

## FLAP KONTROLLÜ BİR RÜZGÂR TÜRBİNİ PALASININ AERODİNAMİK PARAMETRELERİNİN HESAPLAMALI AKIŞKALAR MEKANİĞİ KULLANARAK ELDE EDİLMESİ

Tarık Baran\* ve Ozan Tekinalp†  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Rüzgâr Enerjisi ve Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi, Ankara

### ÖZET

*Bu çalışmada, rijit olarak dönme hareketi yapan firar kenarı kanatçıklı NACA 63<sub>3</sub> 418 kesiti bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılarak (Ansys CFX) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle Ansys CFX sonuçları literatürde deneysel sonuçları bulunan NACA 63418 kesit sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Firar kenarı kanatçık toplam kordun %10'u olarak alınmış ve kesit ile arasında yaklaşık 5 mm boşluk bırakılmıştır. Bahse konu kesitin farklı hücum açıları ( $\alpha$ ) ve flap açılarından ( $\delta$ ) oluşan toplam 320 kombinasyon için analizleri gerçekleştirilmiştir. Ansys CFX yazılımından alınan sonuçlar hücum açısı ve flap açısına bağlı olarak 3 boyutlu kaldırma, süürkleme ve yunuslama moment sabiti ( $C_l$ ,  $C_d$ ,  $C_m$ ) grafikleri ile gösterilmiştir. Bu 3 boyutlu grafiklere hücum açısı ve flap açısı bağımsız değişken olmak üzere polinom fonksiyonlar ile yüzeyler uydurulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre flap açısı ile  $C_l$  arasında doğrusala yakın,  $C_d$  ve  $C_m$  arasında ise doğrusal olmayan bir ilişki söz konusudur.*

### GİRİŞ

Rüzgâr türbinlerinden daha çok enerji elde etme ihtiyacı türbin boyutlarının ve rotor palalarının boyutlarının giderek büyümesine yol açmıştır. Bu gelişme yıllara bağlı olarak gözlemlendiğinde açıkça ortaya çıkmaktadır. Rüzgâr enerjisinden elde edilebilecek güç watt cinsinden denklem 1 ile ifade edilir.

$$P \propto \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (1)$$

denklemden,  $\rho$ , kg-s<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> cinsinden havanın yoğunluğunu,  $v$ , m/s cinsinden havanın hızını ve  $A$  ise m<sup>2</sup> cinsinden rotor alanını tanımlamaktadır. Hava yoğunluğu sıcaklık ve deniz seviyesi ile değişir ve çok büyük oynamalara yol açmaz, türbin kurulması planlanan alan için ölçülmüş rüzgâr hızları da işletme halinde fazla değişim göstermez yani daha fazla güç üretmenin yolu rotor alanını büyütmektir. Rotor alanı ise türbin palalarının rotor merkezi etrafında taradığı alandır. Buradan daha fazla güç için daha uzun palaların üretilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Kompozit malzeme teknolojisi sayesinde daha büyük palaları üretmek sorun değildir. Ancak pala boyutlarının artması, yorulma/aşınma yüklerini, rüzgâr hızı ve yönündeki ani değişimler, türbülanslı hava koşulları sebebi ile palaların salınımı yüzünden pala köklerinde oluşan aşırı kesit tesirlerini tasarım açısından oldukça önemli hale getirmiştir. Bu etkiler diğer aktarma organlarında da (şaftlar vb) aşırı yüklemelere sebep olabilmektedir. Bazı rüzgâr türbinlerinde güç regülasyonu ve aşırı yük kontrolü

\*Yrd. Doç. Dr. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, tarikbaran@oku.edu.tr

