

RÜZGAR TÜRBİNİ KANADINDA AKIŞ KAYNAKLI DEFORMASYONLARININ SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Mustafa ÖZDEN¹, Burçin ÇELİK², Halil Hakan AÇIKEL³, M. Serdar GENÇ⁴

^{1,2,3,4}Rüzgar Mühendisliği ve Aerodinamik Araştırma Laboratuvarı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Melikgazi, Kayseri

¹mustfozden@gmail.com, ²burcincelikbc@gmail.com,
³hhacikel@erciyes.edu.tr, ⁴musgenc@erciyes.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, NACA 4412 kanat profilinden 0.3 metre uzunluğa sahip rüzgar türbini kanadında oluşan akış kaynaklı deformasyonlar lisans bitirme tezi kapsamında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deney için kullanılan rüzgar türbini kanadı üç boyutlu yazıcı ile plastik malzemenin üretilmiştir. Kanat profili üzerinde oluşan deformasyonların sayısal elde edilmesi için; akış dolayısıyla meydana gelen basınç dağılımı ölçülmüş ve bu basınç dağılımları kullanılarak kanat profilinde oluşan deformasyonlar ANSYS programında kullanılarak sayısal deformasyonlar hesaplanmıştır. Deneysel olarak deformasyonları ölçmek için ise; DIC (*Digital Image Correlation*) sistemi ile kanat üzerinde doğrudan ölçüm yapılmıştır. Deformasyon sonuçlarında sayısal ve deneysel sonuçlar arasında farklılıklar tespit edilmiş olup bu farklılıkların üretimde kanat elastikliğinin farklı olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca akışın görselleştirilmesi için iplikçik ve yağ deneyi ile akış görüntüleme teknikleri kullanılmış ve deneyler sonucunda kanat ucuna doğru kanat tasarımında verilen burulma açısının tutunma kaybı açısından fazla olduğu yerlerde ayrılmalar görülmüş ve tasarımda burulma açısının optimizasyonla detaylı hesaplanarak elde edilmesi gerektiği görülmüştür.

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun enerjiye olan bağılılığı her geçen gün katlanarak artmaktadır. Bu enerji talebinin karşılanmasında dünya üzerinde çoğunluk ile fosil kökenli yakıtlar kullanılmaktadır. Fakat fosil kökenli yakıtların çevreye verdikleri zararlı gazlar canlı hayatını ve doğayı olumsuz yönde etkilemekte ve beraberinde yeni sorunların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu sorunların ortaya çıkması, insanoğlunu fosil yakıtlara olan bağılılığını azaltmak için alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Alternatif enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisi de bu enerji kaynakları arasında yer almaktadır.

Rüzgar enerjisi dünyada insanlar tarafından ilk olarak eski çağlarda milattan önce tahıl öğütme, meyvelerin kurutulması ve yelkenli gemilerin yözdürülmesi gibi uygulamalarda kullanılmıştır. Daha sonraları tarlaları sulamak ve kuyudan su çekme gibi uygulamalar görülmekte ve ilerleyen yüzyıllarda yel değirmenleri aracılığı ile sonra rüzgar türbinleri ile rüzgar enerjisinden faydalanılmıştır. 19.yy geldiğimizde ise Danimarkalı meteorolojist Poul la Cour tarafından ilk elektrik üretim amaçlı rüzgar türbini yapılmıştır. Günümüz teknolojisi ile artık rüzgar türbinleri Mega-Watt seviyelerinde elektrik üretimi gerçekleştirmektedir. Teknolojinin gelişimi ile artık elektrik üretiminin en verimli şekilde yapılması hedeflenmektedir. Verimin artırılması üzerine dünyada birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar rüzgar türbinlerinin daha da yüksek mesafelere çıkarılıp rüzgardan en iyi şekilde faydalanılması, elektrik jeneratörlerinin kayıplarını azaltma ve rüzgar türbinleri için en önemli parçalardan biri olan kanatlar üzerinde akışın düzenlenerek verimin artırılması gibi çalışmalar yapılmaktadır. Rüzgar türbini kanatlarının

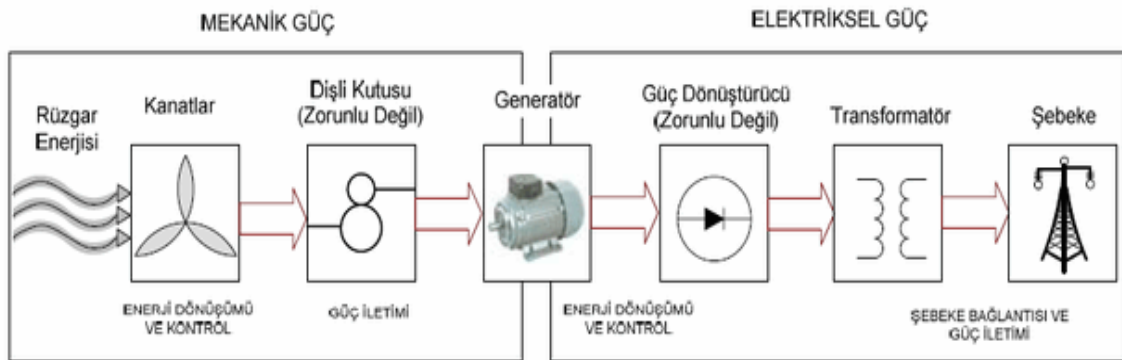
rüzgarın oluşturduğu kaldırma kuvvetini mekanik enerjiye kolay dönüştürebilecek kadar hafif, bu kuvvet karşısında kırılmayacak kadar da sağlam olmalıdır.

