

**İKİLİ KANAT PROFİLİNE SAHİP SU TÜRBİNİNİN ÜÇ
BOYUTLU SAYISAL VE DENEYSEL PERFORMANS
ANALİZLERİ**

**ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL AND
EXPERIMENTAL PERFORMANCE OF WATER TURBINE
WITH DOUBLE BLADE HYDROFOIL**

EMRE KOÇ

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

2012

“İkili Kanat Profiline Sahip Su Türbininin Üç Boyutlu Sayısal ve Deneysel Performans Analizleri” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 31/08/2012 tarihinde, **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Prof. Dr. Hüseyin AKÇAY

Üye (Danışman) :
Prof. Dr. Tahir YAVUZ

Üye :
Yrd. Doç. Dr. Levent ÇOLAK

ONAY

...../...../.....

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŐEKKÜR

Tez çalıőmamda bana her tűrlű konuda yardımcı olan hocam Sayın Prof. Dr. Tahir YAVUZ'a ve her zaman yanımda olan sevgili aileme teőekkűrű bir borç bilirim. Deęerli jűri űyeleri Prof. Dr. Hűseyin AKÇAY ve Yrd. Doç. Dr. Levent ÇOLAK'a tezime olan katkılarından dolayı teőekkűr ederim. Ayrıca Őęr. Gűr. Dr. Őzgűr EROL'a, Uzman Ali CAN ve Yűcel HűKELEK'e sayısal ve deneysel çalıőmalar kısmında tezime yardımcı olmalarından dolayı, TűBİTAK'a da vermiő olduęu mali destekten dolayı teőekkűr ederim.

ÖZ

İKİLİ KANAT PROFİLİNE SAHİP SU TÜRBİNİNİN ÜÇ BOYUTLU SAYISAL VE DENEYSEL PERFORMANS ANALİZLERİ

Emre KOÇ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrokinetik enerjiyi kullanarak gerek büyük akıntılardan kentlerin, gerekse küçük akıntılardan bireylerin elektrik güç gereksinimlerini karşılamak üzere alçak akıntı hızlarında verimli çalışabilecek palalı su türbini tasarım modeli geliştirilmiş ve prototip imalatı için hazır hale getirilmiştir. Hidrokinetik enerjiden elektrik üretebilecek ikili ve ayrıca standart kanat profilli türbin kanat tasarımı için iki ve üç boyutlu sayısal ve deneysel analizler yapılmıştır. İki boyutlu sayısal analizlerde GAMBIT-FLUENT programı, üç boyutlu sayısal analizlerde ANSYS 13.0 programı kullanılmıştır. Rüzgâr ve hidrokinetik türbinlerde tasarım şartı olarak C_L/C_D değerini maksimum yapan geometrik ve akım parametreleri optimum değerler olarak belirlenmiştir. C_L/C_D 'nin maksimum değerleri, ikili kanat için 12,053, standart kanat(NACA4412) için ise 21,517 olarak elde edilmiştir. Optimum hücum açıları ikili kanat için 3° , standart kanat için ise 6° olarak elde edilmiştir. Kanatlar stall konumuna ikili kanatta 30° 'den sonra, standart kanatta 16° 'den sonraki hücum açılarında ulaşmıştır. Dizaynda önemli parametre olan uç hız oranına göre, ikili kanat $\lambda=3,5$ değeri civarında 0,457 maksimum güç katsayısı değerine, standart kanat $\lambda=5,0$ değeri civarında 0,494 maksimum güç katsayısı değerine ulaşmıştır. Su kanalında yapılan deneysel çalışmalarda, ikili kanat için maksimum güç katsayısı 0,424 olarak $\lambda = 3,48$ değerinde, standart kanat için maksimum güç katsayısı 0,463 olarak $\lambda = 4,92$ değerinde elde edilmiştir. Değerlerin sayısal değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Analizlerde hidrodinamik performans açısından ikili kanadın stall konumuna gelmeden daha geniş bir uç hız oranı çalışma şartlarında çalışabileceği görülmüştür. İkili kanadın maksimum güçte çalıştığı uç hız oranının standart türbinlere göre düşük olması, türbinin düşük devirde çalışmasından dolayı daha emniyetli olması sonucuna varılmıştır. Böylece, hidrokinetik enerjiyi kullanarak gerek büyük akıntılardan kentlerin ihtiyaçlarını, gerekse küçük akıntılardan bireysel ihtiyaçları karşılayabilecek elektrik gücü elde etmek üzere küçük akıntı hızlarında verimli çalışabilecek hidrokinetik türbin modeli geliştirilmiş ve prototip imalatı için hazır hale getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrokinetik, Türbin, Akıntı, Sürdürülebilirlik

Danışman: Prof. Dr. Tahir YAVUZ

ABSTRACT

ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL AND EXPERIMENTAL PERFORMANCE OF WATER TURBINE WITH DOUBLE BLADE HYDROFOIL

Emre KOÇ

Baskent University Institute of Science Engineering

Mechanical Engineering Major Field of Study

A computer-aided optimum design-analysis tool and a model was developed that can carry out all the calculations for the design of adaptable, winged water turbines and to support design decision-making processes for both high-capacity hydro-kinetic energy conversion systems for cities and smaller-scale systems for individual power demands that may efficiently operate at low current speeds. Two and three dimensional numerical and experimental analyses were conducted on double blade and also standard hydrofoil which can be used in producing electrical power from hydrokinetic energy. FLUENT and ANSYS numerical analysis programs were used in the two and three dimensional analysis respectively. The maximum values of the C_L/C_D and the optimum design geometric and flow parameters of models were numerically obtained. The maximum values of C_L/C_D is about 12,053, for double blade hydrofoil while the NACA4412 gives the C_L/C_D values about 21,517. Optimum angles of attacks were obtained to be 3° for doubleblade hydrofoil and 6° for the standard hydrofoil. The standard hydrofoil becomes to the stall condition after the angle of attack of 16° , while double blade becomes to the stall condition after the angle of attack about 30° respectively. The maximum power coefficient of double blade hydrofoil is about 0,457 obtained at $\lambda = 3,5$ while the standard hydrofoil gives the maximum power coefficient of 0,494 at $\lambda = 5,0$. Experimental studies carried out in the towing tank give the maximum power coefficient of 0,424 at $\lambda = 3,48$ for double blade hydrofoil 0,463 at $\lambda = 4,92$ for standard hydrofoil. There are reasonable agreements between numerical and experimental values. Comparing stall conditions, the double blade hydrofoils can operate in the range of the larger tip velocity ratio. Because of the double blade hydrofoil give maximum power lower rpm, it has more safety operation condition comparing with standart hydrofoil. Hence, the hydrokinetic turbine model for both high-capacity hydrokinetic energy conversion system for cities and smaller-scale systems for individual power demands were developed, and it is ready for prototype production and testing.

Keywords: Hydro-kinetics, Turbine, Water Flow, ,Sustainable Energy

Advisor: Prof. Dr. Tahir YAVUZ

İÇİNDEKİLER

ÖZ	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	x
RESİMLER LİSTESİ	xii
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
1. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Hidrokinetik Enerji	4
1.3. Literatür Araştırması.....	8
1.4. Türkiye’de Hidrokinetik Enerji Potansiyeli.....	17
1.4.1. Türkiye akarsularının hidrokinetik enerji potansiyeli.....	18
1.4.2. Baraj atık su hidrokinetik enerji potansiyeli	21
1.4.3. Boğazlarda hidrokinetik enerji potansiyeli.....	22
1.5. Hidrokinetik Türbinler	29
1.6. Hidrokinetik Türbin Kontrolü	32
1.7. Hidrokinetik Türbinler Çevresel Etkenler	34
1.8. Amaç ve Kapsam	36
2. GEREÇ VE YÖNTEM	37
2.1. Giriş.....	37
2.2. Model Belirleme	37
2.3. Sayısal Analiz.....	37
2.3.1. İki boyutlu sayısal çalışmalar	38
2.3.2. Üç boyutlu sayısal çalışmalar	40
2.4. Deneysel Çalışmalar	43
2.4.1. Sistem elemanları	44
2.4.2. Kanat üzerindeki basınç dağılımının ölçümü	51

2.5. Hidrokinetik Potansiyel Belirleme	52
3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	54
3.1. Giriş.....	54
3.2. Sayısal Çalışmalar	54
3.2.1. İki boyutlu sayısal çalışmalar	54
3.2.2. Üç boyutlu analizler	66
3.3. Deneysel Analiz Sonuçları	93
3.3.1. İkili kanat performans karakteristikleri.....	94
3.3.2. Standart kanat, NACA 4412, performans karakteristikleri.....	95
3.4. Akarsularımızın Hidrokinetik Potansiyelleri	96
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	102
4.1. Giriş.....	102
4.2. Performans Değerlendirme	102
4.3. Akım Karakteristikleri.....	105
4.4. Üç Boyutlu Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması..	106
4.5. Sonuç.....	111
4.6. Öneriler	112
5. REFERANSLAR	114
EKLER	119
Ek-A Batı Karadeniz Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri.....	119
Ek-B Doğu Karadeniz Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri	121
Ek-C Kızılırmak Havzası Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri ...	123
Ek-D Seyhan Havzası Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri.....	125
Ek-E Fırat Dicle Havzası Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri ...	127
Ek-F Sakarya Havzası Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri	129

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Dünya Enerji Tüketimi	5
Şekil 1.2.	2010 Yılındaki Dünya Enerji Üretimi	5
Şekil 1.3.	2010 Yılındaki Dünya Yenilenebilir Enerji Üretimi	5
Şekil 1.4.	2020 Yılındaki Dünya Yenilenebilir Enerji Üretimi	6
Şekil 1.5.	2009-2015 Hidrokinetik Enerji Tahmini.....	6
Şekil 1.6.	2011 Yılı Türkiye’de Elektrik Üretimi.....	7
Şekil 1.7.	Akarsu Su Derinliği Dağılımı.....	8
Şekil 1.8.	Kanal Kesiti Boyunca Hız Dağılımı	9
Şekil 1.9.	Akarsu Yıllık Hız Karakteristiği	9
Şekil 1.10.	Yıllık Elektrik Güç Yoğunluğu Dağılımı	10
Şekil 1.11.	Verdant Power Hidrokinetik Türbinleri	12
Şekil 1.12.	1,2 MW Gücündeki Yatay Eksenli SeaGen Türbini	12
Şekil 1.13.	Akarsu Havzaları	19
Şekil 1.14.	Akarsu Akış Kesiti	19
Şekil 1.15.	Fırat Akarsu Yıllık Akım Debi Dağılımları	20
Şekil 1.16.	Büyük Melen Akarsu Yıllık Akım Debi Dağılımları	21
Şekil 1.17.	Kızılırmak Akarsu Yıllık Akım Debi Dağılımları.....	21
Şekil 1.18.	İstanbul Boğazı.....	22
Şekil 1.19.	Sarayburnu Derinlik Boyunca Akıntı Hızı Dağılımı	23
Şekil 1.20.	Sarayburnu Derinlik Boyunca Akıntı Yönü Dağılımı	24
Şekil 1.21.	İstanbul Boğazı Dip Akıntı Hızı Bölgeleri.....	24
Şekil 1.22.	İstanbul Boğazı Dip Akıntı Hızı Bölgeleri (Koordinat Numaraları).....	25
Şekil 1.23.	İstanbul Boğazı Dip Akıntı Hızının Uygun Olduğu Bölge	26
Şekil 1.24.	Çanakkale Boğazı Dip Akıntı Hızının Uygun Olduğu Bölge	26
Şekil 1.25.	İstanbul Boğazı Akış Kesitleri	27
Şekil 1.26.	Çanakkale Boğazı Akış Kesitleri.....	28
Şekil 1.27.	Su Türbini ve Elemanları	30
Şekil 1.28.	Güç Katsayısının Uç Hız Oranı ile Değişimi	31
Şekil 1.29.	NACA 63-xx Kanat Profili Aerodinamik Karakteristikleri	32
Şekil 1.30.	TGL Firmasının 1MW’lık Hidrokinetik Türbini ve Güç Eğrisi	33
Şekil 1.31.	Hidrokinetik Türbin Tarlası	35

Şekil 2.1.	İkili Kanat (a) ve Standart Kanat (b) Profilleri.....	37
Şekil 2.2.	İkili Kanat Kesiti Akış Alanı	39
Şekil 2.3.	İkili Kanat Sınır Tabaka ve Ağ Yapıları	40
Şekil 2.4.	Standart Kanat Akış Alanı	40
Şekil 2.5.	İkili Kanat Modeli	41
Şekil 2.6.	Standart Kanat Modeli.....	41
Şekil 2.7.	İkili Kanat Akış Alanı.....	42
Şekil 2.8.	Ağ Yapısı.....	42
Şekil 2.9.	Standart Kanat Akış Alanı	43
Şekil 3.1.	İkili Kanat Geometrik Boyutlar	54
Şekil 3.2.	İkili Kanat C_l , C_d - α Değişimleri.....	56
Şekil 3.3.	Kanat Açılımları ve Kuvvetler	56
Şekil 3.4.	İkili Kanat Açılımları.....	56
Şekil 3.5.	İkili Kanat Göbekten Uca Doğru Kanat Kesit Dağılımı.....	57
Şekil 3.6.	İkili Kanat Basınç Dağılımı, $Re = 3,02 \times 10^5$, $\alpha = 3^\circ$, $c_1/c_2 = 0,671$	58
Şekil 3.7.	İkili Kanat Hız Dağılımı	58
Şekil 3.8.	İkili Kanat Akım Çizgileri	58
Şekil 3.9.	İkili Kanat Yüzey Basınç Dağılımı.....	59
Şekil 3.10.	İkili Kanat Basınç Dağılımı $\alpha = 0^\circ$, $U = 0,5m/s$	60
Şekil 3.11.	İkili Kanat Basınç Dağılımı $\alpha = 3^\circ$, $U = 6,15m/s$	60
Şekil 3.12.	Standart Kanat C_L , C_D - α Değişimleri	62
Şekil 3.13.	Standart Kanat Göbekten Uca Doğru Kanat Kesit Dağılımı	63
Şekil 3.14.	Standart Kanat Basınç Dağılımı	63
Şekil 3.15.	Standart Kanat Hız Dağılımı.....	64
Şekil 3.16.	Standart Kanat Akım Çizgileri.....	64
Şekil 3.17.	Standart Kanat Yüzey Basınç Dağılımı	65
Şekil 3.18.	İkili Kanat Modeli	66
Şekil 3.19.	İkili Kanat C_p - λ Değişimi	67
Şekil 3.20.	İkili Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 3$	68
Şekil 3.21.	İkili Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 3$	69
Şekil 3.22.	İkili Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 3,5$	69
Şekil 3.23.	İkili Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 3,5$	70
Şekil 3.24.	İkili Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 4$	70

Şekil 3.25. İkili Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 4$	71
Şekil 3.26. İkili Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5$	71
Şekil 3.27. İkili Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5$	72
Şekil 3.28. İkili Kanat 0,5 m'den Alınan Kesit	73
Şekil 3.29. İkili Kanat 0,5 m Kesit Akım Çizgileri	73
Şekil 3.30. İkili Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 3$	74
Şekil 3.31. İkili Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 3,5$	74
Şekil 3.32. İkili Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 4$	75
Şekil 3.33. İkili Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 5$	75
Şekil 3.34. İkili Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 3$	76
Şekil 3.35. İkili Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 3,5$	76
Şekil 3.36. İkili Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 4$	77
Şekil 3.37. İkili Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 5$	77
Şekil 3.38. İkili Kanat Merkezden Alınan Kesit	78
Şekil 3.39. İkili Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 3$	78
Şekil 3.40. İkili Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 3,5$	79
Şekil 3.41. İkili Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 4$	79
Şekil 3.42. İkili Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 5$	80
Şekil 3.43. İkili Kanatın Arka Kısımındaki Akım Çizgileri $\lambda = 3,5$	80
Şekil 3.44. Standart Kanat Modeli	81
Şekil 3.45. Standart Kanat C_p - λ Değeri	82
Şekil 3.46. Standart Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 4$	82
Şekil 3.47. Standart Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 4$	83
Şekil 3.48. Standart Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5$	83
Şekil 3.49. Standart Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5$	84
Şekil 3.50. Standart Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5,5$	84
Şekil 3.51. Standart Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5,5$	85
Şekil 3.52. Standart Kanat Arka 0,5 m'den Alınan Kesit	86
Şekil 3.53. Standart Kanat Arka 0,5 m Kesit Akım Çizgileri	86
Şekil 3.54. Standart Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 4$	87
Şekil 3.55. Standart Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 5$	87
Şekil 3.56. Standart Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 5,5$	88
Şekil 3.57. Standart Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 4$	88

Şekil 3.58. Standart Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 5$	89
Şekil 3.59. Standart Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 5,5$	89
Şekil 3.60. Standart Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 4$	90
Şekil 3.61. Standart Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 5$	90
Şekil 3.62. Standart Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 5,5$	91
Şekil 3.63. Standart Kanat Arka Kısımındaki Akım Çizgileri $\lambda = 5$	91
Şekil 3.64. Veri Toplayıcı Tork-Zaman Değişimi, $\lambda = 3,23$	94
Şekil 3.65. Veri Toplayıcı Devir-Zaman Değişimi, $\lambda = 3,23$	94
Şekil 3.66. İkili Kanat Deneysel C_p - λ Değişimi	95
Şekil 3.67. Standart Kanat Deneysel C_p - λ Değişimi	96
Şekil 3.68. 4m Çaplı İkili Türbinin Güç Eğrisi	97
Şekil 3.69. Büyük Melen Beyler Farklı Yıllarda Debi-Ay Değişimleri	97
Şekil 3.70. Büyük Melen-Beyler Weibull Olasılık Yoğunluk Dağılımı	99
Şekil 4.1. İkili Kanat Su ve Hava Ortamında Hücüm Açısına Göre, C_L , C_D Değişimleri.....	103
Şekil 4.2. İki Boyutlu Sayısal Analiz Sonucu Oluşan Basınç Dağılımı..... $U = 6,15\text{m/s}$	105
Şekil 4.3. Üç Boyutlu Sayısal Analiz Sonucu Oluşan Kanat Kesit Basınç..... Dağılımı $r = 0,5\text{ m}$	105
Şekil 4.4. İkili Türbin Sayısal ve Deneysel C_p - λ Değişimi	107
Şekil 4.5. Standart Türbin Sayısal ve Deneysel C_p - λ Değişimi.....	109
Şekil 4.6. İki Boyutlu Sayısal Analiz Sonucu Oluşan Basınç Dağılımı..... $U = 0,5\text{ m}$	110
Şekil A.1. Büyük Melen Akarsuyu Aylık Debi Değişimi	119
Şekil A.2. Araç Çayı Aylık Debi Değişimi	119
Şekil A.3. Filyos Çayı Aylık Debi Değişimi	120
Şekil A.4. Soğanlı Çayı Aylık Debi Değişimi	120
Şekil B.1. Bolaman Çayı Aylık Debi Değişimi	121
Şekil B.2. Melet Çayı Aylık Debi Değişimi	121
Şekil B.3. Terme Çayı Aylık Debi Değişimi	121
Şekil B.4. Çamlıdere Akarsuyu Aylık Debi Değişimi	122
Şekil B.5. Fırtına Deresi Aylık Debi Değişimi	122
Şekil C.1. Kızılırmak Akarsuyu Aylık Debi Değişimi.....	123

Şekil C.2.	Tuzköyü Akarsuyu Aylık Debi Değişimi	123
Şekil C.3.	Kızılırmak Akarsuyu Aylık Debi Değişimi.....	123
Şekil C.4.	Kızılırmak Akarsuyu Aylık Debi Değişimi.....	124
Şekil C.5.	Kızılırmak Akarsuyu Aylık Debi Değişimi.....	124
Şekil D.1.	Göksu Akarsuyu Aylık Debi Değişimi	125
Şekil D.2.	Göksu Akarsuyu Aylık Debi Değişimi	125
Şekil D.3.	Seyhan Akarsuyu Aylık Debi Değişimi	125
Şekil D.4.	Seyhan Akarsuyu Aylık Debi Değişimi	126
Şekil D.5.	Zamanti Nehri Aylık Debi Değişimi	126
Şekil E.1.	Fırat Nehri Aylık Debi Değişimi.....	127
Şekil E.2.	Göksu Nehri Aylık Debi Değişimi.....	127
Şekil E.3.	Murat Nehri Aylık Debi Değişimi.....	127
Şekil E.4.	Murat Nehri Aylık Debi Değişimi.....	128
Şekil E.5.	Muzur Suyu Aylık Debi Değişimi	128
Şekil F.1.	Sakarya Nehri Aylık Debi Değişimi.....	129
Şekil F.2.	Sakarya Nehri Aylık Debi Değişimi.....	129
Şekil F.3.	Doğançay Akarsuyu Aylık Debi Değişimi	129

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Akarsu Güç Yoğunluk Dağılımları	10
Tablo 1.2. Karadeniz Bölgesi Akarsu Karakteristikleri	20
Tablo 1.3. İstanbul Boğazı Alan Başlangıç-Bitiş Koordinat Noktaları	25
Tablo 1.4. İstanbul Boğazı alan başlangıç-bitiş koordinat noktaları.....	27
Tablo 1.5. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Mukayesesi	29
Tablo 3.1. İkili Kanat Su Ortamındaki Hidrodinamik Özellikleri, $c_1/c_2 = 0,671$	55
$h/c_1 = 0,667$ ve $Re = 3,02 \times 10^5$	55
Tablo 3.2. İkili Kanat Modeli Kanat Açılı ve Kanat Veter Uzunlukları (c_1).....	57
Tablo 3.3. İkili Kanadın Hava Ortamındaki Aerodinamik Özellikleri, 12 m/s.....	61
($Re = 1.25 \times 10^5$)	61
Tablo 3.4. Standart Kanadın Su Ortamında Hidrodinamik Özellikleri.....	61
Tablo 3.5. Standart Kanat Modeli Kanat Açılı ve Kanat Veter Uzunlukları	62
Tablo 3.6. İkili Kanat Performans Değerleri $U = 2$ m/s	67
Tablo 3.7. İkili Kanat Performans Değerleri $U = 2$ m/s, $\lambda = 4,36$	68
Tablo 3.8. Standart Kanat Performans Değerleri $U = 2$ m/s	81
Tablo 3.9. İkili Kanat Deneysel Performans Değerleri $U = 2$ m/s	94
Tablo 3.10. Standart Kanat Deneysel Performans Değerleri $U = 2$ m/s	95
Tablo 3.11. Büyük Melen Beyler Debi-Ay Değişimleri	97
Tablo 3.12. Büyük Melen Beyler Debi-Hız Değişimleri.....	98
Tablo 3.13. Büyük Melen Beyler Hız-Olasılık-Güç Değerleri.....	98
Tablo 3.14. Batı Karadeniz Suları Yıllık Potansiyeli	99
Tablo 3.15. Doğu Karadeniz Suları Yıllık Potansiyeli	100
Tablo 3.16. Kızılırmak Yıllık Potansiyeli	100
Tablo 3.17. Seyhan Havzası Yıllık Potansiyeli	100
Tablo 3.18. Fırat Dicle Havzası Yıllık Potansiyeli	100
Tablo 3.19. Sakarya Yıllık Potansiyeli	100
Tablo 4.1. İkili Kanat 2 m/s Su ve 12 m/s Hava Ortamında C_L/C_D Oranları.....	103
Tablo 4.2. İkili Türbin Sayısal Analiz Performans Değerleri.....	106
Tablo 4.3. İkili Türbin Deneysel Analiz Performans Değerleri	107
Tablo 4.4. İkili Türbin Sayısal ve Deneysel C_p - λ Değişimi ve Hatalar.....	108
Tablo 4.5. İkili Türbin Sayısal ve Deneysel Analiz Karşılaştırma, $\lambda = 4,36$	108

Tablo 4.6.	Standart Türbin Sayısal Analiz Performans Değerleri	108
Tablo 4.7.	Standart Türbin Deneysel Analiz Performans Değerleri	109
Tablo 4.8.	Standart Türbin Sayısal ve Deneysel C_p - λ Değişimi ve Hatalar	110

RESİMLER LİSTESİ

Resim 2.1. İTÜ Gemi Mühendisliği Su Kanalı.....	44
Resim 2.2. Kanat Sapıyla Birlikte Kalıp Resimleri.....	45
Resim 2.3. Üretilmiş İkili Kanat Resimleri	45
Resim 2.4. İkili Kanat – Göbek Kısımına Bağlanmış Haliyle	45
Resim 2.5. Standart Kanat – Göbek Kısımına Bağlanmış Haliyle	46
Resim 2.6. Gövde Elemanları.....	46
Resim 2.7. Reosta.....	47
Resim 2.8. Veri Toplayıcı (QUANTUMX, MX840).....	47
Resim 2.9. Tüm Sistem Elemanları	48
Resim 2.10. Kanat Bağlantı Resimleri 1	48
Resim 2.11. Kanat Bağlantı Resimleri 2.....	49
Resim 2.12. Kanat Bağlantı Resimleri 3.....	49
Resim 2.13. Kanat Bağlantı Resimleri 4.....	50
Resim 2.14. Veri Akışı Diyagramı.....	50
Resim 2.15. İkili Kanat ve Basınç Ölçer	51
Resim 2.16. İkili Kanat Basınç Ölçümü	51

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

P	Akış Gücü
U	Akışkan Hızı
ρ	Yoğunluk
λ	Uç Hız Oranı
ω	Rotor Açısal Hızı
ρ	Akışkanın yoğunluğu
C_L	Kaldırma Kuvveti Katsayısı
C_D	Direnç Kuvvet Katsayısı
λ_r	Lokal Uç Hız Oranı
φ	Bağıl Akış Hızının Geliş Hızı
c	Kanat Veter Uzunluğu
C_p	Türbin Güç Katsayısı
y^+	İlk Düğümün Duvara Olan Uzaklığının Boyutsuz Hali
$U_{bağıl}$	Bağıl Akışkan Hızı
\bar{u}	Ortalama Akış Hızı
σ	Standart Sapma
k	Şekil Parametresi
c	Skala Faktörü
$p(u)$	Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
$W(u)$	Türbinin Güç Karakteristiği
c_1	Kanat Veter Uzunluğu
c_2	Kanat Veter Uzunluğu
h	Kanatlar Arası Mesafe
α	Hücum Açısı
$\theta_{p,0}$	Uç Kanat Kesit Açısı
θ_T	Kanat Burulma Açısı
dF_L	Kaldırma Kuvveti
dF_D	Sürüklenme Kuvveti
dF_N	Normal Kuvvet
dF_T	Teğetsel Kuvvet

1. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Giriş

Tükenebilen fosil yakıtların egemenliğindeki dünyamız hızla bir çevre felaketine doğru giderken, yeni, karbon ayak izi küçük, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının tümüne olan ilgi ve ihtiyaç aynı oranda artmaktadır. Bu nedenle daha önce yeterince dikkat çekmemiş olan ancak dünyamızın sahip olduğu bütün temiz enerji türlerini yeterince değerlendirme ve tüm potansiyel alternatifleri verimli ve yaygın kullanma zorunluluğu doğmuştur. Ülkemizde ve dünyada enerji darboğazına ve çevresel-iklimsel sorunlara yeni ve sürdürülebilir çözümler üretmek için birçok alternatif çalışmalar yapılmaktadır. Nitekim Başbakanlık Genelgesi ile Ülkemizde 2008 yılında başlatılmış bulunan ENVER projesi kapsamında enerji kullanımında verimliliğin yanında kullanılagelen enerjilerin yerine alternatif enerji kaynakları önceliklerden daha geniş bir seçenekler yelpazesi içerisinde devreye sokulmaya çalışılmaktadır. Enerji verimliliği bağlamında mevcut ulusal enerji kaynaklarımızın da yerli teknolojilerle tümleşmiş bir biçimde mobilize edilmesi büyük önem kazanmaktadır. Alternatif enerji kaynakları yönünden Ülkemiz oldukça şanslıdır ve bu enerji köprüsü olmak yerine enerji merkezi olmaya layık ve yetkin bir ülkedir. Bu yetkinlik yerli enerji kaynaklarımızın tümünün yerli teknolojilerle değerlendirilmesine bağlıdır. Bilinen alternatif enerji kaynaklarının yanı sıra en az rüzgar ve güneş enerjisi kadar öneme sahip olabilecek ve henüz ulusça geliştirebildiğimizi söyleyemeyeceğimiz uzun soluklu Enerji Stratejilerimize yeni bir boyut kazandırabilecek bir diğer alternatif potansiyelimiz de daha kararlı ve sürdürülebilir bir kaynak teşkil eden hidrokinetik enerji dönüşümüdür. Ülkemizde henüz olmasa bile dünyada sabit akım hızına sahip derin kanallarda çalışabilen su türbinleri (rüzgar türbini tipinde) tasarımıyla güç üretimi yapılmaktadır. Ülkemiz bu konuda oldukça şanslıdır ve kararlı (sabit) akıntı hızına sahip büyük ve uzun nehirlerimiz ve boğazlarımız bulunmaktadır.

Ülkemizin enerji bağımsızlığı ve uluslararası rekabet gücüne katkıda bulunmak üzere ve Başbakanlık DPT Müsteşarlığının Sürdürülebilir Kalkınma-Enerji Yol Haritasına paralel ve TÜBİTAK Vizyon 2023 öngörülerine uyumlu bir çalışma içerisinde, hidrokinetik enerjiyi kullanan bir türbin tasarımının yerli bilgi birikimi

oluşturarak yerli kaynaklarla ve teknolojilerle, mühendislik tasarım ve becerisi ile gerçekleşmesine yönelik bir modeli öncelikle Ülkemiz coğrafyası, iklim düzeni ve hidro potansiyeline uygun bir şekilde geliştirmek ve bu modelin prototip uygulamasına yönelik ön hazırlıkları yaparak ülkemizde de bu enerji kaynağının hem enerji hem ekserji verimli bir şekilde kullanılmasının yolunu açmaktır. Bu uygulamada en büyük sorun akarsu hidrokinetik enerjisinin serbest akışlı rejime büyük değişiklik getirmeden, çevreyi bozmadan, akarsudaki canlıların ve organizmalarının doğasını hiç bozmadan, yerel kültür miraslarını bozmadan, yerel hayat tarzını bozmadan ve yerel insanların alışkanlıklarına ve hayat tarzlarına, tarımlarına olumsuz etki getirmeden geniş bir toplumsal konsensüs oluşumu ile kullanımının yollarının ve teknolojisinin geliştirilmesi olacaktır. Örneğin bir akarsuyun serbest akışını ve faunayı çevreyi bozmak pahasına yapılacak bir gölet, önüne bir ufak çaplı da olsa baraj sistemi vb. faydadan çok fazla zarar verecek uygulamalardır. Toplum, çevre, enerji, ekonomi arasındaki dörtleme dikkat edilmeksizin sadece enerji üretmek pahasına yerel halkla karşı karşıya kalmak, çevreyle dargın kalmak mühendislik etik ve politikalarına uygun düşmeyecektir. İşte tüm bu nedenlerle tez çalışmasında üretilen sistemle serbest akışlı hidrokinetik enerjinin enerji, ekonomi, toplum, çevre dörtleminde hiçbir unsurdan taviz vermeksizin enerji bilançomuza ek yararlar sağlayabilecek bir yaklaşım izlenmiştir. Böylelikle T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının ayrıca üzerinde çalışmakta olduğu dağıtık (bölgesel) güç üretimi projelerinde de yeni ve gerçekçi, yapıcı, toplumu rahatsız etmeyici, bilakis topluma net katma değer sağlayıcı, çevreyi koruyucu yenilikçi bir seçenek oluşacaktır. Bilindiği üzere, büyük ve merkezi enerji ve güç santrallerinin yerine küçük, dağıtık enerji ve güç santrallerinin kurulumu ABD dâhil birçok ülkede öncelik kazanmıştır.

Tez çalışmasında geliştirilen sistemin muhtemel ilk kullanım alanları;

i) Doğu ve Orta Karadeniz Bölgelerinde dik eğimli, yüksek su hızlarının ve depolamanın nispeten zor olduğu akarsulardır. Akarsu akışını ve mecrasını etkilemeden sistemin optimum aralıklarla yerleştirilmesi ile sadece ekonomik değil, sosyo-politik kazanımlar da söz konusu olabilecektir. Bunlar arasında sayılabilecekler; Terme, Fatsa, Bolaman, Solaklı ve Melet çayları gibi akarsulardır. Kısacası sistemde depolamanın olmaması ve sistemin serbest akışlı türde olması

nedenleri ile çevresel etkilerin de en az düzeye indirilmesi, bu tip enerji üretim imkânlarına ilave avantajlar sağlamaktadır.

ii) Ülke genelinde özellikle yüksek debili akarsu kaynaklarından ve mevcut hidroelektrik santrallerinin türbin atık suları uygun kanallara yönlendirilmesiyle elde edilecek akım kanallarında rüzgar türbini tipinde hidrokinetik türbinler yaygın olarak kullanılarak ek enerji üretimi sağlanabilir.

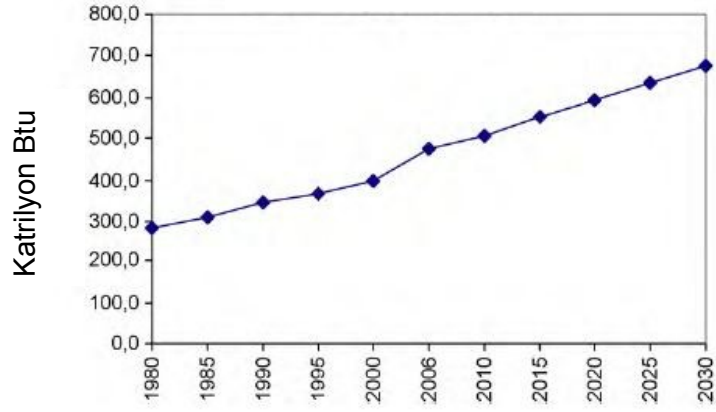
iii) Marmaray projesi kapsamında İstanbul Boğazı'nın muhtelif yerlerinde derinlik boyunca yapılan akıntı hız ölçümlerinde dip akıntıları açısından yüksek hızlara (örneğin, Sarayburnu 1,0 m/s) ulaştığı ve sabit yönlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu özellikler belirtilen türbin tasarımlarının yerleştirilmesi açısından uygun yerler olarak değerlendirilebilir.

Bu tez çalışmasında hidrokinetik enerjiyi kullanarak gerek büyük akıntılardan kentlerin ihtiyaçlarını, gerekse küçük akıntılardan bireysel ihtiyaçları karşılayabilecek mekanik gücü elde etmek üzere küçük akıntı hızlarında verimli çalışabilecek bir palalı su türbini tasarımına yönelik bilgisayar destekli optimum tasarım, analiz ve karar verme modeli geliştirilmiştir. Bu bağlamda bölgesel ve ulusal enerji ihtiyacına önemli katkıda bulunabilecek şekilde uyarlanabilir ve elektrik gücü üretiminde hidrokinetik enerjiyi verimli bir şekilde kullanabilen bir tasarımın yapılması, sayısal olarak incelenmesi ve bir kanal akımında testlerinin yapılması gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, yüksek performanslı türbin prototip imalatı için hazır hale getirilmiştir. Ayrıca geliştirilen türbin kanadı kullanarak türbin güç karakteristikleri çıkarılmış ve bu türbin kullanımı ile yıllık olarak bazı akarsu kaynaklarından elde edilebilecek elektrik enerji miktarları verilmiştir.

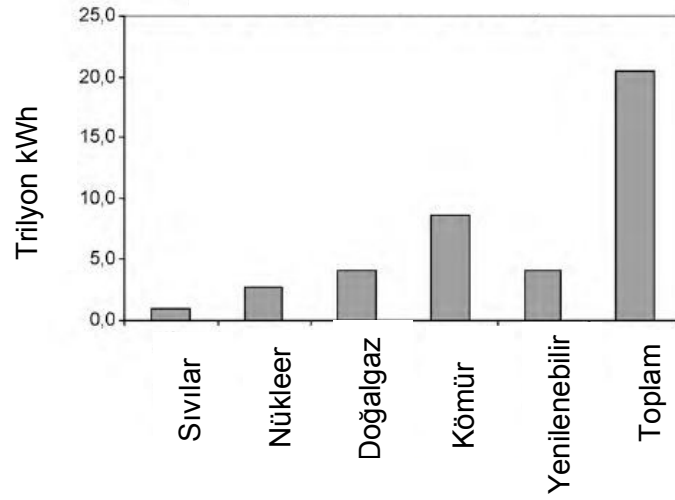
Sonuç olarak geliştirilen yüksek performanslı kanatlarla, ülkemizde hidrokinetik enerji potansiyelleri kullanılarak yıllık enerji üretimine önemli katkı yapılabileceği, aynı kanatların rüzgar türbinlerinde kullanılması ile elektrik enerjisi üretimi için gerekli olan minimum rüzgar hızının aşağılara çekilebileceği söylenebilir. Böylece ülkemizde kullanılabilir rüzgar enerji potansiyelinin buna bağlı olarak yükseleceği ifade edilebilir.

1.2. Hidrokinetik Enerji

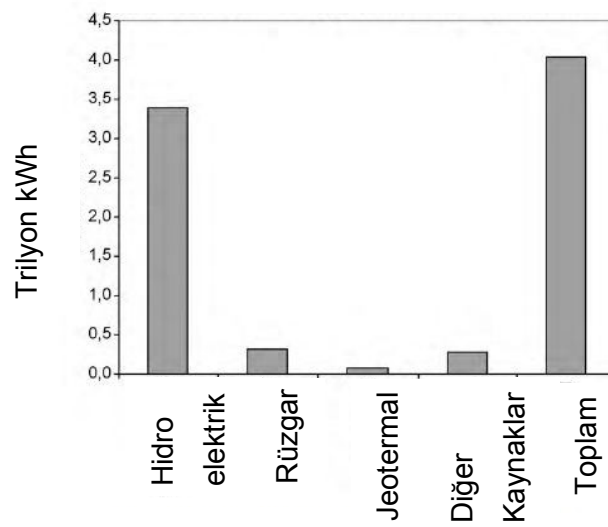
Ekonomik gelişmeler ve insanların artan ihtiyaçları enerji tüketiminin artmasındaki en önemli faktörlerdir. 2030 yılına kadar dünya enerji tüketimini gösteren grafik Şekil 1.1'de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi tüketim miktarı hızla artmaktadır. Enerji üretiminde kullanılan 2010 yılına ait çeşitli kaynaklardan enerji üretim dağılımları Şekil 1.2'de verilmiştir. Buradan görüleceği üzere üretimde büyük payı, tükenmekte olan ve aynı zamanda çevreye zarar veren kömür, doğalgaz petrol, tehlike potansiyeli yüksek aynı zamanda baştan sona dışarıya bağlı hatta atığının bertarafında bile dışa bağımlı nükleer enerji gibi kaynaklar almaktadır. Bu kaynakların çevreye verdikleri zarar ve rezervlerindeki azalma nedeniyle alternatif enerji kullanımı günümüzde kaçınılmaz ve tercih edilebilir olmuştur. 2010 yılına ait yenilenebilir enerji üretimi Şekil 1.3'de verilmiştir. Önümüzdeki yıllarda yenilenebilir enerjinin kullanımının hızlı bir şekilde artması beklenmektedir. Şekil 1.4'de ise 2020 yılına ait tahmini yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilen enerji miktarı yer almaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan hidrokinetik enerjinin 2009-2015 yılları arasındaki tahmini kapasite değerleri ise Şekil 1.5'de verilmiştir. Burada hidrokinetik enerjiden elektrik üretimi, okyanus ve denizlerde oluşan gel-git akıntılarında, sıcaklık farkı nedeniyle oluşan akıntılardan, tuzluluk farkı nedeniyle oluşan akıntılardan üretim ve nehir, akarsulardan elektrik üretimini içermektedir [1]. Pike araştırma merkezinin yayınladığı bir raporda okyanuslardan elektrik üretiminin 2025 yılında 200 GW kadar olabileceğini belirtilmiştir. Aynı rapor günümüzde yaklaşık 300 adet hidrokinetik enerji projesinin olduğunu belirtmektedir [2].



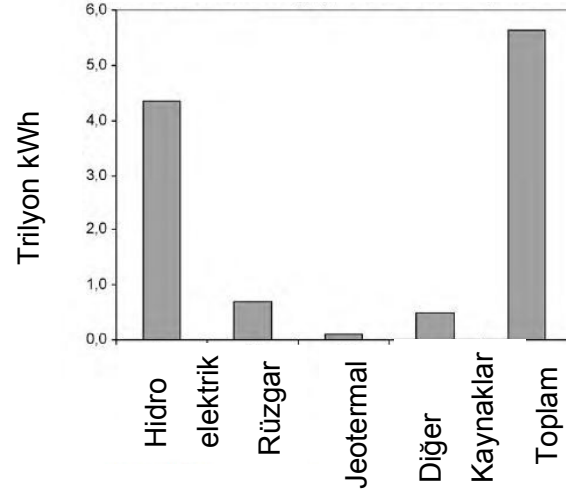
Şekil 1.1. Dünya Enerji Tüketimi [1]



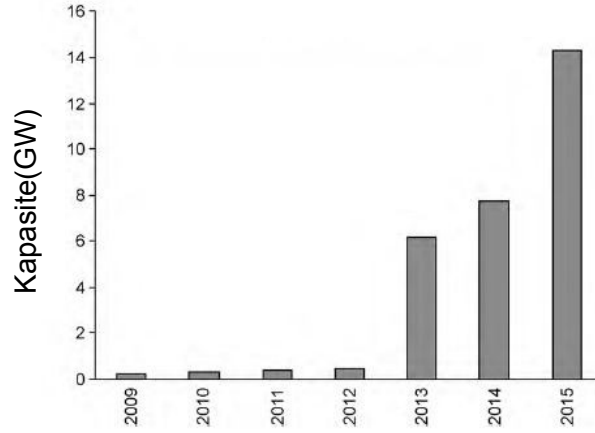
Şekil 1.2. 2010 Yılındaki Dünya Enerji Üretimi [1]



Şekil 1.3. 2010 Yılındaki Dünya Yenilenebilir Enerji Üretimi [1]



Şekil 1.4. 2020 Yılındaki Dünya Yenilenebilir Enerji Üretimi [1]



Şekil 1.5. 2009-2015 Dünya Hidrokinetik Enerji Tahmini [1]

Ülkemizde (Ocak-Kasım 2011) yılındaki çeşitli kaynaklar kullanılarak gerçekleşen elektrik üretimi Şekil 1.6'da verilmiştir. Üretim en fazla doğalgazdan sağlanırken, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim Rüzgardan %2,1, barajlı hidroelektrik santrallerde %18,8, %4,5'lik bir kısım da



Şekil 1.6. 2011 Yılı Türkiye'de Elektrik Üretimi

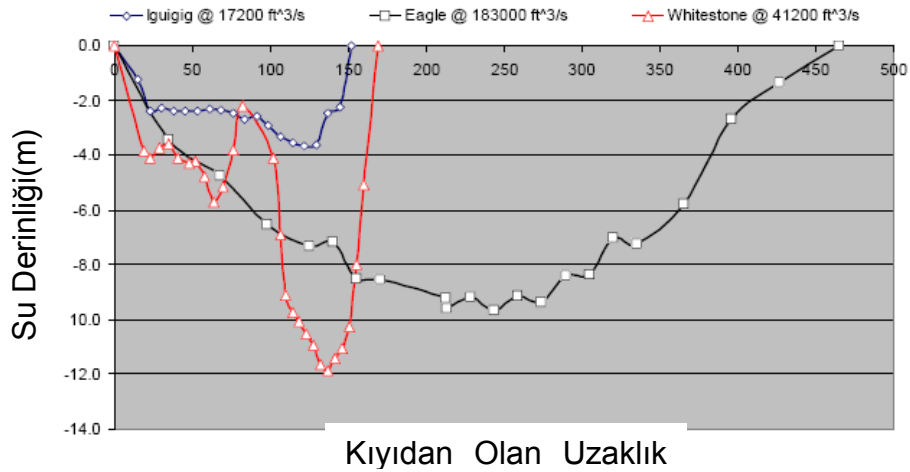
akarsulardan karşılanmaktadır. %4,5'lik kısım akarsuya set çekilip suyun cebri borulara yönlendirilip belli bir yükseklikle türbinlere gönderilmesi prensibine dayanan elektrik üretim yöntemini içermektedir. Barajlar yardımıyla üretilen %18,8'lik kısım temiz enerji olarak görünse de yatırımların büyüklüğü, baraj gölünün altında kalacak ve hiçbir şekilde ekili tarım yapılamayacak toprak ve zaman zaman tarihi kültür mirasının geri dönüşü olmadan kaybına neden olması, baraj alanında su altında kalacak tarihi ve turistik değerlerin kaybedilmesi, fay hatlarına olası olumsuz etkiler yanında zamanla baraj alanının dolması, alüvyonel doğa hareketlerini bozması nedeni ile bu tür elektrik santralleri yeterli uygunlukta bir enerji kaynağı olarak görünmemektedir. Bunun yerine çeşitli coğrafi şekillerden (nehirler, okyanuslar, boğazlar vs.) akan suyun içerdiği enerjinin yerinde (on-site) elektrik enerjisine çevrilmesi, akış alanına doğrudan erleştirilmesinin sağladığı ekonomiklik ve yatırım maliyetinin ve yerleşim süresinin çok kısa olması nedeniyle hidrokinetik enerjiden elektrik üretimi yeni bir metot olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemle elektrik üretimi yani serbest akıştan elektrik üretimi şu an için ülkemizde Şekil 1.6'dan da görüleceği gibi yoktur. Bu amaçla hazırlanmış bir enerji atlası da yoktur.

Kurulum hızının yüksek, yatırım maliyetlerinin ve çevreye olan etkilerinin düşük olması nedeni ile hidrokinetik enerji üretim tesisleri üzerine yapılmakta olan araştırmalar ve yatırımlar artmıştır. Hidrokinetik enerji üretim tesisleri dünya üzerindeki akıntıları kullanarak enerji üretirler. Bu akıntıların kaynağı gel git akıntıları gibi zamana bağlı, okyanus akıntıları gibi sürekli veya nehir akıntıları gibi

dönemsel akıntılar olabilir. Bu akıntılardan başlıcaları Kuzey Denizi, Manş Denizi, Baltık Denizi, Meksika Körfezi akıntıları gibi deniz akıntıları ile Cebelitarık, Messina, Boğaziçi, Çanakkale gibi boğaz akıntıları ve Amazon ve Rio de Plata nehirleri gibi nehir akıntıları sayılabilir. Akıntıların enerji potansiyelleri çok yüksek seviyelerdedir. Sadece Amerika Birleşik Devletlerinin okyanus akıntılarının enerji potansiyelinin 5000 GW, nehir potansiyelinin ise 3400 MW olduğu tahmin edilmektedir.

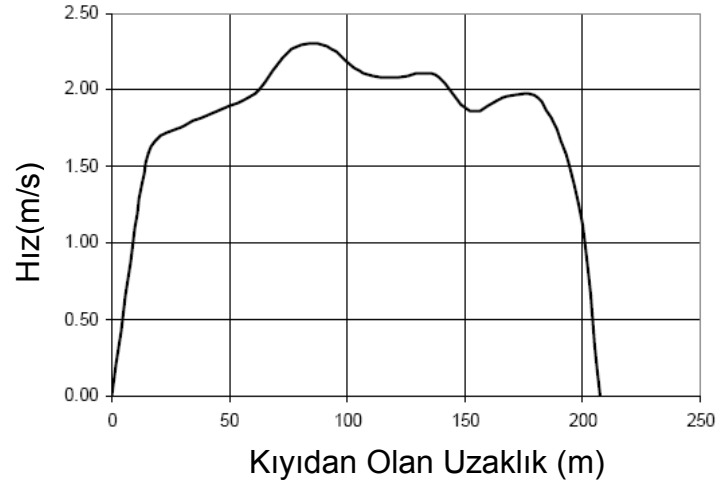
1.3. Literatür Araştırması

Sürekli akıntılı su akımlarında enerji üretilmesi ile ilgili olarak literatürde fazla bilgi bulunmamakla beraber bu alanda son yıllarda artan yoğunlukta çalışmalar yapılmaktadır. Literatüre bakıldığında daha çok dalga enerjisi kullanılarak enerji üretim çalışmaları yapıldığı gözlenmiştir [3; 4; 5]. ABD’de Alaska bölgesinde mevcut akarsular kullanılarak enerji üretimi ile ilgili yapılan çalışmalarda 6 akarsudan sadece üçü uygun görülmüştür [6]. Uygun görülen akarsuların akım karakteristikleri aşağıda verilmiştir. Şekil 1.7’de akarsuların derinlik ve genişlik, Şekil 1.8’de hız profili ve Şekil 1.9’da ise yıl boyunca hız değişimi verilmiştir.

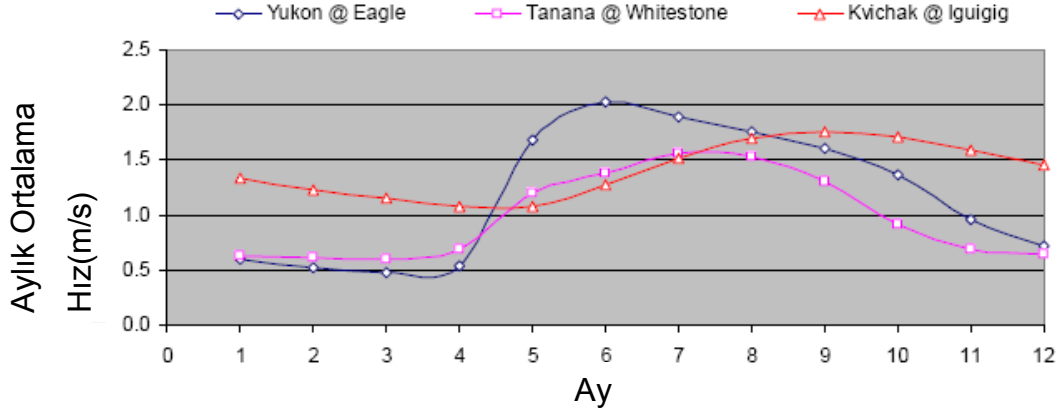


Şekil 1.7. Akarsu Su Derinliği Dağılımı [6]

Bir kanal kesiti boyunca hız dağılımını aşağıda verilmiştir.

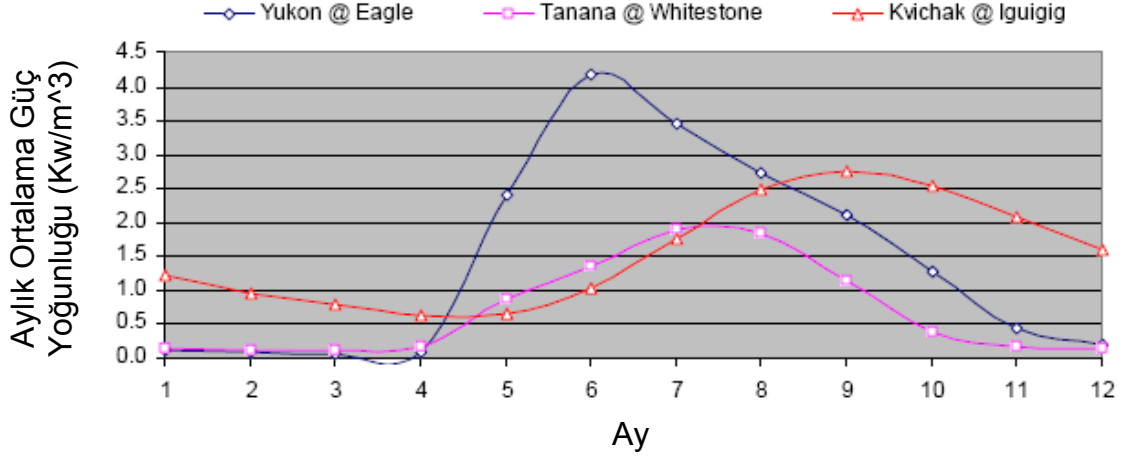


Şekil 1.8. Kanal Kesiti Boyunca Hız Dağılımı



Şekil 1.9. Akarsu Yıllık Hız Karakteristiği [6]

Uygun görülen üç akarsuyun derinlikleri 4 m, 12 m ve 10 m olup yıllık (12 aylık) akım karakteristikleri şekilde görüldüğü gibi hız dağılımları 0,5 m/s ile 2 m/s arasında değişmektedir. Bu akarsularda üretilebilecek elektrik enerjisi güç yoğunluk dağılımı da aşağıda Şekil 1.10'da verilmektedir. Güç yoğunluğu hızın küpü ile orantılı olup, şekilden görüldüğü gibi yaz aylarında maksimum olmaktadır.