†Prof. Dr. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, tekinalp@metu.edu.tr

için pala hatve kontrol mekanizmaları bulunmaktadır [7,19,21]. Çoğunluğu pasif olan bu sistemler ayrıca ağır teçhizat gerektiği için de verimli olsalar dahi maliyet ve yerleştirilecekleri hacimlerin kısıtlı olması sorunları ile karşılaşabilmektedir. Benzeri yöntemler (stall kontrol, hatve kontrol, aerodinamik frenler) genelde güç regülasyonu için kullanılmaktadırlar. Türbin boyutlarının artması ile hatve kontrolü giderek aktif kontrollü sistemler haline gelmiştir. Palaların rüzgâr hızı ve hücum açısına anlık tepkisi bu kontrol yönteminde söz konusudur. Her ne kadar güç regülasyonuna yönelik olsa da anlık hatve açısı değişimi sayesinde pala kökünde yüklerinin azaltılması da söz konusu olmaktadır. Ancak sorun ani yüklemelere yanıt süresinin uzun olmasıdır. Hareket ettirilmesi gereken kütlelerin büyüklüğü daha güçlü eyleyiciler(actuator) gerektirmektedir[19,21,27]. Farklı bir yaklaşım ise rüzgâr kesmesi (wind shear) vb etkiler de göz önüne alındığında palaların bir birlerinden bağımsız hareketidir(individual pitch control). Bu yaklaşımda amaçlanan palalarda kök yüklerinin azaltılmasıdır[6,18,25]. Ancak 2000'li yıllardan itibaren akış kontrolü sağlayan bazı yöntemler gelişen malzeme teknolojisi sayesinde gündeme gelmiştir. Danimarka Risø DTU'da başlatılan Adapwing projesi flap ve flap benzeri yapıların aktif kontrolü ile aşırı yüklerin azaltılması ve güç regülasyonu konusunda akıllı rotor(smart rotor) konsepti konusundaki çalışmaları kapsamıştır[32]. Akıllı rotor yapıları ile palalar üzerindeki hava akışının kontrol edilmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu kontrol yöntemlerinin (fırar kenarı kanatçığı-trailing edge flap, mikro flap, mikrotap, uyum sağlayabilen-morphing yapılar vb)[14] uygulamaları ilk olarak uçak ve helikopter tasarım ve uygulamaları ile ortaya çıkmıştır. Akıllı malzemeler ile uygulama başarısının oldukça yüksek olduğu bu yöntemlerden özellikle öne çıkan fırar kenarı kanatçıklardır (FKK). Denenen birçok yöntem içinde ADASYS projesinde (Eurocopter, EADS CRC, Daimler Chrysler Research Labs ve DLR ortak helikopter projesi) titreşimlerin azaltılması konusunda bu yöntem tercih edilmiştir. Her bir palada aktif olarak kontrol edilen piezoelektrik eyleyicili FKK'lar tam ölçekli bir model üzerinde test edilmiş ve kontrol yöntemine bağlı olarak titreşim yüklerinin %50-%90 oranında azaltılmasını sağlamışlardır[6]. Rüzgâr türbinlerinde FKK kullanımını hakkındaki ayrıntılı ilk çalışma NREL'de FKK'ların aerodinamik fren olarak kullanılması fikri ile Migliore ve ark.[29] tarafından yürütülmüştür. Beş farklı fırar kenarı ekipmanının rüzgâr türbinleri üzerinde güç modülasyonu ve yük kontrolü açısından potansiyelini belirlemek amacı ile yaptıkları rüzgâr tüneli çalışmasında spoiler-flap adını verdikleri fırar kenarı kanatçık yapısının uygun yüksek kaldırma kuvveti düşük sürüklenme kuvveti açısından iyi bir seçenek olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmayı takiben Miller[28], spoiler-flap adı verilen FKK yapısının geliştirilmesi, yüksek hızlarda türbin koruması ve güç modülasyonu için yaptığı rüzgâr tüneli çalışmasını sunmuştur. Danimarka Risø Laboratuvarı'nda yürütülen Adapwing Projesi[32] kapsamında Basualdo[24], amacı kanat deplasmanını azaltmak olan, bir kontrolcü tarafından idare edilen arka kısmı flap olarak değiştirilmiş kanat geometrisinin aeroelastik davranışını iki boyutlu olarak incelemiştir. Kontrolsüz duruma göre kontrollü durumda deplasman standart sapmalarında %25 oranında azalma elde edilmiştir. Yine Adapwing projesi kapsamında Troldborg[22], elastik geometrili fırar kenarı kanatçığına sahip Risø-B1-18 pala kesitinin kararsız salınım yüklerinin azaltılması üzerine iki boyutlu sayısal analizler yapmıştır. FKK'ların kanat basınç dağılımında önemli bir etkiye sahip olduğu, emmeyi artırdığı ve kanadın sürüklenme karakterinde önemli bir değişiklik olmadan kaldırma karakteristiğini önemli oranda değiştirdiği ulaşılan sonuçlar arasındadır. Elastik flapların rijit flaplara göre daha iyi aerodinamik performans sergilediği de vurgulanmıştır. Kararsız yüklemelerden dolayı oluşan ani kesit tesirlerinin, değişken geometrili FKK kullanımı ile azaltılma potansiyeli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. %10 flap uzunluğuna sahip bir pala kesitinin yay ve sönümleyiciler kullanılarak iki boyutlu olarak modellendiği çalışmada Buhl ve ark.[22], normal kuvvetlerdeki salınımın azaltılmasını amaçlamışlardır. Çalışmada 10 m/s'den 12 m/s'ye ani adımlarla artırılan rüzgâr hızı ve türbülanslı rüzgâr koşulları altında kontrolcüler tarafından idare edilen flapın normal kuvvet standart sapmasını ne oranda azalttığı incelenmiştir. Flap kontrolü için ise yine iki farklı yaklaşım incelenmiştir. Bunlardan ilkinde hücum açısı ölçümleri, ikincisinde ise hız ve ivmenin kombinasyonu kullanılmıştır. Rüzgâr hızını bir adım fonksiyonu şeklinde değiştirerek elde edilen sonuçlar kontrolsüz durumla kıyaslandığında adım yükleme durumunda normal kuvvetlerin standart sapmasında, hücum açısı ölçen sensör geri beslemesi ile %95 hız ivme kombinasyonlu geri besleme halinde ise %85 oranında bir azalma elde edilmiştir. Türbülanslı koşullarda ise normal kuvvet standart sapmasındaki azalmalar, hücum açısı tabanlı sistemde %81, ivme tabanlı sistemde ise %75'tir. Ancak kontrol sisteminde oluşabilecek tepki sürelerindeki gecikmeler ve en büyük eyleyici hızları için yapılan gerçekçi tahminler altında normal kuvvet standart sapması azaltılmasında, adım yükleme ve türbülanslı koşullar için sırası ile %25 ve %38 oranında kayıplar

