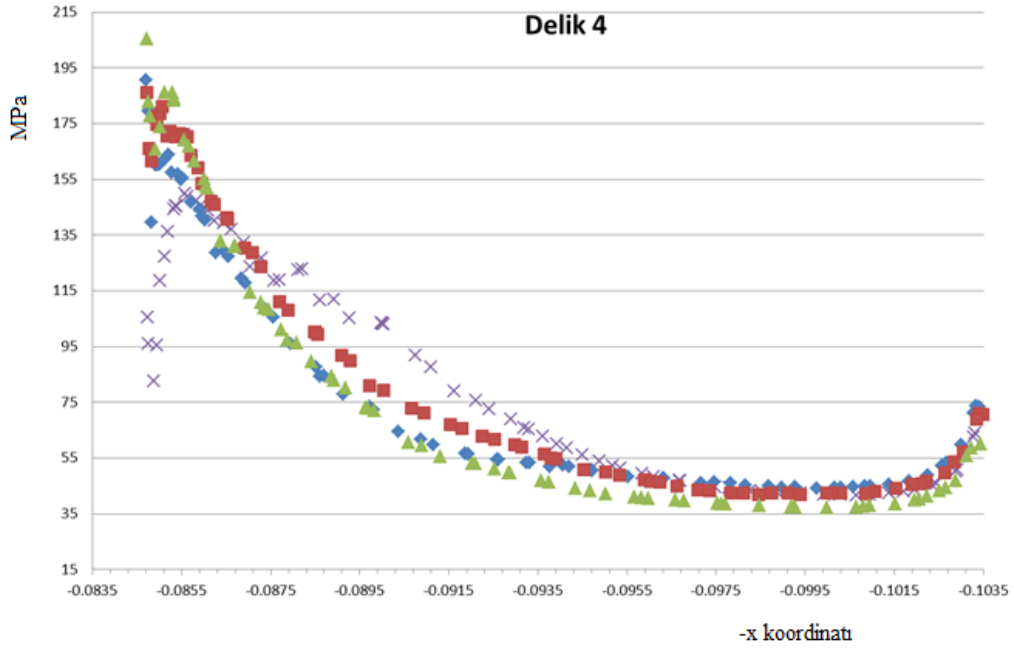
Şekil B.2. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 1)



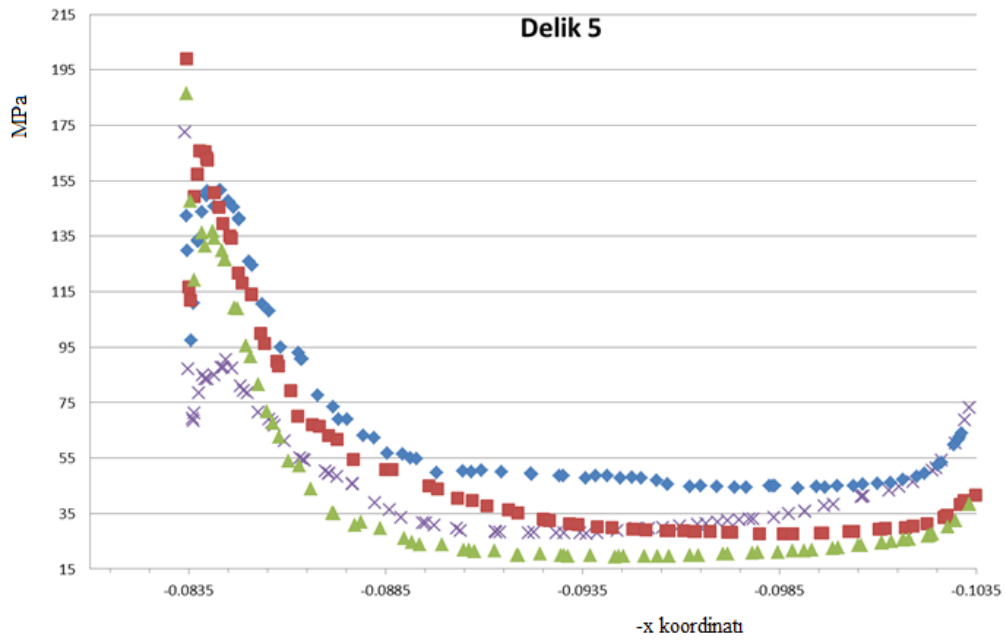
Şekil B.3. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 2)



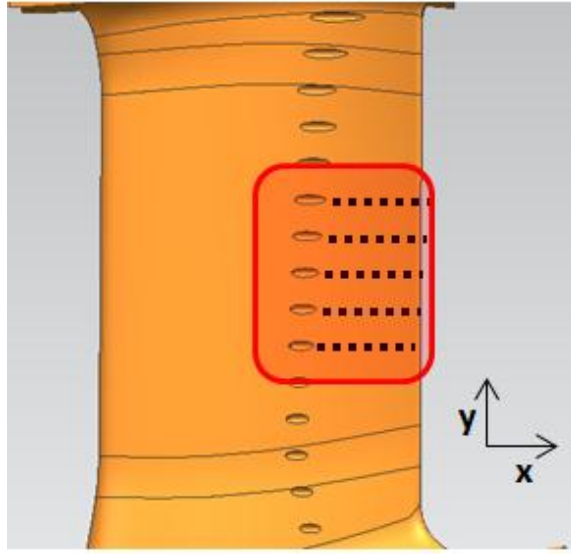
Şekil B.4. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 3)



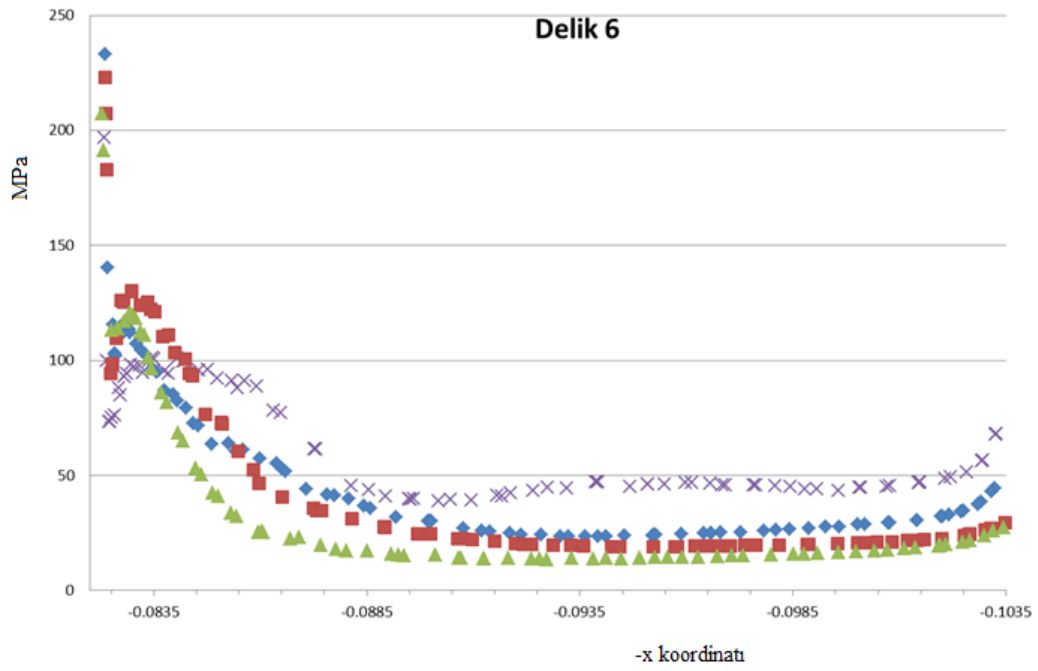
Şekil B.5. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 4)



