

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİLİ KANAT PROFİLİ ETRAFINDAKİ DÜŞÜK REYNOLDS
SAYILI HAVA VE SU AKIŞLARININ İNCELENMESİ VE
AERODİNAMİK PERFORMANS ANALİZLERİ**

H. TAĞMAÇ DERYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2010

**İKİLİ KANAT PROFİLİ ETRAFINDAKİ DÜŞÜK REYNOLDS
SAYILI HAVA VE SU AKIŞLARININ İNCELENMESİ VE
AERODİNAMİK PERFORMANS ANALİZLERİ**

**INVESTIGATION OF LOW REYNOLDS NUMBER AIR AND
WATER FLOW OVER DOUBLE BLADE PROFILE AND
AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS**

H. TAĞMAÇ DERYA

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2010

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma, jürimiz tarafından **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda**
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Prof. Dr. Cevdet TEZCAN

Üye (Danışman) :
Prof. Dr. Tahir YAVUZ

Üye :
Prof. Dr. Birol KILKIŞ

ONAY

Bu tez 15/09/2010 tarihinde, yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

/ 09 / 2010

Prof. Dr. Emin AKATA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

TEŐEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında bana her türlü konuda destek olan, anlayış ve yol gösteren ve yüksek lisans eğitimim süresince üzerimde büyük emeği olan hocam Sayın Prof. Dr. Tahir YAVUZ'a ve değerli yardımlarını esirgemeyen Sayın Öğr. Gör. Özgür EROL'a ve her zaman yanımda ve destek olan sevgili aileme, ayrıca manevi desteğiyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşım İlknur ALTAŐ'a teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZ

İKİLİ KANAT PROFİLİ ETRAFINDAKİ DÜŞÜK REYNOLDS SAYILI HAVA VE SU AKIŞLARININ İNCELENMESİ VE AERODİNAMİK PERFORMANS ANALİZLERİ

H.Tağmaç Derya

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Ülkemizde ve dünyada geleneksel olarak enerji üreten türbinlerde standart kanat profilleri kullanılmaktadır. Bu kanatların verdiği maksimum kaldırma kuvvet katsayısı 1.6 civarındadır. Bu kanatlı türbinler kullanılarak enerji üretebilmek için gerekli minimum rüzgar hızı 6-7 m/s arasındadır. Bu çalışmamızın amacı, yüksek performans verebilecek rüzgar türbini kanat profili ortaya koymak ve ortaya konulan bu profil kullanılarak rüzgar ve hidrokinetik enerjiden elektrik enerjisi üretebilmektir. Bu tez çalışmasında, serbest akım bölgesinde kanat profili etrafındaki akışkanın değişimi incelenmiştir. Hava ve su ortamında, farklı hücum açılarında, farklı Re sayılarında, büyük-küçük kanat arasının farklı uzaklıklarında ve farklı kanat genişliği oranlarında FLUENT™ programıyla nümerik sonuçlar elde edilmiştir. Bu nümerik sonuçlarla, aynı koşullar altında incelenen NACA4412 kanat profili sonuçları karşılaştırılmıştır. En doğru ve en kesin sonucu elde edebilmek için GAMBIT™ programında 43969 hücreye sahip sıkı ağ yapısı kullanılmıştır. Değişik koşullarda, kanat profiline ait basınç konturları, basınç katsayı dağılımı, maksimum kaldırma katsayısı, maksimum C_L/C_D oranı, hız konturları, akım çizgileri, türbülans şiddeti konturları ve vorteks kopma frekansı elde edilerek optimum kanat yapısına ulaşılmıştır. Bu sonuçlara ulaşılırken FLUENT™ programında en uygun türbülans benzeşim modeli olan Realizable k- ϵ modeli kullanılmıştır. Elde edilen optimum kanadın, kanat elemanı momentum teorisi kullanılarak, uç hız oranıyla değişen burulma açıları elde edilmiştir. Hava ortamında, kanatlar arası $h/c_1=0.95$ ve kanat genişliği oranı $c_2/c_1=0.73$ konumundayken $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında maksimum C_L 23^0 hücum açısında 2.230 olarak elde edilmiştir. Fakat kanattan alınacak maksimum güç katsayısı için önemli olan C_L/C_D oranıdır ve kanat yapısı da buna göre dizayn edilir. Bu kanat yapısında maksimum C_L/C_D oranı, kanat arası mesafe $h/c_1=0.95$ ve kanat genişliği oranı $c_2/c_1=0.73$ konumundayken $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında ve 12^0 hücum

açısında elde edildiği için optimum hücum açısı 12^0 olarak seçilmiştir. NACA4412 kanat profilinde maksimum kaldırma kuvveti 16^0 hücum açısında 1.1 olarak elde edilmiştir. Su ortamında, kanatlar arası $h/c_1=0.88$, kanat genişliği oranı $c_2/c_1=0.73$ konumundayken $Re=2.24 \times 10^5$ sayısında maksimum C_L 30^0 hücum açısında 2.4 olarak elde edilmiştir, fakat maksimum C_L/C_D oranı, kanatlar arası mesafe $h/c_1=0.95$ ve kanat genişliği oranı $c_2/c_1=0.73$ konumundayken $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında ve 18^0 hücum açısında elde edildiği için optimum hücum açısı olarak 18^0 seçilmiştir. NACA4412 kanat profilinde maksimum kaldırma kuvveti 18^0 hücum açısında 1.335 olarak elde edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, hem hava hem de suda kullanılan kanat profilinin, NACA4412 kanat profiline göre aerodinamik performansının daha yüksek olduğu görülmüştür.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Hidrokinetik türbinler, serbest akış türbinleri, kanat dizaynı, aerodinamik kuvvet katsayıları, kanat profili performansı, düşük Re sayısı aerodinamiği

Danışman: Prof. Dr. Tahir YAVUZ

ABSTRACT

INVESTIGATION OF LOW REYNOLDS NUMBER AIR AND WATER FLOW OVER DOUBLE BLADE PROFILE AND AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS

H.Tağmaç Derya

Başkent Üniversitesi Knowledge of Science Institute

Energy Engineering Major Field of Study

As traditionally, in our country and in the world, standart turbine airfoils are used for generating energy. Provided that the maximum lift coefficient of the blade is around 1.6. By using these turbines, minimum required wind speed is between 6-7 m/s for generating energy. The purpose of this study, reveal that a wind turbine blade profile which can provide high performance and produce electric energy from hydrokinetic energy with use this profile. In this thesis, fluid changes of around the airfoil analysed in the free flow. In air and water conditions, numerical solutions derived with FLUENT™ program at different angles of attack, different Re numbers, different distances between the blades and different blade span ratio. NACA4412 blade profile's numerical solutions were compared with this numerical solutions which examined under the same conditions. Fine mesh is used with 43969 cells in GAMBIT™ program to obtain the most accurate and precise results. In different conditions, optimum blade form has reached with obtained pressure contours, pressure coefficient, distribution, maximum lift coefficient, maximum C_L/C_D ratio, velocity contours, stream lines, turbulence intensity contours and vorteks break frequency of blade profile. While reaching this solutions, the Realizable k- ϵ model has been used, which is the most appropriate similarity turbulence model in FLUENT™ program. Obtained the optimum blade's twist angle, which is changing with tip speed ratio, with used blade element momentum theory. In air flow, while the distance between the blades $h/c_1=0.95$, blade span ratio $c_2/c_1=0.73$ and $Re=1.5 \times 10^5$ number, the maximum lift coefficient as obtained 2.230 at 23° attack angle. But, C_L/C_D ratio is more important to provide maximum power coefficient and blade form is designed according to this ratio. The optimum attack angle was chosen 12° . Because, the maximum C_L/C_D ratio was obtained at this attack angle while the distance between the blades $h/c_1=0.95$, blade span ratio $c_2/c_1=0.73$ and $Re=1.5 \times 10^5$ number. For

NACA4412 blade profile, the maximum lift coefficient as obtained 1.1 at 16° attack angle. In water flow, while the distance between the blades $h/c_1=0.88$, blade span ratio $c_2/c_1=0.64$ and $Re=2.24 \times 10^5$ number, the maximum lift coefficient as obtained 2.4 at 30° attack angle. But, the optimum attack angle was chosen 18° . Because, the maximum C_L/C_D ratio was obtained at this attack angle while the distance between the blades $h/c_1=0.95$, blade span ratio $c_2/c_1=0.73$ and $Re=4.5 \times 10^5$ number. For NACA4412 blade profile, the maximum lift coefficient as obtained 1.335 at 18° attack angle. As a result of calculations, double blade profile's aerodynamic performance was found to be higher, which is used in air and water flows, according to NACA4412 blade profile.

KEYWORDS: Hydrokinetic turbines, free flow turbines, blade design, aerodynamic force coefficients, airfoil performance, low Re number aerodynamics.

ADVISOR: Prof. Dr. Tahir YAVUZ

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	Sayfa
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
1 GENEL BİLGİLER VE TEZ AMAÇ KAPSAMI.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Rüzgar Gücünün Kullanımı ve Tarihsel Gelişimi	2
1.3. Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Kullanımı ve Hedefleri.....	5
1.4. Literatür Araştırması.....	7
1.4.1. Rüzgar türbin kanatları konusunda yapılan çalışmalar.....	7
1.4.2. Hidrokinetik enerji konusunda yapılan çalışmalar.....	10
1.5. Amaç ve Kapsam.....	11
2 RÜZGAR TÜRBİN TEORİLERİ.....	13
2.1. Giriş.....	13
2.2. Rüzgar Türbin Teorileri.....	13
2.2.1. Momentum teorisi.....	13
2.2.2. Kanat elemanı teorisi.....	25
3 YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	44
3.1. Giriş.....	44
3.2. Aerodinamik Kuvvetler ve Kavramlar.....	45
3.2.1. Basınç dağılımı.....	46
3.2.2. Kaldırma, sürükleme ve boyutsuz parametreler	47

3.2.3. Aerodinamik karakteristikler.....	50
3.2.4. Aerodinamik performansın artırılması.....	51
3.2.5. İkili kanat profili boyutsal çözümleme.....	53
3.3. Sayısal Analiz ve Hesaplamalar.....	56
3.3.1. Sayısal çözümleme için kullanılan FLUENT™ programı.....	57
4 SAYISAL SONUÇLAR.....	61
4.1. Giriş.....	61
4.2. Sayısal Sonuçlar.....	61
4.2.1. Rüzgar ortamındaki sayısal sonuçlar.....	62
4.2.2. Su ortamındaki sayısal sonuçlar	93
4.2.3. Rüzgar ve su ortamındaki sonuçların irdelenmesi.....	120
5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	125
5.1. Sonuçlar.....	125
5.2. Öneriler.....	134
KAYNAKLAR LİSTESİ.....	136

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Savonius rotoru	4
Şekil 1.2 Darrieus rotoru	4
Şekil 2.1 İki boyutlu boru akış sınırı.....	14
Şekil 2.2 Rotor arkasındaki hız ve eksenel indüksiyon faktörüne göre değişen güç ve itki katsayıları.....	17
Şekil 2.3 Rotordan geçen rüzgarın girdap hareketi.....	19
Şekil 2.4 İki boyutlu boru akış sınırı ve kesit alanı.....	19
Şekil 2.5 Havanın kanat çapı boyunca teğetsel hareketi.....	20
Şekil 2.6 Uç hız oranına göre güç katsayısı.....	24
Şekil 2.7 Kanat boyunca değişen eksenel ve teğetsel indüksiyon faktörleri.....	24
Şekil 2.8 N adet bölüme ayrılmış kanat yarıçapı.....	25
Şekil 2.9 Bir pervanenin kanat kesiti.....	25
Şekil 2.10 Burulmuş ve burulmamış palada itme kuvvetinin yarıçap boyunca dağılımının karşılaştırılması.....	26
Şekil 2.11 Rüzgar türbininin çevresel dönüşü ve üzerine dik gelen rüzgar hızı.....	26
Şekil 2.12 Kanat kesit geometrisi ve üzerine gelen kuvvetler.....	27
Şekil 2.13 Kanat genişliğinin r/R oranına göre değişimi.....	32
Şekil 2.14 Kanat burulma açısının r/R oranına göre değişimi.....	32
Şekil 2.15 Kanat elemanının dairesel halka yapısı.....	33
Şekil 2.16 Bilinen bir kanat kesitinin deneysel ve sayısal grafik çözüm metodu.....	36
Şekil 2.17 Kanat elemanları momentum teorisi denklemlerinin çözüm yöntemleri.....	39
Şekil 2.18 Eksenel indüksiyon faktörüne göre itki kuvvet katsayısının değişimi.....	40
Şekil 3.1 Bazı modern kanat profilleri.....	44
Şekil 3.2 Kanat model resmi.....	45
Şekil 3.3 Kanat modelinin kanat kesit profili ve boyutları.....	45
Şekil 3.4 Küçük hücum açısına sahip bir kanat profili etrafındaki basınç dağılımı.....	46
Şekil 3.5 Basınç katsayısının veter uzunluğu boyunca değişimi.....	47
Şekil 3.6 Kanat kesiti üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler.....	47
Şekil 3.7 Kanat profili yüzeyinde oluşan kuvvetler.....	48
Şekil 3.8 Kanat profilinin karakteristikleri.....	51
Şekil 3.9 Hücum açısının değişimi ile kanat profili etrafındaki akış.....	52
Şekil 3.10 Taşıma ve sürüklenme kuvveti katsayılarının hücum açısıyla değişimi.....	53
Şekil 3.11 Bir kanat profilinin geometrik benzerlik örneği.....	53
Şekil 3.12 İkili kanat profilinin prototip ve model ölçüleri.....	54

Şekil 3.13	Rüzgar türbin tipine göre uç hız oranı-güç katsayısı ilişkisi.....	56
Şekil 3.14	İkili kanat profilinin model ölçüleri.....	57
Şekil 3.15	Kanat profili için oluşturulan ağ yapısı.....	58
Şekil 3.16	İkili kanat profilinin eleman sayısına göre değişen C_L değerleri.....	60
Şekil 3.17	NACA4412 kanat profilinin eleman sayısına göre değişen C_L değerleri.....	60
Şekil 4.1	Basınç konturu ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(Pa).....	63
Şekil 4.2	Basınç konturu ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(Pa).....	63
Şekil 4.3	Basınç konturu ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(Pa).....	64
Şekil 4.4	Basınç konturu ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(Pa).....	64
Şekil 4.5	Basınç dağılımı ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	66
Şekil 4.6	Basınç dağılımı ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	66
Şekil 4.7	Basınç dağılımı ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	66
Şekil 4.8	Basınç dağılımı ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	67
Şekil 4.9	NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	68
Şekil 4.10	NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	68
Şekil 4.11	NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	69
Şekil 4.12	Hız konturu ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(m/s).....	71
Şekil 4.13	Hız konturu ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(m/s).....	71
Şekil 4.14	Hız konturu ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(m/s).....	71
Şekil 4.15	NACA4412 hız konturu ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(m/s).....	73
Şekil 4.16	NACA4412 hız konturu ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(m/s).....	73
Şekil 4.17	NACA4412 hız konturu ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(m/s).....	73
Şekil 4.18	Akım çizgisi ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	75
Şekil 4.19	Cidar kayma gerilmesi ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	75
Şekil 4.20	Akım çizgisi ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	76
Şekil 4.21	Cidar kayma gerilmesi ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	76
Şekil 4.22	Akım çizgisi ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	76
Şekil 4.23	Cidar kayma gerilmesi ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	77
Şekil 4.24	Akım çizgisi ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	77
Şekil 4.25	Cidar kayma gerilmesi ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	77
Şekil 4.26	NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	79
Şekil 4.27	NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	79
Şekil 4.28	NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	79
Şekil 4.29	NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	80
Şekil 4.30	Türbülans şiddeti ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	81
Şekil 4.31	Türbülans şiddeti ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	81
Şekil 4.32	Türbülans şiddeti ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	81
Şekil 4.33	Türbülans şiddeti ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	82
Şekil 4.34	Güç dağılım yoğunluğu.....	83
Şekil 4.35	Vorteks kopma frekansı ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	84
Şekil 4.36	Vorteks kopma frekansı ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	84
Şekil 4.37	Vorteks kopma frekansı ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	84

Şekil 4.38	Vorteks kopma frekansı ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	85
Şekil 4.39	Kanat profili üzerinden girdap dağılımları.....	85
Şekil 4.40	Farklı kanat arası açıklıklarında C_L katsayısı ($c_2/c_1=0.64$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	86
Şekil 4.41	Farklı kanat arası açıklıklarında C_L/C_D oraları katsayısı ($c_2/c_1=0.64$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	86
Şekil 4.42	Farklı kanat genişliği oranlarında C_L katsayısı ($h/c_1=0.95$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	87
Şekil 4.43	Farklı kanat kanat genişliği oranlarında C_L/C_D oraları katsayısı ($h/c_1=0.95$, $Re=1.5 \times 10^5$).....	87
Şekil 4.44	Optimum ikili kanat profili ile NACA4412 kanat profilinin C_L ve C_D katsayıları ($Re=1.5 \times 10^5$).....	88
Şekil 4.45	Basınç konturu ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(Pa).....	94
Şekil 4.46	Basınç konturu ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(Pa).....	94
Şekil 4.47	Basınç konturu ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(Pa).....	94
Şekil 4.48	Basınç konturu ($\alpha=30^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(Pa).....	95
Şekil 4.49	Basınç dağılımı ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	96
Şekil 4.50	Basınç dağılımı ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	96
Şekil 4.51	Basınç dağılımı ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	97
Şekil 4.52	Basınç dağılımı ($\alpha=30^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	97
Şekil 4.53	NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	98
Şekil 4.54	NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	98
Şekil 4.55	NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	99
Şekil 4.56	Hız konturu ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(m/s).....	100
Şekil 4.57	Hız konturu ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(m/s).....	100
Şekil 4.58	Hız konturu ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(m/s).....	101
Şekil 4.59	NACA4412 hız konturu ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(m/s).....	102
Şekil 4.60	NACA4412 hız konturu ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(m/s).....	102
Şekil 4.61	NACA4412 hız konturu ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(m/s).....	102
Şekil 4.62	Akım çizgisi ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	103
Şekil 4.63	Akım çizgisi ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	104
Şekil 4.64	Akım çizgisi ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	104
Şekil 4.65	Akım çizgisi ($\alpha=30^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	104
Şekil 4.66	NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	106
Şekil 4.67	NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	106
Şekil 4.68	NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	106
Şekil 4.69	NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=26^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	107
Şekil 4.70	Türbülans şiddeti ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	108
Şekil 4.71	Türbülans şiddeti ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	108
Şekil 4.72	Türbülans şiddeti ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	108
Şekil 4.73	Türbülans şiddeti ($\alpha=30^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	109
Şekil 4.74	Vorteks kopma frekansı ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	110
Şekil 4.75	Vorteks kopma frekansı ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	110
Şekil 4.76	Vorteks kopma frekansı ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	110

Şekil 4.77	Vorteks kopma frekansı ($\alpha=30^0$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	111
Şekil 4.78	Farklı hız ve hücum açısındaki C_L ve C_D katsayıları ($h/c_1=0.95$).....	112
Şekil 4.79	Farklı hız ve hücum açısındaki C_L/C_D oranları ($h/c_1=0.95$).....	112
Şekil 4.80	Farklı kanat arası açıklıklarında C_L katsayıları ($c_2/c_1=0.64$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	113
Şekil 4.81	Farklı kanat arası açıklıklarında C_L/C_D oranları ($c_2/c_1=0.64$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	113
Şekil 4.82	Farklı kanat genişliği oranlarında C_L katsayıları ($h/c_1=0.95$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	114
Şekil 4.83	Farklı kanat kanat genişliği oranlarında C_L/C_D oranları ($h/c_1=0.95$, $Re=4.5 \times 10^5$).....	114
Şekil 4.84	Optimum ikili kanat profili ile NACA4412 kanat profilinin C_L ve C_D katsayıları ($Re=4.5 \times 10^5$).....	115
Şekil 4.85	İkili kanadın hava ve su ortamında optimum koşullardaki C_L katsayıları.....	122
Şekil 4.86	İkili kanadın hava ve su ortamında optimum koşullardaki C_L/C_D oranları.....	123
Şekil 4.87	Türkiye rüzgar atlası.....	133

ÇİZELGELER LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Türkiye’de hedeflenen rüzgar kurulu gücü ve rüzgar enerjisi üretimi.....	6
Çizelge 1.2 Avrupa’daki rüzgar enerji santrallerinin toplam kurulu gücü.....	6
Çizelge 2.1 Uç hız oranına göre $C_{p,max}$ ve uç noktadaki a_2 değerleri...	23
Çizelge 2.2 Kanat kökünden uca doğru olan kanat genişliği ve burulma açısı dağılımları.....	32
Çizelge 2.3 Farklı uç hız oranı ve kanat sayılarında, kanat boyunca değişen kanat genişliği ve izafi (gelen) rüzgar açısı.....	43
Çizelge 4.1 Hava ortamında 1.5×10^5 Re sayısında, $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ konumlarında kanat kesit açıları.....	89
Çizelge 4.2 Hava ortamında, farklı kanat aralıklarında ve farklı kanat genişliği oranlarında elde edilen tüm analiz sonuçları.....	91
Çizelge 4.3 Optimum kanat profili ile elde edilen güç, itki ve tork değerleri.....	92
Çizelge 4.4 NACA4412 kanat profili ile elde edilen güç, itki ve tork değerleri.....	92
Çizelge 4.5 Su ortamında 4.5×10^5 Re sayısında, $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ konumlarında kanat kesit açıları.....	116
Çizelge 4.6 Su ortamında, farklı kanat aralıklarında ve farklı kanat genişliği oranlarında elde edilen tüm analiz sonuçları(1/2).....	117
Çizelge 4.7 Su ortamında, farklı kanat aralıklarında ve farklı kanat genişliği oranlarında elde edilen tüm analiz sonuçları(2/2).....	118
Çizelge 4.8 Optimum kanat profili ile elde edilen güç, itki ve tork değerleri.....	119
Çizelge 4.9 NACA4412 kanat profili ile elde edilen güç, itki ve tork değerleri.....	119
Çizelge 4.10 Hava ve su ortamında elde edilen maksimum değerler...	120
Çizelge 4.11 Hava ve su ortamında elde edilen güç, itki, tork değerleri	123
Çizelge 4.12 Hava ve su ortamında elde edilen vorteks kopma frekansları.....	124
Çizelge 4.13 Farklı su hızlarında elde edilen optimum parametreler ve kanat kesit açıları.....	129

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

C_P	Rüzgar türbin rotorunun güç katsayısı
$C_{P,max}$	Maksimum rotor güç katsayısı
C_T	Rüzgar türbin rotorunun tork katsayısı
P	Türbin rotorunun güç çıkışı (W)
P	Statik basınç (Pa)
\dot{m}	Rotor düzleminde geçen hava debisi (kg/s)
U_1	Rüzgarın giriş hızı (m/s)
U_{rel}	Bağıl rüzgar hızı (m/s)
$U_{2=3}$	Rotordaki düzenli rüzgar hızı (m/s)
U_4	Rüzgarın çıkış hızı (m/s)
u_2	Rotor düzlemindeki rüzgarın aksenal hızı
v_2	Rotor düzlemindeki rüzgarın dönел hızı
w_2	Rotor düzlemindeki rüzgarın açısal hızı
u_4	Çıkıştaki rüzgarın aksenal hızı
v_4	Çıkıştaki rüzgarın dönел hızı
w_4	Çıkıştaki rüzgarın açısal hızı
A	Rüzgar türbin rotorunun alanı (m ²)
R	Rüzgar türbin rotorunun yarıçapı (m)
r	Rotor düzlemindeki radyal koordinat (m)
r_w	Çıkıştaki radyal koordinat (m)
dr	Radyal genişlik
p_1	Girişteki hava basıncı (Pa)

p_2	Rotor girişindeki hava basıncı (Pa)
p_3	Rotor çıkışındaki hava basıncı (Pa)
P'	Rotor kanadı etrafındaki basınç kaybı (Pa)
P_4	Çıkıştaki hava basıncı (Pa)
P_{ref}	Referans basıncı (Pa)
v_{ref}	Referans hız (m/s)
T	Rotor itme kuvveti (N)
Q	Tork (N.m)
M	Moment (N.m)
C_M	Moment katsayısı
F_D	Kanat elemanı üzerindeki sürüklenme kuvveti (N)
F_L	Kanat elemanı üzerindeki kaldırma kuvveti (N)
C_D	Sürüklenme kuvveti katsayısı
C_L	Kaldırma kuvveti katsayısı
F_T	Rotorun süpürdüğü daireye etkiyen teğetsel kuvvet (N)
F_N	Dönme düzlemine etkiyen normal kuvvet (N)
N_e	Kanat eleman sayısı
B	Rotorun sahip olduğu kanat sayısı
a	Eksenel indüksiyon faktörü
a'	Teğetsel indüksiyon faktörü
λ	Rotorun kanat ucu – hız faktörü
λ_r	Bölgesel kanat ucu – hız faktörü
c	Kanat genişliği (m)
c_1	Üst kanat genişliği (m)
c_2	Alt kanat genişliği (m)

L	Kanat boyu (m)
t	Kanat kalınlığı (m)
h	Üst kanat ile alt kanat arasındaki en uzun mesafe (m)
N	Devir sayısı
f	Vorteks kopma frekansı
S_t	Strouhal sayısı
ρ	Akışkan yoğunluğu
Ω	Rüzgar türbini rotorunun açısal hızı (rad/s)
α	Hücum açısı
θ_p	Kanat kesit açısı
$\theta_{p,o}$	Kanat ucundaki kesit burulma açısı
θ_T	Kanat burulma açısı
φ	Bağıl rüzgar hızının gelme açısı
σ'	Kanat dayanıklılık oranı
ν	Havanın kinematik vizkozitesi
Z_w	Cidar kayma gerilmesi
M_a	Mach sayısı
k	Türbülans kinetik enerjisi
ε	Türbülans yayılma oranı
Re	Reynolds sayısı
HAD	Hesaplmalı akışkanlar dinamiği
RANS	Reynolds ortalımalı Navier-Stokes
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics

GENEL BİLGİLER VE TEZ AMAÇ-KAPSAMI

1.1 Giriş

Gelişen ülkemizde sivil nüfusun artması ve bununla birlikte tüketilen enerjinin de artmasıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinin de önemi artmakta ve rüzgar enerjisine alternatif enerji kaynağı olarak bakılmaktadır. Günümüzde ülkemizin içinde bulunduğu enerji darboğazı giderek artmaktadır. Enerji kaynakları bakımından yeterli çeşitliliğe sahip olan ülkemizde bu kaynakların kullanımı yeterli değildir. Bu nedenle ülkemiz enerji ithalat eden konumundadır. 2000 yılında Türkiye'nin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi 128.500 GWh iken bu miktarın 3.800 GWh'ni yurtdışından ithal etmiştir. Ülkemizin gelişmekte olan sanayiye bağlı olarak yıllık enerji talebi % 8 artış göstermektedir [1]. Bundan dolayı dışa bağımlı olmayan enerji kaynaklarına doğru arayışlar başlamıştır. Bunlardan birisi de rüzgâr teknolojisidir. Son dönemlerde rüzgâr enerjisi teknolojisi hızla ilerlemektedir. Rüzgârdan maksimum derecede enerji elde etmek için aerodinamik esaslara uygun tasarım yapılması gereklidir.

Günümüzde aerodinamik performansı arttırmak için rüzgar türbinlerinde değişik kanat tipleri denenmektedir. Bu tezde kullanacağımız ikili rüzgar kanat tipi buna örnek olarak verilebilir. Bu tür kanat tipleriyle akış kontrol edilerek, sürüklenme kuvvetinin azaltılması, taşıma kuvvetinin artırılması, tutunma hızı kaybının geciktirilmesiyle akışın kısmi veya tamamen yüzeye bağlanması gibi faydalar sağlanabilir.

Son yıllardaki aerodinamik araştırmalar, rüzgar türbinlerinde daha yüksek taşıma kuvveti/sürüklenme oranı gibi konular üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu konularda çalışmak için aerodinamik deney olanaklarının kısıtlı ve çok pahalı olmasından dolayı türbin kanadı etrafındaki akışlar incelenmektedir. Kanat üretim firmalarının hemen hemen hepsinde, akış problemlerinin incelenmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çok yaygındır. Kanat etrafındaki akış bileşenlerinin sayısal hesabıyla kanat tasarımı üzerinde düzeltmeler yapılarak taşıma kuvveti artırılıp, sürüklenme kuvveti ve yunuslama momentini azaltma yolları aranmaktadır.

Bu bilgiler ışığında, düşük su ve hava hızlarında, ikili kanat profilinin aerodinamik karakteristiği üzerindeki etkilerini ortaya koymak, ikili kanatlı bir türbün kanadının maksimum performans için optimum geometrik değerleri ve hücum açısı belirlenecektir. Böylece farklı bir türbin kanadının türbin performansına etkilerini sayısal olarak belirlenebilecektir.

1.2 Rüzgâr Gücünün Kullanımı ve Tarihsel Gelişimi

Rüzgâr değirmenlerinin mekanik güç üretmekteki kullanılışığı son bin yıldır bilinmektedir. Rüzgâr gücünün ilk olarak Doğu Hindistan, Tibet, İran ve Afganistan'da kullanıldığından bahsedilmektedir. Rüzgâr enerjisinin kullanımıyla ilgili, 1. ve 12.YY arasındaki neredeyse tüm hikâyelerin ve kayıtların Yakın Doğu, Orta Asya ve dünyanın bu bölgelerinden geldiği görülmektedir. Aynı zamanda rüzgâr enerjisi kullanımının doğduğu yerler olarak bilinmektedir.

Rüzgâr enerjisinin ilk kullanımı M.Ö. 200 yıllarında İran'da ve M.S. 250 yıllarında Roma İmparatorluğu'nda görülmektedir. Bununla beraber ilk kullanışlı rüzgâr değirmenleri 7.YY'dan itibaren Sistan, Afganistan'da dikey eksenli olarak kullanılmıştır. 12.YY'la birlikte dikey eksenli rüzgâr değirmenlerinin gelişimi Uzak Doğu'ya kadar ilerlemiştir. İlk dikey eksenli rüzgâr değirmenlerinin basit açıklaması sonraki yüzyıllarda değirmen taşları yerine yelken kullanılması, sürücüyü yükselterek rotorun daha yüksek rüzgâr hızlarına maruz kalmasını sağlayarak çıkışı güçlendirilmesi ve çalışma yüzeyini güçlendirmek amacıyla kumaş yerine saz kullanılmasıyla ilerletilmiştir.

Dikey eksenli İran rüzgâr değirmenleri asla Avrupa'da kullanılmamıştır. 12.YY sonunda, tamamen farklı bir tip olan yatay eksenli rüzgâr değirmenleri türemeye başlamıştır. Bu gelişme, dikey eksenli İran rüzgâr değirmenlerinin, rüzgâr değirmenlerinin teknik gelişimine bıraktığı bilmecenin ardından ikinci bir bilmece olmuştur.

Avrupa ülkelerinden önce, yatay eksenli rüzgâr değirmenleri Aktuk Türklerinden Ebuliz (1153) tarafından geliştirilmiş ve 1200'lü yıllarda Diyarbakır yöresinde kullanılmıştır. Ancak, Kuzeybatı Avrupa, Fransa'nın bazı bölgeleri, Almanya, Büyük Britanya, İberya, Belçika, Hollanda ve Lüksemburg, İran değirmenlerinin

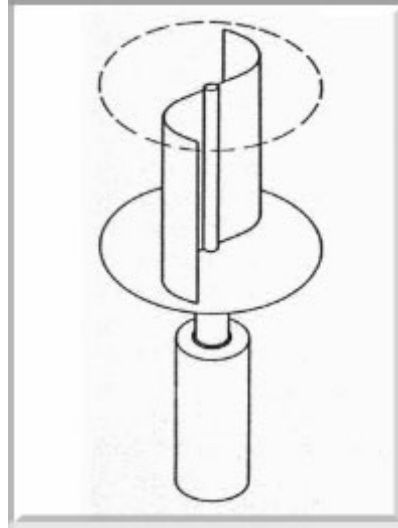
tersine yelkenleri taşıyan şaftı dikey yerine yatay şekilde yerleştirilen ve en efektif tip olan değirmeni geliştiren ilk bölgeler olarak bilinir. Kısa süre içinde, on binlerce dikey eksenli Avrupa rüzgar değirmeni su pompalama, tahıl öğütme, testereyle tahta kesme ve kuvvet elemanları gibi mekanik elemanların neredeyse hepsinde kullanılmaya başlanmıştır.

Dikey eksen rüzgar değirmenleri, yatay eksen olanlara göre daha karmaşık yapılarıdır. Bunun nedeni gücün yatay rotor şaftından dikey şafta aktarılması, değirmeni rüzgara çevirmek ve rotoru gerektiğinde durdurmak gibi üç adet mühendislik problemi olmasıydı; fakat yatay eksen rüzgar değirmenlerinin benimsenmesi çok daha verimli olmalarına bağlıdır.

Dikey değirmenler yerine yatay değirmenlerin kullanımının tarihsel olarak düşünüldüğünden çok daha fazla önemi var. Dişli mekanizması rotor eksenini dikeyden yataya çeviriyor olsa da, yelkenlerin hareketi de 90° döndürülmelidir. Bu gerçekten devrim niteliğindedir; çünkü bu basitçe rüzgar doğrultusuna normal kuvveti üreten, yelkenin yüzeyinde yumuşak bir şekilde akan rüzgar eyleminin, rüzgarın yelkenin yüzeyinde yarattığı ileri itme gücüne dönüşmesi anlamına gelmektedir.

Rüzgar değirmenlerinin mekanik güç üretiminden rüzgar türbinlerini elektrik enerjisi üretimine geçiş 19.YY'ın sonlarına denk gelmektedir. Mekanik güç için rüzgarın elektrik üretmesinin ilk dönemleri, küçük boyutlu rüzgar jeneratörlerinin ve büyük türbinlerin araştırmasını ve deneylerini de kapsamaktadır. 20.YY'ın başlarında uçakların ortaya çıkışı ve geliştirilmesi, rüzgar türbinlerinde kullanılacak olan pervanenin analiz ve dizayn çalışmalarına büyük ivme kazandırmıştır.

Rüzgar türbin rotorlarının yenilikçi tipi olan Savonius rotoru, yaratıcısı Fin'li mühendis S.J. Savonius 'tan sonra isimlendirilmiştir. Yaratıcısının ilgisi, geniş, dönen yelkenlere sahip olan Flettner rotor gemisiyle harekete geçmiştir. Bu silindirlere geçen rüzgar, gemiyi ileri ittiren Magnus efektiyle kaldırma kuvveti yaratmaktadır. Deneyleri S şeklinde bir rotorla sonuçlandı. Rotor, yaratıcısına bağlı olarak, Finlandiya başta olmak üzere Avrupa'da oldukça popülerite kazandı; fakat asla ticari olarak bir elektrik jeneratöründe kullanım amaçlı gelişmedi. Yüksek başlangıç torku ve rüzgarı herhangi bir noktadan almak gibi avantajlarının yanı sıra yavaşlığı ve ağırlığı onun dezavantajlarıydı.



Şekil 1.1 Savonius Rotoru [2]

1930'ların başında F.M. Darrieus tarafından dikey eksenli başka bir yenilikçi rotor tipi geliştirildi. Darrieus rotoru, iki ya da üç eğimli kanadın merkezi kolona alttan ve üstten bağlanmasıyla oluşur. Rüzgarı tüm yönlerden alabilir. Merkezdeki kolon torku kanatlardan alıp, ağırlığın önemli olmadığı ve bakımın kolay olduğu, rotorun altındaki güç ünitesine aktarıyor.



Şekil 1.2 Darrieus rotoru [2]

Endüstri reformu dönemlerinde rüzgar enerjisi, Avrupa'nın en önemli enerji kaynağıydı; fakat bundan sonra zamanla azalmaya başladı. Bunun nedeni rüzgar enerjisinin taşınmazlığı ve entegre edilememesi. Buna ek olarak buhar motorları, içten yanmalı motorlar ve elektrik üretimindeki gelişmeler, rüzgar enerjisinin geri plana atılmasındaki zemini hazırladı. Rüzgar enerjisinin ihmalinden önce Avrupa

rüzgar türbinleri yüksek seviyede karışık dizaynlara sahipti. Rüzgar türbinleri yerde sabit; fakat türbinlerin üst bölümü rüzgarı karşıdan almak için dönebilmekteydi. Kanatlar bükümlü şekildedeydi. Bazı türbinlerin güç çıkışları otomatik kontrol sistemleri tarafından kontrol edilebiliyordu.

Rüzgar enerjisinin tekrar ön plana çıkması 1960'ların başına denk gelir. O dönemlerde birçok insan endüstriyel gelişimin çevresel etkisinin önemini farkına vardı. Neredeyse enerjiye ilgilenen tüm otoriteler kontrolsüz büyümenin felakete veya değişime yol açacağı konusunda hemfikirdi. Bu konuda en büyük sorumlulardan birinin fosil yakıtlar olduğu görüşü geçerliydi. Nükleer enerjinin potansiyel enerjisi de göz önüne alınıyordu. Bu başlıkların otoritelerce tartışılması, temiz enerji kaynaklarının göz önüne alınmasıyla meydana gelecek olan endüstriyel hareket için zemin hazırladı.

1990'ların başında, başta Danimarka ve Almanya olmak üzere pek çok Avrupa ülkesinde rüzgar enerjisi ile ilgili üreticiler boy göstermeye başladı. Küresel ısınma ve nükleer enerji ile ilgili endişeler rüzgar enerjisiyle ilgili yüksek bir talep oluşmasına neden oldu. Son 25 yıldır, en büyük ticari rüzgar türbinlerinin kapasitesi 50 KW'dan 2 MW'a yükseldi. Aynı zamanda 5 MW'lık olanları da dizayn aşamasında. Başta Avrupa olmak üzere, dünya çapında toplam rüzgar enerjisi üretiminin kapasitesi 2001 yılında 20.000 MW'a kadar çıktı. Dizayn standartları ve makinelerin prosedür belgeleri saptandıkça 1970 ve 1980'lerdeki güç ve güvenilirliğin çok daha üzerine çıkıldı. Öyle ki, rüzgar enerjisi üretiminin maliyeti, geleneksel yöntemlerle rekabet edebilecek düzeylere düştü.

Farklı kullanım alanları: Su pompalama, depolama, tahıl öğütme ve yağ çıkarma, elektrik üretme, pilleri şarj etme, taşımacılık, soğutma vb..

1.3 Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Kullanımı ve Hedefleri

Türkiye, Avrupa'ya oranla yüksek rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Öyle ki; teorik olarak Türkiye'nin elektrik ihtiyacının tamamı rüzgar enerjisiyle karşılanabilir. 48.000MW rüzgar enerjisi kapasitesi olmasına rağmen, bugün kurulu gücü toplam 803MW'dır. Bu miktarın 140MW kadarı İzmir-Çeşme ve Aliağa santrallerinden, 80MW'ı Çanakkale-Bozcaada ve Gelibolu santrallerinden, 200MW'ı Balıkesir-

Şanlı ve Bandırma santrallerinden karşılanmaktadır. Çizelge 1.1'de Türkiye'de 2023'e kadar hedeflenen rüzgar kurulu gücü görülmektedir. Çizelge 1.2'de ise 2009 sonu itibariyle rüzgar enerji santrallerinin kurulu gücü görülmektedir ve bu tabloya göre Almanya ve İspanyanın diğer ülkelere göre çok daha fazla kurulu güce sahip olduğunu görebiliyoruz.

Çizelge 1.1 Türkiye'de hedeflenen rüzgar kurulu gücü ve rüzgar enerjisi üretimi.

Yıl	Güç Kurulu (MW)	Ortalama Üretim (GWh)	Arzdaki payı (%)
2000	300	675	0.5
2005	1 359	3 058	1.53
2010	2 979	6 703	2.31
2015	5 142	11 570	2.91
2020	7 849	17 660	3.23
2023	9 733	21 900	3.43

Çizelge 1.2 Avrupa'daki rüzgar enerji santrallerinin toplam kurulu gücü [3]

ÜLKELER	2008 Sonu Kurulu Güç (MW)	2009 Yılı Eklenen Güç (MW)	2009 Sonu Kurulu Güç (MW)
Almanya	23,903	1917	25,777
İspanya	16,689	2459	19,149
Danimarka	3163	334	3465
Hollanda	2225	4	2229
İtalya	3736	1114	4850
İngiltere	2974	1077	4051
Avusturya	995	0	995
İsveç	1048	512	1560
Yunanistan	985	102	1087
Portekiz	2862	673	3535
Fransa	3404	1088	4492
İrlanda	1027	233	1260
Belçika	415	149	563
Polonya	544	181	725
Finlandiya	143	3	146
Litvanya	54	37	91
Letonya	27	1	28
Luxembourg	35	0	35
Çek Cumhuriyeti	150	44	192
Slovakya	3	0	3
Estonya	78	64	142
Macaristan	127	74	201
Bulgaristan	120	57	177
Romanya	11	3	14
Avrupa Toplamı	65,741	10,526	76,152
Denizüstü Kısmı	1479	582	2061

1.4 Literatür Araştırması

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar türbini teknolojileri her gün daha da gelişmektedir. Türbinlerin aerodinamik performansında ki gelişmeler, farklı rüzgar hızları, kanattaki ayrılmaların geciktirilmesi, kaldırma kuvvetinin artırılması ve C_L/C_D oranının artırılması üzerine çalışmalar daha da önem taşımaktadır.

1.4.1 Rüzgar türbin kanatları konusunda yapılan çalışmalar

Ticari kullanımdaki hava araçları yüksek Re sayılı akış rejiminde örneğin $10^8 \sim 10^9$ aralığında uçarlar. Bunun aksine, böcekler, insansız hava araçları düşük Re sayılı rejimde uçarlar. $50.000 < Re < 1.000.000$ aralığında olan aerodinamik akış rejimi düşük Re sayılı aerodinamik olarak adlandırılır [4]. Bu rejimde akış olayı yüksek Re sayısındaki akışındakinden oldukça farklıdır. Bu nedenle, düşük Re sayısı aerodinamiği konusunda yapılan araştırmalar son yıllarda oldukça yoğunlaşmıştır.

Shan ve arkadaşları [5] yaptıkları çalışmada 4^0 hücum açısında ve 100.000 Re sayısında NACA0012 profili etrafındaki akış ayrılması, girdaplar, türbülans ve sınır tabaka için sayısal benzeşim yapmışlardır. Girdaplardaki serbest kayma tabakası ile Kelvin-Helmholtz değişkenine katkıda bulunmuşlardır.

Hamdani ve Sun [6] NACA0012 kanat profilinin kararsız hareketi ve düşük Reynolds sayılarında aerodinamik kuvvetleri ve akış yapısını Navier-Stokes denklemleriyle çözmüşler ve profilin kararsız hareketi sonucu kanat profilinin serbest akım bölgesindeki hızının artması ve azalmasını incelemiştir. Sonuçta bu çalışma, düşük Re sayılarında kanat profilinin bir hızdan diğer bir hıza aniden hızlanmasının büyük aerodinamik kuvvetleri doğurduğunu göstermiştir.

Cebeci ve arkadaşları [7] tek parçalı kanat profili ile düşük ve orta ölçekli Reynolds sayılarında sürüklemenin hesaplanması için Cebeci-Smith türbülans modelini kullanarak azami taşıma katsayısı konusunda çalışmışlardır. Ayrıca sıkıştırılabilirliğin ve türbülans modelinin tutunma kaybı üzerindeki etkisi ile ilgili sonuçlar elde etmişlerdir.

Lian ve arkadaşları [8] düşük Reynolds sayısında mikro hava aracının aerodinamik performansı üzerinde çalıştılar ve Re sayısının 10^6 'dan 10^4 'e düşüşü ile ayrılmanın etkisinin arttığını ve aerodinamik performansın düştüğü sonucuna vardılar. Bu çalışmada mikro hava araçları konusunda yapılmış çok fazla çalışma incelenmiş ve literatüre sunulmak için derlenmiştir.

İnsanlı veya insansız hava araçları için türbülanslı ve türbülansa geçiş akımlarının ölçümü, modellenmesi ve model parametrelerinin çıkarılması aerodinamik alanında en önde gelen konular olmuşturlardır. Gerek insansız hava araçlarının kullandığı düşük Re sayılı profiller, gerekse diğer uygulama alanları olan rüzgar türbini kanatları ve gaz türbinlerinin alçak basınç türbin kanatçıkları üzerindeki akımın detaylı bilimsel incelenmesini gerektirmektedir. Türbülansa geçiş konusunda yapılan çalışmalar arasında son yıllarda ortaya çıkan dikkat çekici bir yaklaşım mühendislik türbülansa geçiş modellemesi olarak adlandırılan ve bilhassa model parametrelerinin detayları verilmeden ticari HAD programlarında standart olarak kullanılan türbülansa geçiş modelleridir [9-23]. Modern ve gelecek nesil gaz türbini motorlarındaki laminar-türbülanslı geçiş olayı ve bunun aerodinamik ve ısı transferi üzerine etkileri Mayle [24] tarafından geniş olarak incelenmiştir.

Türbülansa geçiş modeli konusunda çalışmaların devamı olarak, Misaka ve Obayashi [25] ayrılmış akış problemi üzerine sınır tabaka geçişinin etkisini araştırmak için korelasyon tabanlı γ - $Re_{\theta t}$ türbülansa geçiş modelini kendi korelasyonları ile ince kanat profilli NACA64A006'ya tutunma kaybı açısının tahminine uygulamıştır. Bu profil ayrıca Büyük Girdap Benzeşimi (Large-Eddy Simulation=LES)/Reynolds Ortalama Navier-Stokes (RANS) birleşik metodu kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır [26]. Bu çalışma, yüksek Reynolds sayılı ($Re=5.8 \times 10^6$) akış ($Ma = 0.17$) $4-11^\circ$ hücum açısı aralığında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar; sınır tabaka içerisindeki statik basınç ve hız dağılımları, basıncın veter hattı boyunca değişimi, taşıma, sürüklenme ve yunuslama momentinin ölçümleri yer alan McCollough ve Gault deneyleri [27] ile karşılaştırılmıştır. LES/RANS birleşik modeli ile geçiş noktaları etkin bir şekilde tespit edilmiştir.

Schook [28] tarafından hazırlanan doktora tezinde düz bir plaka üzerindeki daimi ve zamana bağlı türbülansa geçiş akışları üzerine türbülans yoğunluğunun, türbülans yapısının ve Re sayısının etkisi araştırılmıştır. Bütün deneyler yüksek hız ve geniş çalkantı seviyeleri gibi türbin şartlarında yapılmıştır. Bu çalışmada, daimi, zamana bağlı akışlarda türbülansa geçiş akışının yapısı ortaya konmuştur.

Mikro ve insansız hava araçları için yüksek hücum açılarında kritik hava hızlarında kanat profili üzerinde laminer ayrılma kabarcığı oluşturan türbülansa geçiş akışları mevcuttur. Bu ayrılma kabarcıklarını geciktirme, yok etme veya kontrol etme hava aracı tasarımının önemli bir konusu olup ölçme, benzeşim yapma ve ön tahminde bulunma zor bir araştırma konusudur. Akış kontrolünün amacı bir akış durumunda küçük enerji girişi ile taşımayı arttırmak, sürüklemeyi azaltmak, akım gürültülerini azaltmak, türbülansa geçişini geciktirmek, ayrılmayı önlemek ve türbülansı kontrol altına almaktır. Laminer ayrılma kabarcığının deneysel ölçüm, tanımlama ve gösterim tekniklerindeki modern gelişmelerin paralelinde kanatlar üzerindeki türbülansa geçiş mekanizmasının belirlenmesi için tahmin metotları gelişmiştir. Türbülansa geçiş ve türbülanslı akışların benzeşimi için RANS tabanlı HAD metotlarının daha aktif kullanımı yüksek performanslı hesaplama ile mümkün hale gelmiştir. Günümüzde, RANS çözümleri pratik olarak 1 veya 2 denklemlilik kapalı türbülans modelleri içerir [29].

Takagi ve arkadaşları [30] düşük Re sayısında NACA0012 kanat profilinin üç değişik hücum açısında, iz bölgesinde oluşan vorteksleri incelemiş ve güç dalga yoğunluğu grafiği ile vorteks kopma frekansını belirlemişler.

John Matson [31] Clark-Y kanat profilini düşük hızlı rüzgar tüneline, değişik hücum açılarında deneyerek, basınç dağılımını ve hız dağılımını elde etmiştir.

Mofid ve arkadaşları [32] EPPLER E435 ve S8035 kanat profillerinin ağ yapılarını değiştirerek, sıfır hücum açısında dalgalanmaya olan, dolayısıyla da kaldırma kuvveti katsayısına olan etkilerini incelemiştir ve EPPLER E435 kanat profilinin daha fazla kaldırma üretebildiğini, S8035 kanat profilinin simetrik kanat yapısından dolayı erken tutunma kaybına uğradığı ve böylece az kaldırma kuvveti katsayısı üretebildiği görülmüştür.

Berg ve arkadaşları [33] DU97-W-300 kanat profilinde, kanat ayırıcı kullanarak aerodinamik koşullardaki değişimi incelemiş ve ses basınç düzeyi grafiği ile kanadın üç hücum açısındaki konumunda vorteks kopma frekansını incelemişlerdir. Kanat ayırıcı kullanarak oluşan sesin azaldığını gözlemlemişler.

Do ve arkadaşları [34] NACA0015 kanat profili kuyruk kısmının boyutuyla oynayarak aerodinamik performansa etkisini ve basınç katsayısındaki değişim ile vorteks kopma frekansını elde etmişler. Kanat kuyruk kısmının yüksekliğindeki artış ile oluşan vorteks kopmasının azaldığını elde etmişlerdir.

Ünal ve arkadaşları [35] bir silindir etrafında, yüksek Re sayılarında girdap etkisinin kanat performansına olan değişimini farklı türbülans modellerinde inceleyip sonuçları gözlemlemiştir. Türbülanslı yapılan çalışmalarda, literatür sonuçlarına yakın olarak sonuçlar veren k- ω ve S-A modellerinin, k- ϵ modeline göre daha iyi sonuç verdiğini elde etmişler.