oluşmaktadır. Büyük çaplı türbinlerde akıllı yapı uygulamaları ile ilgili çalışmalar bir toplantıda[20] çeşitli yazarlar tarafından duyurulmuştur. Toplantıda Avrupa Birliği ortak çerçeve programı olan Upwind projesi paketlerinden olan ve akıllı rotor sistemleri üzerine yürütülen WP1B3 paketi[31] kapsamındaki akıllı rotor çalışma planları ve gelinen aşamalar Barlas tarafından sunulmuştur. Daha sonra bu iş paketi kapsamındaki Risø ve Delft tarafından yürütülen FKK' çalışmalarının karşılaştırma raporu Bulh ve ark.[17] tarafından sunulmuştur. Raporda, amacı kaldırma katsayısını(CI) sabit tutmak olan basit kontrollü FKK'ların iki boyutlu test sonuçları bulunmaktadır. Türbülanslı rüzgâr koşullarını da içeren üç farklı koşul altında Risø ve Delft tarafından geliştirilen yazılımlar karşılaştırılmıştır. Yazılımlar arasında çeşitli farklılıklar olmasına rağmen FKK kullanımı ile kaldırma katsayısındaki dalgalanmanın oldukça azaldığı her iki modelde de görülmektedir. Yerel aerodinamik yüklemelerden dolayı oluşan palalardeki salınımların kontrolünün FKK ile sağlanabileceği gösterilmiştir. Hulskamp ve ark.[16], akıllı rotor uygulamalarına bir yöneliş olduğunu belirttikleri çalışmalarında, mafsallı ya da sürekli FKK'ların bu alanda en iyi sonuçları verdiğini bildirmişlerdir. Deneysel çalışma için yapısal, aerodinamik ölçekli modelleme ve kontrol için gerekli parametreler belirlenmiştir. Kullanılan malzeme, malzemenin mekanik özellikleri ve özdeğer analizine ait sonuçlar verilmiştir. Flap kontrolünün yapıldığı ve yapılmadığı türbülanslı durumlar için -pala kökündeki gerinim ölçümlerine göre- pala kökünde gerinim değerlerinde oldukça fazla miktarda düşüş olduğu görülmektedir. Deneylerde ivme sensorları kontrol algoritması için geri beslemede kullanılmıştır. Eyleyici olarak ise Thunder® TH-6R piezoelektrik eğici(bender) deneylerde kullanılmıştır.