Şekil 1.10. Yıllık Elektrik Güç Yoğunluğu Dağılımı [6]

Yapılan çalışmalarda 6 bölgedeki akarsuların güç yoğunluğu tablo halinde aşağıda verilmiştir.

Tablo 1.1. Akarsu Güç Yoğunluk Dağılımları [6]

	Unit	Yukon @ Pilot	Yukon @ Eagle	Tanana @ Nenana (1)	Tanana @ Big Delta	Taku @ Juneau	Kvichak @ Iguigig
Velocities							
Average Velocity	m/s	0.49	1.18	0.92	0.98	0.92	1.41
Average Mid-Channel Velocity	m/s	0.64	1.54	1.19	1.28	1.20	1.84
Power							
X-Section Average Power Density	kW/m ²	0.15	1.45	0.80	0.67	0.53	1.48
Mid-Stream Average Power Density	kW/m ²	0.32	3.20	1.75	1.48	1.16	3.24
Average Total Kinetic Power	kW	1,675	4,601	694	762	482	719
Dimensions (During Typical Discharge Conditions)							
Discharge Rate for Referenced Dimensions	m ³ /s	6,201	5,182	1,724	1,167	1,809	487
Cross-Section	m ²	11,393	3,162	870	1,132	911	365
Width	m	808	465	256	169	207	152
Average Depth	m	14.10	6.80	3.40	6.70	4.40	2.40
Deepest Point	m	18.60	9.70	4.20	11.90	5.60	3.70
Discharge							
Average	m ³ /s	3,989	2,363	691	421	388	507
Maximum	m ³ /s	33,414	15,433	5,182	1,767	3,200	1,277
Minimum	m ³ /s	204	204	113	105	20	181

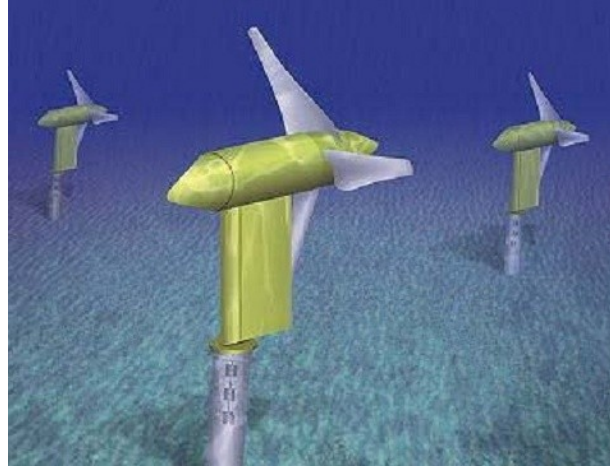
Tablolardan da görüleceği gibi akarsularda 0,49 m/s ve 0,64 m/s akıntı hızlarında enerji üretilebilmektedir. Ayrıca, Quispe'nin yaptığı deneysel bir çalışmada 1 m/s'lik sürekli bir akım hızında 300 W'lık bir güç elde edilmiştir [7].

Hidrokinetik türbinlerin tasarımları esnasında karşılaşılan en önemli sorun, düşük hız değerine sahip akıntılardan enerjiyi elde edebilecek kanat yapısının bulunmasıdır. Tasarımı yapılan kanadın kaldırma katsayısının yüksek olmasının yanı sıra türbin akıntı hızlarında kavitasyona neden olmaması da türbinin dayanıklılığının sağlanması açısından önemlidir.

Pek çok hidrokinetik türbinde rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat yapıları kullanılmaktadır. Bu sistemler sadece yatay değil aynı zamanda dikey eksenli türbinlerin de yapımında kullanılmaktadır.

Wells türbinlerinde suyun iki yönde yer değiştirmesi halinde aynı yönde dönebilmesi amacıyla Dhanasekeran ve Govardhan [8] NACA 0021 tipi kanat yapısını kullanırken, Thakker vd. [9] CA9 tipi kanat yapısını, Kim vd. [10] ise NACA 0020 tipi kanat yapısını kullanmışlardır. Wells tipi türbinler gibi akışkanın salınmasından enerji elde edilmesini sağlayan türbin sistemlerinden birisi de dikey eksenli Darrieus tipi türbin sistemidir. Li ve Calisal'ın yapmış oldukları çalışmada [11] bu türbin sistemini denemişlerdir. Bu çalışmada NACA 0012 ve silindirik kanat yapılarının kullanıldığı üç kanatlı Darrieus türbini kullanılmıştır.

Şekil 1.11 ve Şekil 1.12'de örnek olarak verilen yatay eksenli türbinlerde ise kanat yapıları daha karmaşıktır. Akıntı türbinlerinin (Marine Current Turbines -MCT-) kanat yapıları dikey türbin sistemlerinden daha karmaşıktır. Bu tip hidrokinetik sistemlerde de Rüzgar türbinlerinin kanat yapılarının benzerleri kullanılmaktadır. Batten vd. [12]'nin yapmış olduğu çalışmada NACA 63-8xx serisinin değişik modelleri kullanılmıştır. Bu profiller NACA 63-812, 63-815, 63-818, 63-821 ve 63-824'dür. Myers ve Bahaj'ın [13] yapmış olduğu bir diğer çalışmada ise yapılmış olan akıntı türbininde NACA 44xx serisi kanat profili kullanılmıştır.



Şekil 1.11. Verdant Power Hidrokinetik Türbinleri



Şekil 1.12. 1,2 MW Gücündeki Yatay Eksenli SeaGen Türbini

Son yıllarda hidrokinetik enerji ve dönüşümleri konusunda yapılan çalışmalar özetlenirse;

Khan vd. [14] çalışmalarında nehir akıntılarında elektrik üreten sistemler hakkında literatür çalışmalarına, sistemlerin çalışmalarında yaşanan zorluklara, rüzgar türbinlerine ve barajlı hidro enerji santrallerine göre avantajları gibi konulara yer vermişlerdir.

Yao vd. [15] çalışmalarında sayısal olarak NACA 0018 kanat profilini hava ortamında analiz etmişlerdir. Çalışmada kanadın kaldırma kuvvet katsayıları ve itki kuvvet katsayıları farklı türbülans modellerinde incelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anyi ve Kirke [16] çalışmalarında hidrokinetik enerjiden elektrik üreten bir türbinin kanat tasarımına ve üretim tekniklerine yer vermişlerdir.

Güney [17] çalışmasında hidrokinetik potansiyellere, hidrokinetik türbin teorisine ve türbin performansına yer vermiştir.

Anyi ve Kirke [18] çalışmalarında küçük ölçekli yatay eksenli hidrokinetik türbinlerin çalışmaları sırasında akıntı içindeki türbine zarar verebilecek moloz vb. cisimlerin sisteme etkenlerini ve bu zarar verici etkilerin nasıl engellenebileceğine yer vermişlerdir.

Zabihian ve Fung [19] çalışmalarında dalga enerjisi ve gelgit enerjisi üzerine bilgiler vermişlerdir. İran'ın bu enerjiler açısından potansiyellerini incelemişlerdir.

Shields vd. [20] çalışmalarında su akıntılarında elektrik üreten sistemlerin kuruldukları yerlerdeki su hayatına etkilerini incelemişlerdir.

Bahaj ve Myers [21] çalışmalarında deniz akıntılarında elektrik üretiminde türbinlerin buldukları su ortamından dolayı karşılaştıkları kavitasyon, korozyon, bakım ve suyun kanatlar üzerine uyguladığı yüksek kuvvetlerden dolayı tasarım zorluğuna ve sorunlarına yer vermişlerdir.

Myers ve Bahaj [22] çalışmalarında su ortamında iki sıra halinde dizilmiş türbinlerin birbirlerine olan akış etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonunda türbinlerin arkasında oluşan girdap etkisinden arkada bulunan türbinin en az etkilenmesi için türbinlerin dizilişlerini optimum hale getirmişlerdir.

Lago vd. [23] çalışmalarında ayrıntılı bir şekilde hidrokinetik enerji üretiminde kullanılan yatay eksenli, dikey eksenli, kanallı kanalsız türbinlerin ve diğer hidrokinetik türbin sistemlerine yer vermişlerdir.

Ameku vd. [24] çalışmalarında kanat uç hız oranı 3 olacak şekilde tasarlanan 3kW'lık yatay eksenli Rüzgar türbininin performans karakteristiklerini belirlemişlerdir.

Liu vd. [25] çalışmalarında Çin'de oluşan gelgit akıntılarında elektrik üretimi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada Çin'de kullanılan mevcut sistemlere ve gelecekteki enerji kullanımına bakılmıştır.

Wang vd. [26] çalışmalarında sayısal olarak kanallı tipteki bir türbin için türbin performansını maksimum yapan optimum kanal tasarımına yer vermişlerdir.

Güney ve Kaygusuz [27] çalışmalarında hidrokinetik enerji sistemlerini incelemişlerdir. Çalışmalarda hidrokinetik enerji kullanımı, hidrokinetik türbin tipleri, türbinlerin çevresel etkileri gibi konulara yer vermişlerdir.

Khan vd. [28] çalışmalarında yatay ve dikey eksenli hidrokinetik türbinlerin literatürdeki örneklerine yer vermişlerdir. Türbinlerin akış alanına yerleştirilme şekilleri, kanallı tipteki türbinlerin kanal yapıları gibi konulara yer vermişlerdir.

Bahaj vd. [29] çalışmalarında 80 cm çapında bir hidrokinetik türbini suyun hareketli olup türbinin sabit kaldığı bir kavitasyon tüneline ve suyun hareketsiz olup türbinin monte edildiği aracın hareket ettiği bir kanalda kanadın performans testlerini yapmışlardır. Çalışmada farklı akış hızlarında ve kanat açılarında güç ve itki katsayıları incelenmiştir. Farklı devir sayıları türbin kanat yüzeyinde kavitasyon oluşup oluşmadığı bir kamera aracılığıyla incelenmiştir.

Bahaj vd. [30] çalışmalarında 80 cm çapındaki bir hidrokinetik türbinin deneysel çalışmalarda elde edilen performans karakteristikleriyle iki farklı sayısal program kullanılarak elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır.

Ponta ve Jacovkis [31] çalışmalarında deniz akıntısından elektrik üreten kanallı tipteki türbinin kanal dizaynı üzerine çalışmışlardır.

Yang ve Lawn [32] dikey eksenli bir gelgit akıntısı türbininin deneysel olarak kanat performans karakteristiklerini belirlemişlerdir. Çalışmada ayrıca iki boyutlu sayısal çalışmalarla kanatlar üzerindeki hız ve basınç dağılımlarını incelemişlerdir.

Gaden ve Bibeau [33] çalışmalarında sayısal olarak hidrokinetik türbinin performansını ve türbin performansını ve ömrünü arttırmak için difüzör kanal kullanımını incelemişlerdir.

Batten vd. [34] çalışmalarında rüzgar türbinlerinde de kullanılan NACA 63-2xx ve NACA 63- 8xx hidrokinetik türbin kanat profilleri için farklı kamburluklarda kanatların kaldırma, itki kuvvetleri, kavitasyon varlığı, bu kanat profilleri kullanılarak oluşturulan türbinlerin performans karakteristikleri üzerine çalışmışlardır.

Myers ve Bahaj [35] çalışmalarında 0,4 m çapında bir hidrokinetik türbininin performans ve girdap karakteristikleri üzerine çalışmışlardır.

Myers ve Bahaj [36] çalışmalarında 0,4 m çapında bir hidrokinetik türbini bir dolanı kanalında denemişlerdir. Çalışmada farklı akış hızlarında, farklı kanat ve yönlendirme açılarında türbinin güç değerleri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar bilgisayar ortamında yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Jo vd. [37] çalışmalarında gelgit akıntılarında çalışmak üzere S814 kanat tipi kullanılarak modeli oluşturulmuş bir türbinin ANSYS 13.0 programında 1m/s hız değerinde analizini yapmışlardır. Analizde türbinin güç değerlerini, kanatlar üzerindeki basınç dağılımlarını, türbülans yoğunlukları gibi türbin karakteristiklerine yer vermişlerdir.

Kang vd. [38] çalışmalarında gövde kanat ve kanatlardan oluşan sistemin ve sadece kanatların bulunduğu akışı türbinin arkasından alan bir hidrokinetik türbinin bilgisayar destekli akış analizini yapmışlardır. Analizde farklı devir sayılarında kanat uçlarında oluşan girdaplar ve türbinden elde edilen güç değerleri incelenmiştir. Komple sistemi içeren analizlerle sadece türbin kanadının olduğu analiz sonuçlarından türbin performansının yalnızca türbin kanat yapısına bağlı olduğu, kanatlar dışındaki elemanların performansı etkilemedikleri sonucuna varmışlardır.

Goundar vd. [39] çalışmalarında HF-Sx kanadının sayısal ve deneysel olarak akış karakteristiğini incelemişlerdir. Bu kanat profilini hidrokinetik türbinlerde kullanılan farklı kanat profilleriyle karşılaştırmışlardır.

Singh vd. [40] çalışmalarında küçük ölçekli rüzgar türbinleri için kanat tasarımı üzerine çalışmışlardır. Çalışmada farklı tipteki kanat kesitlerinin kaldırma, itki, basınç katsayıları karşılaştırılmış ayrıca AF300 kanat profili sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda kanat üzerindeki ayrılma noktaları, türbülans şiddetleri gibi akış özellikleri incelenmiş deneysel olarak kaldırma ve itki kuvvetleri dinamometreyle ölçülmüş, kanat yüzeyindeki akış duman testiyle incelenmiştir.

Thumthae ve Chitsomboon [41] çalışmalarında burulma olmayan yatay eksenli bir Rüzgar türbin kanadında sayısal analizle türbinden maksimum güç elde etmek için gerekli optimum hücum açısını bulmuşlardır.

Amano ve Malloy [42] bir rüzgar türbini kanadının tasarımını yapıp modelini oluşturmuşlar ve bu modelin HAD analizlerini yapmışlardır.

Ahmed [43] yaptığı çalışmada Rüzgar ve gelgit enerjisinden elektrik üreten türbinlerde kullanılmak üzere farklı ailelerden kanatların farklı Reynolds sayılarında kaldırma, itki kuvvetleri, basınç dağılımları gibi performans karakteristikleri üzerine çalışmıştır.

WATA vd. [44] çalışmalarında küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere farklı tipte kanat profillerini inceleyip kendi kanat tasarımlarını yapmışlardır. Bu kanadın XFOIL programıyla ve deneysel testlerle akış karakteristiklerini belirlemişlerdir.

Tez çalışması kapsamında, ülkemizde sabit akımlı kanallarda ve boğazlarda, hız sınırları 0.5 m/s ile 4 m/s arasında değişen akış hızlarında enerji üretiminde kullanılabilecek en uygun kanat profilleri çalışması yapılmıştır. Kullanıla gelen kanat profilleri yerine ikili kanatlı hidrofoil(double blade hydrofoil) kullanılarak, daha küçük akıntı hızlarında ekonomik olarak enerji üretebileceği öngörüsü ile, bu

çalışmada ikili kanat profiline sahip bir hidrofoilin performansı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ülkemizde hidrokinetik enerji potansiyelleri, akarsular, HES atık suları ve boğaz akıntıları kullanılarak önemli bir yenilenebilir enerji sağlanabilecektir.

1.4. Türkiye’de Hidrokinetik Enerji Potansiyeli

Dünyada ve Ülkemizde enerji sorunu yıldan yıla büyümekte ülkeler enerji sorununu çözmek için çareler aramaktadır. Enerji sorununun sürdürülebilir çözümünün anahtarı, enerji verimliliği ve tasarrufunun yanında küçük ölçekli hidrolik, güneş, jeotermal, biyokütle ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji potansiyelimizin kullanımını teşvik etmektir. Ülkemizde, yenilenebilir enerji kaynaklarımız enerji ihtiyacımızın önemli bir bölümünü karşılayabilecek potansiyele sahip olmasına rağmen, bu kaynaklarımız ya kullanılmamakta ya da potansiyelin çok altında değerlendirilmektedir. Enerji talebi 168 milyar kWh düzeyinde olan Türkiye enerji tüketimi içinde fosil yakıt kullanımı %90 dolayındadır ve enerjisinin %74 ünü ithal etmektedir. Türkiye enerji tüketiminin %38’i petrol, %27’si kömür, %23’ü doğal gaz ve %12’si yenilenebilir enerji kaynaklarından (hidrolik, güneş ve Rüzgar) karşılamaktadır. Burada üzerinde durulması gereken nokta hidrolik enerjinin %12’lik dilim içersinde çok önemli bir yer tuttuğu ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma oranının diğer ülkelere oranla çok az olduğudur. Türkiye 128 Milyar kW-h olan hidrolik güç potansiyelinin %65’ini kullanırken, 10000 MW ekonomik rüzgar enerjisi potansiyelimizin %99’unu ve mevcut jeotermal kaynaklarımızın %97’sini ve ülkemizin her yerinde bulunan güneş enerjisini hemen hiç kullanmayan bir ülke durumundadır.

Çok acı bir gerçektir ki ülkemizin esas rüzgar enerjisi kıyı ötesinde (off-shore) olmasına rağmen Türkiye’nin kıyı ötesi atlası yoktur. Akarsularımızın serbest akış hidrokinetik atlası da yoktur.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarımız enerji ihtiyacımızın önemli bir bölümünü karşılayabilecek potansiyele sahip olmasına rağmen, bu kaynaklarımız ya kullanılmamakta ya da potansiyelin çok altında değerlendirilmektedir. Hidrolik enerjimizin değerlendirilmesi konusunda ilave

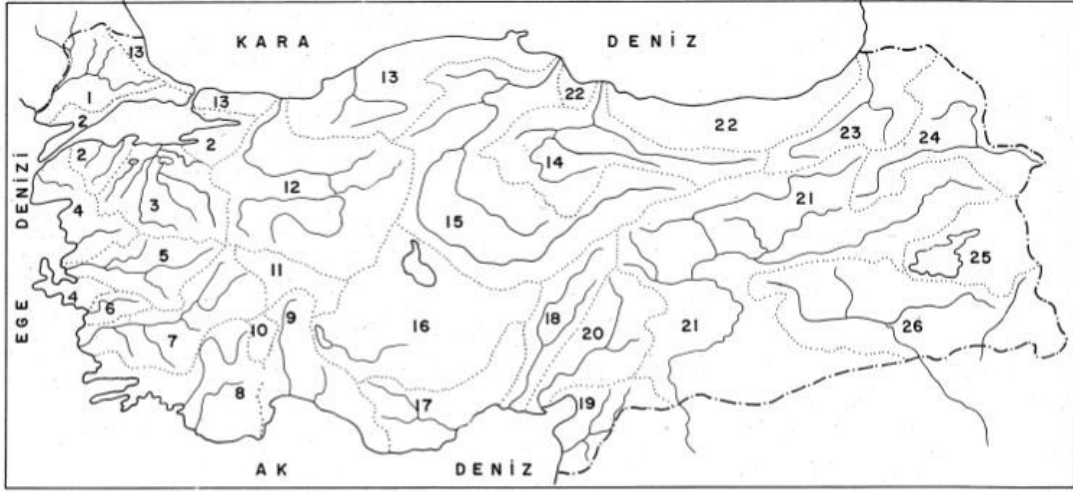
hidrolik kaynaklar, hidrokinetik enerji gibi, sürekli akış halindeki ırmaklar ve boğaz akıntıları gibi, ek kaynakların değerlendirilmeye alınma zamanının geldiği aşikârdır.

Enerji kaynakları içerisinde en eski olan kaynak sudur. Eski çağlarda değirmen gibi işletmelerin enerji ihtiyaçlarını karşılamakta kullanılan bu enerji kaynağı günümüzde barajlar yardımı ile elektrik enerjisi elde etmekte kullanılmaktadır. Barajların yardımı ile üretilmekte olan bu enerji için gereken yatırımların büyüklüğü ve bu yatırımların yapılabileceği yerlerin darlığı ve gerekse baraj gölünün altında kalacak ve hiçbir şekilde ekili tarım yapılamayacak toprak kaybına sebep olacak aynı zamanda baraj alanında su altında kalacak tarihi ve turistik değerlerin kaybedilmesi nedeni ile baraj yardımı ile elde edilen hidroelektrik enerji bu görüşler çerçevesinde günümüz enerji ihtiyaçlarını karşılayacak yeterli uygunluğa sahip bir enerji kaynağı olarak görünmemektedir. Bunun yerine çeşitli coğrafi şekillerden (nehirler, okyanuslar, boğazlar, vs.) akan suyun ihtiva ettiği enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesi hem daha ekonomik hem de yatırım maliyeti ve zamanı az metotlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu konuda şu ana kadar pek çok çalışma yapılmış olmasına karşın hidrokinetik enerjiden elektrik enerjisi elde edilmesi konusu diğer enerji elde etme metotlarının gölgesinde kaldığından dolayı bu tip enerji kaynakları yeni kaynaklar olarak görülebilir. Ülkemizin hidrokinetik enerji potansiyeli akarsular, baraj atık suları ve boğaz akıntılarında oluşmaktadır.

1.4.1. Türkiye akarsularının hidrokinetik enerji potansiyeli

Ülkemiz genelinde Şekil 1.13'de görünen toplam yirmi altı havza için akarsuların hidrokinetik enerji potansiyelleri incelenmiştir. Tez çalışmasında oluşturulan sistemin muhtemel ilk kullanım alanları dik eğimli, yüksek su hızlarının ve depolamanın nispeten zor olduğu Karadeniz havzasındaki sulardır. Karadeniz havzası dışında özellikle depolanabilir olan fakat aylara göre dağılımı daha düzenli ve yüksek debili Güneydoğu Anadolu'da (Dicle ve Fırat havzaları) da sistemin kullanımı oldukça uygundur.

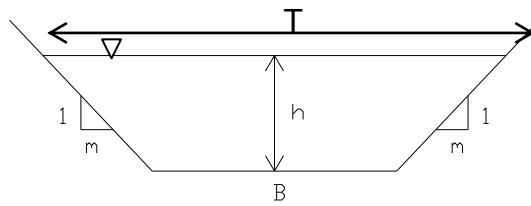
HAVZALARI GÖSTEREN ANAHTAR HARİTA



Şekil 1.13. Akarsu Havzaları

Akarsu hidrokinetik enerji potansiyeli incelemelerinde, türbin dizayn referans hızı olarak 2 m/s alınmıştır. Bunun sağlanması için gerekli minimum debi $30 \text{ m}^3/\text{s}$ olmak üzere (16 m^2 akım kesitinde sağlanabilen referans hız yaklaşık olarak 2 m/s kabul edilerek) değerlendirme yapılmıştır.

Akarsu akış kesitlerinin, Trapez kesit için $A = h(B+1.5h)$ Üçgen kesit için ($B = 0$), $A = 1,5h^2$



Şekil 1.14. Akarsu Akış Kesiti

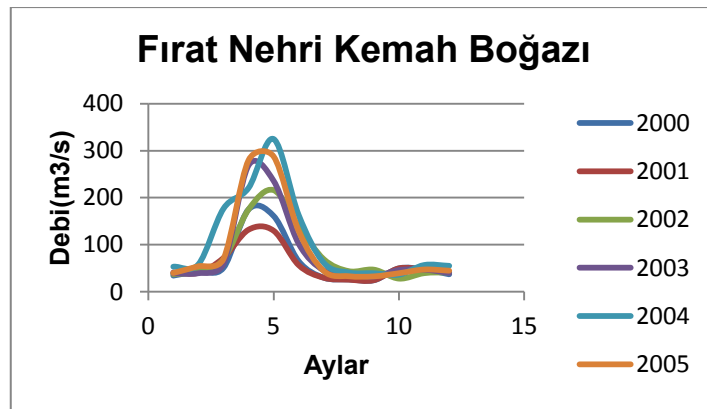
formunda olduğu kabul edilerek Karadeniz Bölgesindeki akarsular için yapılan değerlendirme sonuçları Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2. Karadeniz Bölgesi Akarsu Karakteristikleri

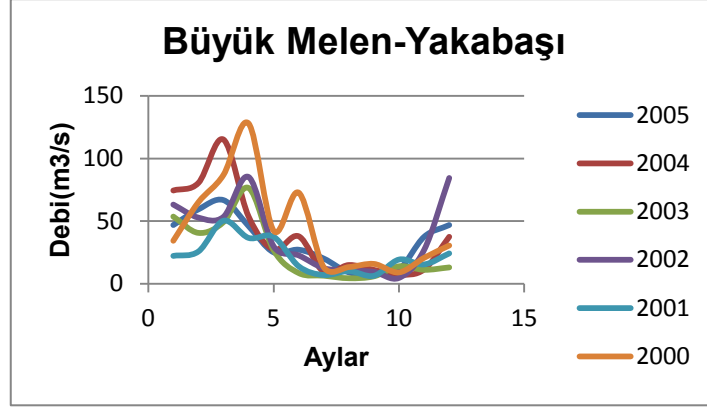
AGİ No	Akarsu	Debi (m ³ /s)	Derinlik (m)	Ort. Hız (m/s)
2201	Harşit Suyu	26,5	3,30	1,63
2204	Taşlıdere	21,1	3,30	1,30
2207	İyidere	20,6	4,00	1,16
2218	İyidere	27,8	3,30	0,90
2220	Harşit Çayı	31,1	3,30	1,00
2231	Melet Çayı	23,7	3,30	0,90
2232	Fırtına Deresi	29	3,30	0,90
2247	Melet Çayı	28,2	3,30	0,90

Tablo incelendiğinde akarsuların yukarıda belirtilen kriterler açısından hidrokinetik enerji kullanımına uygun olmadığı söylenebilir. Ancak, uygun türbin kanatları geliştirilmesiyle yukarıda verilen düşük akıntı hızlarında da ekonomik olarak verimli enerji üretilebileceği söylenebilir. Ayrıca, referanslara bakıldığında minimum 0,5 m/s akıntı hızlarında da enerji üretimi yapılabildiği görülmelidir.

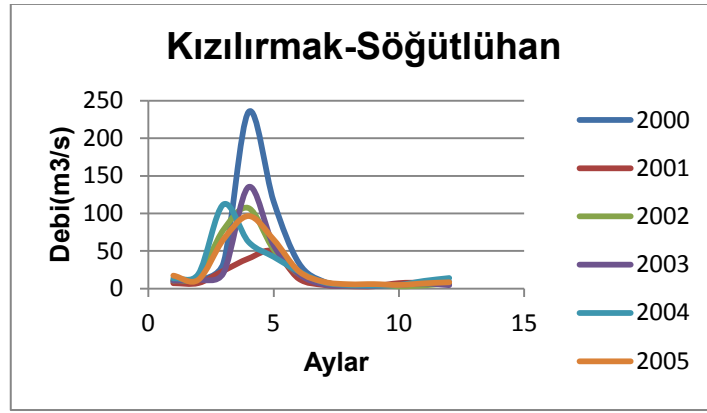
Diğer bölgelerimizdeki akarsular incelendiğinde, hidrokinetik enerji kullanımı için uygun akarsular araştırılırken, akarsuyun maksimum ve minimum debi değerleri, yıllara ve aylara göre değişimleri incelenmiştir. İstatistiksel değerler 2000-2005 altı yıllık bir dönem için EİE' nin "Su Akımları Aylık Ortalamaları" Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Hidrolik Etütler Dairesi Başkanlığı'nın "Su Akımları Aylık Ortalamaları [2000-2005] Eylül 2008" yayınından alınmıştır [45]. Örnek olarak alınan ırmakların aylara göre debi değişimleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 1.15. Fırat Akarsu Yıllık Akım Debi Dağılımları



Şekil 1.16. Büyük Melen Akarsu Yıllık Akım Debi Dağılımları



Şekil 1.17. Kızılırmak Akarsu Yıllık Akım Debi Dağılımları

Ülkemizdeki akarsuların yıllık debi değerlendirmeleri incelendiğinde(Ek-A;F), debi değerlerinin yılın belirli aylarında $30 \text{ m}^3/\text{s}$ değerinin üstünde kaldığı akarsularımızın mevcut olduğu ve dolayısıyla geliştirilecek hidrokinetik türbin ile yılın uzun bir döneminde akarsularımızdan önemli ölçülerde elektrik enerjisi üretilebileceği görülmektedir.

1.4.2. Baraj atık su hidrokinetik enerji potansiyeli

Ülkemizde çok sayıda büyük kapasiteli barajlı HES sistemi kullanılarak enerji üretilmektedir. Enerji üreten türbinlerden atık su olarak vadiye bırakılan suların, oldukça yüksek debide olduğu bilinmektedir. Bu yüksek debili sular sabit kesitli bir kanala yönlendirilerek oldukça yüksek hızlı, düzgün akımlı hidrokinetik kanal oluşturularak, birden çok türbin (türbin çiftliğe) yerleştirilmesiyle ekstra önemli ölçüde elektrik enerjisi üretimi sağlanabilir.

1.4.3. Boğazlarda hidrokinetik enerji potansiyeli



Şekil 1.18. İstanbul Boğazı

Marmara Denizi, Akdeniz ve Karadeniz arasında yer alan oldukça küçük (yaklaşık 70 kmx250 km boyutlarında, 11,500 m² yüzey alanına ve 1390 m maksimum derinliğe sahip) bir basendir.

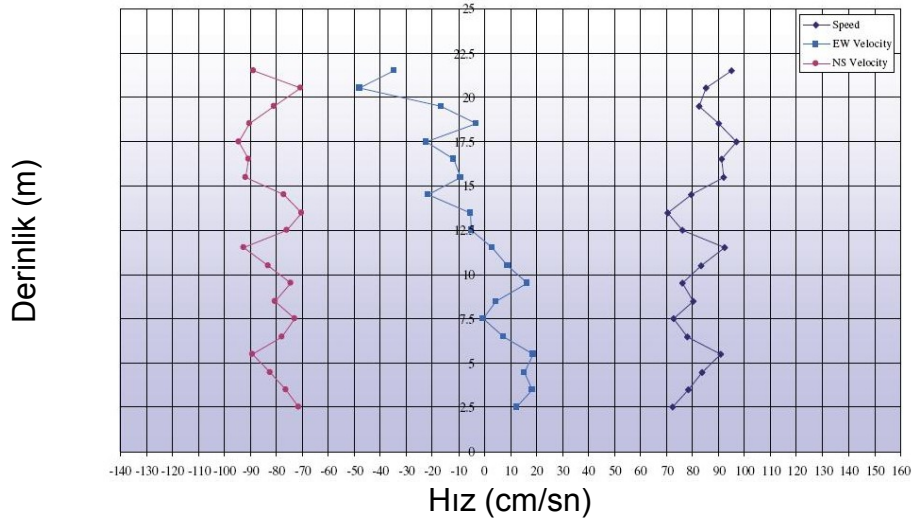
Karadeniz suları Marmara Denizi'ne İstanbul Boğazı üst akıntısı olarak katılır ve havzayı Çanakkale Boğazı üst akıntısı olarak terk etmektedir. Öte yandan, Ege Denizi suları Çanakkale Boğazı alt akıntısı olarak Marmara Denizi'ne katılır ve havzayı İstanbul Boğazı alt akıntısı olarak terk eder. Marmara Denizi'nde bulunan Karadeniz ve Ege Denizi kaynaklı sular yaklaşık olarak 25 m derinlikte yer alan keskin bir ara yüzey ile ayrılmıştır. Üst tabaka suları yaklaşık 230 km³ hacme sahiptir ve 4-5 ayda bir yenilenmektedir. Alt tabaka suları ise yaklaşık 3378 km³ hacme sahiptir ve 6-7 yılda bir yenilenmektedir [46].

Marmara Denizi'nin yüzey dolaşımı İstanbul Boğazı'ndan Marmara Denizi'ne giren yüzey jetinin mevsimlik değişimleri (komşu denizlerdeki yoğunluk, basınç farkları ve su bütçesi) ve rüzgar gerilimi dağılımı ile kontrol edilmektedir. Marmara Denizi

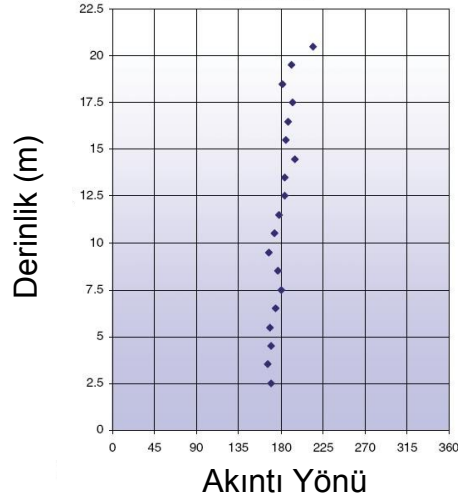
yüzey sularının dolaşımı havza boyutlarında ve saat yönünde bir döngüden oluşmaktadır. Çanakkale Boğazı'ndan Marmara Denizi'ne katılan göreceli olarak daha yoğun Ege Denizi suları Marmara Denizi'nde derinlere çökmektedir. Ege Denizi'nden giren sular yoğunluk farklarına bağımlı olarak kışın tabana, diğer mevsimlerde ise orta derinliklere çökebilmektedir. [47]; [48], [49], [50]; [51].

Yüzey akıları ve her iki yönde de etkili olan türbülanslı girişim nedeniyle TBS'den geçen su kütleleri geçiş sırasında değişime uğrarlarsa da değişimin en hızlı olduğu yerler, Boğazların hidrolik kontrol sonrası bölgeleri (İstanbul Boğazı güneyi ve Karadeniz eşiği kuzeyi, Çanakkale Boğazı'nda Nara Burnu batısı) ile komşu denizlere bağlandıkları çıkış bölgeleridir

Marmaray projesi kapsamında kısa ve uzun dönem akıntı ölçümleri yapılmıştır. İstanbul Boğazı'nda Sarayburnu açıklarında 08/05/2003 tarihinde derinlik boyunca yapılan akıntı hızı ölçümlerinde Şekil 1.19'da görüldüğü gibi dip akıntısının 1,0 m/s değerine ulaşmaktadır. Şekil 1.20'de ise akıntının yönünün (Marmara Denizi'nden - Karadeniz'e, Karadeniz'den - Marmara Denizi'ne) derinlik boyunca fazla değişmediği izlenmektedir [52].



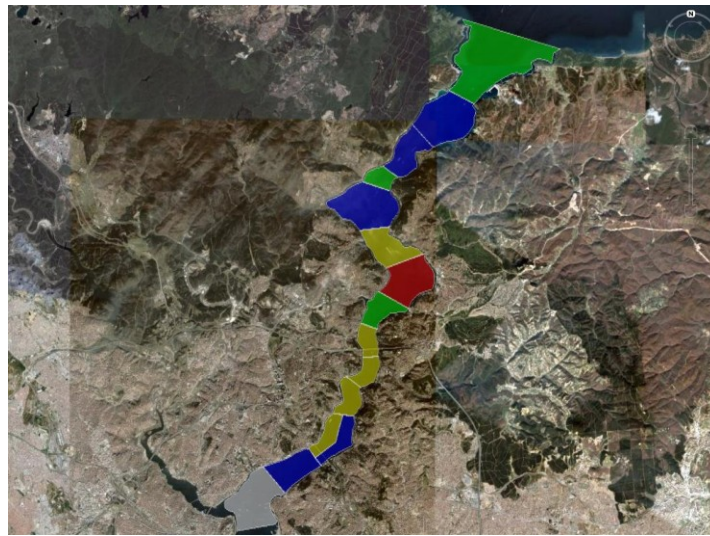
Şekil 1.19. Sarayburnu Derinlik Boyunca Akıntı Hızı Dağılımı



Şekil 1.20. Sarayburnu Derinlik Boyunca Akıntı Yönü Dağılımı

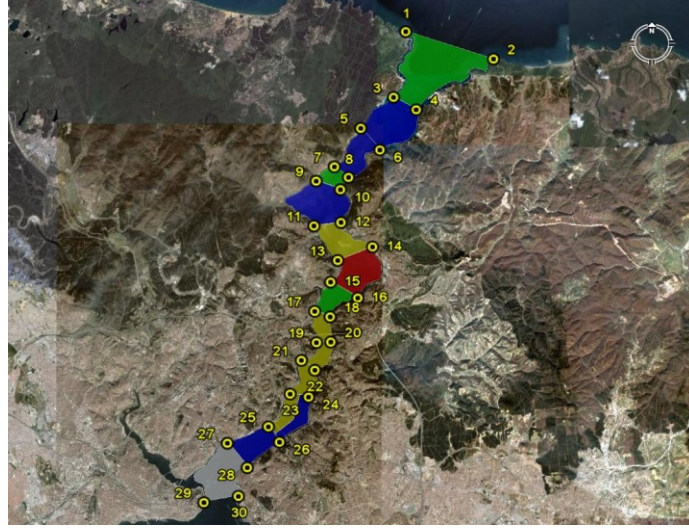
Şekillerde görüldüğü üzere, İstanbul Boğazı'nın muhtelif yerleri dip akıntıları açısından yüksek hızlara ve sabit yönlere sahiptir. Bu özellikler belirtilen ikili türbin sisteminin yerleştirilmesi açısından uygun yerler olarak değerlendirilebilir [52].

İstanbul Boğazı'ndaki (dip akıntı hızı uygun olan) bölgeler, Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'nın 2004 yılı İstanbul Boğazı akıntı haritası göz önüne alınarak belirlenmiştir. Şekil 1.21'de uygun bölgeler gruplandırılarak sunulmuştur. 1 knot, 0,514 m/s'dir.



Şekil 1.21. İstanbul Boğazı Dip Akıntı Hızı Bölgeleri
(beyaz < 1.0 knot; 1.0 knot ≤ sarı < 1.5 knot; 1.5 knot ≤ mavi < 2.0 knot;
2.0 knot ≤ yeşil < 2.5 knot; 2.5 knot ≤ kırmızı)

Her bölge iki koordinat arasındaki çizgi ile başlamakta, boğaz boyunca devam etmekte ve iki koordinat arasındaki çizgi ile bitmektedir (Şekil 1.22).



Şekil 1.22. İstanbul Boğazı Dip Akıntı Hızı Bölgeleri (Koordinat Numaraları)

Şekil 1.22’de en üstteki yeşil alan 1 ve 2 no’lu koordinat noktaları ile başlamakta, 3 ve 4 no’lu koordinat noktaları ile bitmektedir. Her bölgenin başlangıç ve bitiş koordinat numaraları Şekil 1.22’de ve Tablo 1.3’de görülebilmektedir. 1 no’lu koordinat $29,112274^\circ$ doğu boylamını, $41,237883^\circ$ kuzey enlemini göstermektedir.

Tablo 1.3. İstanbul Boğazı Alan Başlangıç-Bitiş Koordinat Noktaları

#	Boylam (doğu)	Enlem (kuzey)	#	Boylam (doğu)	Enlem (kuzey)	#	Boylam (doğu)	Enlem (kuzey)
1	$29,112274^\circ$	$41,237883^\circ$	11	$29,055602^\circ$	$41,144003^\circ$	21	$29,047963^\circ$	$41,079209^\circ$
2	$29,166453^\circ$	$41,224553^\circ$	12	$29,072316^\circ$	$41,145653^\circ$	22	$29,056221^\circ$	$41,074426^\circ$
3	$29,104706^\circ$	$41,206114^\circ$	13	$29,070256^\circ$	$41,127338^\circ$	23	$29,041022^\circ$	$41,062926^\circ$
4	$29,118638^\circ$	$41,199972^\circ$	14	$29,091760^\circ$	$41,133875^\circ$	24	$29,052352^\circ$	$41,061458^\circ$
5	$29,084485^\circ$	$41,191113^\circ$	15	$29,065925^\circ$	$41,116909^\circ$	25	$29,027605^\circ$	$41,047082^\circ$
6	$29,096265^\circ$	$41,180615^\circ$	16	$29,082649^\circ$	$41,109250^\circ$	26	$29,034443^\circ$	$41,039626^\circ$
7	$29,068248^\circ$	$41,172494^\circ$	17	$29,056157^\circ$	$41,102832^\circ$	27	$29,002373^\circ$	$41,039115^\circ$
8	$29,076942^\circ$	$41,167337^\circ$	18	$29,065638^\circ$	$41,100144^\circ$	28	$29,014622^\circ$	$41,027323^\circ$
9	$29,056989^\circ$	$41,165624^\circ$	19	$29,057216^\circ$	$41,087764^\circ$	29	$28,987907^\circ$	$41,010421^\circ$
10	$29,071965^\circ$	$41,161414^\circ$	20	$29,066063^\circ$	$41,088044^\circ$	30	$29,009110^\circ$	$41,013447^\circ$

Şekilden görüldüğü üzere dip akıntılarının en hızlı olduğu alan kırmızı ile işaretli bölgedir. 13 ve 14 no’lu koordinatlar arasındaki çizgi ile başlayan ($29,070256^\circ$ doğu boylamı, $41,127338^\circ$ kuzey enlemi ile $29,091760^\circ$ doğu boylamı, $41,133875^\circ$ kuzey enlemi), boğaz boyunca devam eden ve 15 -16 no’lu koordinatlar arasındaki

çizgi ile biten ($29,065925^{\circ}$ doğu boylamı, $41,116909^{\circ}$ kuzey enlemi ile $29,082649^{\circ}$ doğu boylamı, $41,109250^{\circ}$ kuzey enlemi), kırmızı ile işaretli bölgede yaklaşık 50 metre derinlikte, 3,0 knot akıntı hızı görülmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, İstanbul ve Çanakkale Boğazlarında akıntı hızının uygun olduğu yerler Şekil 1.23 ve Şekil 1.24'de gösterilmiştir.



Şekil 1.23. İstanbul Boğazı Dip Akıntı Hızının Uygun Olduğu Bölge



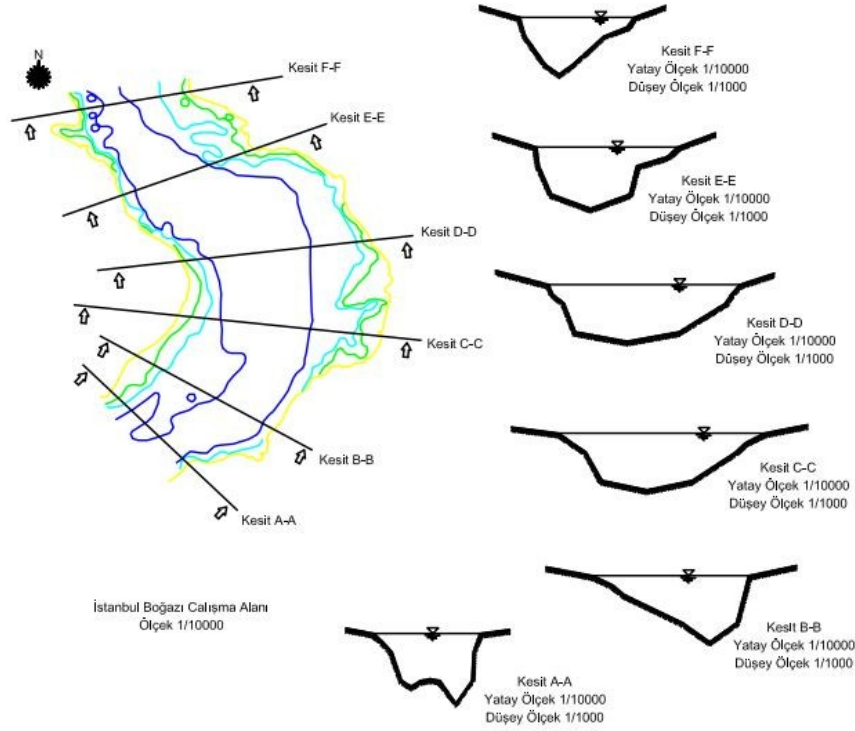
Şekil 1.24. Çanakkale Boğazı Dip Akıntı Hızının Uygun Olduğu Bölge

Haritalarda görülen akıntı hızının uygun olduğu bölgenin koordinatları Tablo 1.4 'de sunulmuştur.

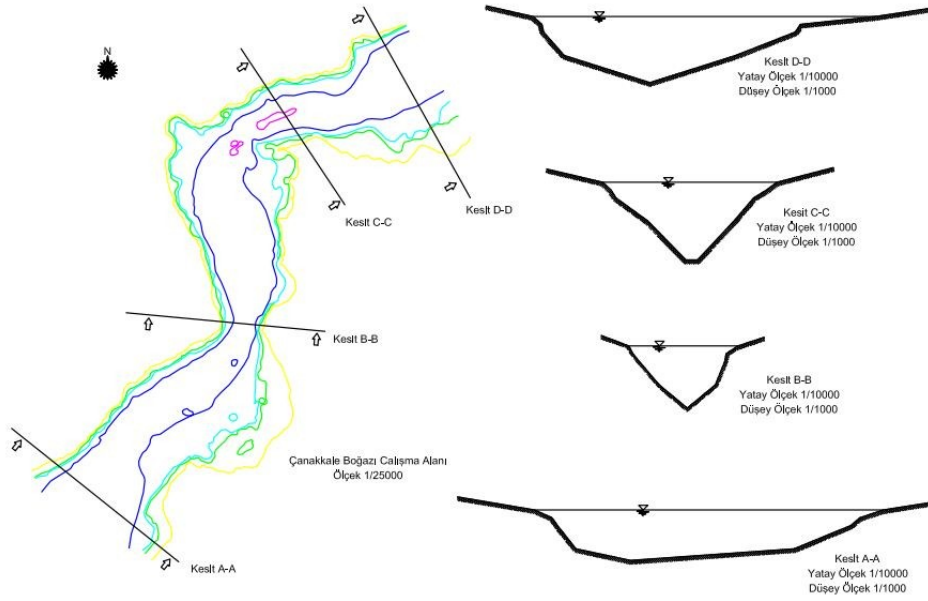
Tablo 1.4. İstanbul Boğazı alan başlangıç-bitiş koordinat noktaları

#	Boylam (doğu)	Enlem (kuzey)	#	Boylam (doğu)	Enlem (kuzey)
A	29,057074	41,141771	E	26,491268	40,266100
B	29,071394	41,144236	F	26,539383	40,234363
C	29,061988	41,113072	G	26,312807	40,099808
D	29,072729	41,106725	H	26,357992	40,076595

İstanbul ve Çanakkale boğazlarında hidrokinetik enerji üretimi için uygun olan bölgelerin taban geometrileri Şekil 1.25 ve Şekil 1.26'da verilmiştir.



Şekil 1.25. İstanbul Boğazı Akış Kesitleri



Şekil 1.26. Çanakkale Boğazı Akış Kesitleri

Sonuç olarak, günümüzde tüketilen toplam enerjinin yaklaşık %80'i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Elektrik üretiminin 2/3'ü ve ulaşım sektöründe kullanılan enerjinin hemen hemen tamamı fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Fosil yakıt kullanımının neden olduğu en önemli sorun ise hava kirliliği ve sera etkisini oluşturan karbondioksit yayılımı ile küresel ısınmadır. Kyoto protokolü (1997) ile tüm ülkelerin karbondioksit yayılımını azaltıcı yönde tedbir almaları kararlaştırılmıştır. Gerek fosil yakıt kullanımının gelecek için olumsuz sonuçları ve gerekse fosil yakıtların zaman içinde biteceği gerçeği, alternatif ve yenilenebilir enerji kullanımını önemli kılmaktadır. Bu yeni yakıtlar, fosil yakıtlardan daha temiz olmalı, küresel ısınmaya sebep olmamalı, çevre dostu olmalı, tehlikesiz olmalı, ülke ekonomisine yük getirmemeli, enerjide dışa bağımlılığı önlemeli ve sürekli kullanıma elverişli olmalıdır. Hiç karbondioksit yayılımına neden olmayan ve güvenli yenilenebilir enerjilerden birisi de serbest akışlı hidrokinetik enerjidir. Yenilenebilir enerjilerin mukayese değerleri aşağıda Tablo 1.5'de verilmiştir.

Tablo 1.5. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Mukayesesi

	Hidrokinetik Enerji	Fosil Yakıtlar	Karada Rüzgar	Denizde Rüzgar	Güneş
Enerji Yoğunluğu	Yüksek (Yaklaşık olarak rüzgardan 1000 kat daha fazla)	Çok Yüksek	Düşük	Orta	Düşük
Tahmin Edilebilirlik	Yüksek	Yüksek (Kömür) Sürekliliği tartışılır (Doğal Gaz)	Bazı Bölgelerde dışında düşük	Orta	Bazı bölgeler hariç tahmin edilemez
Kapasite Faktörü	%95 - %100	%50 - %90	%25 - %35	%25 - %35	%10 - %20
Emisyon	-	C, NO _x , SO ₂ , Hg	-	-	-

Tablo değerleri incelendiğinde hidrokinetik enerjinin avantajları açıkça görülmektedir.

Ülkemizin enerji ihtiyacının çok küçük bir dilimi yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu çalışma ile ülkemizde akarsularımızdaki, baraj atık su ve/veya Türk Boğazlarındaki hidrokinetik enerji potansiyelinden enerji üretimi konusunda yararlanılabileceği ortaya konulmuştur.

1.5. Hidrokinetik Türbinler

Hidrokinetik türbinler suyun kinetik enerjisini kullanarak jeneratör vasıtasıyla elektrik üreten sistemlerdir. Prensip ve tasarım yönünden rüzgar türbinleriyle benzerlik gösterirler. Aralarındaki en önemli fark olarak suyun yoğunluğunun havanın yoğunluğunu 850 kat daha fazla olması söylenebilir. Reynolds sayısının etkisinin her iki sistem içinde benzer olması birçok deneysel verilerin ortak kullanılmasına imkân vermekte ve rüzgar türbin teorisi hidrokinetik türbin tasarımında kullanılabilir. Literatürde yapılan çalışmalarda, rüzgar türbinleri için kullanılan Rüzgar Türbini Performans Kodlarının hidrokinetik türbinler için kullanılmasının uygun olup olmayacağı konusunda çalışmalar yapılmıştır [53]. 2007 yılında 5 m rotor çapında 35 kW'lık 6 adet hidrokinetik türbinden oluşan sistem üzerinde rüzgar türbini performans kodlarının uygunluğu denenmiştir. Kodlardan alınan değerlerle deneysel deneyler arasında fazla bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla prensip ve tasarım yönünden rüzgar türbinleriyle hidrokinetik türbinler benzerlik göstermektedirler.

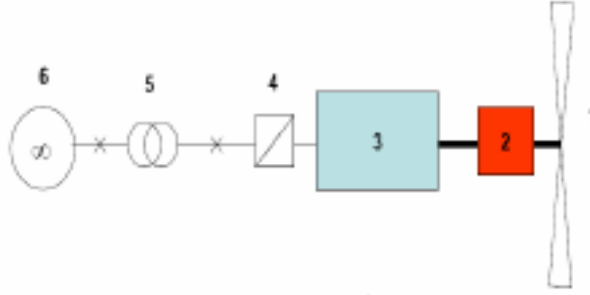
Rüzgar türbinlerinden farklı olarak hidrokinetik türbinlerde tasarım yapılırken kavitasyonun oluşmamasına dikkat edilmelidir. Kavitasyon türbin kanatları üzerinden geçen suyun düşük basınç bölgelerinde lokal kabarcıklar oluşturması ve bu kabarcıkların kanat üzerinde kararsız yüklemelere sebep olabilmesidir.

Güç yoğunluğu mukayesesi yapılırsa;

$$P/A = 0,0005\rho\rho xV^3 \quad (\text{kW/m}^2)$$

ρ yoğunluk (kg/m^3), A pala tarama alanı (m^2) ve V akım hızı (m/s) olmak üzere su ortamında ve rüzgar ortamında güç yoğunlukları sırası ile $0,5V^3 \text{ kW/m}^2$ ve $0,000625V^3 \text{ kW/m}^2$ değerleri bulunur. Görüldüğü gibi güç yoğunluğu serbest akım hızının küpü ile değişmekte ve su ve rüzgar ortamında oldukça farklı değerlere ulaşılmaktadır. Hidrokinetik ortamda 1 m/s hızda güç yoğunluğu $0,5 \text{ kW/m}^2$ iken, rüzgar ortamında 7 m/s dizayn hızında güç yoğunluğu $0,214 \text{ kW/m}^2$ olmaktadır.

Bir hidrokinetik türbin ve elemanları şematik olarak aşağıda gösterilmiştir.