Rong Wu ve arkadaşları [1] döner kanat üzerinde üç boyutlu yer değiştirmeyi DIC sistemini kullanarak incelemiştir. Döner nesnelere temasız ve tam hareketli nesnelere hareket ölçümlerinin mühendislikteki öneminden bahsetmişlerdir. Üç boyutlu görüntüleme sistemi bir çift senkronize yüksek hızlı kamera kullanılarak tüm alanda yer değiştirme üç boyutlu olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar önerilen sistemin döner kanadın ölçümleri üç boyutlu tam olarak yapılabildiğini göstermiştir. Bu sistemle rüzgar türbini modelinin çoklu hızlarda üç boyutlu yer değiştirmesinin uygulamalı ölçümü yapılmıştır. Bu deney sonucu bu metodun rüzgar türbini parçalarının erken safhalarda durum işleme ve kanat üzerinde arıza bulma amacıyla kullanılabilirliğini göstermiştir.

Jan Winstroth ve arkadaşları [2] rüzgar türbinlerini dikkate alarak performanslarını incelemiş titreşim ve deformasyonlarını ölçmek için DIC sistemini kullanmışlardır. Yapılan deneyler kararlı hal, rotasyonlu dinamik ve rotasyonsuz dinamik olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır ve optik sistemle elde edilen sonuçlar birleştirilmiştir. Bu çalışmada, rotor kanadı deformasyonlarında kanat fizibilitesini göstermek ve doğruluğunu değerlendirmek ve rüzgar türbininin tam ölçü sapmasını izlemek için uygun bir seçenek olan DIC sistemini seçmişlerdir.

2.RÜZGAR TÜRBİNİ VE ELEMANLARI

Rüzgar türbinleri, rüzgar enerji santrallerinin ana yapı elemanı olup hareket halindeki havanın kinetik enerjisini öncelikle mekanik enerjiye ve sonrasında elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir. Bir rüzgar türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik elemanlar ve kanattan oluşur (Şekil 1). Rüzgar türbinleri dönüş eksenlerinin doğrultusuna göre yatay eksenli veya dikey eksenli olarak imal edilirler. Bu tiplerden en fazla kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinleridir. Bu tip rüzgar türbinleri bir, iki, üç veya çok kanatlı yapılabilmektedir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri; önden rüzgarlı (*up-wind*) veya arkadan rüzgarlı (*down-wind*) türbin adını alırlar. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin eksenleri rüzgar yönüne dik ve dikey olup kanatları da dikey vaziyettedir. Elektrik üretim amaçlı şebeke bağlantılı modern rüzgar türbinleri çoğunlukla 3 kanatlı, yatay eksenli ve *up-wind* türü rüzgar türbinleridir. Her bir rüzgar türbini için belirlenmiş bir rüzgar hızında, sistemden elde edilen güç en büyük değere ulaşır. Bu en büyük güce nominal güç ve bu rüzgar hızına nominal hız adı verilmektedir. Sistemin hasar görmemesi için belirli bir rüzgar hızından sonra rüzgar türbinlerinin stop konumuna geçmesi otomatik olarak sağlanır. Bu maksimum hıza sistemin *cut-out* hızı adı verilmektedir.



Şekil 1. Rüzgar türbini çalışma prensibi [3].

2.1. Rüzgar Türbini Elemanları

2.1.1. Kule

Kule malzemesi, genelde çelik veya betondur. Modern rüzgar türbinleri, halka enine kesitli kulelere sahiptir. Kule yüksekliği, yüksekteki rüzgar hızlarından yararlanmanın getirisi ile boya bağlı artış gösteren kule maliyeti arasındaki optimum çözümlerle belirlenir. Kule boyutlandırılmasındaki önemli bir parametre de, eğilme doğal frekansıdır. Eğilme doğal frekansı ve kule malzemesi maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Rüzgar türbinlerinin tüm imalat giderlerinin % 11-20' si kule imalatına aittir.

2.1.2. Dişli Kutusu

Rüzgardan elde edilen mekanik enerji iletim sistemi ile jeneratöre verilerek elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu dönüşüm dişli kutusu yoluyla yapılır. Dişli kutusu ana şaft ile jeneratör arasında yer almaktadır.

2.1.3. Jeneratör

Rüzgar, pervaneyi bir dişli kutusu üzerinden hareket ettirerek jeneratörü döndürür. Dişli kutusu teknolojisindeki gelişmeler ve düşük hızlı elektrik jeneratörlerinin maliyetlerinin yüksek olması, küçük sistemler dışında pervanenin jeneratör tarafından doğrudan sürülmemesi eğilimine yol açmaktadır. Genellikle aşağıdaki jeneratörler rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

- Doğru akım jeneratörü
- Senkron jeneratör
- Asenkron jeneratör

2.1.4. Türbin Kanadı

Pervane kanatları, rüzgarı yakalar ve gücünü pervanenin göbeğine aktarır. Modern bir 600 kW rüzgar türbininde her pervane kanadının uzunluğu 20 metre kadardır ve bir uçak kanadı gibi tasarlanır. Modern rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyster veya epoksi ile üretilirler. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımı çok iyidir, fakat hem ağır hem de yorulma dayanımları ve korozyon sorunu vardır.

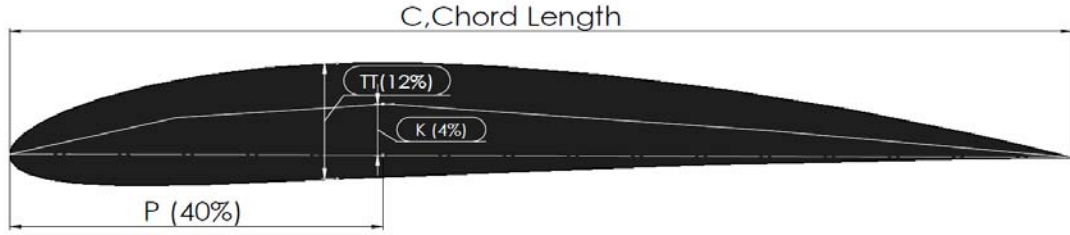
2.2. KANAT ÖZELLİKLERİ

Kanatların boylamasına doğrultuda (gövde doğrultusu) kesilmeleri halinde elde edilen yanall kesit görünümüne kanat profili (*airfoil*) adı verilir. Kanat profillerinin uçuş doğrultusu ve yönüne göre en öndeki noktalarına hücum kenarı (*leading edge*), en geride kalan noktalarına ise firar kenarı (*trailing edge*) adı verilir. Hücum ve firar kenarlarından geçen doğruya veter çizgisi (*chord line*), hücum ve firar kenarları arasındaki uzaklığa ise veter uzunluğu (*chord length*) adı verilir. Bütün kanat profillerinin firar kenarları sivridir. Bu husus aerodinamik taşımanın oluşturulması ve kalitesi açısından önemlidir. Bu çalışmada kanat ğrofilisi olarak NACA 4412 seçilmiş ve kullanılmıştır.