1.4.2 Hidrokinetik enerji konusunda yapılan çalışmalar

Baraj ve arkadaşları [36] kavitasyon tüneli ve deney tankında 0.8 m. çapındaki su türbinini, hidrodinamik koşullar altında, türbinin gücü ve etkisini elde etmişler ve en uygun parametreleri (kanat uç hız oranı vs..) belirlemişlerdir. En uygun uç hız oranının 5-7 arası olduğunu ve uç hız oranının pervane yapısı üzerinde etkisinin çok olduğunu elde etmişler. Ayrıca türbinin su içine batırma seviyesinin güce olan etkisini incelemişlerdir ve türbin ucu batırma seviyesi küçüldükçe, güçte önemli düşüşlerin meydana geldiği görülmüş.

B. Kirke [37] su kanalına alınan su türbininden maksimum alınabilecek güç irdelenmiş ve bu yolla türbinden iyi sonuçlar alındığı, hatta normal türbinlere göre 4 kat daha fazla güç çıkışı elde edilebileceğini belirtmiştir. Bu gücün fazla olması, yol boyunca basınç farklılıklarına ve hacimsel akışa bağlı olduğunu belirtmiştir.

Myers ve arkadaşı [38] 1:30 kere küçültülmüş 0.4 m. çapındaki nehir akıntı türbini, nehre batırılma derinliğine bağlı olarak türbin performansı ve türbin arkası karakteristikleri, farklı su hızı ve itki katsayısında, dolaşımli bir su kanalında

incelenmiştir. Su hızının artmasıyla, yüzey türbülansının arttığı ve rotor yanlarındaki hızın, akış hızından fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Berntsen ve arkadaşları [39] NACA 0015 kanat profilinin su ortamında Fluent 5 programıyla, yüksek kaviteasyon başlangıcında farklı iki hücum açısında kaviteasyon numaralarını elde etmeye çalışmışlardır ve tüm elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapmışlardır. Kaviteasyon numarası ve uzunluğu, deneysel sonuçlarla çok yakın elde edilmiş ve kaviteasyon numarasının fonksiyonu olan kaldırma değişkenliği deneysel sonuçlara yakın sonuçlar vermiştir.

Radespiel ve arkadaşları [40], deneysel ve sayısal olarak 60.000 Reynolds sayısında SD7003 kanat profiline dalma hareketinin etkisini araştırdılar. Bu Re sayısında PIV ile su ve hava tüneline yapılan deneyler sonucunda laminardan türbülansa geçiş esnasında laminar ayrılma kabarcığı meydana geldiğini gördüler ve sayısal benzeşimlerde bu ayrılma kabarcığını dalma hareketi varken ve yokken deneysel verilere yakın elde ettiler.

1.5 Amaç ve Kapsam

Ülkemizde ve dünyada geleneksel olarak enerji üreten türbinlerde standart kanat profilleri kullanılmaktadır. Bu kanatların verdiği maksimum kaldırma kuvvet katsayısı 1.6 civarındadır. Bu kanatlı türbinler kullanılarak enerji üretebilmek için minimum rüzgar hızı 6-7 m/s arasında belirlenmiş ve bu durum dikkate alınarak ülkemizde verimli rüzgar alanları belirlenmiştir. Bu çalışmamızın amacı yüksek performans verebilecek rüzgar türbini kanat profili ortaya koymak ve ortaya konulan bu profil kullanılarak hidrokinetik enerjiden elektrik enerjisi üretebilmektir. Bu bağlamda ülkemizde enerji üretebilecek minimum rüzgar ve su akıntı hızları belirlenerek, ekonomik rüzgar ve hidrokinetik enerji alanları belirlenebilecektir. Bu amaçla, ikili kanatlı bir rüzgar türbin kanadı hava ve su ortamında analiz edilecektir. Bu performans analizi, hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında, su ortamında $Re=2.24 \times 10^5$, $Re=3.36 \times 10^5$, $Re=4.5 \times 10^5$ sayılarında denenecektir.

Öncelikle, performansını inceleyeceğimiz kanat profilinin ve diğer kullanılan kanat profillerinin üretiminde önemli olan kuvvet analizleri, momentum teorisi ve Betz

limit kavramı, kanat elemanı teorisi ve kanat profilinin aerodinamik kapsamı gibi bilgiler ele alınacaktır.

İkinci olarak, kullanılacak kanat profilinin geometrik olarak bir parametrik analizi yapılarak hangi parametreler analizi etkileyecek bunlar irdelenecek ve nasıl bir analiz ve sentez yapıldı bunlar irdelenecektir.

Üçüncü olarak, analizi ve sentezi yapılan kanat profilinin HAD yardımıyla benzeşim yapıp bu benzeşim sonuçlarıyla günümüzde kullanılan NACA4412 kanat profili sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır. Benzeşim yapılırken türbülans benzeşim modellerinden yararlanarak basınç konturları, basınç katsayı dağılımı, taşıma (kaldırma) ve sürüklenme kuvvet dağılımları, maksimum kaldırma katsayısı ve minimum sürüklenme katsayısı için gerekli şartlar, akım çizgileri, türbülans şiddeti konturları ve vorteks kopma frekansları incelenecektir. Ayrıca bu parametrelerin elde edilmesi için en verimli ve kesin sonuç veren ağ sayısı elde edilecektir.

RÜZGAR TÜRBİN TEORİLERİ

2.1 Giriş

Rüzgâr türbini üretimi için geliştirilen modeller güç tahmini için önem taşımaktadır. İdeal disk teorisi (doğrusal momentum teorisi) geliştirilmiş olan ilk teorilerdendir. Bu teoride koşullar ideal olarak düşünülmüştür. Bu teorinin temelinde sonsuz sayıda kanada sahip ve sıfır kalınlıkta bir rotor bulunmaktadır [41, 42, 43]. Kanat elemanı momentum teorisi ise ideal disk teorisi ve kanat elemanı teorisinin birleşimidir [42]. Şu anda geçerliliği olan bir teoridir. Kanat elemanı teorisi ile kanatların şekli tanımlanabilir ve kanattaki diferansiyel (eğrisel) kısmın analizi yapılabilir.

2.2 Rüzgar Türbin Teorileri

Geliştirilmiş pervane teorileri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Doğrusal ve Açısal momentum teorisi
- Kanat eleman teorisi

2.2.1 Momentum teorisi

Momentum teorisi doğrusal ve açısal momentum teorisi olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır.

Doğrusal momentum teorisi ve Betz limit

Rüzgârdan enerji elde etmek için kurulacak türbinin boyutları aerodinamik yapı ile doğrudan ilişkilidir. Sistem ne kadar ideal olursa olsun rüzgârdan elde edilecek enerjinin bir üst limiti vardır. Betz tarafından 1919–1926 yılında belirlenen bu limite Betz limiti denir [43, 44, 45, 46]. Betz, söz konusu teoriyi hesaplarken Şekil 2.1'deki hareketli diskin önünde, üzerinde ve gerisindeki hava akımları için enerjinin korunumu kanunlarını kullanmıştır. Fakat ideal çalışma şartlarında rotor, serbest şekilde akan rüzgârın ancak $2/3$ ünden faydalanabilir. Fakat pratik kullanımda istenilen ideal çalışma şartları sağlanamayacağından bu limite ulaşılması zordur.

$$\dot{m} = (\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 \quad (2.2)$$

Lineer momentumun korunumundan, 1 boyutlu, sıkıştırılmaz ve daimi akış için itme kuvveti;

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2.3)$$

Böylece rotor arkasındaki hızın, rotor önündeki hızdan küçük olduğunu görebiliriz.

Rotor pervanesinin her iki tarafında da iş yapılmadığı için, Bernouille denklemi rotorun her iki tarafı içinde yazılabilir. Şekil 2.1 dikkate alınarak 1-2 ve 3-4 noktaları arasında Bernouille denklemi yazılırsa,

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (2.4)$$

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.5)$$

elde edilir.

İtme kuvveti, diskin her iki tarafındaki net kuvvetlerin toplamı olarak da ifade edilebilir;

$$T = A_2(P_2 - P_3) \quad (2.6)$$

Basınç farkı (ΔP); (2.4) ve (2.5) denklemleri ile bulunabilir.

(P_1 ve P_4) basınçlarının eşit olduğu ve (U_2 ve U_3) hızlarının da eşit olduğunu varsayarsak ve (2.5) denklemi (2.4) denklemine taşınırsa;

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 - \frac{1}{2}\rho U_4^2 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2$$

$$P_2 - P_3 = \frac{1}{2}\rho U_1^2 - \frac{1}{2}\rho U_4^2$$

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho(U_1^2 - U_4^2) \quad (2.7)$$

elde edilir.

(2.7) denklemi, (2.6) denklemine taşınırsa itme kuvveti;

$$T = \frac{I}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.8)$$

olarak elde edilir.

(2.2), (2.3) ve (2.8) denklemlerini kullanarak rotor pervanesindeki hız;

$$\dot{m}(U_1 - U_4) = \frac{I}{2} \rho A (U_1^2 - U_4^2)$$

$$\rho A U_2 (U_1 - U_4) = \frac{I}{2} \rho A (U_1^2 - U_4^2)$$

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.9)$$

elde edilir. Yani; rotor pervanesindeki hız, giriş ve çıkış hızlarının ortalamasına eşittir.

Eğer serbest akış ve rotor pervanesine bağlı olarak rüzgar hızındaki orantısız düşüş olarak bir aksenel indüksiyon faktörü "a" tanımlanırsa [47];

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.10)$$

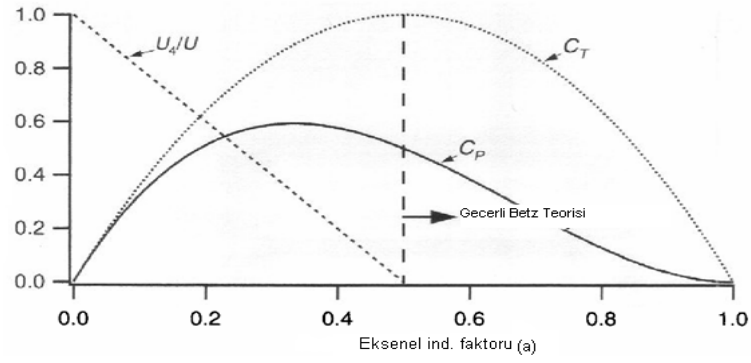
$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (2.11)$$

elde edilir ve (2.11) denklemini (2.10) denklemine taşınırsa;

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (2.12)$$

elde edilir.

Eksenel indüksiyon faktörü sıfırdan fazla olduğunda, rotor arkasındaki rüzgar hızı azalır. Eğer $a > 1/2$ olursa; rotor arkasındaki rüzgar hızı sıfıra doğru yavaşlar ve güç katsayısı bu değerden sonra düşüşe başlar. (2.12), (2.17) ve (2.21) denklemleri irdelendiğinde Şekil 2.2'deki gibi grafiksel dağılım elde edilir.



Şekil 2.2 Rotor arkasındaki hız ve eksenel indüksiyon faktörüne göre değişen güç ve itki katsayıları [47]

Güç çıkışı, P , itme kuvveti ile rotor pervanesindeki hızın çarpımına eşit olacaktır;

$$P = T.U_2 \quad (2.13)$$

(2.8) denklemi (2.13) denkleminde taşınırsa;

$$P = \frac{1}{2} \rho . A (U_1^2 - U_4^2) U_2 \quad (2.14)$$

elde edilir.

(2.11) ve (2.12) denklemleri (2.14) denkleminde taşınırsa, rotor gücü;

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1-a)^2 \quad (2.15)$$

olarak elde edilir.

Güç çıkışı ile güç sabiti arasındaki ilişki [47];

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (2.16)$$

(2.15) denklemi (2.16) denkleminde taşınırsa, güç katsayısı C_p ;

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.17)$$

elde edilir.

C_p 'nin maksimum değeri; (2.17) denkleminin a 'ya göre türevi alınıp, sıfıra eşitlendiğinde bulunabilir;

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad (2.18)$$

Burada maksimum güç çıkışı $a=1/3$ değerinde olur ve $(C_p)_{\max}=16/27$

Bulunan bu değer, ideal ortam şartlarında, rüzgârdan çekilebilecek enerjinin teorik olarak en üst limitidir [47].

(2.11) ve (2.12) denklemleri (2.8) denklemine taşınırsa itki kuvveti;

$$T = \frac{1}{2} \rho A U_1^2 4a(1-a) \quad (2.19)$$

elde edilir.

Güç katsayısı gibi itki katsayısı da benzer şekilde tanımlanır [47];

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (2.20)$$

(2.19) denklemini (2.20) denklemine taşınırsa, itki katsayısı C_T ;

$$C_T = 4a(1-a) \quad (2.21)$$

olarak ifade edilir.

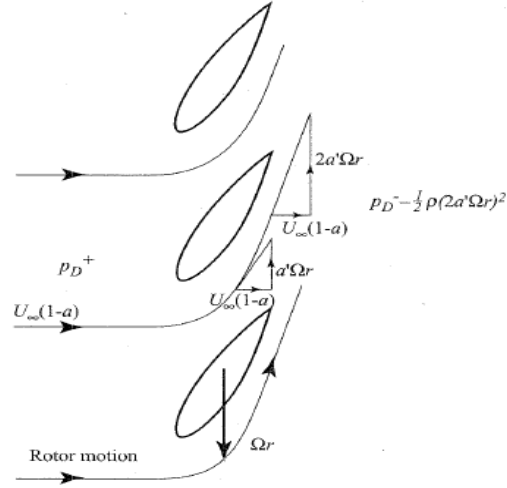
$a=0.5$ iken $C_T=1$ maksimum değerine eşit olur ve rotor arkasındaki hız sıfırlanır.

Maksimum güç çıkışında ($a=1/3$), $C_T=8/9=0.89$

Açısal momentum teorisi

Pervaneye dik gelen rüzgar akışı, rotordan geçerken rotora bir etki olarak tork uygular ve rotorda tepki olarak rüzgara tork uygular. Böylece hava akışı ile birlikte türbin rotoru Şekil 2.3'deki gibi dönmeye başlar ve açısal momentum elde edilir. Açısal momentumun elde edilmesiyle iz bölgesinde hava partikülleri, aksenal hıza ilave olarak teğetsel hız bileşeni de oluşmuş olur.

Açısal momentum teorisinde rotordaki ve rotor gerisindeki hızların kanat tasarımına olan etkileri analiz edilmiştir. Ancak, açısal momentum teorisinin kanat geometrisi açısından uygun sonuçlar vermediği belirtilmiştir.



Şekil 2.5 Havanın kanat çapı boyunca teğetsel hareketi

Akışın açısal hızını ω , rotorun açısal hızını da Ω olduğunu varsayarsak;

Süreklilik denklemi;

$$u_4 r_4 dr_4 = u_2 \cdot r_2 \cdot dr \quad (2.22)$$

Sabit açısal momentum;

$$u_4 r_4^2 = w_2 r_2^2 \quad (2.23)$$

Radyal kanat elemanı torku, birim zamana göre açısal momentumuna eşittir;

$$d\theta = \rho u_2 w_2 r_2^2 dA \quad (2.24)$$

$$dA = 2\pi r dr. \quad (2.25)$$

P' , basınç düşümünü bulmak için; kanatların açısal hızıyla (Ω) ilgili giren ve çıkan akışlarla ilgili bernouille denklemi yazılabilir.

Kanatlara bağlı havanın açısal hızı ($\Omega + \omega$).

Eksenel hız sabitken rotorun ön ve arkasındaki basınç farkı [47];

$$P' = \rho \left(\Omega + \frac{\omega}{2} \right) \omega r^2 \quad (2.26)$$

Dairesel eleman için, (2.26) denklemi (2.6) denklemine taşınırsa itki;

$$dT = (P_2 - P_3) dA = \left[\rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \right] 2\pi r dr \quad (2.27)$$

olarak ifade edilir.

Açısal indüksiyon faktörü aşağıdaki gibi ifade edilebilir [47];

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (2.28)$$

(2.28) denklemini (2.27) denklemine taşınırsa itki kuvveti;

$$dT = 4a'(1+a') \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (2.29)$$

olarak ifade edilir.

Daha önce doğrusal momentum teorisinde itki, denklem (2.8)'deki gibi sağlanmıştı;

$$dT = \frac{1}{2} \rho A U^2 4a(1-a)$$

(2.8) ve (2.29) denklemleri taraf tarafa bölüldüğünde yerel hız oranını verir;

$$\left[\frac{a(1-a)}{a'(1+a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{U^2} = \lambda r^2 \right] \quad (2.30)$$

$$\lambda_r = \frac{\Omega \times r}{U} = \frac{\lambda \times r}{R} \quad (2.31)$$

Tork daha önce denklem (2.24) deki gibi ifade edilmişti;

$$d\theta = \rho \cdot u \cdot w \cdot r^2 dA$$

$$dA = 2\pi r dr$$

Burada $U_2 = U_1(1-a)$ ve $a' = \omega/2\Omega$ formülleri (2.24) denklemine taşınırsa;

$$dQ = 4a'(1-a) \frac{1}{2} \rho U \Omega r^2 2\pi r dr \quad (2.32)$$

olarak ifade edilir.

Her bir eleman için üretilen güç dP aşağıdaki ifade ile bulunabilir [47];

$$dP = \Omega dQ \quad (2.33)$$

(2.32) denklemini (2.33) denklemine taşıyıp, yerel hız oranı ifadesi (2.31) kullanılırsa her dairesel eleman için elde edilen güç;

$$dP = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3 \left[\frac{8}{\lambda^2} a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (2.34)$$

olarak ifade edilir.

Her dairesel halka için değişen güç katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir [47];

$$dC_p = \frac{dP}{1/2\rho AU^3} \quad (2.35)$$

(2.34) denklemi (2.35) denkleminde taşınırsa güç katsayısı;

$$C_p = \left[\frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (2.36)$$

olarak ifade edilir.

(2.30) denkleminde verilen a' , a ve λ_r ile ilişkilendirilirse;

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)} \quad (2.37)$$

olarak ifade edilir.

Güç üretiminin maksimum olması için $a'=1-a$ teriminin maksimum olması gerekir. a' terimi $a'=1-a$ terimine türetilip, a ya göre türevi alınarak sıfıra eşitlenirse her dairesel eleman için teğetsel indüksiyon faktörü;

$$\left[\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{U^2} = \lambda r^2 \right]$$

$$\lambda_r^2 = \frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} \quad (2.38)$$

$$a' = \frac{(1-3a)}{4a-1} \quad (2.39)$$

olarak ifade edilir.

Eğer (2.38) denklemi a ya göre türevi alınırsa maksimum güç üretimi için $d\lambda_r$ ve da arasındaki ilişki elde edilir;

$$2\lambda_r d\lambda_r = [6(4a-1)(1-2a)^2 / (1-3a)^2] da \quad (2.40)$$

Elde edilen (2.40) denklemi, (2.36) güç katsayısı denkleminde taşınırsa;

$$C_{p,max} = \frac{24}{\lambda^2} \int_{a_1}^{a_2} \left[\frac{(1-a)(1-2a)(1-4a)}{1-3a} \right] da \quad (2.41)$$

elde edilir. Bu denklemde a_1 (alt limit), $\lambda_r=0$ 'daki indüksiyon faktörünü ve a_2 (üst limit) $\lambda_r=\lambda$ 'daki indüksiyon faktörünü ifade etmektedir.

Örnek olarak; (2.38) denkleminden a_2 için;

$$\lambda^2 = (1-a_2)(1-4a_2)^2 / (1-3a_2)^2 \quad (2.42)$$

yazılabilir ve $\lambda_r=0$ için $a_1=0.25$ 'dir.

Bu denklem ile farklı uç hız oranı değerlerine göre üst limit a_2 değerleri elde edilir. Sonsuz genişlikteki uç hız oranının maksimum üst limiti $a_2=0.333$ olduğu bilinmektedir. Ayrıca, $C_{p,max}$ denklemine (2.41), $(1-3a)$ yerine x değişkeni yazılarak integrali alındığında;

$$C_{p,max} = \frac{8}{729\lambda^2} \left\{ \frac{64}{5}x^5 + 72x^4 + 124x^3 + 38x^2 - 63x - 12[\ln(x)] - 4x^{-1} \right\}_{x=(1-3a_2)}^{x=0.25} \quad (2.43)$$

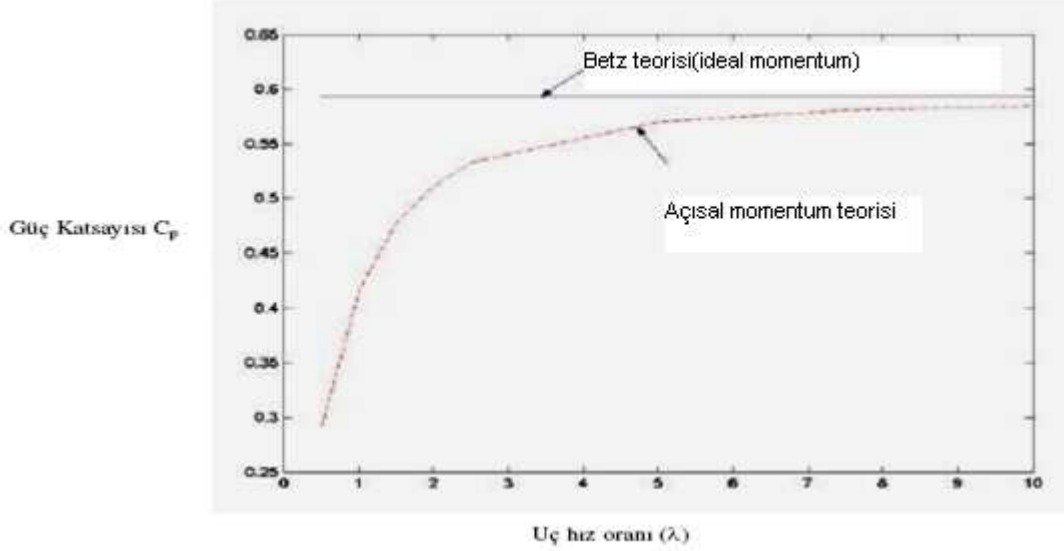
elde edilir. Bu denklem kullanılarak, uç hız oranına göre elde edilen $C_{p,max}$ ve uç noktadaki a_2 değerleri aşağıda Çizelge 2.1'de görülmektedir.

Çizelge 2.1 Uç hız oranına göre $C_{p,max}$ ve uç noktadaki a_2 değerleri

λ	a_2	$C_{p,max}$
0.5	0.2983	0.289
1.0	0.3170	0.416
1.5	0.3245	0.477
2.0	0.3279	0.511
2.5	0.3297	0.533
5.0	0.3324	0.570
7.5	0.3329	0.581
10.0	0.3330	0.585

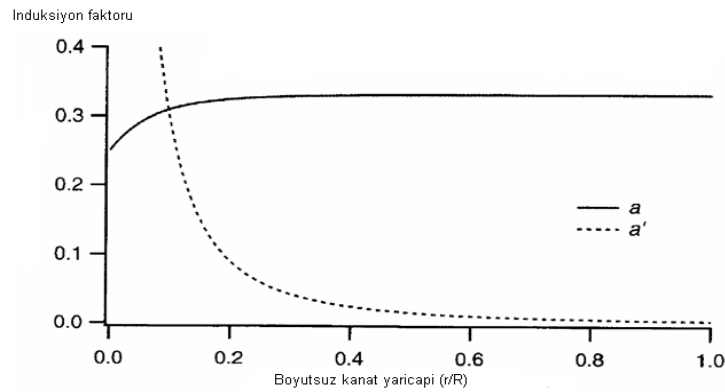
İdeal momentum teorisi ve açısal momentum teorisi sonuçları Şekil 2.6'da verilmiştir. Grafikte, önceki bölümde analiz edilen doğrusal momentuma göre ideal

türbin için Betz limiti de gösterilmiştir. Sonuç olarak uç hız oranı arttıkça, maksimum güç katsayısının da arttığı görülmektedir [47].



Şekil 2.6 Uç hız oranına göre güç katsayısı [48]

(2.37) denklemi irdelenerek kanat boyunca değişen aksenal ve teğetsel indüksiyon faktörleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Kanat boyunca değişen aksenal ve teğetsel indüksiyon faktörleri [47]

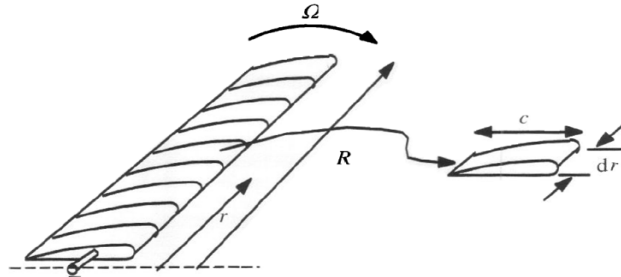
Bu bölümde kullanılan momentum teorisi, türbini bir bütün olarak ele alarak akım tüpü içerisindeki rüzgar gücünden elde edilebilecek türbin gücünü vermektedir. Teori, türbinde nasıl bir kanat profili kullanılması gerektiğini ortaya koymamaktadır. Kanat boyunca, uç hız oranı değerleri ve her kesite etki eden aerodinamik kuvvet değerleri değiştiğinden, maksimum performans için gerekli kanat kesit burulma miktarları ancak kanat teorileri kullanılarak belirlenebilir.

2.2.2 Kanat elemanı teorisi:

Momentum teorisinden farklı olarak; kanat elemanı üzerine gelen kuvvetlerin analizi yapılarak, kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarının, teğetsel ve normal kuvvetlerin ve ayrıca kanat elemanının hücum açısı, bağıl rüzgar açısı ve kanat elemanı burulma açıları hakkında bilgilerin elde edildiği teoridir.

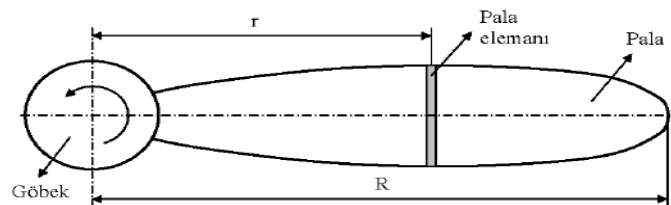
Kabuller:

- Bu analiz için, kanat Şekil 2.8'deki gibi N elemana veya bölüme ayrılmıştır varsayımı yapılmıştır.
- Elemanlar arasında aerodinamik etkileşim söz konusu değildir.



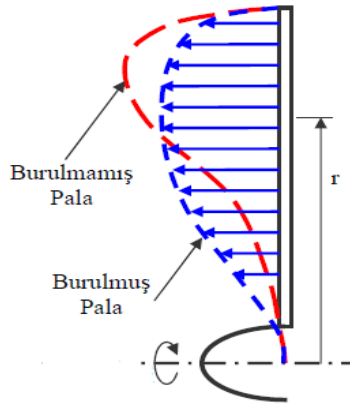
Şekil 2.8 N adet bölüme ayrılmış kanat yarıçapı [47]

Kanat elemanı teorisi pervane palasının kanat kökünden ucuna kadar sonsuz sayıda ince genişliklere sahip profillere (kanat kesit biçimlerine) bölünebileceğini kabul eder. Örneğin; 3 m. çapındaki bir pervanede göbek çapı 30 cm. ise palanın boyu 135 cm. olacaktır ve bu pala 1 cm. genişliğindeki 135 pala elemanına (profile) bölünebilecektir. Şekil 2.9'de pervanenin dönme merkezinden "r" uzaklıktaki böyle bir kanat elemanını göstermektedir [49].



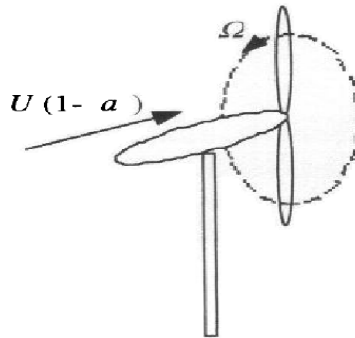
Şekil 2.9 Bir pervanenin kanat kesiti [49]

Pervanenin aerodinamik kuvvet üreten elemanı olan kanat aslında burulmuş bir yapıdadır. Burulmuş olmasının ve uca doğru incelerek gitmesinin sebebi; kanat boyunca düzgün dağılmış bir itme kuvveti oluşturmak ve güç eldesinde herhangi bir düşüşe neden olmamaktır. Çünkü pervane kanadı üzerinden akan hava akımı uç kısımda en yüksek hızına ulaşır. Şekil 2.10'da burulmuş ve burulmamış kanatta itme kuvvetinin yarıçap boyunca dağılımının karşılaştırması görülmektedir. Kökten uca doğru burulmuş olan kanat üzerine etkiyen itki kuvveti düzgün dağılmış iken burulmamış olan kanat üzerine etkiyen itki kuvveti düzgün dağılmamıştır.



Şekil 2.10 Burulmuş ve burulmamış kanatta itme kuvvetinin yarıçap boyunca dağılımının karşılaştırılması [49].

Rüzgarın bağıl hızı; Şekil 2.11'da görülen rotora dik gelen doğal rüzgar hızı ve kanadın dönmesinden kaynaklanan rüzgar hızının vektörel toplamına eşittir ve dönen kanatlar üzerinde aerodinamik kuvvetlerin oluşmasına da katkıda bulunur.



Şekil 2.11 Rüzgar türbininin çevresel dönüşü ve üzerine dik gelen rüzgar hızı [47]

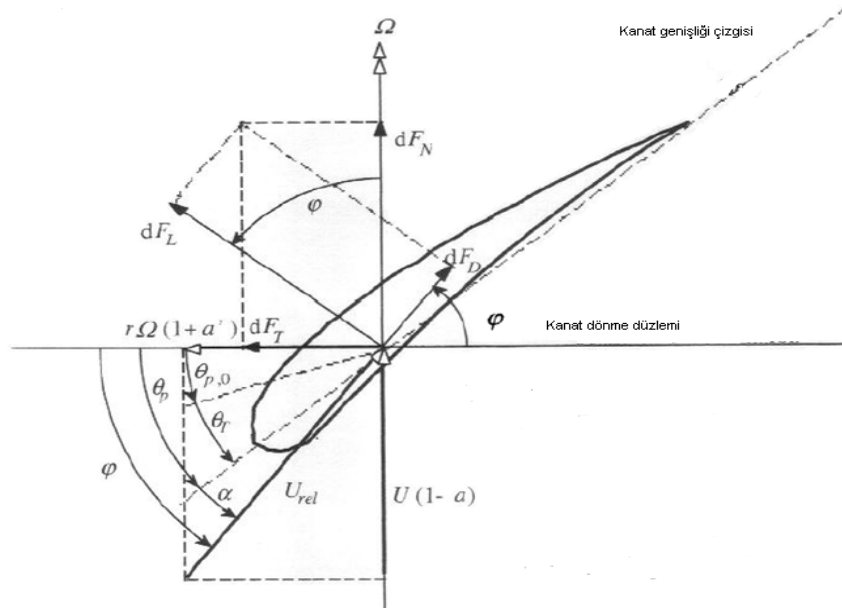
$$\Omega \times r + (\omega/2)r = \Omega \times r + \Omega \times a \times r = \Omega \times r(1+a') \quad (2.44)$$

$$U_{Rel}^2 = [U(1-a)]^2 + [\Omega \times r(1+a')]^2 \quad (2.45)$$

Kanat Kesit Geometrisi

Şekil 2.12'de bir pervanenin kanat kesitine (elemanına) etkiyen hızlar ve kuvvetler gösterilmiştir. $U(1-a)$ şiddeti uçağın ileri doğru uçuş hızına eşit olan bağıl uçuş hızı, $r\Omega(1+a')$ kanat elemanının dönme hızıdır.

Hücum açısı ve bağıl rüzgâr hızı kanat elemanına etkiyen taşıma ve sürüklenme aerodinamik kuvvetlerini doğurur. Taşıma kuvveti, bağıl rüzgâr hızı doğrultusuna dik yöndedir. Sürüklenme kuvveti ise bağıl rüzgâr hızına paralel ve aynı yöndedir. Taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin bileşkesi olan kuvvette bir aerodinamik kuvvettir. Bu bileşke aerodinamik kuvvet, biri dönme düzlemine dik, diğeri dönme düzleminde kalacak iki bileşen halinde düşünebilir. Dönme düzlemine dik olan bileşen (dF_N) pervane çekmesi, dönme düzleminde kalan bileşen (dF_T) ise pervane torkuna neden olan direnç kuvvetidir. Direnç kuvveti torkun yarıçap uzunluğuna oranıdır veya direnç kuvveti ile yarıçapın çarpımı torka eşittir.



Şekil 2.12 Kanat kesit geometrisi ve üzerine gelen kuvvetler [47]

$U(1-a)$: kanada dik gelen rüzgar hızı

U_{Rel} : göreceli rüzgar hızı

θ_p : kanat kesit burulma açısı (kanat genişliği çizgisi ve kanadın dönme düzlemi arasındaki açı)

α : hücum açısı (kanat genişliği çizgisiyle göreceli rüzgar hızı arasındaki açı)

$\varphi = \theta_p + \alpha$: bağıl rüzgar hızının geliş açısı

$\theta_{p,o}$: uç kanat kesit açısı

$\theta_T = \theta_p - \theta_{p,o}$: kanat burulma açısı

dF_L : çoğalan kaldırma kuvveti

dF_D : çoğalan sürüklenme kuvveti

dF_N : dönme düzlemine etkiyen artan normal kuvvet (itkiye katkısı olur)

dF_T : rotor tarafından süpürülen daireye etkiyen artan teğetsel kuvvet (tork üretir)

(2.62) veya (2.92) denklemleriyle rüzgarın kanat boyunca geliş açısı (φ) elde edilir. Çeşitli sayısal akışkan programlarıyla veya kanat profilinin C_L - α grafiğinden de hücum açısı (α) elde edildikten sonra $\varphi = \theta_p + \alpha$ formülünden kanat kesit burulma açısı (θ_p) elde edilir ve göbekten uca kadar elde edilen bu açılardan kanadın en uç kesitindeki burulma açısına uç kanat kesiti burulma açısı ($\theta_{p,o}$) denir. Daha sonra $\theta_T = \theta_p - \theta_{p,o}$ formülü ile de kanat burulma açısı (θ_T) elde edilir.

Şekil 2.12 dikkate alınarak (2.46) ve (2.47) denklemleri ile kanat kesit geometrisine gelen bağıl rüzgar hızı ve bu bağıl rüzgar hızının geliş açısı elde edilmektedir.

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega \times r \times (1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (2.46)$$

$$U_{Rel} = U(1-a) / \sin \varphi \quad (2.47)$$

dF_L ve dF_D kanat kesiti üzerine etkiyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini göstermektedir ve (2.48) ve (2.49) denklemleri ile bu kuvvetler elde edilir.

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} \rho U_{Rel}^2 c dr \quad (2.48)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} \rho U_{Rel}^2 c dr \quad (2.49)$$

Şekil 2.12 dikkate alınarak, kanat kesiti üzerine etkiyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinden, denklem (2.50) ve (2.51)'deki pervane itkisine neden olan direnç kuvveti (dF_N) ve pervane torkuna neden olan direnç kuvveti (dF_T) bileşmeleri elde edilir.

$$dF_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi \quad (2.50)$$

$$dF_T = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi \quad (2.51)$$

Eğer rotor B adet kanada sahipse, merkezden r kadar uzaklıktaki kesite etkiyen toplam normal kuvvet ve teğetsel kuvvet denklem (2.52) ve (2.53)'deki gibi elde edilir.

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{Rel}^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c dr \quad (2.52)$$

$$dF_T = B \frac{1}{2} \rho U_{Rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c dr \quad (2.53)$$

Merkezden r kadar uzaklıktaki teğetsel kuvvet ile tork arasındaki bağıntı denklem (2.54) ve (2.55)'deki gibi elde edilir.

$$dQ = r \times dF_T \quad (2.54)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{Rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c \times r \times dr \quad (2.55)$$

(2.52) ve (2.55) denklemleri dikkate alınarak sürüklenme kuvvetinin, torkta düşüşe ve dolayısıyla da güçte düşüşe neden olduğu fakat itkide artışa neden olduğu görülmektedir.

Böylece kanat elemanları teorisi iki denklem vermektedir. Bu denklemler itki kuvvet (Thrust) ve teğetsel kuvvet (tork) denklemleridir. Bu kuvvetler açısal hareket ortamında kanat akış açlarına ve kanat karakteristiklerine bağlıdır. Dönme olamadığı (ideal) durumda maksimum güç için $a = 1/3$ değeri elde edilmiştir. Aynı basitleştirici yaklaşım momentum ve kanat elemanları teorisine uygulayarak verilen bir hız oranı ve maksimum performans için uygun kanat geometrisi belirlenebilir.

Örnek olarak; ideal türbin rotoru ele alınacak olursa;

$a'=0$ (dönme yok)

$C_D=0$ (sürüklenme yok)

Kayıplar yok,

$a=1/3$ (Betz limiti geçerli)

İlk önce, dizayn uç hız oranı (λ) ve bu uç hız oranına göre kanat sayısı (B) ve bu kanatların yarıçapları (R) belirlenir. Seçilen kanat profilinin bilinen, hücum açısına (α) göre C_L/C_D oranları vardır ve bu oranlardan C_L/C_D 'nin maksimum olduğu durumdaki hücum açısı seçilir. Böylece C_D katsayısının sıfıra yakın bir değer olduğu kabulü ile $C_D=0$ alınır. Daha sonra her r istasyonunda Betz limitini verecek şekilde kökten uca doğru burulma-kanat genişliği dağılımı belirlenir.

$a=1/3$ için momentum teorisi (2.19) denkleminde halka elemanında etki eden itki;

$$dT = \rho U^2 4 \left(\frac{1}{3} \right) \left(1 - \frac{1}{3} \right) \Pi r dr = \rho U^2 \frac{8}{9} \Pi r dr \quad (2.56)$$

ve kanat elemanı teorisi (2.52)denkleminde ($C_D=0$) kanat elemanı üzerine etkiyen normal kuvvet;

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \cos \varphi) c dr \quad (2.57)$$

olarak elde edilir.

Bağıl hız farklı şekilde de ifade edilebilir [47];

$$U_{rel} = U(1-a) / \sin \varphi = \frac{2U}{3 \sin \varphi} \quad (2.58)$$

(2.58) denklemini, (2.57) denklemindeki yerine taşıyıp (2.56) denklemini ile eşitlenirse;

$$\frac{C_L B c}{4 \Pi r} = \tan \varphi \sin \varphi \quad (2.59)$$

elde edilir.

(2.46) denklemini kullanılarak ve $a'=0$ ve $a=1/3$ kabulleri yerlerine konularak;

$$\tan \varphi = \frac{2}{3 \lambda_r} \quad (2.60)$$

eşitliği elde edilir ve bu (2.60) denklemini de (2.59) denklemine taşıyınca;

$$\frac{C_L B c}{4 \Gamma r} = \frac{2}{3 \lambda_r} \sin \varphi \quad (2.61)$$

elde edilir.

$\Lambda_r = \lambda(r/R)$ olduğunu dikkate alarak, her kanat kesitinde (r noktasında) bağıl rüzgar açısı φ ve kanat genişliği c;

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3 \lambda_r} \right) \quad (2.62)$$

$$c = \frac{8 \Gamma r \sin \varphi}{3 B C_L \lambda_r} \quad (2.63)$$

elde edilir. Bu denklemler, her kanat kesitinde Betz limit değerine uygun olarak kanat genişliği ve kanat burulma dağılımını verir.

Örnek;

$\lambda=7$, $R=5$ m, $C_L=1.0$, $(C_L/C_D)_{\text{mak}}$ değeri $\alpha=7^\circ$ 'de oluşmuştur ve kanat sayısı da $B=3$ olsun.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3 \lambda_r} \right)$$

$$c = \frac{8 \Gamma r \sin \varphi}{3 B C_L \lambda_r}$$

$$Q_T = Q_P - Q_{P,0}$$

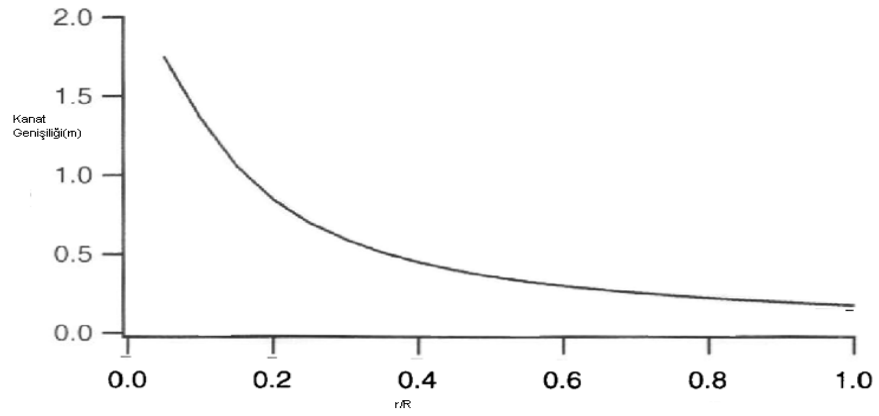
$$\varphi = Q_P + \alpha$$

denklemlerini kullanarak ve kanat ucunda burulma (twist) açısının 0° olduğunu dikkate alarak, kanat kökünden uca doğru kanat genişliği ve burulma (twist) açısı dağılımları ve diğer büyüklükler aşağıdaki Çizelge 2.2 'de verilmiştir.

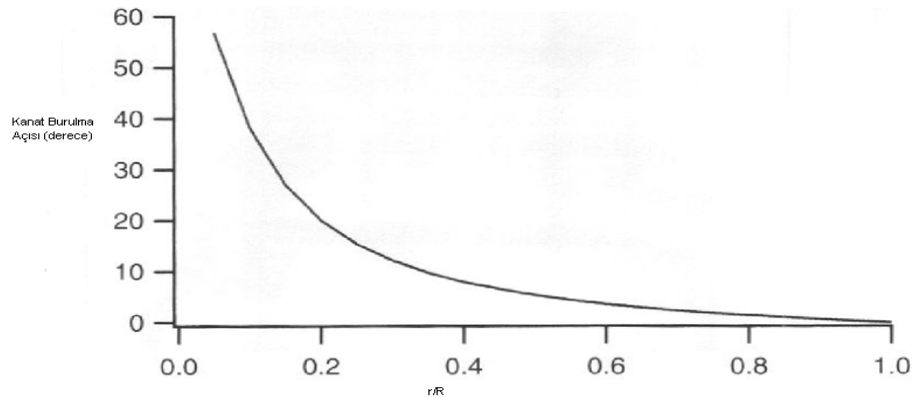
Çizelge 2.2 Kanat kökünden uca doğru olan kanat genişliği ve burulma açısı dağılımları

r/R	Veter, m	Burulma Açısı (derece)	Bağıl rüzgar hızının geliş açısı (derece)	İkkesit Burulma Açısı(derece)
0.1	1.375	38.2	43.6	36.6
0.2	0.858	20.0	25.5	18.5
0.3	0.604	12.2	17.6	10.6
0.4	0.462	8.0	13.4	6.4
0.5	0.373	5.3	10.8	3.8
0.6	0.313	3.6	9.0	2.0
0.7	0.269	2.3	7.7	0.7
0.8	0.236	1.3	6.8	-0.2
0.9	0.210	0.6	6.0	-1.0
1	0.189	0	5.4	-1.6

Şekil 2.13 ve 2.14'de kanat burulma açılarının ve kanat genişliklerinin, r/R oranına göre değişimleri görülmektedir.



Şekil 2.13 Kanat genişliğinin r/R oranına göre değişimi [47]



Şekil 2.14 Kanat burulma açısının r/R oranına göre değişimi [47]

(2.46) ve (2.47) denklemleri kullanılarak, φ ve U_{rel} indüksiyon faktörü biçiminde yazılarak daha kullanışlı bağıntılar olan denklem (2.64) ve (2.65) elde edilir.

$$dF_N = \sigma' \Pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) r dr \quad (2.64)$$

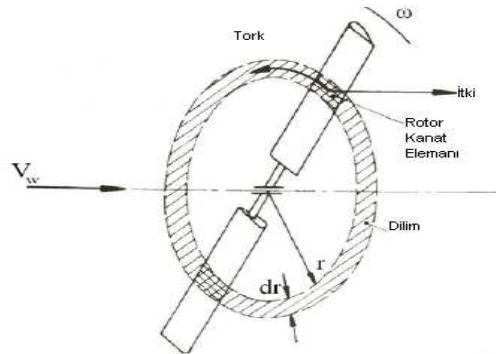
$$dQ = \sigma' \Pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) r^2 dr \quad (2.65)$$

σ' : yerel kanat dayanıklılığı [47];

$$\sigma' = \frac{B \times c}{2 \Pi r} \quad (2.66)$$

Kanat performans analizi

Kanat elemanı-momentum teorisinin ana varsayımı; kanat elemanı üzerine etkiyen kuvvetlerin sadece, eleman tarafından süpürülen halkadan geçen havanın momentumundaki değişiminden sorumlu olduğudur (Şekil 2.15). Bu teori, kanat üzerindeki kuvvetleri ve indüksiyon faktörleri (a, a') belirlemek için hem aksel hem de açısal moment dengesini kullanır. Bu sebepten, kanat elemanı-momentum teorisinde hem momentum teorisinden hem de kanat elemanı teorisinden elde edilen aksel kuvvetler (itki) ve açısal kuvvetler (tork) birlikte incelenmiştir. Bu teori, rüzgar türbini kanat tasarımlarında en çok kullanılan metoddur.



Şekil 2.15 Kanat elemanının dairesel halka yapısı

Doğrusal momentum teorisinden elde edilen aksenal kuvvet (itki) denklem (2.19)'da elde edilmişti;

$$dT = \rho U^2 4a(1-a)\Pi r dr$$

Açısal momentum teorisinden elde edilen açısal kuvvet (tork) denklem (2.32)'de elde edilmişti;

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U \Omega r^3 \Pi dr$$

Kanat elemanı teorisinden elde edilen aksenal kuvvet (itki) ve açısal kuvvet (tork) denklem (2.64) ve (2.65)'de elde edilmişti;

$$dF_N = \sigma' \Pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) r dr$$

$$dQ = \sigma' \Pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) r^2 dr$$

Yukarıda momentum teorisinden elde edilen tork değeri ile kanat elemanı teorisinden elde edilen tork değeri birbirine eşitlendiğinde denklem (2.67) elde edilir;

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_L}{(4\lambda_r \sin \varphi)} \quad (2.67)$$

Yukarıda momentum teorisinden elde edilen itki değeri ile kanat elemanı teorisinden elde edilen itki değeri birbirine eşitlendiğinde denklem (2.68) elde edilir;

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_L \cos \varphi}{(4 \sin^2 \varphi)} \quad (2.68)$$

Aşağıda daha önce kanat elemanı teorisinde (2.46) denklemi ile elde edilen bağlı rüzgar geliş açısı denklemini (2.67) ve (2.68) denklemleri içerisine taşıdığımızda (2.69) ve (2.70) denklemleri gibi kullanışlı bağıntılar elde edilir;

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega \times r \times (1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r}$$

$$C_L = 4 \sin \varphi \frac{(\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi)}{\sigma'(\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)} \quad (2.69)$$

$$\frac{a'}{(1+a')} = \frac{\sigma' C_L}{(4 \cos \varphi)} \quad (2.70)$$

Ayrıca, (2.69) ve (2.70) denklemlerinden türetilen bazı kullanışlı denklemler aşağıda görülmektedir;

$$\frac{a}{a'} = \frac{\lambda_r}{\tan \varphi} \quad (2.71)$$

$$a = 1/[1 + 4 \sin^2 \varphi (\sigma' C_L \cos \varphi)] \quad (2.72)$$

$$a' = 1/[4 \cos \varphi (\sigma' C_L) - 1] \quad (2.73)$$

Çözüm Metodu

Türbin kanadının her kesitinde akış şartları ve kuvvetleri bulabilmek için yukarıda verilen denklemlerin çözümü için iki çözüm metodu vardır.

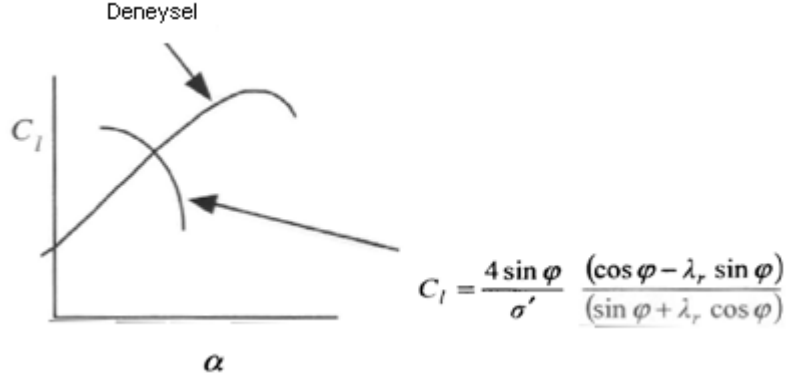
- i) Birinci metod; deneysel olarak belirlenmiş kanat karakteristikleri ve kanat elemanları teori denklemleri kullanılarak C_L ve α değerleri direkt olarak hesaplanır. Bunun için, sayısal çözüm uygulanabildiği gibi grafiksel çözüm de kullanılabilir.
- ii) İkinci metod ise iteratif sayısal çözümü gerektirir.

Metod-I: C_L ve α hesabı

Verilen kanat geometrisi ve operasyon şartlarında $\varphi = \alpha + \theta_P$ olduğu dikkate alınarak;

$$C_L = 4 \sin \varphi \frac{(\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi)}{\sigma'(\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)}$$

denklemden, her kanat kesitinde C_L ve α değerleri hesaplanır. Bu denklemde iki bilinmeyen vardır. Bu değerleri bulabilmek için verilen kanadın C_L - α ampirik bağıntısı kullanılarak, yukardaki denklemi sağlayacak C_L ve α değerleri alınır. Bu işlem, sayısal ve grafiksel olarak yapılabilir. Grafiksel olarak C_L ve α değerleri aşağıda Şekil 2.16'da görüldüğü gibi grafikten alınabilir.



Şekil 2.16 Bilinen bir kanat kesitinin deneysel ve sayısal grafik çözüm metodu [47]

Sonucun doğru olabilmesi için, kesişim noktasındaki eksenel indüksiyon faktörünün 0.5 değerinden küçük bir değer olması gerekmektedir. C_L ve α değerleri bulunduktan sonra a ve a' değerleri, (2.67) ve (2.68) denklemleri kullanılarak elde edilir.

Metod-II: İteratif çözüm

Bu methodda a ve a' değerlerinin iterasyon yöntemiyle bulunması amaçlanır.