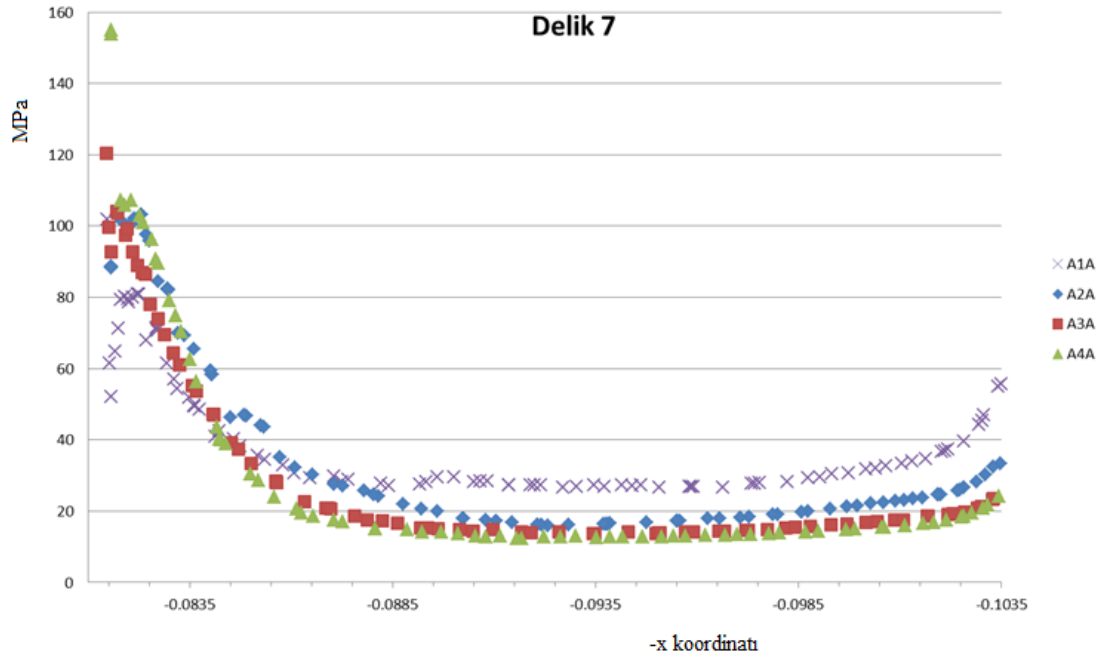
Şekil B.6. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 5)



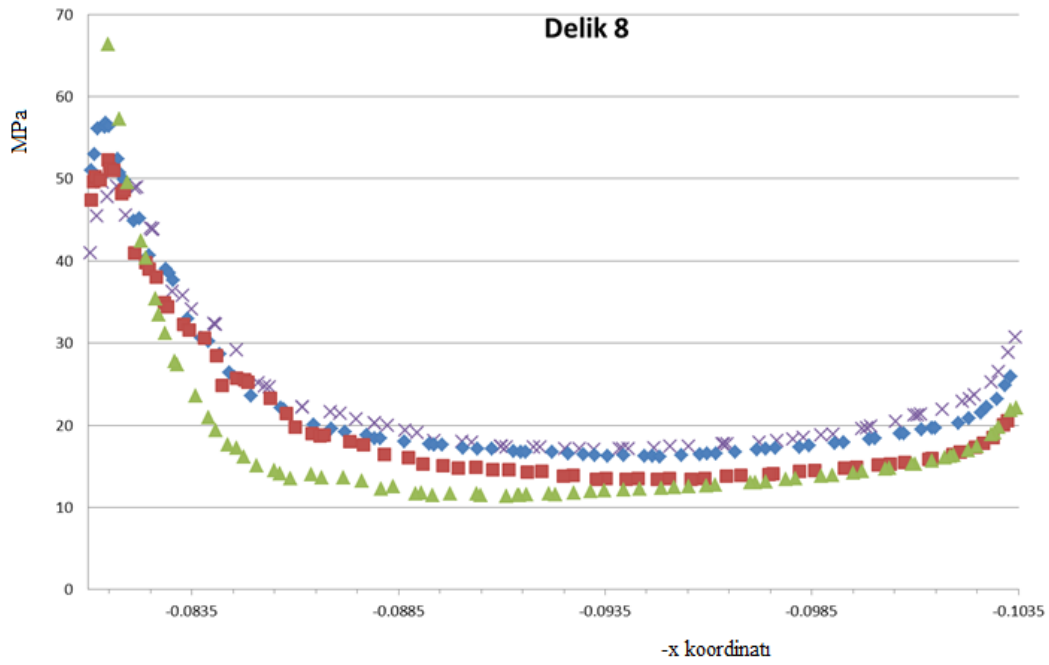
Şekil B.7. Grup 2 delikleri kayma gerilme bölgeleri



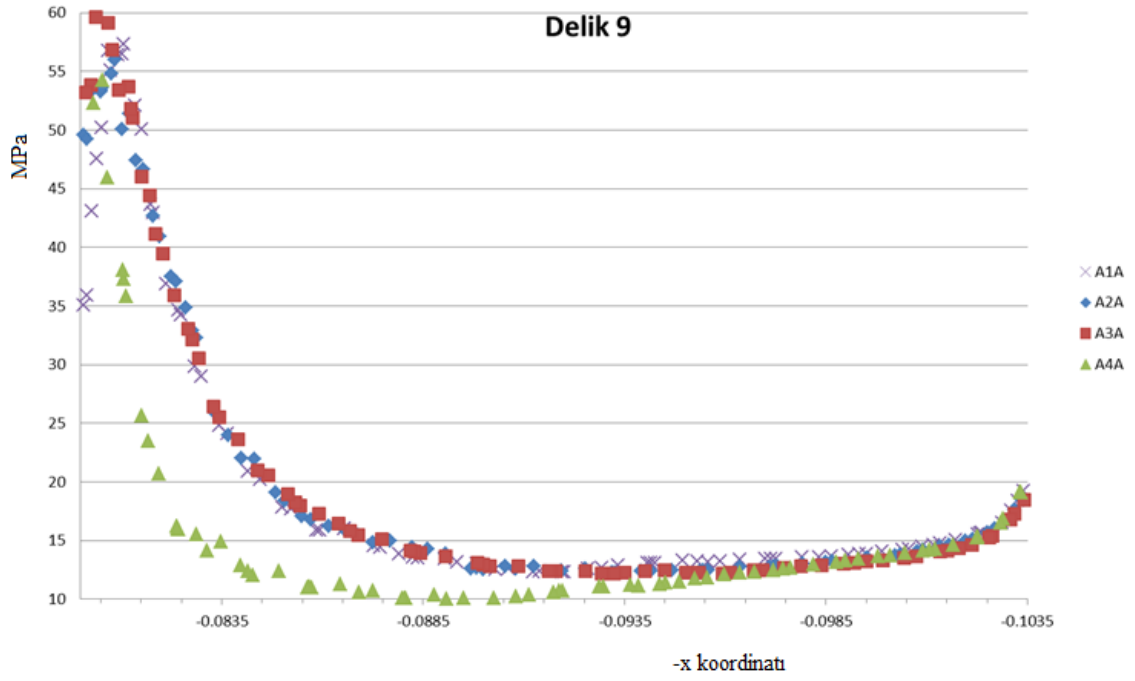
Şekil B.8. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 6)



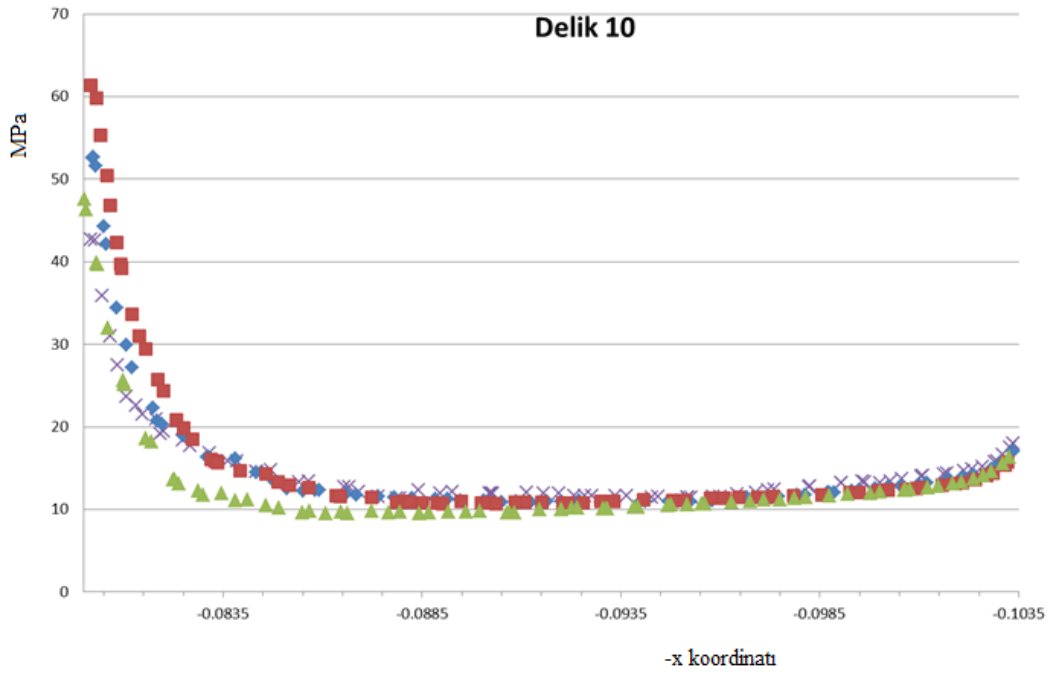
Şekil B.9. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 7)