2.2.1. NACA 4412

NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi NASA'nın önceki adıdır ve akış için uygun kanat profilleri araştırmaları çok fazla yapmıştır. Araştırmalar sonucunda geliştirilmiş kambur ve düşük Reynolds sayılı akışlarda kullanılan NACA 4412 profilinde ilk rakam kord boyunun yüzdesine göre maksimum

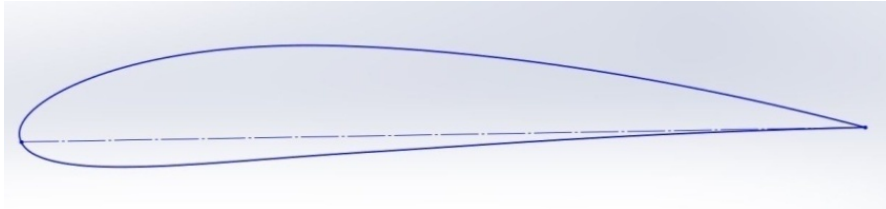
kamburluğu tanımlarken (%4), ikinci rakam ise maksimum kamburluğun yerini (%40) belirtirken son iki rakam ise kord yüzdesine göre maksimum kalınlığı (%12) belirtir (Şekil 2).



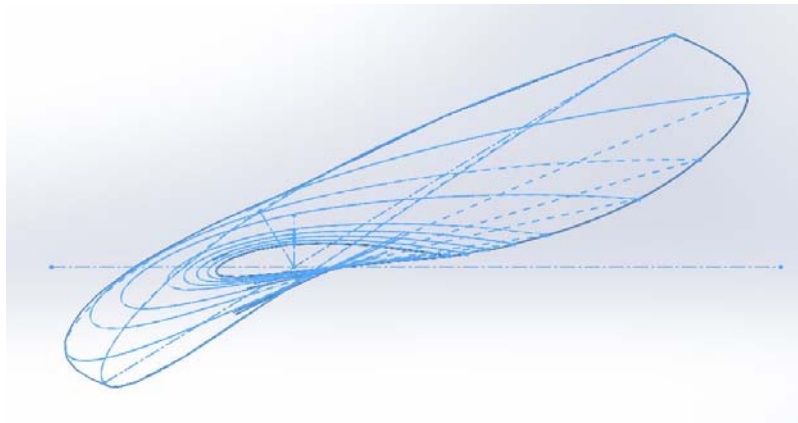
Şekil 2. NACA 4412 profili.

2.2.2. Kanat Modelleme

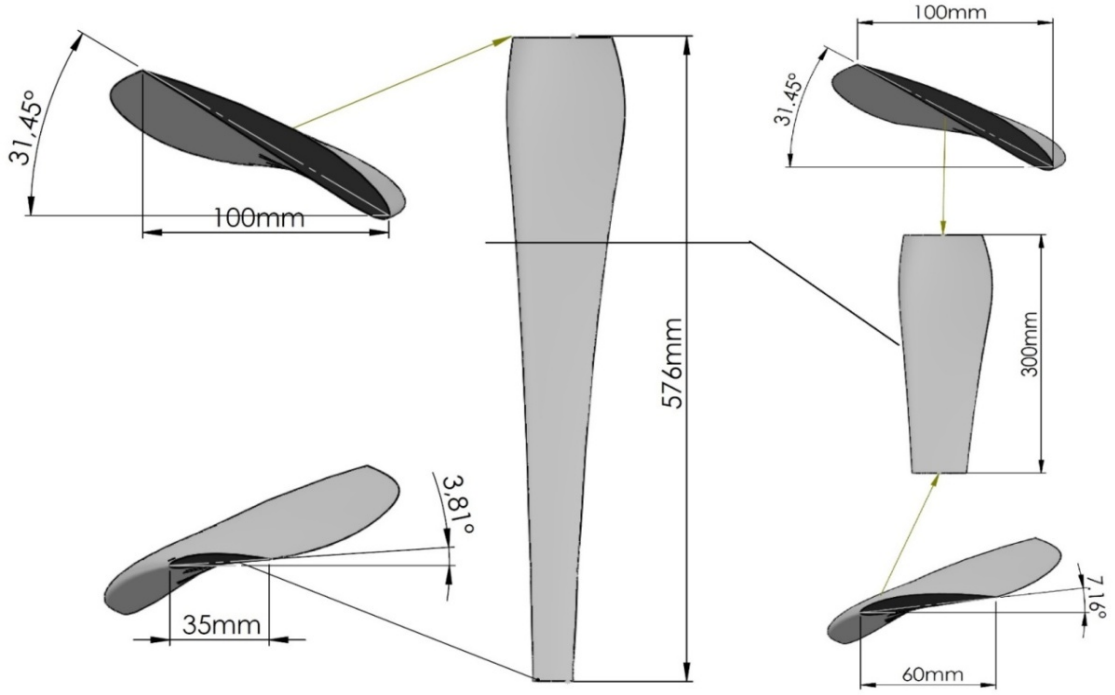
Rüzgar türbini kanadı modellemesi Solidworks programı kullanılarak yapılmıştır. Çizim aşamalarının her bir adımı sırasıyla gösterilmiştir. Çizim sırasında kullanılan boyutlar rüzgar türbini kanadının prototip boyutlarıdır. İlk olarak kanat profili modelinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan profil rüzgar türbinlerinde kullanılan NACA 4412 profilidir ve profil birim uzunluktaki modelinin koordinat sistemindeki noktalarından yararlanılarak çizilmiştir (Şekil 3). Elde ettiğimiz taslak kanat profilinden noktalar yardımıyla ihtiyacımız olan kanat yapısına geçilmiştir. Kanat 576 mm 'lik düzlemlere ayrılmış uygun değerlerde 5°'den 40°'ye artan şekilde bitirme ödevi kapsamında aerodinamik tasarım yapmadan burulma verilmiş (Şekil 4 ve Şekil 5) ve deney yapabileceğimiz test odamızın ölçülerine uygun olan 300 mm'lik kısmıyla deneyler yapılmıştır.