- i) a ve a' değerlerinin tahmini olarak alınması,
- ii) İzafi(gelen) rüzgar açısının

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega \times r \times (1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r}$$

denkleminde hesaplanması,

- iii) $\varphi = \alpha + \theta_P$ denkleminde α açısının ve sonra C_L ve C_D değerlerinin hesaplanması,
- iv) a ve a' değerlerinin (2.67), (2.68) ya da (2.72), (2.73) denklemleri ile tekrar hesap edilip güncellenmesi,

Bu işlemler, güncellenen değerlerin bir önceki değerlere belli bir toleransta yaklaşıncaya kadar devam eder.

Güç Katsayısının Hesabı

Kanadın her kesiti için a , a' ve C_L/C_D değerleri bulunduktan sonra rotorun toplam güç katsayısı;

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} \lambda_r^3 a' (1-a) [1 - (C_D / C_L) \cot \varphi] d\lambda_r \quad (2.74)$$

denkleminde hesaplanır. Burada λ_h , rotorda göbek kesitinde lokal hız oranını ifade etmektedir. Bu denklem aynı zamanda;

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) [1 - (C_D / C_L) \cot \varphi] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (2.75)$$

formunda da yazılabilir.

Bu denklemler genellikle sayısal olarak çözülebilir. $C_D=0$ için (2.74) denklemi, dairesel momentum teorisinden elde edilen denklemin aynısıdır.

Uç Kayıpları: Kanat sayısının güç katsayısına etkileri

Rüzgar türbini kanadında rüzgarın etkiyle kanadın emme kısmında basınç düşük, diğer kısmında basıncın büyük olması nedeniyle hava, kanadın uç kısmında alt yüzeyden üst yüzeye doğru bir hareket kazanır. Bu etki nedeniyle, özellikle kanat ucuna doğru kanada etki eden kaldırma kuvvetinde ve buna bağlı olarak güçte bir azalmaya neden olur. Bu nedenle kanattan elde edilebilecek kuvvet veya güç değerlerinin düzeltilmesi gerekir.

Düzeltilme faktörü (F), kanat sayısına ve izafi (gelen) rüzgar açısına bağlı olup;

$$F = \left(\frac{2}{\pi} \right) \cos^{-1} \left[\exp \left[- \frac{(B/2)[1 - (r/R)]}{(r/R) \sin \varphi} \right] \right] \quad (2.76)$$

denkleminde tanımlanır. F değeri 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Böylece, önceki bölümde verilen denklemler F kullanılarak düzeltilmelidir.

Momentum teorisinden elde edilen kuvvet denklemleri;

$$dT = F \rho U^2 4a(1-a) \Pi r dr \quad (2.77)$$

$$dQ = F 4a' (1-a) \rho U \Omega r^3 \Pi dr \quad (2.78)$$

şeklinde yazılabilir. Diğer denklemler ise;

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_L}{(4F \lambda_r \sin \varphi)} \quad (2.79)$$

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_L \cos \varphi}{(4F \sin^2 \varphi)} \quad (2.80)$$

$$C_L = 4F \sin \varphi \frac{(\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi)}{\sigma' (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)} \quad (2.81)$$

$$\frac{a'}{(1+a')} = \frac{\sigma' C_L}{(4F \cos \varphi)} \quad (2.82)$$

$$a = 1/[1+4F \sin^2 \varphi (\sigma' C_L \cos \varphi)] \quad (2.83)$$

$$a' = 1/[4F \cos \varphi (\sigma' C_L) - 1] \quad (2.84)$$

şeklinde yazılabilir.

Fakat burada (2.71) denklemini değişmemektedir;

$$\frac{a}{a'} = \frac{\lambda_r}{\tan \varphi}$$

Güç katsayısı;

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} F \lambda_r^3 a' (1-a) [1 - (C_D / C_L) \cot \varphi] d\lambda_r \quad (2.85)$$

veya

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} F \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) [1 - (C_D / C_L) \cot \varphi] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (2.86)$$

denkleminde hesaplanır.

Dizayn Şartından Farklı Akış Şartlarında Çalışma

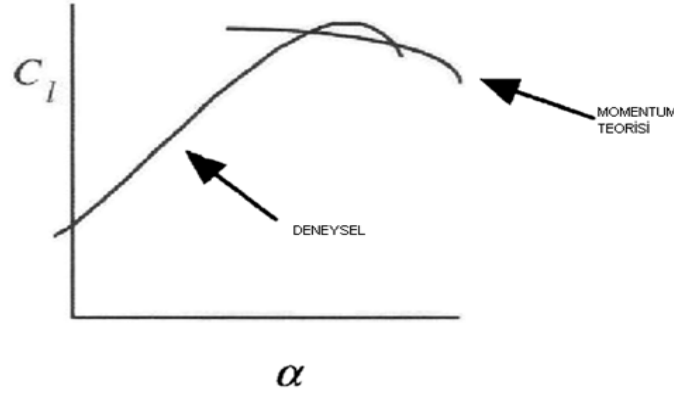
Önceki bölümlerde ifade edildiği gibi rüzgar türbinleri 12 m/s rüzgar hızında dizayn edilir. Bu hız durumuna göre kanada burulma kazandırılır. Dizayn şartlarının oldukça dışındaki operasyon şartlarında sistem analizine etki eden birçok problem vardır. Bu problemler;

i) Kanadın tutunma kaybı (stall) şartlarına yakın çalışma durumunda birden çok çözüm vardır.

ii) Eksenel indüksiyon faktörü 0.5 değerine yaklaşması veya o değeri aşması (yüksek yük altında operasyon).

i) Kanat elemanları momentum teorisi denklemlerinin birden çok çözümü

Tutunma kaybı (stall) şartlarında C_L 'nin belirlenebilmesi için Şekil 2.17'da görüldüğü gibi iki farklı çözümü vardır.



Şekil 2.17 Kanat elemanları momentum teorisi denklemlerinin çözüm yöntemleri

Her iki çözüm de mümkündür. Bu çözümlerden, kanat boyunca hücum açısının sürekliliğini sağlayan çözüm geçerlidir.

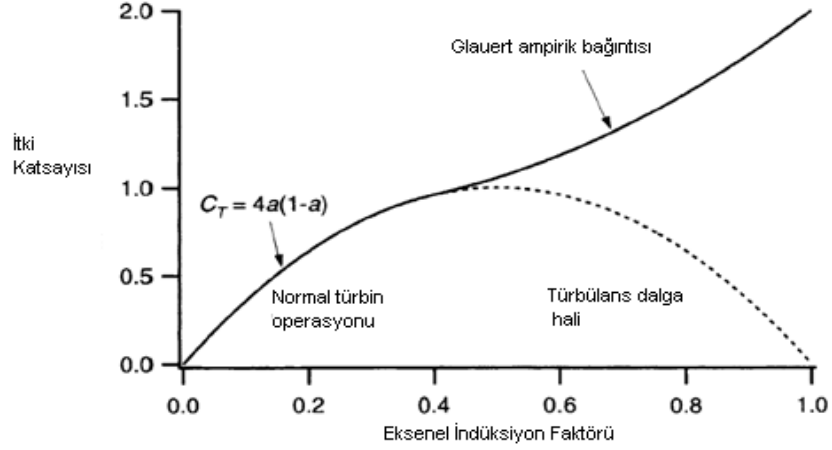
ii) Yüksek yük altında

Rüzgar türbinlerinde Kanat Elemanları Momentum Teorisi, küçük eksenel indüksiyon faktörü değerlerinde deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar vermektedir. Ancak, Momentum teorisi $a > 0.5$ değerleri için geçerli değildir. Bu durumda türbin kanat etrafında akış alanı oldukça kompleks bir hal alır. Bu nedenle, rotor için belirlenen birkaç işletim şekli vardır.

a) Normal rüzgar türbini operasyon hali ($a < 0.5$)

b) Türbülans dalga hali ($a > 0.5$): yüksek rüzgar hızında operasyon.

Aşağıda Şekil 2.18'de eksenel indüksiyon faktörüne göre itki kuvvet katsayısının değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.18 Eksenel indüksiyon faktörüne göre itki kuvvet katsayısının değişimi [47]

Şekilden görüldüğü gibi $a > 0.5$ için ölçülen C_T değerleri artarak $a=1.0$ da $C_T=2.0$ değerine ulaşmaktadır. Bunun anlamı; bu akış şartlarında rotor kanatları etrafında yüksek türbülans ve re-sirkülasyon olduğudur. Bu akış şartlarında momentum teorisi geçerli değildir. Bu şartlarda C_T ve a arasında ampirik bağıntı geliştirilerek sistem performansı belirlenebilir.

Türbülans Dalga Şartlarında ($a > 0.5$) Rotor Performansı

Analiz için ampirik C_T - a denklemi, kanat elemanı teorisi ile beraber kullanılarak sistem analizi gerçekleştirilebilir. Ampirik bağıntı, uç kayıpları da dikkate alınarak Glauert tarafından verilmektedir;

$$a = (1/F)[0.143 + \sqrt{0.0203 - 0.6427(0.889 - C_T)}] \quad (2.87)$$

Bu denklem; $a > 0.5$ veya $C_T > 0.96$ için geçerlidir.

Rotorda, r noktasında alınan halka kesidinde lokal itki kuvvet katsayısı;

$$C_{Tr} = \frac{dF_N}{\frac{1}{2} \rho U^2 2\pi r dr} \quad (2.88)$$

denklemlerle verilir. dF_N değeri kullanılarak,

$$dF_N = \sigma' \Pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) r dr$$

$$C_{Tr} = \sigma'(1-a)^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) / \sin^2 \varphi \quad (2.89)$$

elde edilir.

Bu denklemleri kullanarak en basit çözüm yolu, daha önce iteratif çözüm metodu olarak tanımlanan Metod-II'yi kullanmaktır. Bunun için mümkün olabilecek a ve a' değerlerini seçerek çözüme başlanır. α , C_L ve C_D değerlerini bulduktan sonra lokal itki kuvvet katsayısı yukarıda verilen denklemlerden hesaplanır. Burada iki durum vardır.

i) Eğer $C_T < 0.96$ ise daha önce bulunan denklem kullanılır.

ii) Eğer $C_T > 0.96$ ise; aksel indüksiyon faktörü (a) (2.87) denklemi ile, teğetsel indüksiyon faktörü ise (a') (2.82) denklemi ile hesaplanır.

Optimum Kanat Şekli

Bu optimizasyonda dalga rotasyonu dikkate alınmaktadır, ancak sürüklenme yok ($C_D=0$) ve uç kaybı $F=1$ olarak alınmaktadır. Optimizasyon için;

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) [1 - (C_D / C_L) \cot \varphi] \lambda_r^2 d\lambda_r$$

denkleminin bir kısmının kısmi türevi alınarak;

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} [\sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)] = 0 \quad (2.90)$$

elde edilir ve gerekli işlemler yapılarak;

$$\lambda_r = \sin \varphi (2 \cos \varphi - 1) / [(1 - \cos \varphi) (2 \cos \varphi + 1)] \quad (2.91)$$

bulunur. Gerekli cebirsel işlemler yapılarak;

$$\varphi = (2/3) \tan^{-1}(1/\lambda_r) \quad (2.92)$$

$$c = \frac{8I_r}{BC_L} (1 - \cos \varphi) \quad (2.93)$$

denklemleri elde edilir.

İndüksiyon faktörleri ise (2.39) ve (2.72) denklemlerinden elde edilir.

Bu sonuçlar, ideal (doğrusal) kanat teorisi (dalga rotasyonu olmayan) sonuçlarıyla mukayese edilebilir;

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right)$$

$$c = \frac{8\Gamma r \sin \varphi}{3BC_L \lambda_r}$$

Daha önce de bahsedildiği gibi, C_L/C_D oranının maksimum olduğu α değeri seçilir. Kanat dayanıklılık oranı tanım olarak; kanatlar alanının kanat tarama (süpürme) alanına oranı olarak verilir.

$$\sigma = \frac{1}{\Gamma R^2} \int_{r_h}^R c dr \quad (2.94)$$

Eğer rotor N adet kanada sahip ise dayanıklılık oranı;

$$\sigma \cong \frac{B}{N\Gamma} \left[\sum_{i=1}^N c_i / R \right] \quad (2.95)$$

denklemleriyle hesaplanabilir.

Aşağıda Çizelge 2.3'de üç farklı uç hız oranı (dalga rotasyonu dikkate alınarak) ve kanat sayısı için , kanat genişliğinin ve izafi (gelen) rüzgar açısının kanat boyunca değişimi verilmiştir.

Çizelge 2.3 Farklı uç hız oranı ve kanat sayılarında, kanat boyunca değişen kanat genişliği ve izafi (gelen) rüzgar açısı

r/R	$\lambda=1$	$B=12$	$\lambda=6$	$B=3$	$\lambda=10$	$B=2$
	φ	c/R	φ	c/R	φ	c/R
0.95	31	0.284	6.6	0.053	4.0	0.029
0.85	33.1	0.289	7.4	0.059	4.5	0.033
0.75	35.4	0.291	8.4	0.067	5.1	0.037
0.65	37.9	0.288	9.6	0.076	5.8	0.042
0.55	40.8	0.280	11.2	0.088	6.9	0.050
0.45	43.8	0.263	13.5	0.105	8.4	0.060
0.35	47.1	0.234	17.0	0.128	10.6	0.075
0.25	50.6	0.192	22.5	0.159	14.5	0.100
0.15	54.3	0.131	32.0	0.191	22.5	0.143
Dayanıklılık, σ		0.86		0.088		0.036

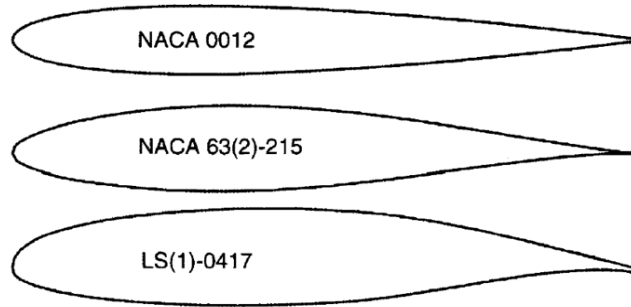
Çizelge 2.3'den görüldüğü gibi, hızlı türbinlerin (yüksek uç hız oranı) kanat genişliği değerleri uçtan göbeğe doğru artarken, kanat boyunca burulma değeri daha küçük olmaktadır ve kanat dayanıklılığı değeri daha düşüktür.

YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1 Giriş

Günümüzde çeşitli ülkelerde geliştirilmiş binlerce kanat profili şeklinden söz etmek mümkündür. Bu profillerin büyük bir çoğunluğu II. Dünya savaşı öncesi ve savaş sırasında ABD’de NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) tarafından ve bir kısmı da İngiltere, Almanya, Rusya gibi bazı ülkelerde geliştirilmiş olup son yıllarda HAD kullanılarak Şekil 3.1’de görüldüğü gibi modern profiller de geliştirilmiştir.

Kanat profiline kamburluk verilerek üst yüzeydeki alan artırılır ve bu alanın artırılmasıyla profil üzerinden geçen havanın hızının artırılması sağlanmaktadır. Hava hızının artması ile Bernoulli denklemine göre basınç da düşmektedir. Böylece alt yüzey ile üst yüzey arasında oluşan basınç farkı artmakta ve sonuç olarak taşıma kuvveti artırılmaktadır ve böylece kanadın da performansına artırıcı yönde etkisi olmaktadır.

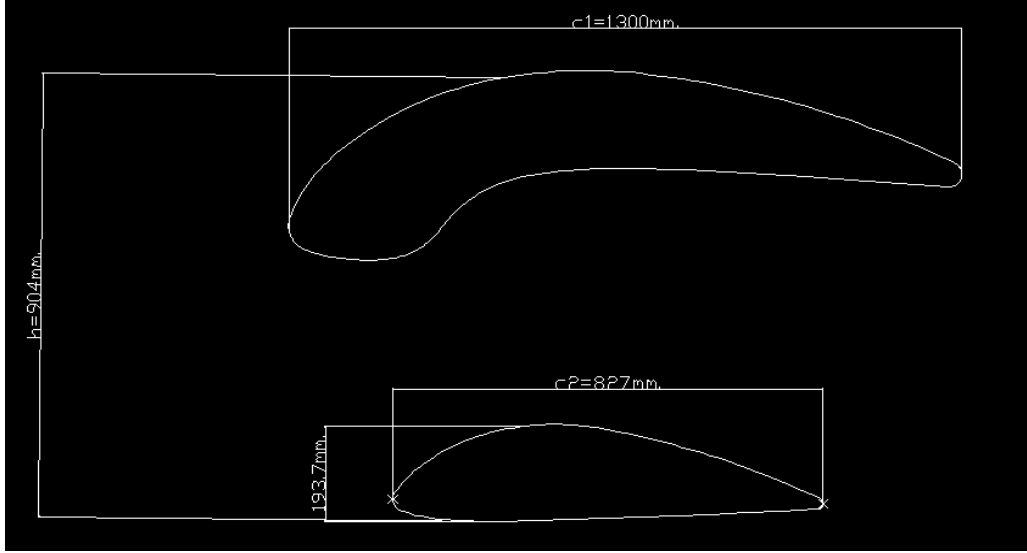


Şekil 3.1 Bazı modern kanat profilleri [47]

Bu bilgiler ışığında, ikili kanat profilinin sistem aerodinamik performansını, laminar akışı koruyarak akışı daha fazla bir % ile kanatta tutarak kontrollü bir akış sağlayarak, yükselteceği beklentisi ile rüzgar ve su ortamlarında sayısal analizi yapılmıştır. Şekil 3.2’de kullanılacak olan kanadın model resmi görülmektedir ve Şekil 3.3’da ise kanat modelinin kanat kesit profili ve boyutları görülmektedir.



Şekil 3.2 Kanat model resmi



Şekil 3.3 Kanat modelinin kanat kesit profili ve boyutları

3.2 Aerodinamik Kuvvetler ve Kavramlar

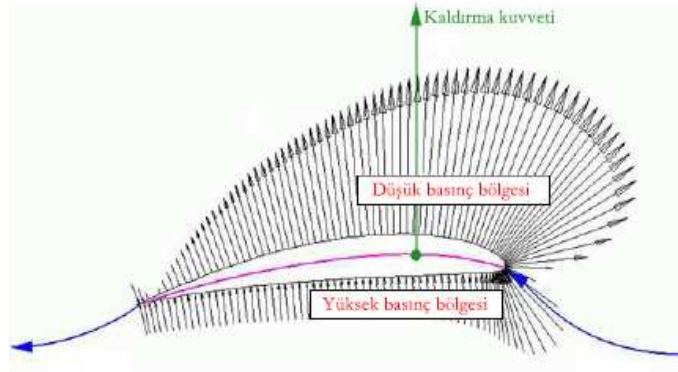
Aerodinamik performans, kanat profili etrafında oluşan taşıma ve sürükleme kuvveti ve bunların oranları ile ilgilidir. Hava araçlarının daha verimli olabilmesi için taşıma kuvvetinin fazla, sürükleme kuvvetinin ve bunların moment etkilerinin ise düşük olması gerektiği için aerodinamikte çalışmalar her zaman aerodinamik performansı artırma üzerine olmuştur.

Rüzgar türbini üzerine gelen hava akımı, kanadın geometrisi sebebiyle oluşacak basınç dağılımı, kanadın dönmesini sağlar. Bu basınç dağılımı ve kayma

gerilmeleri ile cisim üzerinde aerodinamik kuvvetler meydana gelir. Kanat profilinin yapısı sayesinde bu aerodinamik kuvvetler değişmektedir.

3.2.1 Basınç dağılımı

Bir uçak veya benzeri bir cismi geçmekte olan hava akımının yolu bu cisim tarafından değiştirilir. Bu da havanın yerel hızının değişmesine neden olur. Cisim etrafında çeşitli noktalardaki farklı hızlar, Bernoulli denkleminde göre cisim etrafında her noktada değişen bir basınç dağılımına neden olur. Şekil 3.4’de verilen basınç dağılımında görüldüğü gibi üst yüzeyde düşük basınç bölgesi, alt yüzeyde yüksek basınç bölgesi oluşur. Kanadın hücum kenarında durma noktası oluşur ve durma noktasında havanın hızı sıfıra eşit olduğu için dinamik basınç sıfırdır ve toplam basınç statik basınca eşittir.



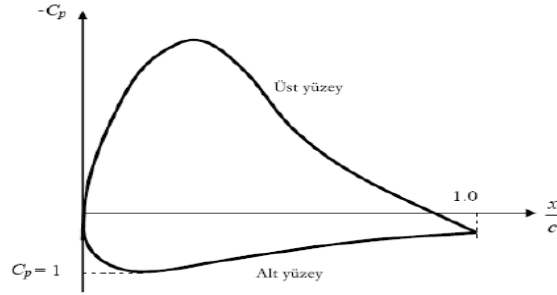
Şekil 3.4 Küçük hücum açısına sahip bir kanat profili etrafındaki basınç dağılımı

Kanat profili etrafındaki basınç dağılımı 3.1 nolu denklemde görüldüğü gibi boyutsuzlaştırılır ve bu boyutsuz sayıya basınç katsayısı adı verilir. Bu denklemde; p statik basınç, p_{ref} referans basıncı ve v_{ref} ise referans hızıdır.

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho v_{ref}^2} \quad (3.1)$$

Şekil 3.5’de basınç katsayısının kanat profilinin veter uzunluğu boyunca değişim grafiği verilmiştir. Alt ve üst yüzeyler arasındaki basınç farkından meydana gelen basınç kuvvetlerinin ve hava ile cisim yüzeyi arasındaki sürtünme kuvvetlerinin

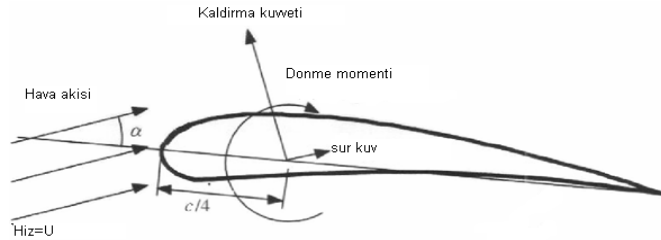
bileşkesi cisim üzerinde bir bileşke kuvvetle bir bileşke moment oluşturulur. İşte bu cisme etkiyen kuvvet ve momente aerodinamik kuvvet ve moment adı verilir.



Şekil 3.5 Basınç katsayısının veter uzunluğu boyunca değişimi

3.2.2 Kaldırma, sürüklenme ve boyutsuz parametreler

Rüzgar türbinleriyle ilgili incelemelerde aerodinamik kuvvet ve moment genellikle rüzgar doğrultusuna veya izafi olarak düşünülürse, Şekil 3.6'den görüldüğü gibi serbest akım doğrultusuna göre tanımlanmış bir eksen takımında: kaldırma kuvveti (L), sürüklenme kuvveti (D) ve yunuslama momenti(M) belirtilmiştir.



Şekil 3.6 Kanat kesiti üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler [47]

i) Kaldırma kuvveti:

Kanat yüzeyinin önüne çarpan hava akımı, kanadın üst yüzeyi daha kavisli olduğu için hızlı bir şekilde, alt yüzey ise üste göre daha az kavisli olduğundan yavaş hareket eder. Bu da, yüksek basınç oluşumuna neden olur ve bir kaldırma kuvveti meydana gelir. Kaldırma kuvveti akışa dik olarak etmektedir.

Taşıma kuvveti 3.2 nolu denklemde görüldüğü gibi kanat profili etrafındaki akışkan yoğunluğu ile serbest akışın hızına ve taşıma katsayısına bağlıdır. Referans alan, sürüklenme kuvvetindekinden farklı olarak kanadın dikey yöndeki izdüşümüne eşittir.

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho_{\infty} V_{\infty}^2 A = f(\alpha, Re, M_{\infty}) \quad (3.2)$$

ii) Sürüklenme kuvveti:

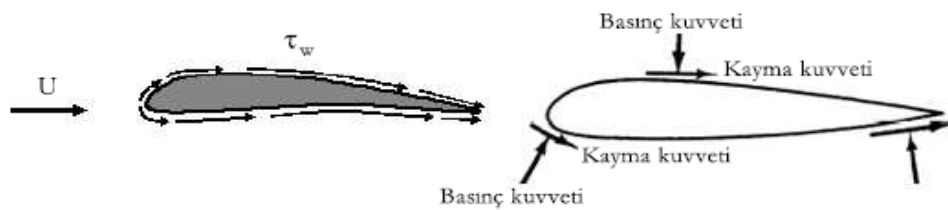
Cismin üzerine akış yönünde meydana gelen bir kuvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti, hava akışının cisim üzerine 90 derece dik geldiği durumda meydana gelirken, minimum sürüklenme kuvveti ise, hava akışı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir.

Sürüklenme, yüzeyin viskozitesine ve basınç farklılıklarından dolayı da cismin şekline bağlıdır. Sürüklenme kuvveti 3.3 nolu denklemde verildiği gibi sürüklenme katsayısının dinamik basınç ile referans alanın çarpımına eşittir. Referans alan, kanat profilinin yere izdüşümünden oluşan alandır. Dinamik basınç ise yoğunluk ile hızın karesinin çarpımının yarısına eşittir.

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho_{\infty} V_{\infty}^2 A = f(\alpha, Re, M_{\infty}) \quad (3.3)$$

Kanat profilinin aerodinamik katsayıları öncelikle profilin geometrik şekline ve hücum açısına ve daha sonra da Reynolds ve Mach sayılarına bağlıdır.

Kanat profili etrafında hareket eden hava akış halindeyken kanat profilinde Şekil 3.7'deki gibi basınç ve hız kuvvetleri oluşur.



Şekil 3.7 Kanat profili yüzeyinde oluşan kuvvetler

Akım yüzey civarında hareket ettiğinde yüzeye yapışan akımın sürtünme etkisiyle yüzeyde kayma gerilmesi meydana gelir. Kayma gerilmesi yüzeye teğetsel etkiyen ve bir alana karşılık gelen kuvvet olarak tanımlanır. Kayma gerilmesi, Z_w şeklinde gösterilir ve bir nokta özelliğidir. Ayrıca yüzey boyunca değişir ve yüzeyin kayma gerilmesi dağılımının dengelenmemiş net farkı da cisim üzerinde bir aerodinamik kuvvet yaratır. Bu oluşan kuvvet sürüklenme kuvvetine katkı sağlar. Sürüklenme kuvveti; parazit ve indüklenmiş sürüklenme kuvveti olmak üzere iki çeşittir.

Parazit sürüklenme kuvveti; kanat sıfır derece hücum açısı ile uçtuğunda, var olan tek sürüklenme kuvvetidir. Yüzeydeki pürüzlülük arttıkça yüzey sürtünme kuvveti artacaktır dolayısıyla parazit sürüklenme kuvveti de artacaktır.

İndüklenmiş sürüklenme; taşıma kuvvetiyle oluşan ve arzu edilmeyen bir sürüklenme kuvvetidir. Kanat ucu girdaplarının aşağı ve yukarı akımları etkileyerek, taşıma kuvvet vektörüne geriye doğru bir bileşke eklemesine indüklenmiş sürüklenme denir. Kanat ucu girdapları, kanat civarında kanadın hem önünde hem de arkasında, dikey hız bileşenleri oluştururlar. Bu akımlar aşağı ve yukarı akımları kuvvetlendirerek etkin hücum açısını azaltırlar. Girdaplar kuvvetlendikçe etkin hücum açısındaki azalma da büyüyecektir. Etkin hücum açısının azalması sonucu kanadın ürettiği toplam taşıma kuvveti, kanatta enine basınç farklılığı olmadığı durumda üretilen toplam taşıma kuvvetine göre daha az olacaktır. Üretilen taşıma kuvvetindeki azalma da aslında taşıma kuvvetinin kendisinden kaynaklanmaktadır. Taşıma kuvvetinde oluşan kaybı karşılamak için kanadın daha yüksek bir hücum açısında uçurulması gerekecektir. Bu da sürüklemeyi arttıracaktır. Bu fazladan sürüklenme indüklenmiş sürüklenmedir.

iii) Yunuslama momenti:

Taşıma-sürüklenme düzlemi içerisinde etkiyen moment bileşenidir. Kanadın hücum açısı artacak şekilde etkimesi pozitif kabul edilir.

Moment kuvveti, 3.4 denkleminde elde edilir.

$$M = \frac{1}{2} C_M \rho_\infty V_\infty^2 A c \quad (3.4)$$

iv) Boyutsuz parametreler

(3.2), (3.3) ve (3.4) nolu denklemlerin sağ tarafındaki bütün boyutlu büyüklükler sol tarafa bölen olarak geçirilirse, aerodinamik kuvvetler ve moment için

$$\frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}V_{\infty}^2A} = C_D = f(\alpha, Re, M_{\infty}) \quad (3.5)$$

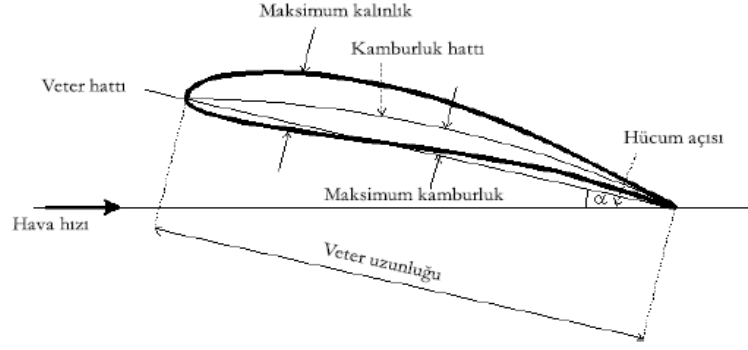
$$\frac{L}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}V_{\infty}^2A} = C_L = f(\alpha, Re, M_{\infty}) \quad (3.6)$$

$$\frac{M}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}V_{\infty}^2Ac} = C_M \quad (3.7)$$

şeklinde boyutsuz birer ifade elde edilir. Bu ifadelerin sağ taraflarındaki boyutsuz büyüklükler sırasıyla aerodinamik kuvvet ve moment katsayıları olarak adlandırılır. Uçak ve benzeri araçlarla ilgili uygulamada birbirine yakın özelliklerdeki araçların kanat, kuyruk gibi elemanlarının geometrileri arasında farklılıklar vardır. Dolayısıyla bunlara etkiyen aerodinamik kuvvet ve momentler de farklı olacaktır. Aerodinamik kuvvet ve momentler yerine aerodinamik katsayıları birbiriyle karşılaştırarak cisimlerin aerodinamik performanslarını mukayese etmek daha doğru olacaktır.

3.2.3 Aerodinamik Karakteristikler

Kanat profili, göreceli olarak yüksek verimlilikle taşıma gücü üretebilen şekildir. Kanat profilinin tanımlanabilmesi için belirli karakteristikleri vardır ve bunlar Şekil 3.8'den görüldüğü gibi; veter hattı, azami kalınlık, azami kamburluk, hücum açısı, hücum kenarı, firar kenarı vs.'dir.



Şekil 3.8 Kanat profilinin karakteristikleri

Kanat veter hattı: Kanat profili hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren hattır.

Hücum kenarı: Kanat profilinin en öndeki havayı karşılayan kenarıdır.

Firar kenarı: Kanat profilinin arkadaki kenarıdır.

Azami kalınlık: Kanat profilinin alt ve üst yüzeyi arasındaki azami mesafedir ve veterin yüzdesi olarak verilir.

Hücum Açısı: Veter hattı ile göreceli hava akımı arasındaki açıdır.

Bombe çizgisi: Kanadın alt ve üst noktasını ikiye ayıran çizgi.

3.2.4 Aerodinamik Performansın Arttırılması

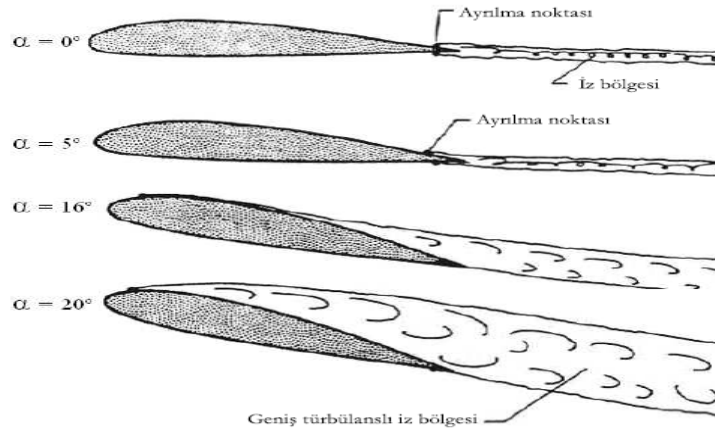
Rüzgar türbinlerinden, belirli rüzgar hızlarında sahip oldukları kaldırma kuvvetine göre elde edilen güç bellidir. Sahip olduğumuz kanat profili yapısında belirli değişiklikler yapılarak aynı rüzgar hızlarında hatta daha düşük rüzgar hızlarında daha fazla güç elde edilmesi mümkündür. Böylece rüzgar türbinlerinin daha verimli olabilmesi için mevcut taşıma kuvvetinden daha fazla taşıma kuvveti elde edilmesi ve mevcut sürüklenme kuvvetinden ise daha az sürüklenme kuvveti elde edilmesi gerekir. Yüksek C_L/C_D oranlı hava araçları düşük oranlılardan daha etkin ve daha verimlidirler. Bu koşullar gerçekleştirildiğinde aynı rüzgar hızlarında ve daha düşük rüzgar hızlarında daha iyi performans sağlanıp üretilen güç arttırılabilir.

Taşıma kuvvetini arttırmak için;

- Hücum açısı arttırılabilir
- Kanat profiline kamburluk verilebilir
- Yüksek taşıma aygıtları kullanılabilir

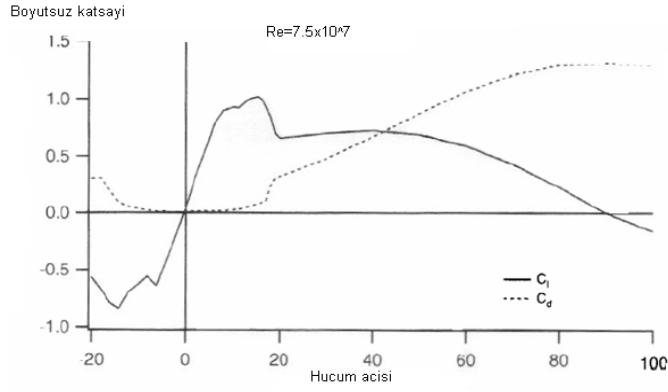
- Aktif akış kontrol sistemleri kullanılabilir

Basınç gradyanı belirli bir mesafedeki hava basıncı değişimidir. İki nokta arasındaki basınç farklılığı büyüdükçe, gradyan da o ölçüde büyük olur. Ters basınç gradyanı, profilin üst yüzeyindeki asgari basınç noktası ve firar kenarındaki basınç farklılığı gibi havanın akış yönünde basıncın artması durumunda oluşur. Hücum açısı arttırıldıkça bu ters basınç gradyanlarının etkisi ile ayrılma noktası, hücum kenarına yaklaşır ve hıza ve diğer parametrelere bağlı olarak klasik profiller için yaklaşık 12-16⁰'lik hücum açısına ulaşıldığında akım ayrılması başlar. Bu durum tutunma kaybı olarak bilinir ve bu olayın başladığı açıya tutunma kaybı açısı denir. Bu açıdan sonra hücum açısının arttırılması halinde taşıma kuvveti azalır ve sürüklenme kuvveti artışı daha fazla olur. Artan hücum açılarında göre kanat arkasında oluşan iz bölgesi ve kanattan ayrılmalar Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9 Hücum açısının değişimi ile kanat profili etrafındaki akış

S809 kanat profiline ait taşıma katsayısı, C_L ve sürüklenme katsayısı, C_D 'nin hücum açısı ile değişim grafikleri Şekil 3.10'da verilmiştir. Bu şekilde taşıma katsayısının tutunma kaybı açısına kadar arttığı ve bu açı değerinden sonra düşmeye başladığı görülmektedir. Ayrıca hücum açısının artışı ile ayrılma noktasının hücum kenarına yaklaşması sonucu sürüklenme katsayısı artmakta olduğu görülmektedir.



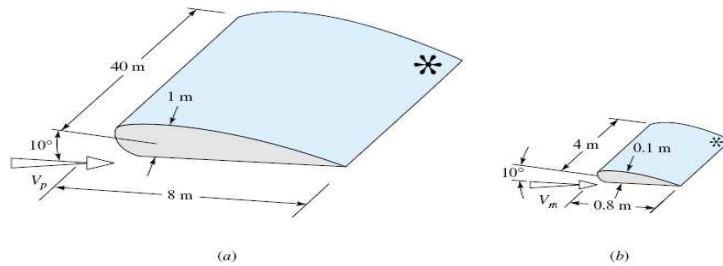
Şekil 3.10 Taşıma, sürüklenme kuvveti katsayılarının hücum açısıyla değişimi [47]

Kanat profili dizayn edilirken genelde C_L/C_D oranının maksimum olduğu andaki hücum açısı seçilir [50].

3.2.5 İkili kanat profili boyutsal çözümlenme

Analize başlamadan önce ikili kanat profilinin model ile prototip arasında geometrik benzerliği oluşturulmuştur.

Geometrik Benzerlik: Model ve prototip, sadece ve sadece gövdelerinin her üç koordinattaki tüm boyutlarının aynı küçülme oranına sahip olması durumunda geometrik olarak benzerdir (Şekil 3.11). Tüm uzunlukların aynı oranda değişmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Eğer model, prototipin 1/10'u olarak yapılacaksa, modelin uzunluğu, genişliği ve yüksekliğinin her biri 1/10 büyüklüğünde olmalıdır. Tüm açılar, geometrik benzerlikte korunurlar. Tüm akış doğrultuları korunur.



Şekil 3.11 Bir kanat profilinin geometrik benzerlik örneği [51]

Bu bilgiler ışığında ikili prototip kanat profilinin 0.15 ölçekli modelini oluşturduk.

$$0.15L_p=L_m$$

$$0.15t_p=t_m$$

$$0.15C_p=C_m$$

Burada; L kanat boyunu, t kanat kalınlığını ve c kanat genişliğini ifade eder.

İkili kanat profilinin prototip ve model ölçüleri Şekil 3.12'de görölmektedir. Burada prototip kanat profilinin üst kanat genişliği $c_1=1300$ mm, alt kanat genişliği $c_2=827$ mm ve iki kanat arası $h=904$ mm'dir. Model kanat profilinin, üst kanat genişliği $c_1=195$ mm, alt kanat genişliği $c_2=124$ mm ve iki kanat arası $h=137$ mm'dir.



Şekil 3.12 İkili kanat profilinin prototip ve model ölçüleri

Boyutsal çözümleme

Türbin kanatlarında yapılabilecek analizlerde sayısal hangi parametrelerin dikkate alınması gerektiği konusunda bir sonuca varabilmek için boyutsal çözümleme şarttır. Bu boyutsuz çözümleme sonucunda sistemde etkili boyutlu ya da boyutsuz parametreler belirlenerek analizler bu boyutsuz parametrelere göre gerçekleştirilir.

Boyut analizinde; F_D : sürüklenme kuvveti, μ : viskozite, v : akışkan hızı, h : üst kanadın en üst noktası ile alt kanadın en alt noktası arasındaki mesafe, c_1 : üst kanat genişliği, c_2 : alt kanat genişliği, ρ : akışkanın yoğunluğu, α : hücum açısı, N : devir sayısıdır. μ , v , c_1 tekrarlanan parametreler olarak seçilip aşağıdaki boyutsuz sayılar elde edilmiştir.

$$F_D=f(\mu, v, c_1, h, c_2, \rho, N, \alpha) \text{ ise;}$$

$$\Pi_1 = F_D / (\mu \cdot v \cdot c_1) = C_D$$

$$\Pi_2 = (\rho \cdot v / \mu) \cdot c_1 = Re$$

$$\Pi_3 = h / c_1$$

$$\Pi_4 = c_2 / c_1$$

$$\Pi_5 = (c_1 \cdot N) / v = \text{uç hız oranı}$$

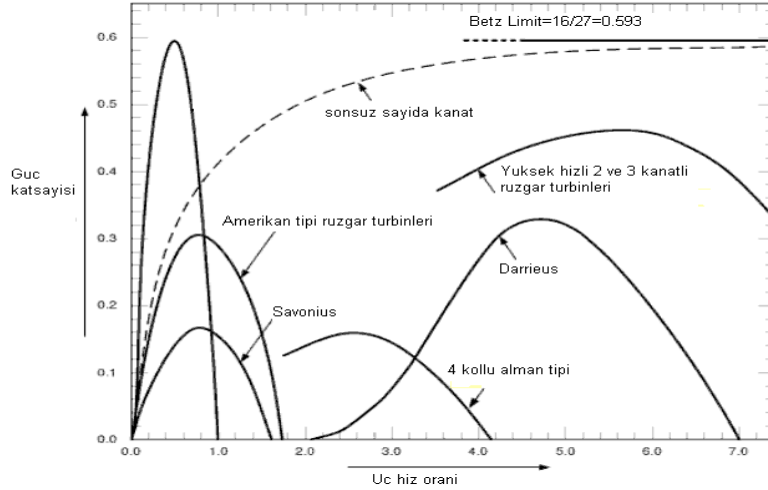
$$\Pi_6 = \alpha = \text{hücum açısı}$$

Aynı işlemler F_L için yapıldığında farklı bir parametre olarak C_L katsayısı bulunmuştur. C_L katsayısı aşağıdaki gibi gösterilir;

$$\Pi = F_L / (\mu \cdot v \cdot c_1) = C_L$$

Sonuç olarak boyut analiziyle elde edilen parametreler; sürüklenme kuvvet katsayısı, kaldırma kuvveti katsayısı, Reynolds sayısı, hücum açısı, h/c_1 oranı, c_2/c_1 oranı ve uç hız oranı elde edilmiştir. Bu analizde akış problemi iki boyutlu olarak çözüldüğünden uç hız oranı dikkate alınmamıştır. Fakat uç hız oranı Şekil 3.13'de görülen rüzgar türbini tiplerine göre uç hız oranlarından en uygun değerinin 5-7 olduğu ve A.S. Baraj ve arkadaşları [36] 0.8 m. çapında model türbinin su ortamında 1-2 m/s su hızlarında yapılan deneysel araştırmasından elde ettiği sonuçlara göre uç hız oranının en uygun değeri 5 olarak elde etmiştir.

Akımın Mach sayısı 0.3 değerinden küçük olduğundan (Hava ortamında 0.035, su ortamında 0.00006) akışkanın yoğunluk değişimi dikkate alınmasına gerek olmadığından Ma sayısının etkisi de ihmal edilmiştir.



Şekil 3.13 Rüzgar türbin tipine göre uç hız oranı-güç katsayısı ilişkisi [52]

3.3 Sayısal Analiz ve Hesaplamalar

Elde edilen bu parametrelere göre yapılan analizler, kanat arası konumunun $h/c_1=0.7$, $h/c_1=0.8$, $h/c_1=0.88$ ve $h/c_1=0.95$ olduğu durumda ve küçük kanat genişliğinin büyük kanat genişliğine olan oranı $c_2/c_1=0.5$, $c_2/c_1=0.64$ ve $c_2/c_1=0.73$ olduğu durumlarda 0° , 4° , 8° , 10° , 12° , 14° , 16° , 18° , 20° , 23° , 26° , 30° , 33° hücum açılarındaki denemelerdir. Bu analizler yapılırken, hava ortamında $Re=1,5 \times 10^5$ sayısında ve su ortamında $Re=2,24 \times 10^5$, $Re=3,36 \times 10^5$ ve $Re=4,5 \times 10^5$ sayılarında denemelerdir. Çözümlemede kullanılan parametrelerin değişim aralıkları;

$$V_{\text{rüzgar}} = 12 \text{ m/s (} Re=1.5 \times 10^5 \text{)}$$

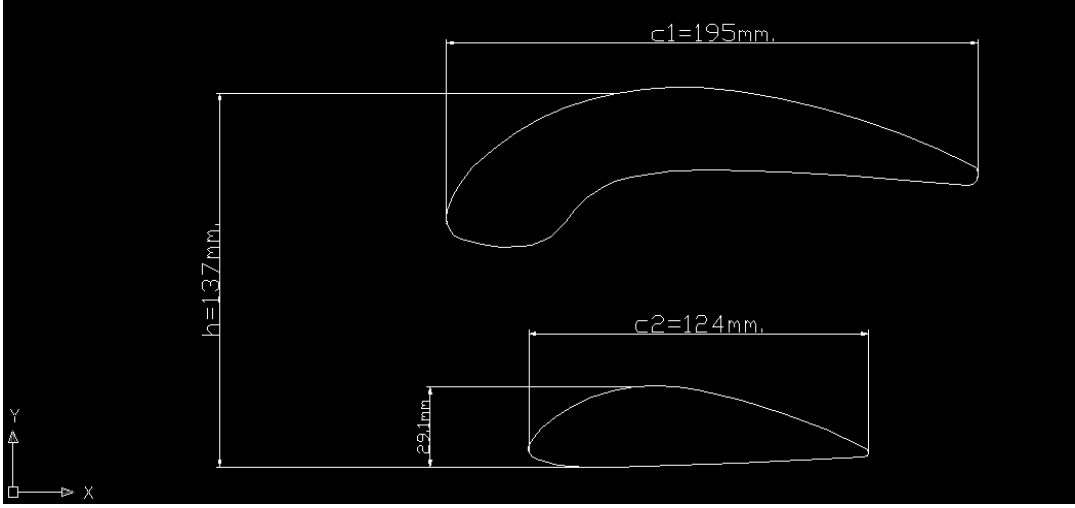
$$V_{\text{su}} = 1 \text{ m/s (} Re=2.24 \times 10^5 \text{), } 1.5 \text{ m/s (} Re=3.36 \times 10^5 \text{) ve } 2 \text{ m/s (} Re=4.5 \times 10^5 \text{)}$$

$$h/c_1 = 0.7, 0.8, 0.88 \text{ ve } 0.95 \text{ (} 0.7 \leq h/c_1 \leq 0.95 \text{)}$$

$$c_2/c_1 = 0.5, 0.64 \text{ ve } 0.73 \text{ (} 0.5 \leq c_2/c_1 \leq 0.73 \text{)}$$

$$\text{Hücum açısı (} \alpha \text{)} = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 14^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 23^\circ, 26^\circ, 30^\circ, 33^\circ$$

Şekil 3.14'de yukarıda görülen değişkenlerin model kanat profili üzerinde ayrıca gösterilmiştir.



Şekil 3.14 İkili kanat profilinin model ölçüleri

3.3.1 Sayısal çözümleme için kullanılan FLUENT™ programı

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin çok hızlı gelişmesiyle birlikte sanayinin hemen hemen tüm kesimlerinde, akış problemlerinin incelenmesinde HAD çok yaygın hale gelmiştir. Rüzgar türbini kanat profili etrafındaki akış bileşenlerinin hesaplanmasıyla aerodinamik kuvvetler elde edilebilir. Bu şekilde, türbin tasarımı üzerinde düzeltmeler yaparak taşıma kuvveti artırılıp sürüklenme kuvvetini azaltma yolları aranabilir.

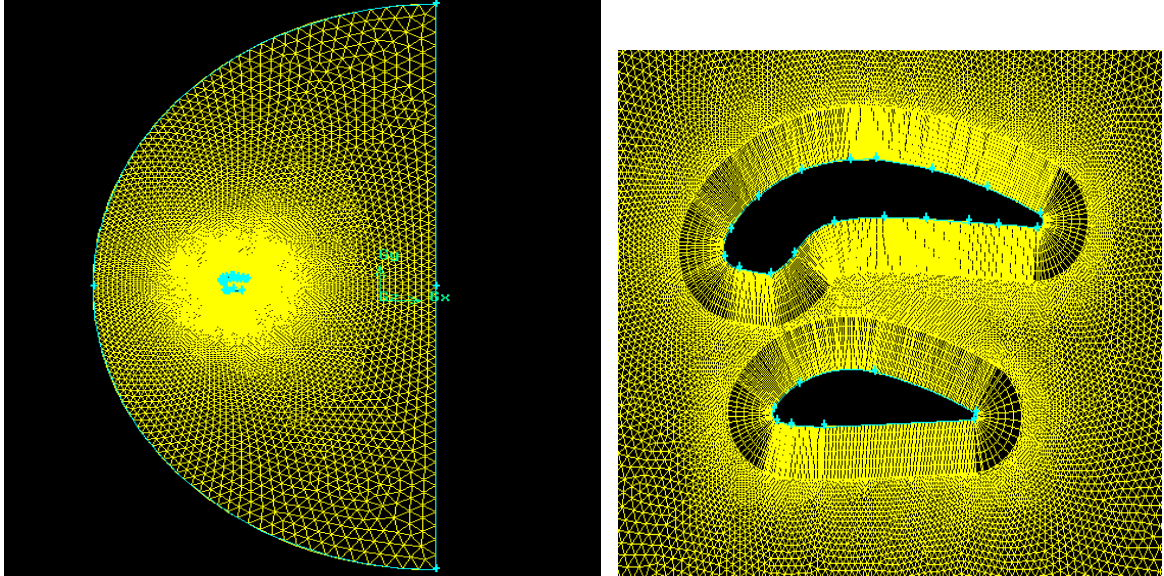
Bu tezde kullanılan FLUENT™ [53] yazılımı, RANS denklemleri ile sonlu hacimler metodu kullanarak benzeşim yapan genel amaçlı bir HAD programıdır. FLUENT™ yazılımı, değişik çalışmalarda kullanılabilecek pek çok fiziksel model içerir; türbülanslı akış, ısı transferi, reaksiyon akışları, kimyasal karışımlar, yanma ve çok safhalı akışlar için modeller örnek olarak verilebilir.

Türbülans Benzeşim Modelleri

Ele alınan uygulama için en uygun türbülans modelinin seçimi için de değişik türbülans modellerinin özelliklerini ve sınırlamalarını bilmek gerekmektedir. FLUENT™ HAD paket programında bulunan türbülans modellerinden bazıları;

- Spalart-Allmaras
- Realizable k- ϵ
- SST (Shear-Stress Transport) k- ω

Bu tez çalışmasında, ikili kanat profili analizi için türbülans benzeşim modeli olarak Realizable k- ϵ seçilmiştir. Bu modelin seçilmesinin sebebi, R_e sayısının düşük olması ve düşük R_e sayılarında FLUENT™ yazılımında bu modelin tavsiye edilmesidir. Ayrıca kanat yakınında, sınır tabaka için geliştirilmiş duvar işlemi ve çözüme basınç gradyantının etkisini de dahil ederek performansını geliştirmektedir. Realizable k- ϵ benzeşiminde kullanılmak üzere FLUENT™'nin ağ yapısı için yardımcı program olan GAMBIT™ yazılım yardımıyla Şekil 3.15'de görülen ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu ağ yapısı, akışın viskoz etkilerden etkilenmemesi için yeteri büyüklükte bir akış ortamı olarak hazırlanmıştır ve kanat profiline alt ve üstünde veter boyunun 12 katı kadar, kanat profiline önünde 5 katı kadar ve iz bölgesinde 7 katı kadar serbest akım bölgesi ele alınmıştır.