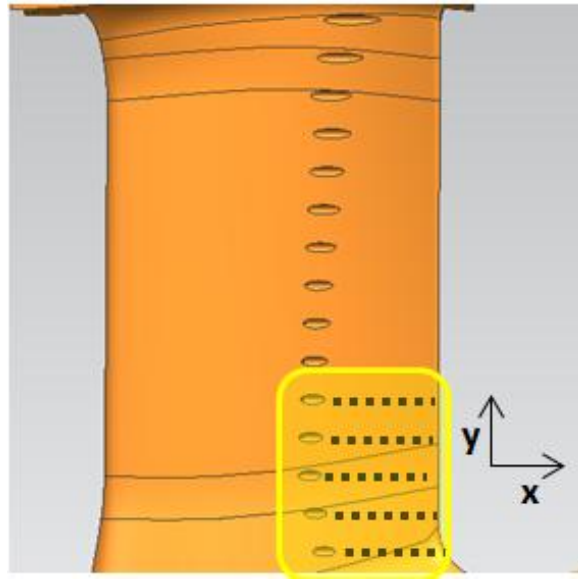
Şekil B.10. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 8)



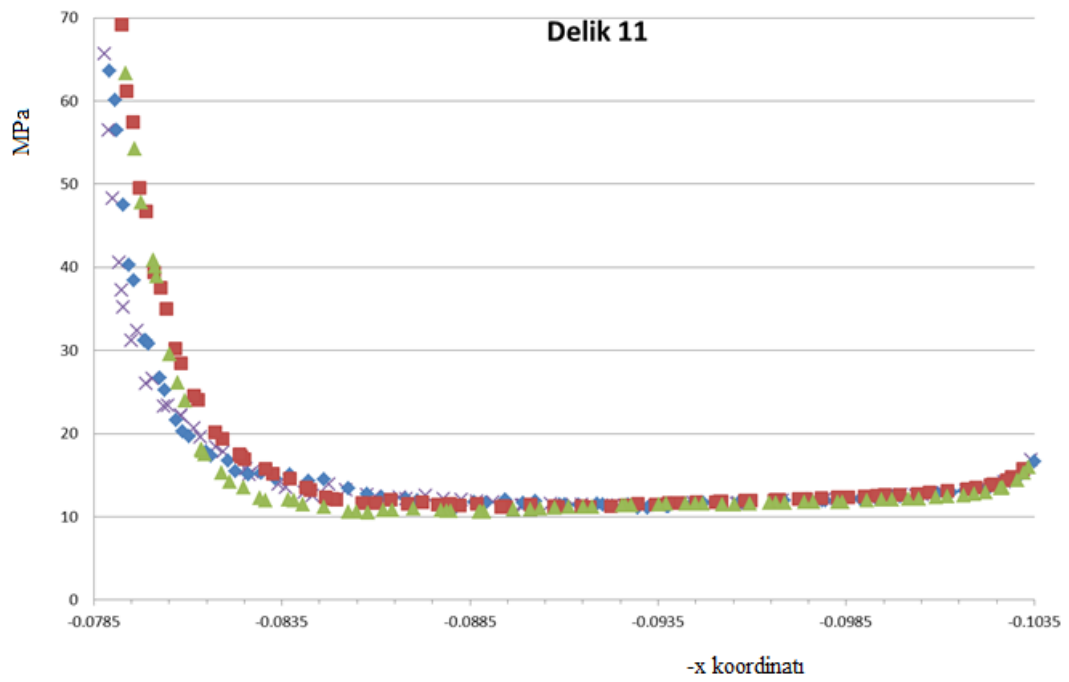
Şekil B.11. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 9)



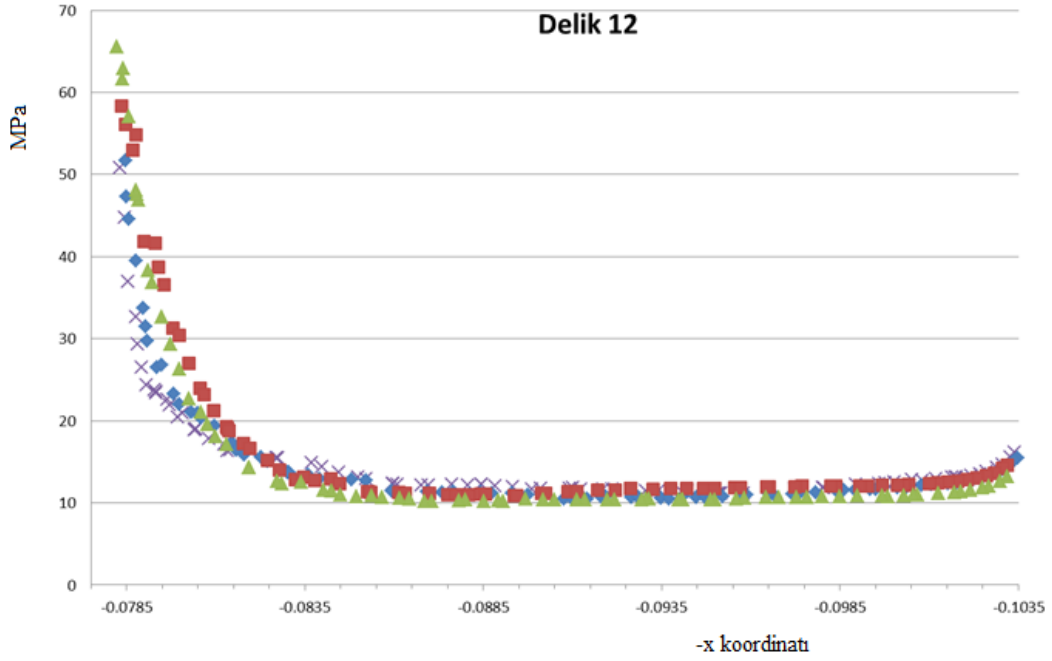
Şekil B.12. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 10)



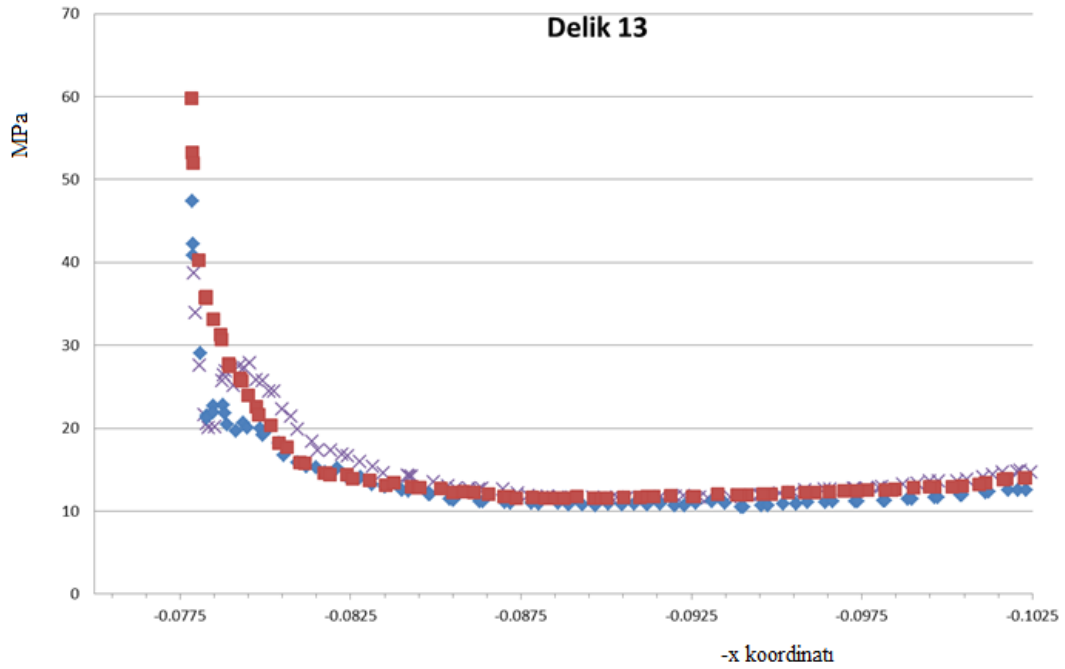
Şekil B.13. Grup 3 delikleri kayma gerilme bölgeleri