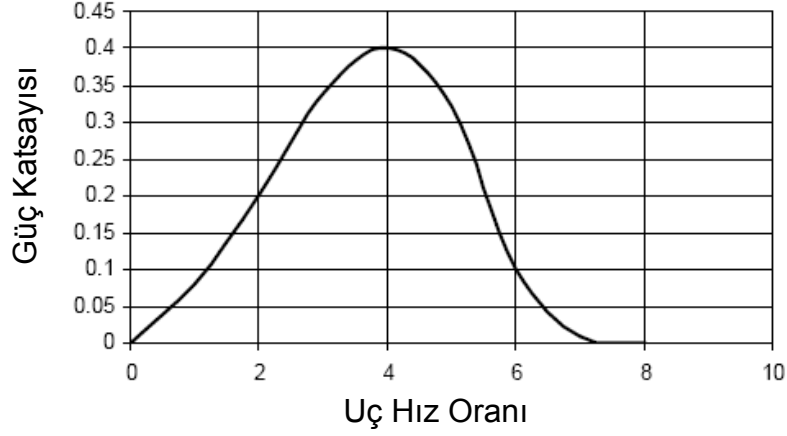


Şekil 1.27. Su Türbini ve Elemanları

1. Rotor
2. Dişli kutusu
3. PM jeneratörü
4. Frekans dönüştürücü
5. Yükseltici Transformatör (Step-up Transformer)
6. Elektrik hattı

Rüzgar türbinlerinde türbin verimi iki şekilde ifade edilir; i) Değişken rotor hızı, ii) Sabit rotor hızı. Değişken rotor hızı için rotor enerji dönüştürme verimi hemen hemen sabittir. Sabit rotor hızı için enerji dönüşüm verimi rotor uç hız oranına (tip-velocity ratio) bağlı olarak değişmektedir. Uç hız oranı rotor pala ucunun hızının serbest akım hızına oranı olarak, $\lambda = \omega R/V$ (ω rotor açısal hızı, R rotor pala yarıçapı ve V serbest akım hızı)

ifade edilir. Rüzgar türbinleri referans alınarak güç katsayısının(veya enerji dönüştürme verimi) uç hız oranına(ilerleme hız oranı) göre değişimi aşağıda verilmiştir. Maksimum verim uç hız oranının 4 değerinde %40 olmaktadır. Bilindiği gibi rüzgar türbinlerinde üç palalı bir kanat için erişebilecek maksimum verim 0,59 olup buna Betz limiti denilmektedir. %40 değeri bu değerin altında bir değerdir.



Şekil 1.28. Güç Katsayısının Uç Hız Oranı ile Değişimi

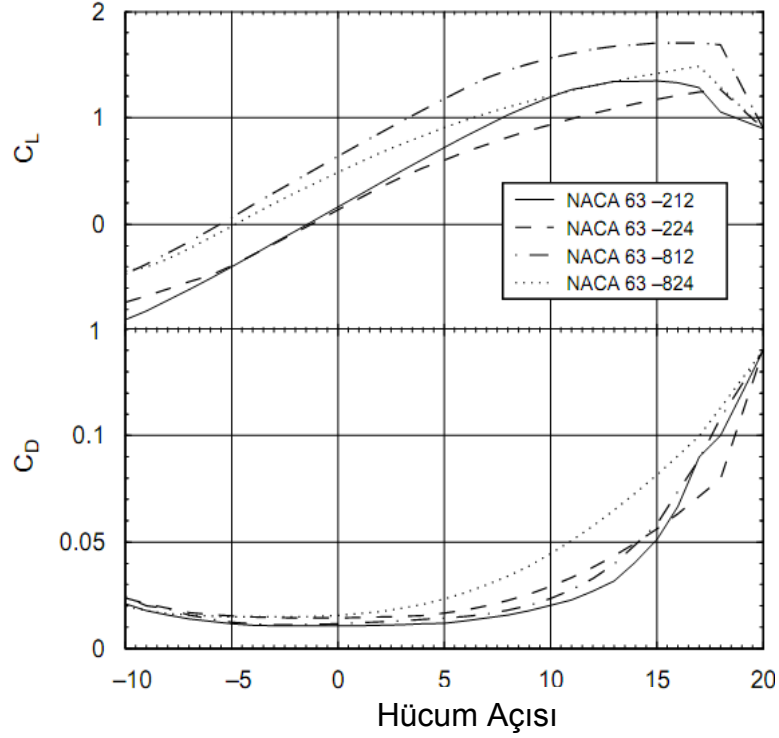
Her elemanın verimi dikkate alınarak genel verim

Rotor verimi	%40
Dişli kutusu	%95
Jeneratör	%95
Frekans dönüş.	%98
Transformatör	%98

Toplam verim	%34

olarak elde edilebilir. Burada görüldüğü gibi sistem verimini etkileyen en önemli eleman rotor yada kanat verimidir. Bu verim değerini yüksek performanslı kanat geliştirilerek yükseltmek gerekir.

Hidrokinetik enerji üreten su türbinlerinde kullanılan bazı kanat tiplerinin hidrodinamik kuvvet karakteristikleri Şekil 1.29'da görülmektedir.



Şekil 1.29. NACA 63-xx Kanat Profili Aerodinamik Karakteristikleri [34]

Görüldüğü gibi kullanılabilen bu kanatlarda maksimum kaldırma kuvvet katsayısı yaklaşık olarak 1,2 ile 1,6 değerleri arasında bir değere sahiptirler. Geliştirilen yüksek performanslı kanat ile bu değerlerin daha yukarıya çıkarılması hedeflenmiştir.

1.6. Hidrokinetik Türbin Kontrolü

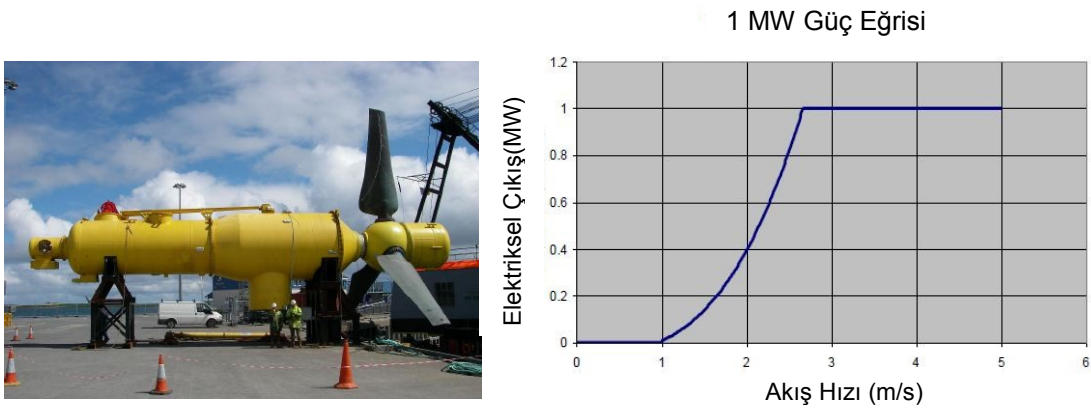
Hidrokinetik türbinler rüzgar türbinlerinde olduğu gibi, yukarıda da bahsedildiği gibi, genel olarak dört kısımdan oluşmaktadır. Bunlar rotor, kabin, türbini akış içerisinde sabitlemesini sağlayan yapı ve elektriksel güç depolama ve aktarım ünitesidir.

Rotor, türbin performansını belirleyen en önemli eleman olan kanatların ve kanatların bağlandığı göbek kısmından oluşmaktadır. Kabin, türbinin mekaniksel ve elektriksel elemanlarının yani güç aktarım ve dönüşüm üniteleri ile kontrol ünitesini içerisinde barındıran kısımdır. Rüzgar türbininden farklı olarak kabinin su altında bulunduğu hidrokinetik türbinlerde sızdırmazlığın sağlanması çok önemlidir. Kabin içerisinde bulunan redüktör, kanatlardan alınan dönme hareketini jeneratör çalışma devrine çıkaran elemandır.

Hidrokinetik türbinlerde rüzgar türbinlerinde olduğu gibi türbin için tehlikeli olabilecek hızlara ulaşılması durumunda devri belirli bir değerde tutmak için diskli bir fren sistemi kullanılabilir.

Rüzgar türbinlerinde rüzgarın farklı yönlerden esmesi durumunda rotoru rüzgar doğrultusuna döndüren konumlama (yaw) mekanizmaları bulunmaktadır. Okyanus, deniz, boğaz, akarsu akımlarında suyun akış yönü rüzgara göre çok az değişmektedir bu yüzden bu konumlandırma mekanizmasına gerek olmayabilir ya da basit bir sistem kullanılabilir.

Rüzgar türbinleri için tasarım rüzgar hızı 12 m/s iken hidrokinetik türbinlerde ise bu hız 2-3 m/s arasında değişmektedir. Rüzgar türbinlerinde rüzgar hızı 20-25 m/s değerlerine ulaştığında türbinin devir sayısı tehlike oluşturabileceğinden kanadın yüksek rüzgar hızlarında stall durumuna geçmesiyle ya da kontrol sistemiyle devir güvenli aralıklarda tutulur. Aynı şekilde hidrokinetik türbinlerde de su hızının 4-5 m/s değerine ulaştığında türbinin devri kontrol edilmesi gerekir. Şekil 1.30'da TGL firmasının 1 MW'lık türbininin güç eğrisi görülmektedir. Güç eğrisinden de görüleceği gibi türbin devri 3 m/s hızdan sonra sabit güç üretecek şekilde ayarlanmaktadır.



Şekil 1.30. TGL Firmasının 1 MW'lık Hidrokinetik Türbini ve Güç Eğrisi

Türbin devrini ayarlamak için kullanılan yöntemlerden stall kontrolü kanat tasarımıyla ilgilidir, su hızı belirli bir değer üzerinde çıktığında kanadın konumlandırılması türbinin devrinin artmasına engel olur. Bir diğer kontrol çeşidi ise pitch (değiştirme) kontrolüdür. Bu kontrolde kanatların açısını değiştiren bir

mekanizma vardır, bu mekanizmayla yüksek hızlarda türbinin devri belirli aralıklarda sabit tutulmaya çalışılırken aynı zamanda düşük hızlarda da türbinden maksimum performans alınması sağlayan kontroldür. Bu iki kontrolden başka her iki kontrolü içeren aktif stall kontrolü de diğer bir kontrol çeşididir.

1.7. Hidrokinetik Türbinler Çevresel Etkenler

Hidrokinetik türbinler su ortamında çalıştılarından rüzgar türbinlerine göre daha zorlu çalışma koşulları vardır. Bu kısımda çevresel etkenlerin hidrokinetik türbinler üzerinde oluşturdukları olumsuzluklar ve bu etkileri giderici yöntemlerden bahsedilmiştir. Deniz ve okyanuslarda çalışan türbinlerin mekanik aksamalarında korozyon oluşma ihtimali göz önüne alınmalıdır. Bunu önlemek için metalik kısımlar galvanizlenmeli ve boyanmalıdır. Bir değer metot ise korozyon nedeniyle oluşan metal kaybını göz önüne alarak parçaların olması gerekenden daha kalın yapılmasıdır. Bu yöntem metalin kaplanmasından daha pahalı bir yöntemdir. Türbin gövdesi sızdırmazlığı sağlanmalıdır. Bunun için keçeli rulmanlar, sıvı contalar kullanılabilir. Özellikle akarsularda türbin üzerine kanatlarına ve gövdeye zarar verici maddeler gelebilir. Bazı uygulamalarda bu zararlı maddelerin türbine çarpmasını önlemek için, akış ortamı perdelenmektedir. Bu koruyucu elemanın akış düzeni bozma ihtimali olsa da bazı durumlarda mecburiyetten konulmaktadır. Kanat üzerinde oluşan yosunlar itki kuvvetini artırıcı, türbin performansını azaltıcı etkilere neden olabilmektedir.

Hidrokinetik türbinlerin rüzgar türbinlerinde olduğu gibi bakıma ihtiyaçları olabilmektedir. Bazı türbinlerde bakımın kolay yapılabilmesi için aşağı yukarı hareket ettiren mekanizmalar bulunmaktadır. Bununla birlikte sistemde iyi bir şekilde yağlama, sağlam kanatlar, sızdırmazlığın iyi bir şekilde sağlanmış olması bakım masraflarını ve zorluğunu azaltacaktır.

Tatlı ve tuzlu suların yoğunluğu yaklaşık $998-1025 \text{ kg/m}^3$ olmasından dolayı türbin üzerindeki aksenal kuvvet (itki kuvveti) büyük olacaktır. 60 m çapında bir rüzgar türbininde aksenal kuvvet yaklaşık 60 tondur. 3 m/s akış hızındaki bir hidrokinetik türbinde aksenal kuvvet bu değerın yaklaşık üç katıdır. Bundan dolayı kanat ve

sistem elemanlarının tasarımı türbine etkiyen bu kuvveti karşılayacak biçimde yapılmalıdır.

Hidrokinetik türbinlerde karşılaşılabilecek bir diğer durum ise kavitasyondur. Kaviteasyon özellikle pompalarda gördüğümüz, akış basıncının suyun buharlaşma basıncının altına düştüğü durumlarda oluşan bir durumdur. Bir diğer ifadeyle suyun çok düşük sıcaklıklarda kaynaması ve kaynama kabarcıklarının oluşmasıdır. Bu kabarcıklar pompa kanatlarına zarar verip pompanın performansını etkilemektedir. Aynı durum hidrokinetik türbinler için de geçerlidir. Bu yüzden kanat tasarımı kanadın üzerindeki basınçlar buharlaşma basıncının altında olmayacak şekilde yapılmalıdır [21].

Çevrenin türbine etkilerinin dışında hidrokinetik türbinlerin çevreye olan etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Türbinler zemine yerleştirilebileceği için dipte yaşayan canlılar üzerindeki etkisi, Şekil 1.31’de görüldüğü gibi türbin tarlası şeklinde yerleştirilmiş türbinlerin oluşturdukları sesin canlı yaşamı üzerindeki etkisi, türbinlerin canlıların hareketini engellemesi gibi etkiler bulunmaktadır.



Şekil 1.31. Hidrokinetik Türbin Tarlası

1.8. Amaç ve Kapsam

Tez çalışmasında amaç yenilenebilir enerji çeşitlerinden olan suyun serbest akış hızını kullanarak elektrik üreten yatay eksenli hidrokinetik enerji türbinlerinde ve aynı zamanda rüzgar türbin uygulamalarında kullanılacak yüksek performanslı ikili türbin kanadı geliştirmektir. Bu amaçla ikili türbin kanadının sayısal ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilerek kanatla ilgili maksimum performansı verecek geometrik boyutlar ve akım parametreleri (optimum geometrik ve optimum akım değerleri) belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca ikili türbin kanadıyla mukayese yapabilmek için standart kanat profilli türbin kanadının da tasarım ve analizleri yapılmıştır. Elde edilen yüksek performanslı kanat kullanılarak, hidrokinetik enerji potansiyelinin kullanımı irdelenmiştir.

Sayısal analiz için 2D ve 3D akış şartlarında problem modellenmiş, deneysel çalışma için ise 200mx6mx4m boyutlarına haiz bir su kanalı (Towing tank) kullanılarak çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmaların detayları sonraki bölümlerde verilmiştir.

2. GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Giriş

Hidrokinetik ve aynı zamanda rüzgar türbin uygulamalarında kullanılmak üzere yüksek performanslı kanat geliştirilmesi konusundaki çalışmalara modeller belirleme, sayısal analizler ve deneysel analizler ile devam edilmiş ve kanat optimum geometrik ve akım değerler belirlendikten sonra, hidrokinetik potansiyel analizleri yapılmıştır.

Bu bölümde kullanılan kanat modellere, sayısal analizde kullanılan sınır koşulları, ağ yapıları gibi bilgilere yer verilmiştir. Deneysel analizde sistem elemanları, kanat üretimi, çalışmada kullanılacak yöntemlere yer verilmiştir. Hidrokinetik potansiyel kısmında belirli verileri kullanarak hidrokinetik potansiyelin belirlenme yöntemi anlatılmıştır.

2.2. Model Belirleme

Yüksek performans vermesi beklenen ikili kanat ve standart NACA4412 kanadı kesitleri Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. İkili Kanat (a) ve Standart Kanat (b) Profilleri

Modeller sayısal ve deneysel çalışmalara tabii tutularak optimum geometrik ve akım şartları belirlenmiştir.

2.3. Sayısal Analiz

Sayısal analizler için GAMBIT-FLUENT yazılımı ve ANSYS 13.0 yazılımı kullanılmıştır. Sayısal analizler önce 2D akım şartlarında yapılmış ve optimum

geometrik değerler ve akım şartları belirlenmiştir. Daha sonra 2D analizden bulunan optimum değerler kullanılarak 3D analizler uygulanmış ve her iki kanadın hidrodinamik karakteristikleri belirlenmiştir.

2.3.1. İki boyutlu sayısal çalışmalar

İki boyutlu sayısal çalışmalar ikili kanat ve standart kesitli kanat profili üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda amaç modellerin dizayn şartlarını (geometrik ve akım alanı olarak) belirlemek ve birbirleri ile mukayeselerini yapabilmektir. Ayrıca, üç boyutlu analiz için uygun boyutları ve akım şartlarını elde etmektir.

Rüzgar ve hidrokinetik türbin dizaynında dizayn kriteri, kanada etki eden kaldırma kuvvet katsayısı C_L ve direnç kuvvet katsayısı, C_D arasındaki ilişki referans alınarak

$$\left(\frac{C_D}{C_L}\right)_{min} = f(\text{geometrik ve akış parametreleri})$$

olarak tanımlanmaktadır. Her kanat profillerinde çok sayıda geometrik ve akım parametresi vardır. Optimum değerler olarak C_D/C_L değerini minimum yapan (veya C_L/C_D değerini maksimum yapan) geometrik ve akım parametrelerini sayısal olarak bulmak gerekmektedir. Bu değerler referans alınarak, tanımlanan türbin kanat uç hız oranına ve türbin kanat sayısına, B, bağlı olarak kanat lokal veter uzunlukları ve kanadın gövdeden itibaren gerekli burkulma açıları ve türbin güç katsayıları momentum teorisi [54] kullanılarak hesaplanmıştır. Aşağıda bağlı akış hızının geliş açısı bir sonraki bölümde kanatlar üzerinde gösterilmiştir.

Lokal Uç Hız Oranı,

$$\lambda_r = \omega r / U \quad U: \text{Referans Hidrokinetik Hız} \quad (2.1)$$

Bağıl Akış Hızının Geliş Açısı

$$\varphi = (2/3) \tan^{-1}(1/\lambda_r) \quad (2.2)$$

Kanat veter uzunluğu,

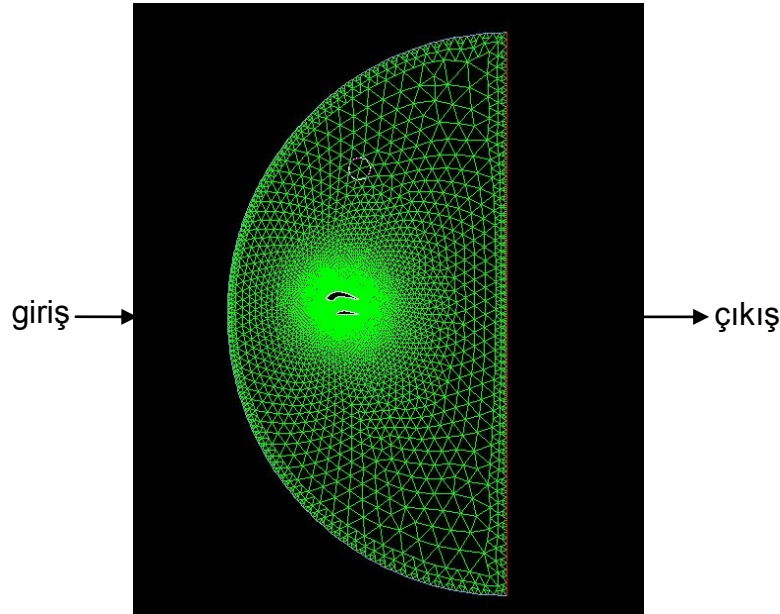
$$c = \frac{8\pi r}{BC_l} (1 - \cos \varphi) \quad (2.3)$$

Güç Katsayısı,

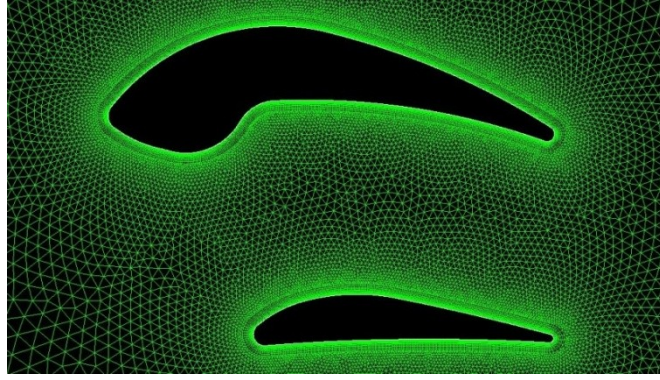
$$C_p = \left(\frac{8}{\lambda^2}\right) \int_{\lambda_h}^{\lambda} \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) \left[1 - \left(\frac{C_d}{C_l}\right) \cot \varphi\right] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (2.4)$$

İki boyutlu yapılan sayısal çalışmalarda referans hız olarak 2 m/s kanal hızı, kanat uç hız oranı olarak ise üç palalı türbinlerde güç değerinin maksimum olmasını sağlayan 5 değeri alınmıştır.

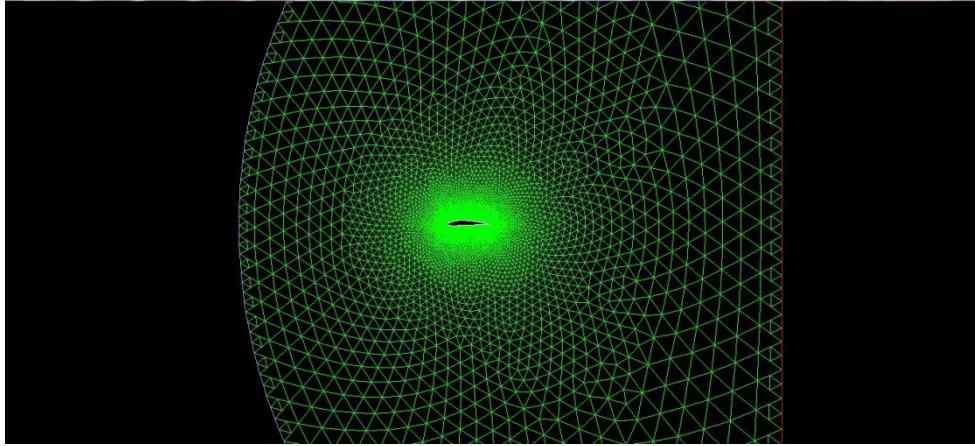
Çalışmalarda amaç kanat tasarım kriter olan C_L / C_D oranının maksimum olduğu hücum açısı değerleri ve bu açıdaki C_L değerini bulmak ve aynı zamanda kanatların etrafındaki basınç ve hız dağılımlarını incelemek olduğundan GAMBIT-FLUENT programında ikili kanat için Şekil 2.2'de, standart kanat için Şekil 2.4'de gösterilen bir akış alanı oluşturulmuştur. Sınır şartları olarak giriş hız değeri 2 m/s ($Re = 3,02 \times 10^5$), sınır koşulu "velocity inlet", çıkış sınır şartı "pressure outlet" kanatlar "wall" olarak, akış alanı ise "domain" olarak tanımlanmıştır. Akış alanı boyutları kanadın ön kısmında 5 kanat mesafesi, arka kısmında ise 7 kanat mesafesi kalacak şekilde oluşturulmuştur. Dğümler üçgensel şekilde atılmış, çözüm düğüm sayısından bağımsız olana kadar yaptırılmıştır. Sayısal ağda tüm kanat profilleri için yaklaşık 46300 düğüm bulunmaktadır. Çözümü doğruluğunu arttırmak için kanat kenarlarına Şekil 2.3'de gösterilen sınır tabakalar atılmıştır. Sınır tabaka y^+ değeri 5'den küçük olacak şekilde oluşturulmuştur. Çalışmalarda türbülans modeli olarak iki boyutlu kanat çalışmalarında kullanılan Spalart Allmaras modeli kullanılmıştır [55].



Şekil 2.2. İkili Kanat Kesiti Akış Alanı



Şekil 2.3. İkili Kanat Sınır Tabaka ve Ağ Yapıları



Şekil 2.4. Standart Kanat Akış Alanı

2.3.2. Üç boyutlu sayısal çalışmalar

Üç boyutlu sayısal çalışmalarda kanat elemanı momentum teorisi kullanılarak kesitleri oluşturulan kanatların modelleri ile her bir kanadın 2 m/s akım hızında farklı devirlerde oluşturdukları tork değerleri ve buna bağlı türbin güç değeri, güç katsayısı ve türbinlerin basınç, hız, türbülans, akım çizgileri gibi akış karakteristikleri incelenmiştir. Sayısal çalışmalar ANSYS 13.0 programında yapılmıştır. Analizlerde kullanılan, iki boyutlu analizlerden tasarım kriterleri belirlendikten sonra Denklem 2.2 ve Denklem 2.3'ün kullanılmasıyla elde edilen kanat kesitlerinin birleştirilmesi sonucu oluşan kanat modelleri Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

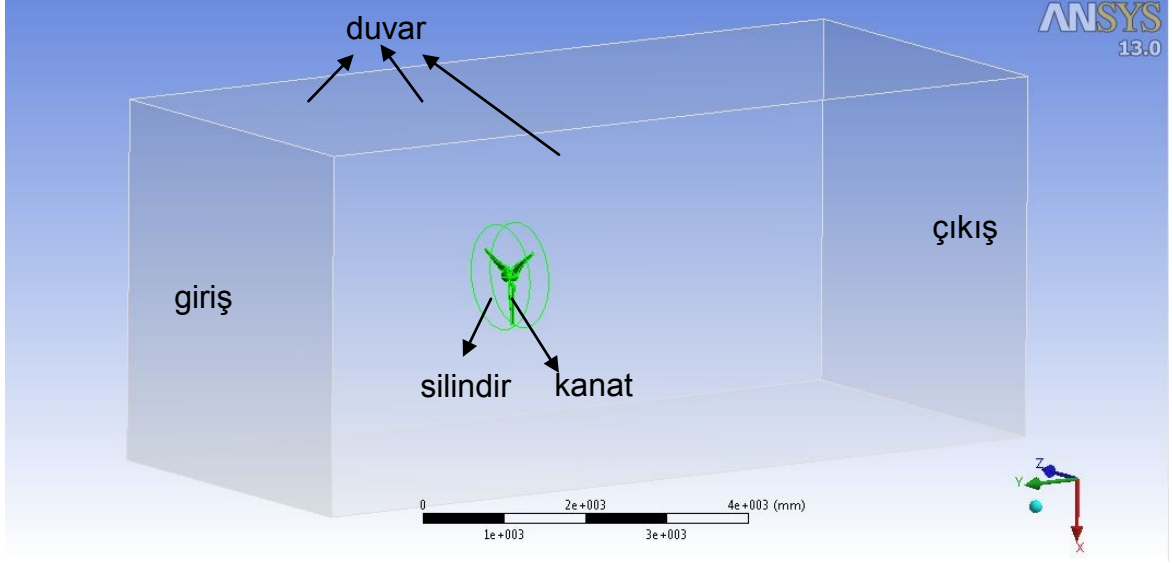


Şekil 2.5. İkili Kanat Modeli



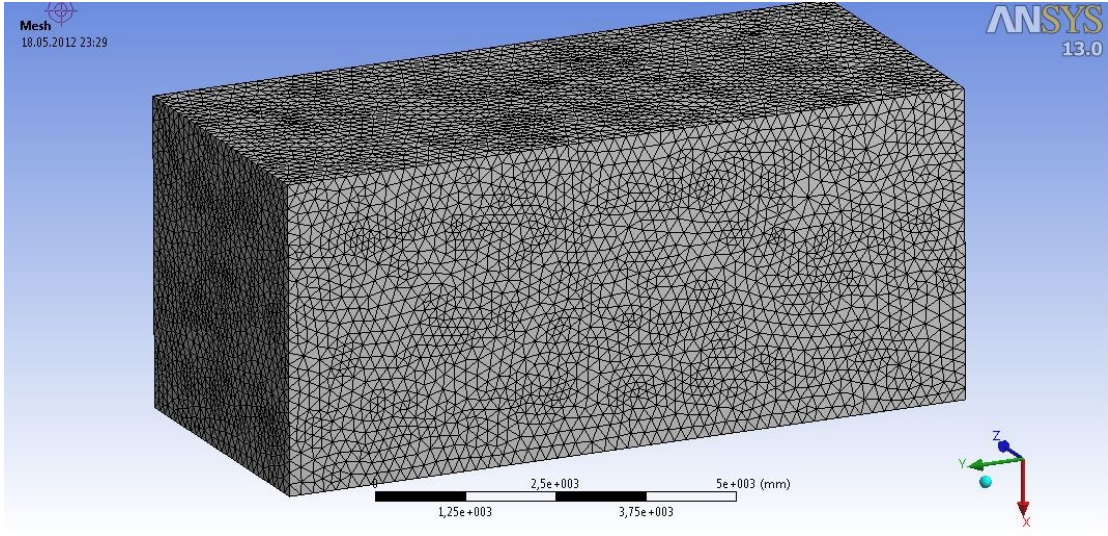
Şekil 2.6. Standart Kanat Modeli

Kanat modellerinin analizini yapmak için ikili ve standart kanat kesitli türbinler etrafına şekillerde gösterilen akış alanları oluşturulmuştur. Akış alanlarının boyutları deneyin yapıldığı kanalın boyutlarına göre oluşturulmuştur. Kanada dönerlik verebilmek için etrafına silindirik bir yapı çizilmiştir. Sınır koşulları olarak giriş “velocity inlet”, çıkış “pressure outlet”, üst, alt, yan duvarlar “wall” olarak, silindirin ön, arka ve yan yüzeyi “interior”, dikdörtgen prizma ve silindir ayrı ayrı “domain” olarak tanımlanmıştır. Türbülans modeli olarak k- ϵ modeli kullanılmıştır.



Şekil 2.7. İkili Kanat Akış Alanı

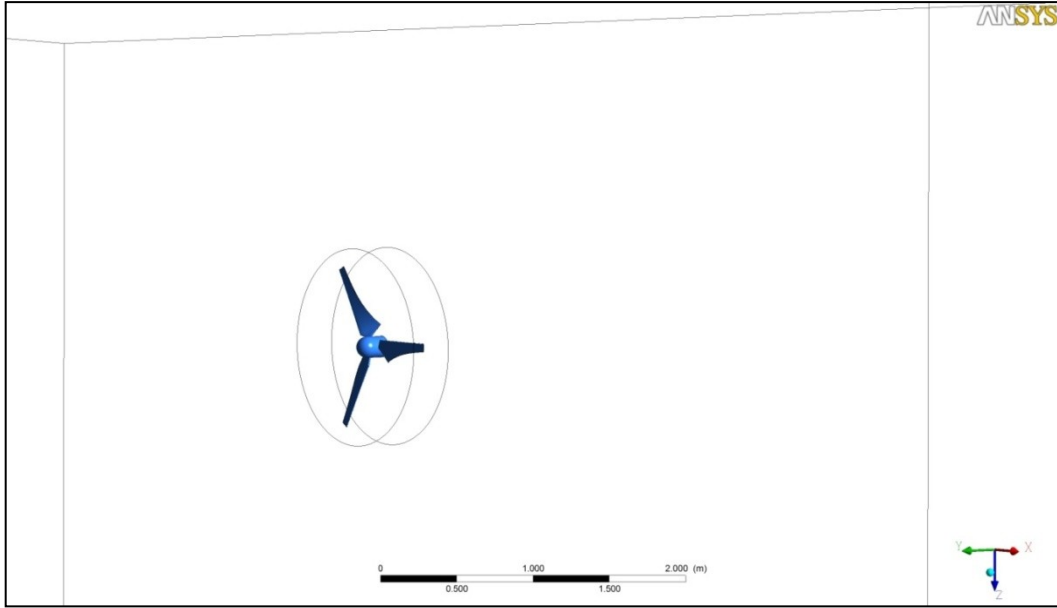
Tetra düğümlerin oluşturduğu ağ yapısı Şekil 2.8'de görülmektedir. Tüm Hacimlerde yaklaşık olarak 9 510 000 ağ elemanı bulunmaktadır.



Şekil 2.8. Ağ Yapısı

Programda akış hızı olarak 2 m/s tanımlanmış ve farklı devir sayılarında tork değerleri elde edilmiştir.

Standart kesitli kanat için oluşturulan akış alanı Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Standart Kanat Akış Alanı

Türbine gelen akış hızı kanatlar yüzeyine kanatların dönmesinden dolayı aşağıda ifade edilen bağıl hız olarak ifade edilen hızla gelmektedir. Üç boyutlu analizdeki kanat kesiti etrafında oluşan basınçla iki boyutlu analizdeki kanat kesiti etrafında oluşan basınç dağılımını karşılaştırmak için, iki boyutlu analizde bağıl hız olarak ifade edilen ve denklem 2.5’de ifade edilen değer girdi olarak verilmiş ve kanat üzerindeki basınç dağılımları elde edilmiştir. Denklemde ifade edilen ω açısal hız değeri, U kanal hızı (2 m/s), λ_r ise r yarıçapındaki lokal uç hız oranıdır. Üç boyutlu 0,6 m yarıçaplı kanadın 0,5 m’lik kısmından kesit alınmıştır. Denklemlerden 0,5 m’deki kanat kesitinde 2m/s akış hızında 6,15 m/s’lik bir bağıl hız oluştuğu hesaplanmıştır.

$$U_{\text{bağıl}} = \sqrt{U^2 + (\omega r)^2} \quad (2.5)$$

$$\omega r = U \lambda_r \quad (2.6)$$

2.4. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar ikili ve standart kanat profilli türbinlerin performans karakteristiklerini belirlemeye yönelik olmuştur. Çalışmalar İTÜ Gemi İnşaat Mühendisliği Fakültesi bünyesinde bulunan su kanalında (Towing tank) gerçekleştirilmiştir.

Deneyin yapıldığı su kanalı Resim 2.1’de gösterilmiştir. Kanal 3,4 m derinliğe, 4 m genişliğe ve 160 m uzunluğa sahiptir. Kanalda su hareketsiz olup kanal üzerinde hareketi kontrol edilebilen bir taşıyıcı, kanal boyunca belirlenen düzgün hızda hareket edebilmektedir.



Resim 2.1. İTÜ Gemi Mühendisliği Su Kanalı

2.4.1. Sistem elemanları

2.4.1.a Model üretimi

İki ve üç boyutlu sayısal analiz sonucunda elde edilen optimum geometrik değerler referans alınarak üretilen iki model üzerinde, ikili kanat ve standart kanat (NACA4412) gerçekleştirilmiştir. Modellerden ikili kanat el yatırma yöntemiyle cam elyafından, standart kanat kesitli türbin ise alüminyum dökümden yapılmıştır. Model üretimi için hizmet alımı yapılmıştır. Cam elyafından üretilen türbin için kanatların Resim 2.2’ de görüldüğü gibi kalıpları yapılmış daha sonra da cam elyafları katmanlar halinde serilip türbin kanatları oluşturulmuştur. Türbin kanatlarının resimleri Resim 2.3 ile Resim 2.5 arasında verilmiştir.



Resim 2.2. Kanat Sapıyla Birlikte Kalıp Resimleri



Resim 2.3. Üretilmiş İkili Kanat Resimleri



Resim 2.4. İkili Kanat - Göbek Kısımına Bağlanmış Haliyle

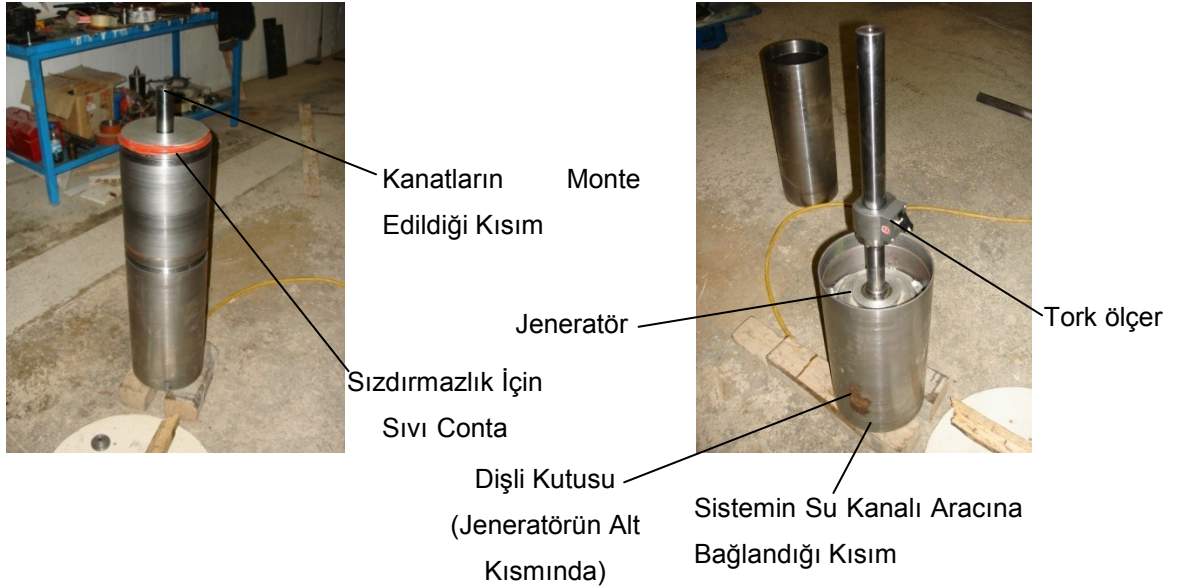


Resim 2.5. Standart Kanat - Göbek Kısına Bağlanmış Haliyle

2.4.1.b Gövde elemanları diğer sistem elemanları ve bağlantı şekilleri

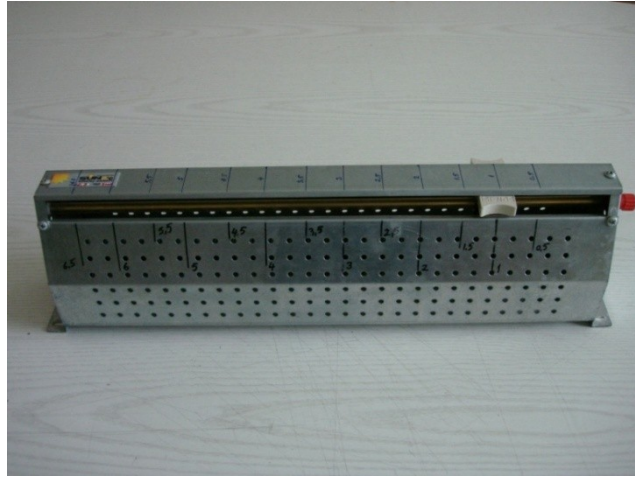
Üretilen kanatlar aşağıda resimde görüldüğü gibi bir şafta, torkmetreye, dişli kutusuna ve jeneratöre bağlanmıştır. Torkmetre, dişli kutusu ve jeneratör sızdırmazlığı sağlanmış bir silindir içerisine yerleştirilmiştir.

Sızdırmazlık için sıvı contalar ve keçeli rulmanlar kullanılmıştır. Gövde ve gövde içerisindeki sistem elemanları Resim 2.6'da gösterilmiştir.



Resim 2.6. Gövde Elemanları

Sistemde kullanılan jeneratör 2,5kW'lik bir jeneratördür. Kullanılan dişli kutusu 1/4 oranında olup kanadın döndürdüğü milin devrini 4 kat artırarak jeneratör miline vermektedir. Sistemde kullanılan tork ölçer kanatların farklı devirlerdeki tork ve devir sayısını belirlemede kullanılmıştır. Jeneratörü farklı yüklerle çalıştırıp türbin gücünü maksimum yapan devir-tork ilişkisini bulmak için Resim 2.7'de gösterilen reostalar kullanılmıştır. Kullanılan 3 adet $1,5\Omega/25A$ değerindeki reostalar birbirlerine gerektiğinde paralel bağlanmışlardır.



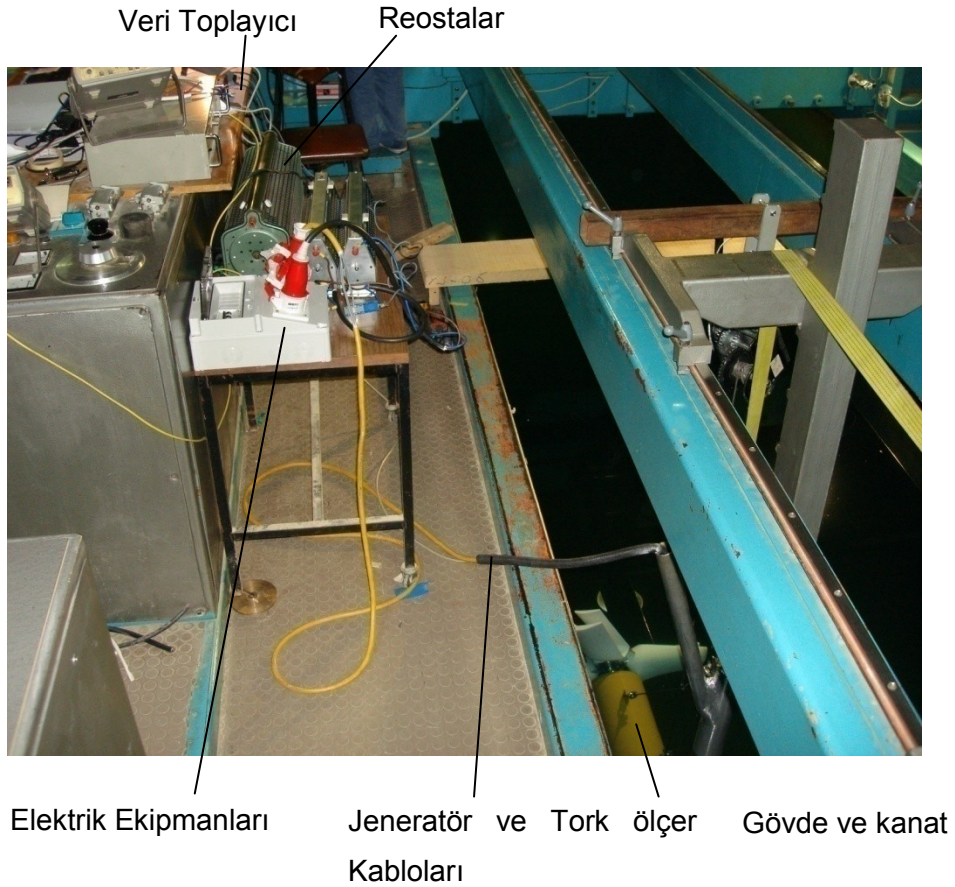
Resim 2.7. Reosta

Tork ölçerden alınan devir ve tork değerleri Resim 2.8'de gösterilen veri toplayıcı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır.



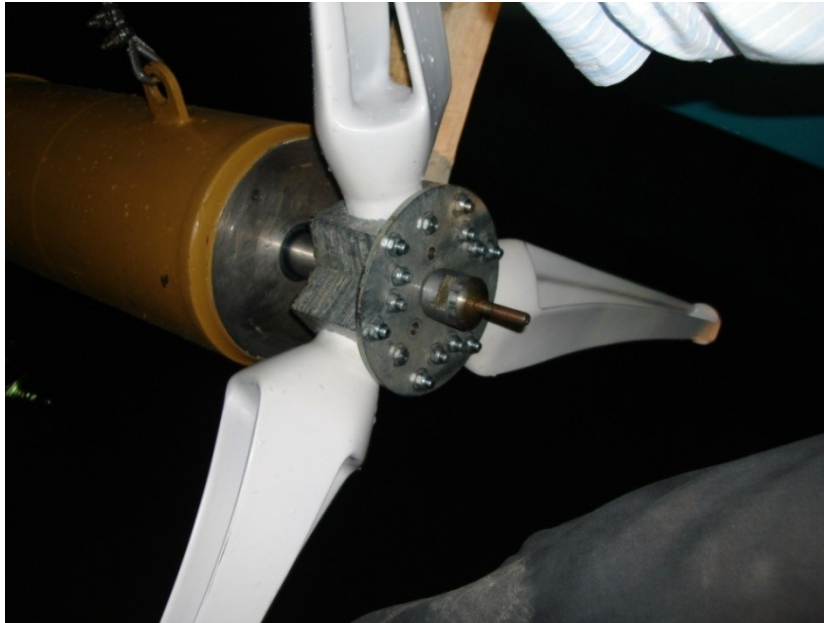
Resim 2.8. Veri Toplayıcı (QUANTUMX, MX840)

Resim 2.9'da tüm sistem elemanları görülmektedir.

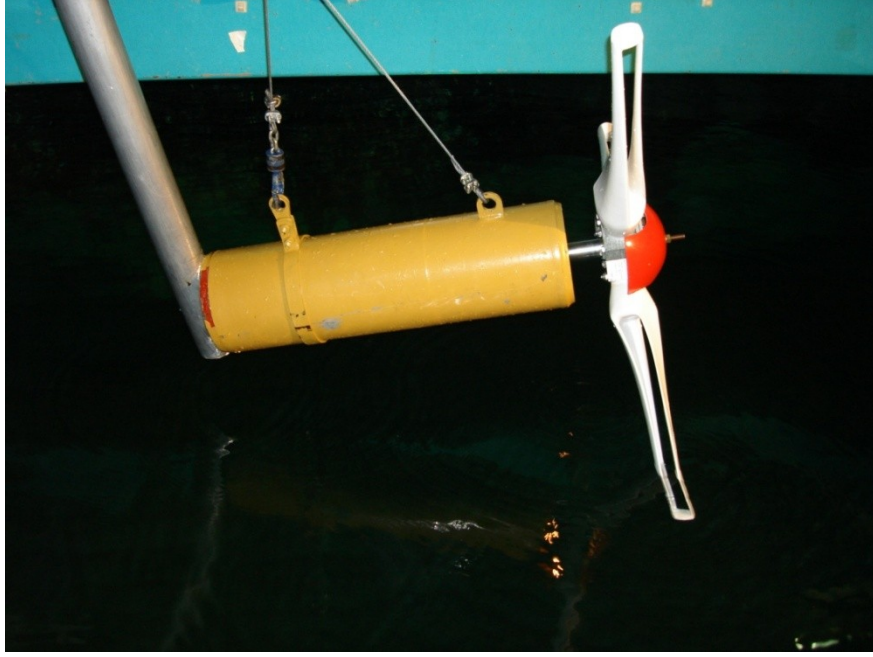


Resim 2.9. Tüm Sistem Elemanları

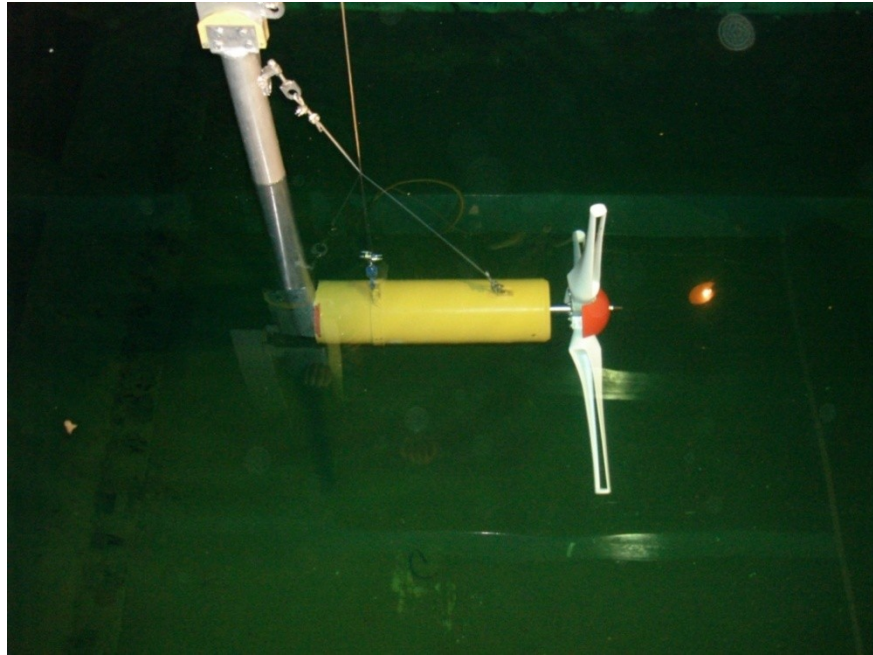
Resim 2.10 ile Resim 2.13 arasında kanatların gövdeye bağlantı resimleri ve türbinin su içerisindeki resimleri gösterilmektedir.



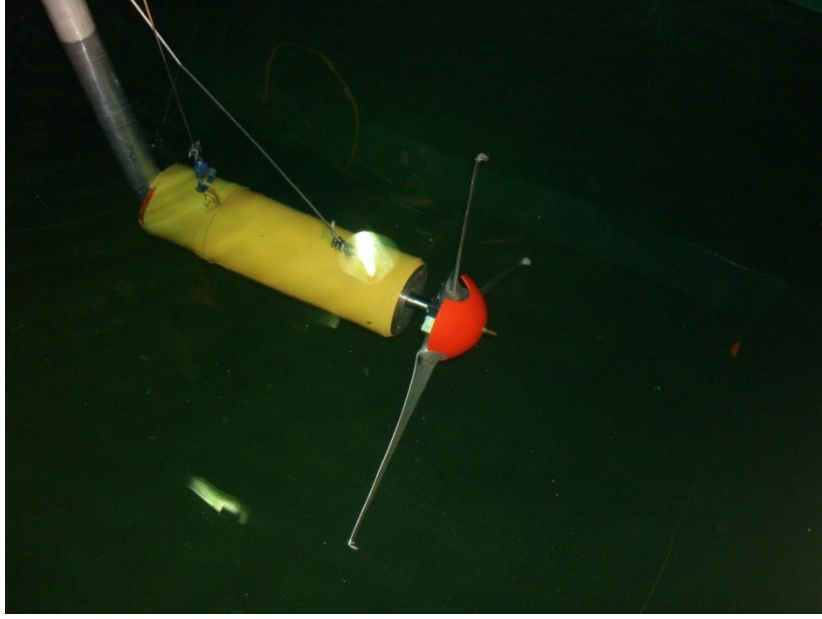
Resim 2.10. Kanat Bağlantı Resimleri 1



Resim 2.11. Kanat Bağlantı Resimleri 2



Resim 2.12. Kanat Bağlantı Resimleri 3



Resim 2.13. Kanat Bağlantı Resimleri 4

Deneyisel çalışmalarda rotorun ürettiği tork ve devir sayısı tork-devir ölçer ile belirlenmiştir. Taşıyıcı hızı (hidrokinetik akıntı hızı) bilgisayar kontrollü kontrol sisteminden alınmıştır. Ayrıca jeneratörden üretilen enerjinin V ve akım I değerleri ölçülerek modellerin ürettiği elektriksel güç hesaplanmıştır. Türbin devrinin değiştirilmesi, reosta direncinin değiştirilip jeneratör üzerindeki yükün artırılıp azaltılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Ölçülen tork, devir değerleri veri toplayıcı ile bilgisayar ortamına aktarılırken volt ve akım değerleri direk olarak güçmetre üzerinden okunmuştur.



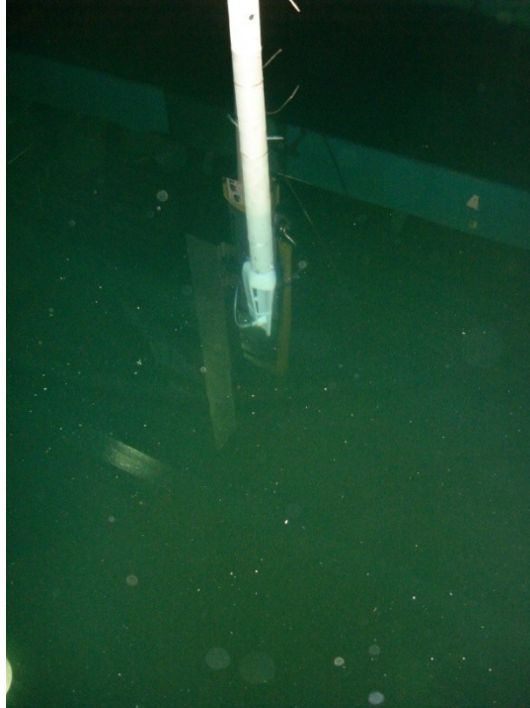
Resim 2.14. Veri Akışı Diyagramı

2.4.2. Kanat üzerindeki basınç dağılımının ölçümü

İkili kanat yüzeyindeki bir bölgenin basınç dağılımını görebilmek ve bu değerle iki boyutlu sayısal analizdeki basınç dağılımını karşılaştırmak için kanat yüzeyine bir basınçölçer (KELLER PR-46X,5mH20) Resim 2.15’de görüldüğü gibi bağlanmıştır. Kanadın bağlantı direğinde yüksek hızlarda titreşim oluşması ve buna bağlı olarak basınç değerlerinin düzgün alınamamasından dolayı testler 0,5 m/s hızda yapılmıştır. Alınan değerler veri toplayıcıdan bilgisayara aktarılmıştır.