Şekil 3.15 Kanat profili için oluşturulan ağ yapısı

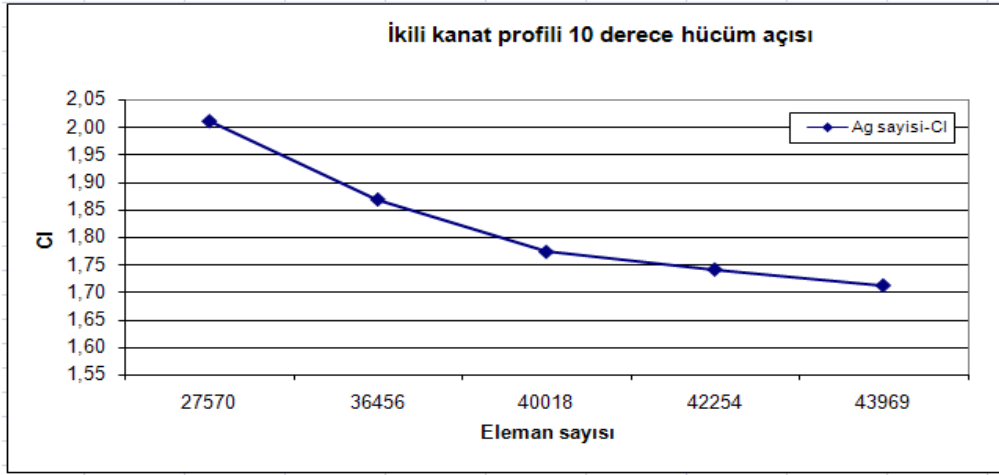
Üretilen hesaplama ağının, benzeşimin sayısal çözüm kararlılığı ve doğruluğu üzerinde büyük bir etkisi vardır. Ağ yapısı oluşturulurken en önemli konulardan birisi de sayısal benzeşim sonuçlarının ağ elemanlarının sayısından bağımsız olmasına dikkat etmektir. Ağ yapısı belirli eleman sayısından sonra sayısal sonuçlarda çok fazla değişiklik göstermez ve fazla ağ yapısı hesaplama zamanını uzatır. Bu nedenle, belirli bir ağ sayısından sonra sonuç fazla değişmediği için hesaplama zamanını uzatmaya gerek yoktur. Bu ağ yapısı sayısını elde edene kadar toplam ağ elemanı sayısı artırılır ve her bir sonuç karşılaştırılır. Bu

çalışmada toplam ağ elemanı sayısı için hem ikili kanat profilinin hem de karşılaştırma yapılacak NACA4412 kanat profilinin Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'deki gibi $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında ve belirli bir hücum açısındaki kanat üzerinde değişen eleman sayısına göre değişen kaldırma kuvveti katsayıları görülmektedir.

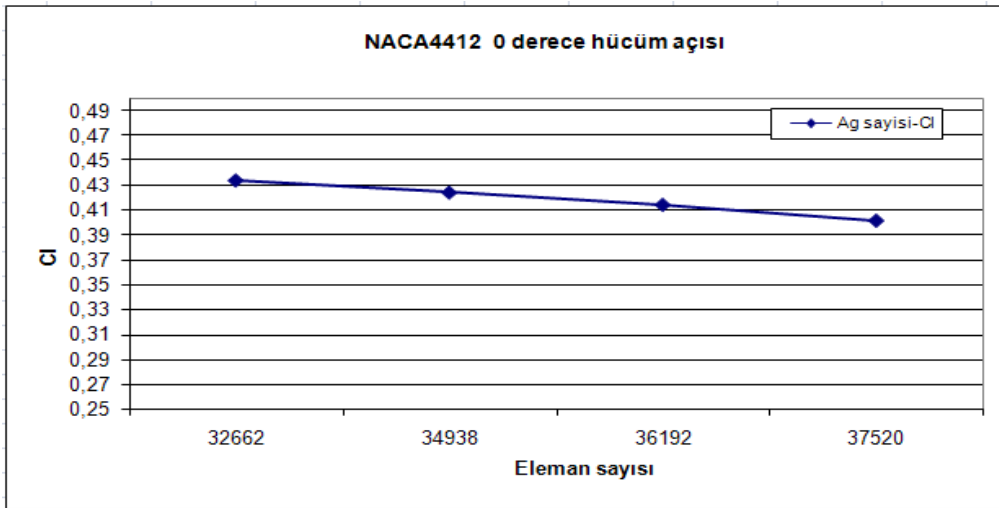
Kanat profilinin sınır şartları; alt ve üst yüzeyleri duvar olarak, giriş; serbest akım bölgesinde hız girişi ve çıkışta; dış akış (outflow) olarak ele alınmıştır. Çünkü çıkış akışının hızı ve basıncı bilinmediği bu durumlarda bu sınır şartı kullanılır. Akışkan olarak hava ve su seçilmiştir ve hava için sıkıştırılmaz, su için sabit yoğunluklu olarak ele alınmıştır. Serbest ortamda ikinci-mertebe geriye-farklar (second order upwind) ayrıklaştırması seçilmiştir çünkü kaldırma ve sürüklenme katsayılarının çok daha doğru tahmin edilebilmesini sağlar [54] ve denklemler SIMPLE çözüm algoritması ile çözdürülmüştür. Bu metot, aşamalı ağ yapısı yöntemini esas alır ve Rhio&Chow interpolasyonu boyunca yan yana sıraya koyulmuş ağ yapısı yöntemine uyarlanmıştır [32]. Bu interpolasyon, sonuçların doğruluğu artırıcı yönde etki eder. Yakınsama için hava ortamında; her parametredeki kalanların 1×10^{-5} , su ortamında 1×10^{-6} olması durumuna kadar çözüme devam edilmiştir.

İkili kanat profiline ait Şekil 3.16'ya baktığımızda; ikili kanat için 10^0 hücum açısında başlangıçta 27570 elemana sahip ağ yapısının eleman sayısını giderek arttırdığımızda C_L katsayısının giderek azaldığını görmekteyiz ve her hesap edilen ile bir önceki hesap edilen arasında çok az fark olduğu ana kadar eleman sayısı arttırılmıştır. Yani eleman sayısından bağımsız hale geldiğini görmekteyiz. Giderek eleman sayısını arttırdığımızda çözüm süresi de uzadığından, en uygun eleman sayısı olan 43969 eleman sayılı ağ yapısı tüm uygulamalarda kullanılmıştır.

Şekil 3.17'de ise karşılaştırma yapacağımız NACA4412 kanat profilinin de 0^0 hücum açısında eleman sayısı ile değişen C_L katsayısı görülmektedir. Bu profil için de en uygun eleman sayısı olan 37520 eleman sayılı ağ yapısı tüm uygulamalarda kullanılmıştır.



Şekil 3.16 İkili kanat profilinin eleman sayısına göre değişen C_L değerleri



Şekil 3.17 NACA4412 kanat profilinin eleman sayısına göre değişen C_L değerleri

SAYISAL SONUÇLAR

4.1 Giriş

İkili kanat profilinin analizi için kullanılan FLUENT™ programında sayısal çözümleme yaparken daha önce boyutsal çözümlemeyle elde edilen parametreler, belirlenmiş olan değişim aralıklarında incelenmiştir. Hava ortamında 12 m/s ($Re=1.5 \times 10^5$)'de ve su ortamında ayrı ayrı 1 m/s ($Re=2.24 \times 10^5$), 1.5 m/s ($Re=3.36 \times 10^5$) ve 2 m/s ($Re=4.5 \times 10^5$)'de incelenmiştir. Öncelikle ikili kanat profilinin orjinal kanat genişliği oranı olan $c_2/c_1=0.64$ oranında sabit tutularak, h/c_1 oranı 4 farklı aralıkta (0.7, 0.8, 0.88 ve 0.95) denenmiştir. Bu koşullar altında elde edilen optimum h/c_1 oranı, bu oranda sabit tutularak bu sefer c_2/c_1 oranı 3 farklı aralıkta denenmiştir ve ikili kanat profili için optimum şartlar belirlenmiştir.

İkili kanat profili analizinde akışkan hızının ve hücum açısının değişimiyle basınç kuvvetlerinin kanat profili üzerindeki dağılımı elde edilmiştir. Basınç dağılımları bize profil üzerindeki aerodinamik kuvvet şiddetlerinin değişimi hakkında bilgiler vererek, tutunma kaybı açısının yani maksimum C_L katsayısının, minimum C_D katsayısının ve maksimum C_L/C_D oranının hangi koşullar altında oluştuğu elde edilmiştir. Bu önemli aerodinamik kuvvetlerin elde edildiği hücum açılarında hız konturları elde edilerek kanat üzerindeki hız değişimleri irdelenmiştir. Daha sonra kanat profili üzerine akım çizgileri göndererek kanat üzerindeki laminar ayrılma kabarcığı, kanat üzerinden akım ayrılmaları elde edilmiştir. Son olarak, kanat üzerinde oluşan bu akım ayrılmalarının belirli aralıklarla algılayıcılar koyularak vorteks kopma frekansları elde edilmiştir. Daha sonra günümüzde kullanılan NACA4412 kanat profili de ayrı hava ve su Re sayılarında, değişik hücum açılarında denenerak bu ikili kanat profiliyle karşılaştırma yapılmıştır.

4.2 Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde ikili kanat profilinin sayısal çözümlemesinden elde edilen tüm değerler tablo halinde verilmiştir. Ayrıca elde edilen optimum $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ oranlarındaki basınç dağılımı, akım karakteristikleri ve vorteks kopma frekansları, önemli hücum açılarında şekiller ile incelenmiştir. Aerodinamik

kuvvetler ise çeşitli grafikler ile daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bölüm, rüzgar ve suda elde edilen sayısal sonuçlar olarak 2 ayrı ana başlıkta ele alınmıştır.

4.2.1 Rüzgar ortamındaki sayısal sonuçlar

Rüzgar ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ (12 m/s) sayısında FLUENT programında yapılan sayısal çözümlerden, $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ koşullarında elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu koşullarda, önemli hücum açıları olarak belirlediğimiz $0^0, 12^0, 23^0, 26^0$ hücum açılarında elde edilen grafiksel sonuçlar irdelenmiştir.

4.2.1.1 İkili kanat profilinin basınç dağılımı

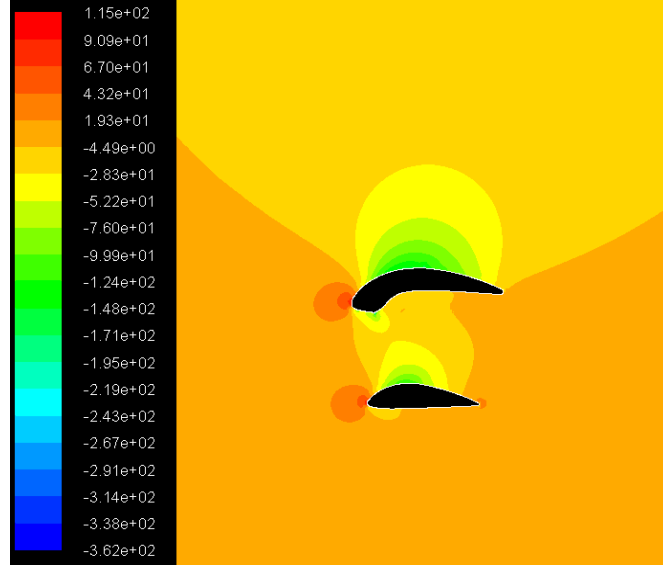
Basınç değişkenleri statik basınç konturları ve basınç katsayı dağılımı olmak üzere iki bölümde incelenmiştir.

i) Statik basınç konturları:

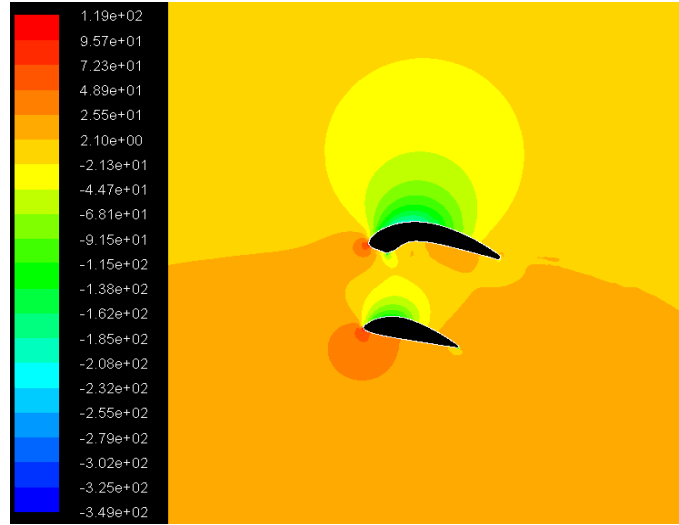
Statik basınç konturları, hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında, kanat aralığı $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ iken irdelenmiştir. Kanat profilleri 0^0 hücum açılarında, gelen rüzgarı ilk önce hücum kenarı karşılar ve yüksek basınç bölgesi oluşur. Şekil 4.1'de 0^0 hücum açısında, durma noktası bölgesinde, kanadın uç kısmında yüksek basınca maruz kaldığı görülmektedir. Bu noktada hız sıfır olduğundan burada yüksek basınç beklenen bir durumdur. Kanatların üst kısımlarında akışkanın hız kazanmasıyla düşük basınç bölgeleri oluşmaktadır. Aynı şekilde, alt kısımlarda da düşük hızdan dolayı yüksek basınç bölgeleri oluşmaktadır.

Hücum açısı Şekil 4.2'deki gibi hava ortamında 12^0 'ye arttırıldığında, üst kanadın üstünde basınç düşüşünün arttığı ve alt kısımda basınç artışının olduğu görülmektedir. 23^0 hücum açısında üst kanadın üstünde basınç düşüşü, Şekil 4.3'de görüldüğü gibi hücum kenarının hemen üst noktasından başlayarak kanadın 1/3'lük kısmına kadar görülmektedir ve alt kısımdaki basınç artışıyla birlikte kanadın alt ve üst kısmında basınç farkı maksimum seviyeye ulaşır maksimum kaldırma kuvveti elde edilmiştir. Daha sonra tutunma kaybına uğrayan Şekil 4.4'deki kanat profili, üst kısımda hala düşük basınç alanı görülse de, 23^0

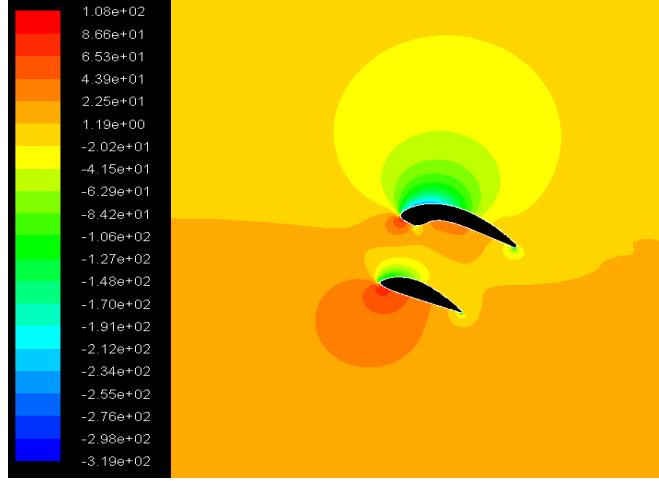
hücum açılı konuma göre kanadın alt ve üst bölgesi arası basınç farkı daha azdır ve bu hücum açısından sonra giderek azalır.



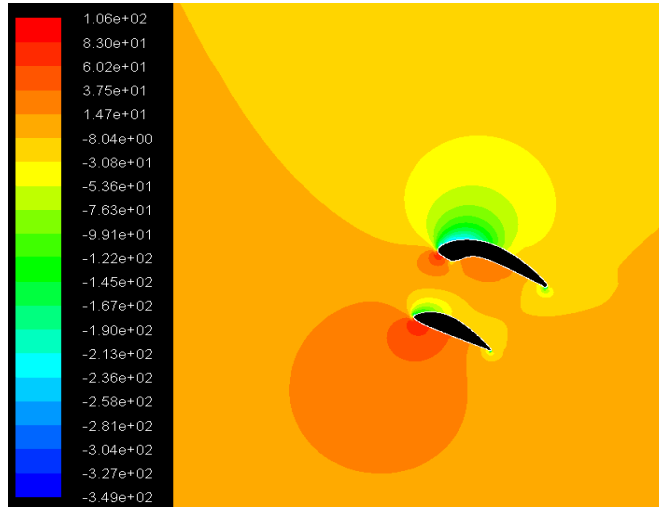
Şekil 4.1 Basınç konturu ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(Pa)



Şekil 4.2 Basınç konturu ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(Pa)



Şekil 4.3 Basınç konturu ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(Pa)



Şekil 4.4 Basınç konturu ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)(Pa)

ii) Basınç Katsayı Dağılımları

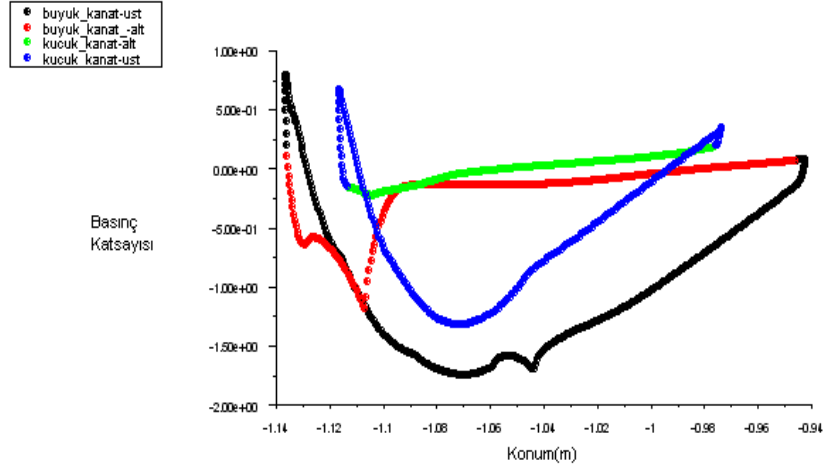
Bu bölümde, ikili kanat profili kanat aralığı $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ iken basınç katsayısı dağılımları, hava akışında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında ve 0^0 , 12^0 , 23^0 , 26^0 hücum açılarında irdelenmiştir. Şekillerde her kanat yüzeyi farklı renklerle belirtilmiştir ve kanat yüzeylerinin hücum kenarlarından firar kenarına doğru konumları (soldan sağa doğru) x koordinatında belirtilmiştir.

Bernoulli prensibine göre hızın düştüğü bölgelerde basınç yükselmek zorundadır. Buna uygun olarak basınç katsayısı da artmaktadır. Kanadın kaldırma kuvvetine etkisi olan basınç kuvveti, kanat profilinin alt bölgesinde üst bölgesine oranla fazla olması gerekmektedir.

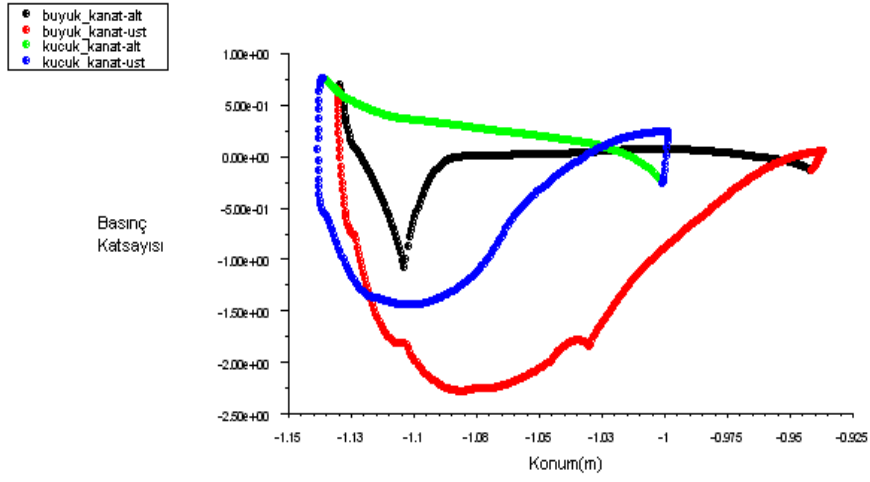
Şekil 4.5'de 0° hücum açısında, durma noktası bölgesinde, kanadın hücum kenarında yüksek basınca maruz kaldığı görülmektedir ve firar kenarına doğru gidildiğinde kanatların üst kısımlarında akışkanın hız kazanmasıyla düşük basınç bölgeleri oluşmaktadır. Aynı şekilde, alt kısımlarda da düşük hızdan dolayı yüksek basınç bölgeleri oluşmakta ve bu alt kısımlar ile üst kısımlar arasındaki basınç farkı kaldırma kuvvetini oluşturmaktadır. Basınç farkı ne kadar fazlaysa o kadar kaldırma kuvveti de artmaktadır. Belli bir hızdan sonra kanattaki ayrılmalardan dolayı sürüklenme kuvveti artar ve hız düşmeye başlar ve üst kanattaki basınç artmaya başlar. Alt ve üst kanat arası basınç farkı azaldıkça da kaldırmaya olan etki de azalmış olur.

Şekil 4.6'da 12° hücum açısında; küçük ve büyük kanadın üst bölgesinde hız alanları arttığından basınçta düşüş, alt bölgesinde hız alanları azaldığından basınçta artış gözlemlenmiştir. Şekil 4.7'de tutunma kaybı açısı olan 23° hücum açısında, küçük ve büyük kanadın üst bölgelerinde hız alanı daha fazla olduğundan, basınç katsayılarının daha da azaldığını, alt bölgelerinde buna zıt olarak basınç katsayılarının daha da arttığını görmekteyiz. Fakat firar kenarına doğru kanat üst bölgesindeki hız azalmasından ve üst yüzeydeki basıncın alt yüzeydekinden fazla olmasından dolayı kanattan akım ayrılmasının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.8'de tutunma kaybı açısından sonra incelenen 26° hücum açısındaki basınç katsayı dağılımı görülmektedir. Bu hücum açısında, kanatların alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç katsayı farkının 23° hücum açısına göre biraz daha az olduğu görülmektedir ve bu sebepten 23° hücum açısına göre daha az kaldırma kuvveti elde edilecektir. Kanadın firar kenarına doğru gidildikçe, 23° hücum açısına göre akışın daha erken kanattan ayrılmaya başladığı da gözlemlenmiştir.

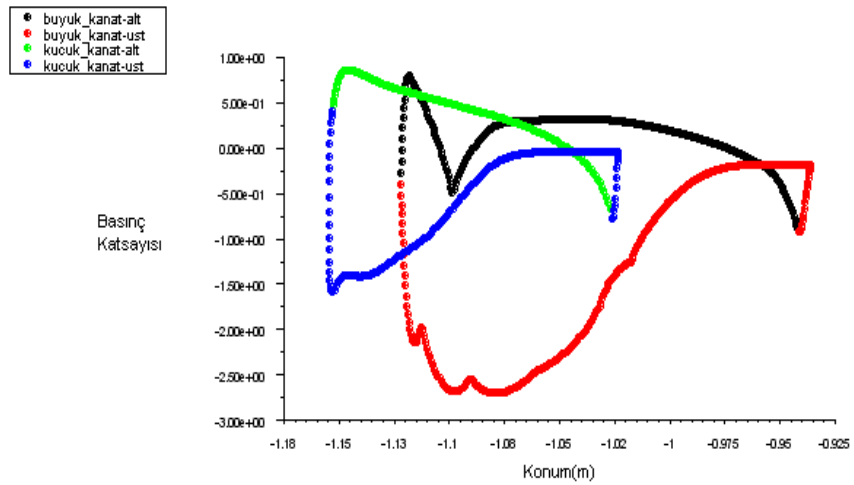
Basınç katsayı grafiğinden kanat üzerindeki akış ayrılmalarının gözlemlenebildiği gibi kanadın herhangi bir yerinde oluşan laminer ayrılma kabarcıklarını da belirlemek mümkündür. Hava ve su akışında siyah çizgiyle gösterilen büyük kanadın alt kısmında, kanadın 1/3'lük kısmına denk gelen yerde bir dalgalanma görülmektedir ve bu dalgalanma burada bir ayrılma kabarcığının olduğunu belirtmektedir. Bu ayrılma olayı ve firar kenarındaki akış ayrılmaları geniş bir şekilde türbülans karakteristikleri bölümünde anlatılmıştır.



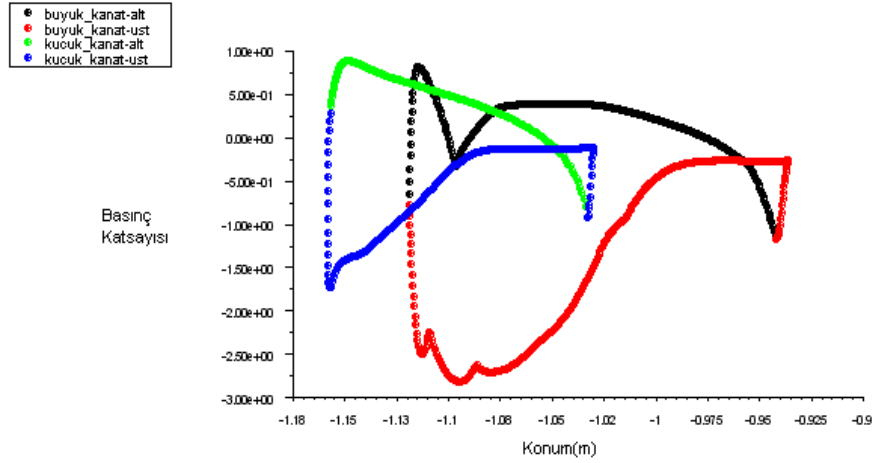
Şekil 4.5 Basınç dağılımı ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.6 Basınç dağılımı ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.7 Basınç dağılımı ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.8 Basınç dağılımı ($\alpha=26^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)

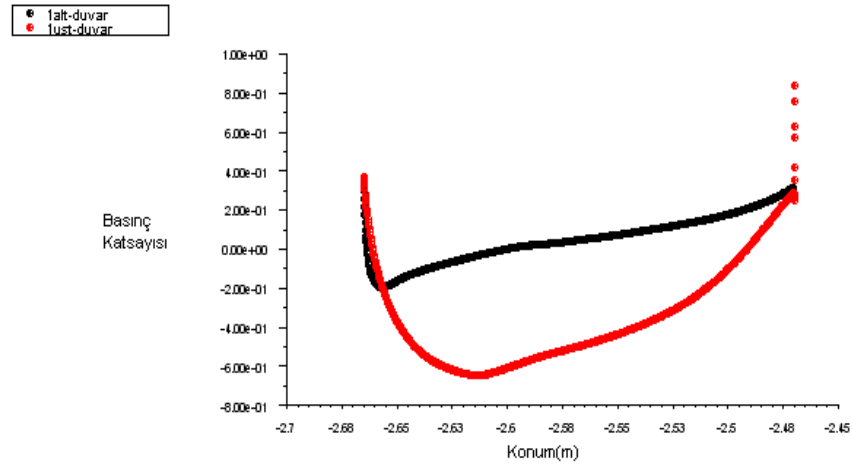
NACA4412 kanadının hava ortamındaki basınç katsayısı dağılımları:

İkili kanat profili ile NACA4412 kanat profilinin basınç katsayısı dağılımlarını karşılaştırabilmek için hava ortamında, ikili kanat profili ile aynı Re sayısında ve aynı hücum açılarında basınç katsayısı dağılımları elde edilmiştir.

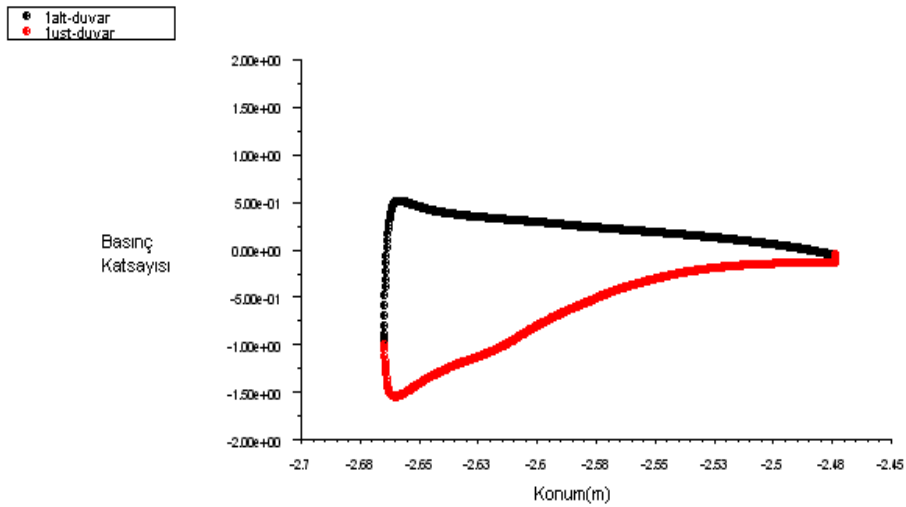
Hava ortamında Şekil 4.9'da 0° hücum açısındaki NACA4412 kanat profili, hücum kenarı uç kısmında hız değeri düşük olduğu için hem alt hem de üst kanat pozitif basınç katsayısı değeri ile başlamıştır. Fakat daha sonra üst kanatta, hızın artmasıyla basınç katsayısı düşüşe geçmiştir. Alt kanat, firar kenarına doğru hızdaki azalma ile basınç katsayısında artış görülmektedir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi, NACA4412 kanat profiline ait basınç katsayısı farkı, ikili kanat profili basınç katsayısı farkından çok düşüktür. Bu da, ikili kanat profilinden daha fazla kaldırma kuvveti elde edileceğini ispatlar niteliktedir.

Şekil 4.10'da 12° hücum açısındaki NACA4412 kanat profili hücum kenarında, üst kanattaki hız değeri yüksek olduğundan bu noktada basınç düşüktür. Firar kenarına doğru gidildikçe hız azalmasından dolayı basınçta artış görülür. Alt yüzeyde hücum kenarında basınç yüksektir fakat firar kenarına doğru basınç düşmektedir. NACA4412 kanat profilinin 12° hücum açısında elde ettiği basınç farkı, ikili kanat profilinin 12° hücum açısındaki basınç farkına göre az olduğu görülmektedir.

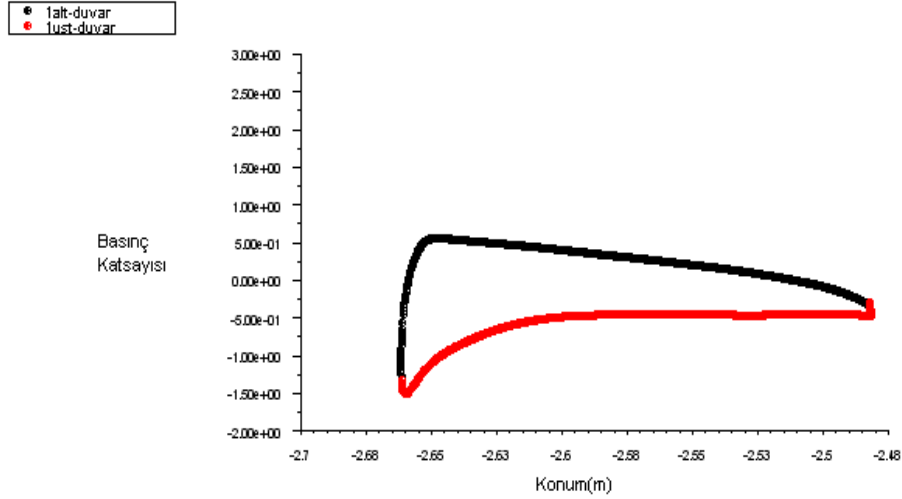
Şekil 4.11'de 23^0 hücum açısında NACA4412 kanat profilinden elde edilen basınç farkı daha da azalmıştır ve buna zıt olarak ikili kanat profilinden elde edilen basınç farkı daha da artmıştır. Bu da; ikili kanat profilinin NACA4412'ye daha geç tutunma kaybına uğradığının bir göstergesidir.



Şekil 4.9 NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.10 NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=12^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.11 NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=23^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)

4.2.1.2 İkili kanat profilinin akım karakteristikleri

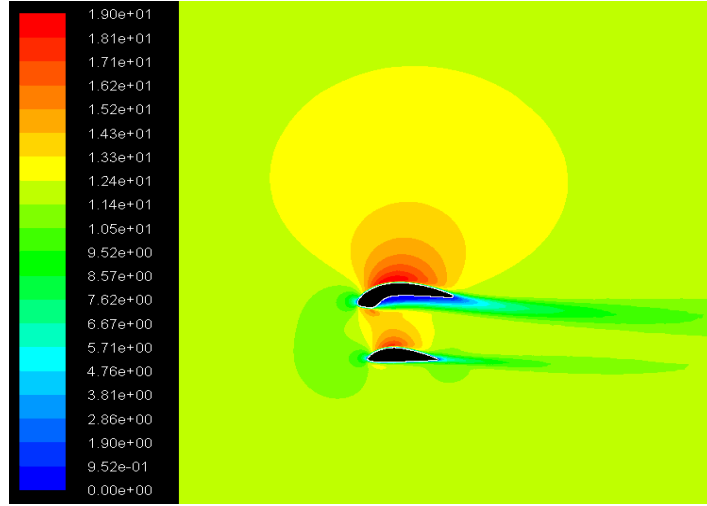
Bu bölümde kanat kesitinin akış karakteristikleri incelenmiş olup, kanat üzerindeki hız dağılımları, akım çizgileri oluşturma, türbülans şiddeti konturları ve vorteks kopma frekansları belirlenmiştir.

i) Hız konturları

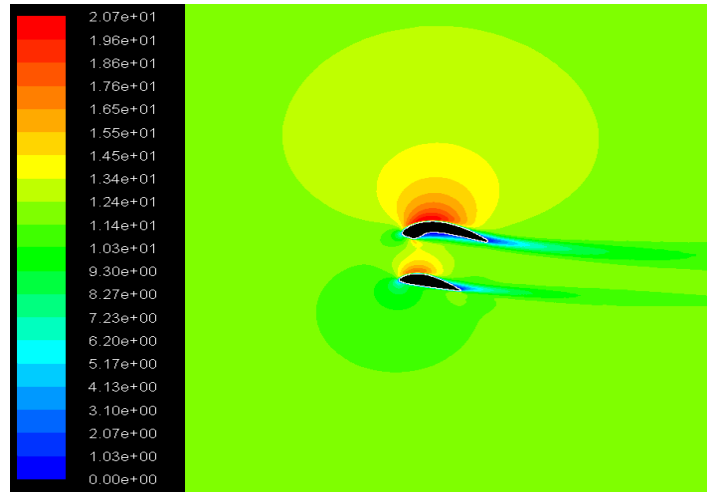
İkili kanat profili, kanat aralığı $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ iken $Re=1.5 \times 10^5$ (12m/s) sayısında 0° , 12° , 23° hücum açılarında hız konturları irdelenmiştir. Ayrıca NACA4412 kanat profili için, hava akışında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında 0° , 12° , 23° hücum açılarında hız konturları irdelenmiş ve ikili kanat profili ile karşılaştırma yapılmıştır.

Durma noktası bölgeleri yüksek basınca maruz kaldığından buradaki hız bölgeleri de azdır ve tam ortasında hız sıfırdır. Kanatlarda kamburluk oluşturularak üst yüzeydeki alanın artırılması sağlanır ve böylece kanat profili üzerinden geçen havanın hızı artırılır. Hava hızının artmasıyla Bernoulli denkleminde basınç daha fazla düşmektedir. Böylece alt yüzey ile üst yüzey arasında oluşan basınç farkı artmakta ve sonuç olarak kaldırma kuvveti de artmaktadır. Fakat belirli hücum açısından sonra akışta, kanat profilinden ayrılmalar başlar ve üst kanattaki basınç değeri artar ve kanat profilinin alt ve üst kısımları arasında basınç farkı azalır ve böylece kaldırma kuvveti de azalır.

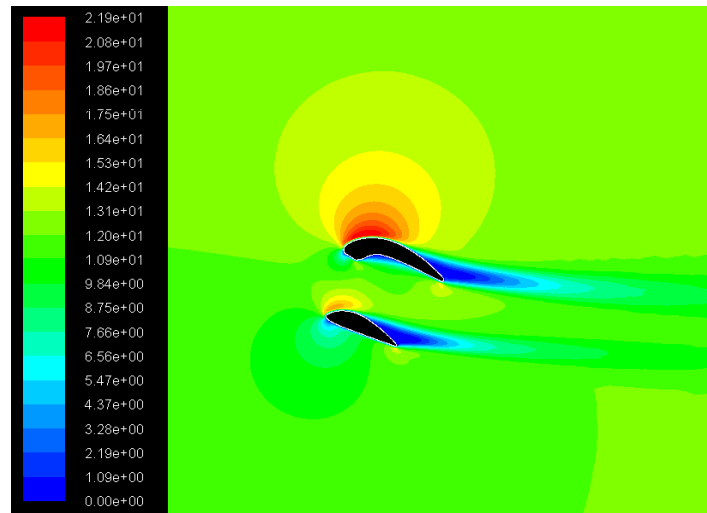
Şekil 4.12'de hava ortamında 0° hücum açısında, serbest akım bölgesine 12 m/s hızla giren hava, kanat profilinin hücum kenarı ucunda sıfırdır. Hız değeri, ikili kanat profili üzerinde 18.1 m/s hızlara kadar ulaşmakta ve üst kanadın alt kısmında, geometrisine bağlı olarak kanadın büyük bölümünde hız sıfırdır. Küçük kanadın alt kısmındaki hız, serbest akım bölgesindeki hıza eşittir. Şekil 4.13'de maksimum C_L/C_D oranının elde edildiği 12° hücum açısındaki hız dağılımı gösterilmektedir. Büyük kanadın alt bölgesinde yoğun sıfır hız alanının azaldığı görülmektedir. Büyük kanat üzerindeki hız, 19.7 m/s hızlara kadar ulaşmakta. Küçük kanadın alt kısmındaki hız, serbest akım bölgesindeki hızdan biraz düşüktür ve 9.3-11.4 m/s hız civarındadır. Hücum açısının artmasıyla kanat üzerinde hız alanı arttırılmış, böylece kaldırma kuvveti de artmıştır. Şekil 4.14'de 23° hücum açısında hız dağılımı görülmektedir. Büyük ve küçük kanadın hücum kenarının hemen altında hız sıfır değerindedir. Kaldırma kuvvetinin maksimum olduğu 23° hücum açısında kanat üzerinde hız 20.8 m/s değerine kadar ulaşmaktadır fakat kanadın yarısından sonra hızda düşüş görülürken firar kenarına doğru akışta ayrılmalar başlamaktadır ve bu bölgede hız değeri sıfırdır. Bu hücum açısından büyük açılarda, firar kenarından akış ayrılmaları artacağından kaldırma kuvveti azalacaktır ve türbülanslı bölgeler artacaktır. Küçük kanadın alt kısmında, hücum kenarının hemen altından başlayarak kanadın 1/3'lük kısmına kadar 5.5-6.5 m/s arasında akış hızları oluşuyorken, firar kenarına doğru hız, serbest akım hızına yaklaşmaktadır ve firar kenarının hemen altında hız serbest akım hızının biraz üzerinde 13.1 m/s akış hızında seyretmektedir. Daha önceden de belirttiğimiz gibi, kanadın firar kenarının üst kısmında hız azalmasından dolayı basınçta artış, alt bölgesinde hız artışından dolayı basınçta düşüş görülür bundan dolayı kanadın alt ve üst kısmında basınç farkı azaldığından firar kenarında akışta ayrılmalar görülür ve bu da sürükleme kuvvetinde artışa neden olacaktır.



Şekil 4.12 Hız konturu ($\alpha=0^{\circ}$, $Re=1.5 \times 10^5$) (m/s)



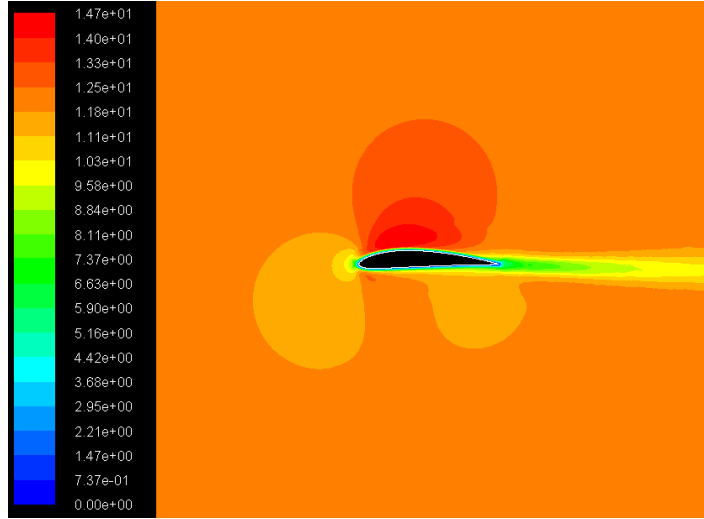
Şekil 4.13 Hız konturu ($\alpha=12^{\circ}$, $Re=1.5 \times 10^5$) (m/s)



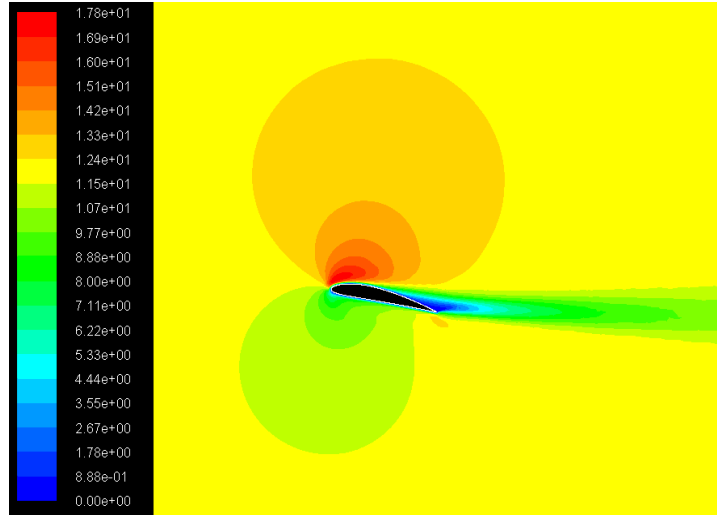
Şekil 4.14 Hız konturu ($\alpha=23^{\circ}$, $Re=1.5 \times 10^5$) (m/s)

NACA4412 kanadının hız konturları:

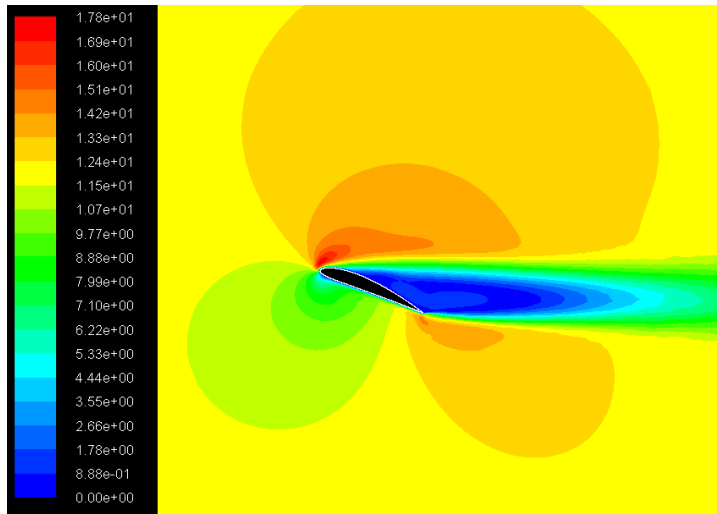
Şekil 4.15'de hava ortamındaki 0^0 hücum açısında, NACA4412 kanat profilinin üst kısmındaki hava hızı 14 m/s değerine kadar ulaşmaktadır. NACA4412 kanat profilinin alt kısmında serbest akım hızına yakın değerler oluşmuş fakat firar kenarına doğru gidildikçe azalmaktadır. Şekil 4.16'da 12^0 hücum açısındaki NACA4412 kanat profili görülmektedir. Kanadın hemen hücum noktası üst bölgesinde başlayan yüksek hız alanı maksimum 16.9 m/s hava hızına ulaşabilmektedir. Kanat profilinin yarısından sonra hız değeri, serbest akım hızının altına düşerken, firar kenarında akışta ayrılmalar görülmektedir. Kanadın alt yüzeyinde hız değerleri, hücum kenarında serbest akım hızından düşük olsa da, firar kenarına doğru hız artmakta ve serbest akım hızına ulaşmaktadır. İkili kanat profilinin alt bölgesinde çok düşük hızlardan dolayı basınç değerlerinin NACA4412 kanat profiline göre fazla olduğu basınç katsayı dağılım bölümünde Şekil 4.6 ve Şekil 4.10'da gözlemlenmişti. Böylece, ikili kanat profilinin üst kısmında yüksek hızların oluşması, alt kısmında düşük hızlarla birlikte yüksek basınçların oluşması ve firar kenarında akış ayrılması olmaması gibi nedenler ikili kanat profilinden daha fazla kaldırma kuvveti elde edilmesine sebep olur. Şekil 4.17'de 23^0 hücum açısındaki NACA4412 kanat profili görülmektedir. Kanat üzerinde maksimum 17 m/s hava hızına kadar ulaşılabilirken, yüksek hız alanı kanadın sadece hücum kenarı üzerinde oluşmaktadır ve kanat yüksek tutunma kaybına uğrayarak kanadın hücum kenarına yakın bölgesinden akış ayrılmaları görülmektedir. Kanat bu durumda yüksek sürükleme kuvvetine maruz kalacaktır. İkili kanat profili üzerinde oluşan maksimum akış hızları, NACA4412 kanat profilinin üzerinde oluşan maksimum akış hızlarından daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, ikili kanat profilinin kambur yapısının pozitif yönde etkisi görülmüştür.



Şekil 4.15 NACA4412 hız konturu ($\alpha=0^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$) (m/s)



Şekil 4.16 NACA4412 hız konturu ($\alpha=12^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$) (m/s)



Şekil 4.17 NACA4412 hız konturu ($\alpha=23^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$) (m/s)

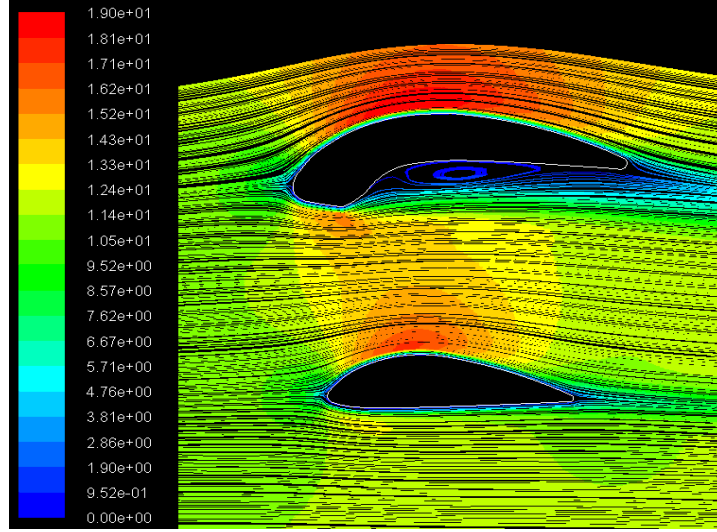
ii) Akım çizgileri

İkili kanat profilinin, kanat aralığı $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ iken hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında 0° , 12° , 23° , 26° hücum açılarında akım çizgileri irdelenmiştir. Ayrıca NACA4412 kanat profili için, hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında 0° , 12° , 23° , 26° hücum açılarında akım çizgileri irdelenmiş ve ikili kanat profili ile karşılaştırma yapılmıştır.

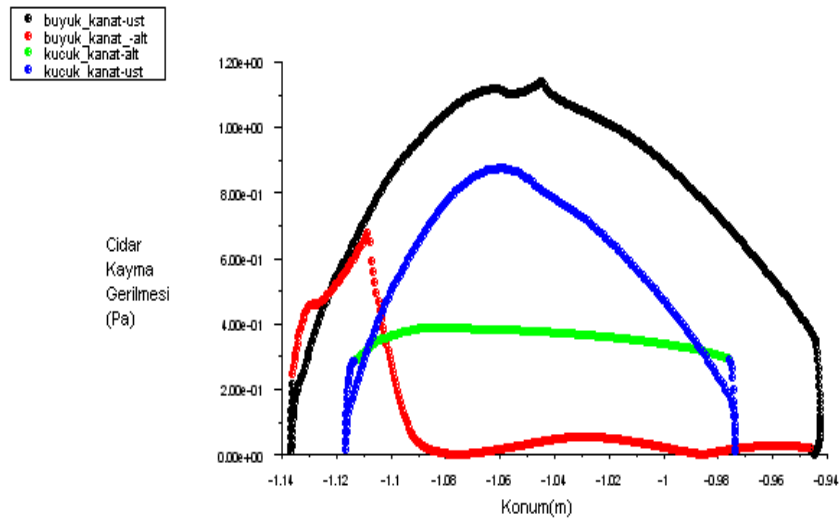
Kanat profili üzerinde, laminer ayrılma kabarcığının nerede oluştuğunu ve kanadın hangi hücum açısından sonra akım ayrılmasına uğradığını görebilmek için kanat üzerine akım çizgileri gönderilmiştir. Ayrıca bu laminer ayrılma kabarcığı ve akım ayrılmaları, cidar kayma gerilmesi grafiğinden de elde edilebilmektedir. Cidar kayma gerilmesinin ($Z_w = 0$) sıfır olduğu durumda kanat profili üzerinde laminer ayrılma kabarcığının olduğu ya da akım ayrılmasının meydana geldiğinin kanıtıdır [34]. Hava ortamında örnek olarak bu grafiğin gösterimi yapılmıştır.