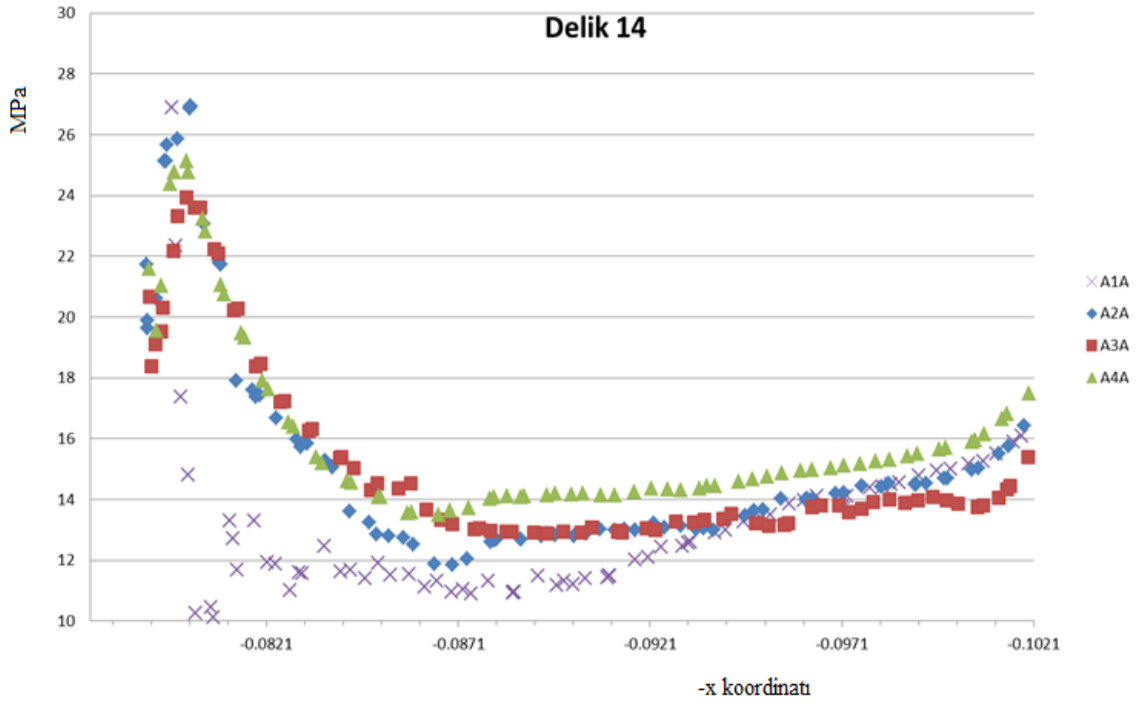
Şekil B.14. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 11)



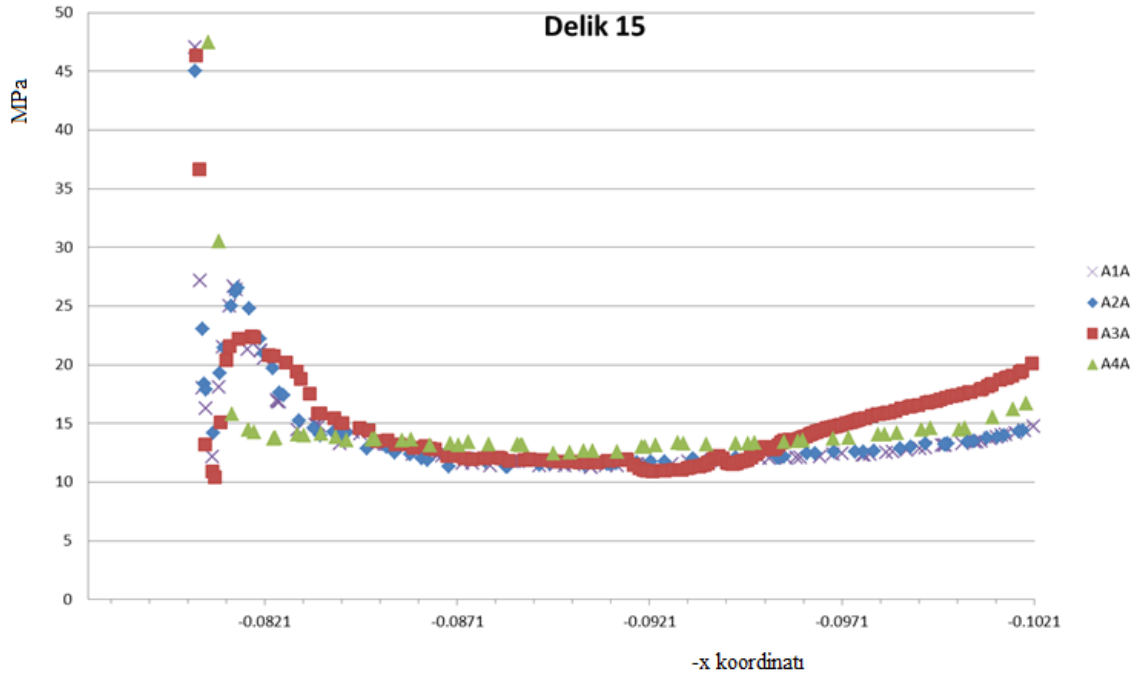
Şekil B.15. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 12)



Şekil B.16. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 13)

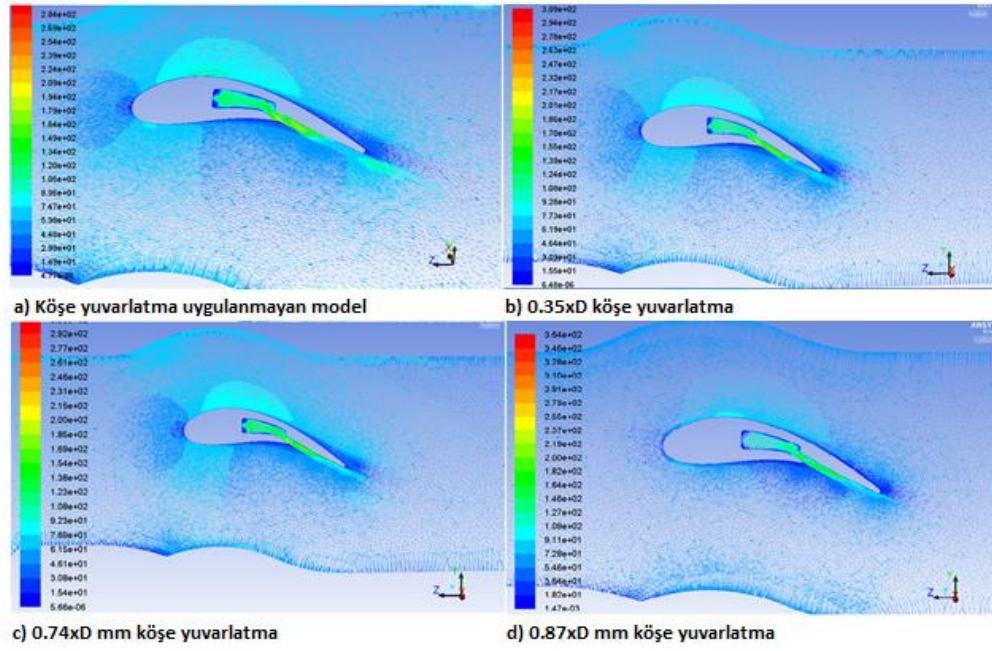


Şekil B.17. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 14)