Resim 2.15. İkili Kanat ve Basınç Ölçer



Resim 2.16. İkili Kanat Basınç Ölçümü

2.5. Hidrokinetik Potansiyel Belirleme

Tez çalışmasında üretilen sistemin uygulamaya geçirilebileceği akarsularda bir sonraki sonuçlar bölümünden elde edilen türbin güç değerleriyle akarsulardan yıllık elde edilebilecek elektrik güç miktarı kWh/yıl, hesaplanmıştır. Hesaplamalarda rüzgar potansiyelini belirleme çalışmalarında da kullanılan iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılmıştır [56].

Dağılım denklemleri;

Ortalama hız,

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (2.7)$$

Standart Sapma,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (2.8)$$

Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu,

$$p(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right) \quad (2.9)$$

Parametreler,

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{u}}\right)^{-1,086} \quad (2.10)$$

$$\frac{c}{\bar{u}} = \left(0,568 + \frac{0,433}{k}\right)^{-1/k} \quad (2.11)$$

\bar{u} : Ortalama hız

n: Ölçüm sayısı

u: Anlık ölçülen hız değerleri

k: Şekil parametresi

c: Skala faktörü

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu:

Elde edilen akarsuyun Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu, geliştirilen kanadın türbin güç karakteristiği $W(u)$ kullanılarak bir yıl boyunca üretilen güç;

$$P_m(U_m) = \int_0^{\infty} p(u)W(u)du \quad (2.12)$$

denklemlerinden elde edilir. Elde edilen değer 8760 saat/yıl ile çarpılarak yıllık üretilen elektrik değeri bulunur. İlk bölümde hidrokinetik potansiyel kısmında ve ekler kısmında bazı akarsuların aylık akım debilerinin yıllara göre değişimleri verilmiştir. Bir sonraki bölümde enerji hesaplamaları verilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışmalar

3.1. Giriş

Bulgular kısmı sayısal çalışmalar, deneysel çalışmalar, hidrokinetik enerji potansiyeli olmak üzere üç ana başlıktan oluşmaktadır. Sayısal çalışmalar iki ve üç boyutlu akım şartlarında incelenmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar referans alınarak model oluşturulmuş, deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

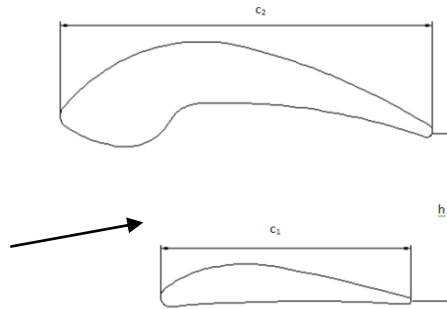
3.2. Sayısal Çalışmalar

3.2.1. İki boyutlu sayısal çalışmalar

İki boyutlu analiz, tez çalışmasında ikili ve standart kanada uygulanarak kanatların hidrodinamik performans analizleri yapılmıştır.

i) İkili kanat hidrodinamik karakteristikleri

İkili kanat geometrisi Şekil 3.1'de verilmiştir. Kanat ana kanat ve küçük kanat kombinasyonundan oluşmaktadır. Yapılan sayısal analizde geometrik boyutlar aşağıda verilen değerlerde değişken olarak alınmıştır.



Şekil 3.1. İkili Kanat Geometrik Boyutlar

Geometrik boyutlar;

$$0,177 < h/c_1 < 0,834,$$

$$0,537 < c_1/c_2 < 0,737$$

Dizayn hidrokinetik akım hızı 2 m/s olup, akımı tanımlayan Reynolds sayısı ($Re = U c_1 / \nu = 3,02 \times 10^5$) olarak alınmıştır.

Gerçekleştirilen 2D analiz sonucunda optimum geometrik değerler;

$$c_1/c_2 = 0,671 \text{ ve } h/c_1 = 0,667$$

olarak elde edilmiştir. Bu optimum geometrik değerler kullanılarak ikili kanadın hidrodinamik karakteristikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

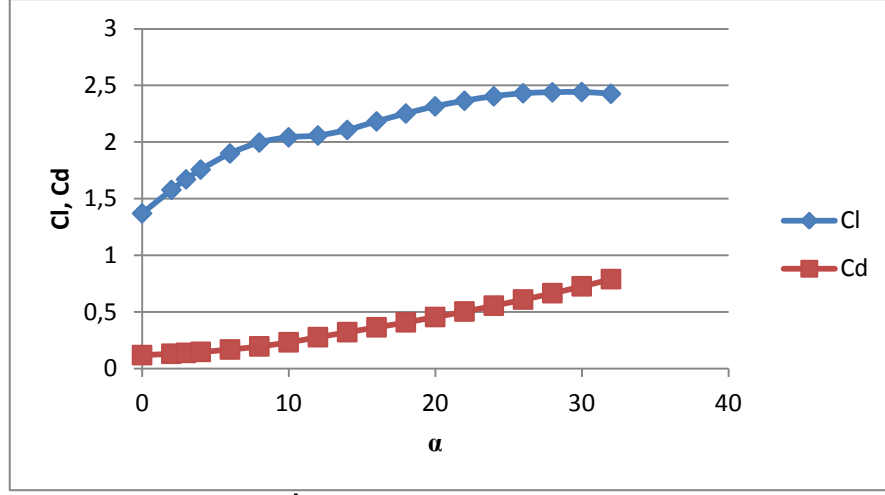
Tablo 3.1. İkili Kanat Su Ortamındaki Hidrodinamik Özellikleri, $c_1/c_2 = 0,671$
 $h/c_1 = 0,667$ ve $Re = 3,02 \times 10^5$

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d	C_l/C_d
0	1,3698	0,1188	11,5303
2	1,5771	0,131	12,0389
3	1,6706	0,1386	12,0534
4	1,7568	0,1474	11,9186
6	1,899	0,1685	11,27
8	1,9959	0,196	10,1832
10	2,0415	0,2322	8,79199
12	2,0577	0,2773	7,42048
14	2,1068	0,3216	6,551
16	2,1818	0,3646	5,98409
18	2,2518	0,4088	5,50832
20	2,3149	0,4553	5,08434
22	2,3641	0,5039	4,69161
24	2,4038	0,5555	4,32727
26	2,4302	0,6097	3,98589
28	2,4389	0,6659	3,66256
30	2,4413	0,7265	3,36036
32	2,4259	0,7898	3,07154

Tablo incelendiğine C_L/C_D ' nin maksimum değeri 12,05 olarak hücum açısının 3° oluşu konumda elde edilmiştir. Böylece iki boyutlu analizde ikili kanat dizayn değerleri olarak,

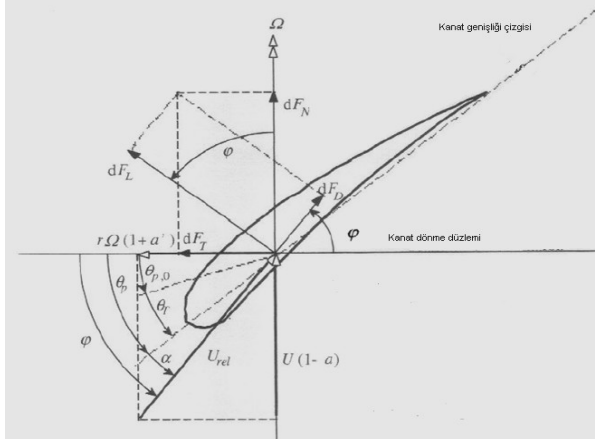
$\alpha = 3^{\circ}$, $C_L = 1,67$, $C_D = 0,16$ ve $C_L/C_D = 12,03$ olarak elde edilmiştir. Yine tablo incelendiğinde hücum açısı 30° ye kadar yükseldiği halde kanadın stall konumuna gelmediği ve ulaştığı maksimum kaldırma kuvvet katsayısının 2,44 değerine kadar yükseldiği görülmektedir.

Tablo değerlerinden kaldırma ve direnç katsayılarının hücum açısına göre değişimleri grafiksel olarak Şekil 3.2 de verilmiştir.

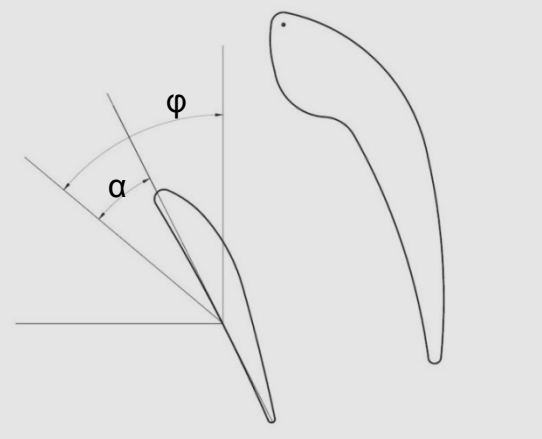


Şekil 3.2. İkili Kanat C_L , C_D - α Değişimleri

Belli bir devir ile dönmekte olan kanat için U serbest akım hızı ve Ω rotorun açısal hızı olmak üzere kanadın her kesitinde hücum açısı optimum değerine sahip olmalıdır. Bu hareket sırasında kanada etki eden aerodinamik veya hidrodinamik kuvvetler ve açılar Şekil 3.3'de tanımlanmıştır [54]. Şekil 3.4'de ise ikili kanat üzerindeki hücum açısı ve bağıl su-rüzgar hızının geliş açısı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kanat Açılı ve Kuvvetler



Şekil 3.4. İkili Kanat Açılı

Şekilde;

U_{Rel} : Göreceli su-rüzgar hızı

θ_p : Kanat kesit burulma açısı

α : Hücum açısı(kanat genişliği çizgisiyle göreceli Rüzgar hızı arasındaki açı)

$\varphi = \theta_p + \alpha$: Bağıl su-rüzgar hızının geliş açısı

$\theta_{p,o}$: Uç kanat kesit açısı

θ_T = Kanat burulma açısı

dF_L : Kaldırma kuvveti

dF_D : Sürükleme (Direnç) kuvveti

dF_N : Normal kuvvet (itkiye katkısı olur)

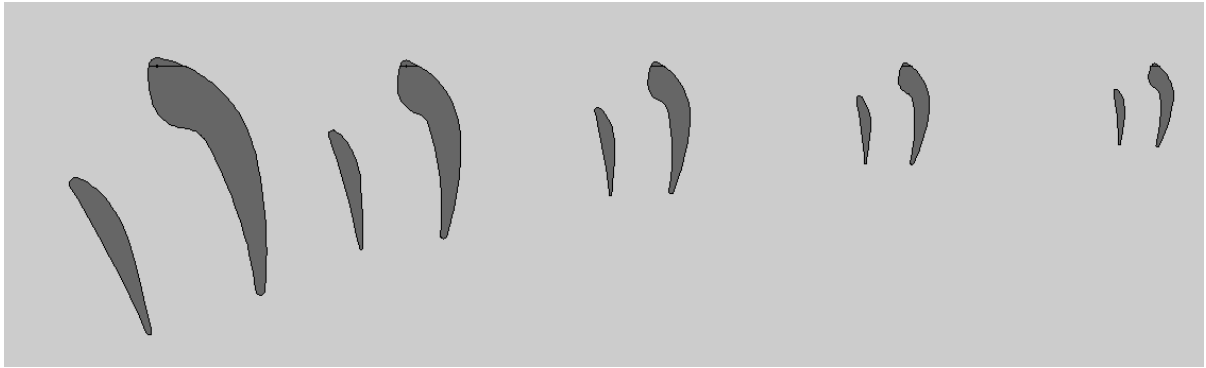
dF_T : Teğetsel kuvvet (tork üretir)

olarak tanımlanmıştır. Optimum değerler kullanılarak kanadın her kesitinde veter uzunlukları ve kanat açıları Denklem 2.3 ve Denklem 2.4'den hesaplanmış ve rotor göbek noktasından kanat ucuna doğru değişimleri Tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.2. İkili Kanat Modeli Kanat Açılı ve Kanat Veter Uzunlukları (c_1)

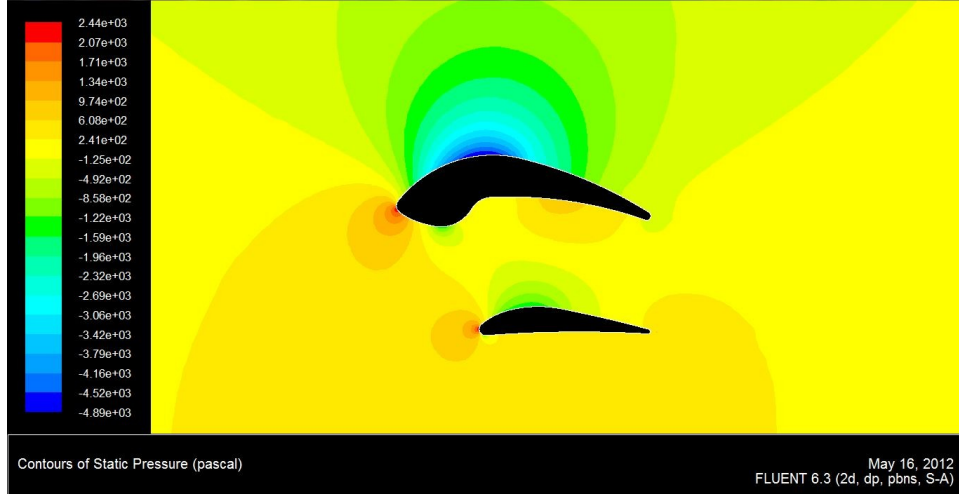
Kanat Kesit Açılı ve Veter Uzunlukları							
$r(m)$	r/R	λ_r	$\varphi(^{\circ})$	$A(^{\circ})$	$\Theta_p = \varphi - \alpha$	$\Theta_T(^{\circ})$	$c_1(m)$
0,12	0,2	1	30	3	27	22,46	0,081
0,24	0,4	2	17,71	3	14,71	10,17	0,057
0,36	0,6	3	12,29	3	9,29	4,75	0,041
0,48	0,8	4	9,36	3	6,36	1,82	0,032
0,6	1	5	7,54	3	4,54	0,00	0,026

Tablo incelendiğinde, kanat ucunda 0 olan burkulma açısı kanat göbek kısmında 22.46° değerine ulaşmaktadır. Böylece kanadın her kesitinde efektif hücum açısı 3° olarak kalmaktadır. Ayrıca rotor göbek noktasından kanat ucuna doğru 5 istasyonda kanat kesitleri Şekil 3.5'de verilmiştir.

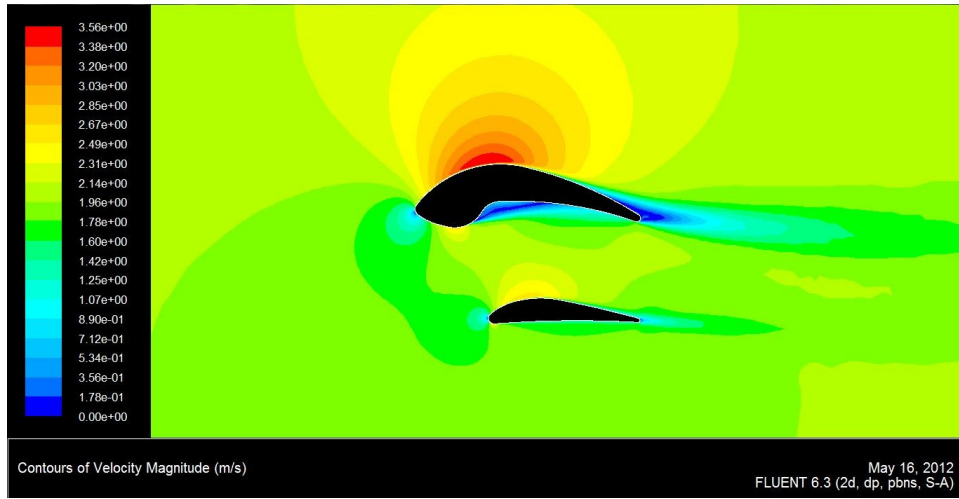


Şekil 3.5. İkili Kanat Göbekten Uca Doğru Kanat Kesit Dağılımı

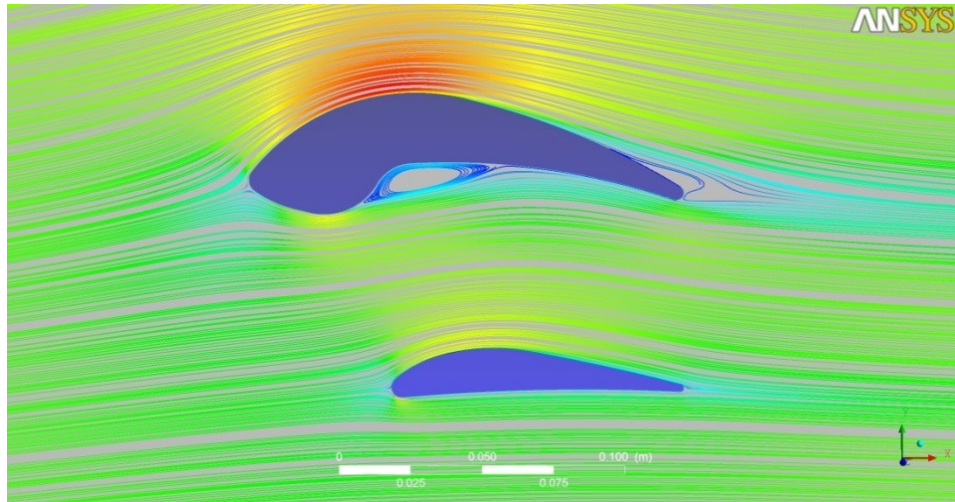
Optimum değerlerde kanatlar etrafında basınç dağılımı, hız dağılımı ve akım çizgileri Şekil 3.6 ile 3.8 arasında gösterilmiştir.



Şekil 3.6. İkili Kanat Basınç Dağılımı, $Re = 3,02 \times 10^5$, $\alpha = 3^\circ$, $c_1/c_2 = 0,671$



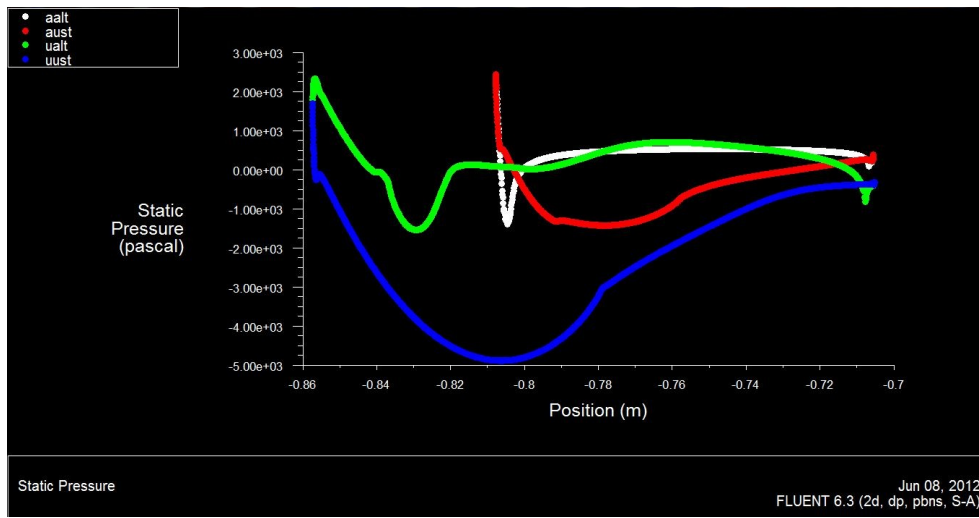
Şekil 3.7. İkili Kanat Hız Dağılımı



Şekil 3.8. İkili Kanat Akım Çizgileri

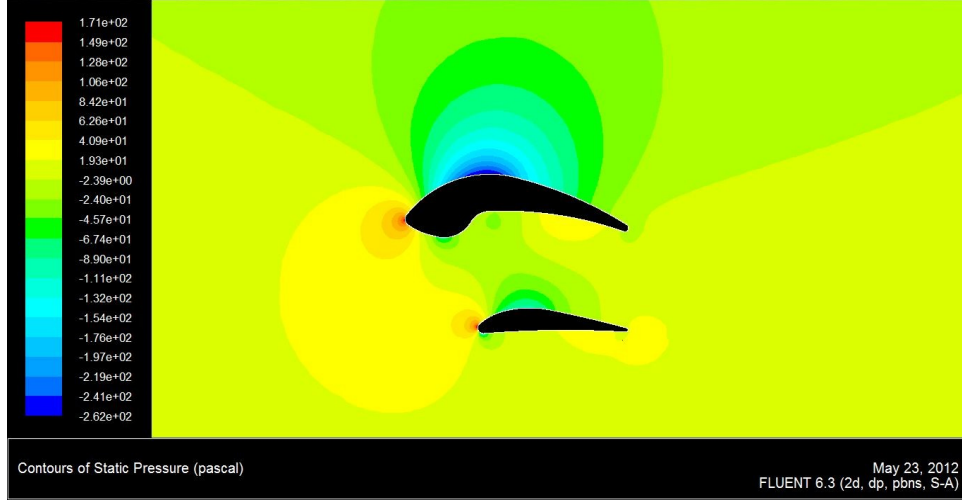
Şekiller incelendiğinde kanatların üst bölgelerinde yüksek hız alçak basınç, alt bölgelerinde ise alçak hız yüksek basıncın oluştuğu, ana kanadın alt bölgesinde bir ters akım oluştuğu (Şekil 3.8) görülmektedir.

Kanat yüzeylerinde basınç dağılımları Şekil 3.9'da verilmiştir. Basınç dağılımları incelendiğinde kanatların üst yüzeylerinde basıncın negatif alt yüzeylerinde ise pozitif olduğu görülmektedir. Bu durum kaldırma kuvvetinin olması gerektiği gibi kanat altından üste doğru olduğunu kanıtlamaktadır. İkili kanat için her iki kanadın da kaldırma kuvvetine önemli katkı yaptığı söylenebilir.



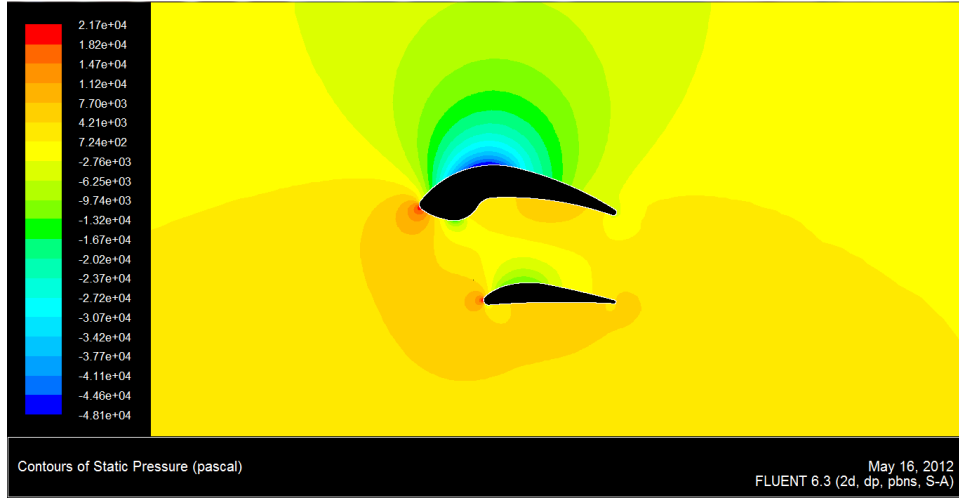
Şekil 3.9. İkili Kanat Yüzey Basınç Dağılımı

DeneySEL analizdeki basınç değerleriyle karşılaştırmak amacı ile analizler 0° hücum açısı ve 0,5 m/s akıntı hızında gerçekleştirilmiş ve kanat üzerindeki basınç dağılımı Şekil 3.10 da verilmiştir.



Şekil 3.10. İkili Kanat Basınç Dağılımı $\alpha = 0^\circ$, $U = 0,5\text{m/s}$

Ayrıca gereç ve yöntem bölümünde 0,6 m yarıçaplı kanadın 0,5 m'lik kesitindeki bağıl hız değeri 6,15 m/s olarak elde edilmişti. Bu hız değeri kullanılarak yapılan analizde kanat etrafında Şekil 3.11'da görülen basınç dağılımı elde edilmiştir.



Şekil 3.11. İkili Kanat Basınç Dağılımı $\alpha = 3^\circ$, $U = 6,15\text{ m/s}$

Yukarıda elde edilen sonuçlar 2 m/s hidrokinetik akım şartında elde edilmiştir. Aynı analizler rüzgar türbinleri için rüzgar türbinleri tasarım hızı 12 m/s hava ortamı için ($Re = 1,25 \times 10^5$) tekrarlanmıştır. Hava ortamında elde edilen karakteristik değerler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. İkili Kanadın Hava Ortamındaki Aerodinamik Özellikleri, 12 m/s
($Re = 1,25 \times 10^5$)

$\alpha(^{\circ})$	C_L	C_D	C_L/C_D
0	1,1775	0,1131	10,4111
2	1,3441	0,1259	10,6759
3	1,447	0,1346	10,7504
4	1,5148	0,1452	10,4325
6	1,5965	0,1751	9,11765
8	1,6218	0,2183	7,42923
10	1,7121	0,2555	6,70098
12	1,8253	0,2914	6,2639
14	1,9374	0,3285	5,89772
16	2,0374	0,3674	5,54545
18	2,1311	0,4094	5,20542
20	2,2048	0,4532	4,86496
22	2,267	0,5	4,534
24	2,3085	0,5497	4,19956
26	2,34	0,6039	3,87481
28	2,3487	0,6623	3,54628
30	2,3376	0,727	3,21541

Tablo 3.1 ve Tablo 3.3 değerleri mukayese edildiğinde değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Aradaki farkın Re sayısı farkından kaynaklandığı söylenebilir. Hava şartlarında Mach sayısının çok küçük olması (0,3 den küçük) nedeniyle havanın sıkışabilme özelliği göz ardı edilmiştir ve bu nedenle su ve hava ortamında benzer aerodinamik veya hidrodinamik karakteristikler elde edilmiştir. Literatür bilgilerine bakıldığında, rüzgar türbin teorilerinin hidrokinetik türbinler için de kullanılabileceği ifade edilmişti.

ii) Standart NACA4412 Kanadı

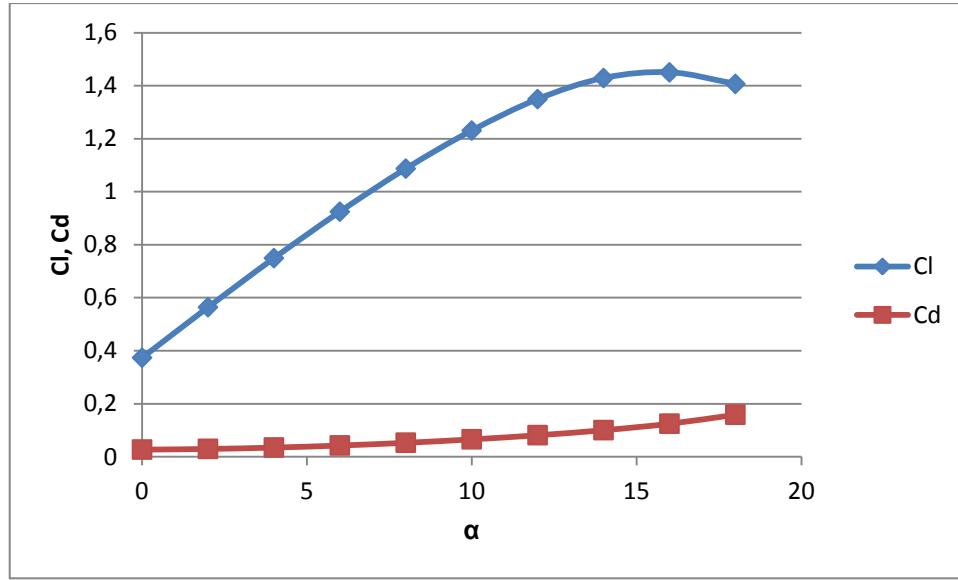
Standart kanadın 2 m/s su ortamında elde edilen sonuçları Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Standart Kanadın Su Ortamında Hidrodinamik Özellikleri

α	C_l	C_d	C_l/C_d
0	0,3739	0,0274	13,64599
2	0,5643	0,02998	18,82255
4	0,7496	0,03521	21,28941
6	0,9248	0,04298	21,51698
8	1,0873	0,0533	20,39962
10	1,2309	0,06615	18,60771
12	1,3495	0,08178	16,50159
14	1,429	0,1007	14,19067
16	1,4505	0,1251	11,59472
18	1,4068	0,159	8,847799

Standart kanat için optimum değerler; $\alpha = 6^\circ$, $C_L = 0,9248$, $C_D = 0,04298$ ve $C_L/C_D = 21,517$ olarak elde edilmiştir. Maksimum kaldırma kuvvet katsayısı 1,45 olarak 16° hücum açısında elde edilmiştir.

Hidrodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısına göre değişimleri grafiksel olarak Şekil 3.12'de verilmiştir. Kanat yaklaşık olarak 16° hücum açısından sonra stall konumuna gelmektedir.

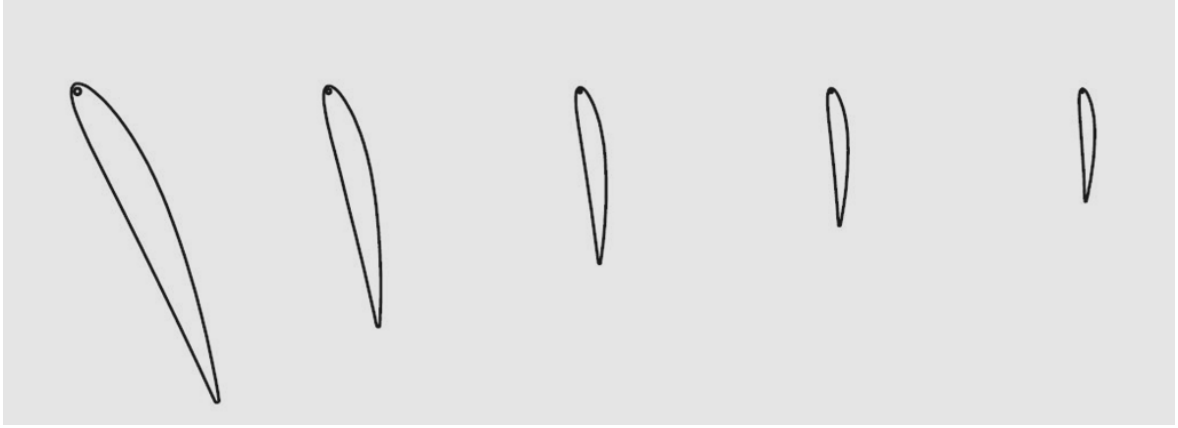


Şekil 3.12. Standart Kanat C_L , C_D - α Değişimleri

Optimum değerler kullanılarak $\lambda = 5$ uç hız oranında rotor göbek noktasından kanat ucuna doğru veter uzunlukları ve kanat açıları Tablo 3.5'de verilmiş, kanat kesitleri ise Şekil 3.13'de gösterilmiştir.

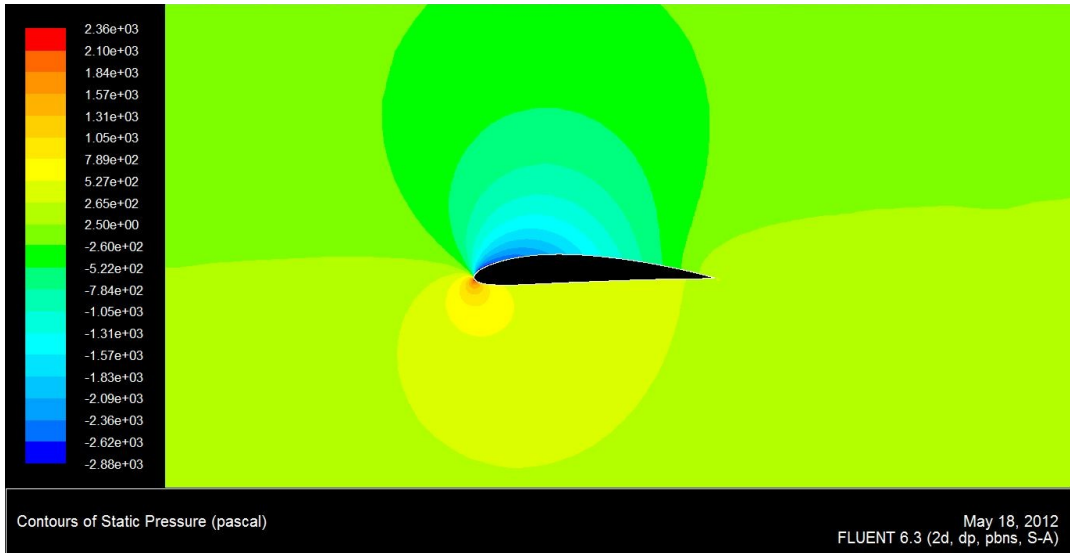
Tablo 3.5. Standart Kanat Modeli Kanat Açılı ve Kanat Veter Uzunlukları

Kanat Kesit Açılı ve Veter Uzunlukları							
$r(m)$	r/R	λ_r	$\varphi(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\Theta_p = \varphi - \alpha$	$\Theta_T(^{\circ})$	$c (m)$
0,12	0,2	1	30	6	24	22,46	0,167
0,24	0,4	2	17,71	6	11,71	10,17	0,118
0,36	0,6	3	12,29	6	6,29	4,75	0,085
0,48	0,8	4	9,36	6	3,36	1,82	0,066
0,6	1	5	7,54	6	1,54	0,00	0,054

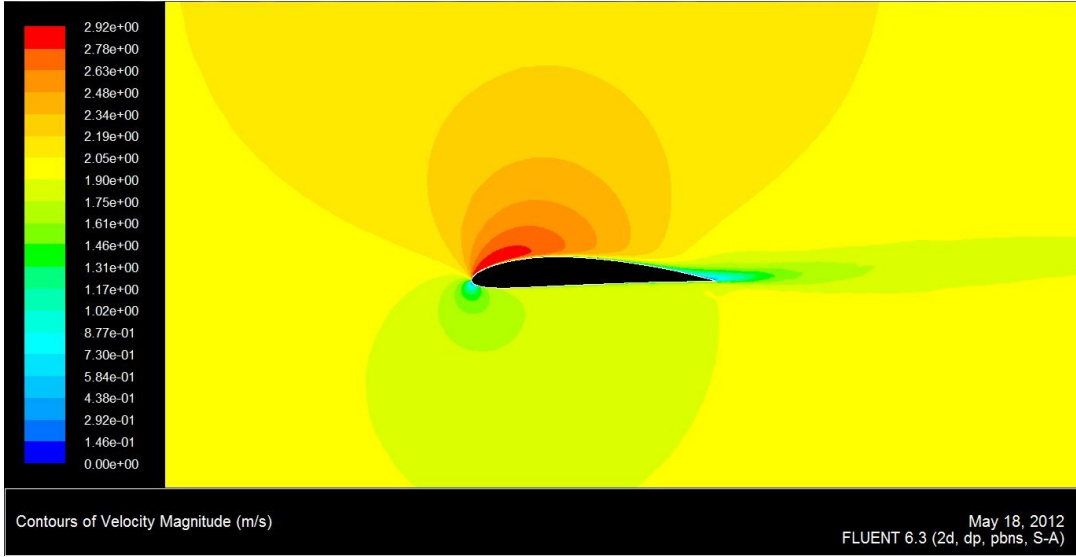


Şekil 3.13. Standart Kanat Göbekten Uca Doğru Kanat Kesit Dağılımı

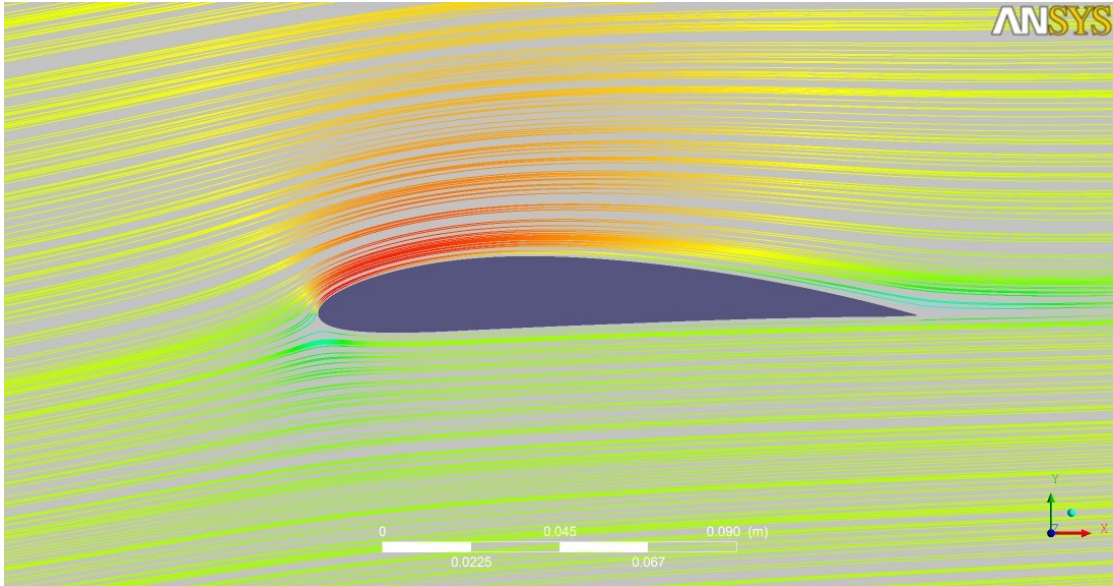
Optimum değerlerde basınç dağılımı, hız dağılımı ve akım çizgileri sırası ile Şekil 3.14 ile Şekil 3.17 arasında gösterilmiştir.



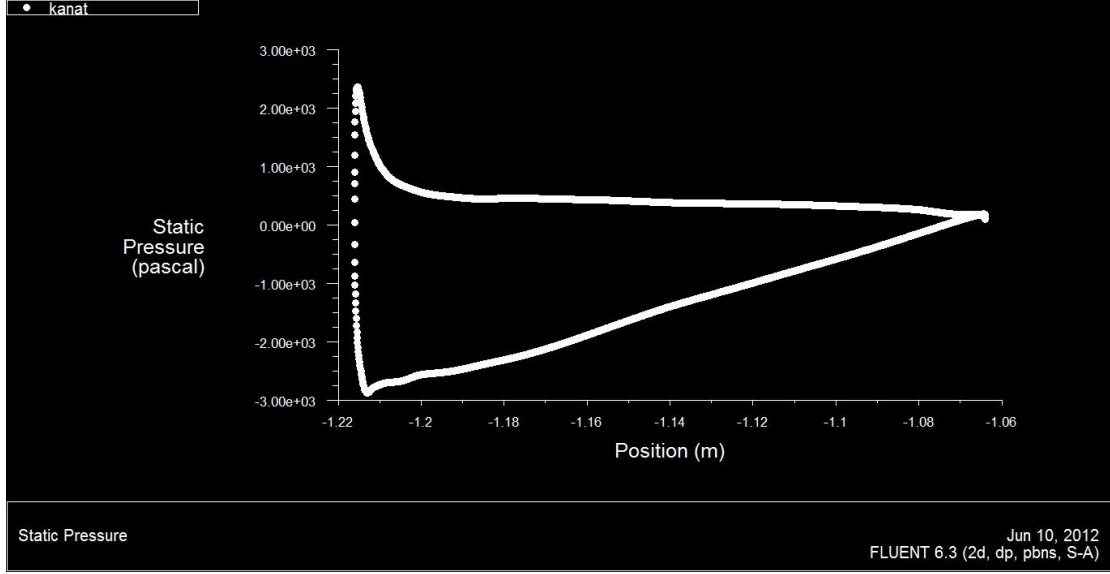
Şekil 3.14. Standart Kanat Basınç Dağılımı



Şekil 3.15. Standart Kanat Hız Dağılımı



Şekil 3.16. Standart Kanat Akım Çizgileri



Şekil 3.17. Standart Kanat Yüzey Basınç Dağılımı

İrdeleme

Hidrokinetik ve rüzgar türbinleri tasarımında kanatların tasarım kriteri olan C_L/C_D değerini maksimum yapan geometrik boyutlar, hücum açısı ve hidrodinamik kuvvet katsayıları, C_L ve C_D ele alınan kanatlar için belirlenmiştir. İkili kanat için bu değerler belirlenirken kanatların birbirlerine göre konumları ve veter uzunlukları değiştirilerek hangi konumda maksimum C_L/C_D değerine ulaşıldığı belirlenmiştir.

Bu oran;

- İkili kanat için veter uzunluklarının birbirine oranı olan $c_1/c_2 = 0,671$, kanatlar arasındaki mesafenin kısa kanat veter uzunluğuna oranı $h/c_1 = 0,667$ ve hücum açısının 3° olması durumunda C_L/C_D maksimum değere, $12,05'$ de ulaşmıştır. Bu değerdeki kaldırma kuvveti katsayısı olan $1,6706$ değeri ve 3° hücum açısı ve kanat uç hızının serbest akış hızına oranı olan λ değerinin 5 kabul edilmesiyle kanat kesitleri oluşturulmuştur.
- Standart kanat, NACA4412 için, optimum değerler ; $\alpha = 6^\circ$, $C_L = 0,92$, $C_D = 0,04$ ve $C_L/C_D = 21,51$ olarak bulunmuştur.
- İkili ve standart kanat için kanatların üst yüzeylerinde basınç değerleri negatif, alt yüzeylerinde ise pozitif olarak oluşmaktadır. İkili kanat için kanadın üst yüzeyinde basınç değerinin $-4,89 \times 10^3$ Pa, hız değerinin ise $3,38-3,56$ m/s değerlerinde olduğu görülmüştür. Bu değerler standart kesitli kanatta $-2,62 \times 10^3$ Pa ve $2,78-2,92$ m/s olarak elde edilmiştir.

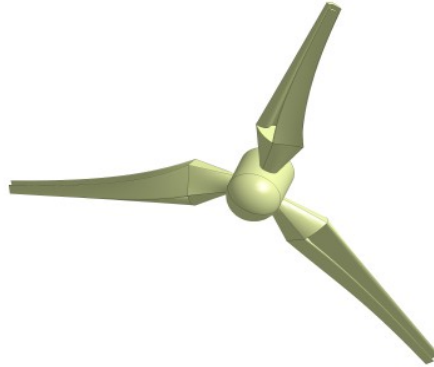
Sayısal analizler 1 m/s ve 1,5 m/s ($Re=1,51 \times 10^5$, $2,25 \times 10^5$, $3,02 \times 10^5$) akıntı hızlarında tekrarlanmış, bu Reynolds sayısı sınırları içerisinde sonuçlara etkisi ihmal edilebilir mertebede olduğu görülmüştür.

3.2.2. Üç boyutlu analizler

Yukarıda iki boyutlu akım şartlarında elde edilen optimum değerler kullanılarak oluşturulan modeller ile üç boyutlu analizler yapılmıştır. Üç boyutlu analizde bağımsız parametre olarak uç hız oranı, λ alınmış ve bu değere göre hidrodinamik karakteristikler belirlenmiştir.

i) İkili Kanat 3D Analizleri

Kanat kesitlerinin birleştirilmesi sonucu kökten uca doğru burulan ve darlaşan ikili kanat modeli Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. İkili Kanat Modeli

Programda akış hızı olarak 2 m/s tanımlanmış ve uç hız oranı 2,5 değerinden 5,5 değerine kadar değiştirilerek analizler yapılmıştır. Elde edilen karakteristik değerler Tablo 3.6'da verilmiştir.

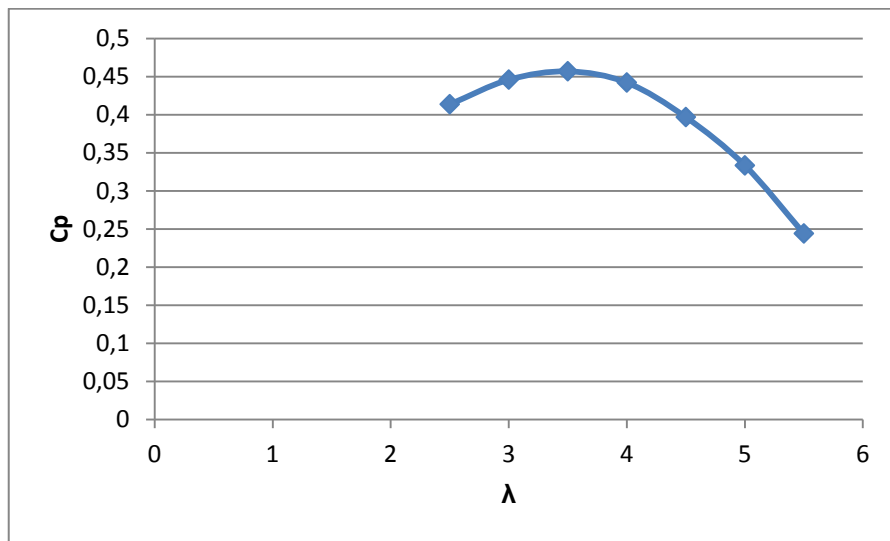
Tablo 3.6. İkili Kanat Performans Değerleri U = 2 m/s

Uç Hız Oranı(λ)	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Tork (Nm)	224,1	201,33	176,8	149,7	119,43	90,3	60,11
Devir (dev/dk)	79,55	95,5	111,4	127,3	143,2	159,2	175
Güç(W)	1867,5	2013,3	2062,7	1996	1791,45	1505	1102,0
Güç $1/2\rho V^3 A$	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8
Güç Kat., C_p	0,414	0,446	0,457	0,442	0,397	0,333	0,244

Tablodan görüldüğü gibi ikili kanat için maksimum güç katsayısı 0,457 olarak yaklaşık $\lambda = 3,5$ uç hız oranında elde edilmiştir. Bu uç hız oranı standart 3 palalı bir rüzgar türbini için maksimum verimin ulaştığı $\lambda = 5,0$ değerinden oldukça küçüktür. Dolayısı ile ikili kanatlı bir hidrokinetik veya rüzgar türbini daha küçük akıntı ve rüzgar hızlarında çalışabilir.

Tork değerinin maksimum olduğu λ değeri tablodan tam olarak gözükmemekle beraber uç hız oranının 2,5 değerinden daha küçük değerlerde ulaşılabileceği tahmin edilebilir.

Kanat uç hız oranına göre güç katsayısı (verim) değişimi Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19. İkili Kanat C_p - λ Değişimi

Analizde ayrıca deneysel analizdeki uç hız oranlarıyla aynı değerde karşılaştırma yapabilmek için uç hız oranı 3,46 iken tork, güç, güç katsayısı değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 3.7'de verilmiştir.

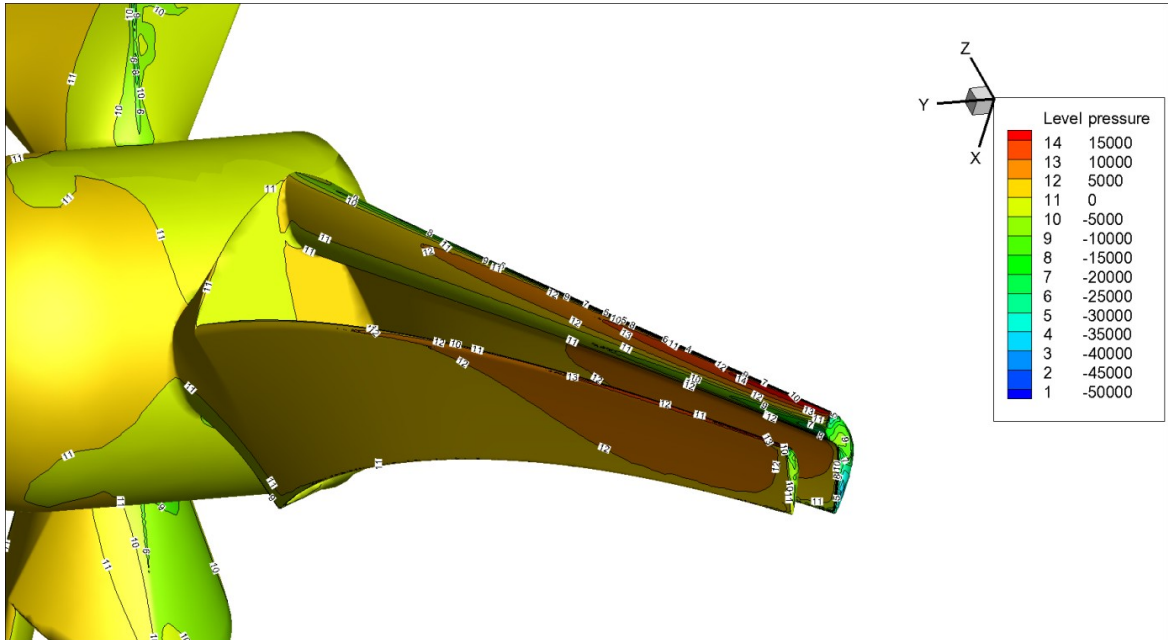
Tablo 3.7. İkili Kanat Performans Değerleri $U = 2 \text{ m/s}$, $\lambda = 4,36$

Uç Hız Oranı	4,36
Tork(Nm)	126,2
Devir(dev/dak)	138,7
Güç(W)	1833
Güç($1/2\rho V^3A$)	4514,85
Güç Kat., C_p	0,406

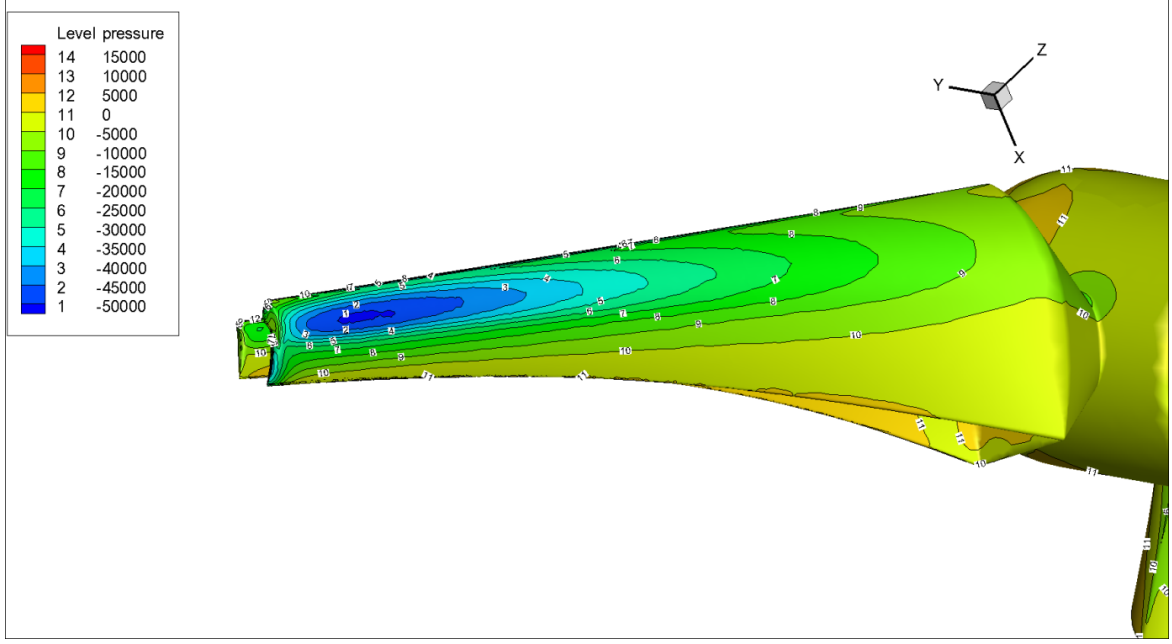
Basınç Dağılımları ve Kaviteasyon İrdelemesi

Hidrokinetik türbinler su altında çalıştıkları için bazı durumlarda türbin üzerindeki basınç değeri suyun buharlaşma basıncının altına düşerek kaviteasyon tehlikesine maruz kalabilmektedirler. Hidrokinetik türbin kanadı tasarımında bu etki göz önünde bulundurulmalıdır.