Şekil 4.18'de hava ortamındaki 0° hücum açısında; büyük kanadın alt kısmında kamburluktan dolayı bir laminer ayrılma kabarcığının oluştuğunu görmekteyiz. Bu ayrılma kabarcığına sebep olarak; düşük Re sayılı akışlarda laminer akım viskoz kuvvetlerin etkisi ile çok çabuk sınır tabakadan ayrılmaya başlar. Bu bölgede akım, viskoz etkilerin ve ters basınç gradyanlarının üstesinden gelemez ve şekilde görüldüğü gibi laminer sınır tabaka ayrılması ve ayrılma kabarcığı meydana gelir. Bu kabarcıkta geri akış ve ters hız profilleri oluşur. Ayrılma kabarcığından sonra basınç toparlanmaya çalışır. Yeniden tutunma ile birlikte akış yüzeye yapışır. Şekil 4.19'da 0° hücum açısındaki cidar kayma gerilmesi grafiğinden de görüleceği üzere, bu ayrılma kabarcığının oluştuğu büyük kanadın alt kısmında cidar kayma gerilmesi sıfır noktasındadır. Şekil 4.20'de 12° hücum açısında ayrılma kabarcığının giderek azaldığını ve yüzeye tekrar yapışmaya başladığını görmekteyiz. Firar kenarına doğru kanat üzerinden akış ayrılması olmaması; ikili kanat profili üzerindeki akışın ters basınç gradyanlarına direnebilmesidir. Şekil 4.21'de 12° hücum açısındaki cidar kayma gerilmesi grafiğinden laminer ayrılma kabarcığının biraz daha azaldığını görebilmekteyiz. Şekil 4.22'de 23° hücum açısında yani tutunma kaybı açısından bu laminer ayrılma kabarcığının daha da yok olduğu görülmekte fakat bu sefer kanadın firar kenarında akım ayrılması oluşmuş ve bu açıdan sonra sürükleme kuvvetinin daha fazla arttığı görülmüştür. Şekil

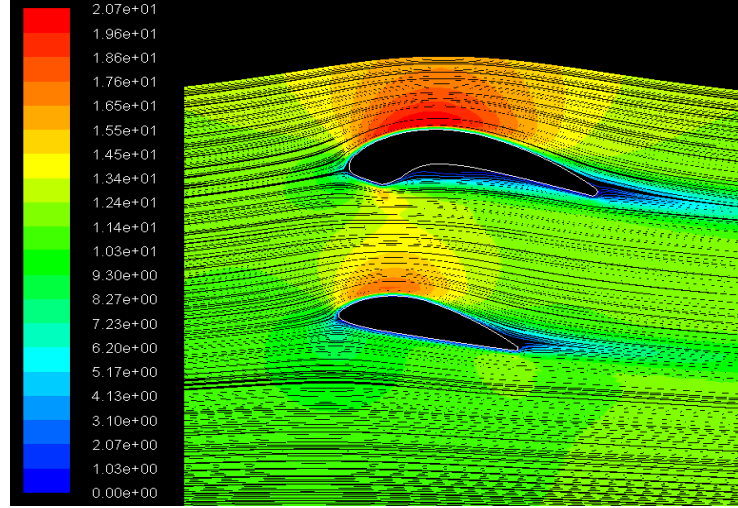
4.23'de laminer ayrılma kabarcığına ek olarak firar kenarındaki akış ayrılmaları da cidar kayma gerilmesinde sıfır konumunda görülebilmektedir. Şekil 4.24'de 26° hücum açısında kanat profiline firar kenarındaki akım ayrılması daha da artmıştır. Şekil 4.25'de cidar kayma gerilmesi grafiğinden de görüleceği gibi, büyük kanadın alt kısmında akış yüzeye tutunarak laminer ayrılma kabarcığı yok olmuştur fakat kanadın firar kenarındaki akış ayrılmaları sıfır konumunda görülmektedir.



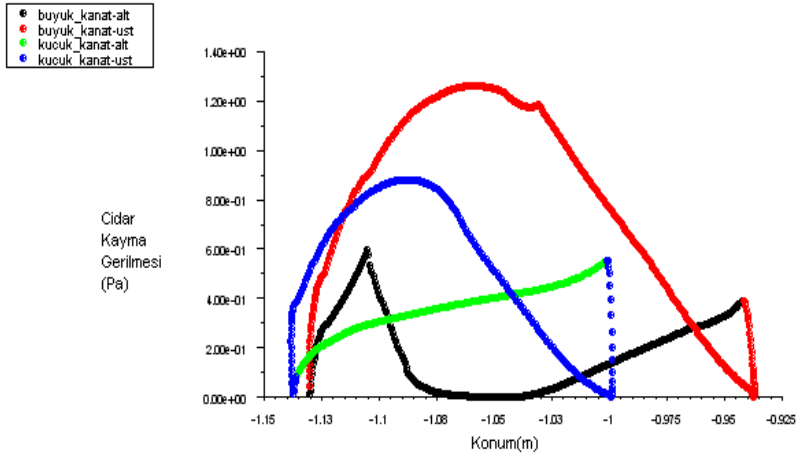
Şekil 4.18 Akım çizgisi ($\alpha=0^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)



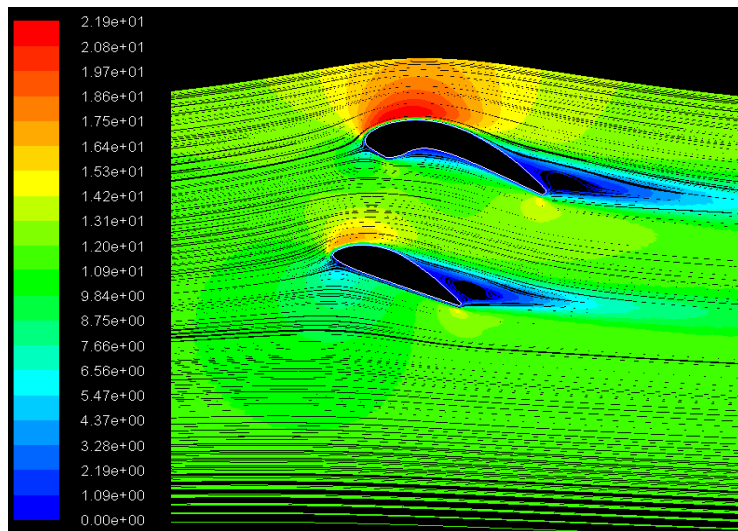
Şekil 4.19 Cidar kayma gerilmesi dağılımı ($\alpha=0^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$) (Pa)



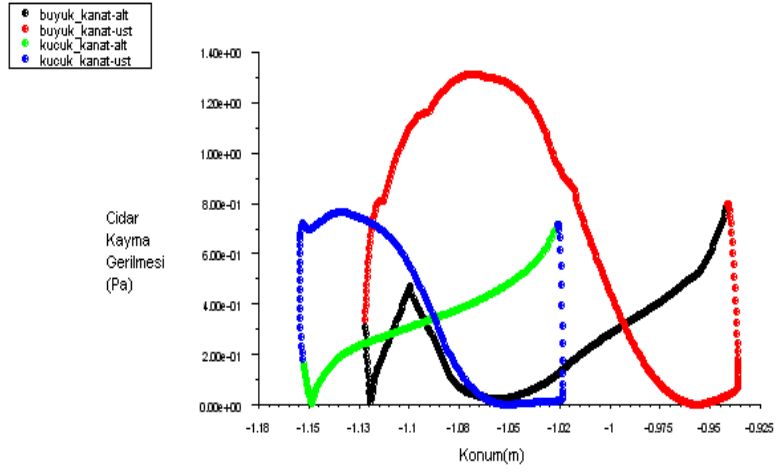
Şekil 4.20 Akım çizgisi ($\alpha=12^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)



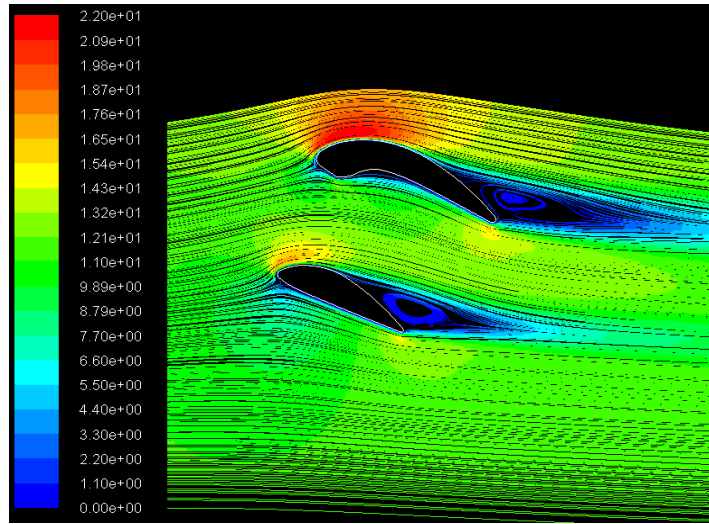
Şekil 4.21 Cidar kayma gerilmesi dağılımı ($\alpha=12^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$) (Pa)



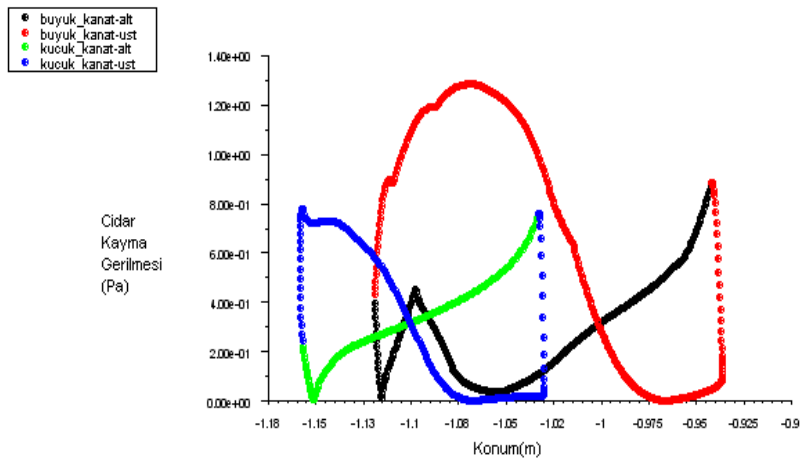
Şekil 4.22 Akım çizgisi ($\alpha=23^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.23 Cıdar kayma gerilmesi dağılımı ($\alpha=23^0$, $Re=1.5 \times 10^5$) (Pa)



Şekil 4.24 Akım çizgisi ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)

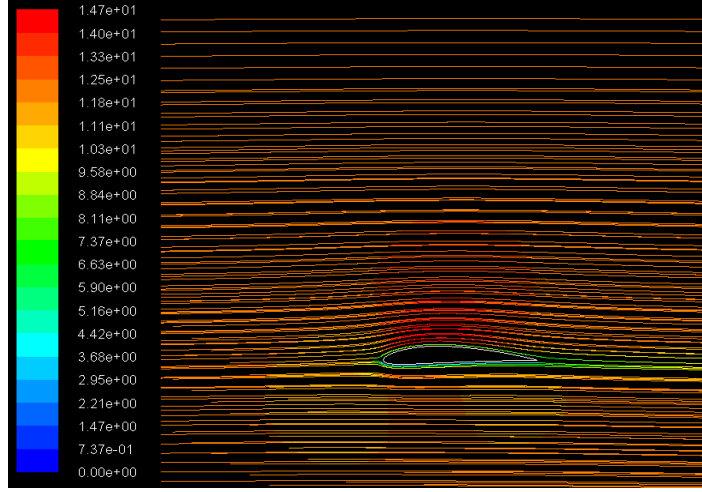


Şekil 4.25 Cıdar kayma gerilmesi dağılımı ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$) (Pa)

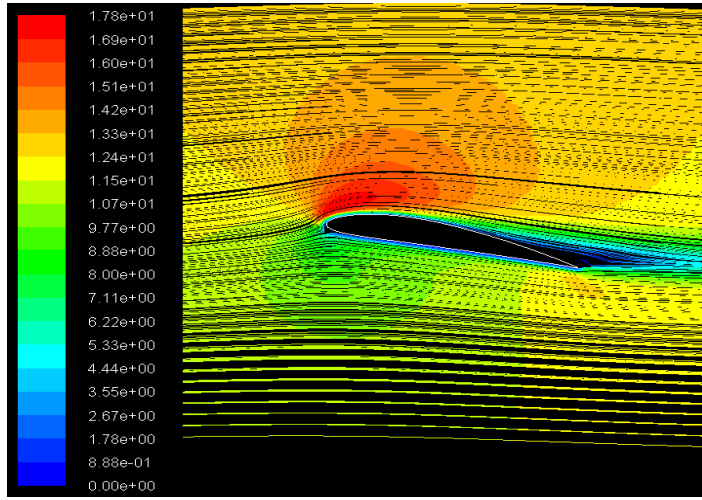
NACA4412 kanadının akım çizgileri:

Kanat üzerindeki akış ayrılmaları ne kadar geç olursa kanat aerodinamiği açısından o kadar iyidir. Kanat profili üzerinde ayrılmaya geçen bölgede çok düşük hız alanları oluşur ve kanadın üst kısmında basınç kuvvetleri artar. Böylece, kanat profilinin alt ve üst kısımları arasındaki basınç farkı azalarak kaldırma kuvvetinde düşüş, sürüklenme kuvvetinde artış meydana gelir. Bu bilgiler ışığında iki kanat profili karşılaştırılacak olursa;

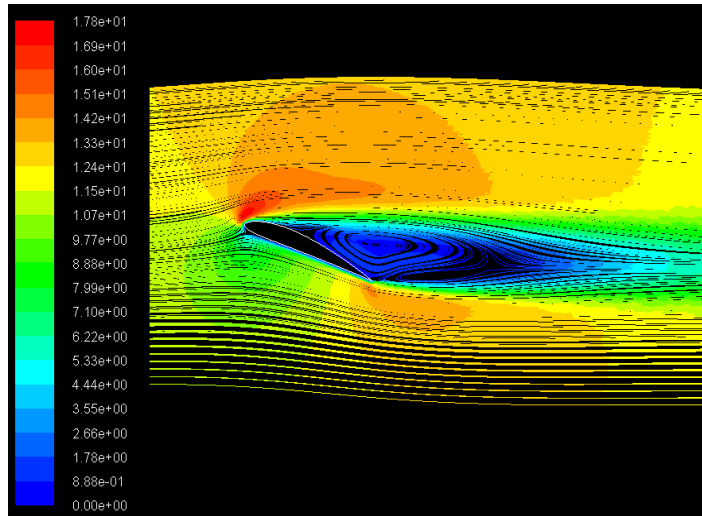
NACA4412 kanat profili, Şekil 4.26'da hava ortamlarında 0° hücum açısında laminer ayrılma kabarcığının ve firar kenarında sınır tabaka ayrılmasının olmadığı görülmüştür. Şekil 4.27'de hava ortamındaki 12° hücum açısında NACA4412 kanat profilinin akım çizgileri görülmektedir. Kanat profilinin firar kenarında akış ayrılması çok az da olsa görülmektedir. Aynı hücum açısında, ikili kanat profili üzerinde akış ayrılması oluşmamaktadır. Fakat, ikili kanat profilinde geometrisine bağlı olarak laminer ayrılma kabarcığı meydana geliyorken, NACA4412 kanat profilinde laminer ayrılma kabarcığı oluşmamıştır. Şekil 4.28'de 23° hücum açısında NACA4412 kanat profilinin akım çizgileri görülmektedir. Kanat profilinde, hücum kenarına yakın bir yerden akış ayrılması meydana gelmektedir. Kanat üzerinde akım ayrılmasıyla birlikte sürüklenme kuvveti hızla artıp, kaldırma kuvveti azalacaktır. İkili kanat profili, akış ayrılmasını firar kenarına doğru kaydırarak ayrılmayı geciktirmiştir ve NACA4412 kanat profiline göre daha geç akım ayrılması görülmektedir. Böylece, kaldırma kuvveti katsayısında NACA4412 kanat profiline göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.29'da 26° hücum açısında görülmekte olan NACA4412 kanat profilinde akım ayrılması, hücum kenarının hemen üzerinden başlarken, ikili kanat profilinde akış ayrılması sadece firar kenarında 1/3'lik kısmında meydana gelmektedir.



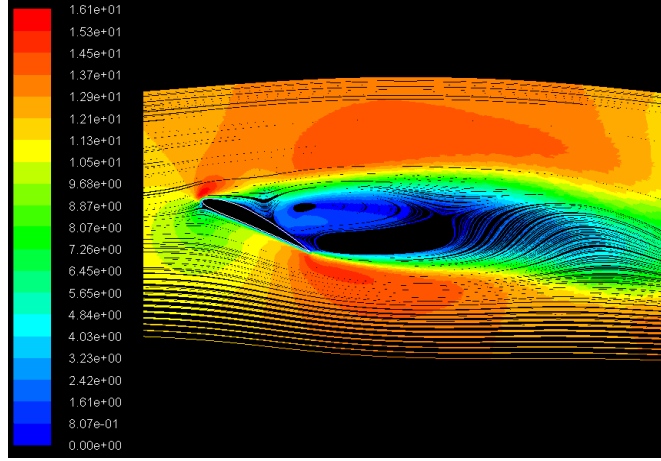
Şekil 4.26 NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=0^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.27 NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=12^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.28 NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=23^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)

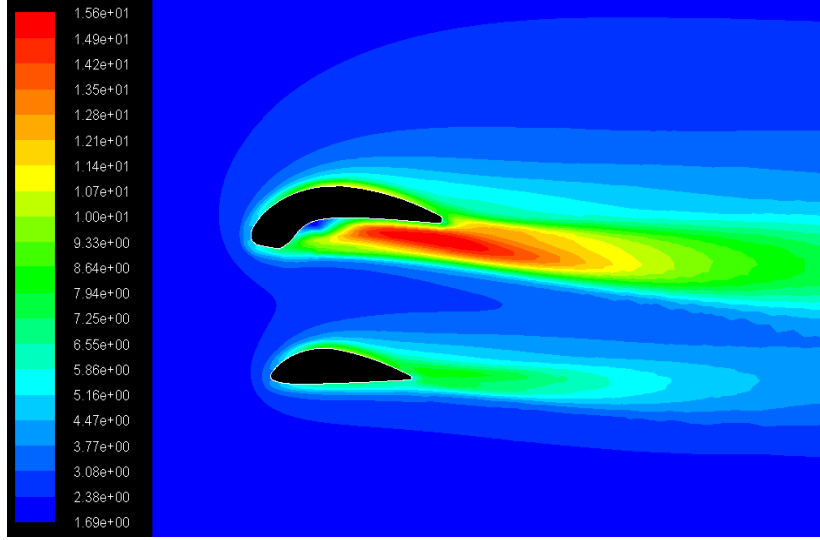


Şekil 4.29 NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=26^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)

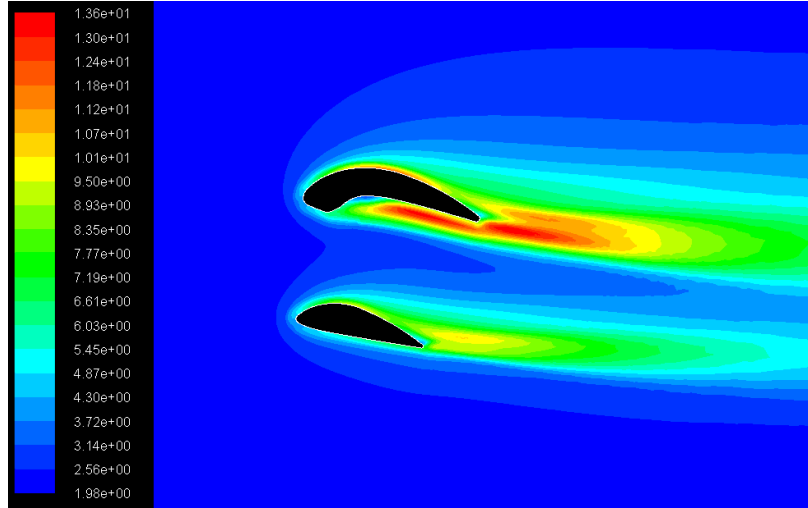
iii) Türbülans şiddetleri

Türbülans şiddeti yüzdesel olarak ifade edilmekle birlikte türbülans şiddetinin düşük Reynolds sayılı araçlarda $<10\%$ olduğu bilinmektedir. Böylece kırmızı renkle oluşan alanlarda türbülans şiddetinin fazla olduğu belirtilmektedir.

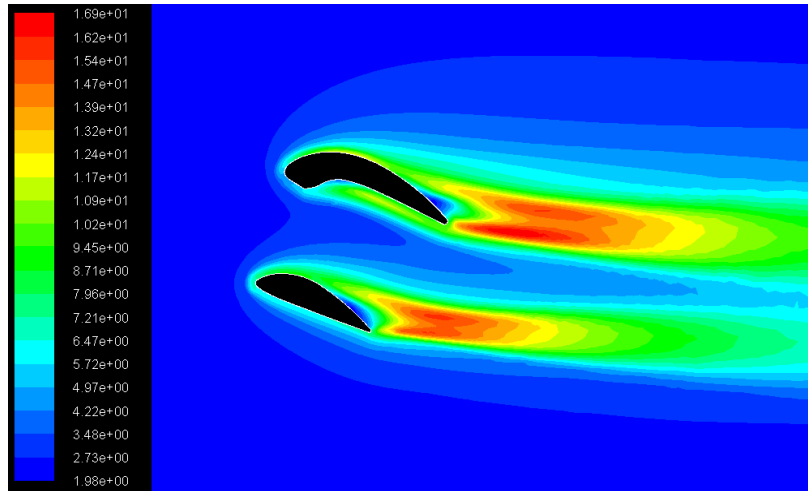
Hava ortamındaki 0° hücum açısında büyük kanadın altında laminer ayrılma kabarcığı daha önceki bölümlerde tespit edilmişti (Şekil 4.18). Bu bölümde Şekil 4.30'da türbülans şiddetinin yüksek olarak gösterildiği bölge, laminer ayrılma kabarcığının olduğu bölgedir ve burada türbülans şiddeti 14.9% civarındadır. 12° hücum açısında büyük kanadın altındaki laminer ayrılma kabarcığının etkisi biraz azalmıştı ve kanat üst kısmında akış ayrılması görülmemişti (Şekil 4.20). Şekil 4.31'de kanat üstünde yüksek türbülans şiddeti görülmediği gibi, alt kanattaki laminer ayrılma kabarcığının türbülans şiddeti 13% olarak elde edilmekte ve 0° hücum açısına göre azaldığını görebilmekteyiz. 23° hücum açısında kanadın firar kenarından akım ayrılmaları tespit edilmişti (Şekil 4.22) ve Şekil 4.32'de kanadın firar kenarı akış bölgesinde yüksek türbülans bölgesi görülmekte olup şiddeti 16.2% olarak elde edilmiştir. 26° hücum açısında kanadın yarısından başlayan geniş akış ayrılması (Şekil 4.24), Şekil 4.33'de görüldüğü gibi biraz daha yoğunlaşarak türbülans şiddeti 17.6% olarak elde edilmiştir.



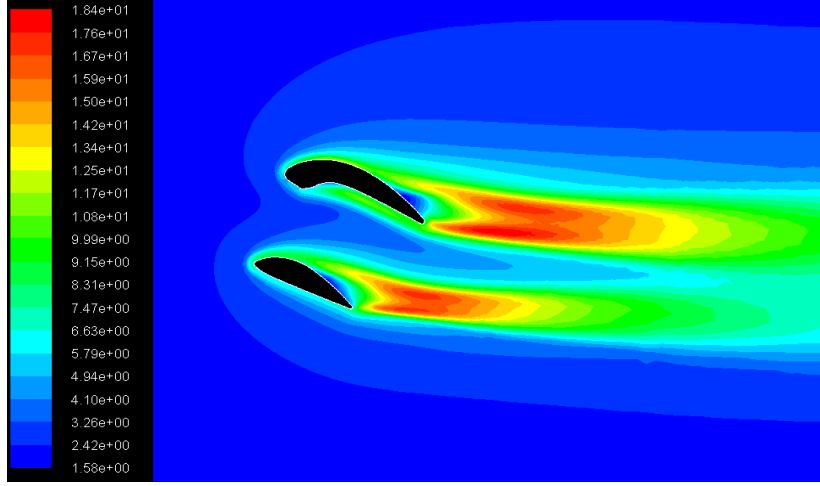
Şekil 4.30 Türbülans şiddeti ($\alpha=0^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$) (%)



Şekil 4.31 Türbülans şiddeti ($\alpha=12^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$) (%)



Şekil 4.32 Türbülans şiddeti ($\alpha=23^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$) (%)



Şekil 4.33 Türbülans şiddeti ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$) (%)

iv) Vorteks Kopma Frekansı

Cisimlerden girdap yayılması, akım ayrılması nedeniyle ortaya çıkan cisim gerisindeki girdapların, periyodik olarak cisimden kopmaları ve iz bölgesinde ilerlemeleridir. Bunun sonucunda cisme etki eden direnç ve kaldırma kuvveti gibi temel kuvvetler zamana bağlı olarak bir salınım gösterirler. Özellikle pervane kanatları, girdap yapıcılar gibi yüksek Reynolds sayılı hidrodinamik araçlarda girdap yayılması rahatlıkla görülebilir. Bu nedenle girdap yayılmasının modellenebilmesi ve akış karakteristiklerinin anlaşılabilmesi hidrodinamik açıdan önem taşımaktadır. Özellikle girdap yayılımından doğan değişken yüklerin hesabı için pek çok deneysel ve sayısal simülasyon çalışmaları yapılmıştır [55, 56].

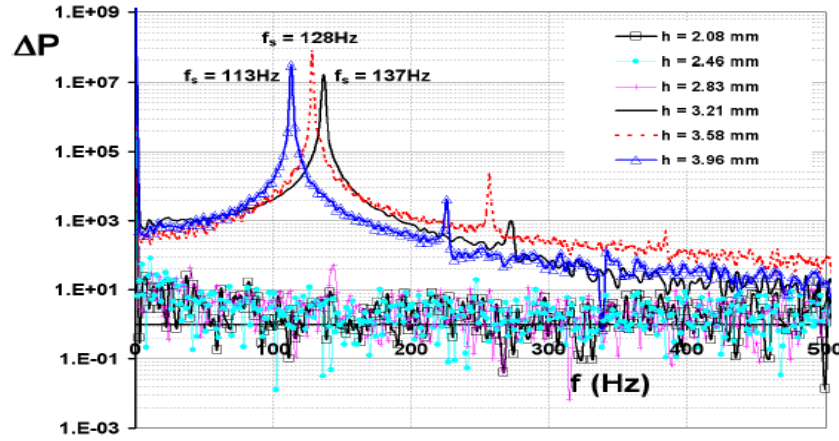
Şekil 4.39'da görüldüğü gibi giderek boyları artan girdaplar periyodik olarak kanadın üstünden koparak iz bölgesine doğru yayılırlar. Bu şekilde hareketlerini sürdüren girdaplar, akış yönü boyunca silindirin arkasında “Karman girdap caddesini” oluştururlar. Girdapların yayılma frekansını ifade eden boyutsuz katsayı Strouhal sayısı olup;

$$St = \frac{fxc}{U_{\infty}} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada c kanat genişliğini, U_{∞} serbest akım hızını ve f vorteks kopma frekansınıdır. Bu harmonik hareketten dolayı akıştaki C_D ve C_L gibi temel katsayılar, yayılma periyoduna uygun şekilde salınım gösterirler. Girdapların

yayıma frekansları, C_L katsayısının salınma frekansına eşit değerdedir. Ayrıca, Strouhal sayısının doğru hesabı için, kanat çevresindeki ağ yoğunluğunun önemli olduğu bilinmektedir [57].

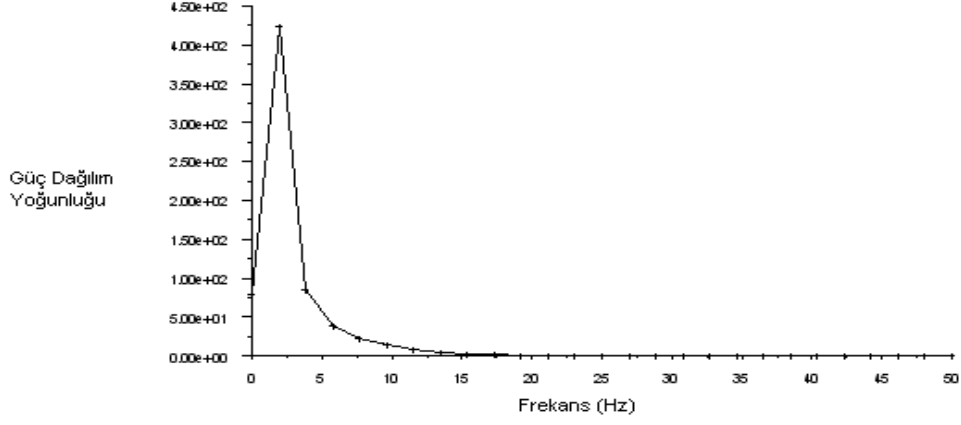
İkili kanat profilinin kanatlar arası $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ konumundayken, hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında ikili kanat profilinin vorteks kopma frekansı 0° , 12° , 23° , 26° hücum açılarında incelenmiştir. Bu frekanslar, güç dağılım yoğunluğu grafiklerinden elde edilip Do ve arkadaşlarının [34] yaptığı analizde elde ettikleri Şekil 4.34'deki grafiğe benzer bir grafik elde ederek gücün sıçrama yaptığı frekans, vorteks kopma frekansıdır.



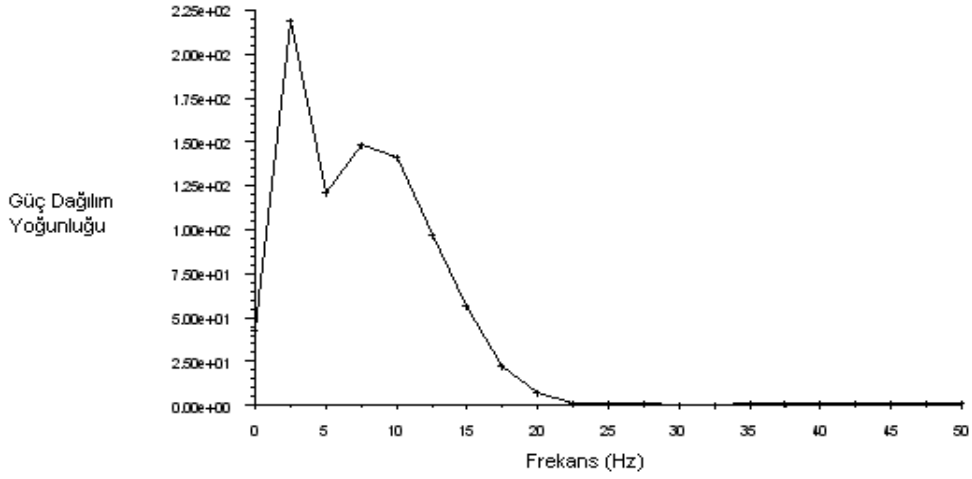
Şekil 4.34 Güç dağılım yoğunluğu [34]

Şekil 4.35'de 0° hücum açısında elde edilen vorteks kopma frekansı 2.5Hz ve Strouhal sayısı 0.05 iken, Şekil 4.36'da maksimum C_L/C_D oranının elde edildiği 12° hücum açısında vorteks kopma frekansı 3Hz ve Strouhal sayısı 0.056'dır. Şekil 4.37'de tutunma kaybı açısı olan 23° hücum açısında vorteks kopma frekansı 1.5Hz ve Strouhal sayısı 0.025'dir. Şekil 4.38'de 26° hücum açısında vorteks kopma frekansı 3Hz ve Strouhal sayısı 0.056'dır. 0° ve 12° hücum açılarında, laminer ayrılma kabarcığı yoğun olduğundan algılayıcılar buraya konulmuştur, fakat 23° ve 26° hücum açılarında kanat firar kenarından akım ayrılması daha yoğun olduğu için algılayıcılar firar kenarı ve gerisine konulmuştur. Elde edilen sonuçlardan da görüleceği üzere; hücum açısının artmasıyla girdap oluşumunun arttığı görülmüştür. 0° hücum açısından 12° hücum açısına geçildiğinde kopma frekansı biraz daha artmaktadır. Aynı şekilde, 23° hücum açısından 26° hücum açısına geçildiğinde kopma frekansı tekrar artmaktadır. Yani, hücum açısının

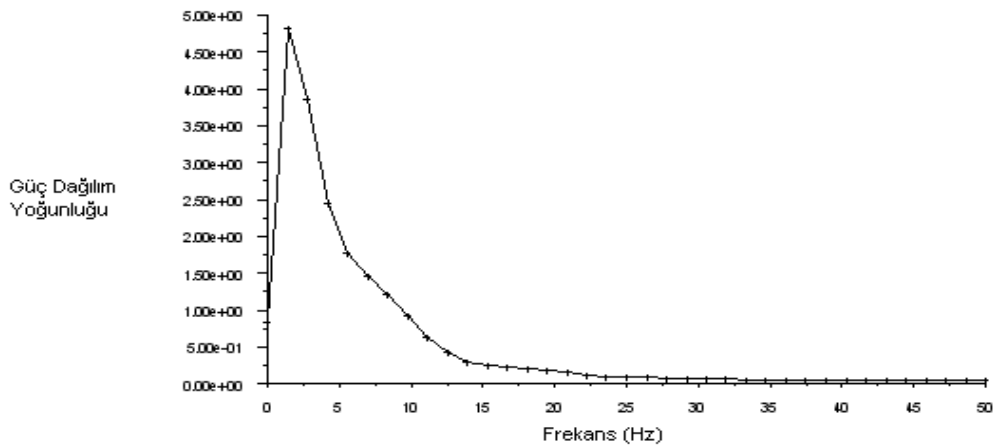
artmasıyla kanat yüzeyinden kopmalar ve girdap oluşumunun arttığı görülmektedir.



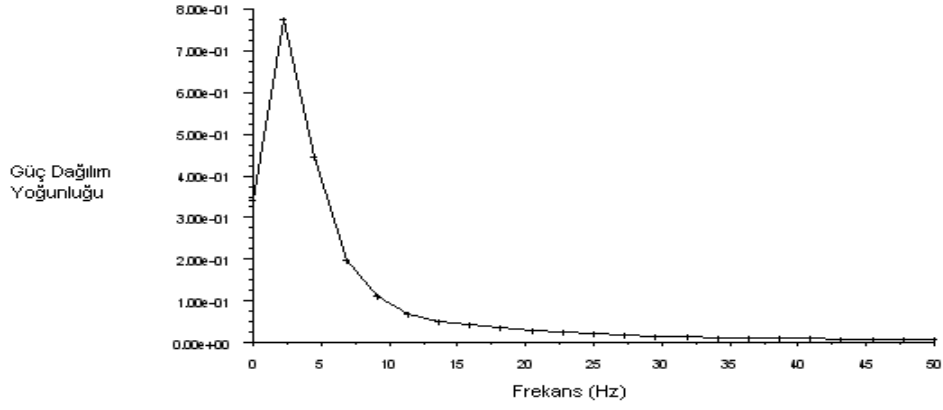
Şekil 4.35 Vorteks kopma frekansı ($\alpha=0^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)



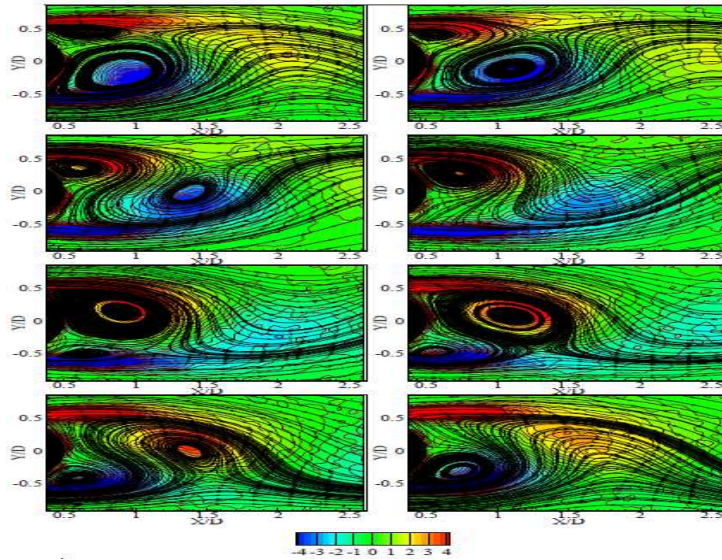
Şekil 4.36 Vorteks kopma frekansı ($\alpha=12^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.37 Vorteks kopma frekansı ($\alpha=23^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.38 Vorteks kopma frekansı ($\alpha=26^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)

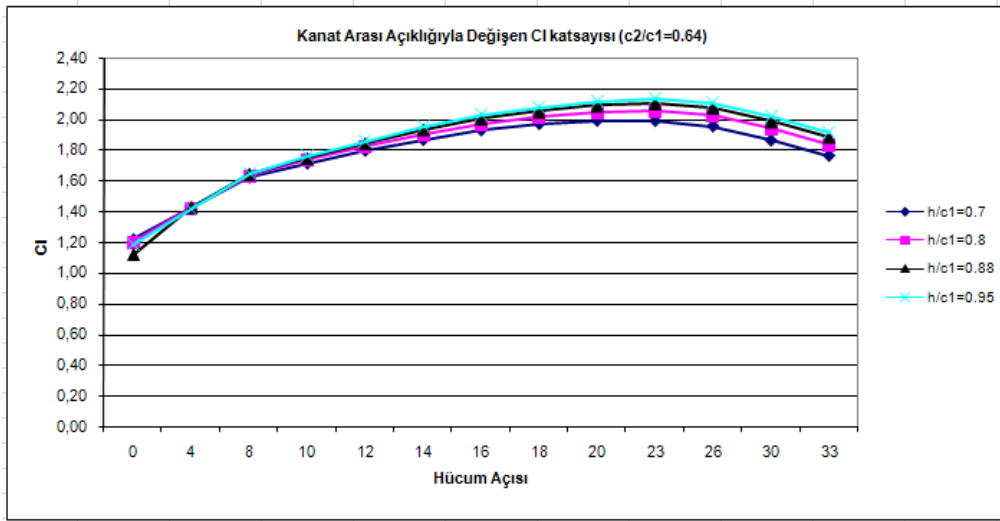


Şekil 4.39 Kanat profili üzerinden girdap dağılımları

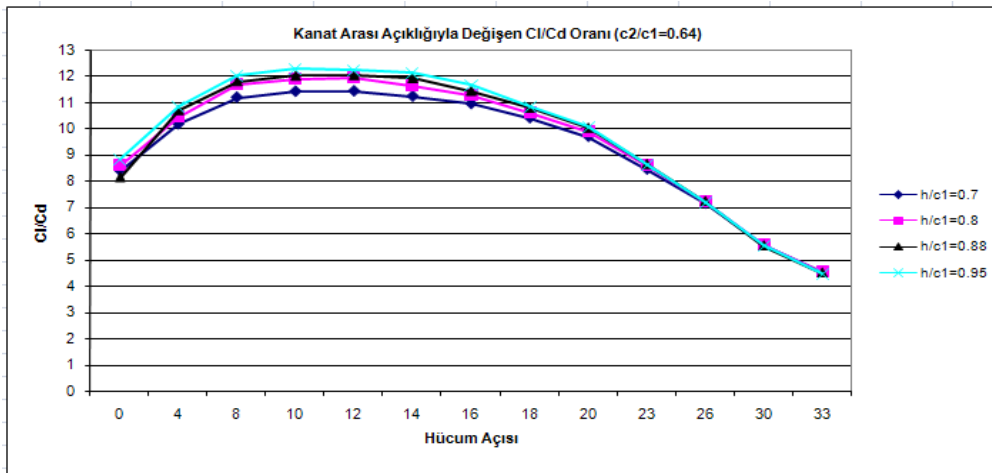
4.2.1.3 İkili kanat profilinin aerodinamik kuvvet analizi

Kanatlar arası mesafenin $h/c_1=0.7$, $h/c_1=0.8$, $h/c_1=0.88$ ve $h/c_1=0.95$ olduğu durumlarda optimum kanat arası açıklığını belirleyip daha sonra bu optimum aralıkta sabit tutup, farklı kanat genişlikleri oranı olan $c_2/c_1=0.5$, $c_2/c_1=0.64$ ve $c_2/c_1=0.73$ değerlerinde, hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında değişik hücum açılarında göre aerodinamik analizleri yapıp optimum kanat parametreleri belirlenmiştir. Aşağıda kanat arası mesafesine göre değişen C_L katsayı değerleri ve C_L/C_D oranları ve elde edilen optimum kanat arası mesafesinde, kanat genişliği oranlarına göre değişen C_L katsayı değerleri ve C_L/C_D oranları çizelgeler halinde verilmiştir. Ayrıca, optimum ikili kanat profili aerodinamik kuvvetleri ile NACA4412 kanat profilinin aerodinamik kuvvetleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.40'da hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında (12 m/s) ikili kanat profilinin orjinal kanat genişliği oranında ($c_2/c_1=0.64$), farklı kanat arası açıklığında ($h/c_1=0.7$, $h/c_1=0.8$, $h/c_1=0.88$ ve $h/c_1=0.95$) elde edilen C_L katsayı değerleri görülmektedir. Bu farklı kanat arası açıklıklarında C_L katsayıları birbirine çok yakın olup maksimum C_L katsayısı $h/c_1=0.95$ konumunda 23° hücum açısında 2.135 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.41'de bu koşullardaki C_L/C_D oranları görülmektedir ve yine $h/c_1=0.95$ konumunda 10° hücum açısında maksimum C_L/C_D oranları 12.28 olarak elde edilmiştir. Böylece; orjinal kanat genişliği oranında ($c_2/c_1=0.64$), ikili kanat profilinin optimum kanat arası açıklığı $h/c_1=0.95$ konumunda 10° hücum açısında elde edildiği görülmüştür.

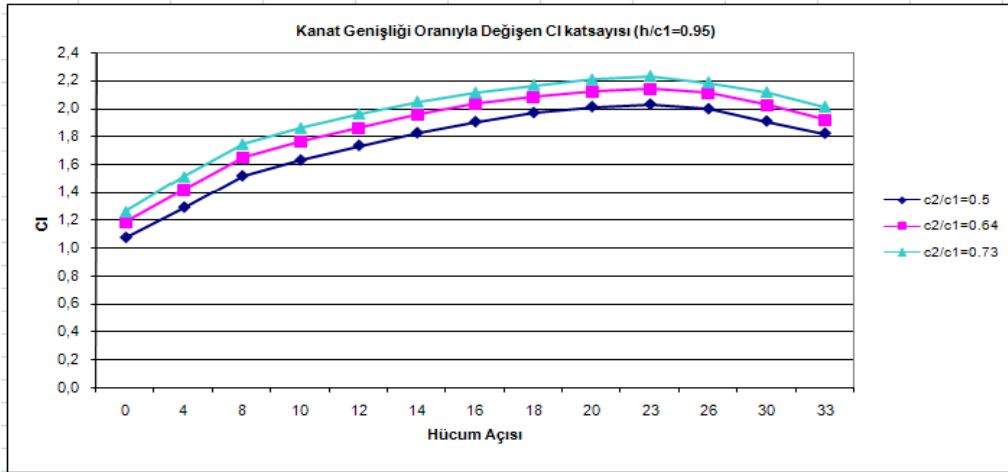


Şekil 4.40 Farklı kanat arası açıklıklarında C_L katsayıları ($c_2/c_1=0.64$, $Re=1.5 \times 10^5$)

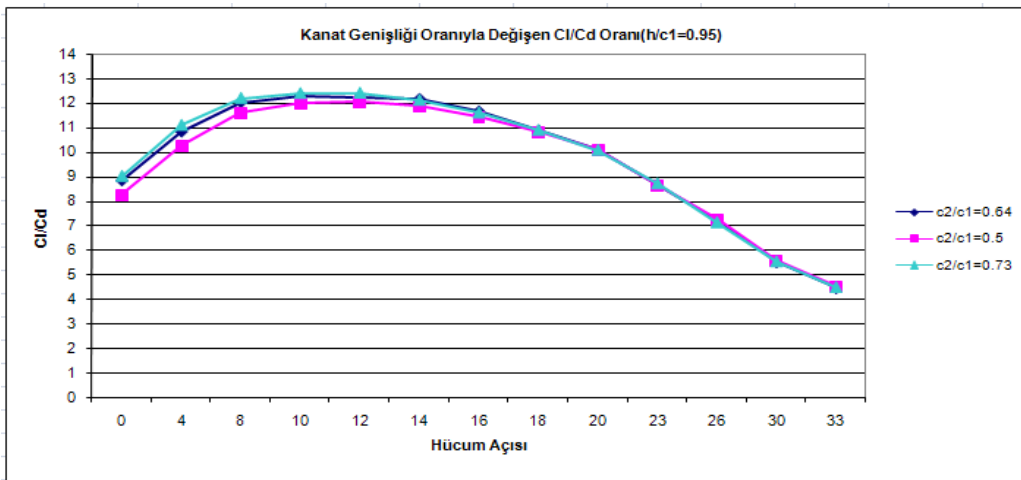


Şekil 4.41 Farklı kanat arası açıklıklarında C_L/C_D oranları ($c_2/c_1=0.64$, $Re=1.5 \times 10^5$)

Optimum kanat arası açıklığı elde edilen ikili kanat profilinin daha sonra optimum kanat genişliği oranını elde etmek amacıyla, $(h/c_1)_{opt}=0.95$ değerinde sabit iken farklı kanat genişliği oranlarında ($c_2/c_1=0.5$, $c_2/c_1=0.64$ ve $c_2/c_1=0.73$) denenmiştir ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.42’de görülmektedir. Kanat genişliği oranı arttıkça elde edilen C_L katsayısının da arttığı görülmektedir ve maksimum C_L katsayısı $c_2/c_1=0.73$ konumunda 23° hücum açısında 2.230 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.43’de ise bu kanat genişliği oranlarındaki C_L/C_D oranları görülmektedir ve yine $c_2/c_1=0.73$ konumunda 12° hücum açısında maksimum C_L/C_D oranı 12.41 olarak elde edilmiştir. Böylece; ikili kanat profilinin hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında optimum kanat arası açıklığı $(h/c_1)_{opt}=0.95$, optimum kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ ve optimum hücum açısı 12° olarak elde edilmiştir.



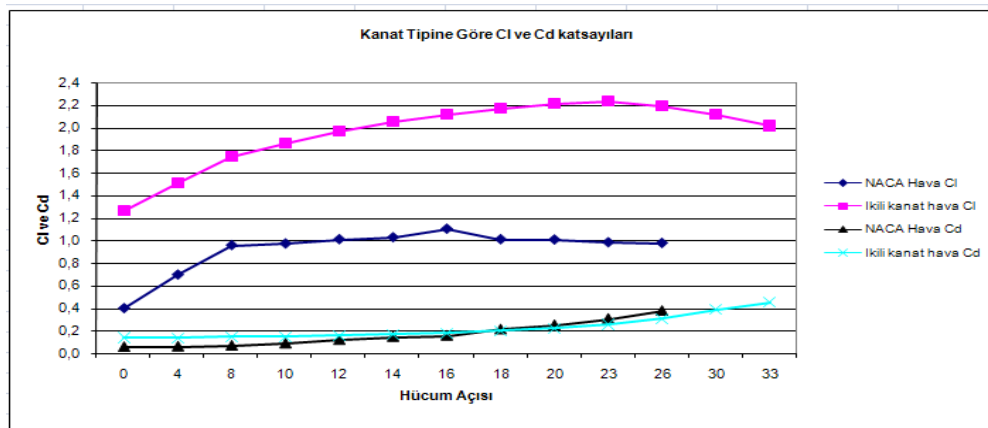
Şekil 4.42 Farklı kanat genişliği oranlarında C_L katsayıları ($h/c_1=0.95$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Şekil 4.43 Farklı kanat genişliği oranlarında C_L/C_D oranları ($h/c_1=0.95$, $Re=1.5 \times 10^5$)

Şekil 4.44'de ikili kanat profilinin ve NACA4412 kanat profilinin, hava ortamında aerodinamik değerlerinin değişimi görülmektedir. Günümüzde kullanılan NACA4412 kanat profilinin kaldırma kuvveti katsayısı, ikili kanat profilininkine göre oldukça düşüktür. NACA4412 kanat profilinde 0° hücum açısında 0.4 kaldırma kuvveti katsayısı elde edilirken, ikili kanat profilinde elde edilen kaldırma kuvveti katsayısı 1.262'dir. Çoğu kanat profilinin bu hücum açısında kaldırma kuvveti sağlayamadığını düşünürsek, incelediğimiz ikili kanat profili çok iyi sonuç vermektedir. Hatta çoğu kanat profilinin elde ettiği maksimum kaldırma kuvveti katsayısı bile bu değere ulaşamayabiliyor.

İkili kanat profilinde tutunma kaybı açısı 23° 'de oluşuyorken, NACA4412 kanat profilinde tutunma kaybı açısı 16° hücum açısında oluşuyor. Tutunma kaybı açısı ne kadar geç oluşuyor ise, elde edilen kaldırma kuvveti katsayısı o kadar iyi demektir. İkili kanat profilinden elde edilen maksimum kaldırma kuvveti katsayısı 2.230 iken, NACA4412 kanat profilinden elde edilen kaldırma kuvveti katsayısı 1.025'dir. Sürükleme kuvveti katsayılarına baktığımızda; 16° hücum açısına kadar NACA4412 kanat profilinin ikili kanat profilinden daha az sürükleme kuvvetine maruz kaldığı görülmekte, fakat 18° hücum açısından sonra NACA4412 kanat profili daha fazla sürükleme kuvvetine maruz kalmaktadır.



Şekil 4.44 Optimum ikili kanat profili ile NACA4412 kanat profilinin C_L ve C_D katsayıları ($Re=1.5 \times 10^5$)

Hava ortamında elde edilen kanat kesit açıları:

İkili kanat profilinin FLUENT™ programı analizi ile elde edilen sonuçlara göre optimum hücum açısı olarak, maksimum C_L/C_D oranının olduğu 12° hücum açısı seçilmiştir. Çizelge 4.1'de hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında ve optimum hücum açısına göre kanat üzerindeki diğer açılar da elde edilmiştir. Kanat elemanı momentum teorisi kullanılarak elde edilen (2.89) denklemi ile bulunan rüzgarın geliş açısı (φ) ile sayısal akışkan analizi ile elde edilen optimum hücum açısının (α) farkı bize kanat kesitinin burulma açısını verecektir. Kanat boyunu 10 eşit parçaya böldüğümüzde, kanat kök kısmından ($r=0.05m$), kanat uç kısmına ($R=0.5m$) doğru olan burulma açıları (θ_p) farklı koşullar altında çizelgede görülmektedir. Açılarının kanat üzerinde gösterimi ve simgelerinin açıklımı daha önce kanat kesit geometrisi bölümünde irdelenmişti.