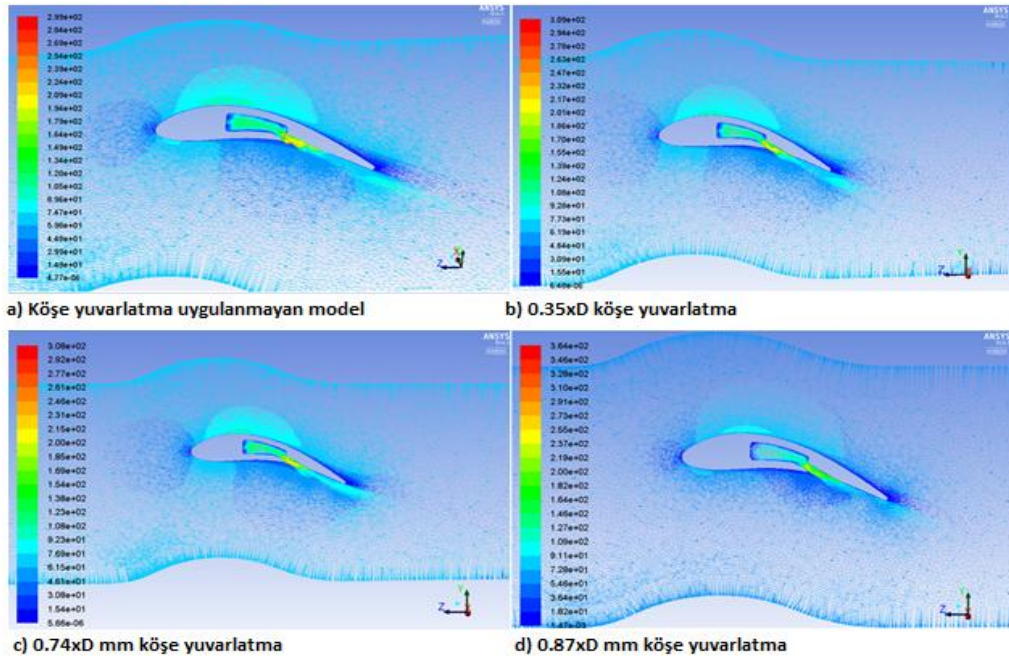


Şekil B.18. Delik ardı kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (Delik 15)

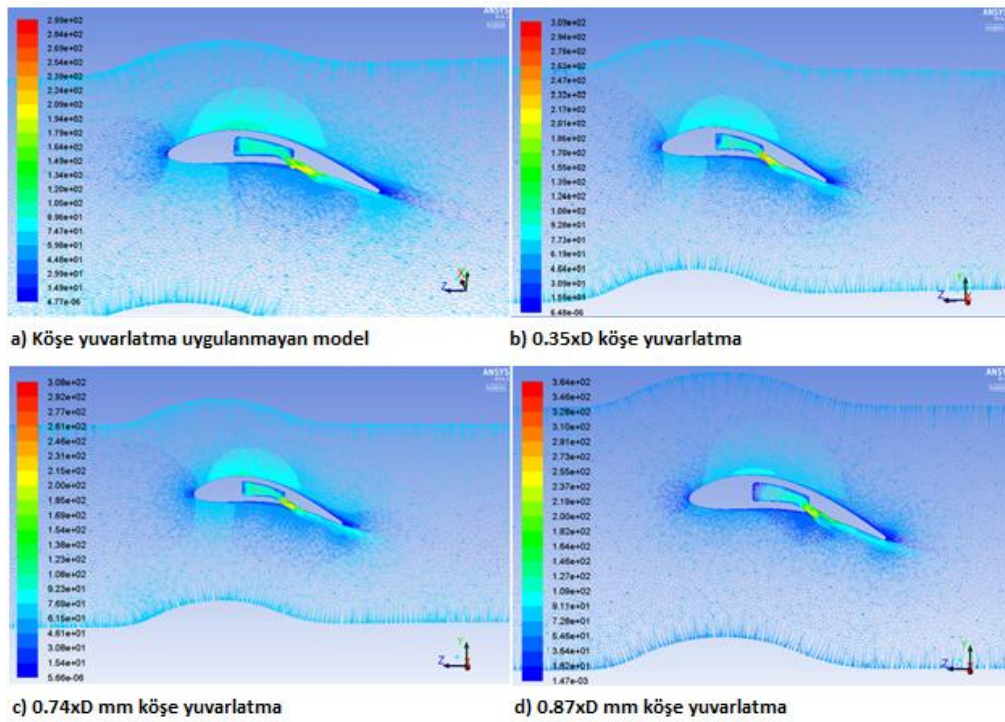
EK AÇIKLAMA-C



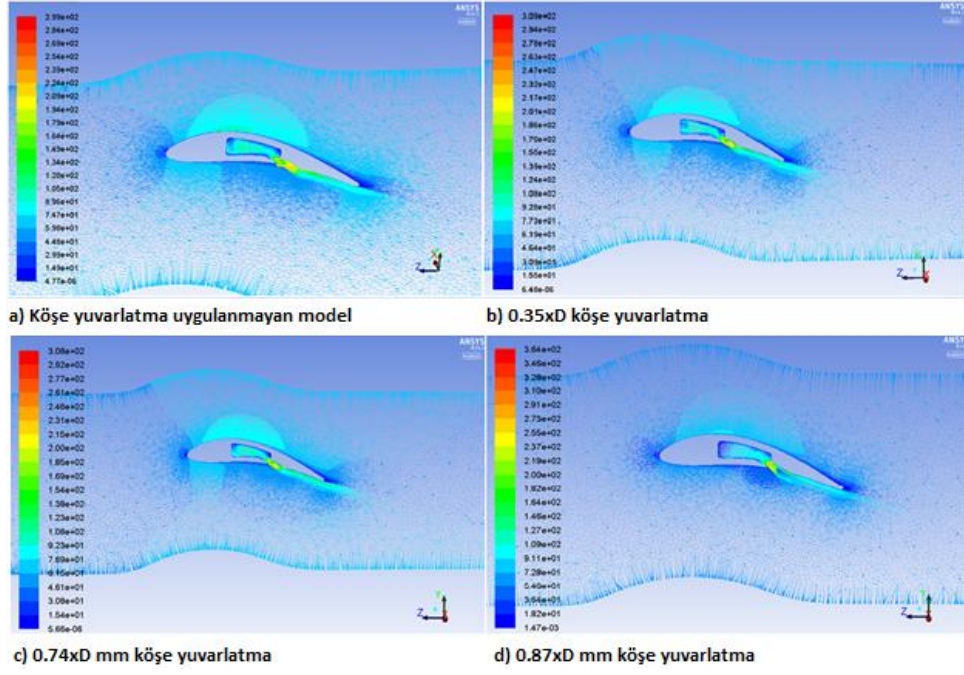
Şekil C.1. Hız vektörleri (Delik 1)



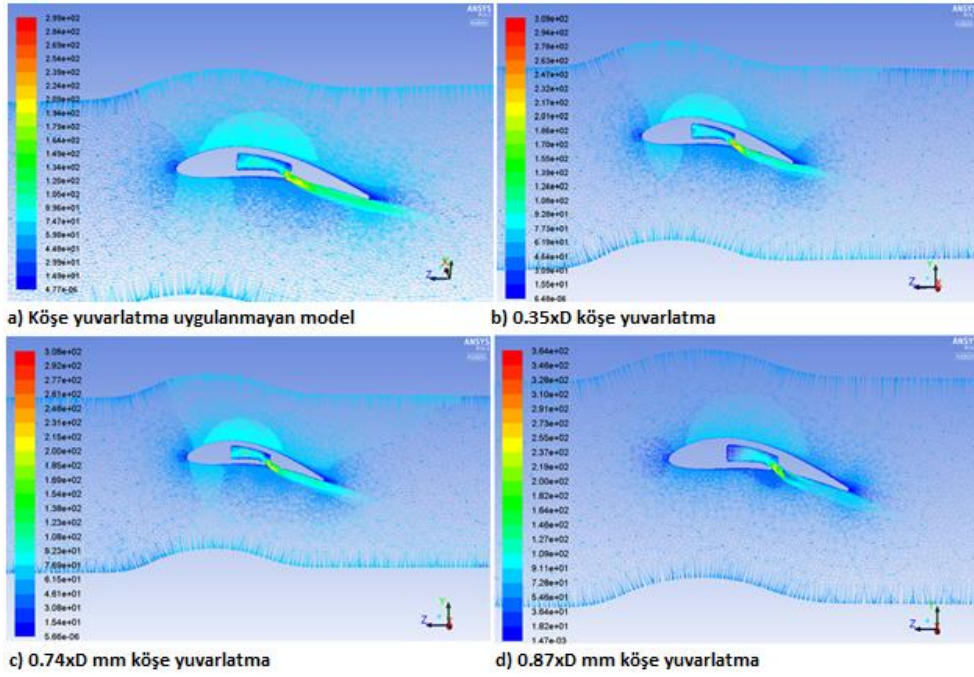
Şekil C.2 Hız vektörleri (Delik 2)