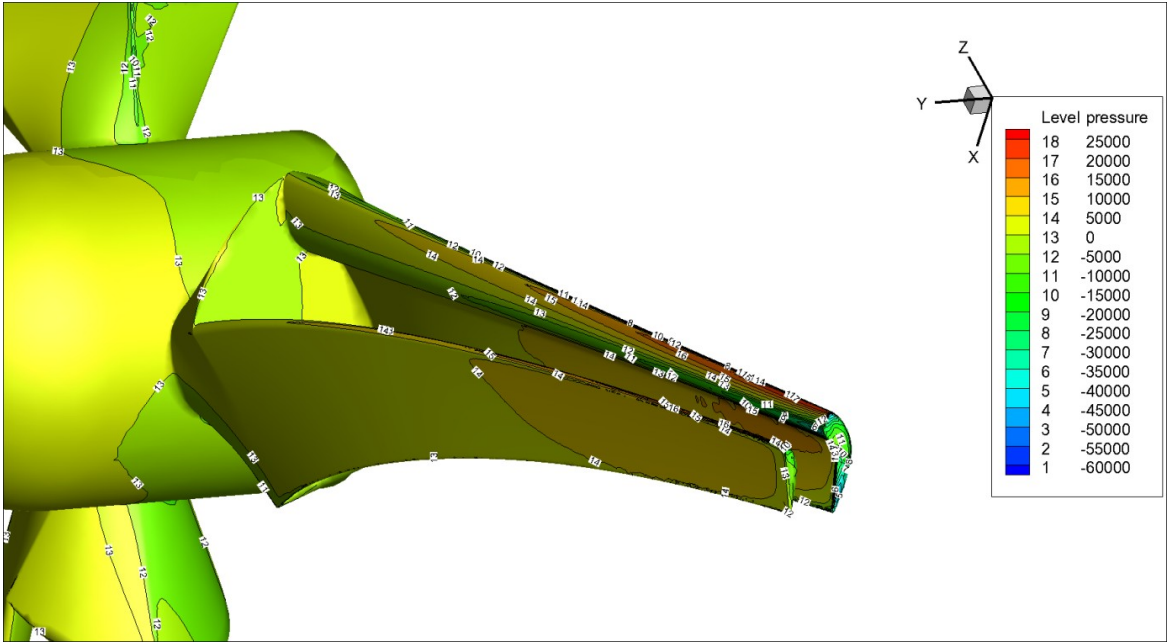
Şekil 3.20 ile Şekil 3.27 arasında kaviteasyon etkisini incelemek için farklı uç hız oranı değerlerinde kanat arka ve ön yüzeylerindeki basınç dağılımları verilmiştir.



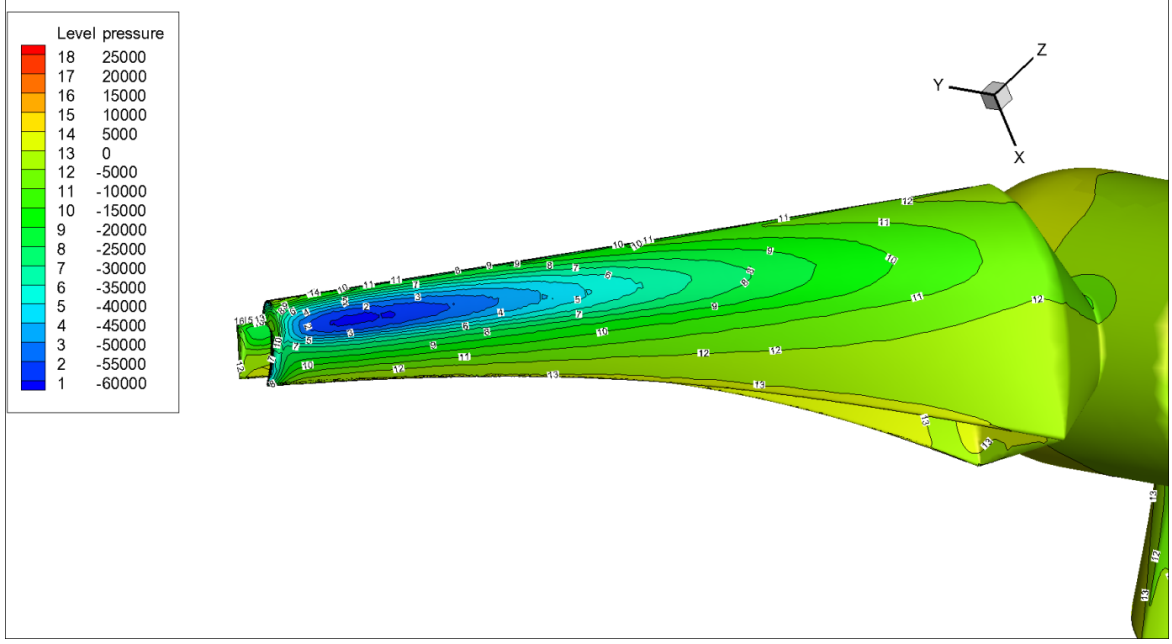
Şekil 3.20. İkili Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 3$



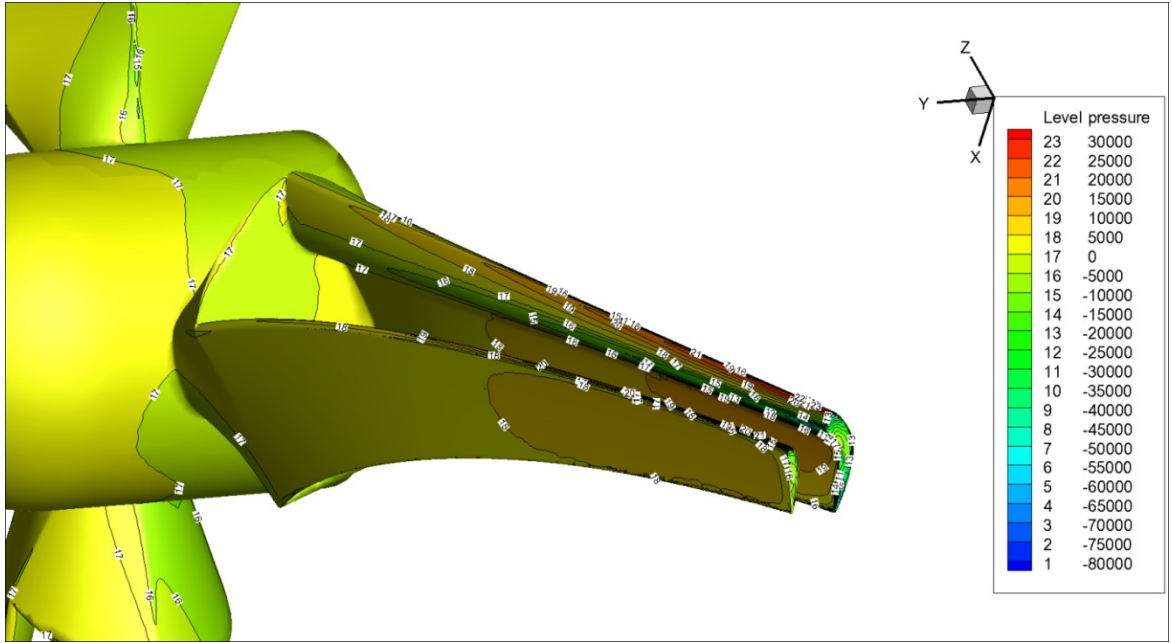
Şekil 3.21. İkili Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 3$



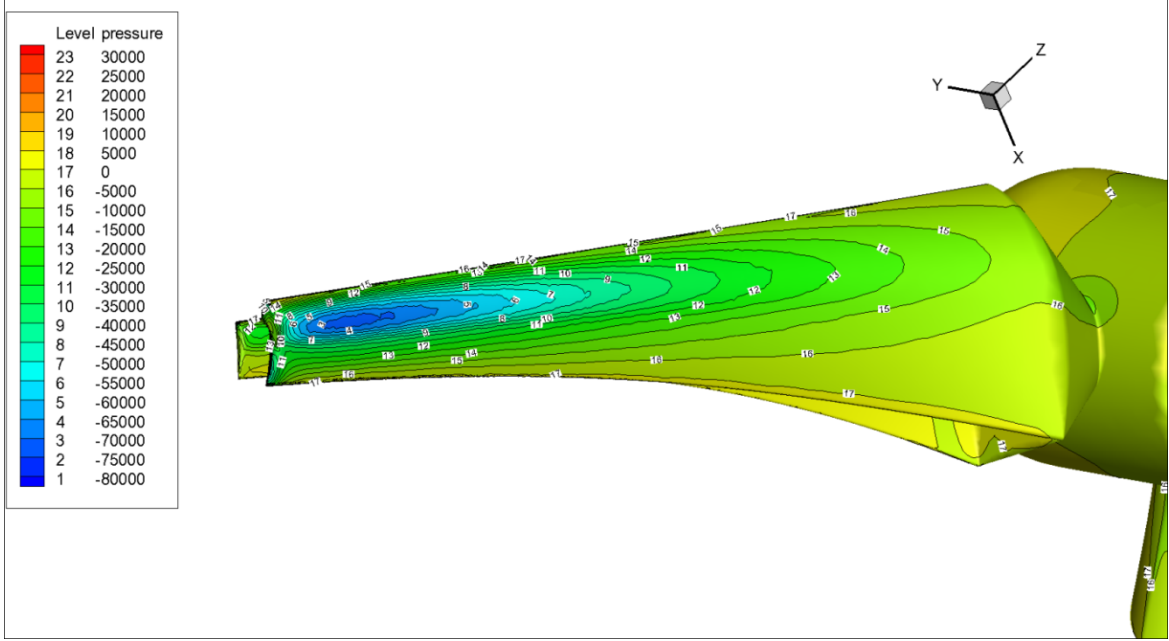
Şekil 3.22. İkili Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 3,5$



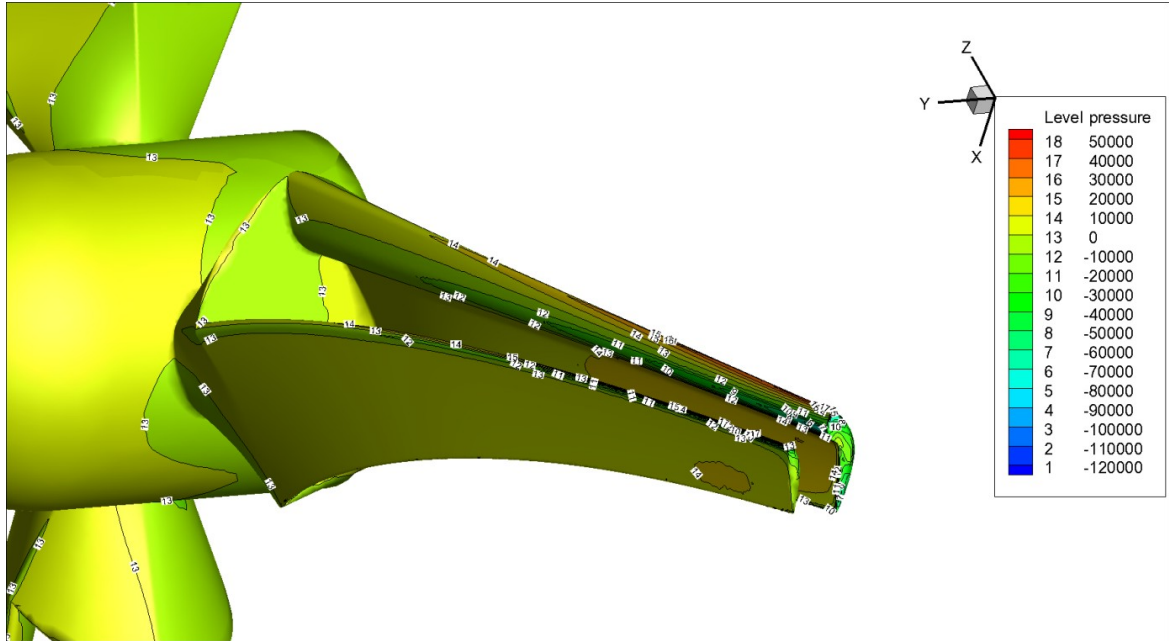
Şekil 3.23. İkili Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 3,5$



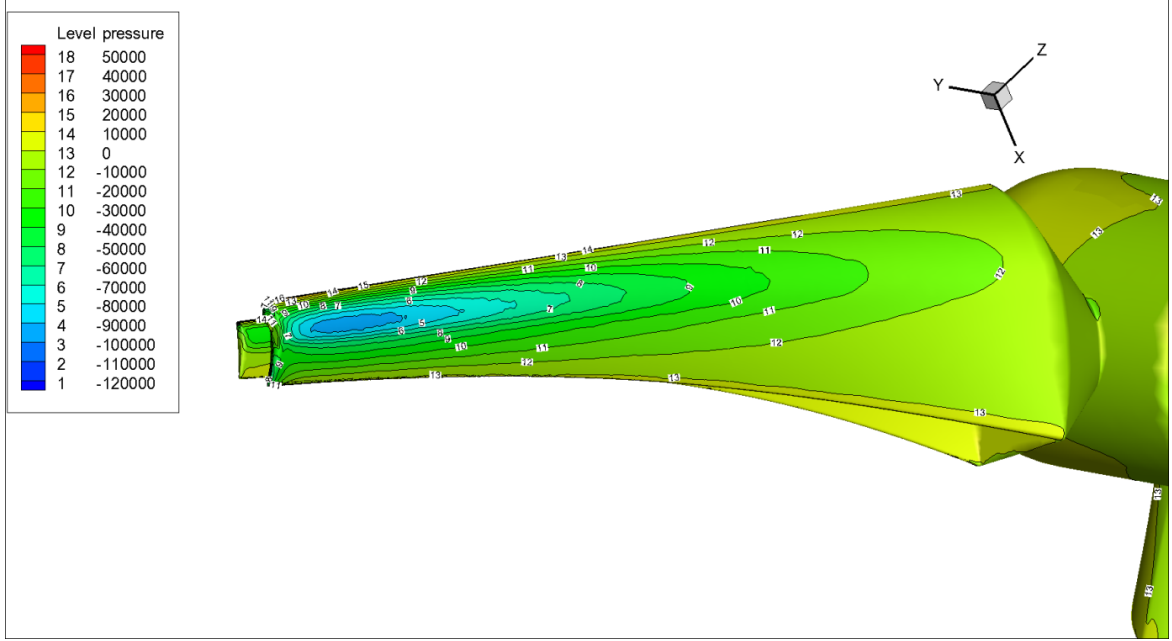
Şekil 3.24. İkili Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 4$



Şekil 3.25. İkili Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 4$



Şekil 3.26. İkili Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5$

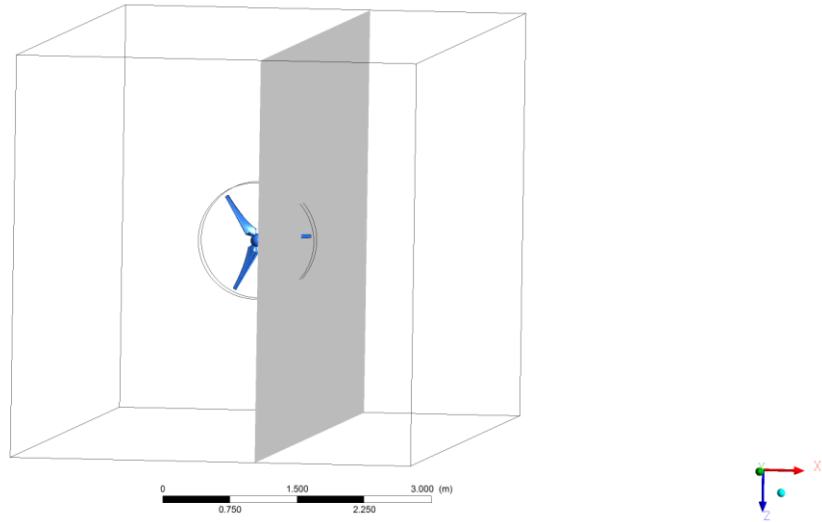


Şekil 3.27. İkili Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5$

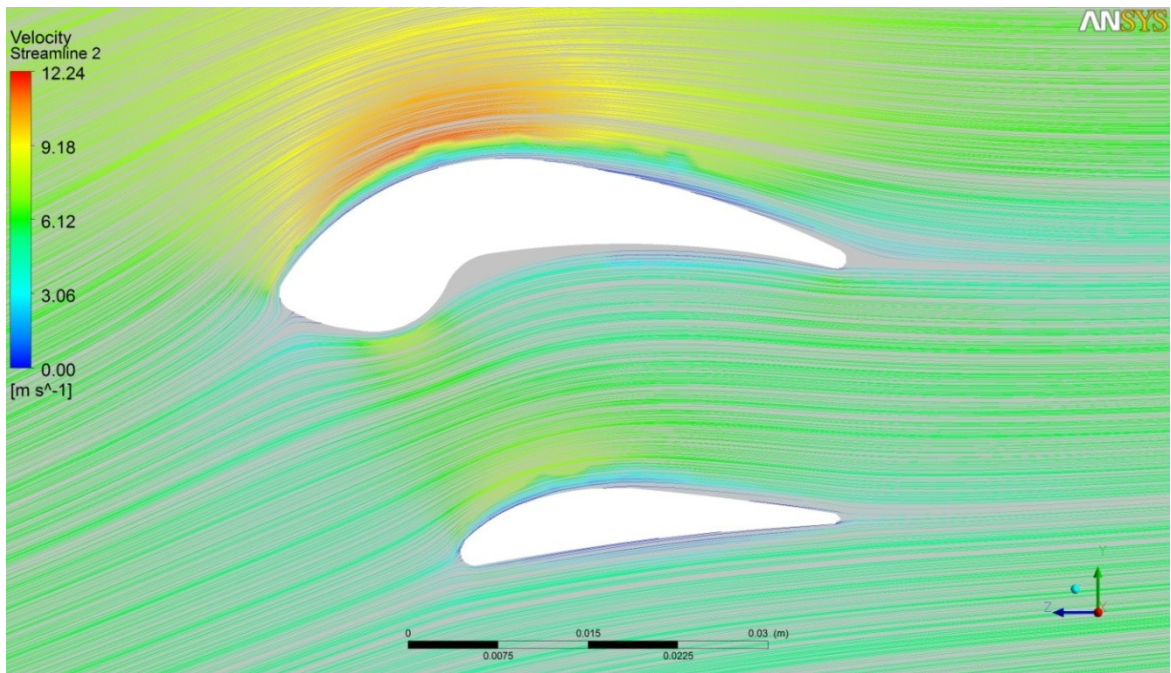
Skalada mutlak basınç olarak verilen basınç dağılımlarına bakıldığında kanadın ön yüzeyinde basınç değerleri pozitif, arka yüzeyinde ise negatiftir. Kaldırma kuvvetini ve diğer aerodinamik kuvvetleri oluşturan bu basınç farkı şekiller üzerinden görülmektedir. Kanatların arka yüzeylerine bakıldığında kavitasyon açısından kritik noktaların kanadın uç kısımlarına doğru olduğu görülmektedir. Kanadın maksimum güç katsayısını verdiği 3,5 uç hız oranında veya diğer uç hız oranlarında basınç suyun buharlaşma basıncının altına düşmemektedir. Örnek olarak $\lambda = 3,5$ için kanadın arka yüzeyinde uç kısmına doğru oluşan kritik basınç değeri skalada 2 numarayla gösterilen -55000, -60000 Pa aralığındadır. 20°'de suyun buharlaşma basıncı 2300 Pa değerindedir. Kanat yüzeyindeki (101300-55000 = 46300) ve (101300-60000 = 41300) değerleri buharlaşma basıncının altında olmadığından kavitasyon oluşmayacağı görülmektedir.

Kanat Kesitindeki Basınç, Türbülans, Hız Dağılımları

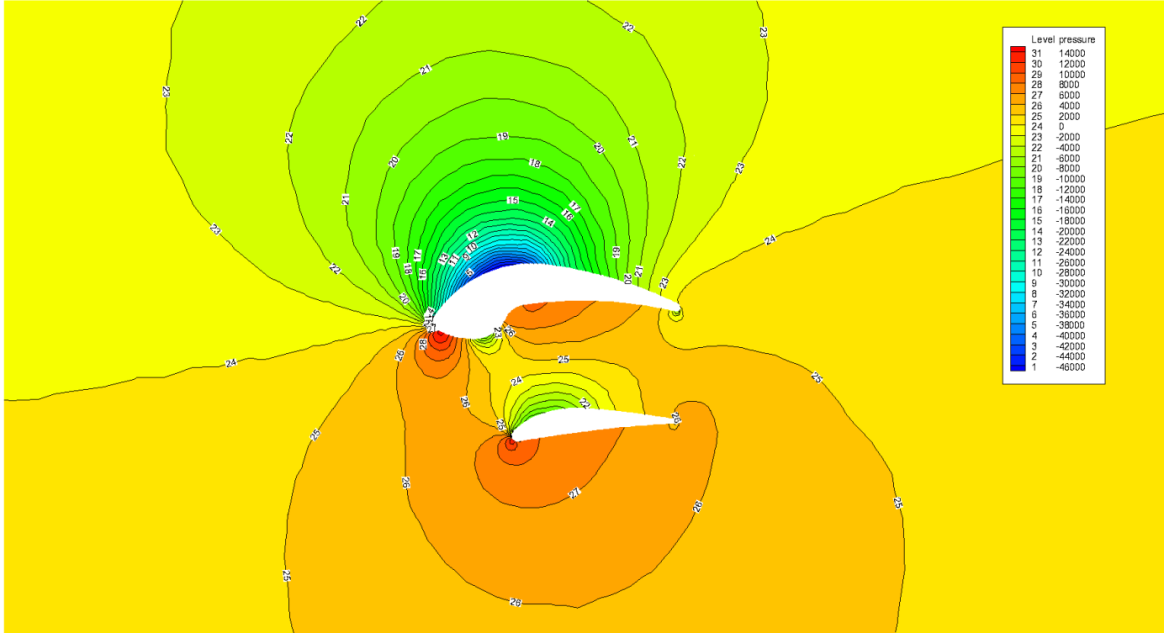
Şekil 3.29'dan Şekil 3.37'ye 0,6 m yarıçaplı türbinin 0,5 m'lik kısmından alınan bir kesitte kanat üzerindeki akım çizgileri, basınç ve türbülans değerleri görülmektedir. Kesitin 0,5 m'lik kısmından alınmasının nedeni kritik basınç değerlerinin o bölge civarında oluşmasındandır. Şekil 3.28'de alınan kesit görülmektedir.



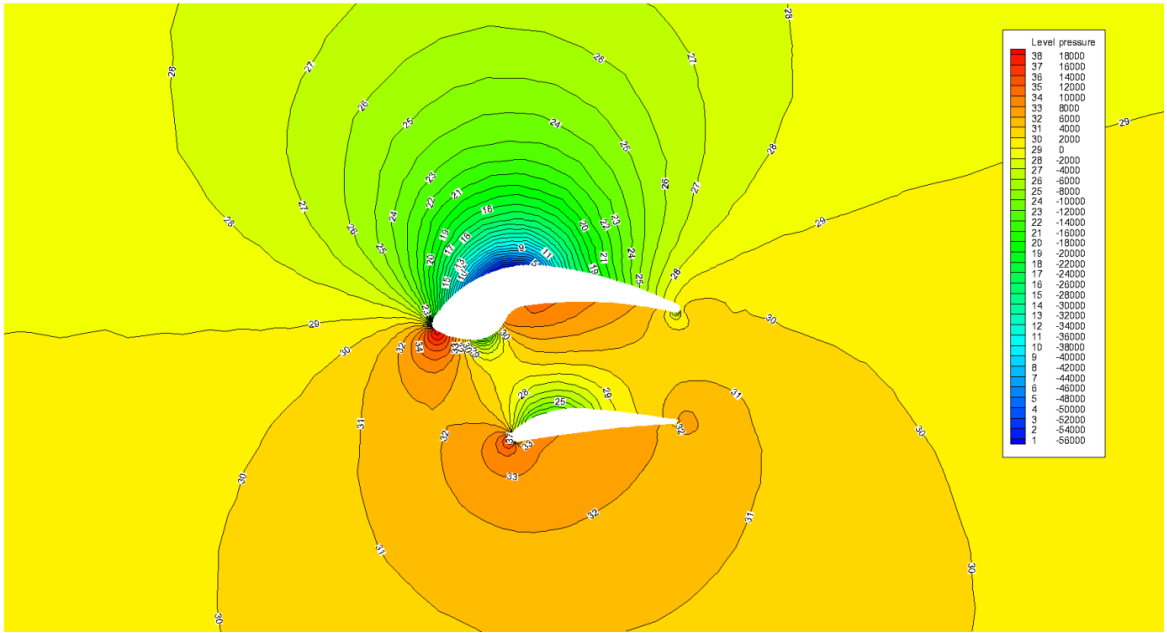
Şekil 3.28. İkili Kanat 0,5 m'den Alınan Kesit



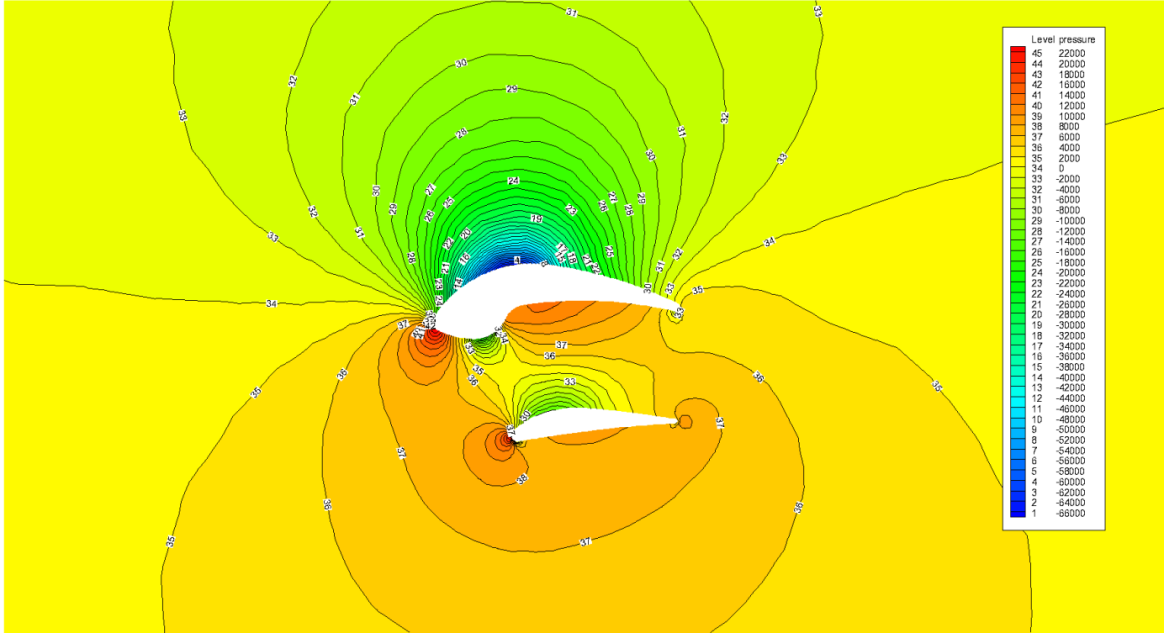
Şekil 3.29. İkili Kanat 0,5 m Kesit Akım Çizgileri



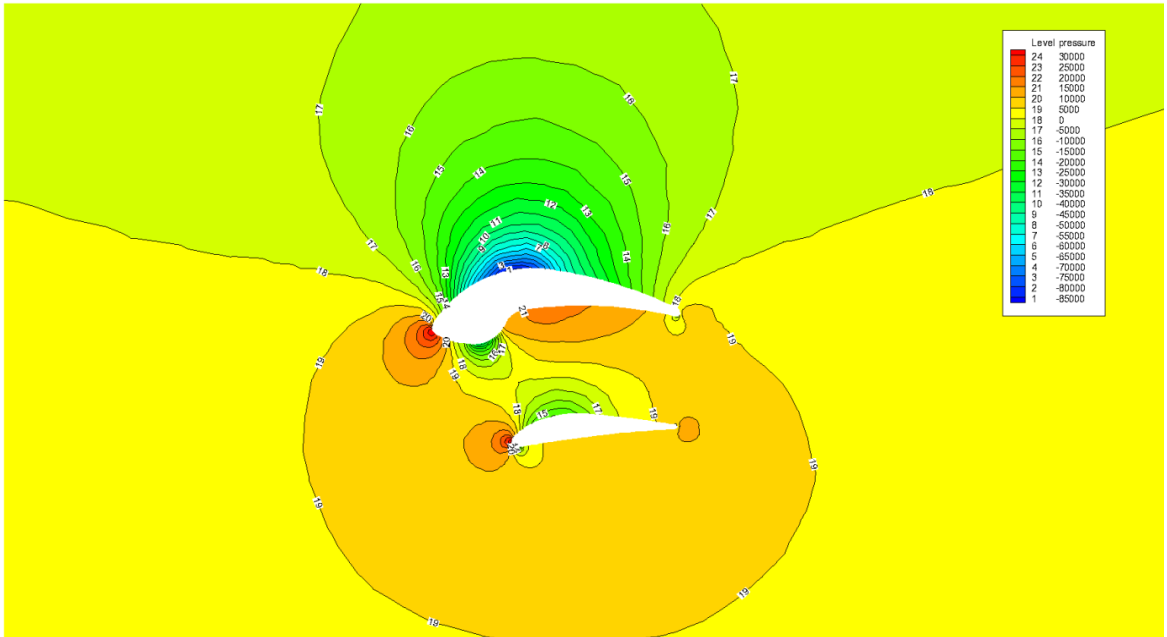
Şekil 3.30. İkili Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 3$



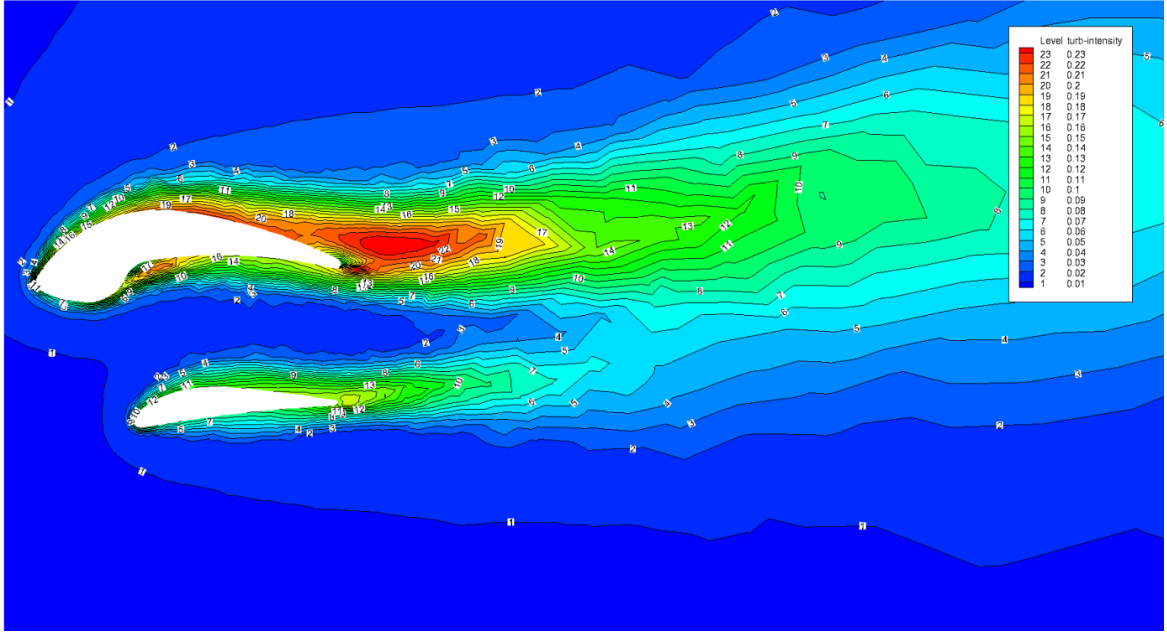
Şekil 3.31. İkili Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 3,5$



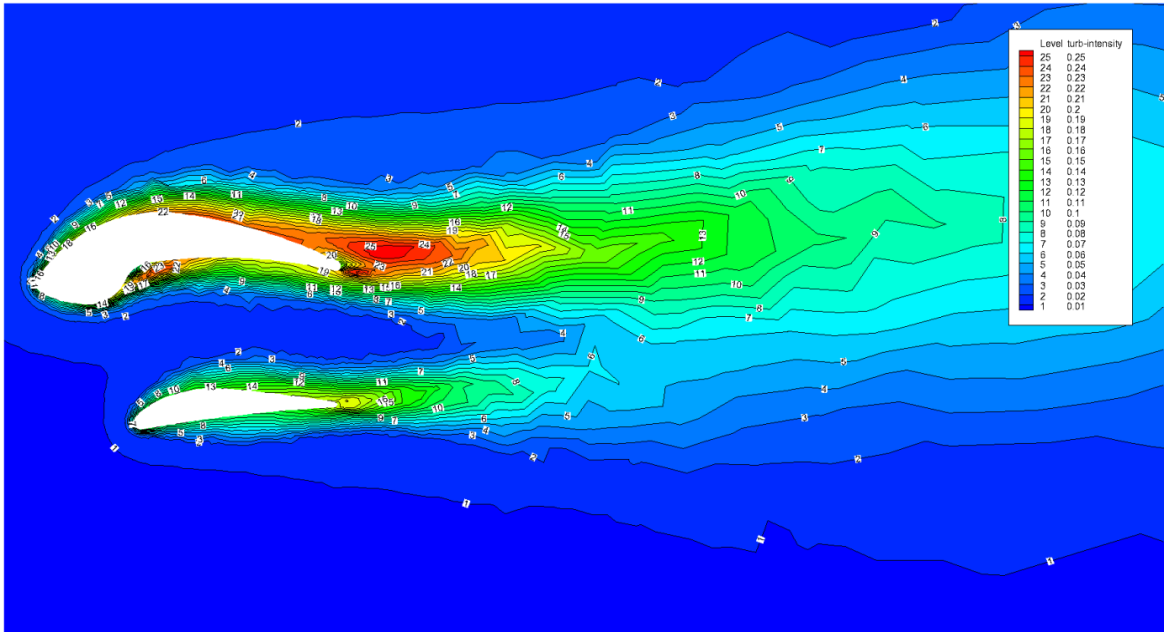
3.32. İkili Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 4$



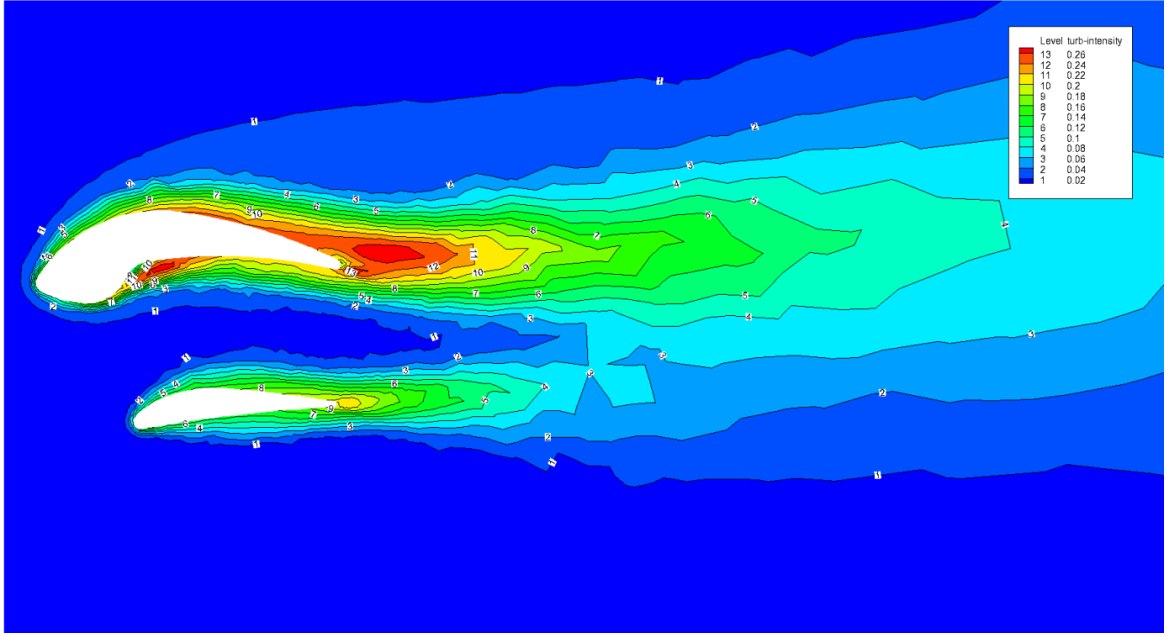
Şekil 3.33. İkili Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 5$



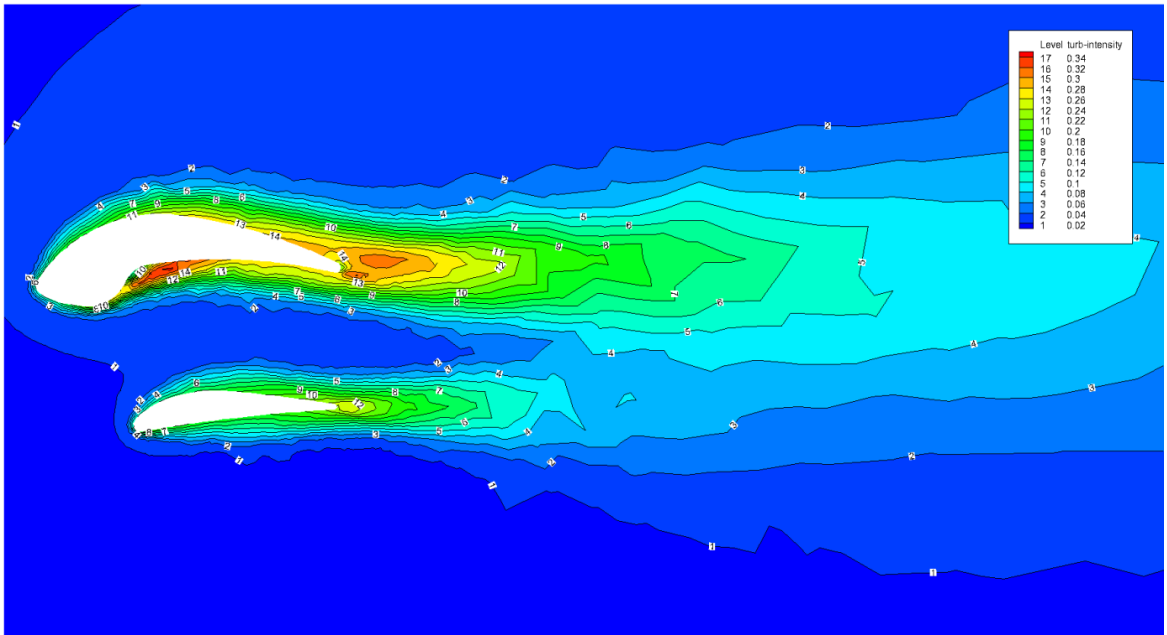
Şekil 3.34. İkili Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 3$



Şekil 3.35. İkili Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 3,5$



Şekil 3.36. İkili Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 4$

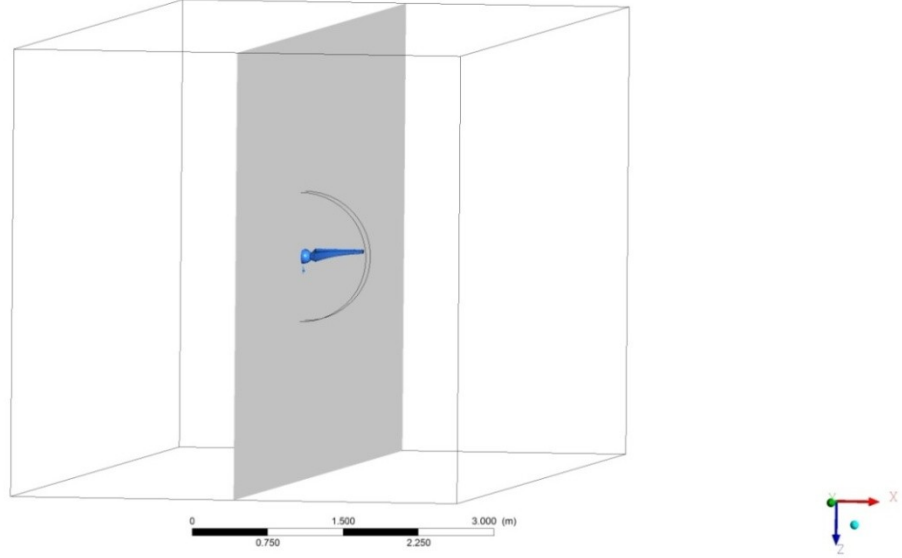


Şekil 3.37. İkili Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 5$

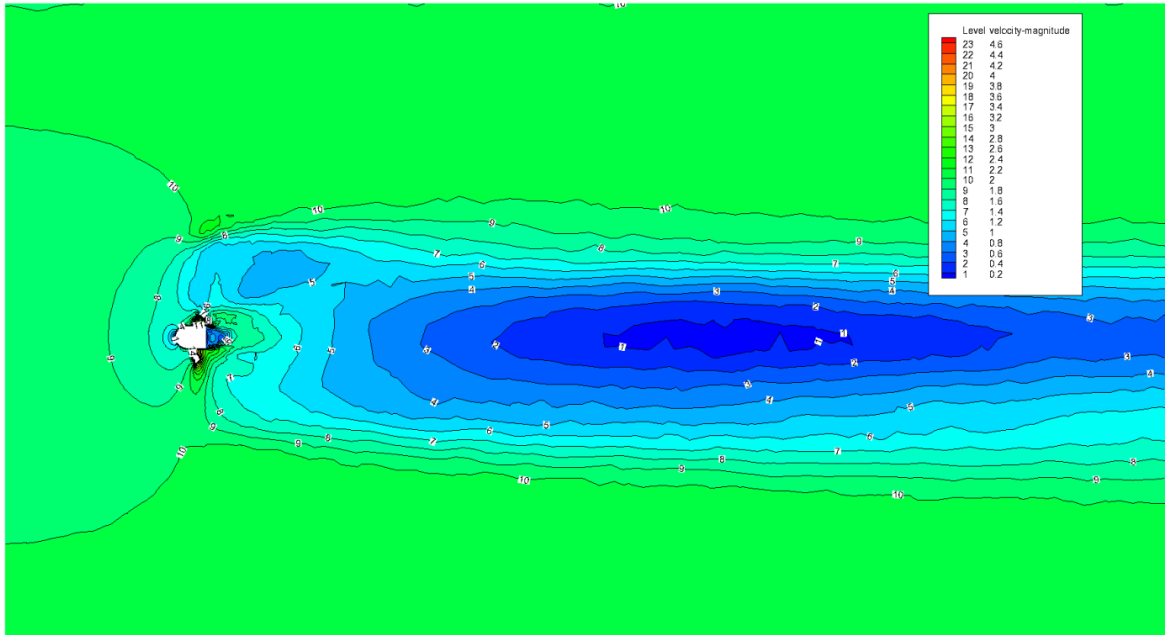
Basıncın kritik olduğu yerler üç boyutlu kanat yüzeyinden de görüleceği gibi üst kanadın üst-orta kısımlarıdır. λ arttıkça basınç değeri hız arttığından dolayı azaldığı görülmektedir. Türbülans yoğunluğu λ arttıkça artmaktadır. Türbülansın yoğun olduğu noktalar kesitteki akım çizgilerinin hareketinden de görüleceği gibi üst kanadın alt yüzeyindeki boşlukta ve kanatların arka kısmındaki bölgelerdir.

Şekil 3.39'dan Şekil 3.42'ye Şekil 3.38'de gösterildiği gibi kanadın ekseninden alınan bir kesitte kanat arkasındaki hız dağılımları incelenmiştir.

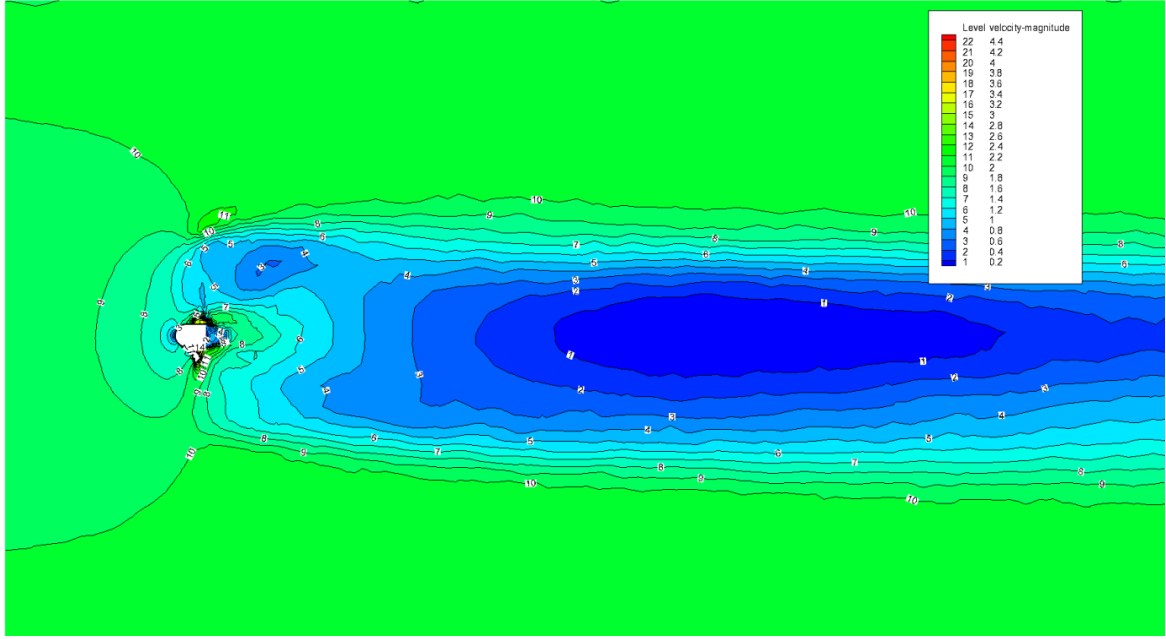
ANSYS



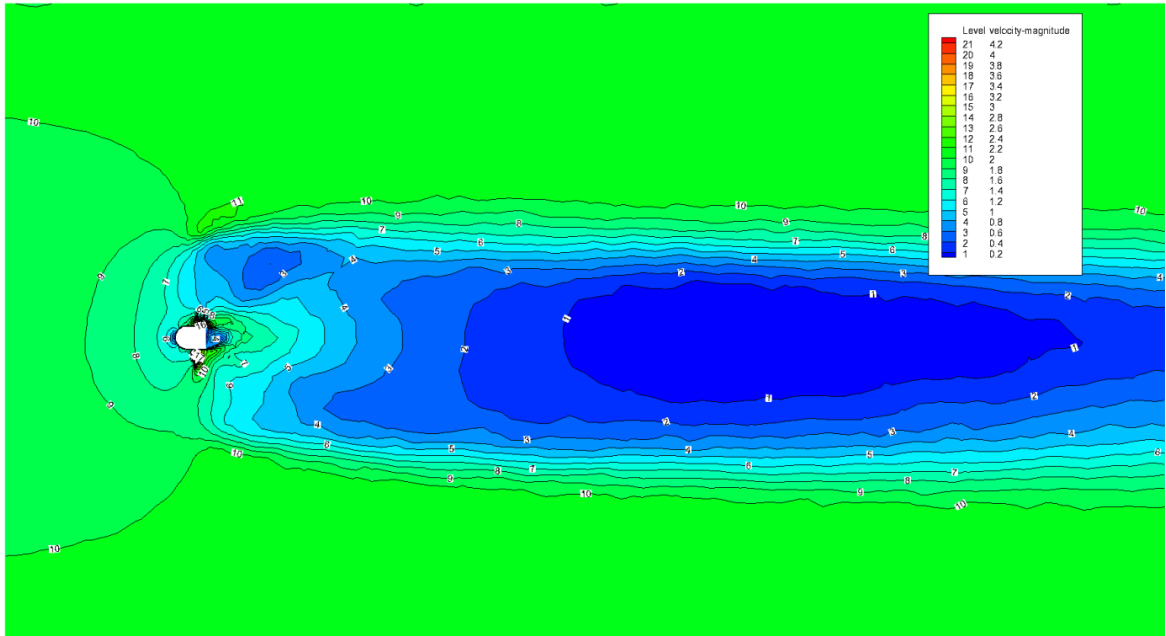
Şekil 3.38. İkili Kanat Merkezden Alınan Kesit



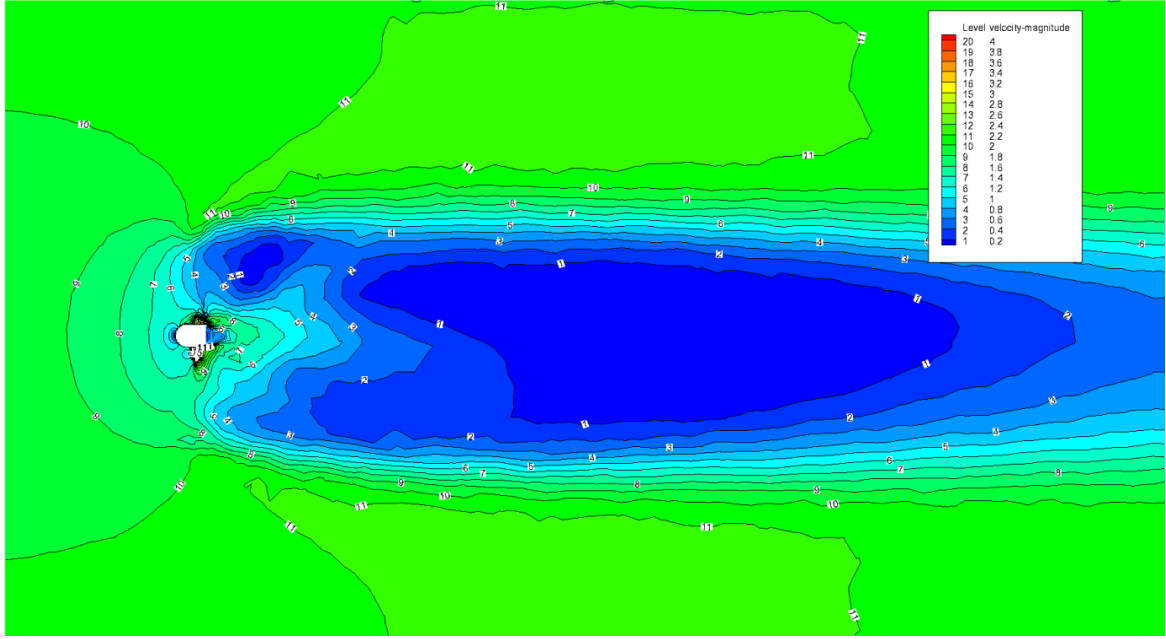
Şekil 3.39. İkili Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 3$



Şekil 3.40. İkili Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 3,5$



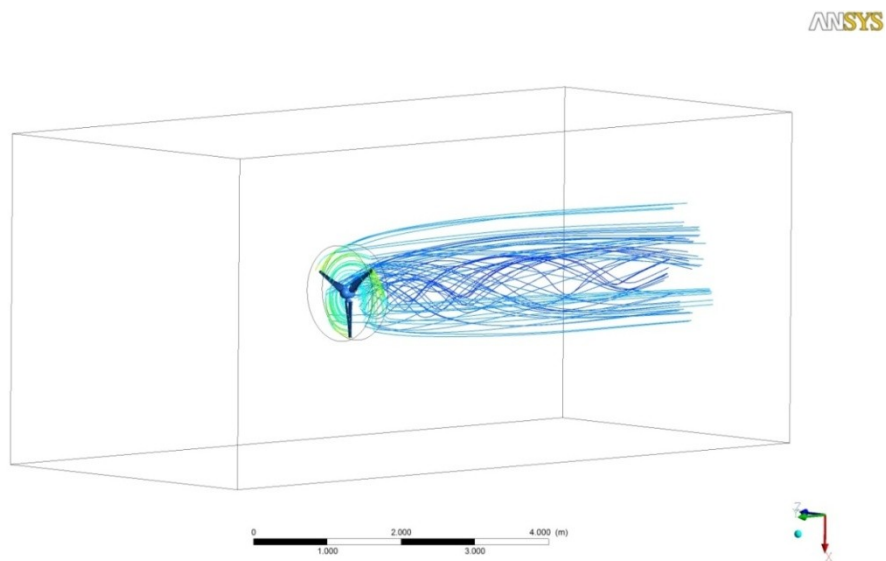
Şekil 3.41. İkili Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 4$



Şekil 3.42. İkili Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 5$

Şekillerden de görüleceği gibi suyun akış hızı 2 m/s iken türbinin arka kısımlarında hız belirli bölgelerde 0,2 m/s hıza kadar düşmektedir. Birden çok türbinin türbin tarlası şeklinde yerleştirileceği bölgelerde kanadın arka kısmındaki bu etki önem arz etmektedir. λ 'nın artmasıyla kanat devri arttığı için arka kısımdaki düşük hız bölgeleri de artmaktadır.