Şekil 3. NACA 4412 profili koordinatlarıyla elde edilen eğri.



Şekil 4. NACA 4412 profiline burulma açısı verilmiş geometri.



Şekil 5. Solidworks'te çizilen kanadın tamamı.

Deneylerin yapılacağı test odasının ölçüleri göz önünde bulundurularak uzunluğu 576mm olan kanadın 300 mm 'lik kısmı ele alınmış ve 3D yazıcının maksimum uzunluğu 200mm olan çıktılarına izin vermesi sebebi ile de kanat iki parça olarak tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. 3D yazıcıda üretilmiş kanat.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümüne ait Rüzgâr Mühendisliği ve Aerodinamik Araştırma (RMAA) laboratuvarında bulunan 50 cm x 50 cm test odasına sahip emmeli tip açık çevrimli rüzgâr tüneline (Şekil 7) gerçekleştirilmiştir. Tüneline emiş yapan fanının gücü 15 kW, devri ise 1500 devir/dakika olup harici bir kontrol ünitesiyle hızı ayarlanabilen bir fanıdır. Tüneline test odası akış görüntülemeye uygun olması için şeffaf fleksiglasdan yapılmıştır.



Şekil 7. Deneysel gerçekleştirildiği rüzgâr tüneline

3.1. Kanat Üzeri Basınç Dağılımın Belirlenmesi

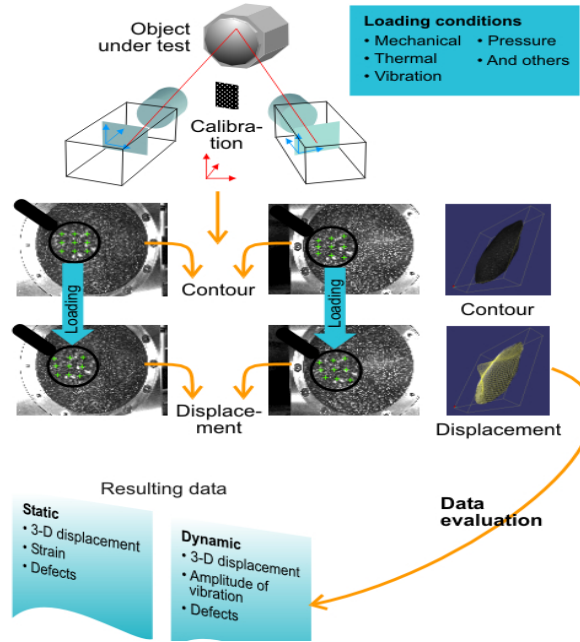
Kanat üzerindeki basınç dağılımlarını ve bu dağılımlardan kanada gelen basınç farklarını deneysel olarak ölçmek için pitot statik tüpü ve fark basınç manometresi kullanılmıştır. Pitot tüpü akışkanın basınç etkisini tam algılamak için açık ucu akışa doğru yerleştirilmiş küçük bir borudur ve durma basıncını ölçer. Pitot-statik tüpü bir basınç dönüştürücüsüne ya da bir manometreye bağlanarak doğrudan dinamik basıncı ölçer ve bunun sonucunda akışkan hızını ölçer [7]. Yapılan deneyde iki adet pitot tüpü kullanılmıştır. Bunlardan birini akışa paralel şekilde yerleştirip serbest akışın statik basıncını, diğer pitot tüpünü ise kanat üzerinde basınç değerini almak istediğimiz koordinatlara getirerek kanat üzerindeki basınç farkı ölçülmüştür.

3.2. DIC (Digital Image Correlation) Sistemi ile Deformasyon Ölçümü

Digital Image Correlation deformasyon analizinde kullanılan gelişmiş optik yöntemlerden biridir. Bu yöntemde temel elemanlar, yüksek çözünürlüklü kamera, ışık sistemi ve bilgisayardır. DIC sisteminde öncelikle analizi yapılmak istenen parça üzerine boya yardımıyla karekodlar yapılır (Şekil 8). Üzerindeki karekodlarla akış kaynaklı deformasyonların inceleneceği sistem hazır hale getirilmiştir. Saniyede binlerce fotoğraf alan kameralar kanat üzerindeki karekodların yer değiştirmesini bu fotoğraflarla belirleyip deformasyonu ölçmektedir.

3.3. İplikçik Deneyi ile Akış Görselleştirme

İplikçik deneyi kanat etrafındaki akışın görselleştirilmesi için kullanılan basit, ucuz ve kullanışlı bir deneydir. Otomotiv, havacılık, kimya ve birçok akış olayının olduğu endüstri kollarında kullanımı oldukça yaygındır. Bu deneyle uygun ipler yardımıyla kanat üzerinde ve kanattan ayrılan akışta akış görselleştirilmiştir. Genelde bu deneyde kısa iplikler kullanılmaktadır fakat bu çalışmada yeni bir şey denenmiş ve iplikleri uzun da tutarak kanat gerisinde ve uçlarında oluşan akış durumlarını gözlemlenmiştir.