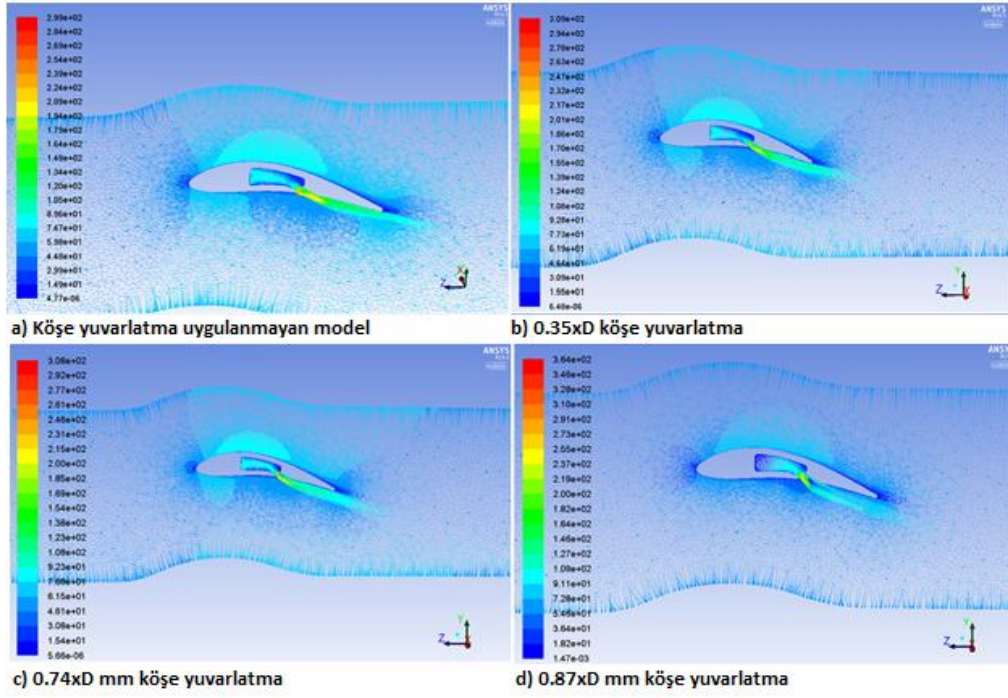
Şekil C.3. Hız vektörleri (Delik 3)



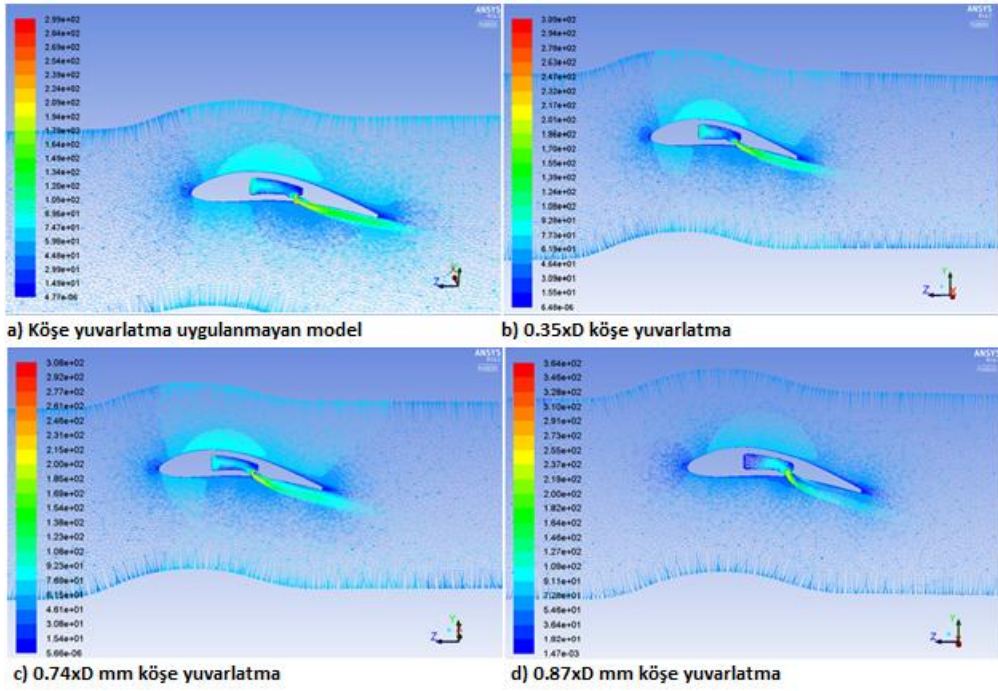
Şekil C.4. Hız vektörleri (Delik 4)



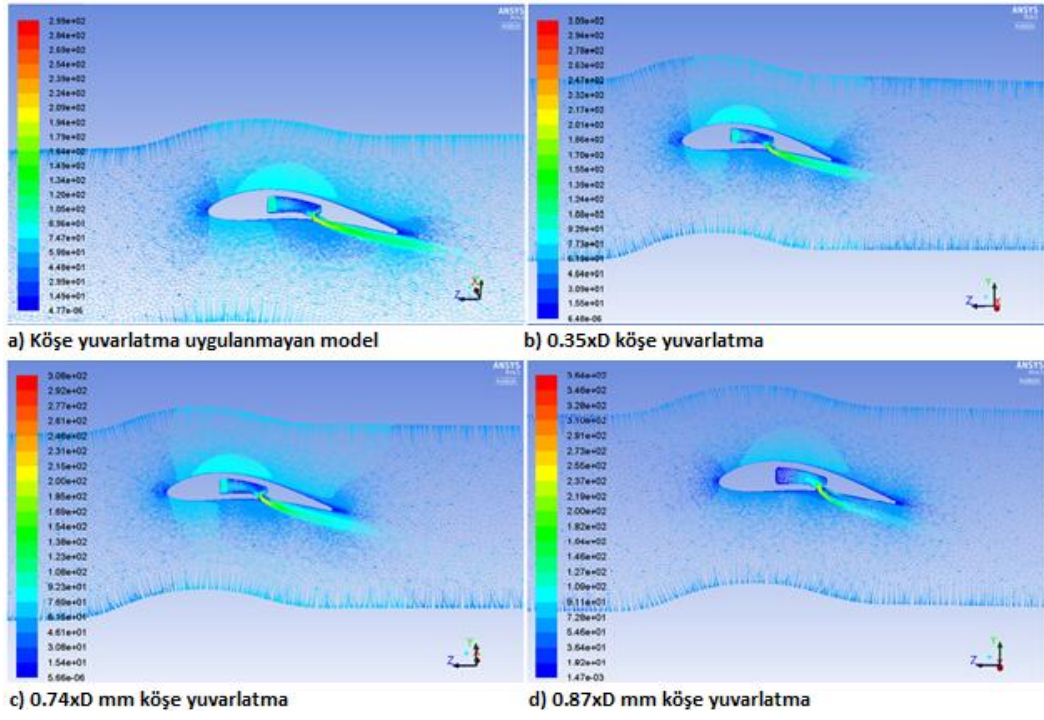
Şekil C.5. Hız vektörleri (Delik 5)