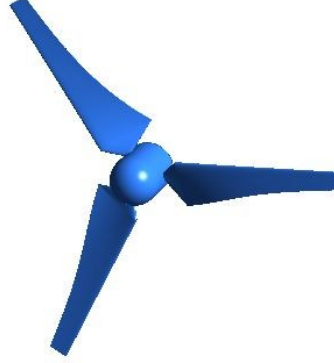
Şekil 3.43'de ise $\lambda = 3,5$ değerinde kanadın arka kısmındaki akım çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 3.43. İkili Kanadın Arka Kısımındaki Akım Çizgileri $\lambda = 3,5$

ii) Standart Kanat (NACA4412) Üç Boyutlu Analizler

NACA 4412 kanat kesitlerinin birleştirilmesi sonucu oluşturulan kanat modeli Şekil 3.44'deki gibidir.

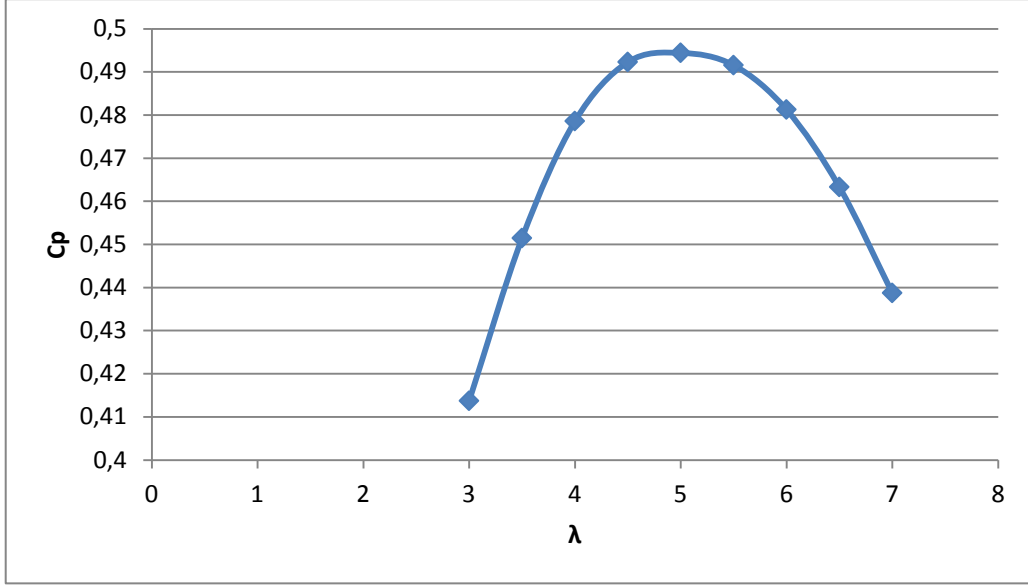


Şekil 3.44. Standart Kanat Modeli

Diğer kanat analizlerindeki gibi Tablo 3.8'de standart kanat için farklı devir sayılarında elde edilen tork, güç, güç katsayısı değerleri görülmektedir.

Tablo 3.8. Standart Kanat Performans Değerleri U = 2 m/s

Uç Hız Oranı	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Tork (Nm)	186,8	174,7	162,05	148,17	133,93	121,05	108,64	96,54	84,89
Devir dev/dk	95,49	111,41	127,32	143,24	159,15	175,07	190,99	206,9	222,82
Güç (W)	1867,8	2038,1	2160,6	2222,5	2232,2	2219,2	2172,8	2091,7	1980,8
Güç $1/2\rho V^3 A$	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8
Güç Kat. C_p	0,414	0,451	0,479	0,492	0,494	0,492	0,481	0,463	0,439

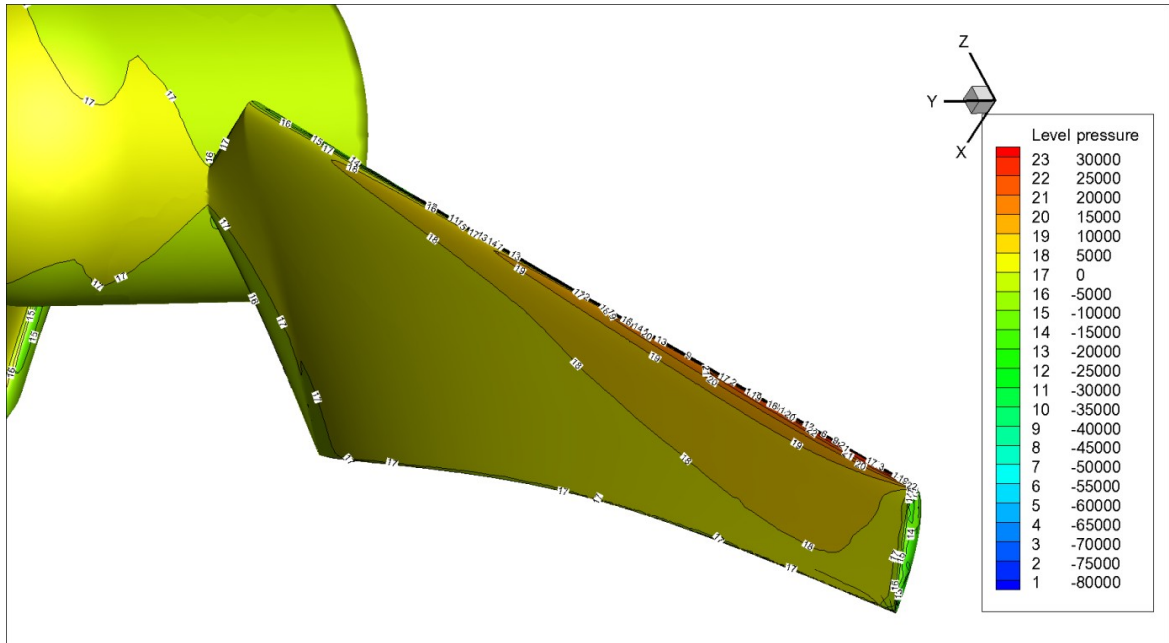


Şekil 3.45. Standart Kanat C_p - λ Değeri

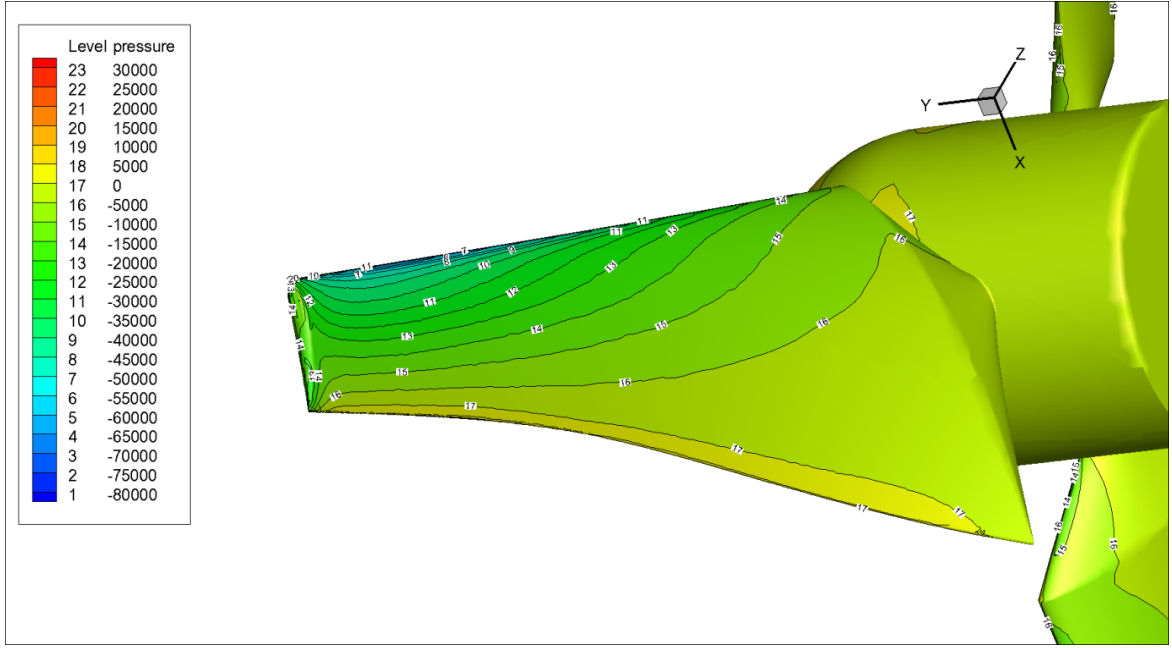
Görüldüğü gibi maksimum güç değeri tasarım kriteri olan 5 λ değerinde oluşmaktadır.

Basınç Dağılımları ve Kaviteasyon İrdelemesi

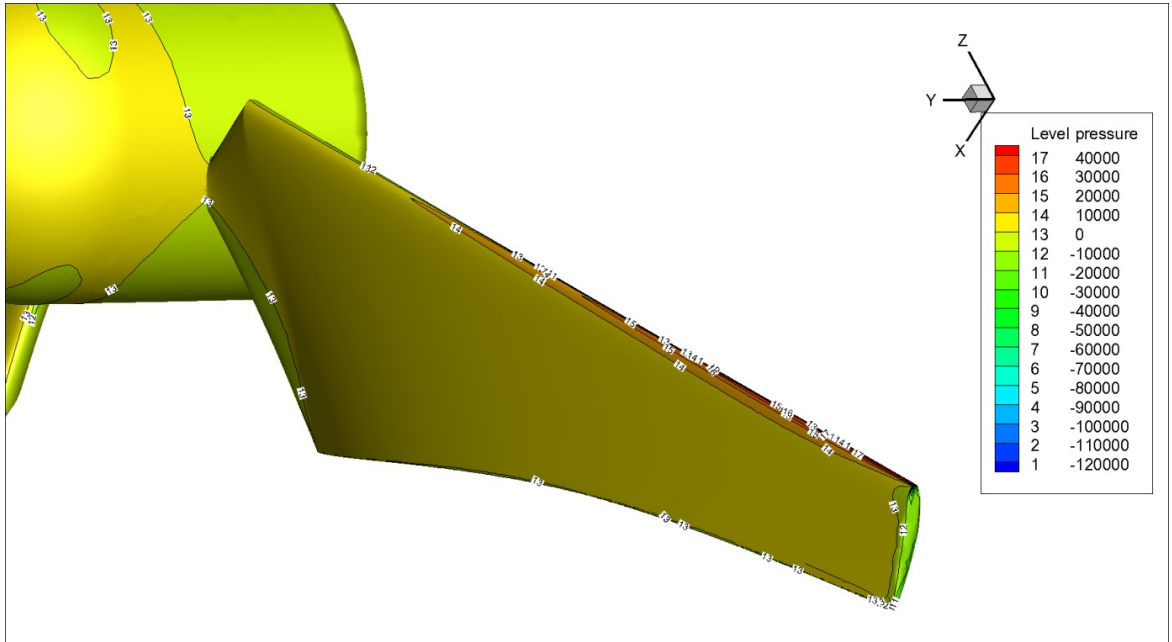
Farklı devir sayılarında kanadın ön ve arka kısımlarında oluşan basınç dağılımları Şekil 3.46 ile Şekil 3.51 arasında verilmiştir.



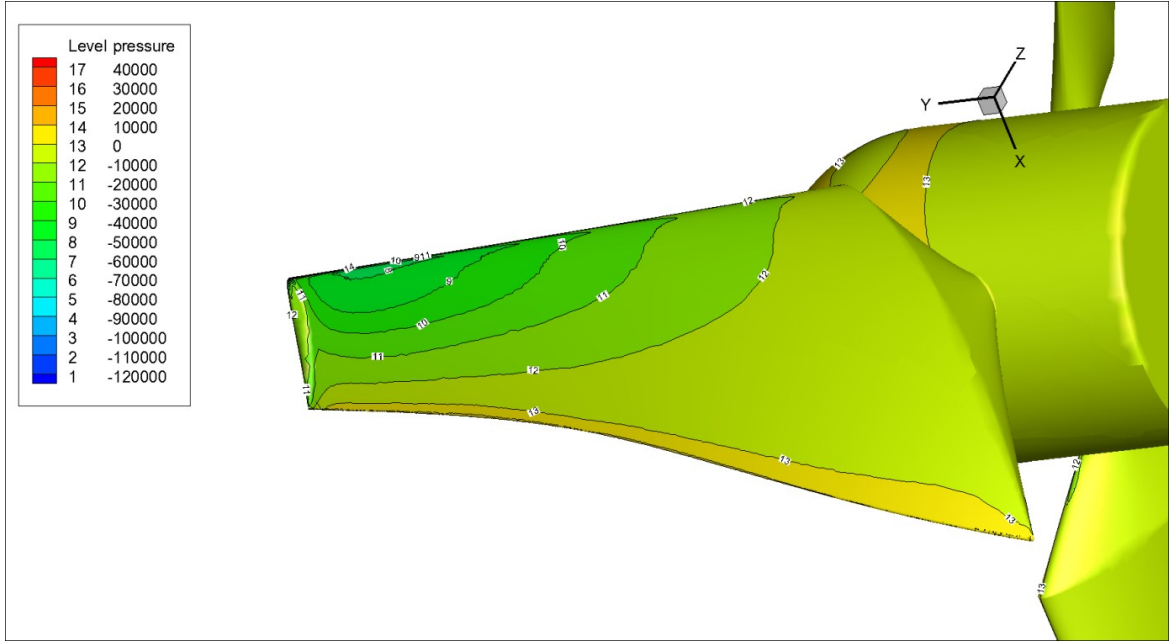
Şekil 3.46. Standart Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 4$



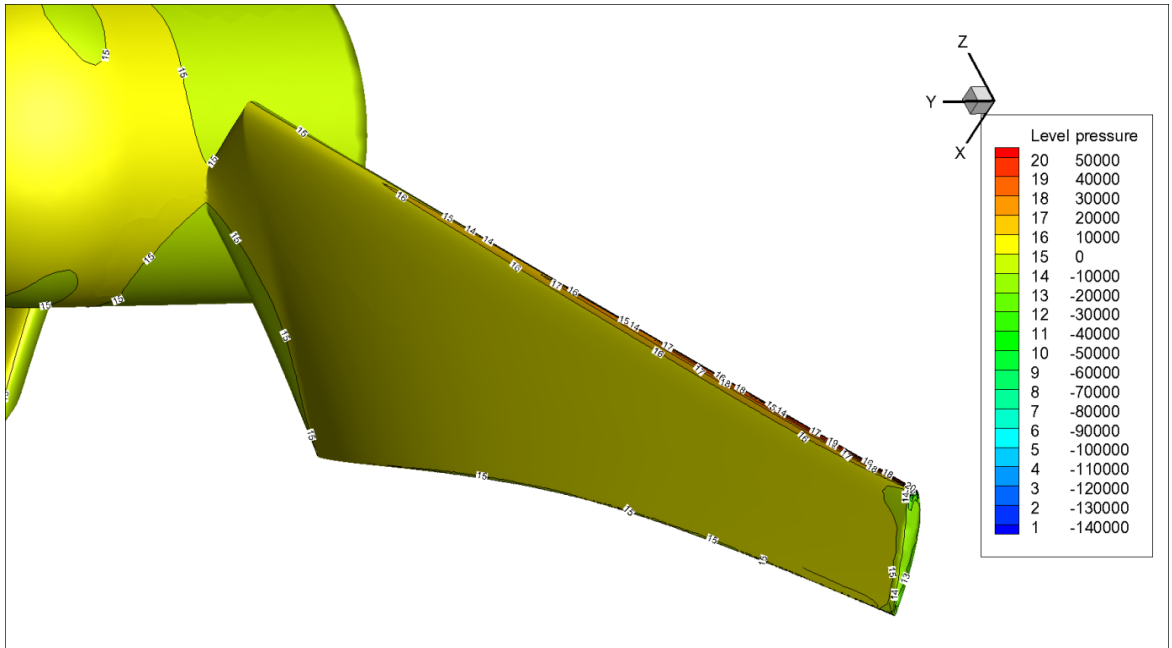
Şekil 3.47. Standart Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 4$



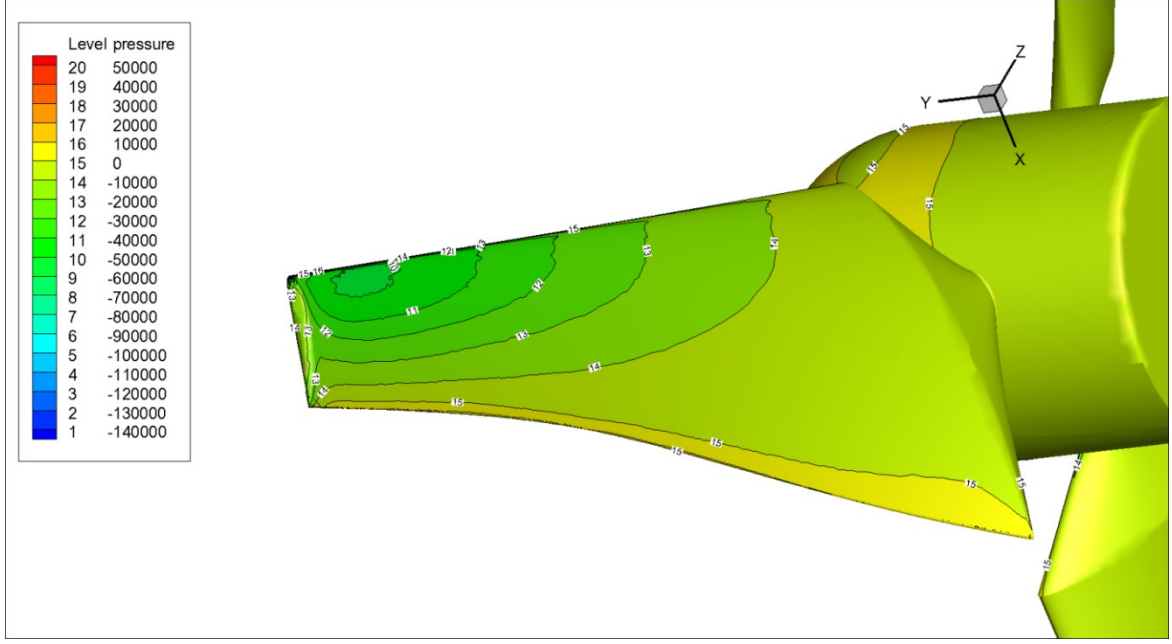
Şekil 3.48. Standart Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5$



Şekil 3.49. Standart Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5$



Şekil 3.50. Standart Kanat Ön Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5,5$



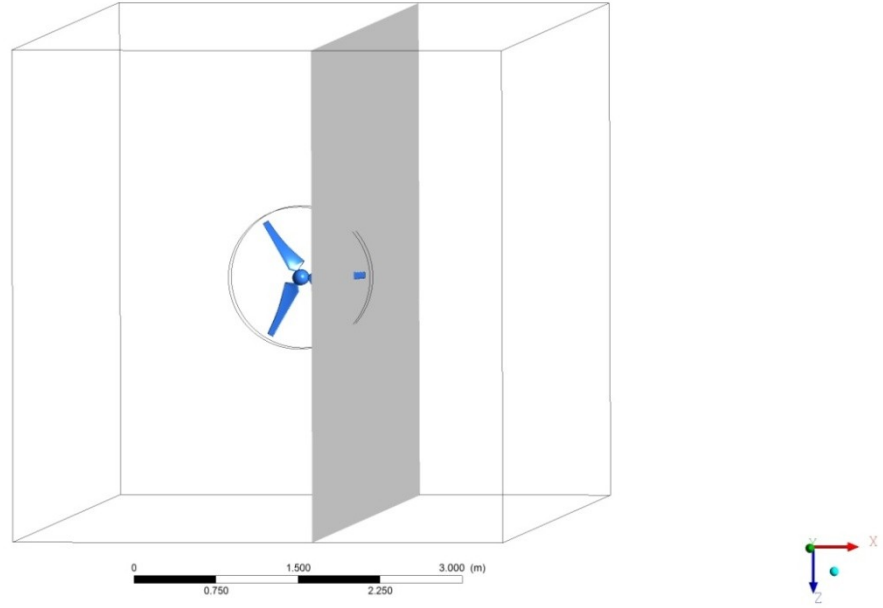
Şekil 3.51. Standart Kanat Arka Yüzeyi Basınç Dağılımı $\lambda = 5,5$

Örnek olarak güç katsayısının maksimum olduğu 5λ değerine bakılırsa kanadın uç kısmına doğru üst yüzeydeki basınç değerleri 8 noktasının skalada gösterdiği değer -50000 Pa 'dır. Minimum basıncın olduğu bu noktada kavitasyon oluşmadığından diğer noktalarda da kavitasyon oluşmayacaktır.

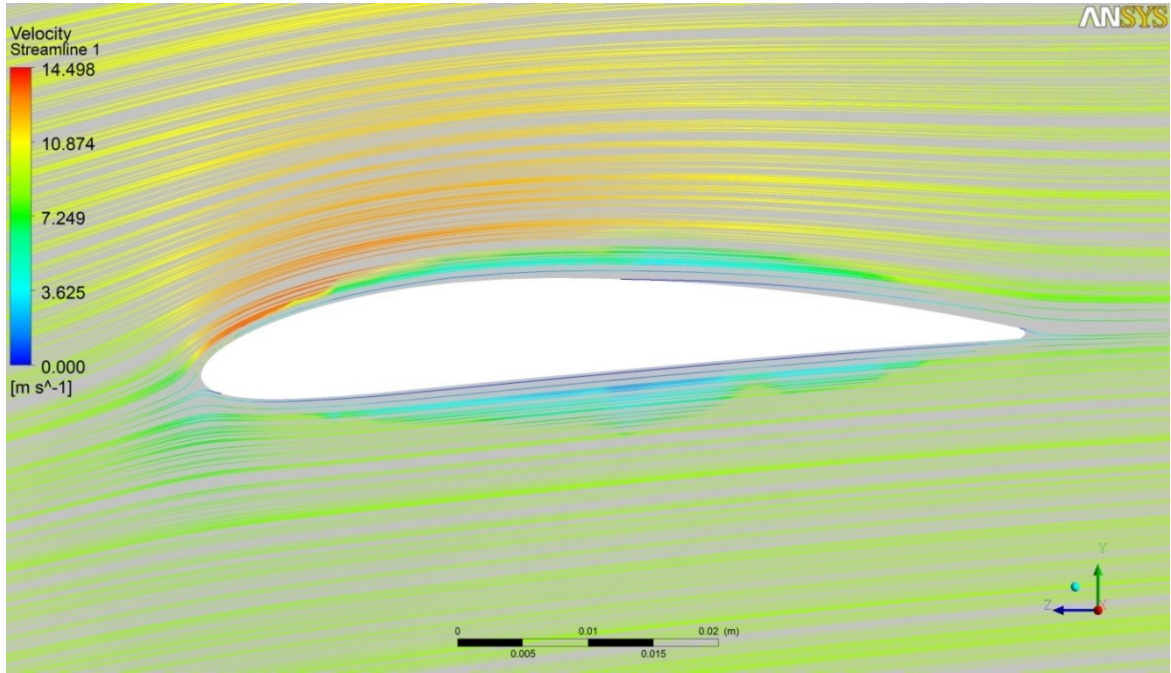
Kanat Kesitindeki Basınç, Türbülans, Hız Dağılımları

Şekil 3.53'den Şekil 3.59'a ikili türbindeki gibi 0,5 m'lik kısmından alınan bir kesitte kanat üzerindeki akım çizgileri, basınç ve türbülans değerleri görülmektedir. Şekil 3.52'de alınan kesit görülmektedir.

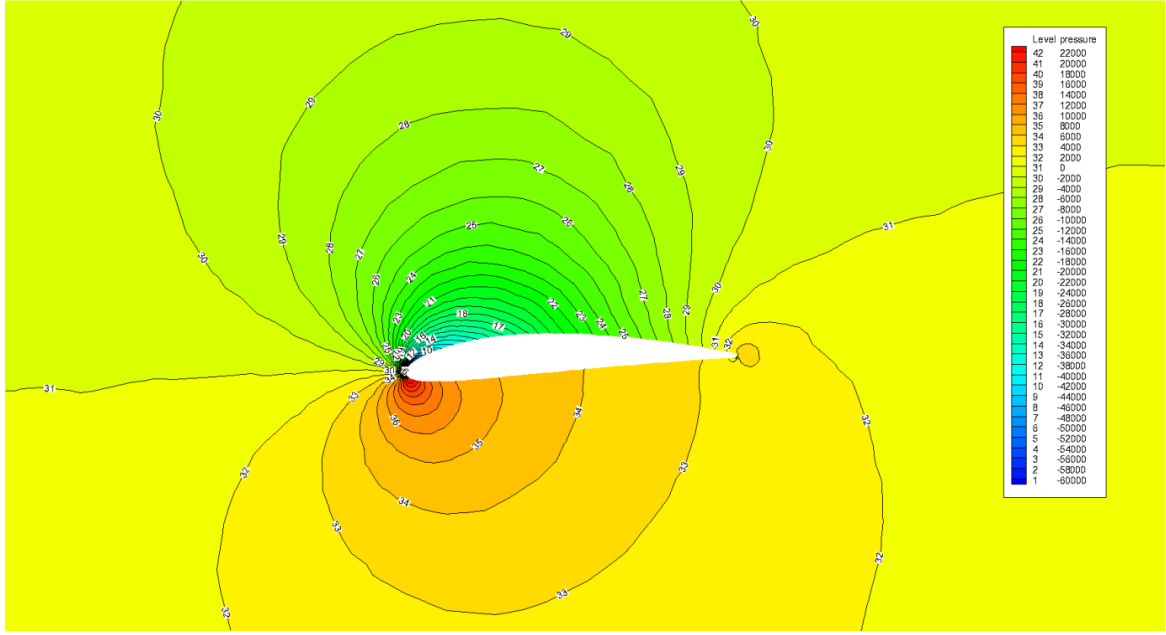
ANSYS



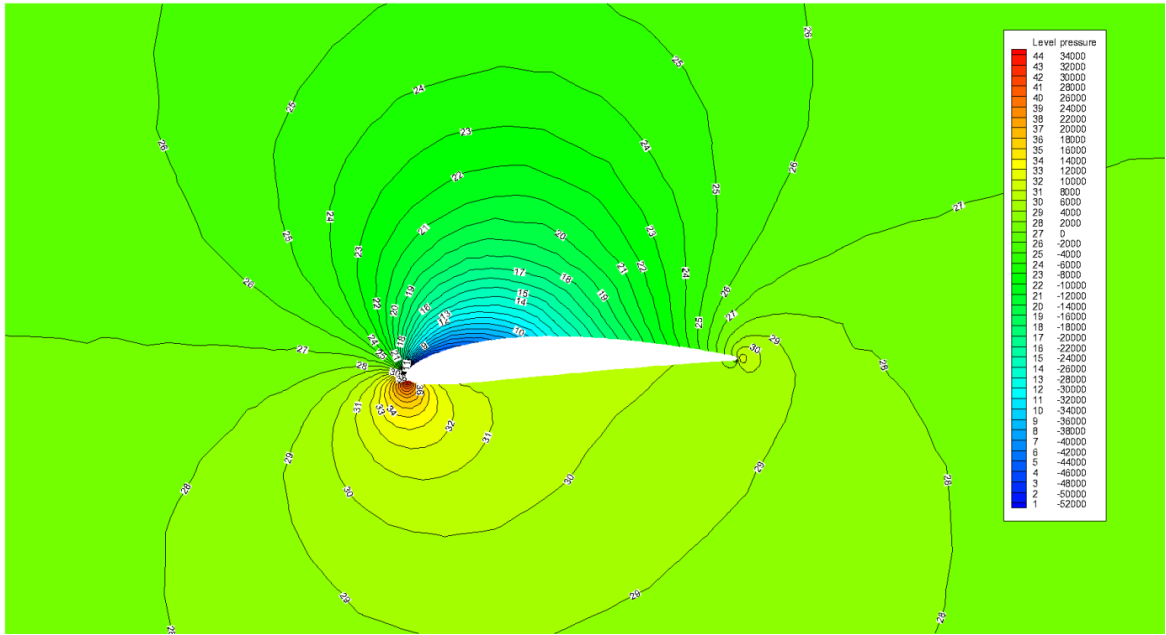
Şekil 3.52. Standart Kanat Arka 0,5 m'den Alınan Kesit



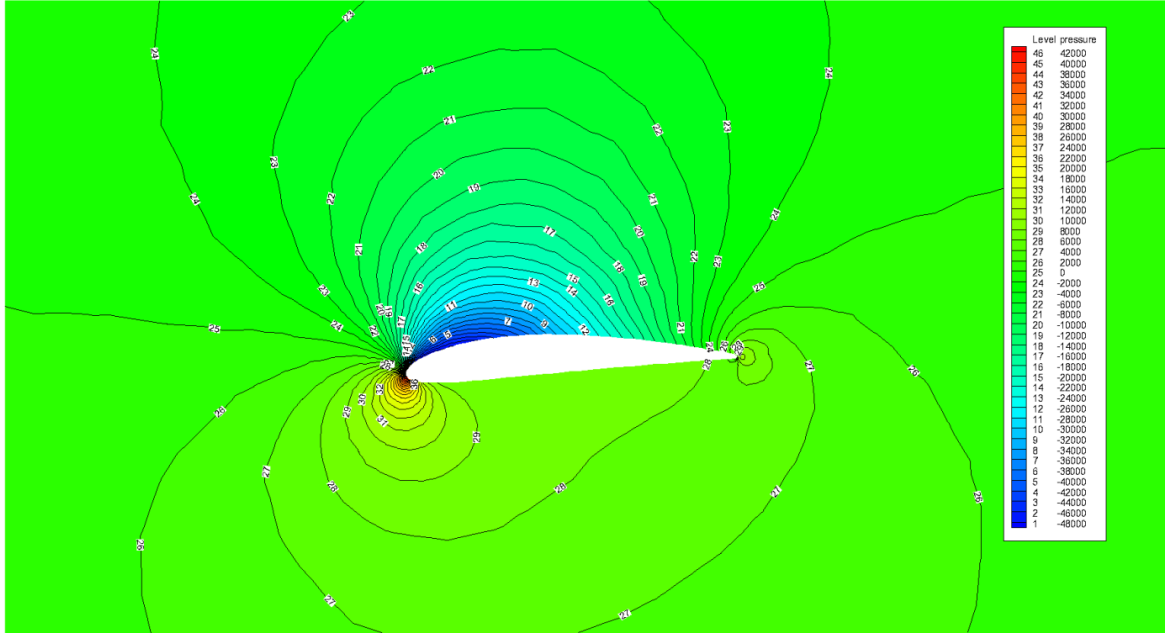
Şekil 3.53. Standart Kanat Arka 0,5 m Kesit Akım Çizgileri



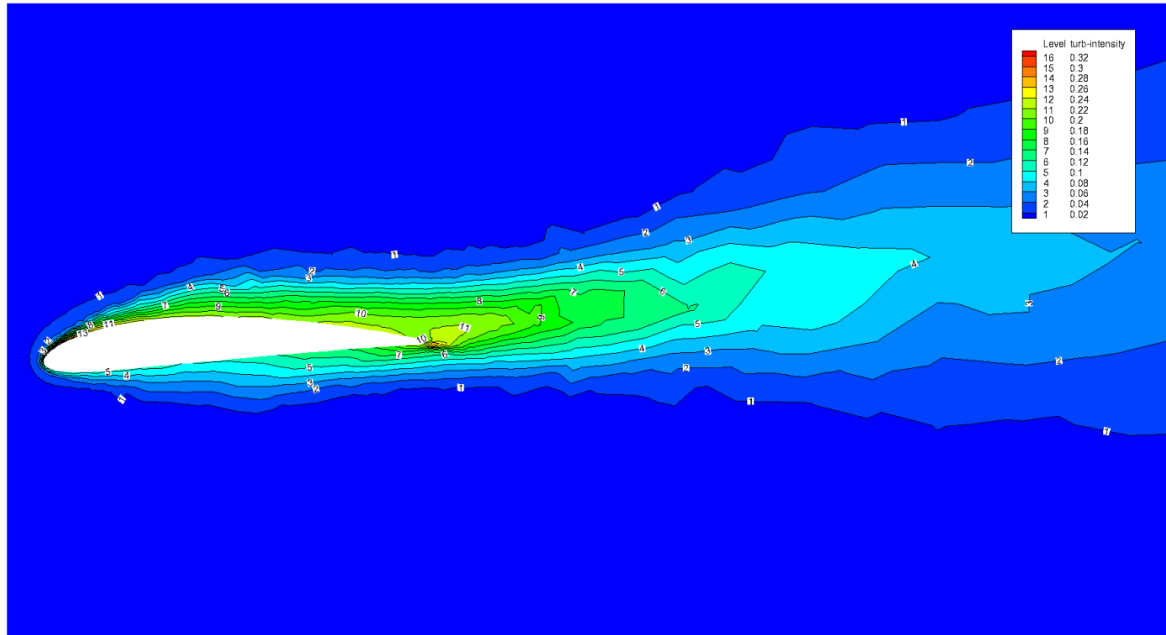
Şekil 3.54. Standart Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 4$



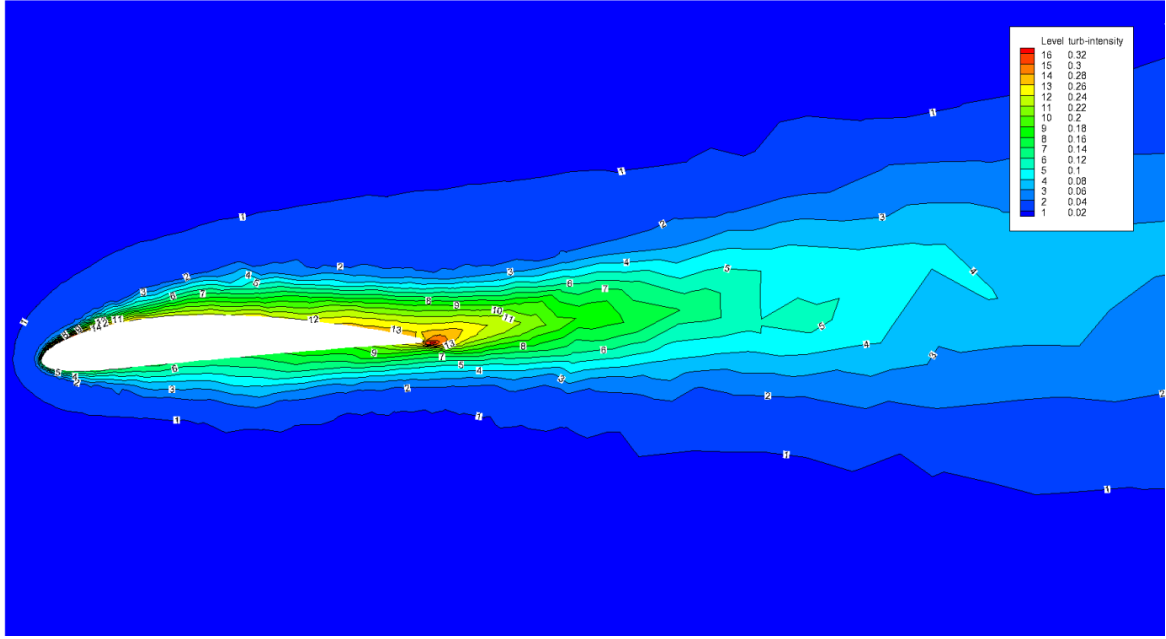
Şekil 3.55. Standart Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 5$



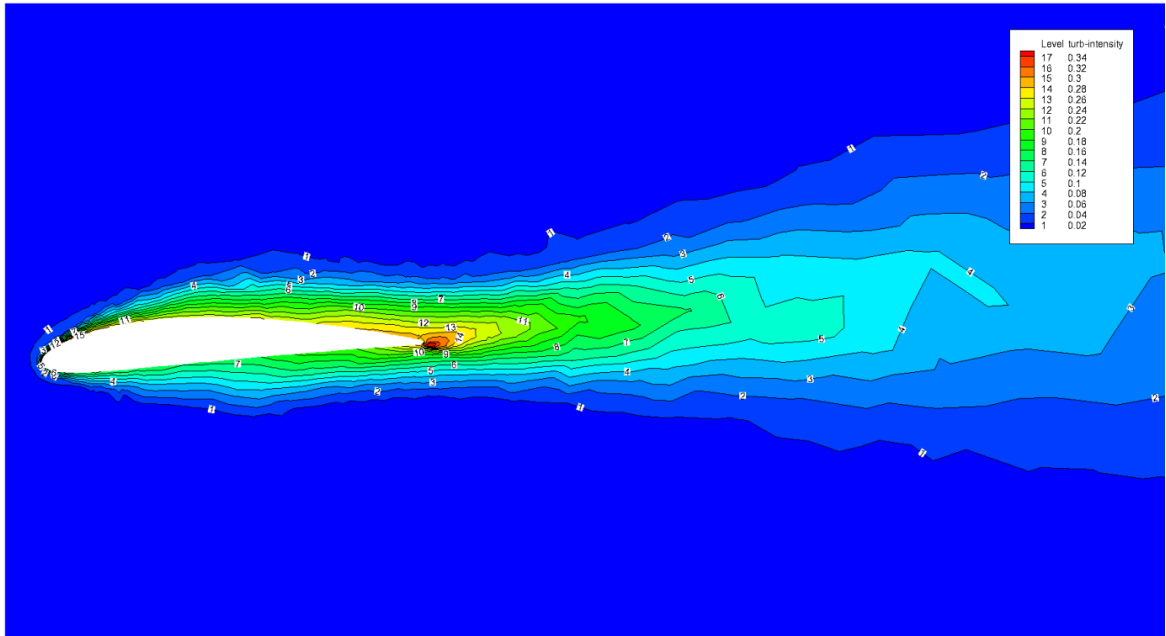
Şekil 3.56. Standart Kanat 0,5 m Kesit Basınç Dağılımı $\lambda = 5,5$



Şekil 3.57. Standart Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 4$



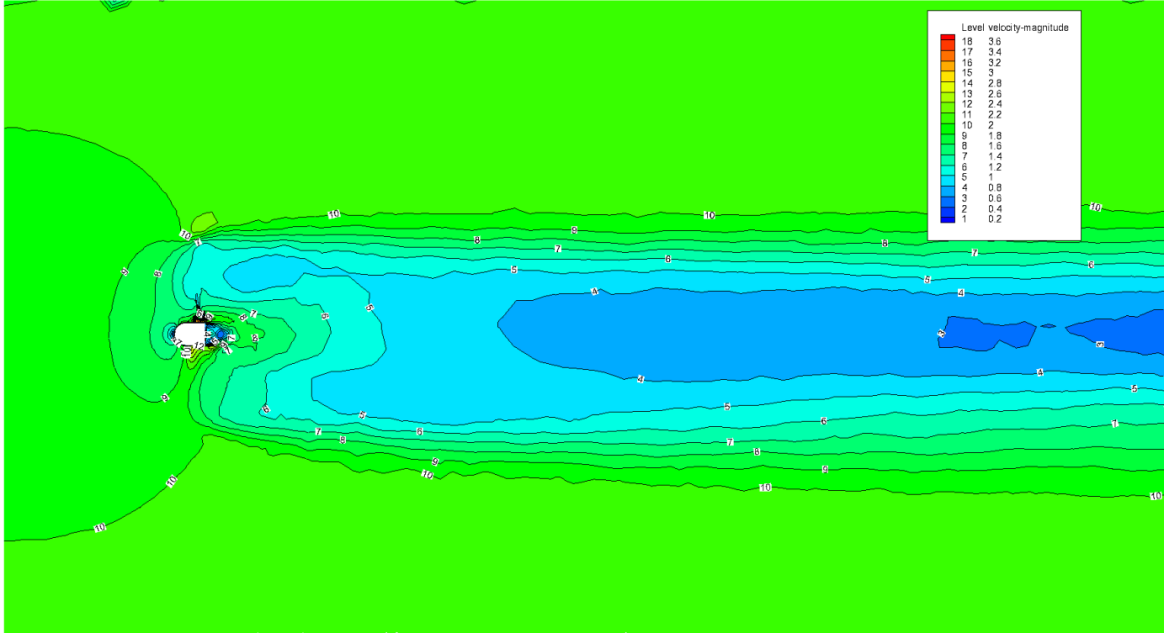
Şekil 3.58. Standart Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 5$



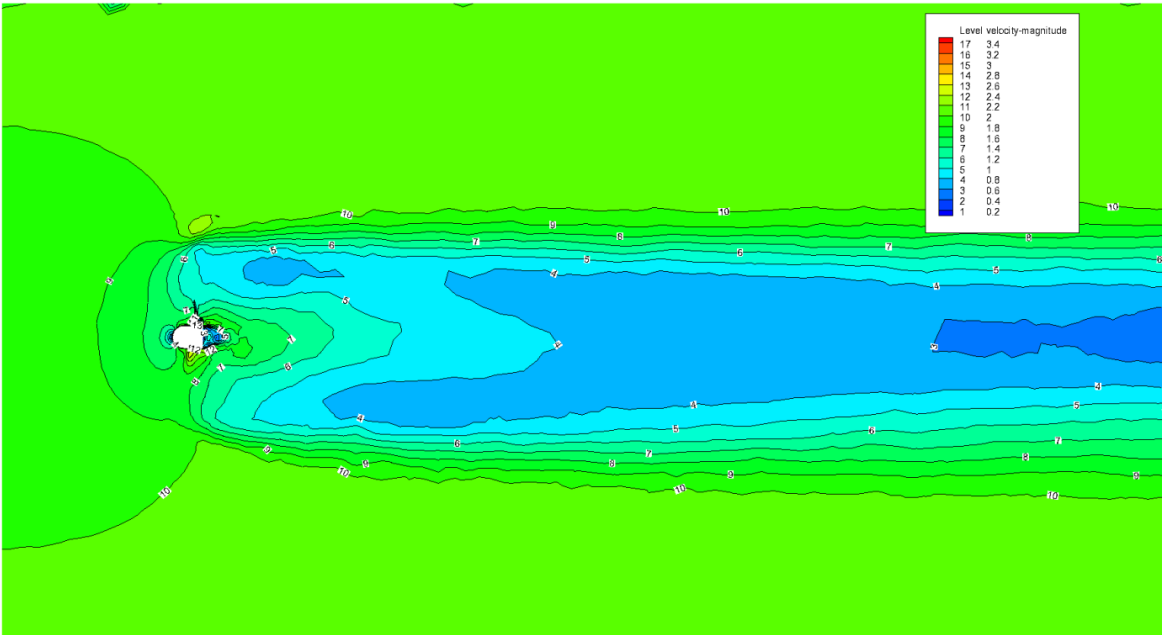
Şekil 3.59. Standart Kanat 0,5 m Kesit Türbülans Yoğunluğu $\lambda = 5,5$

$\lambda = 5$ değeri için basınç dağılımında model üzerindeki basınç değeri minimum -45000,-50000 civarındadır. Kesit üzerindeki türbülans değerleri devre bağlı olarak artmaktadır. Türbülans değerleri maksimum kanadın arka kısmında oluşmaktadır.

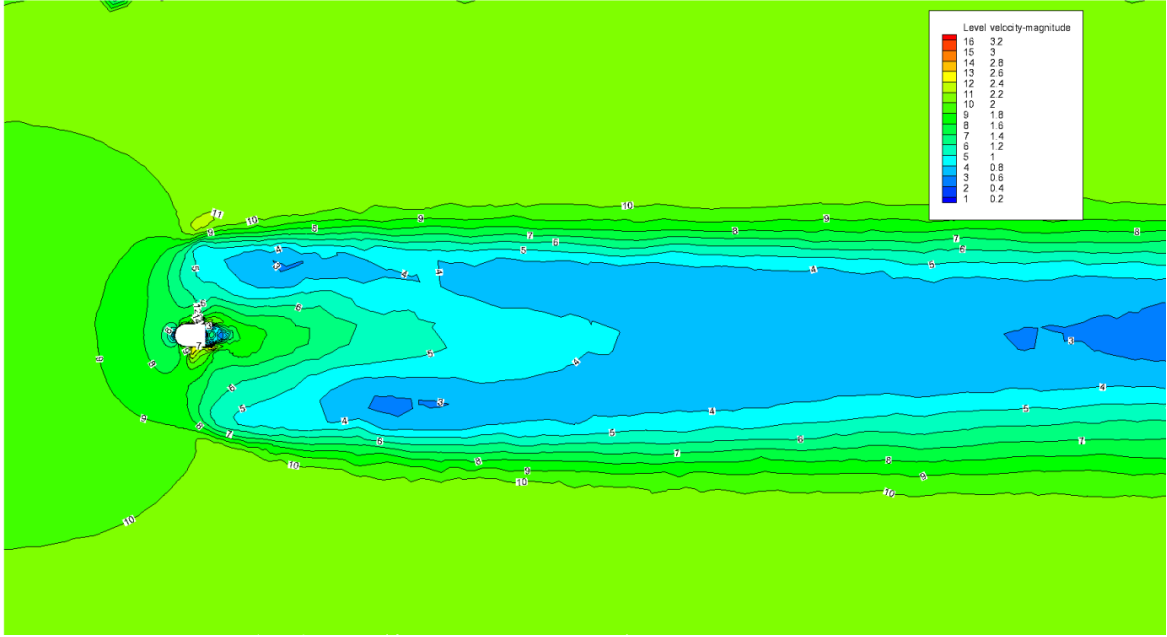
Şekil 3.60'dan Şekil 3.62'ye kadar ikili kanattaki gibi türbin ekseninden alınan bir kesitle arka kısımdaki hız dağılımlarına yer verilmiştir.



Şekil 3.60. Standart Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 4$

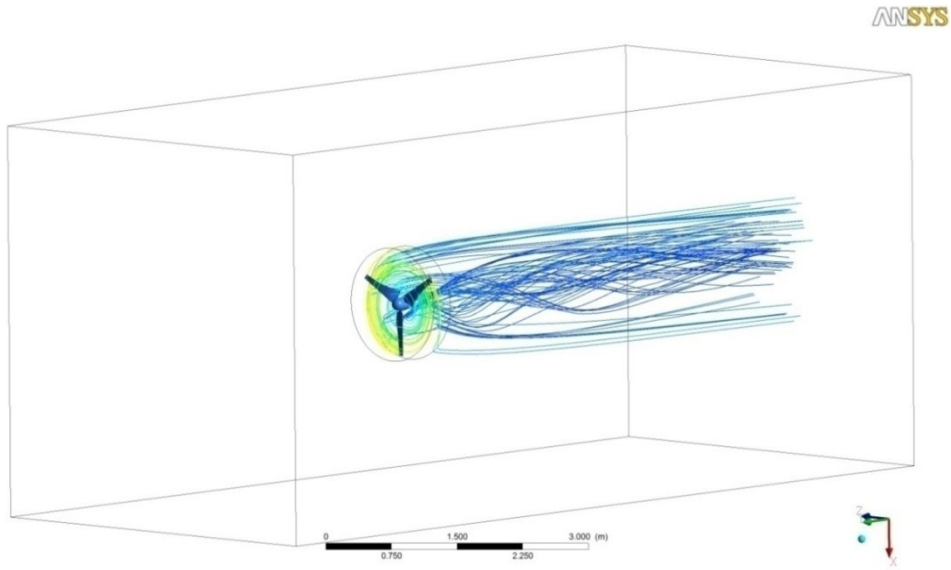


Şekil 3.61. Standart Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 5$



Şekil 3.62. Standart Kanat Merkez Hız Dağılımı $\lambda = 5,5$

Şekil 3.63'de ise 5λ değerinde kanadın arka kısmındaki akım çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 3.63. Standart Kanat Arka Kısımındaki Akım Çizgileri $\lambda = 5$

İrdeleme

İkili ve standart kesitli kanatların modelleri oluşturulduktan sonra kanatların ANSYS 13.0 programında performans analizleri yapılmıştır. Sayısal çalışmalar için akış hızı deneysel çalışmaların gerçekleştirilmiş olduğu 2m/s hız değerinde yapılmıştır. Çalışmalardaki amaç uç hız oranına bağlı olarak türbin performans karakteristiklerini belirlemek olmuştur.

- İkili kanat için, uç hız oranı 2,5 değerinden 5,5 değerine kadar değiştirilerek türbin performans değerleri elde edilmiştir. Türbinden alınan gücün maksimum olduğu λ değerinin 3,5 olduğu görülmüştür. Bu değerde güç 2062,67 W, güç katsayısı ise 0,457 olarak elde edilmiştir. Bu değer, üç kanatlı türbinler için kullanılan maksimum verim için tasarım kriteri olan uç hız oranının 5 değerinden aşağıda çıkmıştır. Yani türbin tasarım uç hız oranından daha düşük devirde maksimum güç değerine ulaşmaktadır. Bu türbin için tork-devir değişimine bakıldığında türbin yüksek torkta ve düşük devirde maksimum güçte çalışmaktadır. Türbinin performans karakteristiklerinden başka, farklı uç hız oranlarında kanat yüzeylerinde oluşan basınç değerleri incelenmiştir. Kaviteasyon açısından önem teşkil eden basınç dağılımlarında ikili türbin için basınç değerleri kanatların üst yüzeylerinde negatif alt yüzeylerinde ise pozitif çıkmıştır. Basınç dağılımlarından türbinin devrinin artmasıyla basınç düşümünün daha da arttığı görülmüştür. Türbin güç katsayısının maksimum olduğu 3,5 λ değerinde ve diğer λ değerlerinde basınç buharlaşma basıncının altına düşmediğinden kanat yüzeylerinde kaviteasyon oluşmamaktadır. Kanat yüzeylerine bakıldığında maksimum basınç düşümünün üst kanadın uç kısımlarına doğru olduğu görülmektedir. 0,6 m yarıçapa sahip türbinin kritik olarak görülen 0,5 m'lik kısmından bir kesit alınmış ve kesit etrafındaki basınç dağılımları, akım çizgileri, türbülans değerleri gözlemlenmiştir. Üç boyutlu analizde kesit üzerindeki türbülans yoğunluğu dağılımlarından türbülansın kanadın arka kısımlarında, firar kenarı tarafında ve üst kanadın alt kısmındaki boşlukta fazla olduğu görülmüştür. Türbülans değerinin kanat uç hız oranının artmasıyla arttığı görülmüştür. Kanadın arka kısmında oluşan hız dağılımını görmek için kanadın ekseninden bir kesit alınmıştır. Kanadın arkasındaki hız dağılımları özellikle türbin tarlası şeklinde dizilecek

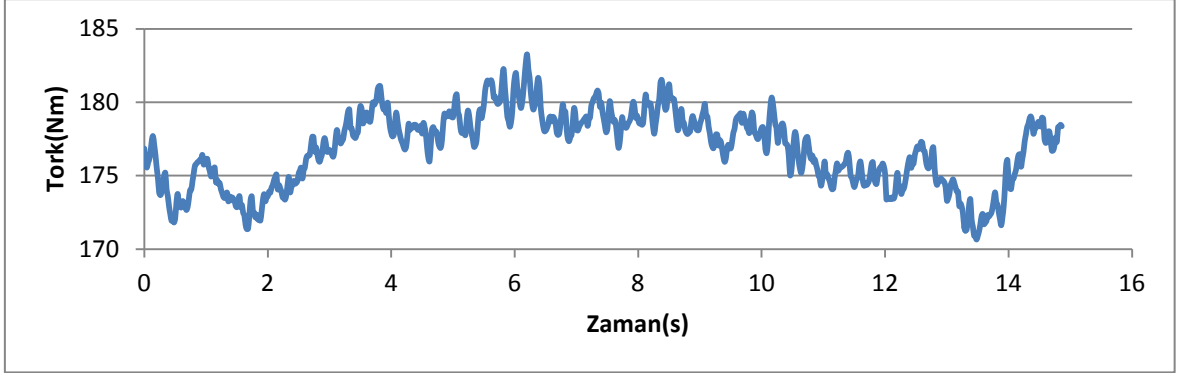
türbinleri için önem arz etmektedir. Hız dağılımlarından akış hızı türbine gelmeden 2 m/s iken türbin ön kısımlarında 3,5 λ için 1,6-1,8 m/s değerlerine arka kısımda ise 0,2 m/s değerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. λ değerinin artmasıyla arka kısımda oluşan düşük hız bölgelerinin arttığı görülmüştür.