Şekil 8. .DIC sistemi

3.4. Yağ Deneyi ile Akış Görselleştirme

Yağ deneyi kanat yüzeyindeki akışın görselleştirilmesi için kullanılan ucuz ve etkili diğer bir yöntemdir. Oleik asit, titanyum dioksit ve gaz yağından oluşan karışım en uygun oranlarda birleştirilerek kanat yüzeyine sürülür. Titanyum dioksit, karışımın beyaz rengini veren maddedir. Titanyum dioksitin karışım içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için oleik asit, karışımın akışkanlığını sağlamak içinde gaz yağı kullanılmıştır. Kanat üzerine sürülen karışım, akış esnasında kanat yüzeyinde akışa göre yer değiştirerek akış görselleştirme gerçekleştirilir.

4. SAYISAL MODELLEME

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

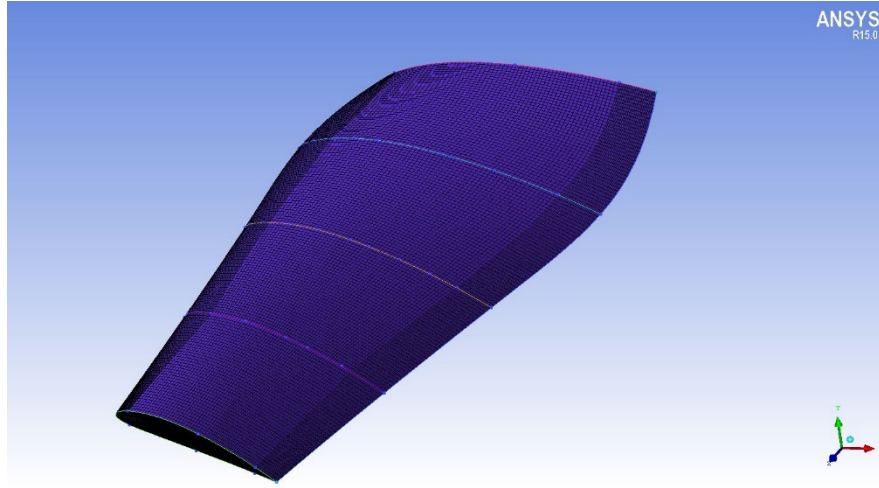
Sonlu elemanlar metodu, mühendislikte problemlerin çözümünde parçadan bütüne giderek çözümü kolaylaştıran bir yaklaşımdır. Temel mantık, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözüme götürmektir. Bu yöntemde çözüm bölgesi, çok sayıda, basit, küçük, birbirine bağlı, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Yani kısacası birbirine çok sayıda düğüm noktalarıyla bağlanmış parçalara ayrılan problemin çözümü kolay bir şekilde yapılabilir. Kanat üzerinde akış analizi yapabilmek için mesh (ağ oluşturma) işlemi ile yüzey küçük parçalara bölünmüş bu şekilde parçadan bütüne gidilmiştir.

4.1.2.Yapısal Analiz

Bu çalışmada yapısal analiz için kullanılan ANSYS yazılımı, mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan etkileşimlerini modellemekte kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu yazılım kullanılarak deneyde elde edilen basınç farkları ANSYS Static Structural modülünde kanat yüzeyine uygulanmıştır. Böylelikle bu basınç farklarında kanatta meydana gelen deformasyonlar elde edilmiş ve DIC sistemi ile elde edilenlerle kıyaslanmıştır.

4.1.3. Akış Analizi

Bu çalışmada akış analizi için ANSYS FLUENT, sonlu hacimler yöntemini kullanan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. NACA 4412 kanat profili üzerine uygun mesh işleminin yapılmasının ardından (Şekil 9) ANSYS FLUENT modülü ile kanat üzerindeki akış sayısal olarak incelenmiş ve Erciyes Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Rüzgar Mühendisliği ve Aerodinamik Araştırma (RMAA) laboratuvarında yapılmış olan akış görselleştirme deney sonuçları ile kıyaslanmıştır.