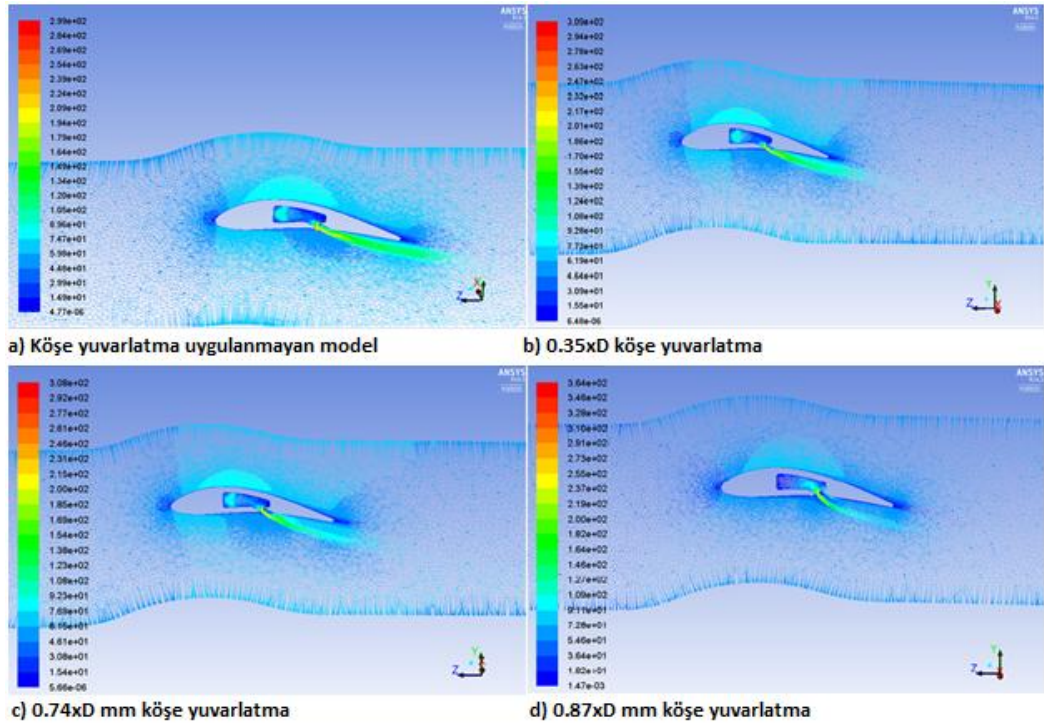
Şekil C.6. Hız vektörleri (Delik 6)



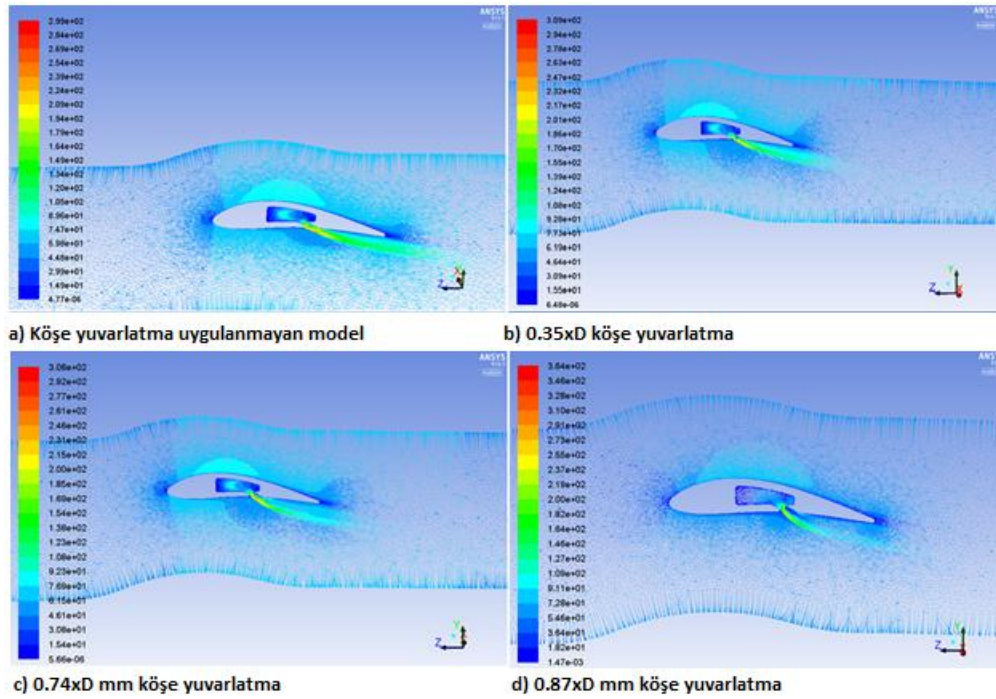
Şekil C.7. Hız vektörleri (Delik 7)



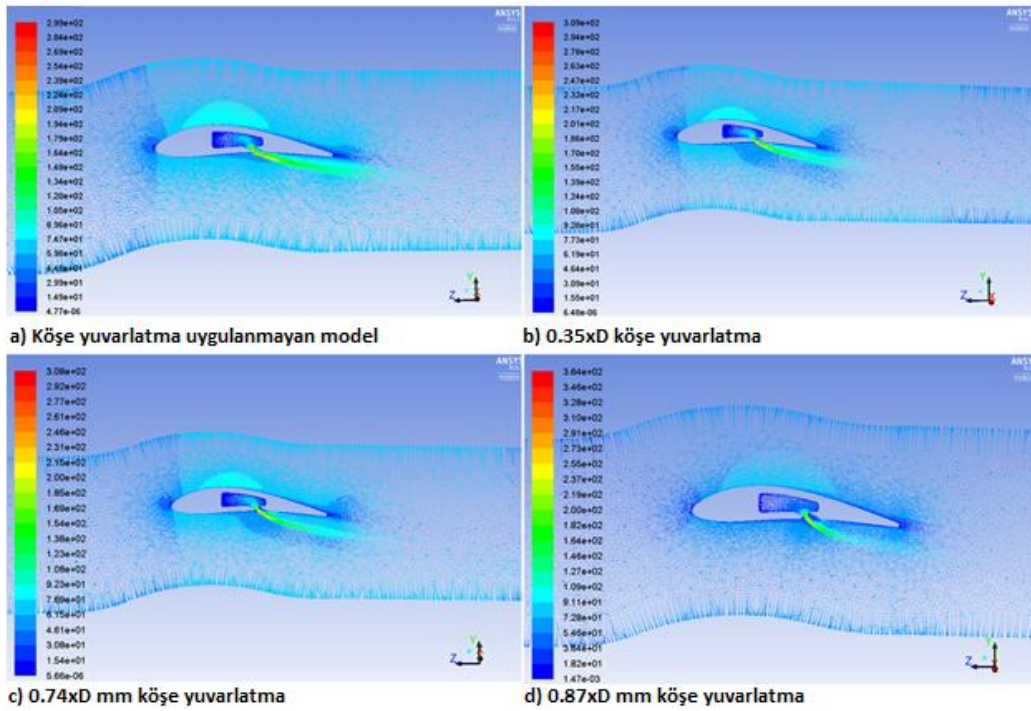
Şekil C.8. Hız vektörleri (Delik 8)



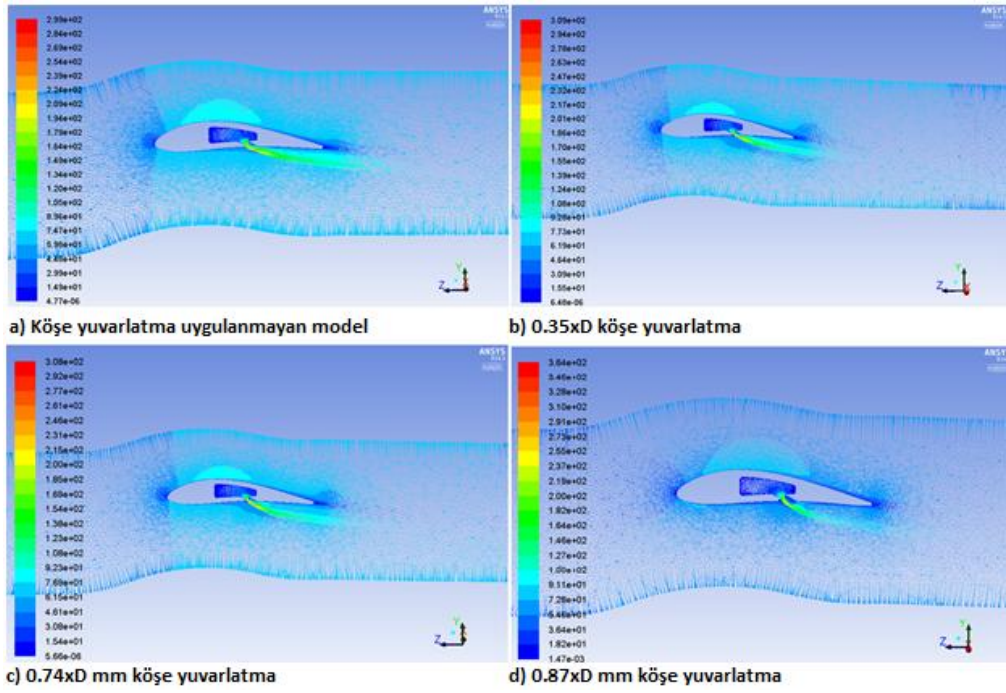
Şekil C.9. Hız vektörleri (Delik 9)