- Standart kesitli kanatta ise 3 λ değerinden 7 λ 'ya kadar türbinden türbin devrinin değiştirilmesiyle tork değerleri elde edilmiştir. Maksimum güç değeri 2232,17 W ve güç katsayısı 0,494 aynı zamanda tasarım kriteri de olan 5 λ değerinde elde edilmiştir. Yüzey basınç dağılımı ve kesit basınç dağılımlarına bakıldığında 5 λ değeri için basınç değeri minimum -45000, -50000 Pa civarındadır. Kanat yüzeylerinde kavitasyon oluşmamaktadır. Türbülans yoğunluğu diğer kanatlarda olduğu gibi kanadın firar kenarı tarafında oluşmuştur. Hız dağılımından 5 λ değerinde arka kısımda 0,6 m/s değerlerine kadar hız bölgelerinin oluştuğu görülmüştür.

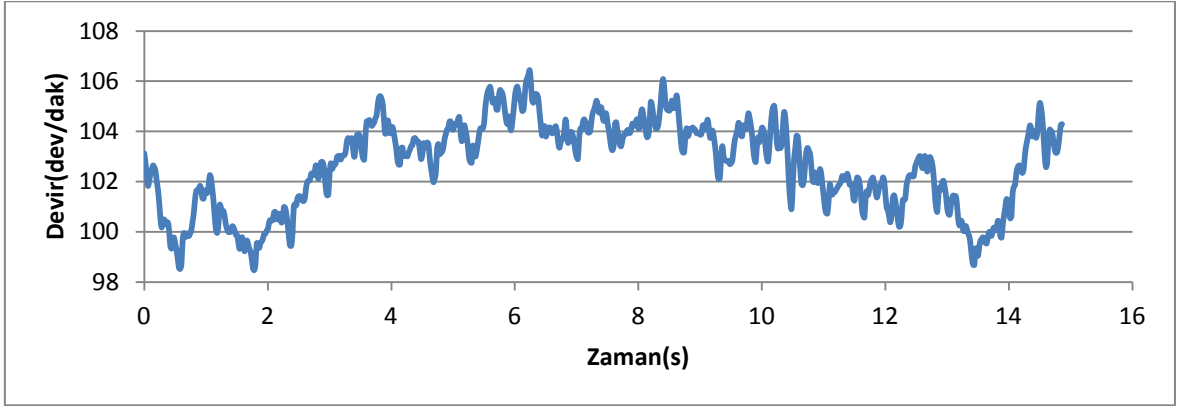
3.3. Deneysel Analiz Sonuçları

Deneysel çalışma sonuçları olarak ikili ve standart kanat kesitli türbinlerinin farklı devir sayılarında ürettikleri güç değerleri ve ikili kanat yüzeyindeki basınç dağılımı değerleri verilmiştir. Kanat ve jeneratörün arasındaki mile bağlanan tork ve devir ölçerden okunan değerlerden elde edilen mekanik güç ve jeneratörden elde edilen elektriksel güç olmak üzere iki farklı güç değeri elde edilmiştir. Türbin devrinin değiştirilmesi, reosta direncinin değiştirilip jeneratör üzerindeki yükün arttırılıp azaltılması suretiyle olmuştur.

Sistem reosta yardımıyla farklı yükler altında teste tabi tutularak, her çalışma için serbest akım hızı, devir sayısı, tork, volt ve akım değerleri veri toplayıcı yardımıyla 50 veri/sn okunarak bilgisayara aktarılmıştır. Kaydedilen verilerin ortalaması alınarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Örnek ölçüm değerleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.64. Veri Toplayıcı Tork-Zaman Değişimi, $\lambda = 3.23$



Şekil 3.65. Veri Toplayıcı Devir-Zaman Değişimi, $\lambda = 3,23$

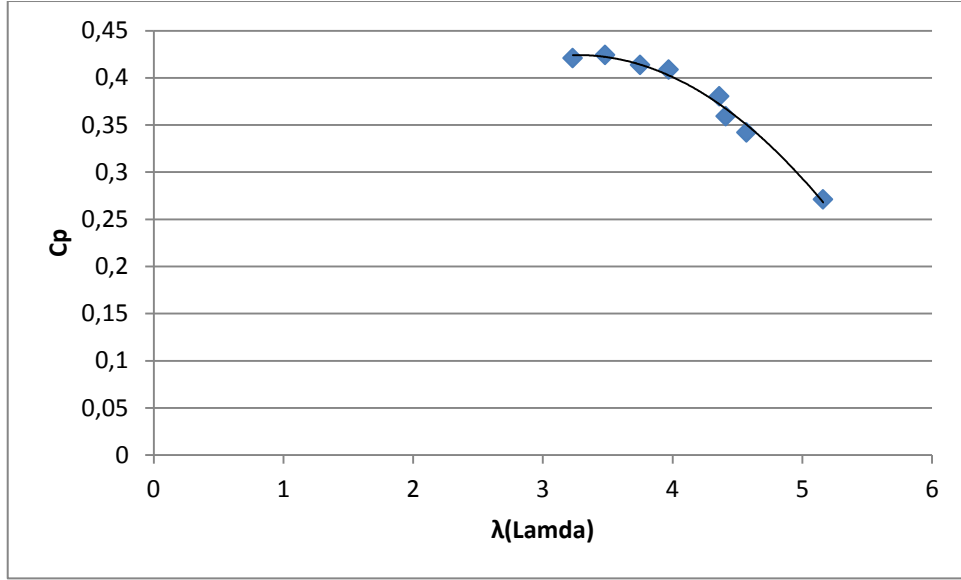
3.3.1. İkili kanat performans karakteristikleri

İkili kanatlı türbin modeli için uç hız oranlarına bağlı olarak deneysel türbin performans değerleri Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9. İkili Kanat Deneysel Performans Değerleri $U = 2$ m/s

Uç Hız Oranı	3,23	3,48	3,75	3,97	4,36	4,41	4,57	5,16
Tork(Nm)	176,8	165	149,47	139,6	118,3	110,28	101,28	71,13
Devir dev/dk	102,68	110,89	119,34	126,22	138,7	140,49	145,6	164,3
Güç(W)	1900,6	1915,6	1867,9	1845,5	1717,7	1622,2	1544,5	1224,1
Güç($1/2\rho V^3 A$)	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8
Güç Kat., C_p	0,421	0,424	0,414	0,409	0,38	0,359	0,342	0,271
Elektriksel Güç	1539,5	1570,8	1503,7	1439,1	1355,3	1304,4	1280,4	998,91

Tablo incelendiğinde jeneratörden ölçülen güç değeri tork-devir kullanılarak hesaplanan güçten az çıkmıştır. Bunun sebebi jeneratör, dişli kutusu ve bağlantı elemelerinden olan kayıplardandır. Şekil 3.66'da tablodaki değerler kullanılarak güç katsayısı- λ grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 3.66. İkili Kanat Deneysel C_p - λ Değişimi

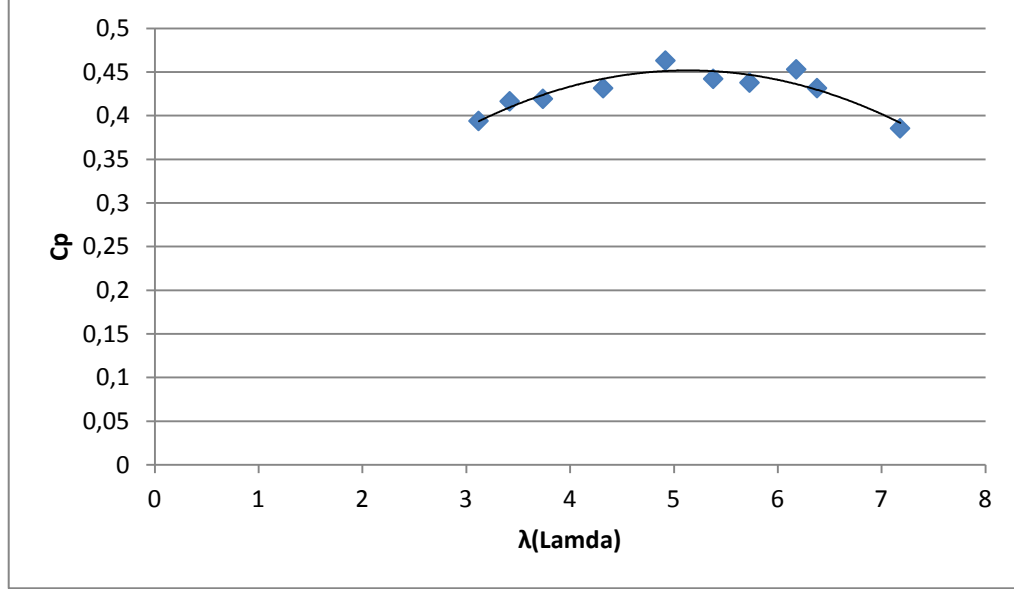
Tablodaki değerlerden türbin güç katsayısının maksimum olduğu λ değerinin 3,48 olduğu görülmektedir.

3.3.2. Standart kanat, NACA 4412, performans karakteristikleri

Tablo 3.10. Standart Kanat Deneysel Performans Değerleri $U = 2\text{m/s}$

λ	3,12	3,42	3,74	4,32	4,92	5,38	5,73	6,18	6,38	7,18
Tork Nm	171,05	164,06	151,88	135,3	127,5	111,35	103,52	99,31	91,64	72,74
Devir d/dk	99,31	108,86	119,05	137,51	156,61	171,25	182,39	196,72	203,08	228,55
Güç (W)	1778,8	1880,6	1893,4	1948,2	2091,1	1996,8	1977,2	2045,8	1948,8	1740,8
Güç $1/2\rho V^3 A$	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8
Güç Kat. C_p	0,394	0,417	0,419	0,432	0,463	0,442	0,438	0,453	0,432	0,386
Elekt. Güç	1465,8	1527,0	1519,4	1611,2	1695,9	1611,4	1610,8	1690,7	1591,9	1429,7

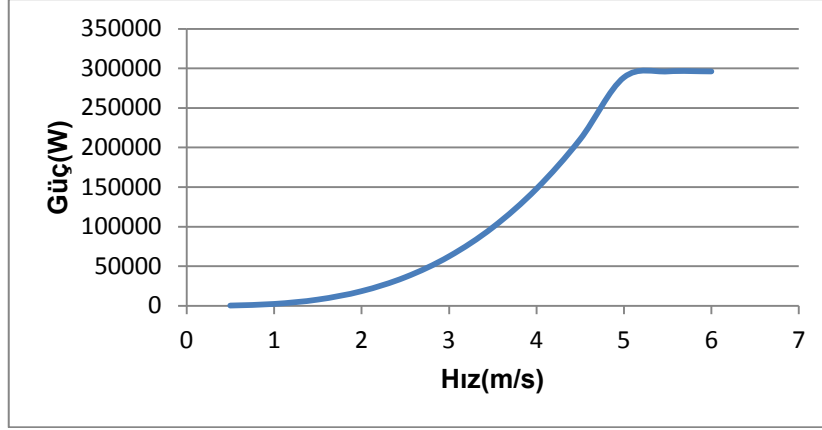
Tablodaki değerlerden türbin güç katsayısının maksimum olduğu λ değerinin 4,92 olduğu görülmektedir. Şekil 3.67’de tablodaki değerler kullanılarak elde edilen lamda-güç katsayısı grafiği oluşturulmuştur.



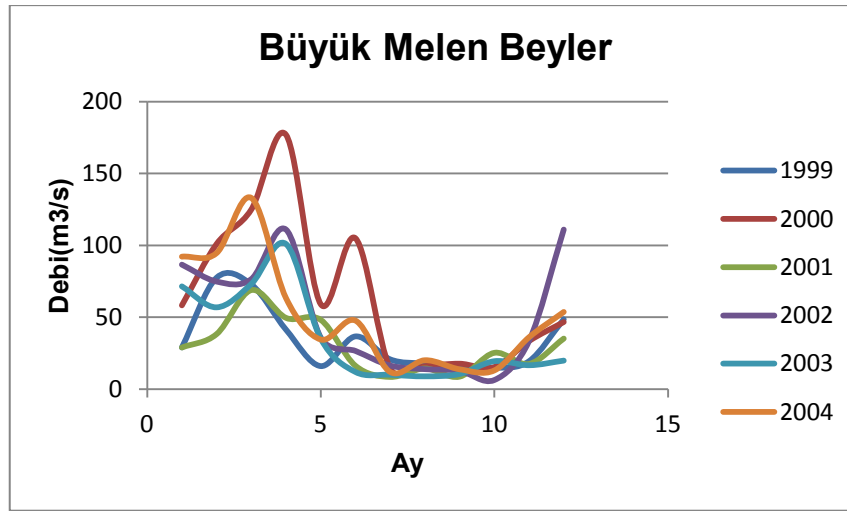
Şekil 3.67. Standart Kanat Deneysel C_p - λ Değişimi

3.4. Akarsularımızın Hidrokinetik Potansiyelleri

Çalışma kapsamında ayrıntılı olarak Batı Karadeniz Bölgesinde ve diğer bölgelerde yer alan akarsuların 6 yıla ait aylık ortalama debilerinden faydalanılarak hidrokinetik enerji potansiyelleri incelenmiştir. Potansiyeller Batı Karadeniz Bölgesi Büyük Melen Beyler akarsuyu için ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Diğer akarsuların potansiyelleri ise direk sonuç olarak verilmiştir. Batı Karadeniz Bölgesi Büyük Melen Beyler akarsuyunun yıllara göre aylık debi ve hız değişimleri grafiksel ve tablolar halinde aşağıda verilmiştir. Diğer akarsuların yıllara göre aylık debi değişimleri EK-A;F’de verilmiştir. Debi değerleri suyun 25 m²’lik bir kanaldan aktığı düşüncesiyle 6 farklı yılın aylık ortalama debi değerlerinden 6x12 = 72 adet ortalama hız değerleri elde edilmiştir. Potansiyel belirlemede kullanılan 4 m çaplı ikili türbinin güç eğrisi Şekil 3.68’de verilmiştir.



Şekil 3.68. 4 m Çaplı İkili Türbinin Güç Eğrisi



Şekil 3.69. Büyük Melen Beyler Farklı Yıllarda Debi-Ay Değişimleri

Tablo 3.11 Büyük Melen Beyler Debi-Ay Değişimleri

Ay	Debi(m3/s)					
	1999	2000	2001	2002	2003	2004
1	28,9	58,3	29	86,6	71,5	92,1
2	77,5	101	38,3	74,8	56,9	94,6
3	72,8	125	68,9	76,5	73,2	133
4	41,3	177	49,6	111	101	63,2
5	15,9	59,1	48,2	35,8	35,1	34,4
6	36,6	105	16,3	26,5	11,9	47,6
7	20,6	14,4	8,54	16,3	9,99	11,8
8	17,6	16	14,4	13,8	8,86	20
9	15,7	17,7	8,75	12,6	10,5	13,7
10	14,6	15,4	25,3	6,22	19,4	12,9
11	19,3	33,5	17,6	33,4	16,6	36
12	48,5	46,7	35,2	111	19,8	53,6

Tablo 3.12 Büyük Melen Beyler Debi-Hız Değişimleri

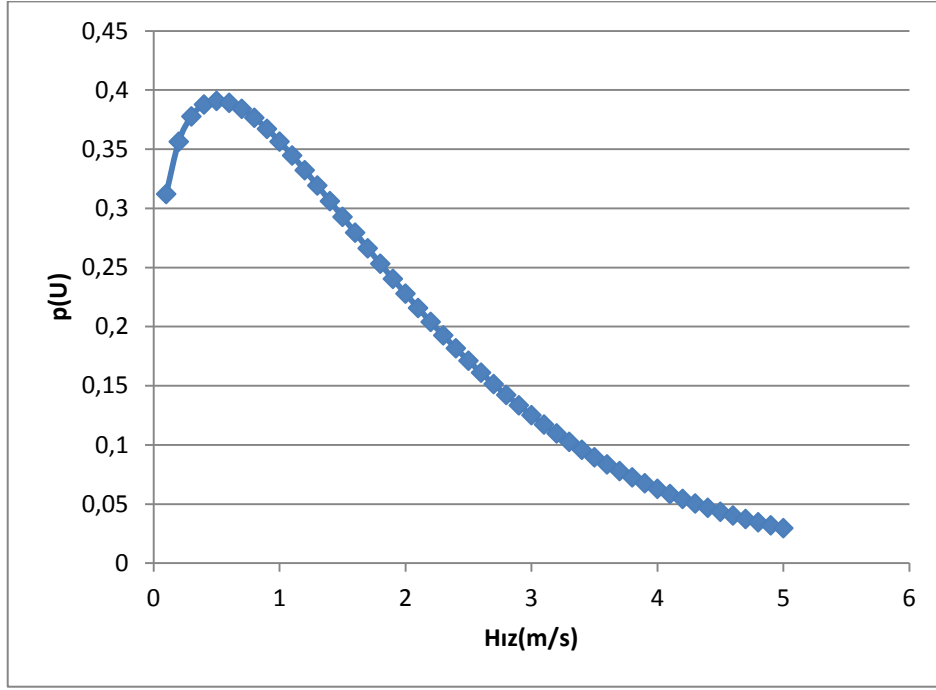
Ay	Hız(m/s)					
	1999	2000	2001	2002	2003	2004
1	1,156	2,332	1,16	3,464	2,86	3,684
2	3,1	4,04	1,532	2,992	2,276	3,784
3	2,912	5	2,756	3,06	2,928	5,32
4	1,652	7,08	1,984	4,44	4,04	2,528
5	0,636	2,364	1,928	1,432	1,404	1,376
6	1,464	4,2	0,652	1,06	0,476	1,904
7	0,824	0,576	0,3416	0,652	0,3996	0,472
8	0,704	0,64	0,576	0,552	0,3544	0,8
9	0,628	0,708	0,35	0,504	0,42	0,548
10	0,584	0,616	1,012	0,2488	0,776	0,516
11	0,772	1,34	0,704	1,336	0,664	1,44
12	1,94	1,868	1,408	4,44	0,792	2,144

Bu değerler kullanılarak ortalama hız değeri 1,7726 m/s, standart sapma 1,452, k parametresi 1,242, c parametresi ise 1,901 olarak elde edilmiştir. Akış hızı 0,1 m/s'den başlatılarak 5 m/s değerine kadar aşağıda verilen tabloyla her bir hızın Weibull olasılık fonksiyonu değeri ve o hızdaki 4m çapındaki türbinden elde edilen güç değerleri verilmiştir.

Tablo 3.13. Büyük Melen Beyler Hız-Olasılık-Güç Değerleri

U(m/s)	p(U)	W(U)	U(m/s)	p(U)	W(U)
0,1	0,312352	0	2,6	0,161154	40558,16
0,2	0,356536	0	2,7	0,15152	45420,25
0,3	0,377847	0	2,8	0,142323	50656,17
0,4	0,387867	0	2,9	0,13356	56279,76
0,5	0,390922	288,4485	3	0,125226	62304,87
0,6	0,389239	498,439	3,1	0,117311	68745,35
0,7	0,384165	791,5026	3,2	0,109806	75615,04
0,8	0,376603	1181,485	3,3	0,102699	82927,78
0,9	0,367198	1682,231	3,4	0,095978	90697,43
1	0,356431	2307,588	3,5	0,089631	98937,83
1,1	0,344674	3071,399	3,6	0,083643	107662,8
1,2	0,332219	3987,512	3,7	0,078	116886,2
1,3	0,319299	5069,77	3,8	0,072689	126622
1,4	0,306101	6332,021	3,9	0,067695	136883,8
1,5	0,29278	7788,109	4	0,063004	147685,6
1,6	0,279459	9451,88	4,1	0,058601	159041,3
1,7	0,26624	11337,18	4,2	0,054473	170964,6
1,8	0,253204	13457,85	4,3	0,050606	183469,4
1,9	0,240419	15827,74	4,4	0,046986	196569,6
2	0,227937	18460,7	4,5	0,0436	210278,9
2,1	0,215799	21370,57	4,6	0,040436	224611,4
2,2	0,204039	24571,19	4,7	0,037481	239580,7
2,3	0,19268	28076,42	4,8	0,034724	255200,7
2,4	0,181739	31900,09	4,9	0,032154	271485,4
2,5	0,171228	36056,06	5	0,029758	288448,5

Weibull olasılık yoğunluk dağılımı ise Şekil 3.92'de verilmiştir.



Şekil 3.70. Büyük Melen-Beyler Weibull Olasılık Yoğunluk Dağılımı

Tabloda verilen Weibull olasılık fonksiyonu değerleriyle türbin güç değerlerini bir önceki bölümde verilen Denklem 2.12'de yerine koymak suretiyle güç değeri 26537,13 W bulunmuştur. Türbinden elde edilen senelik güç miktarı ise $26537,13 \times 8750 / 1000 = 232465,2$ kWh değerindedir.

Benzer hesaplama ile diğer akarsuların bir türbin için üretebilecekleri enerji değerleri Tablo 3.14 ile Tablo 3.19 arasında verilmiştir.

Tablo 3.14. Batı Karadeniz Suları Yıllık Potansiyeli

	Doğu Karadeniz Suları
	kWh
Büyük Melen-Yakabaşı	147424,2
Araç Çayı-Karabük	47182,52
Filyos Çayı-Derecikviran	347978,7
Soğanlı Çayı	76369,51

Tablo 3.15. Doğu Karadeniz Suları Yıllık Potansiyeli

	Doğu Karadeniz Suları
	kWh
Bolaman Çayı-Örencik	23589,1
Melet Çayı-Gocallı	106753,7
Terme Çayı-Gökçeli	870,032
Çamlıdere-Dereköy	16348,28
Fırtına Deresi-Topluca	98582,78

Tablo 3.16. Kızılırmak Yıllık Potansiyeli

	Kızılırmak
	kWh
Karaözü	163808,2
Tuzköyü	139931,4
Yahşihan	297804,1
Avşar Köprüsü	558806,5
Söğütlühan	95736,3

Tablo 3.17. Seyhan Havzası Yıllık Potansiyeli

	Seyhan Havzası
	kWh
Göksu-Gökdere	216546,3
Himmetli	68648,17
Üçtepe	376013,2
Değirmen Ocağı	38006,03
Ergenuşağı	357983,3

Tablo 3.18. Fırat Dicle Havzası Yıllık Potansiyeli

	Fırat Dicle Havzası
	kWh
Kemah Boğazı	325405,8
Göksu Nehri-Balpınar	206067,5
Murat Nehri-Palu	202483,5
Murat Nehri-Tutak	173185,1
Muzur Suyu	310853,4

Tablo 3.19. Sakarya Yıllık Potansiyeli

	Sakarya
	kWh
Ayvalı Yaylası	14722,82
Botbaşı	350146,5
Doğançay	450241,6

Yukarıda akarsuların yıllık üreteceği güç değerleri elde edilirken, 4 m çaplı tek bir türbin için hesaplamalar yapılmıştır. Bu akarsulara birden çok türbin (türbin tarlası) kurmak suretiyle çok daha fazla güç elde edilebilecektir. Ayrıca boğazların hidrokinetik türbin kurulumuna uygun yerlerine tek veya çoklu olacak şekilde türbinler kurulmasıyla ve baraj atık sularının bir kanala yönlendirilmesi suretiyle büyük miktarlarda güç elde edilebilmesi mümkündür.

4. Tartışma ve Sonuç

4.1. Giriş

Bir önceki bölümde kanatların iki boyutlu, üç boyutlu ve deneysel çalışma sonuçları verilmişti. Bu bölümde ise geliştirilen ikili kanat ve ikili kanat ile karşılaştırılmak için modellenen standart kanadın performans karakteristiklerinin karşılaştırılmasına ve sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Bölümün sonunda sonuç ve öneriler kısmına yer verilmiştir.

4.2. Performans Değerlendirme

Tez çalışması kapsamında denenen kanat profillerinde 2 m/s serbest akış hızında ($Re = 3,02 \times 10^5$);

2D analizlerden,

İkili kanat için $C_L / C_D = 12,05$,

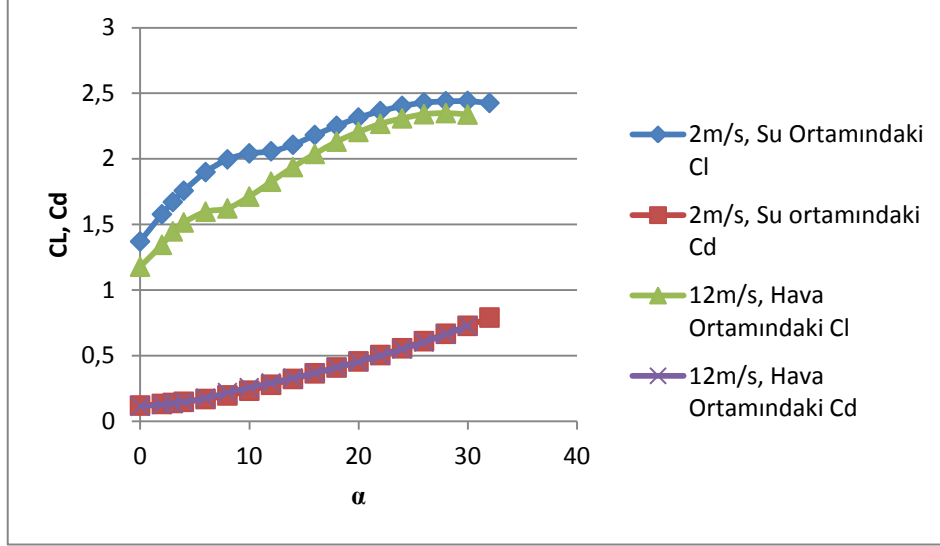
Standart kanat(NACA4412) için 21,52

değerleri bulunmuştur. Çalışma farklı akıntı hızlarında 1 m/s ($Re = 1,51 \times 10^5$) ve 1,5 m/s ($Re = 2,25 \times 10^5$) değerlerinde tekrarlanmış ve bu hız değişiminin sonuçlar üzerinde etkili olmadığı görülmüştür.

İkili kanat için kanadın üst yüzeyinde basınç değerinin $-4,89 \times 10^3$ Pa, hız değerinin ise 3,38-3,56 m/s değerlerinde olduğu görülmüştür. Standart kesitli kanat için ise $-2,62 \times 10^3$ Pa ve 2,78-2,92 m/s olarak elde edilmiştir. Bu değerlerden basınç düşümünün ve hız değerinin en büyük olduğu ikili kanat, basınç düşümünün ve hız değerinin en az olduğu kanadın ise standart kesitli kanat olduğu görülmüştür.

Kanatların stall konumuna gelme şartları incelendiğinde, stall hücum açıları ikili kanat için 30° ve standart kanat için ise yaklaşık olarak 16° olmaktadır. Buradan ikili kanadın düz kanada göre stall durumu geç oluştuğundan ikili kanadın daha geniş bir operasyon (çalışma şartları) şartlarında kullanılabileceği sonucu çıkarılmıştır.

İkili ve standart türbin kanat kesitlerinin rüzgar türbinleri için de kullanılabileceğini göstermek için yapılan analizlerden ikili kanat için yapılan analiz sonuçlarına göre Şekil 4.1 'de 2 m/s ($Re = 3,02 \times 10^5$) su akış hızında ve 12m/s ($Re = 1,25 \times 10^5$) hava ortamında hücum açısına karşılık C_L , C_D , C_L / C_D 'nin değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1. İkili Kanat Su ve Hava Ortamında Hücum Açısına Göre, C_L , C_D Değişimleri

Tablo 4.1'de ise su ve hava ortamında ikili kanat için hücum açısına karşılık C_L / C_D değişimleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1. İkili Kanat 2 m/s Su ve 12 m/s Hava Ortamında C_L / C_D Oranları

α	C_L / C_D Su	C_L / C_D Hava
0	11,5303	10,4111
2	12,0389	10,6759
3	12,0534	10,7504
4	11,9186	10,4325
6	11,2700	9,1176
8	10,1832	7,4292
10	8,7920	6,7010
12	7,4205	6,2639
14	6,5510	5,8977
16	5,9841	5,5455
18	5,5083	5,2054
20	5,0843	4,8650
22	4,6916	4,5340
24	4,3273	4,1996
26	3,9859	3,8748
28	3,6626	3,5463
30	3,3604	3,2154

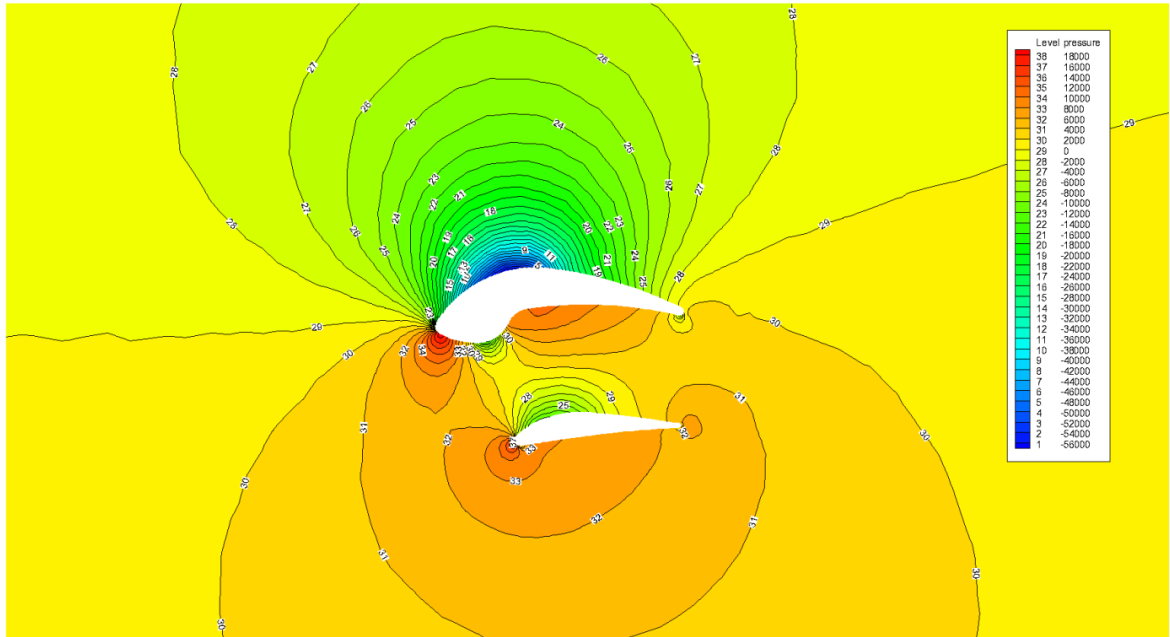
Şekil 4.1 incelendiğinde ikili kanadın su ve hava ortamında benzer karakteristikler gösterdiği görülmektedir. C_L değerleri birbirlerine yakın çıkmıştır. C_D değerleri ise neredeyse aynı elde edilmiştir. Aradaki küçük fark Reynolds sayısındaki değişimden kaynaklanmaktadır. Tablo 4.1’de görüldüğü gibi kanat dizayn şartı olan C_L/C_D ’nin maksimum olduğu açı hava ve su ortamında aynı çıkmıştır. Buradan Reynolds sayısının değişimiyle C_L/C_D ’yi maksimum yapan açının değişmediği sonucu çıkarılmıştır. Farklı kanat profillerinin farklı Reynolds sayılarındaki karakteristiklerinin incelendiği bir başka çalışmada da bu durum ortaya konulmuştur [40].

İkili kanat sayısal analiz kısmında akış hızı 2 m/s değerinde iken kanadın dönmesinden dolayı kanadın üzerinde uç hız oranına ve yarıçapa bağlı olarak bağıl hız oluştuğu belirtilmişti ve bu bağıl hız değerinin $\lambda = 3,5$ değerinde 0,5 m’lik kanat kesitinde 6,15 m/s olduğu hesaplanmıştı. Bu değere göre kanadın iki boyutlu ortamda analizi yapılmış ve kanat üzerinde aşağıda görünen basınç dağılımının oluştuğu görülmüştü.

Şekil 4.2’deki bu dağılıma ve üç boyutlu analiz sonucu 0,5 m’lik kesitten alınan Şekil 4.3’de gösterilen basınç dağılımına bakıldığında değerlerin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuç GAMBIT-FLUENT programıyla yapılan iki boyutlu sonuçlarla, ANSYS 13.0 programında yapılan üç boyutlu analiz sonuçlarının birbiriyle uyumunu göstermektedir.



Şekil 4.2. İki Boyutlu Sayısal Analiz Sonucu Oluşan Basınç Dağılımı $U = 6,15$ m/s



Şekil 4.3. Üç Boyutlu Sayısal Analiz Sonucu Oluşan Kanat Kesit Basınç Dağılımı $r = 0,5$ m

4.3. Akım Karakteristikleri

Kanatların maksimum verimde çalıştığı durumlar göz önüne alındığında ikili kanatta basınç değeri minimum -50000 Pa civarında, türbülans yoğunluğu $0,25$ civarında ve kanat arkasındaki en düşük hız bölgesinin $0,2$ m/s olduğu görülmüştür. Standart kanat için basınç dağılımı -50000 Pa civarında, türbülans

yoğunluğunun maksimum 0,34 civarında, kanat arkasındaki hızın minimum olduğu bölge hızının ise 0,6 m/s olduğu görülmüştür. Basınç dağılımlarından her iki kanat için de kanat yüzeylerinde kavitasyon oluşmayacağı görülmüştür. Güç katsayısının maksimum olduğu λ değerlerinin haricindeki değerlerin basınç dağılımları incelendiğinde de kanat yüzeyinin herhangi bir kısmında kavitasyon olmadığı görülmüştür.

4.4. Üç Boyutlu Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Yapılan deneysel çalışmalar ve üç boyutlu sayısal çalışmalar sonucu elde edilen kanat performans değerlerini karşılaştırmak için Tablo 4.2'de ikili türbin için elde edilen sayısal analiz sonuçları Tablo 4.3'de deneysel analiz sonuçları verilmiştir.

Bu mukayesede, deneysel çalışmalarda gerçekleştirilen uç hız oranları referans alınarak sayısal çalışmalar tekrarlanmış ve mukayese yapılmıştır.

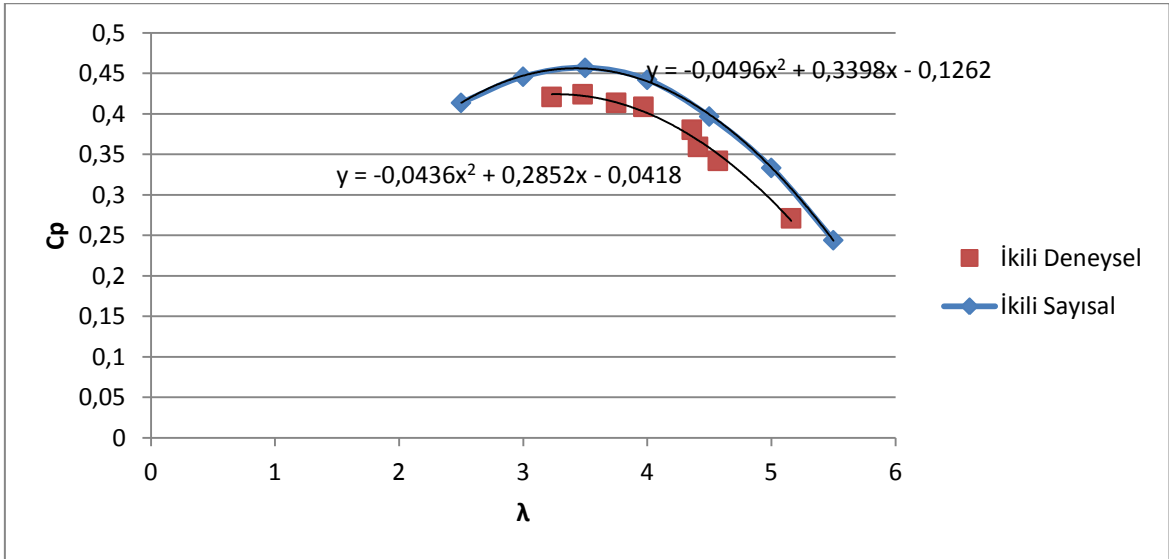
Tablo 4.2. İkili Türbin Sayısal Analiz Performans Değerleri

Uç Hız Oranı	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Tork (Nm)	224,1	201,33	176,8	149,7	119,43	90,3	60,11
Devir (dev/dk)	79,55	95,5	111,4	127,3	143,2	159,2	175
Güç(W)	1867,5	2013,3	2062,67	1996	1791,45	1505	1102,0
Güç(1/2 $\rho V^3 A$)	4514,85	4514,85	4514,85	4514,8	4514,85	4514,85	4514,8
Güç Kat., C_p	0,414	0,446	0,457	0,442	0,397	0,333	0,244

Tablo 4.3. İkili Türbin Deneysel Analiz Performans Değerleri

Uç Hız Oranı	3,23	3,48	3,75	3,97	4,36	4,41	4,57	5,16
Tork (Nm)	176,8	165	149,47	139,6	118,3	110,28	101,28	71,13
Devir (dv/dk)	102,68	110,89	119,34	126,22	138,7	140,49	145,6	164,3
Güç(W)	1900,6	1915,6	1867,9	1845,5	1717,7	1622,2	1544,5	1224,1
Güç (1/2ρV ³ A)	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8
Güç Kat., C _p	0,421	0,424	0,414	0,409	0,38	0,359	0,342	0,271
Elektriksel Güç	1539,5	1570,8	1503,7	1439,1	1355,3	1304,4	1280,4	998,91
Kayıp(%)	19	18	19,5	22	21	19,6	17	18,4

Tablolardaki sayısal ve deneysel güç değerlerinin elde edildiği λ değerleri birbirlerinden farklı olduğundan çözümleri karşılaştırmak için tüm değerler Şekil 4.4'de gösterilen grafiğe aktarılmıştır.



Şekil 4.4. İkili Türbin Sayısal ve Deneysel C_p - λ Değişimi

Sayısal verilerden $y = -0,049x^2 + 0,339x - 0,126$ ikinci derece polinomu, deneysel verilerden ise $y = -0,043x^2 + 0,339x - 0,126$ polinomu oluşturulmuştur. Tablo 4.4'de deneysel λ değerlerine karşılık deneysel veri polinomu denkleminde ve sayısal veri polinomundan elde edilen C_p değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.4. İkili Türbin Sayısal ve Deneysel C_p - λ Değişimi ve Hatalar

Lamda(λ)	3,23	3,48	3,75	3,97	4,36	4,41	4,57	5,16
Deneysel	0,431	0,430	0,423	0,413	0,384	0,38	0,363	0,285
Sayısal	0,458	0,46	0,456	0,448	0,421	0,416	0,4	0,319
Hata(%)	5,9	6,52	7,24	7,8	8,79	8,65	9,25	10,66

Sayısal çalışmada maksimum güç katsayısı 3,5 λ 'da elde edilmiştir. Deneysel çalışmada ise bu değere yakın olan 3,48 λ 'da güç katsayısı maksimuma ulaşmıştır. Hatalara bakıldığında düşük λ değerlerinde hatanın daha az olduğu devrin artmasıyla hata oranının da arttığı görülmüştür. Hata analizi için ayrıca programa deneysel çalışmalarda oluşan 4,36 λ 'daki devir sayısı girilmiş ve tork değeri elde edilmiştir. Tablo 4.5'de aynı λ 'daki sayısal ve deneysel çalışmadan elde edilen tork değeri verilmiştir.

Tablo 4.5. İkili Türbin Sayısal ve Deneysel Analiz Karşılaştırma, $\lambda = 4,36$

	Sayısal	Deneysel
Uç Hız Oranı	4,36	4,36
Tork(Nm)	126,2	118,3
Devir(dev/dk)	138,7	138,7
Güç(W)	1833	1718,3
Güç($1/2\rho V^3 A$)	4514,85	4514,85
Güç Kat., C_p	0,406	0,38

Tablolarda görüldüğü gibi hata miktarları oldukça düşüktür. Aynı hata analizleri standart kanat kesitine sahip türbin için de yapılmıştır. Standart kanat kesitli türbinin sayısal ve deneysel sonuçları Tablo 4.6'da ve Tablo 4.7'de verilmiştir.

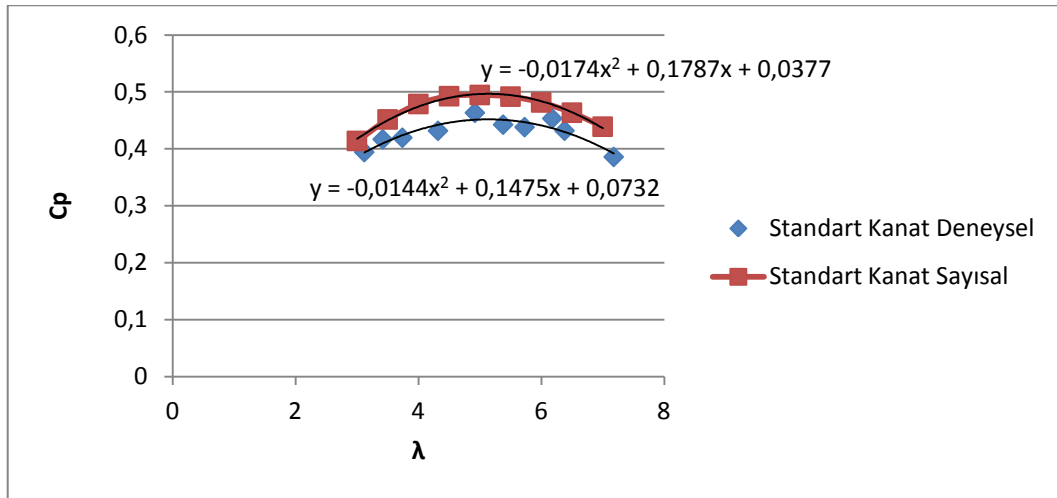
Tablo 4.6. Standart Türbin Sayısal Analiz Performans Değerleri

Uç Hız Oranı	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Tork (Nm)	186,78	174,7	162,05	148,17	133,93	121,05	108,64	96,54	84,89
Devir (dev/dk)	95,49	111,41	127,32	143,24	159,15	175,07	190,99	206,9	222,82
Güç (W)	1867,8	2038,2	2160,7	2222,5	2232,2	2219,2	2172,8	2091,7	1980,8
Güç ($1/2\rho V^3 A$)	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8
Güç Kat. C_p	0,414	0,451	0,479	0,492	0,494	0,492	0,481	0,463	0,439

Tablo 4.7. Standart Türbin Deneysel Analiz Performans Değerleri

Uç Hız Oranı	3,12	3,42	3,74	4,32	4,92	5,38	5,73	6,18	6,38	7,18
Tork (Nm)	171,05	164,06	151,88	135,3	127,5	111,35	103,52	99,31	91,64	72,74
Devir dv/dak	99,31	108,86	119,05	137,51	156,61	171,25	182,39	196,72	203,08	228,55
Güç (W)	1778,9	1880,6	1893,4	1948,2	2091,1	1996,8	1977,2	2045,8	1948,8	1740,8
Güç $1/2\rho V^3 A$	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8	4514,8
Güç Kat., C_p	0,394	0,417	0,419	0,432	0,463	0,442	0,438	0,453	0,432	0,386
Elekt. Güç	1465,8	1527,0	1519,4	1611,2	1695,9	1611,4	1610,8	1690,7	1591,9	1429,7
Kayıp (%)	18	19	19,7	17	18,9	19,3	18,5	17,4	18,3	17,9

Şekil 4.5'de sayısal ve deneysel analiz λ değerlerine karşılık güç katsayısı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.5. Standart Türbin Sayısal ve Deneysel C_p - λ Değişimi

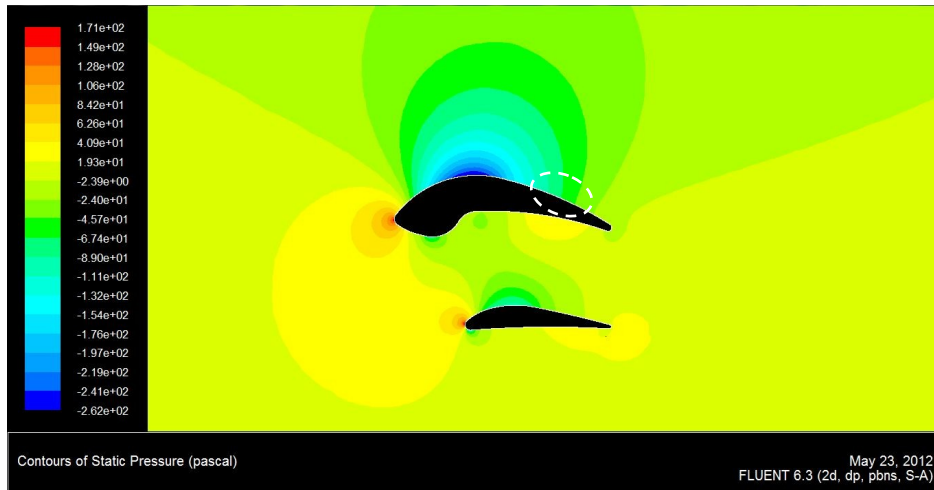
Sayısal verilerden $y = -0,017x^2 + 0,178x + 0,037$ ikinci derece polinomu, deneysel verilerden ise $y = -0,014x^2 + 0,147x + 0,073$ polinomu oluşturulmuştur. Tablo 4.8'de deneysel λ değerlerine karşılık deneysel veri polinomu denkleminde ve sayısal veri polinomundan elde edilen C_p değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.8. Standart Türbin Sayısal ve Deneysel C_p - λ Değişimi ve Hatalar

Lamda, λ	3,12	3,42	3,74	4,32	4,92	5,38	5,73	6,18	6,38	7,18
Deneysel	0,395	0,412	0,427	0,447	0,457	0,459	0,456	0,447	0,441	0,407
Sayısal	0,427	0,447	0,465	0,489	0,501	0,503	0,499	0,488	0,481	0,439
Hata(%)	7,49	7,83	8,17	8,59	8,78	8,75	8,6	8,4	8,32	7,29

Hata oranları %8 civarında oluşmuştur. Sayısal çalışmadaki güç katsayısının maksimum olduğu λ değeri aynı zamanda tasarım kriteri de olan 5, deneysel çalışma için ise noktasal değerde 4,92 λ 'da, eğri uydurulduğunda ise 5,38 λ 'da oluşmuştur.

İkili türbinin kanat yüzeyinde oluşan basınç dağılımını görmek için kanada bir adet basınç ölçerin yerleştirildiği belirtilmişti. Bu basınç ölçerden 0,5 m/s su hızında -80,38 Pa değeri alınmıştır. 0,5 m/s hızdaki kanat üzerindeki basınç dağılımı ayrıca iki boyutlu analiz çalışmalarında incelenmişti ve sonuçta kanat yüzeyinde Şekil 4.6'da görünen bir basınç dağılımı elde edilmişti. Sayısal ve deneysel analizleri karşılaştırmak için kanada yerleştirilen basınç ölçerin kapsadığı yüzey, sayısal basınç dağılımı üzerinde de kesikli çizgilerle göstermiş ve bu bölgedeki ortalama basınç değerinin yaklaşık olarak -90 Pa olduğu görülmüştür. Bu durum sayısal ve deneysel analizin birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.6. İki Boyutlu Sayısal Analiz Sonucu Oluşan Basınç Dağılımı U = 0,5 m/s

4.5. Sonuç

Sonuç olarak rüzgar ve hidrokinetik türbinlerde kullanılabilir ikili ve standart kanatlı türbin kanatları üzerinde performans karakteristikleri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. İkili kanat kullanımı ile hem rüzgar türbinlerinde hem de hidrokinetik türbinler yüksek performansın yanında geniş bir hız sınırları arasında stall konumuna gelmeden enerji üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

- İkili kanat kullanımıyla maksimum kaldırma kuvveti katsayısı $C_{Lmaks.} = 1,451$ değerinden $C_{Lmaks.} = 2,441$ değerine yükselmiştir. Kanadın stall olma durumu standart kanatta $\alpha = 16^\circ$ den $\alpha = 30^\circ$ ye yükselmiştir. İkili kanat için dizayn parametreleri $C_L = 1,671$, $C_D = 0,1386$, $C_L / C_D = 12,05$ ve $\alpha = 3^\circ$ olarak elde edilmiştir.
- İkili kanat kullanıldığında stall hücum açısının oldukça yüksek olduğu ve bu nedenle daha geniş hız sınırları arasında yüksek verimle çalışabileceği sonucuna varılmıştır.
- Türbin su ortamında çalışacağından dolayı yapılan basınç dağılımı incelemelerinde ikili kanat yüzeyinin herhangi bir yerinde kavitasyon oluşmayacağı görülmüştür.
- İkili kanadın maksimum güç katsayısı CFD analizlerinden $\lambda = 3,5$ değerinde 0,457 olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda ise kanadın maksimum güç katsayısı CFD çalışmalarından yaklaşık %7 farklı olacak şekilde 0,424 olarak elde edilmiştir.
- Uygun akarsularda , hidrokinetik türbin kullanılarak, yılda önemli miktarda enerji üretilebileceği,
- Oluşturulacak hidrokinetik kanallarda türbin çiftlikleri olarak birden fazla türbin yerleştirilerek üretilecek enerji miktarının artabileceği,
- Hidroelektrik baraj atık suları bir hidrokinetik kanala yönlendirilerek elde edilen akıntıdan hidrokinetik enerji elde edilebileceği,
- Geliştirilen ikili kanat yardımı ile düşük akıntı hızlarında 1 m/s veya biraz altı, hidrokinetik türbin uygulaması ile enerji üretilebileceği ve bu anlamda boğazların belli bölgelerinin (önceki bölümlerde tanımlanmış) önemli potansiyeller oluşturduğu,

- Geliştirilen kanadın hem rüzgar hem de hidrokinetik türbinlerde kullanılabilceği, sonuçlarına varılmıştır.

Uygun bir akarsu için ikili 4 m çapında bir tek türbin kullanıldığında üretilecek yıllık enerji miktarı kWh/yıl olarak örneklenmiştir.

Yapılan çalışmalar referans alınarak gerek küçük ölçekli gerekse büyük ölçekli türbinler tek ya da türbin çiftliği olacak şekilde Türkiyedeki akarsularda, hidroelektrik santrallerin atık su kanallarında ve boğazlarda yaygın olarak kullanılabilir.

4.6. Öneriler

Yapılan çalışmada ikili ve standart kesite sahip kanatların iki boyutlu analizleri yapılarak kanat modelini oluşturmak için gerekli parametreler elde edilmiş, daha sonra bu parametreler kanat elemanı momentum teorisinde kullanılarak üç boyutlu modeller elde edilmiştir. Üretimi de yapılan bu modellerin üç boyutlu deneysel çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kanat, gövdeye akışa göre optimum açıdaysen monte edilmiştir. Tezin ilk bölümünde kanatlarda açı kontrolleri yapan çeşitli sistemler olduğu bahsedilmişti. Mevcut üretilen sisteme böyle bir kontrol mekanizması ilave edilerek farklı akış hızları ve kanat açılarında kanadın performans testleri yapılabilir.

Su kanalında yapılan testlerde kanadın ucu ile su yüzeyi arasındaki uzaklık sabit tutulmuştur. Literatürde yapılan çalışmalardaki gibi yüzey ile kanat ucu mesafesi değiştirilerek bu mesafenin kanat performansına etkileri incelenebilir.