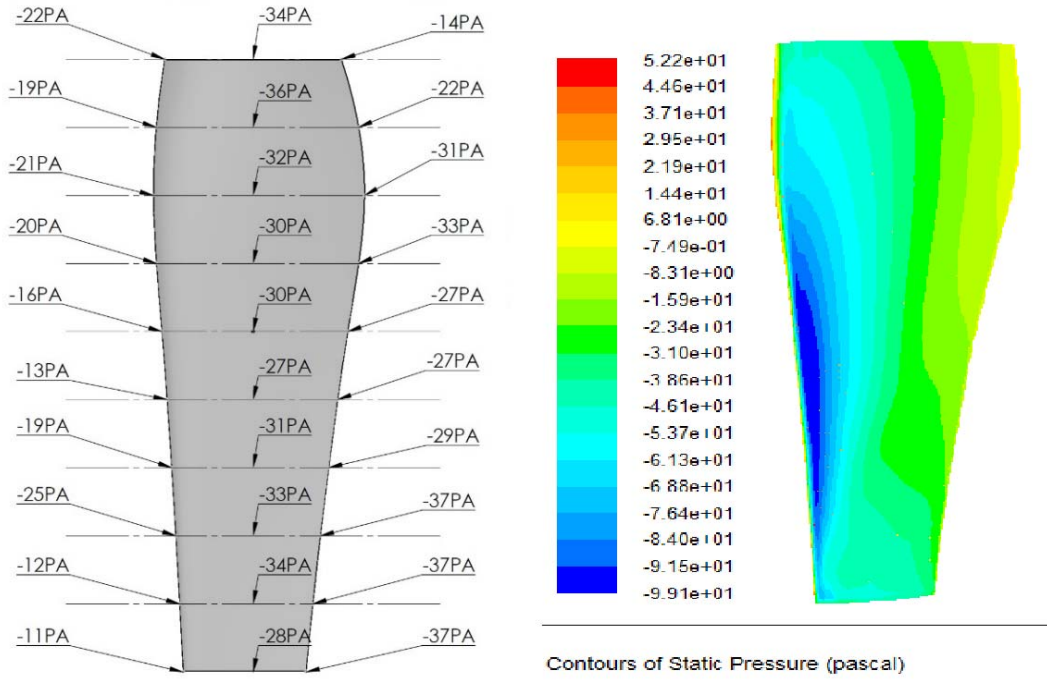


Şekil 9. Kanat üzerinde oluşturulmuş ağ yapısı

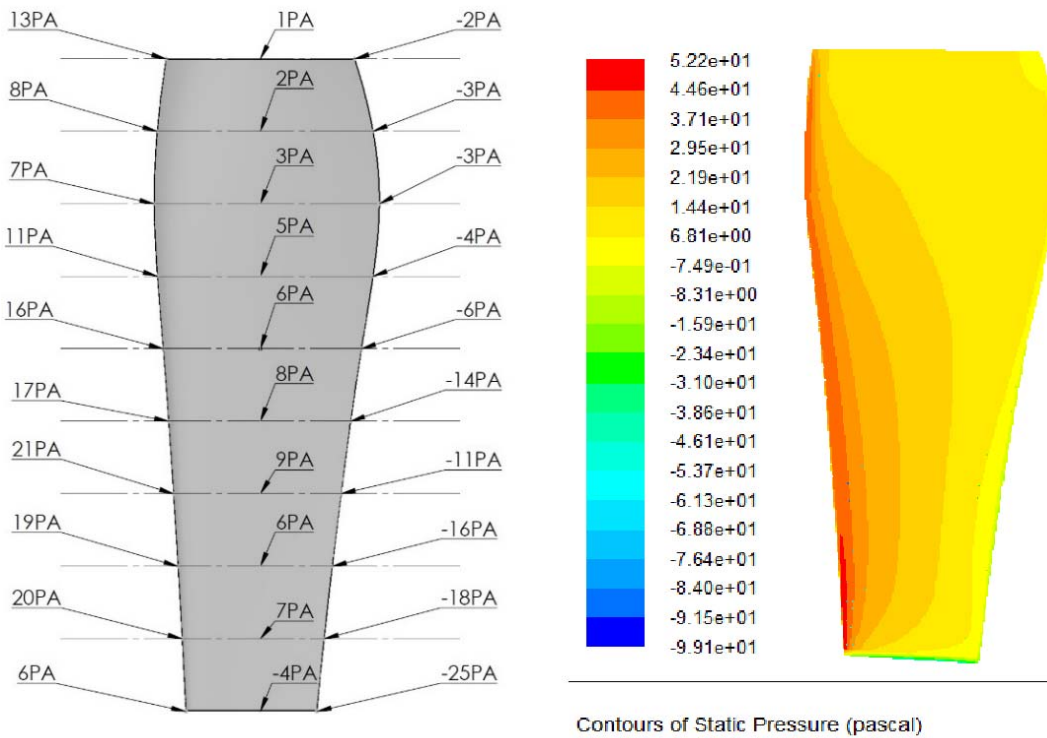
5.SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLARIN KIYASLAMASI

5.1. Basınç Deneyi ve Sayısal Sonuçların Kıyaslaması

Pitot tüpü ile ölçülen basınç değerleri ve ANSYS Fluent modülünün sonuçları Şekil 10 ve Şekil 11'de görülmektedir. Sayısal analiz sonuçlarında mavi renk minimum basınç kırmızı renk maksimum basınç değerlerini gösterir. Kanadın üst yüzeyinden alınan basınç değerleri incelendiğinde basınç değerlerinin negatif çıktığı görülmektedir. Kanadın yapısı itibari ile üst yüzeyde hızın artması sonucu basınç düşmekte tam aksine kanadın alt yüzeyinde de hızın azalması ile basınç artışı görülmekte sonuç olarak alt ve üst yüzeyde basınç farkı olduğu için kanat üzerinde kaldırma kuvveti oluşmaktadır. Kanadın alt yüzeyinde hücum ve orta hat üzerinde basınç değerlerinin pozitif firar kenarında ise üst yüzeydeki ayrılmış akışın etkisi ile negatif basınç oluşmaktadır. Bu sonucun etkilerini yağ deneyinde firar hattında (Şekil 12-A3 Kesiti) görülmektedir. Sonuçta sayısal değerlerle deneysel değerler uyumluluk göstermiştir.



Şekil 10. $Re = 50000$ için kanat üst yüzeyinde basınç deneyi ve sayısal analiz sonuçları



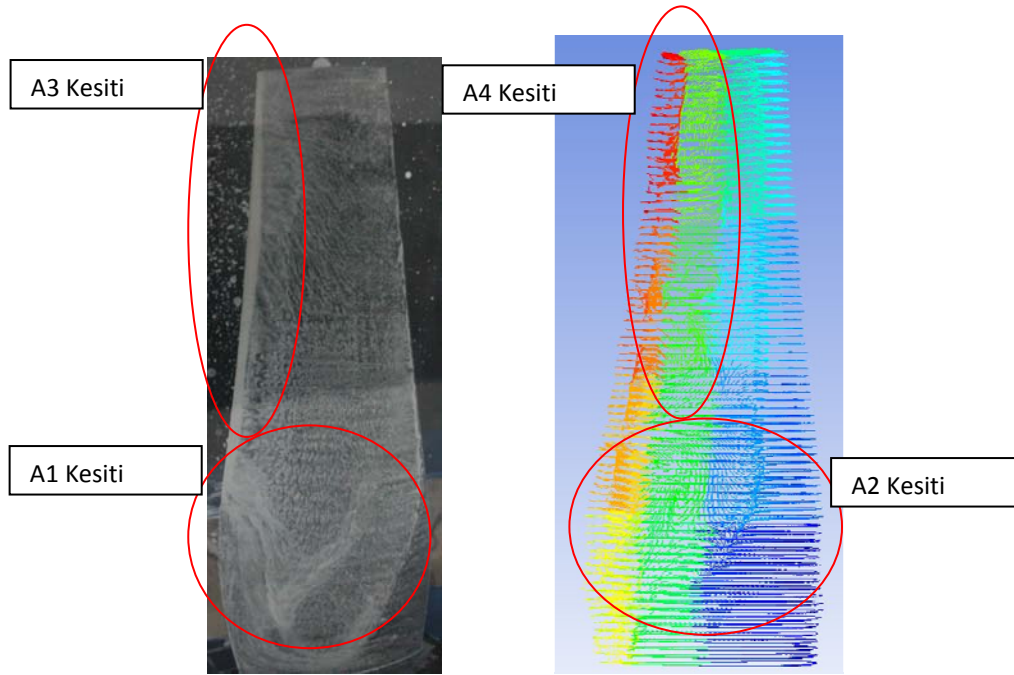
Şekil 11. $Re = 50000$ için kanat alt yüzeyinde basınç deneyi ve sayısal analiz sonuçları