Çizelge 4.1 Hava ortamında 1.5×10^5 Re sayısında, $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ konumunda kanat kesit açıları

Hava Akışkanında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında Kanat Kesit Açılıları $(h/c_1)_{opt}=0.95$, $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$							
$r(m)$	r/R	λ_r	$\varphi(0)$	$\alpha(^{\circ})$	$\Theta_p=\varphi-\alpha$	$\Theta_{p,o}$	$\Theta_T= \Theta_p- \Theta_{p,o}$
0,05	0,1	0,5	42,29	12	30,29	-4,46	34,75
0,1	0,2	1	30	12	18,00	-4,46	22,46
0,15	0,3	1,5	22,46	12	10,46	-4,46	14,92
0,2	0,4	2	17,71	12	5,71	-4,46	10,17
0,25	0,5	2,5	14,53	12	2,53	-4,46	6,99
0,3	0,6	3	12,29	12	0,29	-4,46	4,75
0,35	0,7	3,5	10,63	12	-1,37	-4,46	3,09
0,4	0,8	4	9,36	12	-2,64	-4,46	1,82
0,45	0,9	4,5	8,35	12	-3,65	-4,46	0,81
0,5	1	5	7,54	12	-4,46	-4,46	0,00

Çizelge 4.2'de hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ (12 m/s) sayısında elde edilen tüm analiz sonuçları görülmektedir. Maksimum C_L katsayısı ve maksimum C_L/C_D oranı farklı renklerle belirtilmiştir.

Çizelge 4.2: Hava ortamında, farklı kanat aralıklarında ve farklı kanat genişliği oranlarında elde edilen tüm analiz sonuçları

İKİLİ KANAT PROFİLİ-HAVA ORTAMINDAKİ AERODİNAMİK KUVVETLER																
h/c₁=0.7 c₂/c₁=0.64 V=12m/s				h/c₁=0.8 c₂/c₁=0.64 V=12m/s				h/c₁=0.88 c₂/c₁=0.64 V=12m/s				h/c₁=0.95 c₂/c₁=0.64 V=12m/s				
$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	
0	1.219	0.145	8.41	0	1.200	0.140	8.57	0	1.114	0.137	8.13	0	1.184	0.134	8.84	
4	1.424	0.140	10.17	4	1.420	0.136	10.44	4	1.422	0.133	10.69	4	1.417	0.131	10.82	
8	1.622	0.145	11.19	8	1.634	0.140	11.67	8	1.639	0.139	11.79	8	1.646	0.137	12.01	
10	1.712	0.150	11.41	10	1.733	0.146	11.87	10	1.741	0.145	12.01	10	1.756	0.143	12.28	
12	1.794	0.157	11.43	12	1.825	0.153	11.93	12	1.840	0.153	12.03	12	1.859	0.152	12.23	
14	1.864	0.166	11.23	14	1.903	0.164	11.60	14	1.930	0.162	11.91	14	1.955	0.161	12.14	
16	1.926	0.176	10.94	16	1.970	0.175	11.26	16	1.999	0.175	11.42	16	2.025	0.174	11.64	
18	1.967	0.189	10.41	18	2.013	0.190	10.59	18	2.047	0.190	10.77	18	2.075	0.191	10.86	
20	1.988	0.205	9.70	20	2.046	0.207	9.88	20	2.084	0.208	10.02	20	2.116	0.210	10.08	
23	1.986	0.235	8.45	23	2.054	0.239	8.59	23	2.098	0.243	8.63	23	2.135	0.247	8.64	
26	1.952	0.273	7.15	26	2.028	0.281	7.22	26	2.073	0.287	7.22	26	2.110	0.293	7.20	
30	1.860	0.334	5.57	30	1.935	0.348	5.56	30	1.980	0.358	5.53	30	2.019	0.366	5.52	
33	1.762	0.388	4.54	33	1.836	0.406	4.52	33	1.882	0.419	4.49	33	1.918	0.430	4.46	
h/c₁=0.95 c₂/c₁=0.5 V=12m/s				h/c₁=0.95 c₂/c₁=0.73 V=12m/s												
$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D									
0	1.072	0.130	8.25	0	1.262	0.140	9.01									
4	1.289	0.126	10.23	4	1.509	0.136	11.10									
8	1.513	0.131	11.55	8	1.744	0.143	12.20									
10	1.627	0.136	11.96	10	1.859	0.150	12.39									
12	1.731	0.144	12.02	12	1.960	0.158	12.41									
14	1.822	0.154	11.83	14	2.048	0.169	12.12									
16	1.901	0.167	11.38	16	2.112	0.182	11.60									
18	1.967	0.182	10.81	18	2.166	0.199	10.88									
20	2.009	0.200	10.05	20	2.206	0.219	10.07									
23	2.027	0.235	8.63	23	2.230	0.256	8.71									
26	1.994	0.277	7.20	26	2.186	0.307	7.12									
30	1.906	0.345	5.52	30	2.116	0.383	5.52									
33	1.819	0.405	4.49	33	2.012	0.450	4.47									

Hava ortamında elde edilen güç, itki ve tork değerleri:

Hava ortamında, ikili kanat profilinden elde edilen optimum kanat parametreleriyle ($h/c_1=0.95$, $c_2/c_1=0.73$ ve 12° hücum açısı) sağlanan güç, itki, tork ve diğer aerodinamik kuvvetler Çizelge 4.3'de görülmektedir. NACA4412 kanat profilinde değerleri de Çizelde 4.4'de görülmektedir.

Çizelge 4.3 Optimum kanat profili ile elde edilen güç, itki ve tork değeri

Re=1.5x10⁵ (12 m/s) ikili kanat profili	
Açısal hız	120 rad/sn=1146 rpm
Güç (P)	405 W
Net Güç ($\eta_{mek}=0.9$, $\eta_{jen}=0.85$)	310 W
İtki kuvveti (T)	66.14 N
Tork (Q)	2.19 N.m
Basınç farkı ($\Delta P=T/A$)	84.2 N/m ² (Pa)
F_L (N)	44.8 N
F_D (N)	3.6 N
F_N (N)	134.7 N

Çizelge 4.4 NACA4412 kanat profili ile elde edilen güç, itki ve tork değeri

Re=1.5x10⁵ (12 m/s) NACA4412 kanat profili	
Açısal hız	120 rad/sn=1146 rpm
Güç (P)	278 W
Net Güç ($\eta_{mek}=0.9$, $\eta_{jen}=0.85$)	213 W
İtki kuvveti (T)	62 N
Tork (Q)	0.57 N.m

Yukarıdaki çizelgelerden görüldüğü gibi; optimum ikili kanat profilinden elde edilen net güç değeri 310W iken NACA4412 kanat profilinden elde edilen net güç değeri

213W'dır. Böylece; hava ortamında ikili kanat profilinden elde edilen güç, NACA4412 kanat profilinden elde edilen gücün %45.5'i kadar daha fazla olduğu görülmektedir.

4.2.2 Su ortamındaki sayısal sonuçlar

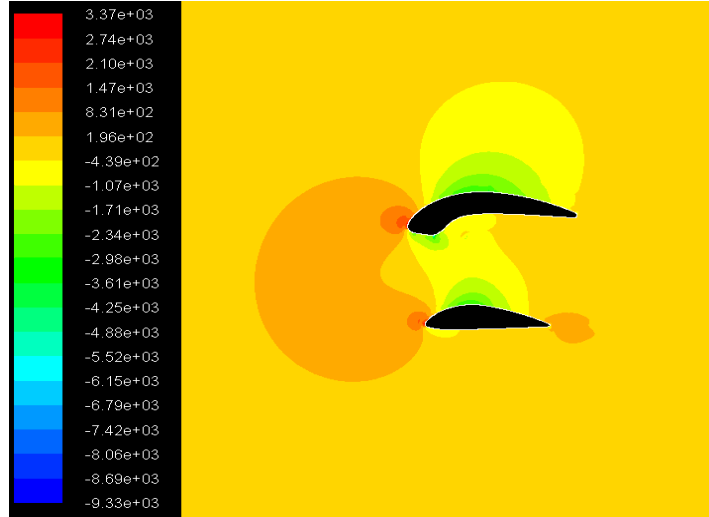
Rüzgar ortamında $Re=4.5 \times 10^5$ (2 m/s) sayısında FLUENT™ programında yapılan sayısal çözümlerden, $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ koşullarında elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu koşullarda, önemli hücum açıları olarak belirlediğimiz $0^0, 18^0, 23^0, 30^0$ hücum açılarında elde edilen grafiksel sonuçlar irdelenmiştir.

4.2.2.1 İkili kanat profilinin basınç dağılımı

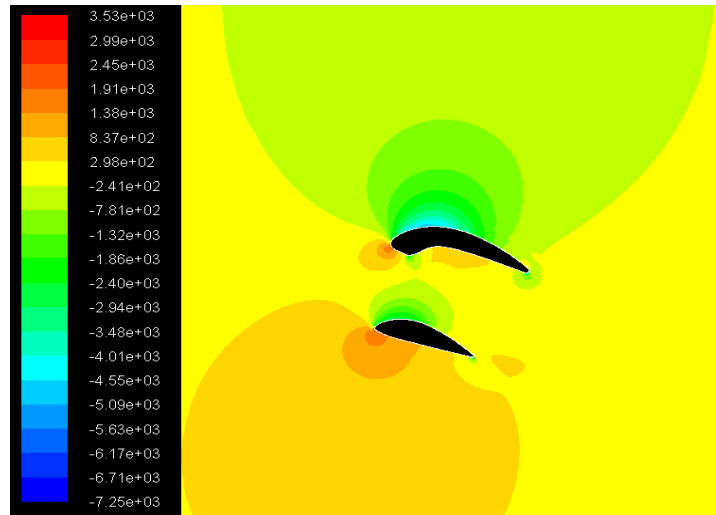
Basınç değişkenleri statik basınç konturları ve basınç katsayı dağılımı olmak üzere iki bölümde incelenmiştir.

i) Statik basınç konturları:

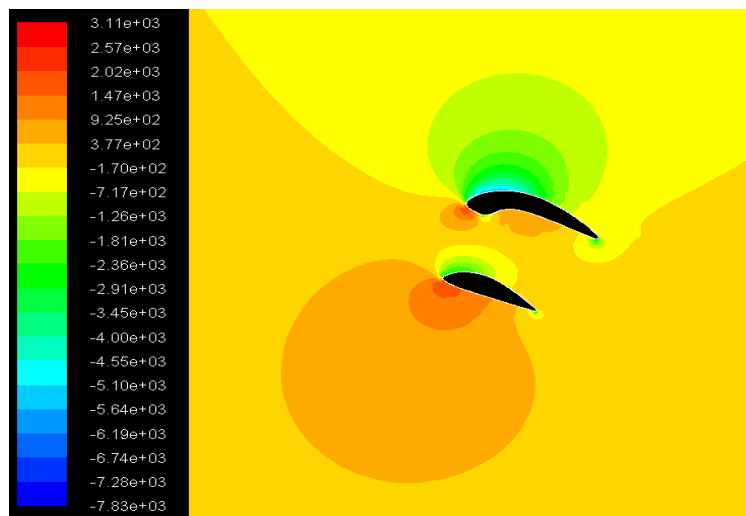
Şekil 4.45'de 0^0 hücum açısında, durma noktası bölgesinde, kanadın uç kısmında yüksek basınca maruz kaldığı görülmektedir. Kanatların üst kısımlarında akışkanın hız kazanmasıyla düşük basınç bölgeleri oluşmaktadır. Aynı şekilde, alt kısımlarda da düşük hızdan dolayı yüksek basınç bölgeleri oluşmaktadır. Şekil 4.46'da maksimum C_L/C_D oranının olduğu 18^0 hücum açısında üst kanadın üst kısmındaki basınç düşüşü, kanat üzerindeki su hızının artması ile artıp, kanadın alt kısmındaki basınç artışı, kanat altındaki su hızının azalması ile arttığı görülmektedir. 23^0 hücum açısında üst kanadın üstünde basınç düşüşü, Şekil 4.47'de görüldüğü gibi hücum kenarının hemen üst noktasından başlayarak hemen hemen kanadın yarısına kadar görülmektedir ve alt kısımdaki basınç artışıyla birlikte kanadın alt ve üst kısmındaki basınç farkı maksimum seviyeye ulaşıp maksimum kaldırma kuvveti elde edilmiştir. Daha sonra tutunma kaybına uğrayan Şekil 4.48'deki 30^0 hücum açısındaki kanat profilinin üst kısmında düşük basınç alanının çok azaldığı görülmektedir.



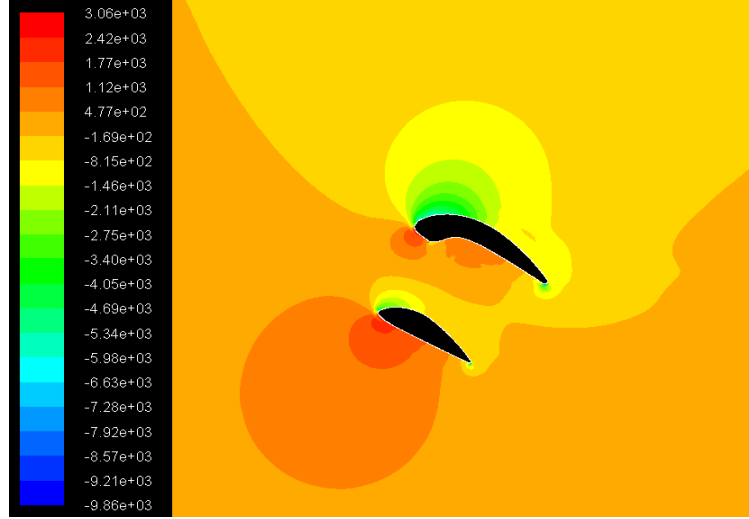
Şekil 4.45 Basınç konturu ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(Pa)



Şekil 4.46 Basınç konturu ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(Pa)



Şekil 4.47 Basınç konturu ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)(Pa)



Şekil 4.48 Basınç konturu ($\alpha=30^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)(Pa)

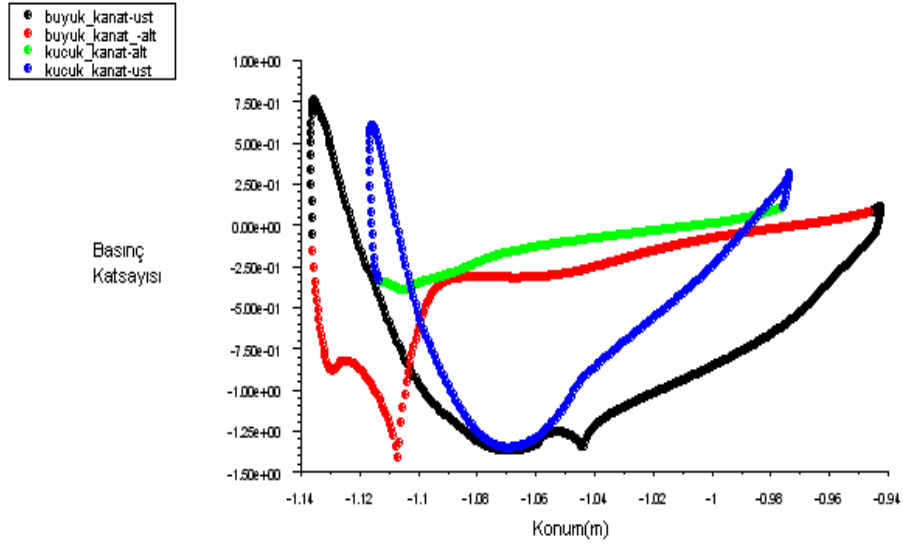
ii) Basınç Katsayı Dağılımları

Bu bölümde, ikili kanat profili kanat aralığı $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ iken basınç katsayısı dağılımları, su akışında $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında ve 0° , 18° , 23° , 30° hücum açılarında irdelenmiştir.

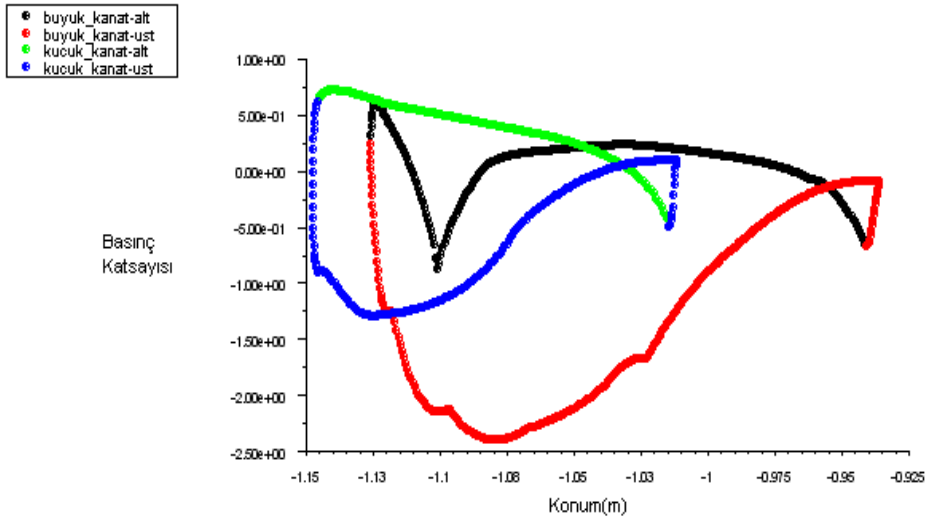
Şekil 4.49'da 0° hücum açısında, durma noktası bölgesinde, kanadın hücum kenarında yüksek basınca maruz kaldığı görülmektedir ve firar kenarına doğru gidildiğinde kanatların üst kısımlarında akışkanın hız kazanmasıyla düşük basınç bölgeleri oluşmaktadır. Aynı şekilde, alt kısımlarda da düşük hızdan dolayı yüksek basınç bölgeleri oluşmaktadır.

Su akışlı ortamda da hava akışlı ortam gibi basınç katsayı farkı, 0° hücum açısından Şekil 4.50'de maksimum C_L/C_D oranının olduğu 18° hücum açısına geçildiğinde artmaktadır. Şekil 4.51'de maksimum kaldırma kuvvetinin elde edildiği 23° hücum açısında basınç katsayı farkı diğer hücum açılara göre daha fazla olduğu görülmüştür ve firar kenarında akışın daha erken ayrılmaya başladığı da gözlemlenmiştir. Şekil 4.52'de tutunma kaybı açısından sonra incelenen 30° hücum açısındaki basınç katsayı dağılımı görülmektedir. Bu hücum açısında, kanatların alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç katsayı farkının 23° hücum açısına göre biraz daha az olduğu görülmektedir ve bu sebepten 23° hücum açısına göre daha az kaldırma kuvveti elde edilecektir. Kanat firar kısmına doğru gidildikçe, 23°

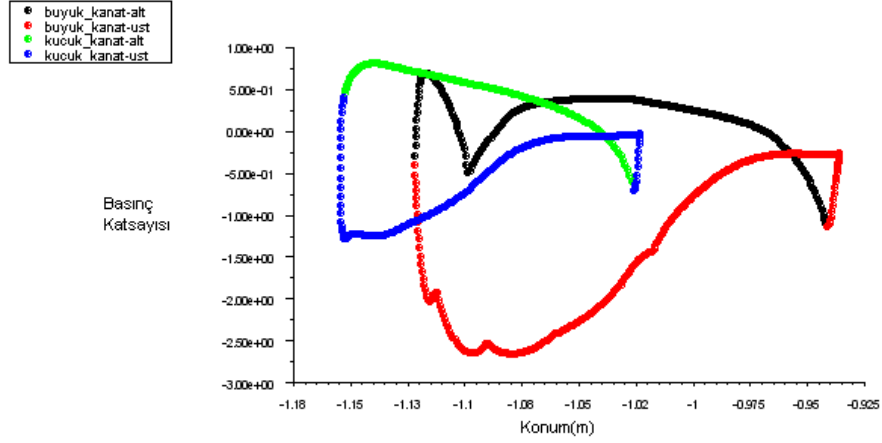
hücum açısına göre akışın daha erken kanattan ayrılmaya başladığı da gözlemlenmiştir.



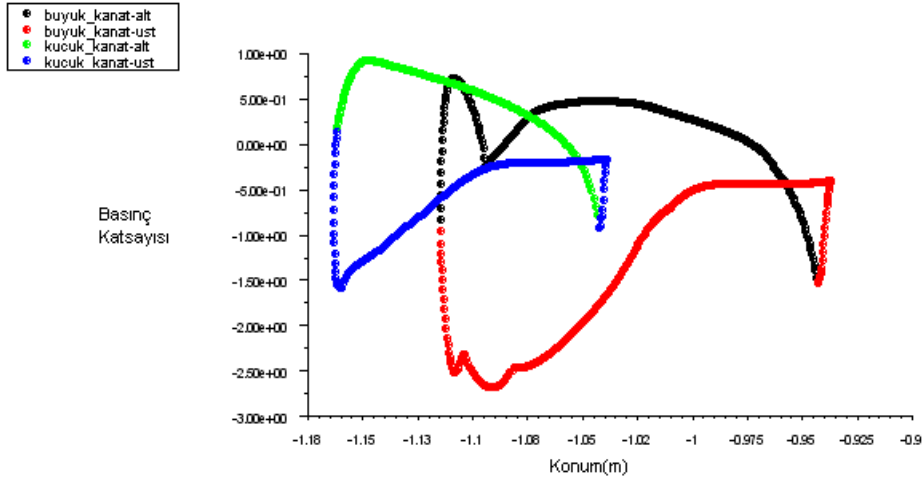
Şekil 4.49 Basınç dağılımı ($\alpha=0^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.50 Basınç dağılımı ($\alpha=18^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.51 Basınç dağılımı ($\alpha=23^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)

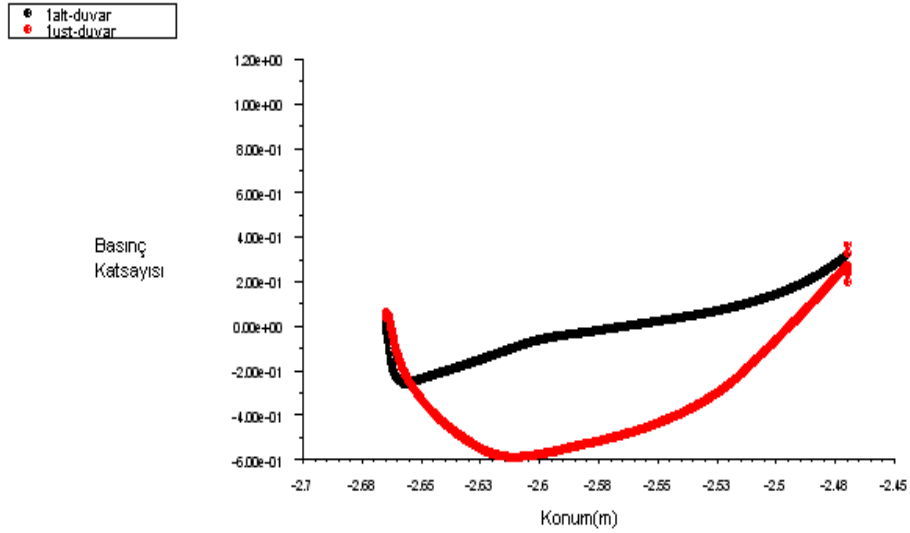


Şekil 4.52 Basınç dağılımı ($\alpha=30^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)

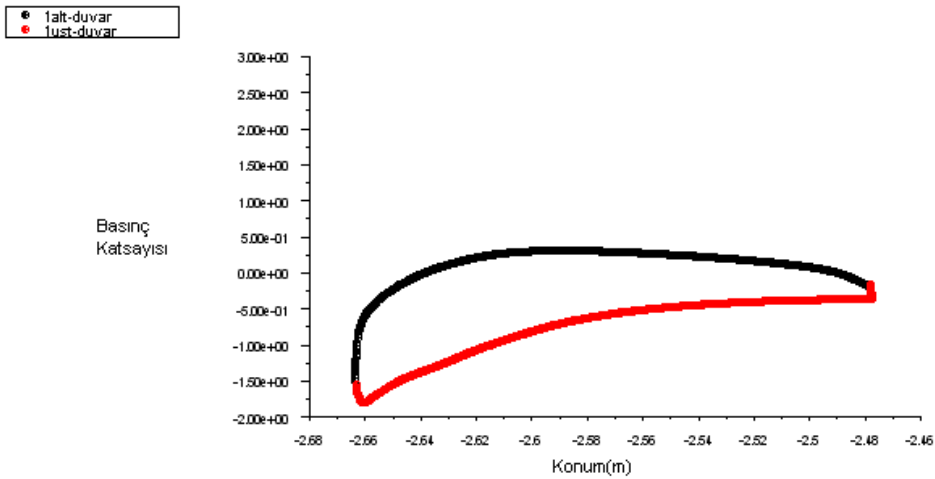
NACA4412 kanadının basınç katsayısı dağılımları:

Su ortamında, Şekil 4.53'de 0° hücum açısında, ikili kanat profilinin durma noktasına gelen basınç değerleri ile NACA4412 kanat profilinin durma noktasına gelen basınç değerleri arasındaki farkın çok fazla olduğu görülmektedir. Hem ikili kanat hem de NACA4412 kanat profilinin alt kanatlarında oluşan basınç değerleri hemen hemen aynı olsa da ikili kanadın üst kanatlarında etkili olan basınç değerleri, NACA4412 kanat profilinin üst kanadına etkiyen basınç değerlerinden oldukça az olduğu görülmektedir. Böylece ikili kanat profilinde basınç farklılığının daha fazla olmasından dolayı aynı koşullar altında NACA4412 kanat profilinden daha fazla kaldırma kuvveti oluşur.

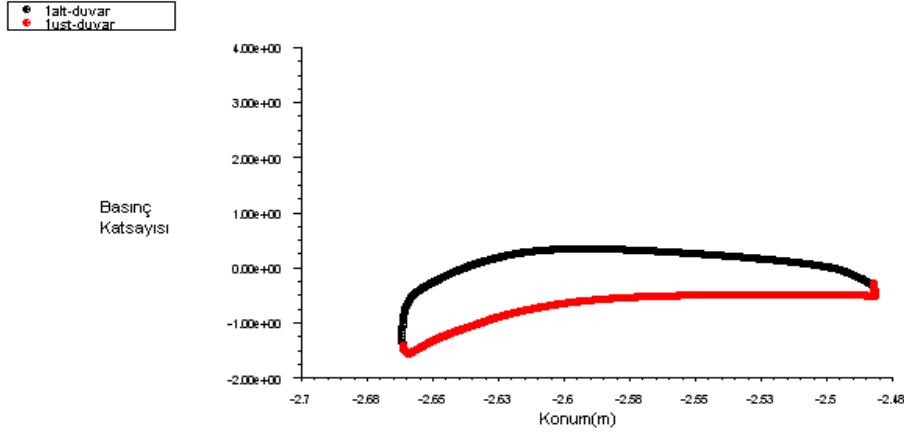
Şekil 4.54 ve Şekil 4.55’de görülen NACA4412 kanat profiline ait 18° ve 23° hücum açılarındaki basınç değerlerinin, ikili kanat profilinde maksimum C_L/C_D oranının ve maksimum C_L katsayısının elde edildiği 18° ve 23° hücum açılarındaki basınç değerleriyle oldukça farklı olduğu görülmektedir. İkili kanat profilinde basınç farklılığının fazla olmasından dolayı elde edilen kaldırma kuvvetinin de daha fazla olacağı beklenmektedir.



Şekil 4.53 NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=0^{\circ}$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.54 NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=18^{\circ}$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.55 NACA4412 basınç dağılımı ($\alpha=23^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)

4.2.2.2 İkili kanat profilinin akım karakteristikleri

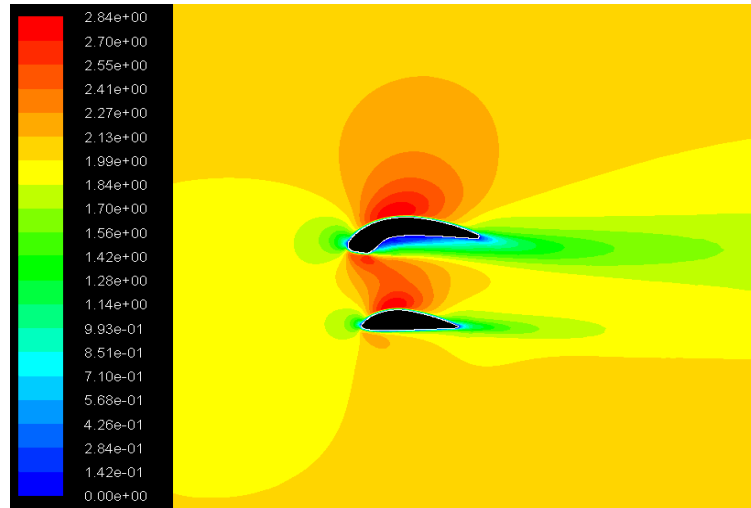
Bu bölümde su ortamında, kanat kesitinin akış karakteristikleri incelenmiş olup, kanat üzerindeki hız dağılımları, akım çizgileri oluşturma, türbülans şiddeti konturları ve vorteks kopma frekansları belirlenmiştir.

i) Hız konturları

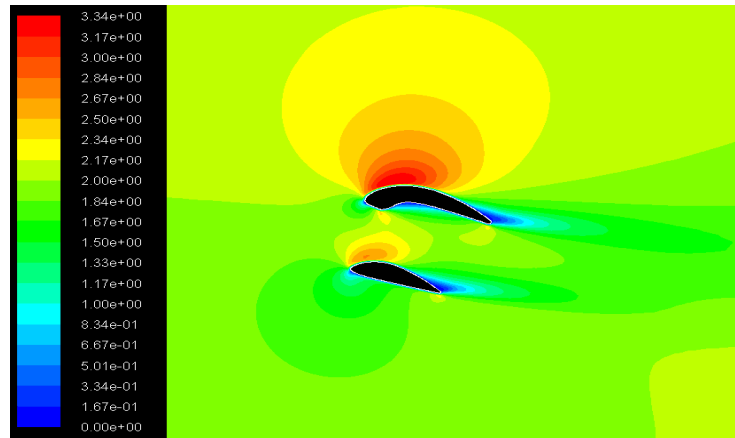
İkili kanat profili, kanat aralığı $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ iken $Re=4.5 \times 10^5$ (2m/s) sayısında 0° , 18° , 23° hücum açılarında hız konturları irdelenmiştir. Ayrıca NACA4412 kanat profili için, su akışında $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında 0° , 18° , 23° hücum açılarında hız konturları irdelenmiş ve ikili kanat profili ile karşılaştırma yapılmıştır.

Şekil 4.56'da su ortamında 0° hücum açısında, serbest akım bölgesine 2 m/s hızla giren su, büyük kanat profilinin hücum kenarında hız küçük bir bölgede sıfıra düşmektedir ve hücum kenarının üst bölgesinde akış hızı artmaya başlayıp kanadın orta noktasında maksimum değeri olan 2.70 m/s akış hızına ulaşmaktadır. Büyük kanadın alt bölgesinde, büyük bir alanda geometrisine bağlı olarak hız değerleri sıfıra düşmüştür. Fakat hava akışlı ortamda aynı hücum açısında bu sıfır hız alanı daha yoğunken, su akışlı ortamda biraz daha az olduğu görülmektedir. Büyük kanadın firar kenarına doğru akış hızında azalmalar olmaktadır. Küçük kanadın alt kısmındaki hız ise serbest akım bölgesindeki hıza eşittir. Şekil 4.57'de 18° hücum açısında kanat üzerindeki hız dağılımı görülmektedir. Büyük kanadın

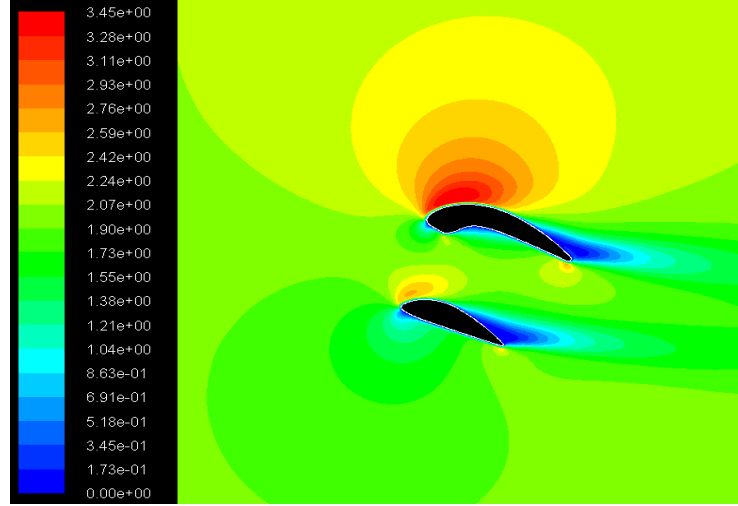
alt bölgesinde yoğun sıfır hız alanının azalıp akış hızının arttığı görülmektedir. Büyük kanat üzerinde maksimum 3.17 m/s hıza kadar ulaşılmakta ve firar kenarına doğru serbest akım hızından daha düşük hızlar meydana gelmektedir. Küçük kanadın alt kısmındaki hız, serbest akım bölgesindeki hızdan biraz düşüktür fakat firar kenarında serbest akım hızı ile eşittir. Şekil 4.58'de 23° hücum açısında hız dağılımı görülmektedir. Büyük ve küçük kanadın hücum kenarının hemen altında hız, sıfır değerindedir. Kanat üzerinde maksimum 3.28 m/s hıza kadar ulaşılmakta ve kanadın yarısından sonra hızda düşüş görülürken, firar kenarına doğru akışta ayrılmalara başlar. Bu bölgede hız sıfırdır. Bu hücum açısından sonraki açılarda, akım ayrılması daha erken ve daha yoğun olacağından kaldırma kuvvetinde düşüşe, sürtünme kuvvetinde artışa neden olacak ve kanat verimini düşürecektir.



Şekil 4.56 Hız konturu ($\alpha=0^{\circ}$, $Re=4.5 \times 10^5$) (m/s)



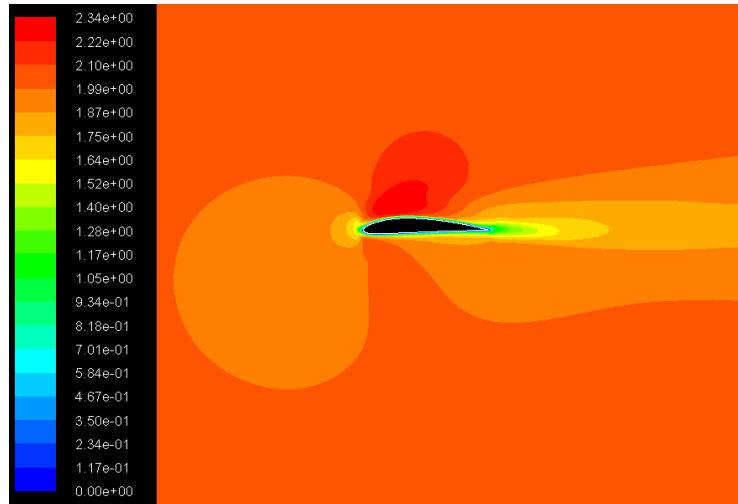
Şekil 4.57 Hız konturu ($\alpha=18^{\circ}$, $Re=4.5 \times 10^5$) (m/s)



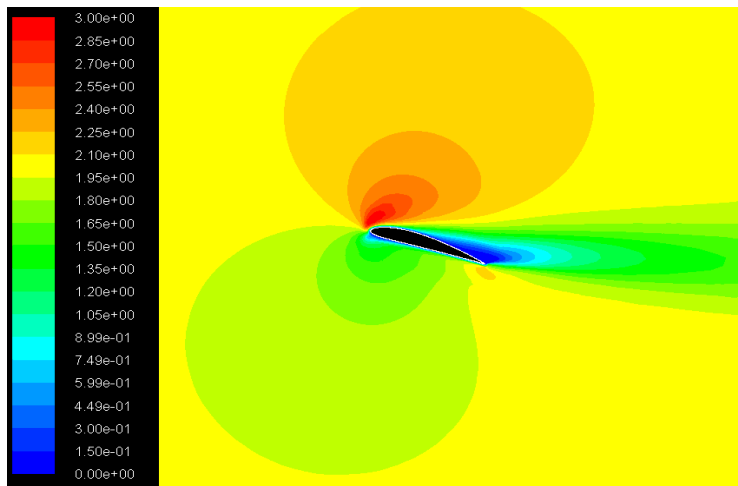
Şekil 4.58 Hız konturu ($\alpha=23^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$) (m/s)

NACA4412 kanadının hız konturları:

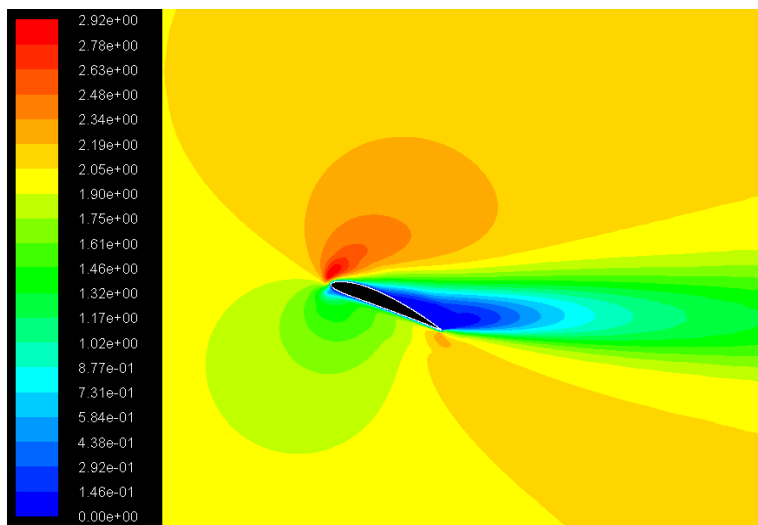
Şekil 4.59'da su ortamındaki 0° hücum açısında NACA4412 kanat profilinin üst kısmındaki hava hızı 2.22 m/s değerine kadar ulaşmaktadır. Bu değer ikili kanat profilinde 2.70 m/s olarak elde edilmişti. NACA4412 kanat profilinin alt ve üst kısmında hız farkının çok olmaması, basınç katsayı dağılımında Şekil 4.49'da görüldüğü gibi basınç farkının da çok olmamasına neden olur. İkili kanat profilinin kanatlar arası basınç farkı fazla olduğundan kaldırma kuvveti katsayısı daha yüksektir. Şekil 4.60 ve 4.61'de 18° ve 23° hücum açılarında NACA4412 kanat profili görülmektedir. Bu hücum açılarında üst kanadın yarısından itibaren akım ayrılması gözlemleniyorken, ikili kanat profili bu akış ayrılmasını firar kenarına doğru iterek daha geç tutunma kaybına uğramıştır. NACA4412 kanat profili 18° hücum açısında maksimum 2.85 m/s, 23° hücum açısında maksimum 2.78 m/s hızına ulaşabilmektedir. 18° hücum açısından 23° hücum açısına geçildiğinde kanat üstünde hız değerlerinin azaldığı görülmektedir. İkili kanat profili 18° 'de 3.17 m/s ve 23° 'de 3.28 m/s maksimum hızlara ulaşabiliyor ve hız değerinin hücum açısıyla birlikte hala arttığı görülmektedir. NACA4412 kanat profilinin alt kısmında da hız değerlerinin, ikili kanat profiline göre daha yüksek olduğu görülmekte ve alt kısımda yeterince basınç düşmediğinden kanat alt ve üst arası basınç farkı azalmaktadır. Tüm bu nedenler ikili kanat profilinin daha verimli olduğunu, daha fazla kaldırma kuvveti oluşturabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.59 NACA4412 Hız konturu ($\alpha=0^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$) (m/s)



Şekil 4.60 NACA4412 Hız konturu ($\alpha=18^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$) (m/s)

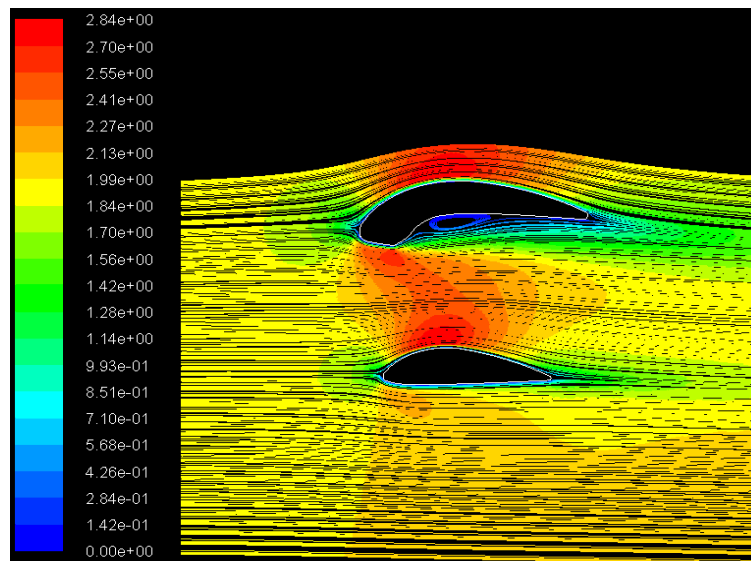


Şekil 4.61 NACA4412 Hız konturu ($\alpha=23^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$) (m/s)

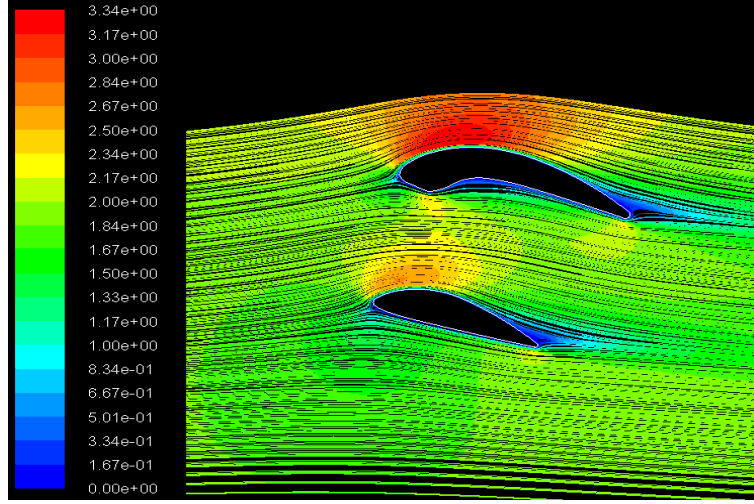
ii) Akım çizgileri

İkili kanat profilinin, kanat aralığı $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ iken su ortamında $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında 0° , 18° , 23° , 30° hücum açılarında akım çizgileri irdelenmiştir. Ayrıca NACA4412 kanat profili için, su ortamında $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında 0° , 18° , 23° , 26° hücum açılarında akım çizgileri irdelenmiş ve ikili kanat profili ile karşılaştırma yapılmıştır.

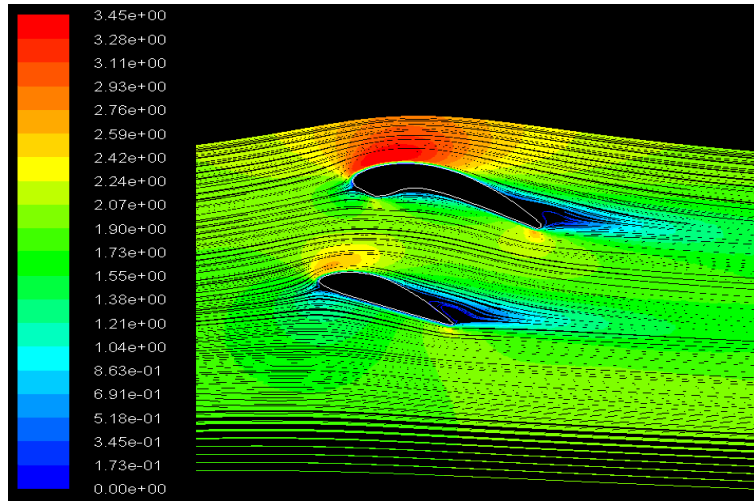
Şekil 4.62'de su ortamındaki 0° hücum açısında oluşan laminer ayrılma kabarcığının boyutu, hava ortamındakine oranla daha azdır. Hava ortamında maksimum C_L/C_D oranının elde edildiği 12° hücum açısında, kanadın firar kenarında akış ayrılması yok denecek kadar az iken, Şekil 4.63'de görülen su ortamında maksimum C_L/C_D oranının elde edildiği 18° hücum açısında kanadın firar kenarında akış ayrılması biraz daha erken meydana gelmektedir. Benzer şekilde, hava ortamında tutunma kaybı açısı olan 23° hücum açısında kanadın firar kenarındaki akım ayrılması, Şekil 4.64'de su ortamında tutunma kaybı açısı olan 23° hücum açısında meydana gelen akım ayrılmasına göre daha fazladır. Şekil 4.65'de 30° hücum açısında kanat profilinin firar kenarındaki akım ayrılması daha da erken oluşmuşmaya başlamış ve böylece sürükleme kuvveti katsayısı artışında hızlanmayla birlikte kaldırma kuvveti katsayısında düşüş meydana gelecektir.



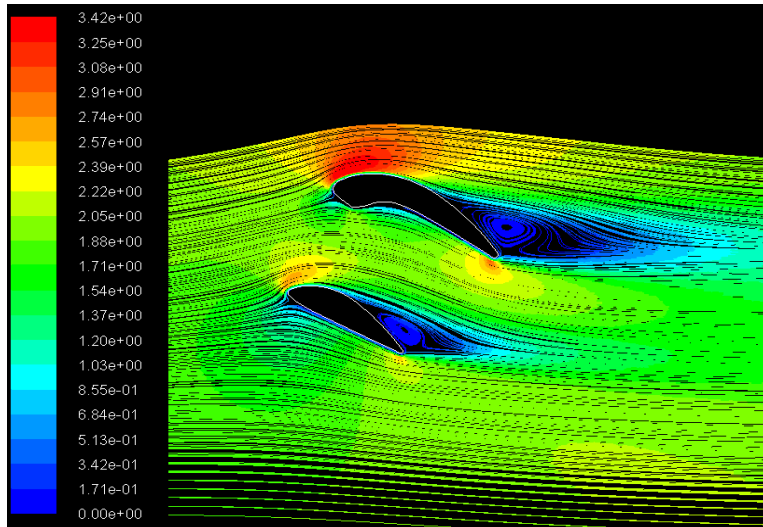
Şekil 4.62 Akım çizgisi ($\alpha=0^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.63 Akım çizgisi ($\alpha=18^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)



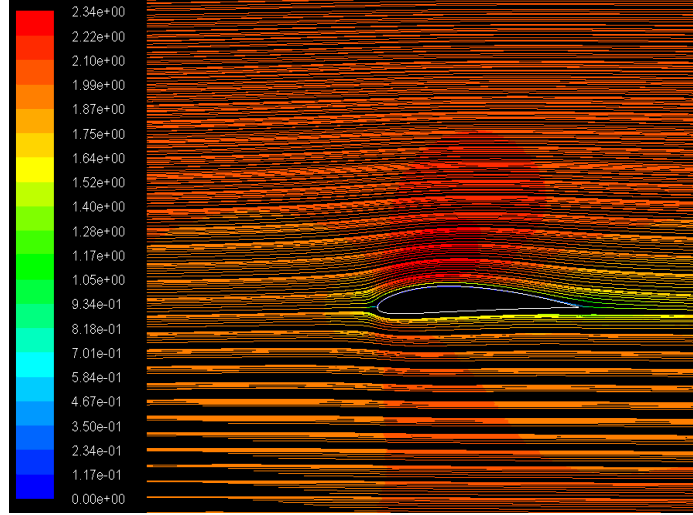
Şekil 4.64 Akım çizgisi ($\alpha=23^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)



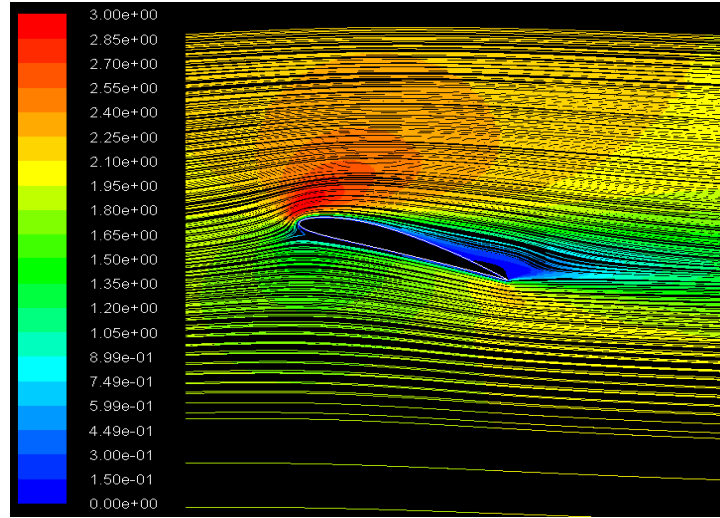
Şekil 4.65 Akım çizgisi ($\alpha=30^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)

NACA4412 kanadının akım çizgileri:

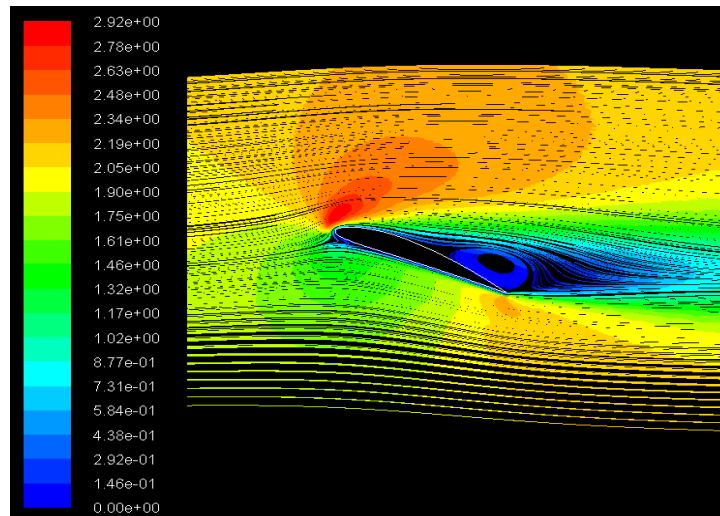
NACA4412 kanat profili, Şekil 4.66'da su ortamlarında 0° hücum açısında laminer ayrılma kabarcığının ve firar kenarında sınır tabaka ayrılmasının olmadığı görülmüştür. Şekil 4.67'de su ortamındaki 18° hücum açısında NACA4412 kanat profili akım çizgileri görülmektedir. Bu hücum açısında kanadın firar kenarında akım ayrılması görülmektedir. NACA4412 kanat profilinin kaldırma kuvveti katsayısı, ikili kanat profilinin bu hücum açısında elde ettiği kaldırma kuvveti katsayısından çok düşüktür. Çünkü ikili kanat profilinde akış ayrılması çok geç meydana gelmiştir. Şekil 4.68'de NACA4412 kanat profilinin 23° hücum açısında akım çizgileri görülmektedir. 18° hücum açısında tutunma kaybına uğrayan kanat profili, 23° hücum açısında daha erken akım ayrılmasına uğrayarak kaldırma kuvveti katsayısı düşüşe geçmiştir. İkili kanat profili için tutunma kaybı açısı olan 23° hücum açısında akım ayrılması, firar kenarının hemen üstünde başlamaktadır. Akım ayrılmalarının akış aerodinamiği üzerinde olumsuz etkileri olduğundan daha önce bahsetmiştik ve bu hücum açısında ikili kanat profilinin kaldırma kuvveti katsayısı 2.355, NACA4412 kanat profilinin kaldırma kuvveti katsayısı 1.322 olduğunu göz önüne alırsak, ikili kanat profilinin çok daha verimli olduğu görülebilmektedir. Şekil 4.69'da NACA4412 kanat profilinin 26° hücum açısındaki akım çizgileri görülmektedir. Bu kanat profili, ikili kanat profili gibi 30° hücum açılarında çözümü yapılamadığı için bu açıya en yakın olan 26° hücum açısında irdelenmiştir. Bu hücum açısında NACA4412 kanat profilinin hücum kenarına yakın noktasından akış ayrılması başlarken, ikili kanat profili daha yüksek hücum açısında olmasına rağmen kanat profilinin yarısından itibaren akış ayrılmasına uğramaktadır.