Çalışmada üç boyutlu analizde ve deneysel analizde tek bir türbin için sonuçlar alınmıştır. Birden çok türbinden akarsular, boğazlar ve baraj atık sularınının bir kanala yönlendirilmesi suretiyle çok daha fazla elektrik eldesi olabileceği belirtilmişti. Üç boyutlu sayısal çalışmada türbinin arkasında oldukça düşük hız bölgelerinin olduğu görülmüştü. Birden çok türbinin birbirini etkilemeden nasıl

konumlandırılması gerektiği konusunda üç boyutlu ve deneysel analizler gerçekleştirilebilir.

İkili kanadın alt ve üst kanadının kamburlukları ve kalınlıkları değiştirilerek farklı performans değerlendirmeleri yapılabilir.

5. REFERANSLAR

- [1] Energy Information Administration , International Energy Outlook 2009, U.S. Department of Energy, 2009.
- [2] Asmus P., Wheelock C., Hydrokinetic and Ocean Energy, Research Reports, 2009.
- [3] Hagerman G., Bedart R., Guidelines for Preliminary Estimation of Power Production by Offshore Wave Energy Conversion Devices, E2I/EPRI-WP-US-001, 2003.
- [4] Previsic M., Siddiqui O., Bedart R., Economic Assessment Methodology for Offshore Wave Power Plants, E2I/EPRI WP-US-002, Rev 4, 2004.
- [5] Previsic M., Bedart R., Methodology for Conceptual Level Design of Offshore Wave Power Plants, E2I/EPRI WP-US-005, 2004.
- [6] Previsic M., Alaska River In-Stream Energy Feasibility Study, EPRI-RP-006, 2008.
- [7] Quispe F.M., Diden de una turbine de rio parata la generacion de electricidad en el distrito de Mazon- Region Lorato, Lima-Peru, 2005.
- [8] Dhanasekaran T.S., Govardhan M., Computational Analysis of Performance and Flow Investigation on Wells Turbine for Wave Energy Conversion, Renewable Energy, 30, 2129-2147, 2005.
- [9] Thakker A., Frawley P., Sheik Bajjeet E., Numerical Analysis of Wells Turbine Performance Using 3D Navier-Stokes Explicit Solver, Proceeding of the 11th ISOPE, 2011.
- [10] Kim T.H., Setoguchi T., Kaneko K., Raghunathan S., Numerical Investigation on the Effect of Blade Sweep on the Performance of Wells Turbine, Renewable Energy, 25, 1776-1788, 2006.
- [11] Li Y., Calisal S.M., Three-dimensional Effects and Arm Effect on Modeling a Vertical Axis Tidal Current Turbine, Renewable Energy, 35, 2325-2334, 2010.
- [12] Batten W.M.J., Bahaj A.S., Molland A.F., Chaplin J.R., Experimentally Validated Numerical Method for the Hydrodynamic Design of Horizontal Axis Tidal Turbines, Ocean Engineering, 34, 1013-1020, 2007.
- [13] Myers L., Bahaj A.S., Simulated Electrical Power Potential harnessed by Marine Current Turbine Arrays in the Alderney Race, Renewable Energy, 30,

1713-1731, 2005.

- [14] Khan M.J., Iqbal M.T., Quaiocoe J.E., River Current Energy Conversion Systems: Progress, Prospects and Challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2177-2193, 2008.
- [15] Yao J., Yuan W., Wang J., Xie J., Zhou H., Peng M., Sun Y., Numerical Simulation of Aerodynamic Performance for Two Dimensional Wind Turbine Airfoils, *Procedia Engineering*, 31, 80-86, 2012.
- [16] Anyi M., Kirke B., Hydrokinetic Turbine Blades: Design and Local Construction Techniques for Remote Communities, *Energy for Sustainable Development*, 15, 223-230, 2011.
- [17] Güney M.S., Evaluation and Measures to Increase Performance Coefficient of Hydrokinetic Turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3669-3675, 2011.
- [18] Anyi M., Kirke B., Evaluation of Small Axial Flow Hydrokinetic Turbines for Remote Communities, *Energy for Sustainable Development*, 14, 110-116, 2010.
- [19] Zabihian F., Fung A.S., Review of Marine Renewable Energies: Case Study of Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2461-2474, 2011.
- [20] Shields M.A, Woolf D.K., Grist E.P.M., Kerr S.A., Jackson A.C., Harris R.E., Bell M.C., Beharie R., Want A., Osalusi E., Gibb S.W., Side J., Marine Renewable Energy: The Ecological Implications of Altering the Hydrodynamics of the Marine Environment, *Ocean & Coastal Management*, 54, 2-9, 2011.
- [21] Bahaj A.S., Myers L.E., Fundamentals Applicable to the Utilisation of Marine Current Turbines for Energy Production, *Renewable Energy*, 28, 2205-2211, 2003
- [22] Myers L.E., Bahaj A.S., An Experimental Investigation Simulating Flow Effects In First Generation Marine Current Energy Converter Arrays, *Renewable Energy*, 37, 28-36, 2012.
- [23] Lago L.I., Ponta F.L., Chen L., Advances and Trends In Turbine Systems, Energy for Hydrokinetic Turbine Systems, *Energy for Sustainable Development*, 14, 287-296, 2010.
- [24] Ameku K., Nagai B.M., Roy J.N., Design of a 3kW Wind Turbine Generator

- with Thin Airfoil Blades, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1723-1730, 2008.
- [25] Liu H-W., Ma S., Li W., Gu H-G., Lin Y-G., Sun X-J., A Review On the Development of Tidal Current Energy In China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1141-1146, 2011.
- [26] Wang S., Xu C., Yuan P., Yingying W., Hydrodynamic Optimization of Channelling Device for Hydro Turbine Based On Lattice Boltzman Method, *Computers and Mathematics with Applications*, 61, 3722-3729, 2011.
- [27] Güney M.S., Kaygusuz K., Hydrokinetic Energy Conversion Systems: A Technology Status Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2996-3004, 2010.
- [28] Khan M.J., Bhuyan G., Iqbal M.T., Quaicoe J.E., Hydrokinetic Energy Conversion Systems and Assessment of Horizontal and Vertical Axis Turbines for River and Tidal Applications: A Technology Status Review, *Applied Energy*, 86, 1823-1835, 2009.
- [29] 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 Towing Tank, *Renewable Energy*, 32, 407-426, 2007.
- [30] Bahaj A.S., Batten W.M.J., McCann G., Experimental Verifications of Numerical Predictions for the Hydrodynamic Performance of Horizontal Axis Marine Current Turbines, *Renewable Energy*, 32, 2479-2490, 2007.
- [31] Ponta F.L., Jacovkis P.M., Marine-Current Power Generation By Diffuser-Augmented Floating Hydro-Turbines, *Renewable Energy*, 33, 665-673, 2008.
- [32] Yang B., Lawn C., Fluid Dynamic Performance of a Vertical Axis Turbine for Tidal Currents, *Renewable Energy*, 1-12, 2011.
- [33] Gaden D.L.F, Bibeau E.L., A Numerical Investigation into the Effect of Diffusers On the Performance of Hydrokinetic Turbines Using a Validated Momentum Source Turbine Model, *Renewable Energy*, 35, 1152-1158, 2010.
- [34] Batten W.M.J., Bahaj A.S., Molland A.F., Chaplin J.R., Hydrodynamics of Marine Current Turbines, *Renewable Energy*, 31, 249-256, 2006.
- [35] Myers L., Bahaj A.S., Wake Studies of a 1/30th Scale Horizontal Axis Marine Current Turbine, *Ocean Engineering*, 34, 758-762, 2007.

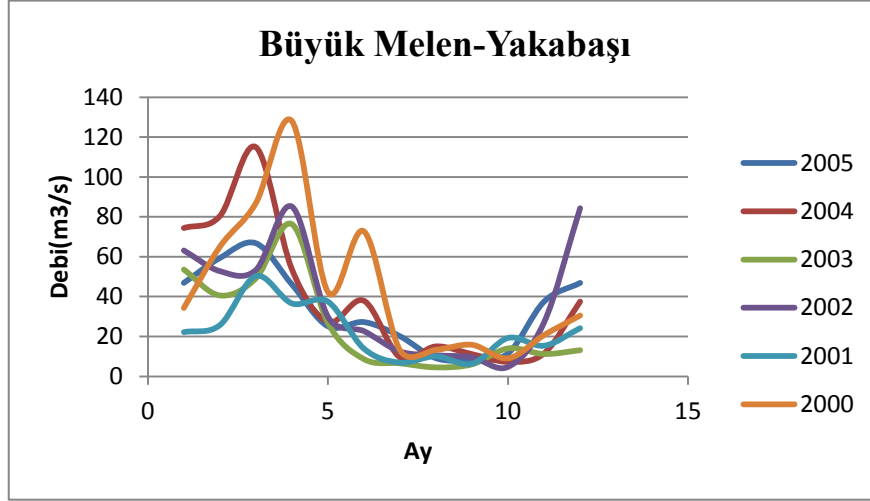
- [36] Myers L., Bahaj A.S., Power Output Performance Characteristics of a Horizontal Axis Marine Current Turbine, *Renewable Energy*, 31, 197-208, 2006.
- [37] Jo CH., Yim J.Y, Lee K.H., Rho Y.H., Performance of Horizontal Axis Tidal Current Turbine By Blade Configuration, *Renewable Energy*, 42, 195-216, 2012.
- [38] Kang S., Borazjani I., Colby J.A., Sotiropoulos F., Numerical Simulation of 3D Flow Past a Real-Life Marine Hydrokinetic Turbine, *Advances in Water Resources*, Volume 39, 33-43, 2012.
- [39] Goundar J.N., Ahmed M.R., Lee Y-H., Numerical and Experimental Studies on Hydrofoil for Marine Current Turbines, *Renewable Energy*, 42, 173-179, 2012.
- [40] Singh R.K., Ahmed M.R., Zullah M.A., Lee Y-H., Design of a Low Reynolds Number Airfoil for Small Horizontal Axis Wind Turbines, *Renewable Energy*, Volume 42, 66-76, 2012.
- [41] Thumthae C., Chitsomboon T., Optimal Angle of Attack for Untwisted Blade Wind Turbine, *Renewable Energy*, 34, 1279-1284, 2009.
- [42] Amano R.S., Malloy R.J., CFD Analysis on Aerodynamics Optimization of Wind Turbine Rotor Blades, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 60, 71-75, 2009.
- [43] Ahmed M.R., Blade Sections for Wind Turbine and Tidal Current Turbine Applications- Current Status and Future Challenges, *International Journal of Energy Research*, 36, 829-844, 2012.
- [44] Wata J., Faizal M., Talu B., Vanawalu L., Sotia Puamau, Ahmed M.R., Studies on a Reynolds Number Airfoil for Small Wind Turbine Applications, *Science China*, Volume 54, 1684-1688, 2011.
- [45] EİE, Su Akımları Aylık Ortalamaları Kitabı, Eylül 2008.
- [46] Beşiktepe Ş.T., Özsoy E., Latif M.A., Oğuz T., Marmara Denizi'nin Hidrografisi ve Dolaşımı, *Marmara Denizi Sempozyumu*, 314-326, 2000.
- [47] Özsoy E., Oğuz T., Latif M., Ünlüata Ü., *Oceanography of the Turkish Straits- First Annual Report, Volume I, Physical Oceanography of the Turkish Straits*, Institute of Marine Sciences, 1986.
- [48] Özsoy E., Oğuz T., Latif M., Ünlüata Ü., Sur H.İ., Ş. Beşiktepe,

Oceanography of the Turkish Straits-Second Annual Report, Volume I, Physical Oceanography of the Turkish Straits, Institute of Marine Sciences, 1988.

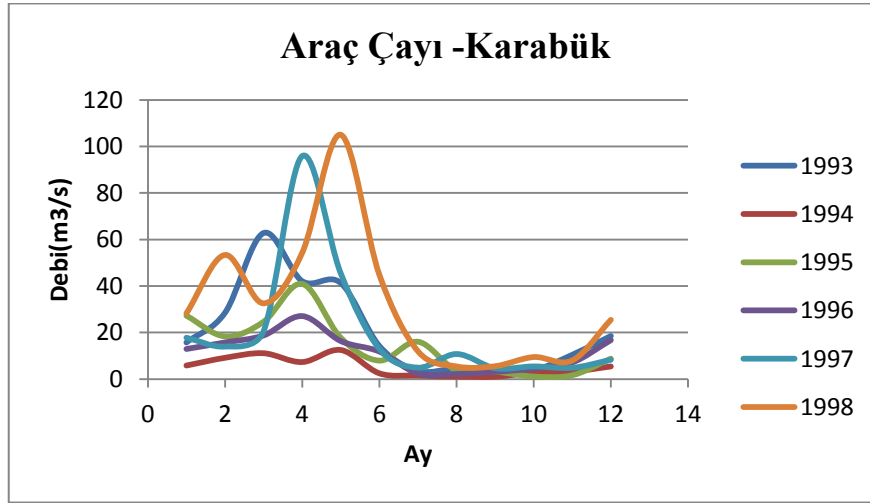
- [49] Ünlüata Ü., Oğuz T., Latif M.A., Özsoy E., On the Physical Oceanography of the Turkish Straits, In: The Physical Oceanography of Sea Straits, L.J. Pratt, editor, NATO/ASI Series, 1990.
- [50] Beşiktepe Ş., Özsoy E., Ünlüata Ü., Filling of the Marmara Sea by the Dardanelles Lower Layer Inflow, Deep Sea Research, 40, 1815-1838, 1993.
- [51] Beşiktepe Ş., Sur H., Özsoy E., Latif M.A., Oğuz T., Ünlüata Ü., The Circulation and Hydrography of the Marmara Sea, Progress In Oceanography, 34, 285-334, 1994.
- [52] Güler I., Yüksel Y., Yalçiner A.C., Çevik E., Ingerslev C., Measurement and Evaluation of the Hydrodynamics and Secondary Currents in and a Strait Connecting Large Water Bodies-A Field Study, Ocean Engineering, 13, 1718-1748, 2006.
- [53] Buhl M., NWTTC Design Codes WT-Perf. a Wind Turbine Performance Predictor, <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/wtperf/>, April 2009.
- [54] Manwell J.F., MCGowan J.G., Rogers A.L., Wind Energy Explained Theory, Design and Application, 2nd Edition, Wiley, U.K, 2009, 129-132.
- [55] Numerical Simulation And Aerodynamic Performance Comparison Between Seagull Aerofoil and NACA 4412 Aerofoil under Low-Reynolds HUA Xin, GU Rui JIN Jing-fu, LIU Yi-rong, MA YiCONG, Qian ZHENG Ying
- [56] Genç, A., Erişoğlu, M., Pekgör, A., Oturanc, G., Hepbasli, A., Ulgen, K., Estimation of Wind Power Potential Using Weibull Distribution, Energy Sources, 27, 809-822, 2005.

EKLER

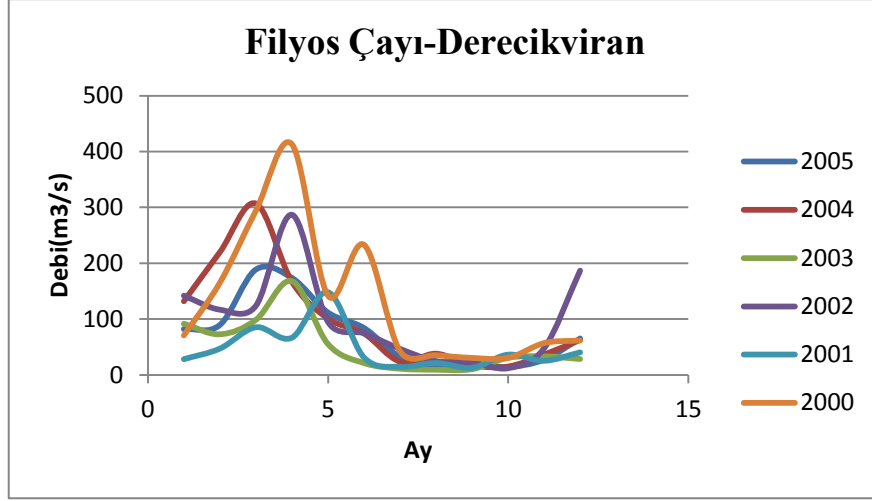
Ek-A Batı Karadeniz Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri



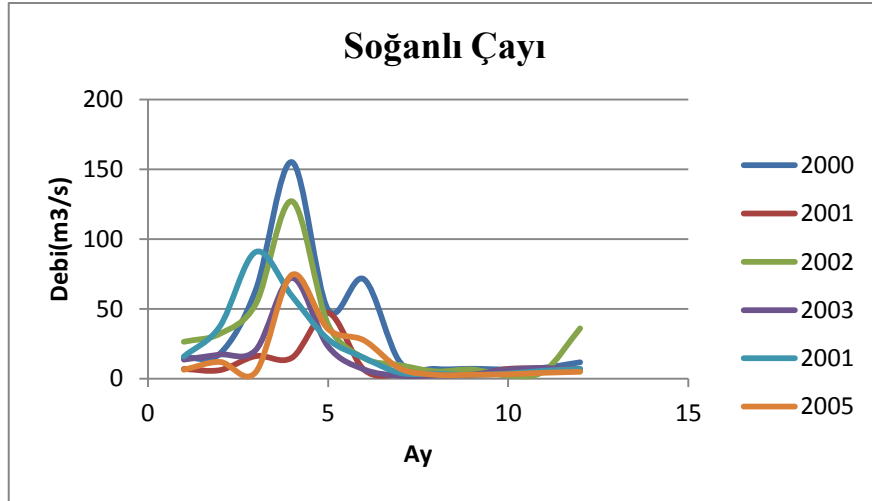
Şekil A.1. Büyük Melen Akarsuyu Aylık Debi Değişimi



Şekil A.2. Araç Çayı Aylık Debi Değişimi

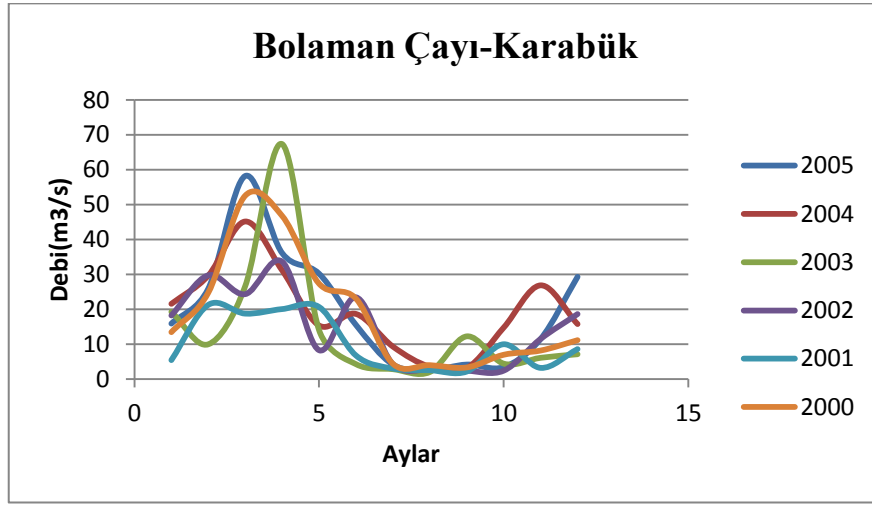


Şekil A.3. Filyos Çayı Aylık Debi Değişimi

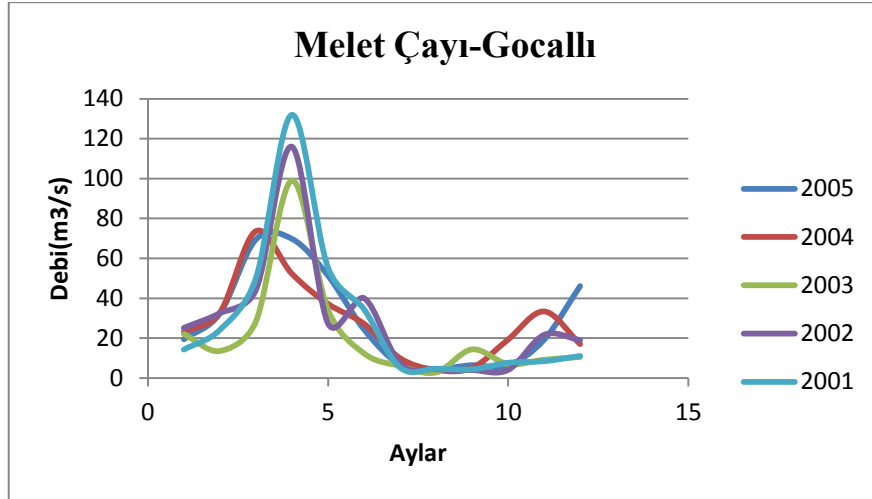


Şekil A.4. Soğanlı Çayı Aylık Debi Değişimi

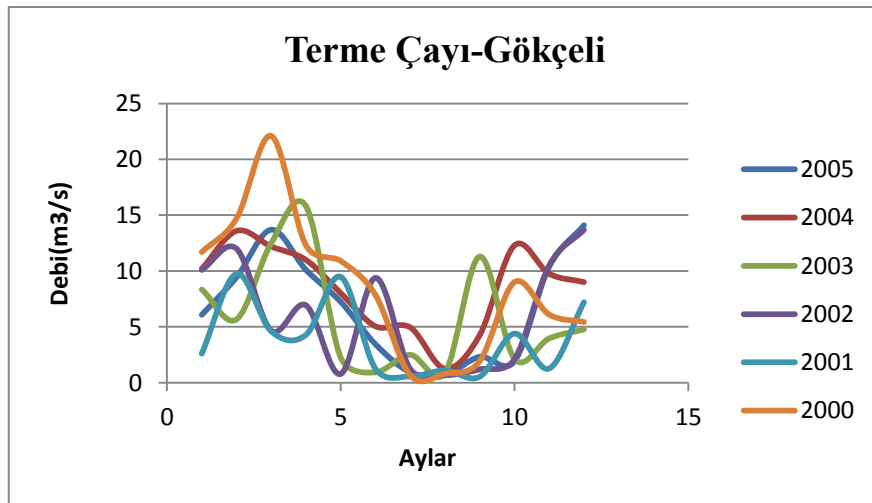
Ek-B Doğu Karadeniz Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri



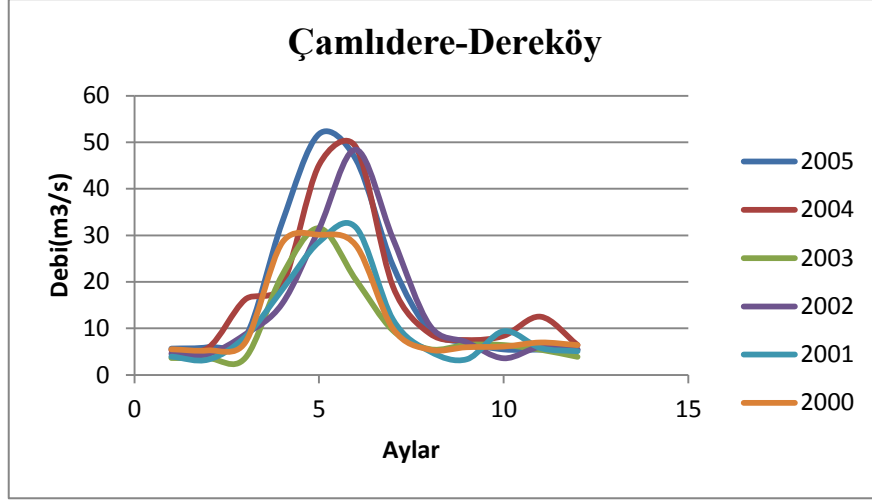
Şekil B.1. Bolaman Çayı Aylık Debi Değişimi



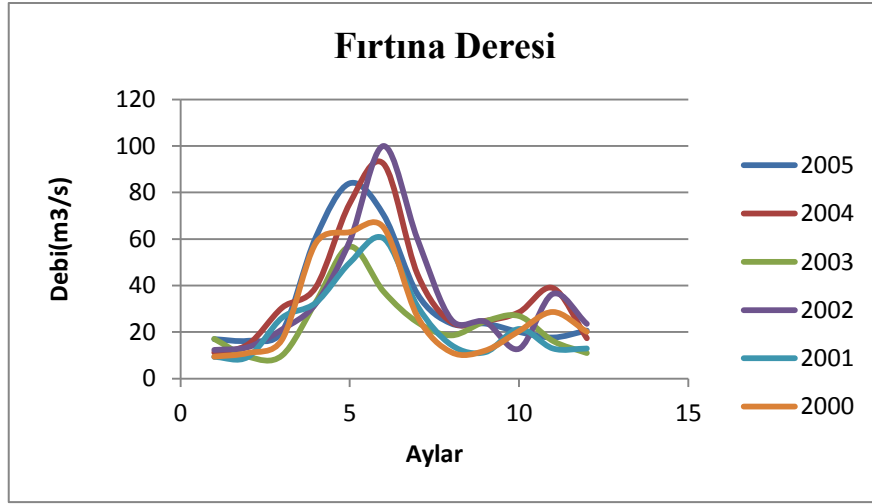
Şekil B.2. Melet Çayı Aylık Debi Değişimi



Şekil B.3. Terme Çayı Aylık Debi Değişimi

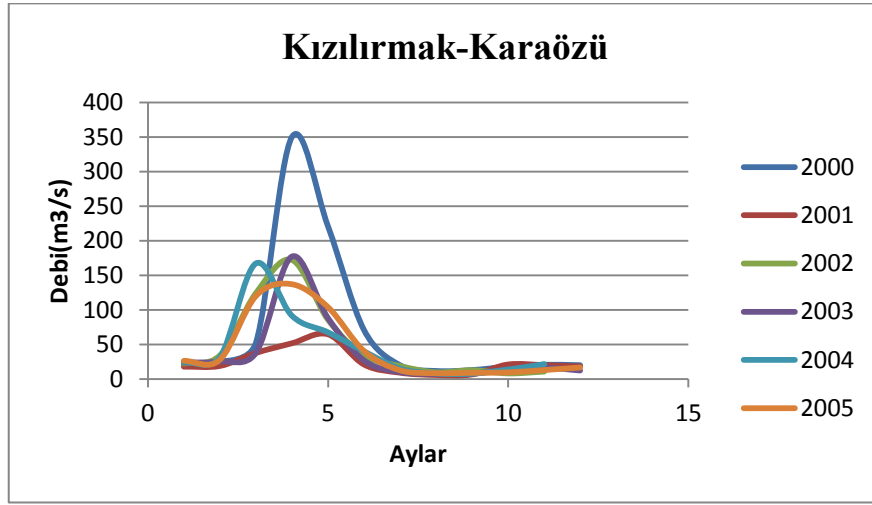


Şekil B.4. Çamlıdere Akarsuyu Aylık Debi Değişimi

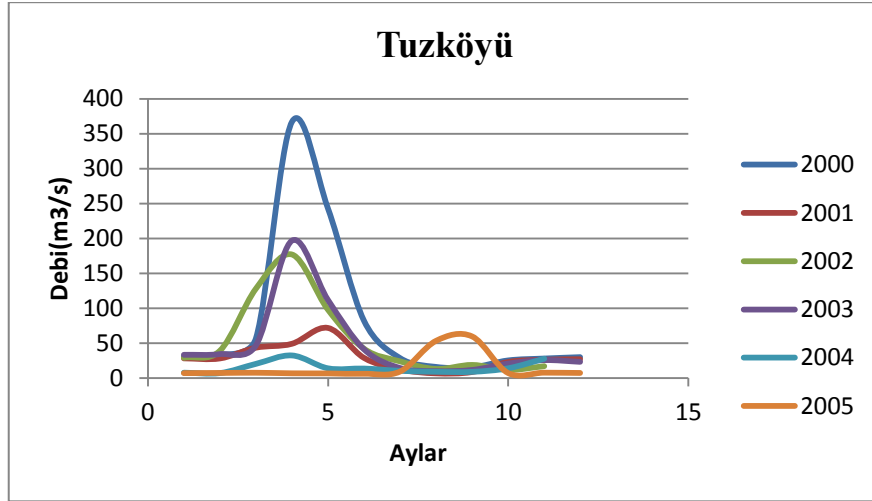


Şekil B.5. Fırtına Deresi Aylık Debi Değişimi

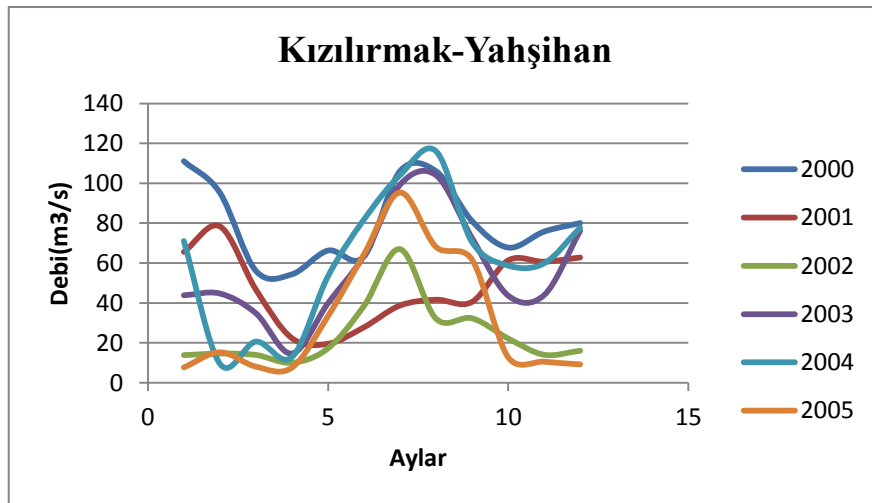
Ek-C Kızılırmak Havzası Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri



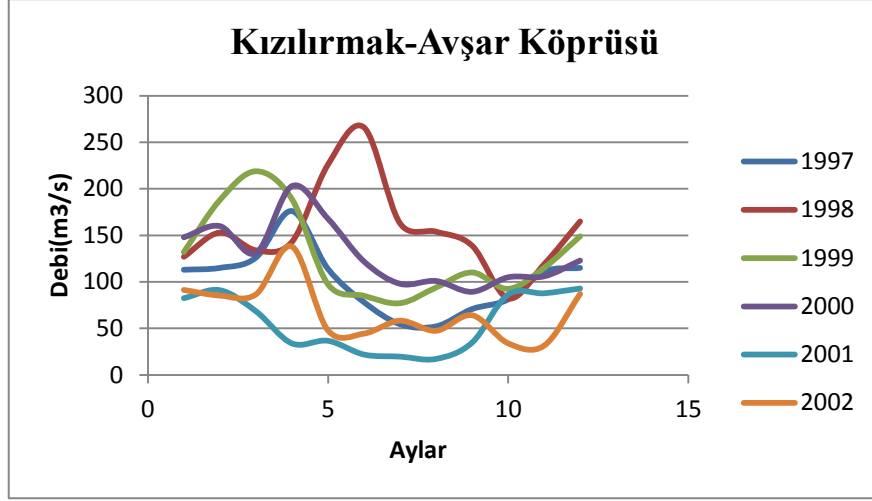
Şekil C.1. Kızılırmak Akarsuyu Aylık Debi Değişimi



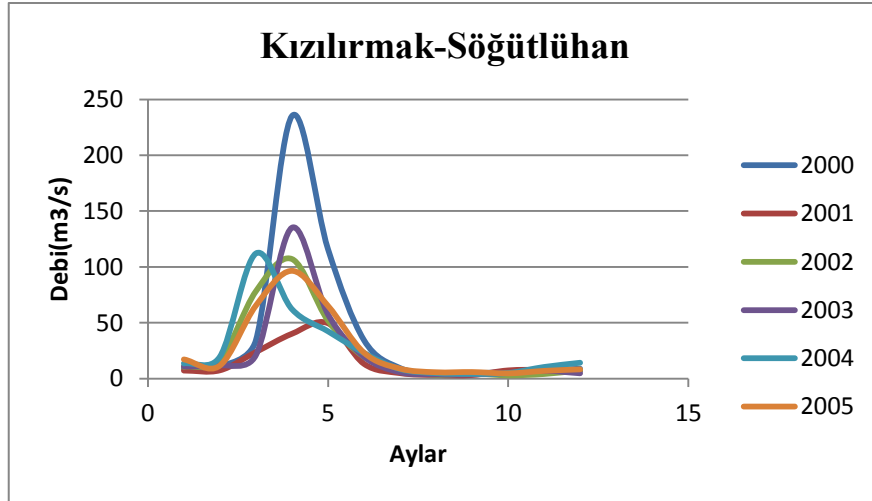
Şekil C.2. Tuzköyü Akarsuyu Aylık Debi Değişimi



Şekil C.3. Kızılırmak Akarsuyu Aylık Debi Değişimi

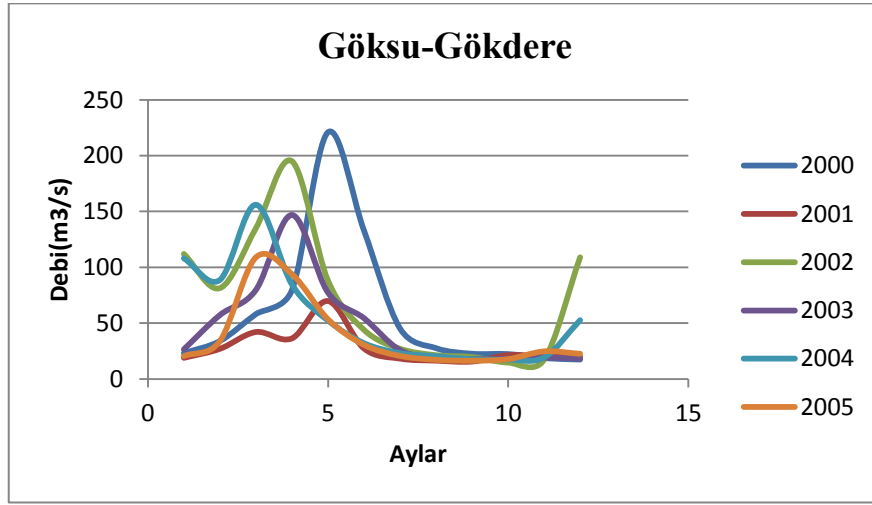


Şekil C.4. Kızılırmak Akarsuyu Aylık Debi Değişimi

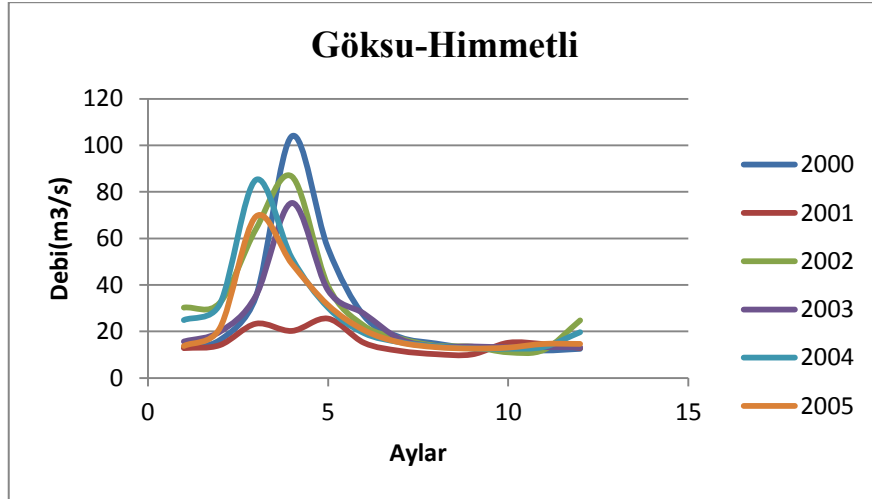


Şekil C.5. Kızılırmak Akarsuyu Aylık Debi Değişimi

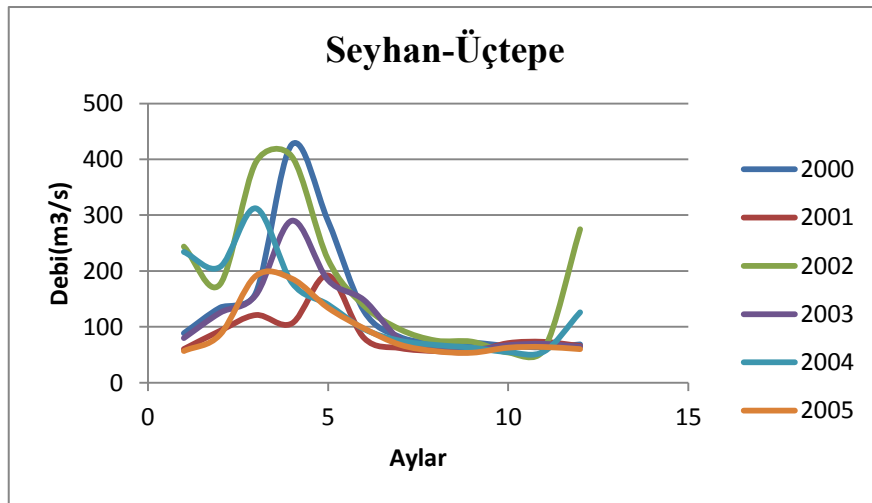
Ek-D Seyhan Havzası Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri



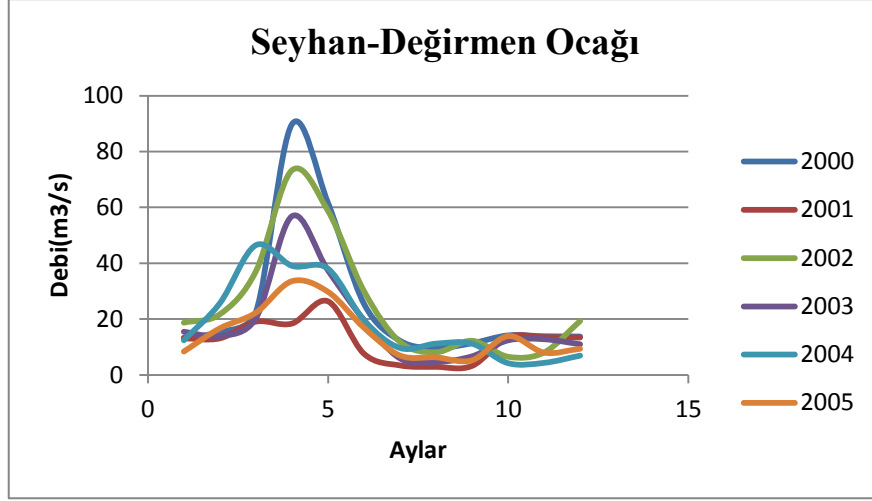
Şekil D.1. Göksu Akarsuyu Aylık Debi Değişimi



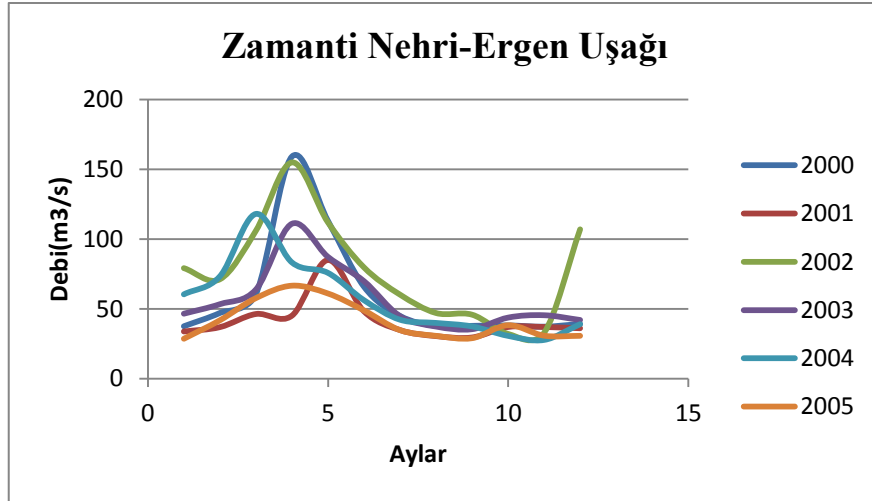
Şekil D.2. Göksu Akarsuyu Aylık Debi Değişimi



Şekil D.3. Seyhan Akarsuyu Aylık Debi Değişimi

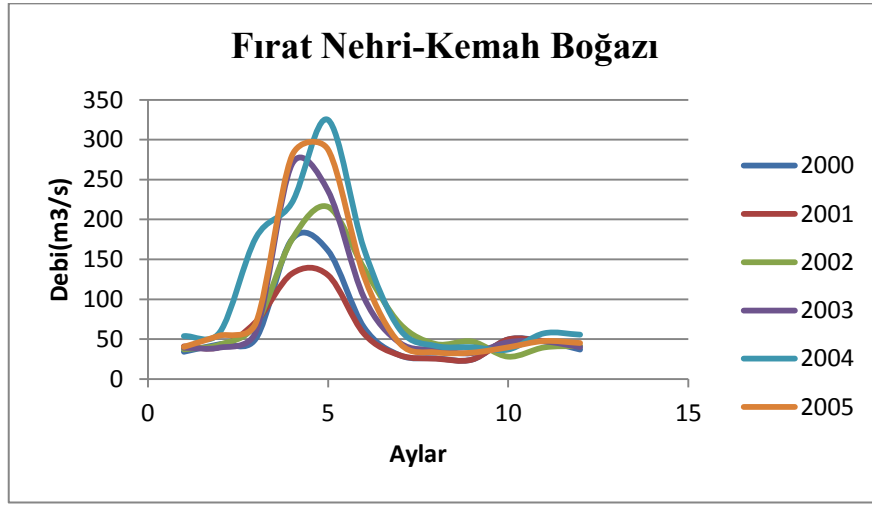


Şekil D.4. Seyhan Akarsuyu Aylık Debi Değişimi

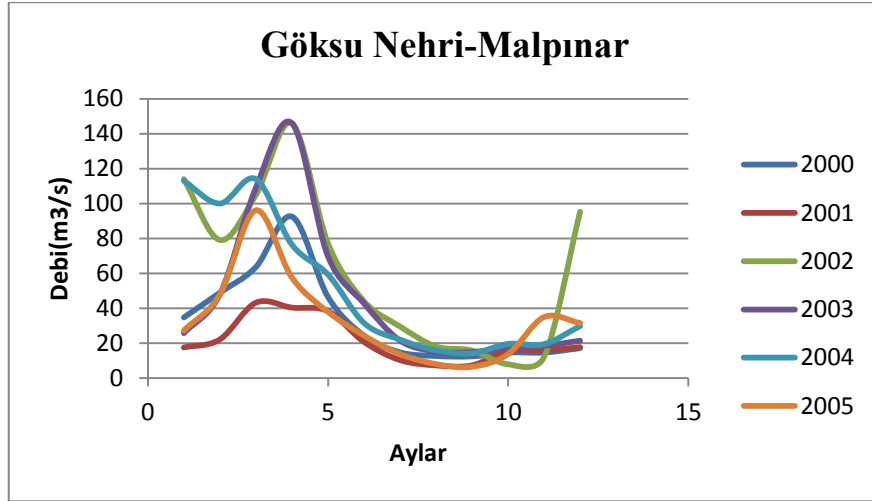


Şekil D.5. Zamanti Nehri Aylık Debi Değişimi

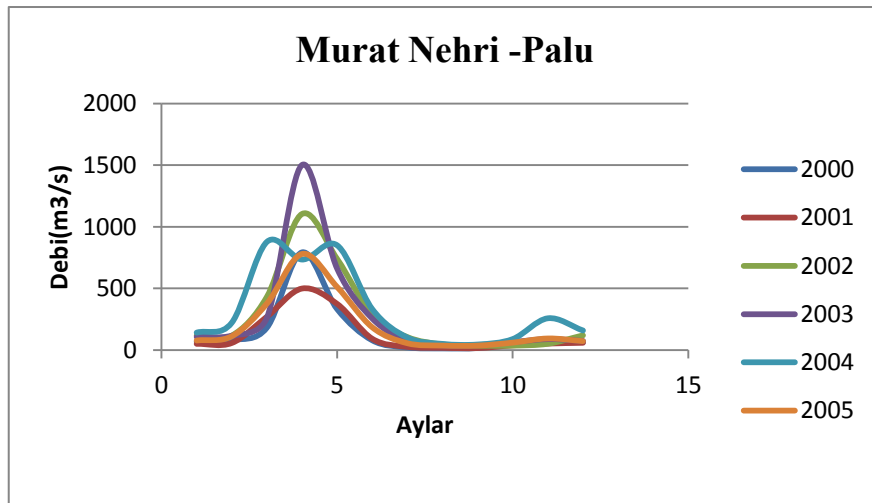
Ek-E Fırat Dicle Havzası Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri



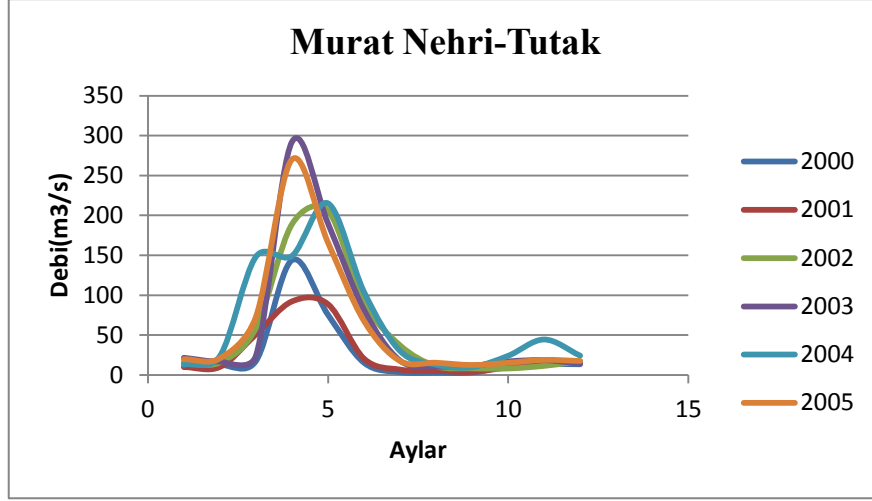
Şekil E.1. Fırat Nehri Aylık Debi Değişimi



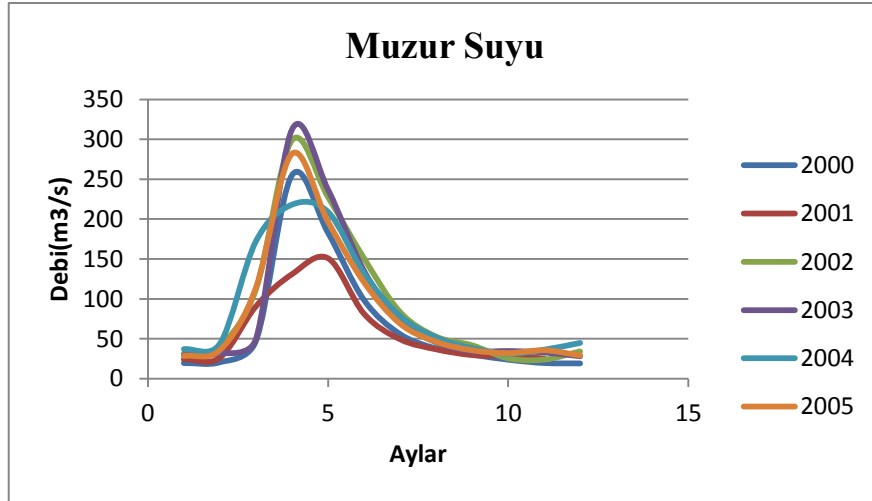
Şekil E.2. Göksu Nehri Aylık Debi Değişimi



Şekil E.3. Murat Nehri Aylık Debi Değişimi

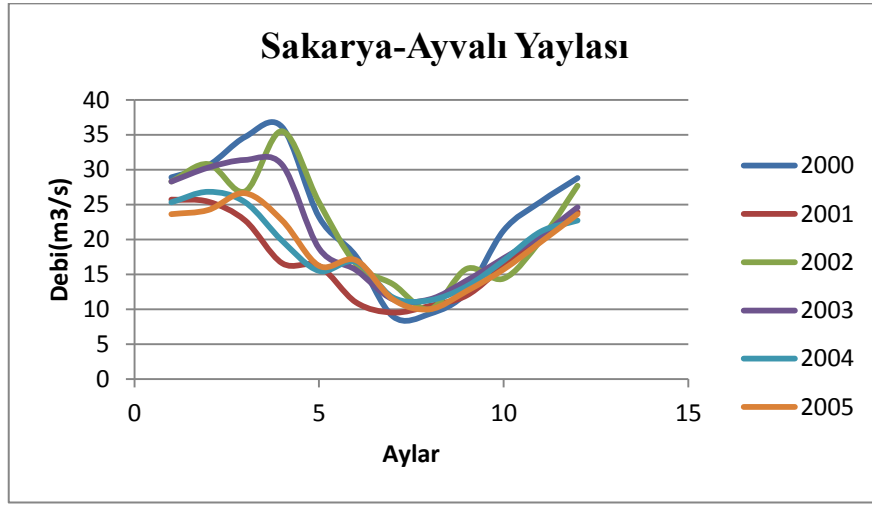


Şekil E.4. Murat Nehri Aylık Debi Değişimi

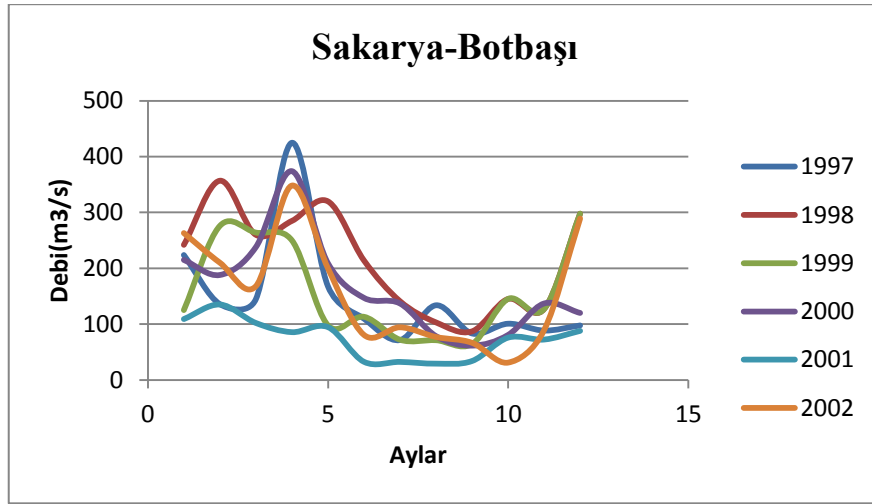


Şekil E.5. Muzur Suyu Aylık Debi Değişimi

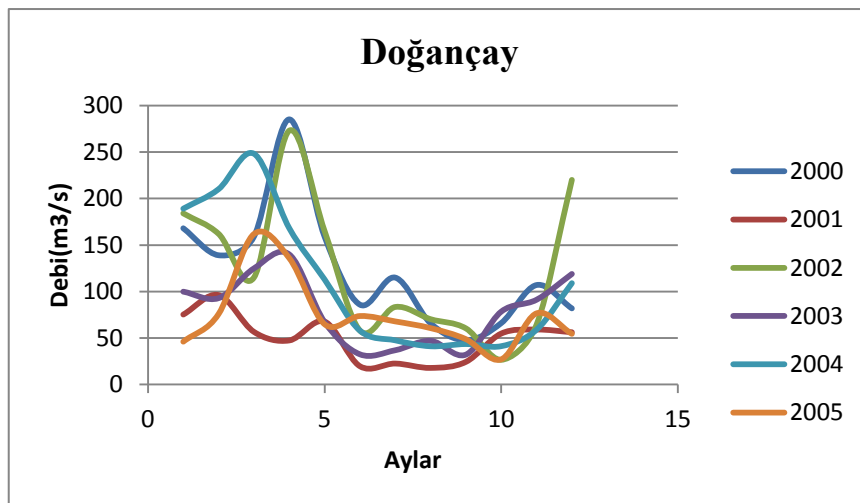
Ek-F Sakarya Havzası Akarsularının Yıllara Göre Aylık Debi Değişimleri



Şekil F.1. Sakarya Nehri Aylık Debi Değişimi



Şekil F.2. Sakarya Nehri Aylık Debi Değişimi



Şekil F.3. Doğançay Akarsuyu Aylık Debi Değişimi