5.2. Yağ Deneyi ve Sayısal Sonuçların Kıyaslaması

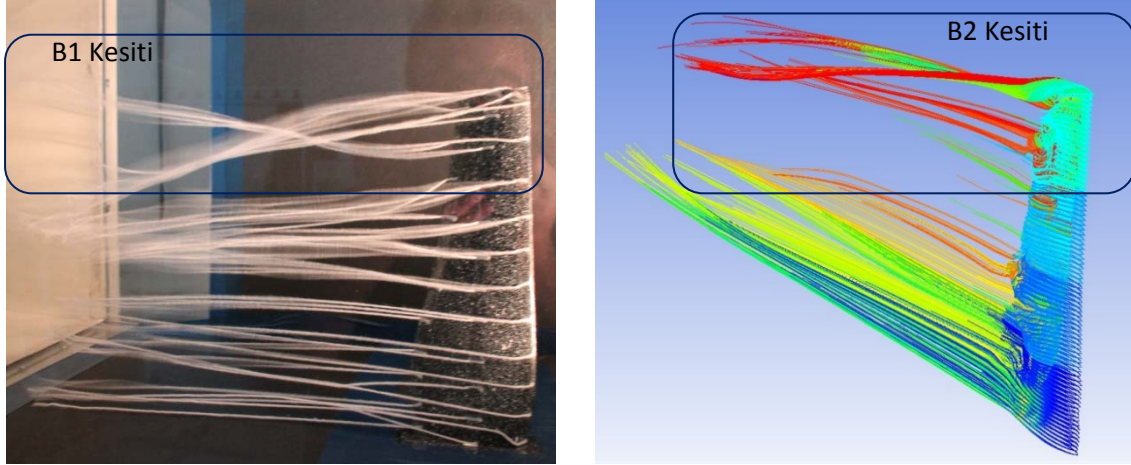
Kanadın firar kısmından kanadı terk eden akışın oluşturduğu girdaplar sonucunda kanadın alt ve üst firar hattında negatif basınç oluşmaktadır. Bu sonuç yağ deneyinde yağın orada hareketsiz kalması şeklinde görülürken (Şekil 12-A3 kesiti), FLUENT sonuçlarında kırmızı ve kırmızı renk üzerindeki yeşil renkli ters akışa sahip hız vektörleri (A4 kesiti) ile görülmektedir. Yağ deneyinde A1 kesitinde (Şekil 12) görülen ters akış etkileri yine FLUENT sonuçlarında A2 kesitinde (Şekil 12) de net olarak görülmektedir. Kanadın uç kısmında uç girdaplarından kaynaklı ters akış etkilerini iki sonuçta da görülmektedir.

5.3. İplikçik Deneyi ve Sayısal Sonuçların Kıyaslaması

Aynı Reynolds sayıları için yapılan iplikçik deneyi ve FLUENT sonuçları Şekil.13’de verilmiştir. Kanadın alt ve üst yüzeylerindeki basınç farkından dolayı kanadın uç kısmında oluşan uç girdapları iplikçik deneyinde de görülmektedir. Aynı girdaplar FLUENT sonucunda B2 kesitinde de görülürken iplikçik deneyinde B1 kesitinde görülmektedir. Yağ deneyinde kanadın kök kısmında görülen ters basınç etkileri iplikçik deneyinde de görülmekte fakat ipler uzun olduğu için tam belirginleşmemektedir. Bu sebeple kısa iplerle yapılan diğer bir deneyde köke yakın yerlerdeki ters akış etkileri daha net görülmektedir (Şekil.14). İplikçik deneyleri ile yağ deneyinden farklı olarak kanadı terk eden akışın da görselleştirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 12. Yağ deneyi ve sayısal sonuç