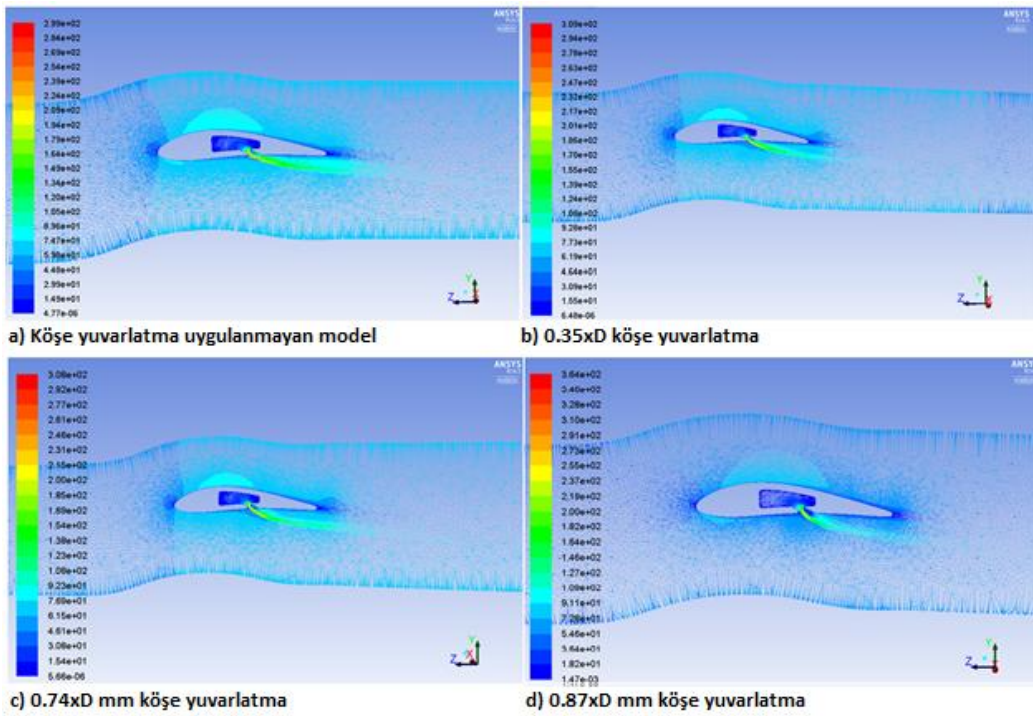
Şekil C.10. Hız vektörleri (Delik 10)



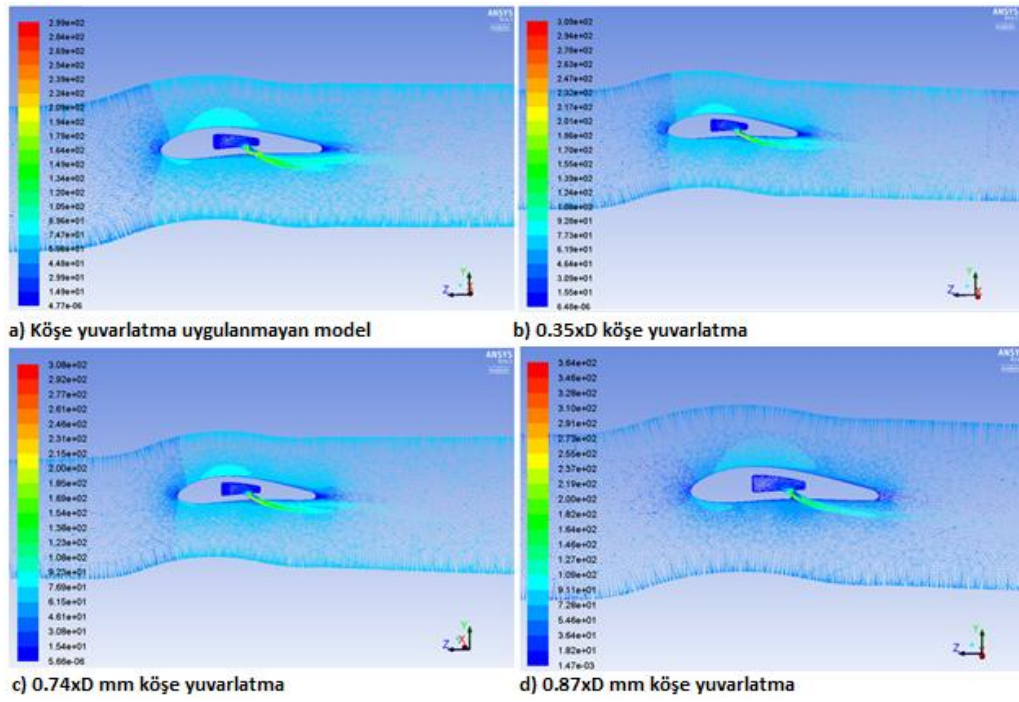
Şekil C.11. Hız vektörleri (Delik 11)



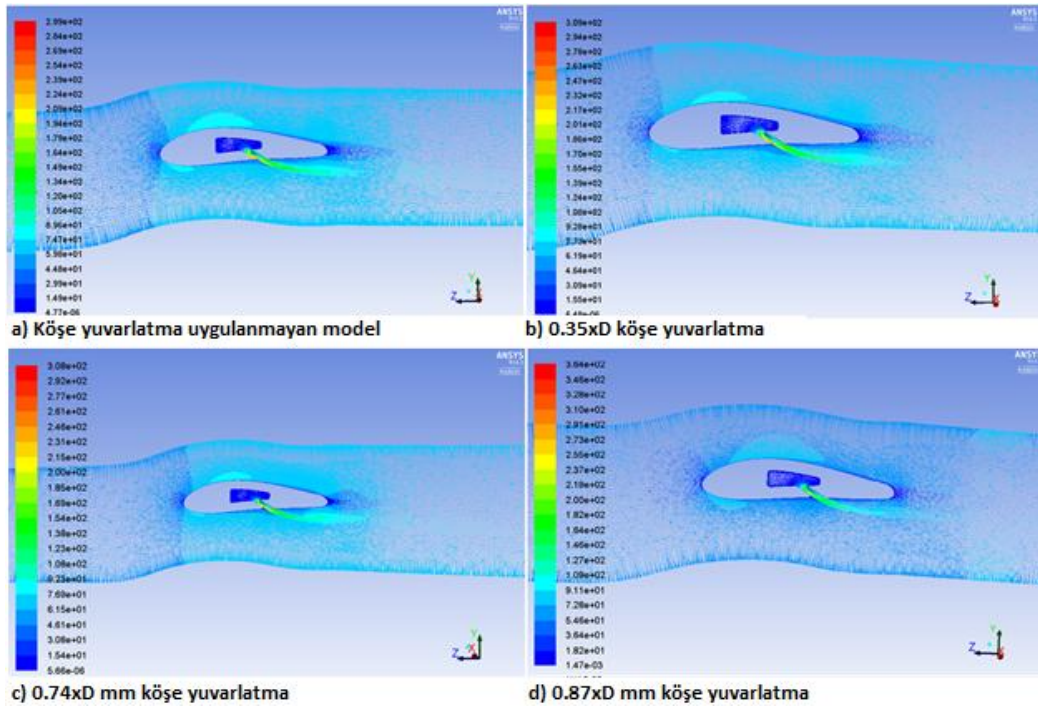
Şekil C.12. Hız vektörleri (Delik 12)



Şekil C.13. Hız vektörleri (Delik 13)



Şekil C.14. Hız vektörleri (Delik 14)



Şekil C.15. Hız vektörleri (Delik 15)

ÖZGEÇMİŞ

Volkan TATAR, 1986 İstanbul doğumlu olup Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2008 yılında mezun oldu.

2010-2012 yılları arasında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji-Termodinamik Bilim Dalında yüksek lisansını tamamladı. Yüksek lisans tezini 2010-2011 yılları arasında üniversiteler arası öğrenci değişimi programı kapsamında Bologna Üniversitesi'nde gerçekleştirdiği proje ile tamamladı.

2010 yılında Tusaş Motor Sanayii'nde termal analiz mühendisi olarak göreve başladı ve şu anda kıdemli termal analiz mühendisi olarak görevine devam etmektedir.