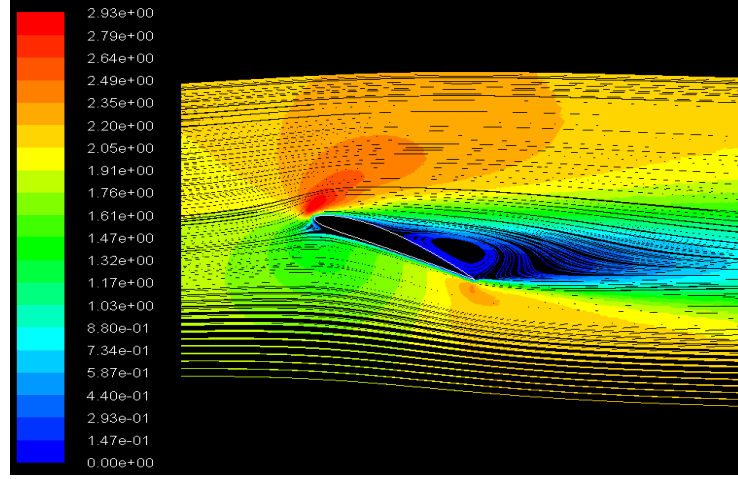
Şekil 4.66 NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=0^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.67 NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=18^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)



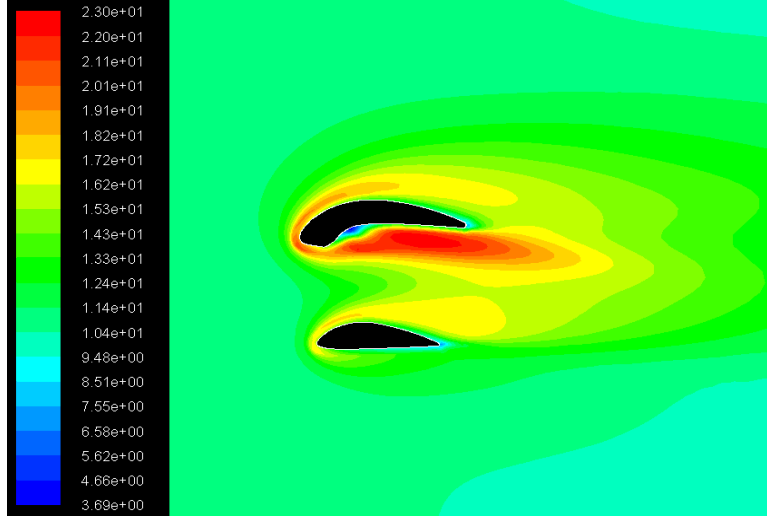
Şekil 4.68 NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=23^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)



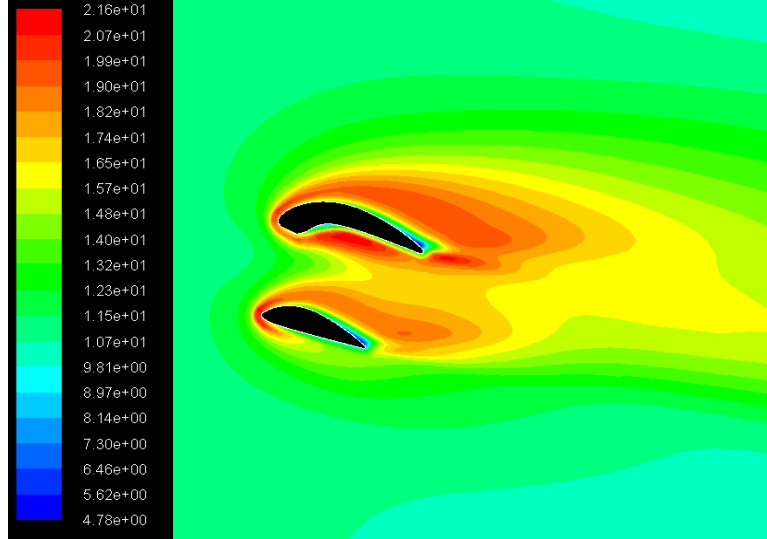
Şekil 4.69 NACA4412 akım çizgisi ($\alpha=26^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)

iii) Türbülans Şiddetleri

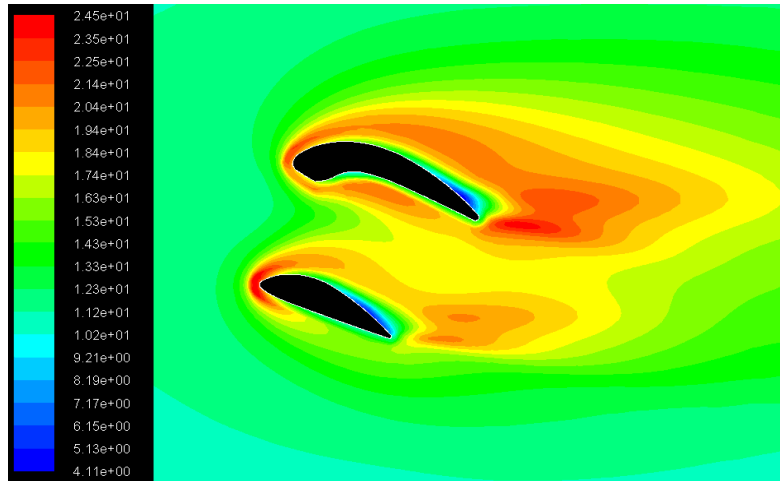
Su ortamındaki 0° hücum açısında büyük kanadın altında laminer ayrılma kabarcığı daha önceki bölümlerde tespit edilmişti (Şekil 4.62). Bu bölümde Şekil 4.70'de türbülans şiddetinin yüksek olarak gösterildiği bölge, laminer ayrılma kabarcığının olduğu bölgedir ve burada türbülans şiddeti %22 civarındadır. Şekil 4.71'de 18° hücum açısında büyük kanadın altındaki laminer ayrılma kabarcığının etkisi azalmış olmasına rağmen, kanadın geometrisine bağlı olarak bu bölümde ve kanadın firar kenarında akış ayrılmasından (Şekil 4.63) dolayı yüksek türbülans bölgeleri görülmekte ve şiddeti %20.7 olarak elde edilmektedir. 0° hücum açısındaki şiddete göre biraz daha az olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.72'de görülen kanat profili 23° hücum açısında olup, büyük kanat altındaki türbülans bölgesinin azaldığı, fakat üstünde akım ayrılmasının (Şekil 4.64) biraz daha erken oluşmasından dolayı türbülans şiddeti %23.5 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.73'de 30° hücum açısındaki kanat profilinin altında türbülans şiddetinin daha da azaldığı fakat, geniş akış ayrılmasından (Şekil 4.65) dolayı kanat arkasında yüksek türbülans şiddetlerinin olduğu görülmektedir. Türbülans şiddeti %25.3 olarak elde edilmiştir. Hava ve su ortamlarında hücum açısının artmasıyla türbülans şiddetinin de arttığı ve aşağı akış yönüne doğru kaydığı görülmüştür.



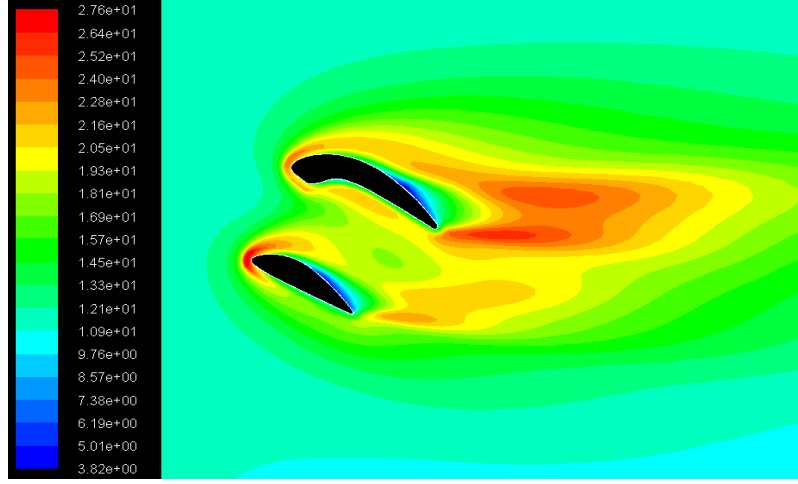
Şekil 4.70 Türbülans şiddeti ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.71 Türbülans şiddeti ($\alpha=18^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.72 Türbülans şiddeti ($\alpha=23^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)

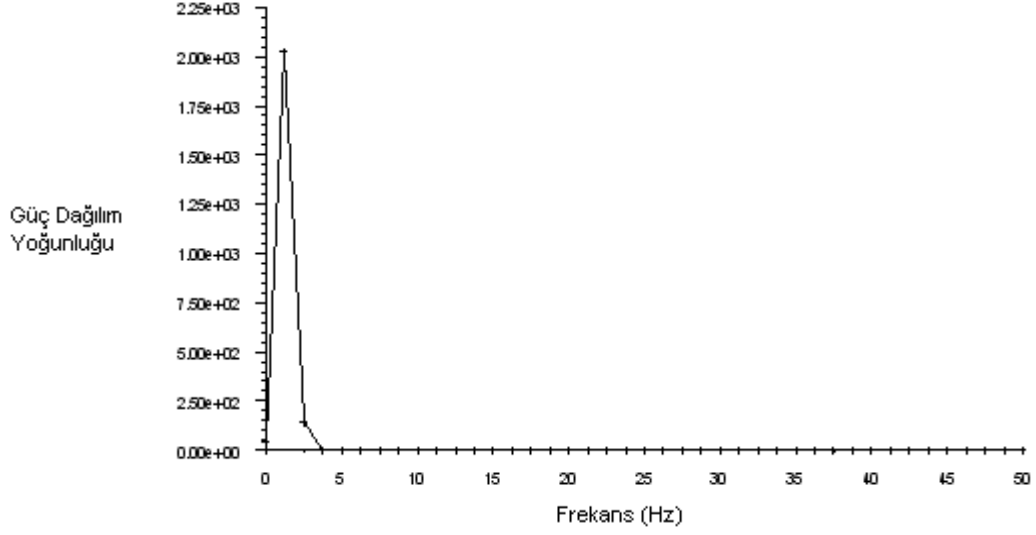


Şekil 4.73 Türbülans şiddeti ($\alpha=30^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)

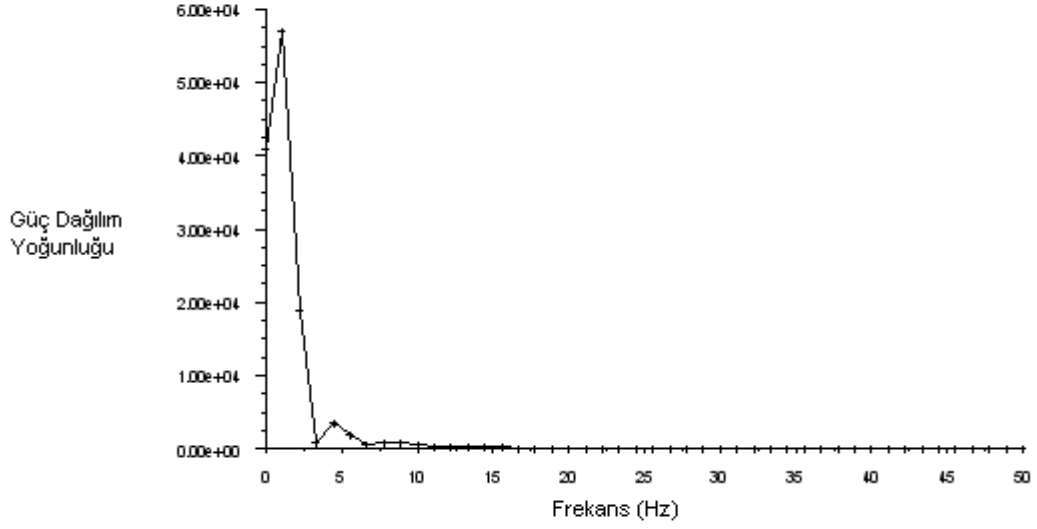
iv) Vorteks Kopma Frekansı

İkili kanat profilinin kanatlar arası $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ konumundayken, su ortamında $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında ikili kanat profilinin vorteks kopma frekansı 0° , 18° , 23° , 30° hücum açılarında incelenmiştir.

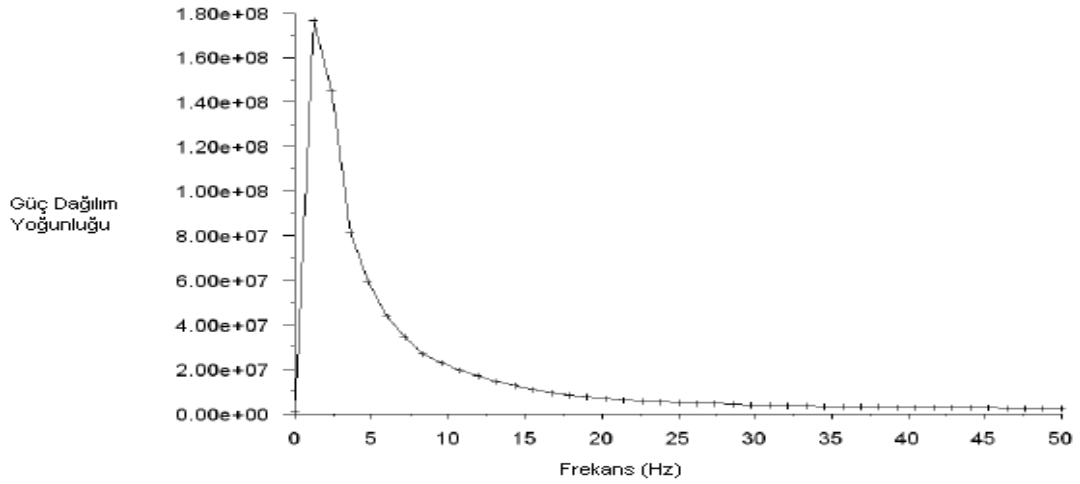
Şekil 4.74'de 0° hücum açısında elde edilen vorteks kopma frekansı 2Hz ve Strouhal sayısı 0.2 iken, Şekil 4.75'de maksimum C_L/C_D oranının elde edildiği 18° hücum açısında vorteks kopma frekansı 2.5Hz ve Strouhal sayısı 0.25'dir. Şekil 4.76'da tutunma kaybı açısı olan 23° hücum açısında vorteks kopma frekansı 1Hz ve Strouhal sayısı 0.1'dir. Şekil 4.77'de 30° hücum açısında vorteks kopma frekansı 1.25Hz ve Strouhal sayısı 0.125'dir. 0° ve 18° hücum açılarında, laminar ayrılma kabarcığı yoğun olduğundan algılayıcılar buraya konulmuştur, fakat 23° ve 30° hücum açılarında kanat firar kenarından akım ayrılması daha yoğun olduğu için algılayıcılar firar kenarı ve gerisine konulmuştur. Elde edilen sonuçlardan da görüleceği üzere; hücum açısının artmasıyla girdap oluşumunun arttığı görülmüştür. 0° hücum açısından 18° hücum açısına geçildiğinde kopma frekansı biraz daha artmaktadır. Aynı şekilde, 23° hücum açısından 30° hücum açısına geçildiğinde kopma frekansı tekrar artmaktadır. Yani, hücum açısının artmasıyla kanat yüzeyinden kopmalar ve girdap oluşumunun arttığı görülmektedir.



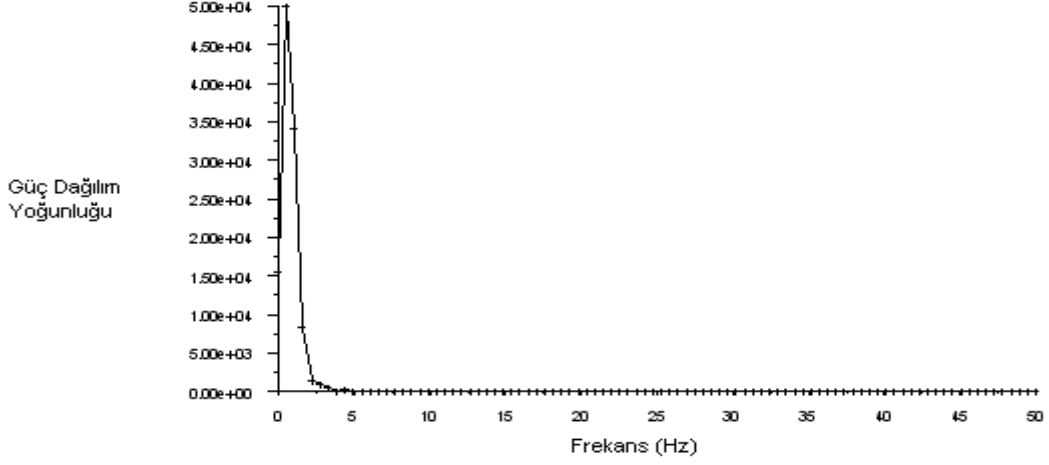
Şekil 4.74 Vorteks kopma frekansı ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.75 Vorteks kopma frekansı ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.76 Vorteks kopma frekansı ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)



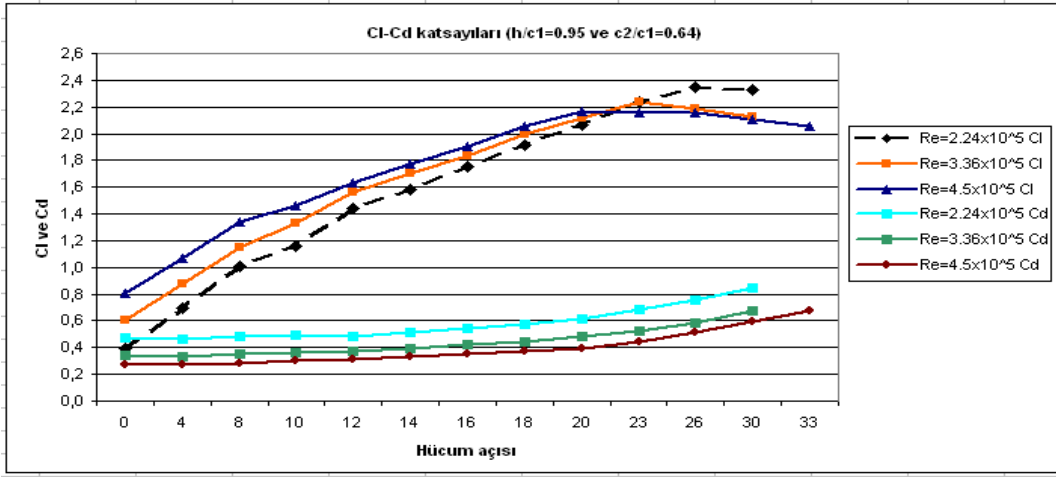
Şekil 4.77 Vorteks kopma frekansı ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)

4.2.2.3 İkili kanat profilinin aerodinamik kuvvet analizi

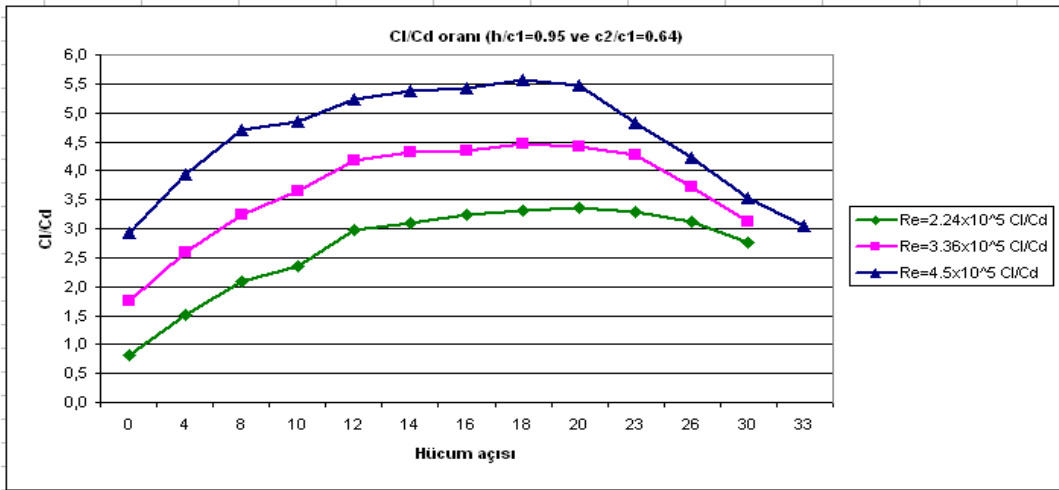
Bu bölümde öncelikle, ikili kanat profilinin kanatlar arası $h/c_1=0.95$, kanat genişliği oranı $c_2/c_1=0.64$ konumundayken Re sayısı ve hücum açısındaki değişim ile aerodinamik performansların değişimi Şekil 4.78 ve Şekil 4.79'de görülmektedir.

Şekil 4.78'da su akışında, $Re=2.24 \times 10^5$, $Re=3.36 \times 10^5$ ve $Re=4.5 \times 10^5$ sayılarında oluşan tutunma kaybı açıları sırasıyla 26^0 , 23^0 ve 20^0 'dir. 20^0 hücum açısına kadar maksimum C_L katsayısı $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında oluşuyorken bu hücum açısından sonra tutunma kaybına uğrayan kanadın C_L katsayısı düşüğe geçiyor. 23^0 hücum açısında ise maksimum C_L katsayısı $Re=3.36 \times 10^5$ sayısında oluşuyorken bu hücum açısından sonra tutunma kaybına uğrayan kanadın C_L katsayısı düşüğe geçiyor. En geç tutunma kaybına $Re=2.24 \times 10^5$ sayısında 26^0 hücum açısında ulaşıldığı görülmektedir ve maksimum C_L katsayısı bu hücum açısında 2.345 olarak elde edilmiştir. Sürüklenme kuvveti katsayıları ise; her hücum açısında en yüksek değerleri $Re=2.24 \times 10^5$ sayısıyla, en düşük değerleri ise $Re=4.5 \times 10^5$ sayısıyla elde edildiği görülmüştür.

Şekil 4.79'de C_L/C_D oranının her hücum açısında en yüksek $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında oluştuğunu görmekteyiz. Fakat düşük hücum açılarında oluşan C_L/C_D oranları arasındaki farkın, yüksek hücum açılarında doğru gidildikçe azalmakta olduğu görülmüştür.



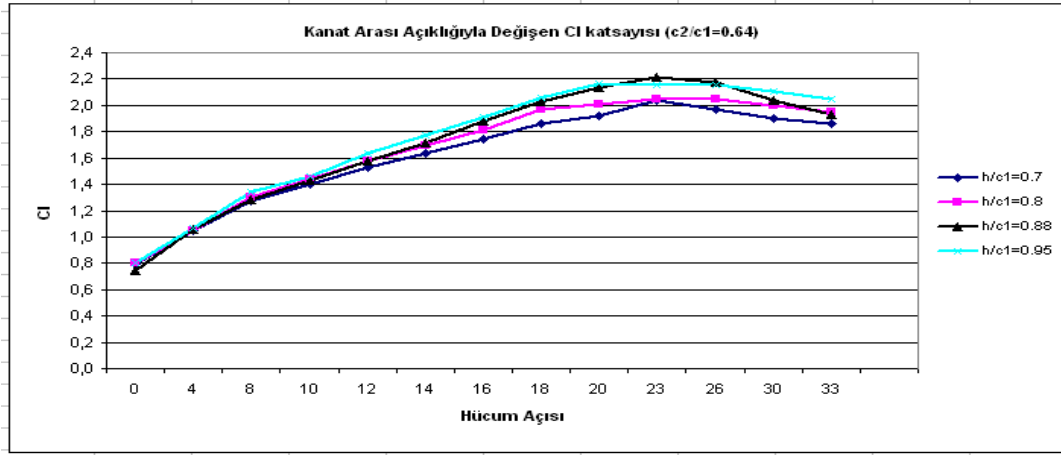
Şekil 4.78 Farklı hız ve hücum açısındaki C_L ve C_D katsayıları ($h/c_1=0.95$)



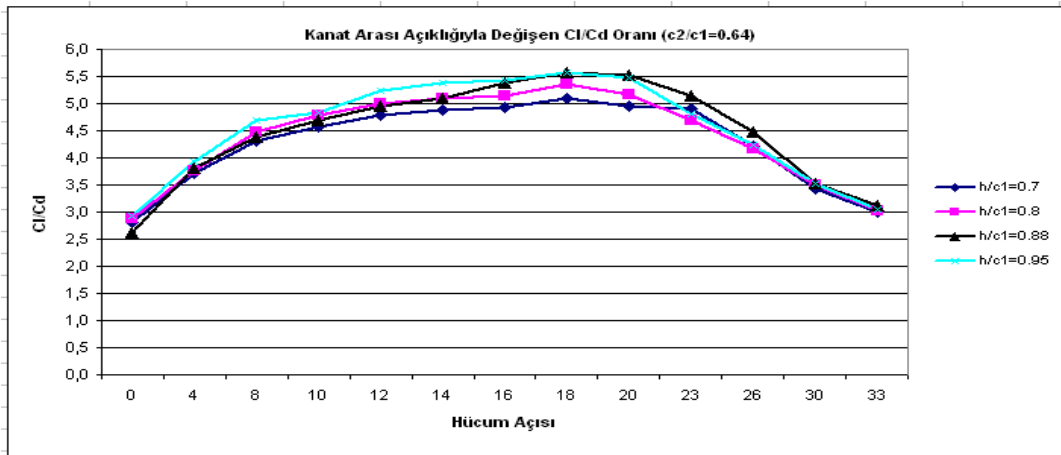
Şekil 4.79 Farklı hız ve hücum açısındaki C_L/C_D oranları ($h/c_1=0.95$)

Şekil 4.80'de, su ortamında $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında (2 m/s) ikili kanat profilinin orjinal kanat genişliği oranında ($c_2/c_1=0.64$), farklı kanat arası açıklığında ($h/c_1=0.7$, $h/c_1=0.8$, $h/c_1=0.88$ ve $h/c_1=0.95$) elde edilen C_L katsayı değerleri görülmektedir. Bu farklı kanat arası açıklıklarında C_L katsayıları düşük hücum açılarında birbirine çok yakın iken yüksek hücum açılarında daha farklı C_L katsayılarının olduğu görülmektedir. Maksimum C_L katsayısı, $h/c_1=0.88$ konumunda 23° hücum açısında 2.210 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.81'de ise C_L/C_D oranları görülmektedir ve maksimum C_L/C_D oranı, $h/c_1=0.95$ konumunda 18° hücum açısında 5.572 olarak elde edilmiştir. Optimum kanat, daha önceden de belirttiğimiz gibi, C_L/C_D oranının maksimum olduğu koşullarda belirlenir. Böylece; orjinal kanat genişliği oranında ($c_2/c_1=0.64$), ikili kanat profilinin optimum kanat

arası açıklığı $h/c_1=0.95$ konumunda 18° hücum açısında elde edildiği görülmüştür.



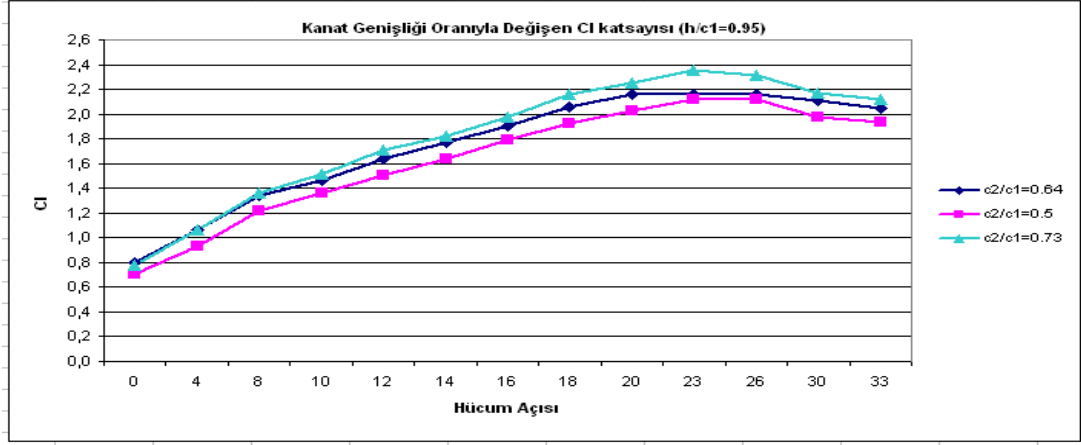
Şekil 4.80 Farklı kanat arası açıklıklarında C_L katsayıları ($c_2/c_1=0.64$, $Re=4.5 \times 10^5$)



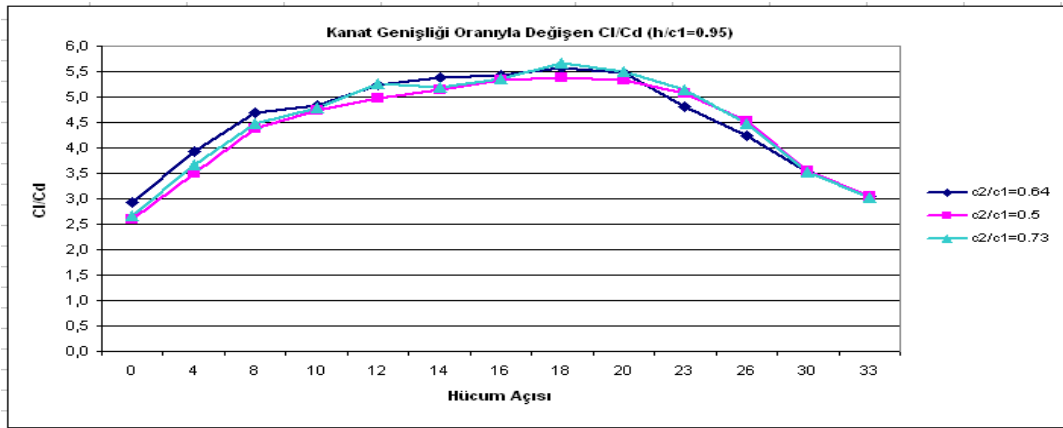
Şekil 4.81 Farklı kanat arası açıklıklarında C_L/C_D oranları ($c_2/c_1=0.64$, $Re=4.5 \times 10^5$)

Optimum kanat arası açıklığı elde edilen ikili kanat profilinin daha sonra optimum kanat genişliği oranını elde etmek amacıyla, $(h/c_1)_{opt}=0.95$ değerinde sabit iken farklı kanat genişliği oranlarında ($c_2/c_1=0.5$, $c_2/c_1=0.64$ ve $c_2/c_1=0.73$) denenmiştir ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.82'de görülmektedir. Kanat genişliği oranı arttıkça elde edilen C_L katsayısının da arttığı görülmektedir ve maksimum C_L katsayısı $c_2/c_1=0.73$ konumunda 23° hücum açısında 2.355 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.83'de ise bu kanat genişliği oranlarındaki C_L/C_D oranları görülmektedir ve yine $c_2/c_1=0.73$ konumunda 18° hücum açısında maksimum C_L/C_D oranı 5.669 olarak elde edilmiştir. Böylece; ikili kanat profilinin su ortamında $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında

optimum parametreleri belirlenmiştir. Buna göre; optimum kanat arası açıklığı $(h/c_1)_{opt}=0.95$, optimum kanat genişliği oranı $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ ve optimum hücum açısı 18° olarak elde edilmiştir.



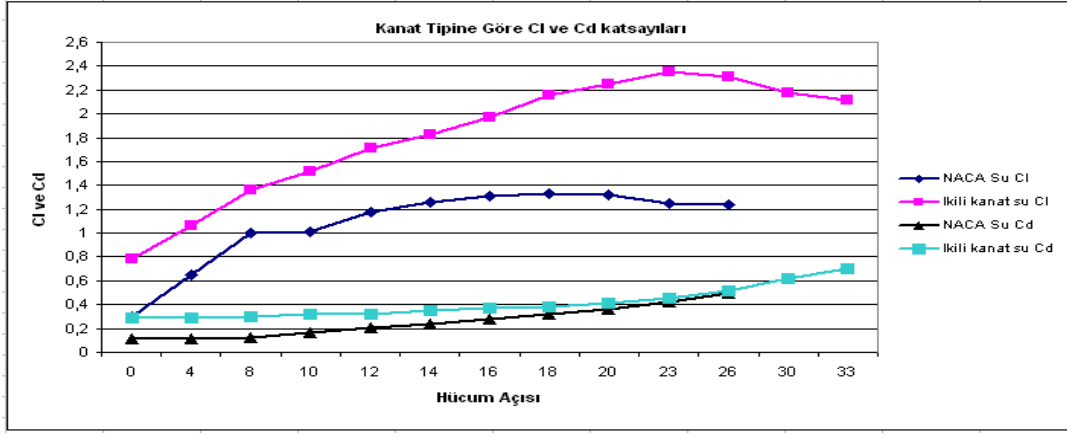
Şekil 4.82 Farklı kanat genişliği oranlarında C_L katsayıları ($h/c_1=0.95$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Şekil 4.83 Farklı kanat genişliği oranlarında C_L/C_D oranları ($h/c_1=0.95$, $Re=4.5 \times 10^5$)

Şekil 4.84'de ikili kanat profili ile NACA4412 kanat profilinin aerodinamik kuvvetlerinin karşılaştırması görülmektedir. İkili kanat profilinden elde edilen kaldırma kuvveti katsayısı, NACA4412 kanat profilinden elde edilene göre daha büyüktür. Hücum açısının 0° ile 8° olduğu durumlarda, şekilden görüldüğü gibi fark daha azdır. 8° hücum açısından sonra bu fark açılmaktadır, çünkü ikili kanat profilinin su ortamında tutunma kaybı açısı 23° hücum açısında oluşuyorken, NACA4412 kanat profilinde tutunma kaybı açısı 18° hücum açısında oluşmaktadır. Sürükleme kuvveti katsayısında yine belirli hücum açısına kadar NACA4412 kanat profili daha az sürükleme kuvvetine maruz kalmakta ve hava ortamında 18° hücum

açısında dengelenen sürüklenme kuvveti katsayısı, su ortamında 26° hücum açısında dengeye gelebilmiştir.



Şekil 4.84 Optimum ikili kanat profili ile NACA4412 kanat profilinin C_L ve C_D katsayıları ($Re=4.5 \times 10^5$)

Su ortamında elde edilen kanat kesit açıları:

İkili kanat profilinin FLUENT™ programı analizi ile elde edilen sonuçlara göre optimum hücum açısı olarak, maksimum C_L/C_D oranının olduğu 18° hücum açısı seçilmiştir.

Çizelge 4.5'de su ortamında $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında ve 18° optimum hücum açısına göre hava ortamında olduğu gibi su ortamında da kanat üzerindeki diğer kesit açıları elde edilmiştir.

Çizelge 4.5 Su ortamında 4.5×10^5 Re sayısında, $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ konumlarında kanat kesit açıları

Kanat Kesit Açıları							
r(m)	r/R	λ_r	$\varphi(0)$	$\alpha(^{\circ})$	$\Theta_p=\varphi-\alpha$	$\Theta_{p,o}$	$\Theta_T=\Theta_p-\Theta_{p,o}$
0,05	0,1	0,5	42,29	18	24,29	-10,46	34,75
0,1	0,2	1	30	18	12,00	-10,46	22,46
0,15	0,3	1,5	22,46	18	4,46	-10,46	14,92
0,2	0,4	2	17,71	18	-0,29	-10,46	10,17
0,25	0,5	2,5	14,53	18	-3,47	-10,46	6,99
0,3	0,6	3	12,29	18	-5,71	-10,46	4,75
0,35	0,7	3,5	10,63	18	-7,37	-10,46	3,09
0,4	0,8	4	9,36	18	-8,64	-10,46	1,82
0,45	0,9	4,5	8,35	18	-9,65	-10,46	0,81
0,5	1	5	7,54	18	-10,46	-10,46	0,00

Çizelge 4.6 ve 4.7'de su ortamında $Re=4.5 \times 10^5$ (12 m/s) sayısında elde edilen tüm analiz sonuçları görülmektedir. Maksimum C_L katsayısı ve maksimum C_L/C_D oranı farklı renklerle belirtilmiştir.

Çizelge 4.6 Su ortamında, farklı kanat aralıklarında ve farklı kanat genişliği oranlarında elde edilen tüm analiz sonuçları (1/2)

İKİLİ KANAT PROFİLİ-SU ORTAMINDAKİ AERODİNAMİK KUVVETLER															
h/c₁=0.7 c₂/c₁=0.64 V=1m/s				h/c₁=0.7 c₂/c₁=0.64 V=1.5m/s				h/c₁=0.7 c₂/c₁=0.64 V=2m/s							
$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D				
0	0.507	0.441	1.150	0	0.552	0.355	1.555	0	0.797	0.284	2.806				
4	0.650	0.477	1.363	4	0.815	0.351	2.322	4	1.045	0.281	3.719				
8	0.940	0.486	1.934	8	1.082	0.365	2.964	8	1.275	0.296	4.307				
10	1.067	0.503	2.121	10	1.224	0.377	3.247	10	1.400	0.306	4.575				
12	1.306	0.488	2.675	12	1.418	0.383	3.703	12	1.524	0.319	4.779				
14	1.434	0.511	2.806	14	1.546	0.402	3.845	14	1.638	0.336	4.875				
16	1.556	0.538	2.892	16	1.626	0.435	3.738	16	1.746	0.355	4.918				
18	1.736	0.564	3.078	18	1.836	0.439	4.182	18	1.862	0.366	5.087				
20	1.871	0.592	3.161	20	1.956	0.456	4.290	20	1.921	0.388	4.951				
23	2.026	0.650	3.117	23	2.077	0.498	4.171	23	2.040	0.415	4.916				
26	2.126	0.705	3.016	26	2.112	0.546	3.867	26	1.965	0.466	4.217				
30	2.020	0.770	2.624	30	1.899	0.629	3.018	30	1.900	0.555	3.423				
33	1.930	0.820	2.350	33	1.878	0.702	2.680	33	1.857	0.619	3.000				
h/c₁=0.8 c₂/c₁=0.64 V=1m/s				h/c₁=0.8 c₂/c₁=0.64 V=1.5m/s				h/c₁=0.8 c₂/c₁=0.64 V=2m/s							
$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D				
0	0.377	0.485	0.777	0	0.588	0.348	1.690	0	0.804	0.280	2.871				
4	0.675	0.471	1.433	4	0.845	0.344	2.456	4	1.049	0.278	3.773				
8	0.968	0.484	2.000	8	1.112	0.359	3.097	8	1.306	0.291	4.488				
10	1.110	0.500	2.220	10	1.264	0.372	3.398	10	1.443	0.301	4.794				
12	1.362	0.486	2.802	12	1.471	0.378	3.892	12	1.575	0.315	5.000				
14	1.496	0.511	2.928	14	1.602	0.399	4.014	14	1.696	0.333	5.093				
16	1.632	0.540	3.022	16	1.727	0.423	4.082	16	1.815	0.353	5.142				
18	1.834	0.567	3.234	18	1.914	0.440	4.349	18	1.967	0.367	5.360				
20	1.974	0.600	3.290	20	2.049	0.460	4.454	20	2.009	0.389	5.165				
23	2.121	0.664	3.194	23	2.071	0.510	4.060	23	2.0502	0.438	4.681				
26	2.207	0.722	3.056	26	2.061	0.567	3.634	26	2.0501	0.492	4.167				
30	2.157	0.799	2.700	30	2.002	0.649	3.085	30	1.999	0.573	3.489				
33	2.110	0.840	2.512	33	1.974	0.703	2.808	33	1.945	0.641	3.034				

Çizelge 4.7 Su ortamında, farklı kanat aralıklarında ve farklı kanat genişliği oranlarında elde edilen tüm analiz sonuçları (2/2)

İKİLİ KANAT PROFİLİ-SU ORTAMINDAKİ AERODİNAMİK KUVVETLER															
h/c₁=0.88 c₂/c₁=0.64 V=1m/s				h/c₁=0.88 c₂/c₁=0.64 V=1.5m/s				h/c₁=0.88 c₂/c₁=0.64 V=2m/s				h/c₁=0.95 c₂/c₁=0.64 V=1m/s			
$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D
0	0.374	0.483	0.774	0	0.603	0.343	1.758	0	0.748	0.286	2.615	0	0.388	0.473	0.820
4	0.688	0.465	1.480	4	0.865	0.340	2.544	4	1.059	0.278	3.809	4	0.700	0.460	1.522
8	0.993	0.480	2.069	8	1.143	0.356	3.211	8	1.287	0.294	4.378	8	1.005	0.481	2.089
10	1.144	0.498	2.297	10	1.306	0.368	3.549	10	1.434	0.305	4.702	10	1.161	0.496	2.341
12	1.382	0.497	2.781	12	1.512	0.419	3.609	12	1.579	0.319	4.950	12	1.439	0.484	2.974
14	1.516	0.526	2.882	14	1.670	0.395	4.228	14	1.713	0.336	5.098	14	1.580	0.511	3.093
16	1.720	0.544	3.162	16	1.801	0.421	4.278	16	1.876	0.348	5.391	16	1.750	0.542	3.228
18	1.890	0.575	3.287	18	1.956	0.444	4.405	18	2.030	0.365	5.562	18	1.912	0.577	3.313
20	2.029	0.606	3.348	20	2.100	0.466	4.506	20	2.135	0.386	5.531	20	2.069	0.616	3.358
23	2.190	0.671	3.264	23	2.233	0.518	4.311	23	2.210	0.430	5.140	23	2.235	0.682	3.276
26	2.315	0.740	3.128	26	2.200	0.572	3.846	26	2.171	0.484	4.486	26	2.345	0.751	3.122
30	2.400	0.845	2.840	30	2.176	0.663	3.282	30	2.035	0.579	3.515	30	2.331	0.846	2.755
33	2.369	0.925	2,561	33	2.080	0.702	2.963	33	1.930	0.619	3.118	33	2.198	0.912	2.410
h/c₁=0.95 c₂/c₁=0.64 V=1.5m/s				h/c₁=0.95 c₂/c₁=0.64 V=2m/s				h/c₁=0.95 c₂/c₁=0.5 V=2m/s				h/c₁=0.95 c₂/c₁=0.73 V=2m/s			
$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D	$\alpha(^{\circ})$	C _L	C _D	C _L /C _D
0	0.600	0.341	1.760	0	0.803	0.275	2.920	0	0.706	0.271	2.605	0	0.781	0.294	2.656
4	0.876	0.337	2.599	4	1.069	0.272	3.930	4	0.934	0.267	3.498	4	1.064	0.291	3.656
8	1.153	0.356	3.239	8	1.342	0.286	4.692	8	1.216	0.278	4.374	8	1.360	0.304	4.474
10	1.333	0.365	3.652	10	1.461	0.302	4.838	10	1.362	0.288	4.729	10	1.514	0.317	4.776
12	1.557	0.373	4.175	12	1.635	0.312	5.240	12	1.506	0.302	4.987	12	1.712	0.325	5.268
14	1.702	0.395	4.309	14	1.772	0.330	5.370	14	1.642	0.320	5.131	14	1.822	0.351	5.191
16	1.832	0.422	4.342	16	1.907	0.351	5.433	16	1.796	0.336	5.345	16	1.974	0.369	5.350
18	1.998	0.447	4.469	18	2.056	0.369	5.572	18	1.920	0.357	5.378	18	2.160	0.381	5.669
20	2.113	0.479	4.411	20	2.164	0.395	5.478	20	2.025	0.380	5.329	20	2.254	0.410	5.498
23	2.242	0.524	4.278	23	2.155	0.447	4.821	23	2.124	0.419	5.069	23	2.355	0.457	5.153
26	2.186	0.586	3.730	26	2.156	0.509	4.236	26	2.118	0.468	4.526	26	2.313	0.517	4.474
30	2.125	0.680	3.125	30	2.105	0.598	3.520	30	1.977	0.557	3.549	30	2.175	0.617	3.525
33	2.098	0.735	2.854	33	2.052	0.674	3.045	33	1.937	0.635	3.050	33	2.116	0.702	3.014

Su ortamında elde edilen güç, itki ve tork değerleri:

Su ortamında, ikili kanat profilinden elde edilen optimum kanat parametrelerinde ($h/c_1=0.95$, $c_2/c_1=0.73$ ve 12° hücum açısı) sağlanan güç, itki, tork ve diğer aerodinamik kuvvetler Çizelge 4.8'de görülmektedir. NACA4412 kanat profilinde değerleri de Çizelde 4.9'da görülmektedir.

Çizelge 4.8 Optimum kanat profili ile elde edilen güç, itki ve tork değeri

Re=4.5x10⁵ (2 m/s) ikili kanat profili	
Açısal hız	20 rad/sn=191 rpm
Güç (P)	1521 W
Net Güç ($\eta_{mek}=0.9$, $\eta_{jen}=0.85$)	1163 W
İtki kuvveti (T)	1553.55 N
Tork (Q)	53.2 N.m
Basınç farkı ($\Delta P=T/A$)	1978 N/m ² (Pa)
F_L (N)	1060 N
F_D (N)	187 N
F_N (N)	3225 N

Çizelge 4.9 NACA4412 kanat profili ile elde edilen güç, itki ve tork değeri

Re=4.5x10⁵ (2 m/s) NACA4412 kanat profili	
Açısal hız	20 rad/sn=191 rpm
Güç (P)	1097.4 W
Net Güç ($\eta_{mek}=0.9$, $\eta_{jen}=0.85$)	839.5 W
İtki kuvveti (T)	1468 N
Tork (Q)	13.5 N.m

Yukarıdaki çizelgelerden görüldüğü gibi; optimum ikili kanat profilinden elde edilen net güç değeri 1163W iken NACA4412 kanat profilinden elde edilen net güç değeri 839.5W'dır. Böylece; su ortamında ikili kanat profilinden elde edilen güç,

NACA4412 kanat profilinden elde edilen gücün %38.5'i kadar daha fazla olduğu görülmektedir.

4.2.3 Rüzgar ve su ortamındaki sonuçların irdelenmesi

Hava ortamında 12 m/s ($Re=1.5 \times 10^5$)'de ve su ortamında ayrı ayrı 1 m/s ($Re=2.24 \times 10^5$), 1.5 m/s ($Re=3.36 \times 10^5$) ve 2 m/s ($Re=4.5 \times 10^5$)'de incelenmiştir. Öncelikle kanat profilinin $c_2/c_1=0.64$ koşulunda sabit tutarak, h/c_1 oranı 4 farklı aralıkta (0.7, 0.8, 0.88 ve 0.95) denenmiştir. Bu koşullar altında elde edilen optimum h/c_1 oranı, bu oranda sabit tutularak bu sefer c_2/c_1 oranı 3 farklı aralıkta denenmiştir ve ikili kanat profili için optimum şartlar belirlenmiştir. Çizelge 4.10'da farklı kanat arası konumlarında, farklı kanat genişliği oranlarında ve farklı Re sayılarında elde edilen maksimum kaldırma kuvveti katsayı değerleri ile C_L/C_D oranının maksimum olduğu değerleri ve maksimum değere ulaştığı hücum açıları görülmektedir. Çizelgede görülen maksimum değerler arasında, hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ sayısında ve su ortamında $Re=4.5 \times 10^5$ sayısında optimum değerlerin $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ koşullarında elde edildiği görülmüştür.