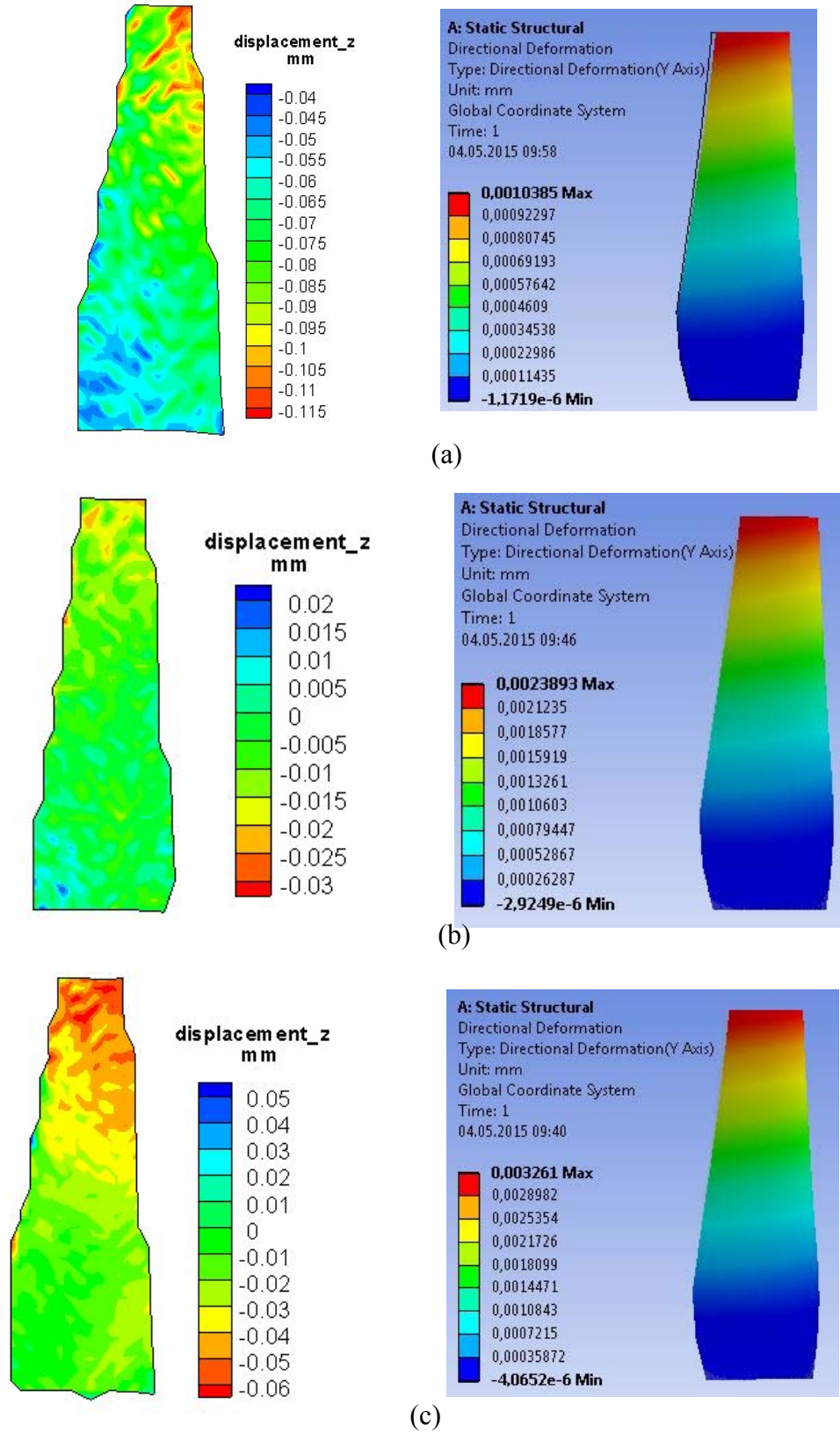
Şekil 13. İplikçik deneyi ve FLUENT sonuçlarının kıyaslanması



Şekil.14 Kısa iplerle yapılan iplikçik deneyi

5.4. DIC ve ANSYS Yapısal Analiz Kıyaslaması

Pitot tüpü ile kanadın alt ve üst yüzeylerinde 60 istasyonda yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen basınç değerleri ANSYS Yapısal Analiz modülünde kanadın yüzeyine uygulanmış ve Şekil 15'deki sonuçlar elde edilmiştir. DIC deneylerinde kanadın üzerine boya yardımı ile oluşturulan kare kodlar üzerindeki partiküllerin hareketi ile yer değiştirme ölçülmüştür. DIC ve ANSYS Yapısal analiz sonuçları kıyaslandığında, yer değiştirmenin kanadın uç kısımlarında fazla olduğu ve bunun DIC ve ANSYS Yapısal Analiz sonuçlarında sarı ve kırmızı renklerle görülmektedir. Bunun sebebinin de uç girdaplarının kanadın ucunda etkin olduğu görülmüştür. Artan Reynolds değeriyle deformasyondaki artış net olarak görülmektedir. Yağ ve iplikçik deneylerinde görülen uç girdapları etkilerinin kanat üzerinde oluşturduğu deformasyon DIC sonuçlarında da net olarak görülmektedir. Bununla birlikte, deney ve sayısal sonuçlar arasında farklılıklar görülmüş ve bu farklılığın 3D yazıcıda üretilen kanadın boşluklu yapıya sahip olması ve modellemede bu yapıyı oluşturmak zor olduğundan katı model olarak alınmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 15. Analiz Sonuçları (a) Re=50000, (b) Re=70000, c) Re=85000

6. SONUÇ

Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda kanadın üzerindeki akış ve deformasyonlar incelenmiştir. Kanadın firar kısmından kanadı terk eden akışın oluşturduğu ve kanat uçlarında basınç farklarının oluşturduğu girdaplar sonucunda kanadın değişik yerlerinde ters akış bölgeleri oluşmuş ve bu sonuç, yağ deneyinde ayrılmış akış bölgesinde yağın hareketsiz kalması şeklinde, iplikçik deneyinde iplerin karışması şeklinde görülürken, FLUENT sonuçlarında ters akışa sahip hız vektörleri ile açıkça görülmüştür. Deformasyon deneylerinde ise kanat uçlarında maksimum deformasyonlar sayısal ve deneysel sonuçlarda da görülmüştür. Sonuç olarak; sayısal değerlerle deneysel değerler uyumluluk göstermiştir. Ayrıca, bu çalışma sonucunda deneysel ve sayısal sonuçların incelenmesi ile rüzgar türbini kanat tasarımında burulma açısının optimizasyonunun önemi ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Rong Wu (13-17 January, 2014) Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation Shanghai CHINA
- [2] Jan Winstroth (29 April, 2014) Wind turbine rotor blade monitoring using digital image correlation. Assessment on a scaled model Hanover, GERMANY
- [3] Yeni Enerji, Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi-3, <http://www.yenienerji.info/?pid=19147>
- [4] Yenilenebilir Enerji, Rüzgar Enerjisi, Yenilenebilir Enerji Müdürlüğü 2012, <http://www.eie.gov.tr>
- [5] Murat Durak - Serra Özer Rüzgar Enerjisi Teori ve Uygulama, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği 2008.
- [6] H.AÇIKEL Yüksek Lisans Tezi Düşük Reynolds Sayılı Akışlarda Kanat Profili Üzerindeki Akışa Ses Dalgalarının Etkisinin Deneysel İncelenmesi Ocak 2013 KAYSERİ
- [7] Yunus A. ÇENGEL, John M. CIMBALA Akışkanlar Mekaniği Temelleri Ve Uygulamaları Palme Yayıncılık, Ankara, 2013.