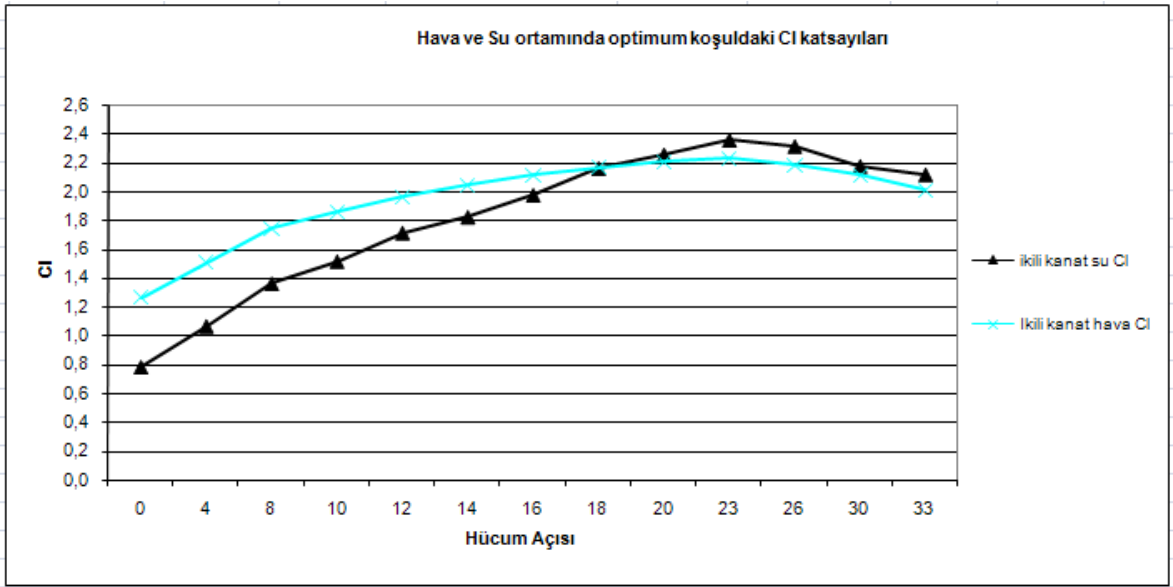
Çizelge 4.10 Hava ve su ortamında elde edilen maksimum değerler

Hava ($h/c_1=0.7$) (c_2/c_1)=0.64			
Reynolds Sayısı	maksimum C_l değeri	maksimum C_L/C_D değeri	maksimum C_L/C_D hücum açısı (α)
1.5 x 10 ⁵	1.988	11.43	12
Hava ($h/c_1=0.8$) (c_2/c_1)=0.64			
1.5 x 10 ⁵	2.054	11.93	12
Hava ($h/c_1=0.88$) (c_2/c_1)=0.64			
1.5 x 10 ⁵	2.098	12.09	12
Hava ($h/c_1=0.95$) (c_2/c_1)=0.64			
1.5 x 10 ⁵	2.135	12.28	10
Hava ($h/c_1=0.95$) (c_2/c_1)=0.5			

1.5×10^5	2.027	12.02	12
Hava ($h/c_1=0.95$) (c_2/c_1)=0.73			
1.5×10^5	2.230	12.41	12
Su ($h/c_1=0.7$) (c_2/c_1)=0.64			
4.5×10^5	2.04	5.09	18
3.36×10^5	2.112	4.29	20
2.24×10^5	2.126	3.161	20
Su ($h/c_1=0.8$) (c_2/c_1)=0.64			
4.5×10^5	2.0502	5.36	18
3.36×10^5	2.071	4.454	20
2.24×10^5	2.207	3.389	16
Su ($h/c_1=0.88$) (c_2/c_1)=0.64			
4.5×10^5	2.210	5.562	18
3.36×10^5	2.233	4.506	20
2.24×10^5	2.400	3.348	20
Su ($h/c_1=0.95$) (c_2/c_1)=0.64			
4.5×10^5	2.164	5.572	18
3.36×10^5	2.242	4.469	18
2.24×10^5	2.345	3.358	20
Su ($h/c_1=0.95$) (c_2/c_1)=0.5			
4.5×10^5	2.124	5.378	18
Su ($h/c_1=0.95$) (c_2/c_1)=0.73			
4.5×10^5	2.355	5.669	18

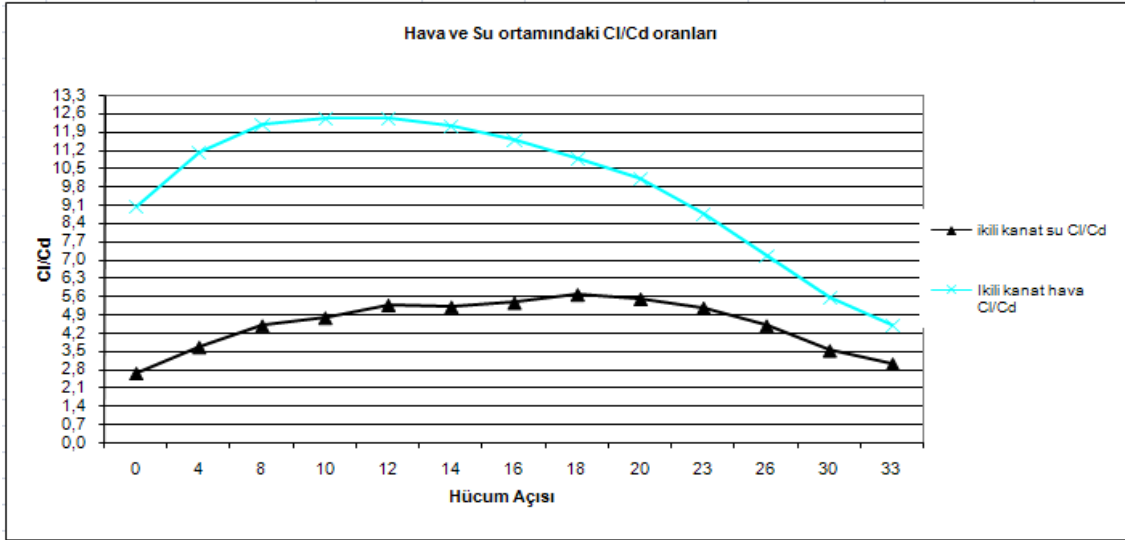
Şekil 4.85'de hava ve su ortamında elde edilen optimum kanat yapısının C_L katsayısı değişimleri görülmektedir. Her iki ortamda da hücum açısının artması ile kanadın üst kısımlarında akışın hızlandığı ve böylece düşük basınç bölgelerinin oluştuğu, kanadın alt kısımlarında akış hızının düşük olmasından dolayı yüksek

basınç bölgelerinin oluştuğu görülmüştür. Alt ve üst kanat arasındaki basınç farkının artması ile kaldırma kuvvetinin hücum açısı ile arttığı şekilden görülmektedir. Bu artış, tutunma açlarına kadar devam ettiği daha sonra bu açılardan sonra düşmeye başladığı görülmüştür. Hava ve su ortamında kaldırma kuvvetindeki fark, iki ortam arasındaki farklı akım ayrılması yoğunluklarından kaynaklanmaktadır. Hava ortamında, tutunma açısı ve sonrası hücum açılarında suya göre daha yoğun akım ayrılmasına uğradığı için kaldırma kuvvetinde daha fazla düşüşe neden olmuştur.



Şekil 4.85 İkili kanadın hava ve su ortamında optimum koşullardaki C_L katsayıları

Sayısal benzeşimler sonucu, ikili kanat profilinin kullanımı ile aerodinamik performansın arttığı, fakat bu artışın, hava koşullarında 12° hücum açısına kadar, su koşullarında 18° hücum açısına kadar verimli olduğu ve bu açıdan büyük açılarda sürüklenme kuvveti katsayısının artması ile C_L/C_D oranının düştüğü Şekil 4.86'da görülmüştür.



Şekil 4.86 İkili kanadın hava ve su ortamında optimum koşullardaki C_L/C_D oranları

Çizelge 4.11’de ikili kanat profilinin hava ve su ortamında elde edilen güç, itki, tork ve aerodinamik kuvvetleri görülmektedir. Hava ortamında 12 m/s akış hızında 310W net güç elde ediliyorken, su ortamında 2 m/s akış hızında 1163W net güç elde edilmiştir. Ayrıca, hava ortamında kanat üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetler, su ortamında kanat üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetlerden oldukça düşük olduğu görülmektedir ve bunun nedeni; suyun havaya göre daha yüksek yoğunluğa sahip olmasıdır.

Çizelge 4.11 Hava ve su ortamında elde edilen güç, itki ve tork değerleri

İkili kanat profili	$Re=1.5 \times 10^5$ (12 m/s)	$Re=4.5 \times 10^5$ (2 m/s)
Açısal hız	120 rad/sn=1146 rpm	20 rad/sn=191 rpm
Güç (P)	405 W	1521 W
Net Güç ($\eta_{mek}=0.9, \eta_{jen}=0.85$)	310 W	1163 W
İtki kuvveti (T)	66.14 N	1553.55 N
Tork (Q)	2.19 N.m	53.2 N.m
Basınç farkı ($\Delta P=T/A$)	84.2 N/m ² (Pa)	1978 N/m ² (Pa)
F_L (N)	44.8 N	1060 N
F_D (N)	3.6 N	187 N
F_N (N)	134.7 N	3225 N

Her iki ortamda, 0° ve maksimum C_L/C_D oranlarının olduğu 12° , 18° hücum açılarında büyük kanat altında oluşan laminar ayrılma kabarcığı bölgesine koyulan algılayıcılar ile vorteks kopma frekansları elde edilmiştir. Çizelge 4.12'den görüldüğü gibi hava ortamındaki vorteks kopma frekansları su ortamındakine göre biraz daha fazladır. Daha önceki bölümlerde akış çizgileri ile laminar ayrılma kabarcığının hava ortamında biraz daha yoğun olduğu (Şekil 4.23) gözlemlenmişti. Benzer şekilde, hava ortamında tutunma kaybı açısı olan 23° hücum açısında kanadın firar kenarındaki akım ayrılması (Şekil 4.27), Şekil 4.71'de su ortamında tutunma kaybı açısı olan 23° hücum açısında meydana gelen akım ayrılmasına göre biraz daha fazladır. Bu sebepten hava ortamında oluşan vorteks kopma frekansı su ortamındakine göre biraz daha fazladır.

Çizelge 4.12 Hava ve su ortamında elde edilen vorteks kopma frekansları

Re=1.5x10⁵ (12 m/s) Hava		Re=4.5x10⁵ (2 m/s) Su	
0°	2.5 Hz	0°	2 Hz
12°	3 Hz	18°	2.5 Hz
23°	1.5 Hz	23°	1 Hz
26°	3 Hz	30°	1.25 Hz

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin kanat tasarımında kullanılan teoriler incelenmiş ve ikili kanatlı rüzgâr türbinlerinin tasarım parametrelerinin belirlenmesiyle FLUENT™ paket program ile aerodinamik esasların elde edilmesi amaçlanmıştır. Ülkemizde ve dünyada kullanılan standart kanat profillerinin kaldırma kuvveti katsayısından daha yüksek kaldırma kuvveti katsayıları elde ederek, enerji üretebilmek için gerekli olan minimum rüzgar hızını, 6-7 m/s'nin aşağısına çekebilmek için ikili kanat profilinin sayısal incelemesi hava ve su ortamında yapılmıştır ve NACA4412 kanat profili ile karşılaştırması yapılmıştır.

Rüzgâr türbinlerindeki kanatlar elektrik üretimi için önemlidir. Kanatlar rüzgârdaki enerjiyi alan parçalardır. Dolayısıyla rüzgâr ile kanat arasındaki aerodinamik kuvvetler tasarım için oldukça önemlidir. Rüzgâr türbininden üretilecek enerji aerodinamik koşullar ile sınırlıdır. Kanat tasarımı ile ilgili bugüne kadar pek çok teori geliştirilmiştir. Öncelikle ideal disk teorisinden bahsedilmiştir. Burada türbin veriminin ideal koşullarda ancak %59 olabileceği dolayısıyla da ideal disk teorisinin temel bir model olmasına rağmen rüzgâr türbinlerinin ideal tasarımında gerçekçi sonuçlar vermediği belirtilmiştir.

Daha sonra, genel momentum teorisinde rotordaki ve rotor gerisindeki hızların kanat tasarımına olan etkileri analiz edilmiştir. Ancak, genel momentum teorisinin kanat geometrisi açısından uygun sonuçlar vermediği belirtilmiştir. Kanat elemanı teorisinde ise kanat geometrisindeki katsayılar kullanılarak rotorun dönme momenti ve itme kuvveti analiz edilmiştir. Söz konusu teori ile rotorun performansı ve rotor geometrisi arasındaki ilişkinin desteklendiği analiz edilmiştir.

Sonuç olarak yatay eksenli rüzgâr türbininin kanat tasarımı için genel momentum teorisinin ve kanat elemanı teorisinin birleştirilmesi gerektiği; bu teoriye ise kanat elemanı momentum teorisi adı verildiği belirtilmiştir. Sonuçları doğrusal hale dönüştürmek için uç düzeltme metodu (Prandtl'in uç kayıp faktörü) da hesaba katılmıştır. Böylece rotordaki kanat sayısının etkisi hesaba dahil edilmiştir.

İkili kanat profilinin 0.15 oranında modeli oluşturulmuştur ve GAMBIT™ programında kanat profilinin sınır şartları belirlenip en iyi çözümü alabilmek amacıyla da 43696 hücre sayılı sık ağ yapısı kullanılmıştır. Daha sonra ağ örgüsü oluşturulan kanat profilinin FLUENT™ programında sayısal çözümü yapılmıştır. İkili kanat profili hava ve su koşullarında, farklı kanat arası mesafelerinde (h/c_1), farklı kanat genişliği oranlarında (c_2/c_1), farklı Reynolds sayılarında ve farklı hücum açılarında sayısal çözümü yapılarak kanat profiline ait basınç konturları, basınç katsayı dağılımları, aerodinamik kuvvetleri, hız konturları, akım çizgileri, türbülans şiddeti konturları ve vorteks kopma frekansları elde edilmiş, NACA4412 kanat profili ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sağlıklı olabilmesi için NACA4412 kanat profilinin de aynı koşullar altında sonuçları elde edilmiştir.

İkili kanat profilinin çözümlenmesinde kullanılan parametrelerin değişim aralıkları;

$$V_{\text{rüzgar}} = 12 \text{ m/s (Re}=1.5 \times 10^5)$$

$$V_{\text{su}} = 1 \text{ m/s (Re}=2.24 \times 10^5), 1.5 \text{ m/s (Re}=3.36 \times 10^5) \text{ ve } 2 \text{ m/s (Re}=4.5 \times 10^5)$$

$$h/c_1 = 0.7, 0.8, 0.88 \text{ ve } 0.95 (0.7 \leq h/c_1 \leq 0.95)$$

$$c_2/c_1 = 0.5, 0.64 \text{ ve } 0.73 (0.5 \leq h/c_1 \leq 0.73)$$

$$\text{Hücum açısı } (\alpha) = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 14^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 23^\circ, 26^\circ, 30^\circ, 33^\circ$$

olarak kullanılmıştır.

Hava ortamında 12 m/s ($Re=1.5 \times 10^5$)'de ve su ortamında ayrı ayrı 1 m/s ($Re=2.24 \times 10^5$), 1.5 m/s ($Re=3.36 \times 10^5$) ve 2 m/s ($Re=4.5 \times 10^5$)'de incelenmiştir. Öncelikle ikili kanat profilinin orjinal kanat genişliği oranı olan $c_2/c_1=0.64$ oranında sabit tutarak, h/c_1 oranı 4 farklı aralıkta (0.7, 0.8, 0.88 ve 0.95) denenmiştir. Bu koşullar altında elde edilen optimum (h/c_1)_{opt} oranı, bu oranda sabit tutularak bu sefer c_2/c_1 oranı 3 farklı aralıkta denenmiştir ve ikili kanat profili için optimum şartlar belirlenmiştir ve elde edilen sonuçlar;

i) Çözümlerden elde edilen basınç katsayı dağılımı grafiklerine göre; bütün hücum açılarında, ikili kanat profilinin kanatlar arası oluşan basınç farkı, NACA4412 kanat profiline göre daha fazladır. Düşük hücum açılarından yüksek hücum açlarına doğru, ikili kanat profilinde daha çok basınç farklılığı oluşmaktadır. Bunun nedeni; NACA4412 kanat profili düşük hücum açısında tutunma kaybına uğrarken, ikili kanat profili hava ve su koşullarında 23° hücum açısına kadar tutunma kaybına

uğramamaktadır. Ayrıca, ikili kanat profili; hava koşullarında 18° hücum açısına kadar olan hücum açılarında basınç katsayı farkı su koşullarındakine göre daha fazla iken 20° hücum açısı ve sonrasında su koşullarında basınç farkı daha fazladır.

ii) Hava ortamında $Re=1.5 \times 10^5$ (12 m/s) sayısında öncelikle ikili kanat profilinin orijinal kanat genişliği olan $(c_2/c_1)=0.64$ oranında sabit tutarak, kanatlar arası mesafe (h/c_1) oranı 4 farklı oranda (0.7, 0.8, 0.88, 0.95) denenmiştir.

- Maksimum $C_L=2.130$, maksimum $C_L/C_D=12.28$ oranı 10° hücum açısında $(h/c_1)_{opt}=0.95$ oranında elde edilmiştir.

Daha sonra bu $(h/c_1)_{opt}=0.95$ oranında sabit tutulan kanat kesiti 3 farklı kanat genişliği (0.5, 0.64, 0.73) oranında denenmiştir.

- Maksimum $C_L=2.230$, maksimum $C_L/C_D=12.41$ oranı 12° hücum açısında $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ oranında elde edilmiştir ve bu oranlar optimum kanat parametreleri olarak belirlenmiştir.

iii) Su ortamında 3 farklı hız değerinde ($Re=2.24 \times 10^5$, $Re=3.36 \times 10^5$, $Re=4.5 \times 10^5$) denenmiştir. Orijinal kanat genişliği olan $(c_2/c_1)=0.64$ oranında sabit tutarak, kanatlar arası mesafe (h/c_1) 4 farklı oranda (0.7, 0.8, 0.88, 0.95) denenmiştir. Üç farklı hıza göre elde edilen maksimum değerler;

- 1 m/s= Maksimum $C_L=2.4$ ($h/c_1=0.88$, $c_2/c_1=0.64$), maksimum $C_L/C_D=3.389$ oranı 16° hücum açısında ($h/c_1=0.8$, $c_2/c_1=0.64$) elde edilmiştir.
- 1.5 m/s= Maksimum $C_L=2.242$ ($h/c_1=0.95$, $c_2/c_1=0.64$), maksimum $C_L/C_D=4.506$ oranı 20° hücum açısında ($h/c_1=0.88$, $c_2/c_1=0.64$) elde edilmiştir.
- 2 m/s= Maksimum $C_L=2.210$ ($h/c_1=0.88$, $c_2/c_1=0.64$), maksimum $C_L/C_D=5.572$ oranı 18° hücum açısında ($h/c_1=0.95$, $c_2/c_1=0.64$) elde edilmiştir.

Optimum kanat hücum açısının C_L/C_D oranının maksimum olduğu andaki değer seçildiği daha önce bahsedilmişti ve tüm bu elde edilen değerler arasında $Re=4.5 \times 10^5$ (2 m/s) sayısında maksimum $C_L/C_D=5.572$ oranı 18° hücum açısında $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $c_2/c_1=0.64$ koşullarında oluştuğu görülmüştür.

Daha sonra $Re=4.5 \times 10^5$ (2 m/s) sayısında $(h/c_1)_{opt}=0.95$ oranında sabit tutulan kanat kesiti 3 farklı kanat genişliği (0.5, 0.64, 0.73) oranında tekrar analiz edilmiştir.

- Maksimum $C_L=2.355$, maksimum $C_L/C_D=5.669$ oranı 18° hücum açısında $(h/c_1)_{opt}=0.95$ ve $(c_2/c_1)_{opt}=0.73$ oranında elde edilmiştir ve bu oranlar optimum kanat parametreleri olarak belirlenmiştir.

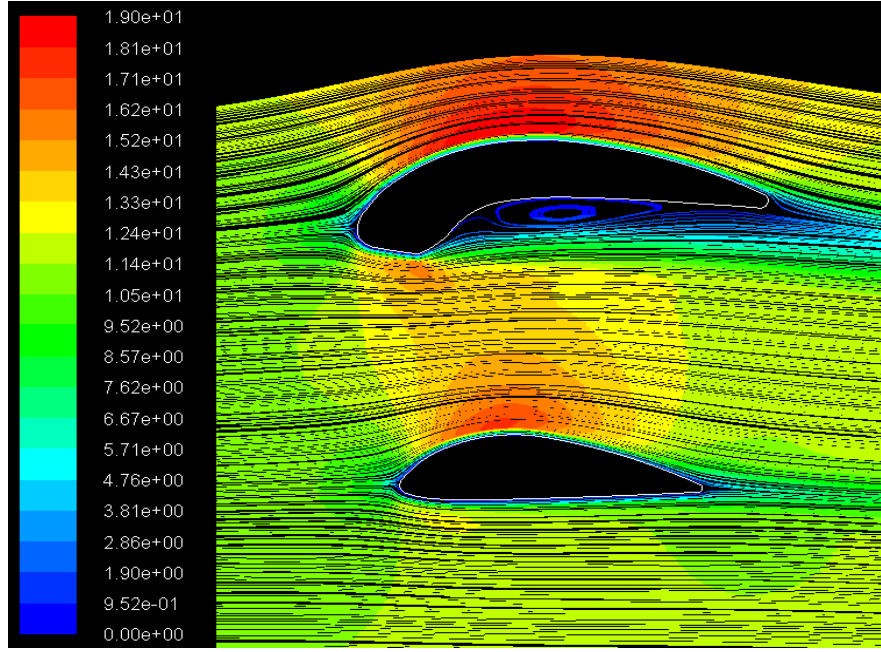
Çizelge 4.13 Farklı su hızlarında elde edilen optimum parametreler ve kanat kesit açıları

1 m/s su hızında								1.5 m/s su hızında							
Optimum aralıklar		C_L	C_L/C_D	Hücum açısı (α)				Optimum aralıklar		C_L	C_L/C_D	Hücum açısı (α)			
h/c ₁ =0,95c ₂ /c ₁ =0,73		2,150	3,365	20°				h/c ₁ =0,88 c ₂ /c ₁ =0,64		2,103	4,503	20°			
Kanat Kesit Açılıarı								Kanat Kesit Açılıarı							
r (m)	r/R	λ_r	$\varphi(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\Theta_p=\varphi-\alpha$	$\Theta_{p,o}$	$\Theta_T=\Theta_p-\Theta_{p,o}$	r (m)	r/R	λ_r	$\varphi(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\Theta_p=\varphi-\alpha$	$\Theta_{p,o}$	$\Theta_T=\Theta_p-\Theta_{p,o}$
0,05	0,1	0,5	42,29	20	22,29	-12,46	34,75	0,05	0,1	0,5	42,29	20	22,29	-12,46	34,75
0,10	0,2	1	30	20	10	-12,46	22,46	0,10	0,2	1	30	20	10	-12,46	22,46
0,15	0,3	1,5	22,46	20	2,46	-12,46	14,92	0,15	0,3	1,5	22,46	20	2,46	-12,46	14,92
0,20	0,4	2	17,71	20	-2,29	-12,46	10,17	0,20	0,4	2	17,71	20	-2,29	-12,46	10,17
0,25	0,5	2,5	14,53	20	-5,47	-12,46	6,99	0,25	0,5	2,5	14,53	20	-5,47	-12,46	6,99
0,30	0,6	3	12,29	20	-7,71	-12,46	4,75	0,30	0,6	3	12,29	20	-7,71	-12,46	4,75
0,35	0,7	3,5	10,63	20	-9,37	-12,46	3,09	0,35	0,7	3,5	10,63	20	-9,37	-12,46	3,09
0,40	0,8	4	9,36	20	-10,64	-12,46	1,82	0,40	0,8	4	9,36	20	-10,64	-12,46	1,82
0,45	0,9	4,5	8,35	20	-11,65	-12,46	0,81	0,45	0,9	4,5	8,35	20	-11,65	-12,46	0,81
0,50	1	5	7,54	20	-12,46	-12,46	0	0,50	1	5	7,54	20	-12,46	-12,46	0
2 m/s su hızında								3 m/s su hızında							
Optimum aralıklar		C_L	C_L/C_D	Hücum açısı (α)				Optimum aralıklar		C_L	C_L/C_D	Hücum açısı (α)			
h/c ₁ =0,95c ₂ /c ₁ =0,73		2,160	5,669	18°				h/c ₁ =0,95c ₂ /c ₁ =0,73		2,213	7,352	18°			
Kanat Kesit Açılıarı								Kanat Kesit Açılıarı							
r (m)	r/R	λ_r	$\varphi(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\Theta_p=\varphi-\alpha$	$\Theta_{p,o}$	$\Theta_T=\Theta_p-\Theta_{p,o}$	r (m)	r/R	λ_r	$\varphi(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\Theta_p=\varphi-\alpha$	$\Theta_{p,o}$	$\Theta_T=\Theta_p-\Theta_{p,o}$
0,05	0,1	0,5	42,29	18	24,29	-10,46	34,75	0,05	0,1	0,5	42,29	18	24,29	-10,46	34,75
0,10	0,2	1	30	18	12	-10,46	22,46	0,10	0,2	1	30	18	12	-10,46	22,46
0,15	0,3	1,5	22,46	18	4,46	-10,46	14,92	0,15	0,3	1,5	22,46	18	4,46	-10,46	14,92
0,20	0,4	2	17,71	18	-0,29	-10,46	10,17	0,20	0,4	2	17,71	18	-0,29	-10,46	10,17
0,25	0,5	2,5	14,53	18	-3,47	-10,46	6,99	0,25	0,5	2,5	14,53	18	-3,47	-10,46	6,99
0,30	0,6	3	12,29	18	-5,71	-10,46	4,75	0,30	0,6	3	12,29	18	-5,71	-10,46	4,75
0,35	0,7	3,5	10,63	18	-7,37	-10,46	3,09	0,35	0,7	3,5	10,63	18	-7,37	-10,46	3,09
0,40	0,8	4	9,36	18	-8,64	-10,46	1,82	0,40	0,8	4	9,36	18	-8,64	-10,46	1,82
0,45	0,9	4,5	8,35	18	-9,65	-10,46	0,81	0,45	0,9	4,5	8,35	18	-9,65	-10,46	0,81
0,50	1	5	7,54	18	-10,46	-10,46	0	0,50	1	5	7,54	18	-10,46	-10,46	0

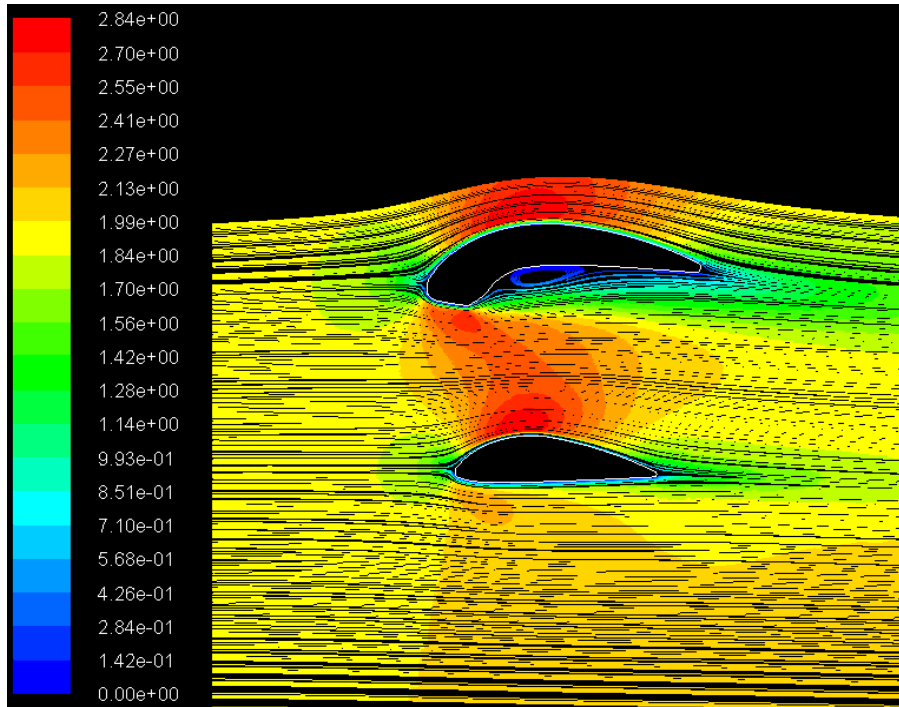
iv) Tüm bu aerodinamik katsayılar belirlendikten sonra kanat dizayn parametresi olan, C_L/C_D maksimum olduğu hücum açıları kanat kesit açıları belirlendi. Belirlenen bu kanat kesit açılarına göre yapılan güç hesaplamalarında hava ortamında NACA4412 kanat profilinde, açısal hız (Ω) 1146rpm ve net güç ($\eta_{mek}=0.9$, $\eta_{jen}=0.85$) 213W, ikili kanat profilinde ise net güç 310W olarak elde edilerek %45.5'lik bir artış sağlanmıştır. Su ortamında NACA4412 kanat profilinde, açısal hız (Ω) 191rpm ve net güç ($\eta_{mek}=0.9$, $\eta_{jen}=0.85$) 839.5W iken ikili kanat profilinde net güç 1163W olarak elde edilerek %38.5'lik bir artış sağlanmıştır. Ayrıca ikili kanat profilinden hava ve su ortamlarında elde edilen güçlere bakıldığında; su ortamında, hava ortamında elde edilen gücün 3.5 katı kadar daha fazla güç elde edilmiştir.

v) Hava koşullarında, ikili kanat profili maksimum hıza (20.8 m/s) 23^0 hücum açısında ulaşıyorken, NACA4412 kanat profili maksimum hıza (17 m/s) 23^0 hücum açısında ulaşmıştır. Aynı şekilde su koşullarında, ikili kanat profili maksimum hıza (3.28 m/s) 23^0 hücum açısında ulaşıyorken, NACA4412 kanat profili maksimum hıza (2.85 m/s) 18^0 hücum açısında ulaşmıştır.

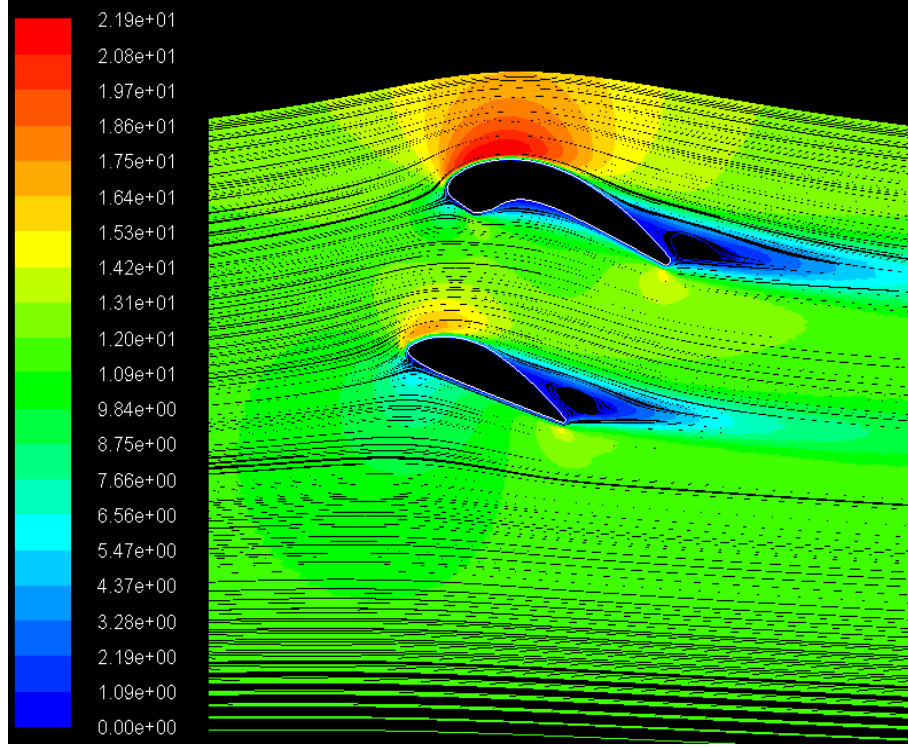
vi) Hava ve su ortamında kaldırma kuvvetlerindeki fark, iki ortam arasındaki farklı akım ayrılması yoğunluklarından kaynaklanmaktadır. Hava ortamında, tutunma açısı ve sonrası hücum açıları suya göre daha yoğun akım ayrılmasına uğradığı için kaldırma kuvvetinde daha fazla düşüşe neden olmuştur. 0^0 ve 23^0 hücum açıları elde edilen laminar ayrılma kabarcığı ve firar kenarından akım ayrılmasının farkı daha önce Şekil 4.18, Şekil 4.22, Şekil 4.62 ve Şekil 4.64'de elde edilen şekillerden de görülmektedir.



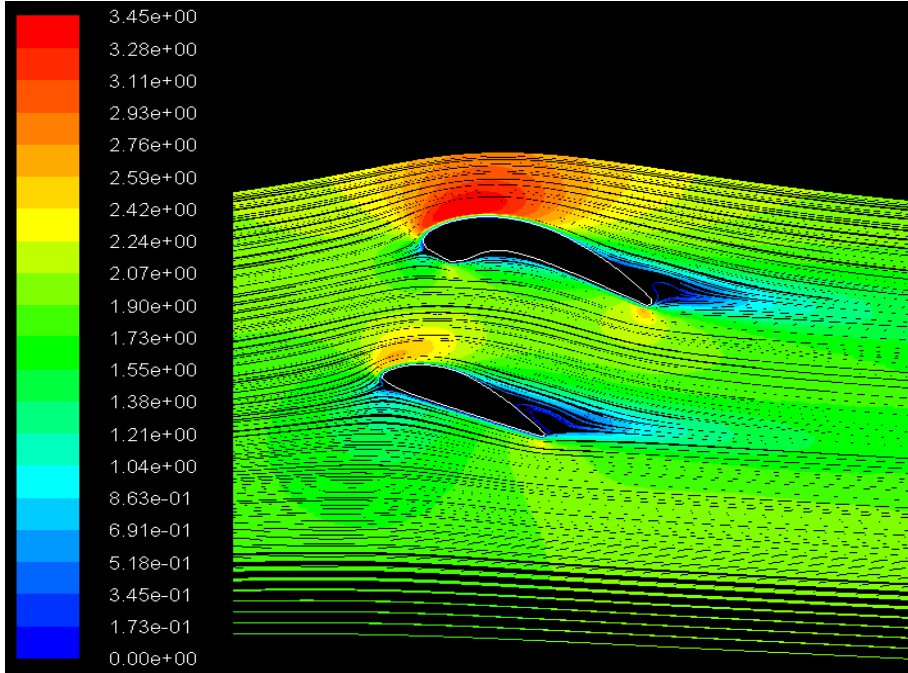
Hava akışında akım çizgileri ($\alpha=0^0$, $Re=1.5 \times 10^5$)



Su akışında akım çizgileri ($\alpha=0^0$, $Re=4.5 \times 10^5$)



Hava akışında akım çizgileri ($\alpha=23^\circ$, $Re=1.5 \times 10^5$)



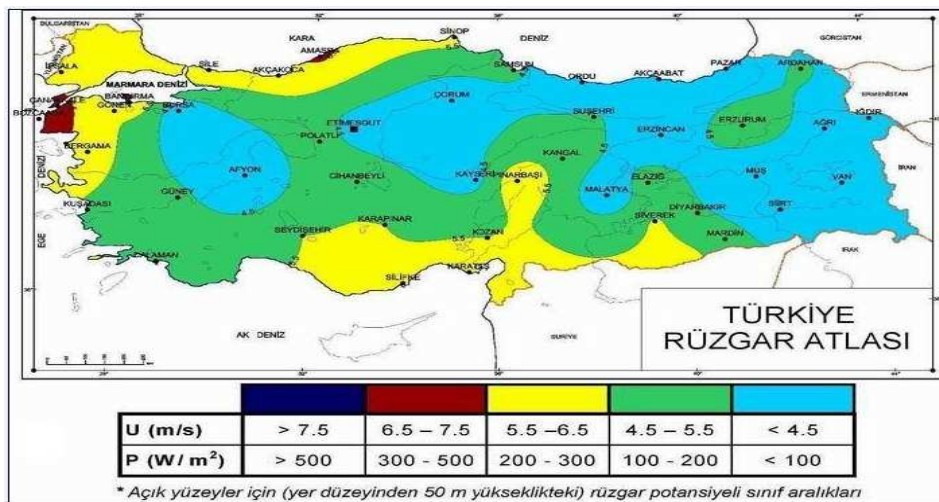
Su akışında akım çizgileri ($\alpha=23^\circ$, $Re=4.5 \times 10^5$)

vii) Her iki ortamda, 0° ve maksimum C_L/C_D oranlarının olduğu 12° , 18° hücum açılarında büyük kanat altında oluşan laminer ayrılma kabarcığı bölgesine koyulan algılayıcılar ile vorteks kopma frekansları elde edilmiştir. Daha önce Çizelge

4.12’de elde edilen hava ortamındaki vorteks kopma frekansları su ortamındakine göre biraz daha fazladır. Daha önceki bölümlerde akış çizgileri ile laminer ayrılma kabarcığının hava ortamında biraz daha yoğun olduğu gözlemlenmişti. Benzer şekilde, hava ortamında tutunma kaybı açısı olan 23^0 hücum açısında kanadın firar kenarındaki akım ayrılması, su ortamında tutunma kaybı açısı olan 23^0 hücum açısında meydana gelen akım ayrılmasına göre biraz daha fazladır. Bu sebepten hava ortamında oluşan vorteks kopma frekansı su ortamındakine göre biraz daha fazladır.

$Re=1.5 \times 10^5$ (12 m/s) Hava		$Re=4.5 \times 10^5$ (2 m/s) Su	
0^0	2.5 Hz	0^0	2 Hz
12^0	3 Hz	18^0	2.5 Hz
23^0	1.5 Hz	23^0	1 Hz
26^0	3 Hz	30^0	1.25 Hz

viii) (2.15) denklemi dikkate alınarak; NACA4412 kanat profilinin 6 m/s rüzgar hızında elde ettiği gücü, ikili kanat profili kullanarak gerekli rüzgar hızını 4.5-5 m/s seviyelerine indirebildiğimizi gözlemledik. Şekil 4.87’de görülen Türkiye rüzgar atlasında NACA4412 kanat profili ile sadece sarı ve kırmızı bölgelerde enerji üretilebiliyorken ikili kanat profili kullanımıyla yeşil bölgelerde de enerji üretilmesine olanak sağlamıştır. Bu sonuçlar ile Türkiye’de rüzgar alanları artırılıp ülke ekonomisine ve refahına katkısı oldukça fazla olacaktır.



Şekil 4.87 Türkiye rüzgar atlası [58]

5.2 Öneriler

Sunulan tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ışığında düşük Re sayılı akışlarda kanat profilleri etrafındaki akışkanın değişimi incelenmiştir. Farklı hücum açılarında, farklı Re sayısında, üç farklı kanat arası mesafesinde ve üç farklı kanat genişliği oranında çok sayıda nümerik sonuç elde edilerek literatüre sunulmuştur. Elde edilen sonuçlardan HAD yöntemi ile kanat profilleri etrafındaki akış hakkında detaylı bilgi elde edinilmiştir. Kullanım alanına göre değişiklik gösteren kanat profillerinde optimum profil seçimi konusunda faydalı bilgiler verilmiştir. Fakat gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik aşağıdaki öneriler getirilebilir:

- Bu çalışmada, rüzgar hızı 12 m/s'de ve su hızı üç farklı Re sayısında incelenmiştir, fakat özellikle rüzgar hızı normal şartlarda değişkendir. Ani rüzgar hızı değişimleri kanatlarda zorlanmalara, dolayısıyla hesaplanan kanat boyutlarının ilgili bölge için geçerli olabilecek maksimum rüzgar hızları da kontrol edilmesi faydalı olacaktır.
- İkili kanat türbini kanat profilinin büyük ve küçük kanat kalınlıkları (t_1 , t_2), değiştirilerek daha farklı ve daha iyi sonuçlar elde edilebilir.
- Sayısal sonuçlar, iki boyutlu ve hareketsiz kanat profillerinden elde edilmiştir. Ancak, gerçek koşullarda, rüzgar türbinlerindeki kanatlar hareket halindeyken eğilme meydana gelmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda söz konusu eğilmeler de dikkate alınarak programın geliştirilmesi ve uygulamaya daha yakın sonuçlar vermesi sağlanabilir.
- Bu tez çalışmasında, ikili kanat profilinin FLUENT™ programında sayısal sonuçları elde edilmiştir. Aynı zamanda bu kanat profilinin deneysel çalışmaları yapılarak, sayısal çözüm sonuçlarında elde edilen bulgular ile doğrulukları karşılaştırılıp daha detaylı bilgi edinilerek hata seviyesi minimum seviyeye indirgenebilir.

- Ayrıca, farklı sayısal çözüm yöntemleri, türbülans modelleri ve ağ yapıları kullanılarak, teorik verilerin deneyler ile doğrulanması konusunda yapılacak araştırmaların çoğaltılması önerilebilir.
- FLUENT™ programında modeli oluşturmak ve her değişen model için tekrar koordinatları girip uygun mesh işlemlerinin uygulanması gerekirken daha az işlem ile daha kısa sürede modelin oluşturulabileceği programlar kullanılarak kısa sürede çözümlere ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Özerdem, B., "Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Uygulamalarının Gelişimi ve Geleceği", Mühendis ve Makine, 526: 10-25, 2003.
- [2] Hau, E., Wind turbines, fundamentals, technologies, application, economics, Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [3] http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/dunya_RES.html
- [4] King R.M., Study of an Adaptive mechanical turbulator for control of laminar separation bubbles, Degree of Masters of Science Thesis, Graduate Faculty of North Carolina State University, Aerospace Engineering, April 2001.
- [5] Shan, H., Jiang, L., Liu, C., Direct numerical simulation of flow separation around a NACA0012 airfoil, Computers and Fluids, 34, 1096-1114, 2005.
- [6] Hamdani, H., Sun, M., Aerodynamic forces and flow structures of an airfoil in some unsteady motions at small Reynolds number, Acta Mechanica, 145, 173-187, 2000.
- [7] Cebeci, T., Besnard, E., Chen, H.H., Calculation of multielement airfoil flows, including flap wells, AIAA960056, 1996.
- [8] Lian, Y., Shyy, W., Viieru, D., Zhang, B., Membrane wing aerodynamics for micro air vehicles, Progress in Aerospace Sciences, 39, 425-465, 2003.
- [9] Menter, F.R., Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA Journal 0001-1452, 32(8), 1598-1605, 1994.
- [10] Suzen, Y.B., Huang, P.G., An intermittency transport equation for modeling flow transition, AIAA-2000-0287, 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 10-13 January 2000.
- [11] Suzen, Y.B., Huang, P.G., Modeling of flow transition using an intermittency transport equation, Journal of Fluids Engineering, 122(2), 273-284, 2000.

- [12] Suzen, Y.B., Xiong, G., Huang, P.G., Predictions of transitional flows in low pressure turbines using intermittency transport equation, *AIAA Journal*, 40(2), 254-266, 2002.
- [13] Suzen, Y.B., Huang P.G., Numerical simulation of unsteady wake/blade interaction in low pressure turbine flows using an intermittency transport equation, *Journal of Turbomachinery*, 127(3), 431-444, 2005.
- [14] Steelant J., Dick E., Modelling of bypass transition with conditioned Navier Stokes equations coupled to an intermittency transport equation, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 23(3), 193-220, 1996.
- [15] Cho R., Chung M.K., A $k-\epsilon-\gamma$ equation turbulence model, *Journal of Fluid Mechanics*, 237, 301-322, 1992.
- [16] Dhawan, S., Narasimha, R., Some properties of boundary layer during the transition from laminar to turbulent motion, *Journal of Fluid Mechanics*, 3, 418-436, 1958.
- [17] Menter, F.R., Langtry, R.B., Likki, S.R., Suzen, Y.B., Huang, P.G., Völker, S., A correlation-based transition model using local variables: Part I-Model formulation ASME-GT2004-53452, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2004*, Vienna, Austria, 57-67, 2004.
- [18] Langtry, R.B., Menter, F.R., Likki, S.R., Suzen, Y.B., Huang, P.G., Völker, S., A correlation-based transition model using local variables: Part II-Test cases and industrial applications ASME-GT2004-53454, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2004*, Vienna, Austria, 69-79, 2004.
- [19] Langtry, R.B., Menter, F.R., Transition modeling for general CFD applications in aeronautics, *AIAA Paper 2005-0522*, 2005.
- [20] Langtry, R.B., Gola, J., Menter, F.R., Predicting 2D airfoil and 3D wind turbine rotor performance using a transition model for general CFD codes, *AIAA 2006-0395*, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 9-12 January 2006.

- [21] Menter, F.R., Langtry, R.B., Likki, S.R., Suzen, Y.B., Huang, P.G., Völker, S., A correlation-based transition model using local variables: Part I-Model formulation, *Journal of Turbomachinery*, 128(3), 413-422, 2006.
- [22] Langtry, R.B., Menter, F.R., Likki, S.R., Suzen, Y.B., Huang, P.G., Völker, S., A correlation-based transition model using local variables: Part II-Test cases and industrial applications, *Journal of Turbomachinery*, 128(3), 423-434, 2006.
- [23] Langtry, R.B., A correlation-based transition model using local variables for unstructured parallelized CFD codes, PhD thesis, Universität Stuttgart, Fakultät Maschinenbau zur Erlangung des akademischen Grades eines, 2006.
- [24] Mayle, R.E., The role of laminar-turbulent transition in gas turbine engines, *ASME Journal of Turbomachinery*, 113, 509-537, 1991.
- [25] Misaka, T., Obayashi, S., Application of local correlation-based transition model to flows around wings, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 January 2006, Reno, Nevada, AIAA 2006-918.
- [26] Kawai, S., Fujii, K., Prediction of a thin-airfoil stall phenomenon using LES/RANS hybrid methodology with compact difference scheme, 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Portland, Oregon, 28 Jun.-1 Jul. 2004.
- [27] McCullough, G.B., Gault, D.E., Boundary-layer and stalling characteristics of the NACA64A006 airfoil section, NACA Technical Note 1923, Ames Aeronautical Laboratory, Washington, August 1949.
- [28] Schook, R., Bypass Transition Experiments in Subsonic Boundary Layers, PhD Thesis, Eindhoven University, 2000.
- [29] Wilcox, D.C., Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998.

- [30] Takagi, S., Kamono, T., Rikitake, S., Wake instability behind and NACA0012 at low Reynolds numbers, Proceedings of 6th International Symposium on Advanced Fluid Information (2006), P.91-92.
- [31] Matsson, J., A student project on airfoil performance, Oral Roberts University in Tulsa, Oklahoma, 2007.
- [32] Mofid, G., Nourollahi, M., Jafari, B., Javadi, G., The effect of fluctuation flow on the EPPLER 435 and S8035 airfoils, Faculty of Mechanical Engineering, Noshirvani Institute of Technology, Mazandaran University, Babol, Iran, P.O. Box 484 (2008), pp. 159–174.
- [33] Berg, D.E., Barone, M., Aerodynamic and aeroacoustic properties of a flatback airfoil, Sandia National Laboratories Albuquerque, NM, USA, 2001.
- [34] Do, T., Chen, L., Tu, J., Numerical study of the effect of trailing edge bluntness on highly turbulent hydrofoil flow, ANZIAM J. 47 (EMAC2005), pp. C822-C839, 2007.
- [35] Ünal, U.O., Gören, Ö., Bir navier-stokes çözücü ile dairesel silindirden girdap yayılımı simülasyonu, Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu, 24-25 Aralık 2004.
- [36] Bahaj, A.S., Molland, A.F., Chaplin, J.R., Batten, W.M.J., Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank, University of Southampton, UK, 2006.
- [37] Kirke B., Developments in ducted water current turbines, Sustainable Energy Centre, University of South Australia, Mawson Lakes, SA 5095, Australia, 2005.
- [38] Myers, L., Bahaj, A.S., Wake studies of a 1/30th scale horizontal axis marine current turbine, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK, 2006.

- [39] Berntsen, G.S., Kjeldsen, M., Arndt, R.E.A., Numerical modeling of sheet and tip vortex cavitation with fluent 5, University of Minnesota, 2001.
- [40] Radespiel, R., Windte, J., Scholz, U., Numerical and experimental flow analysis of moving airfoils with laminar separation bubbles, AIAA Journal, 45(6), 1346-1356, 2007.
- [41] Duran, S., "Computer-Aided Design of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 26-66, 2005.
- [42] Yücel, B., "Performance Prediction of Horizontal Axis Wind Turbines Using Vortex Theory", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-14, 2004.
- [43] Onat, C., "Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı", Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 61-98, 2001.
- [44] Walker, J., F., Jenkins, N., "Wind Energy Technology", John Wiley & Sons, New York, 17-74, 1997.
- [45] Çiçek, A., "Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Dizayn ve İmalatı", Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 22-35, 2002.
- [46] Wilson, R., E., "Aerodynamic Behavior of Wind Turbines", Wind turbine technology fundamental concepts of wind turbine engineering, Spera, D., A., Asme Pres, New York, 215-282, 1998.
- [47] Manwell, J.F., MCGOWAN, J.G., ROGERS, A.L., Wind Energy Explained: Theory, design and application, Second Edition, Massachusetts University, USA.
- [48] Durak, M., Özer, S., Rüzgar Enerjisi: Teori ve uygulama, Şahsi yayımlanan kitap, 1.Baskı, Türkiye, 2008.
- [49] BENT, Ralph D., MCKINLEY, James L., Aircraft powerplants, 5th Ed., McGraw-Hill, New York, 1985.

- [50] Migita, S.A., Effects of low Reynolds number on the aerodynamics of micro-air vehicles, Hawaii University at Manoa Honolulu, HI 96822.
- [51] White, F.M., Akışkanlar mekaniği, Çeviri: Kadir Kırköprü, Erkan Ayder, Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 2004.
- [52] Bose, B.K., Power electronics and motor drives: advances and trends, Kindle edition, 2006.
- [53] Fluent Incorporated FLUENT Version 12, User's Guide, Ağustos 2007.
- [54] Reasor, D.A.J., LeBeau R.P.Jr., Numerical investigation of the effects of bumps on inflatable wing profiles, Kentucky University, Lexington, USA, 2007.
- [55] Riberio J.L.D., Fluctuating Lift and its Spanwise Correlation on a Circular Cylinder in a Smooth and in Turbulent Flow: A Critical Review, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1992; 40: 179-198.
- [56] Norberg C., Fluctuating lift on a circular cylinder, Journal of Fluids and Structures 2003; 17: 57-96.
- [57] Rocchi D., Zasso A., Vortex Shedding from a Circular Cylinder in a Smooth and Wired Configuration: Comparison between 3D LES Simulation and Experimental Analysis, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2002; 90: 475-489.
- [58] http://www.meteoroloji.gov.tr/2006/arastirma/files/107_tra9mart.jpg