Upwind projesi[31] kapsamında ele alınan WP1B3(Smart Rotor Blades and Rotor Control) iş paketi kapsamında rotor kontrolü konusunda helikopterden başlayarak rüzgâr türbinlerine kadar uzanan aşamadaki literatür taraması Barlas[15] tarafından raporlanmıştır. Çalışma daha sonra Barlas ve van Kuik[6,18] tarafından yayınlanmıştır. Rapor çalışmasında rotor kontrolü konusunda gelinen aşamalar, modelleme teknikleri, sensorlar, eyleyiciler, kontrol algoritmaları ve malzeme gibi birçok alanda ayrıntılı bilgiye yer verilmiştir. Rotor kontrolü konusunda NREL, Delft ve Risø'da yürütülen araştırmalar ve gelinen aşamalar ve Upwind projesinde bu aşamaların nasıl değerlendirilebileceği raporda tartışılmıştır.

Johnson ve ark.[14], özellikle aktif akış kontrolüne odaklanan bir literatür çalışmasını yayınlamışlardır. Çalışmada akış kontrolü siteminde, kontrol ve sensorlar, eyleyiciler ve diğer donanımlar ve akış olgusu olarak üç önemli konu başlığının olduğu vurgulanmıştır. Rapor eyleyiciler ve akış kontrolü sağlayan donanımlara odaklanmıştır. Rapor rüzgâr türbinlerinde kullanımı olası 15 farklı akış kontrol yöntemini sınıflamakta, çalışma prensipleri hakkında bilgi vermekte, aerodinamik ve mekanik özellikleri hakkında bilgi sunmaktadır.

Bergami[13], 2 boyutlu pala kesitinde flap benzeri yapıların aeroelastik stabiliteye etkisini araştırmıştır. Kesitin stabilitesi flap yokken belirlenmiş daha sonra kontrolsüz flap ve üç farklı kontrol yöntemi ile flapın kontrol edildiği durumlar için kesitin stabilitesi incelenmiştir. Sonuçlar FKK kontrolünün önemli ölçüde kesit stabilite sınırlarını düzenlediği ve stabiliteyi arttırdığı yönündedir.

van Wingerden ve ark.[12], daha önce sundukları tasarımı[16]gerçekleştirerek deneysel ve teorik çalışmalarının sonuçlarını yayınlamışlardır. Çalışmada yüklerin etkili bir şekilde azaltılabilmesi için her pala üzerindeki FKK'nın farklı şekilde davranması gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmada 2 adet akıllı malzemeli flapa sahip pala kesiti kullanılmış ve deneysel çalışmalar için ölçek/benzeşim parametreleri ile ilgili bilgilere de yer verilmiştir. Deneylerde tasarlanan pala dönmemektedir ve türbülans durumlarını benzeştirmek için bir pitch eyleyicisi kullanılmaktadır. Kontrol için geri beslemede gerinim ölçümleri-flap yönü momentlerinin en küçük olmasını sağlamak amacı ile kullanılmıştır. Periyodik ve türbülanslı koşullar altında kök yüklerinde sırası ile %90 ve %55 oranında azalmalar elde edilmiştir.

0.6-5 MW aralığında tasarlanmış mevcut rüzgâr türbinlerinin aktif kontrollü FKK ve farklı akış kontrol yöntemleri kullanımı ile ilgili sayısal analizlerin yapıldığı çalışmada Wilson ve ark.[10] pala kökünde flap yönü momentlerinde oluşan salınımların standart sapmalarında %20-%32 oranlarında azalmalar elde etmiştir.

Barlas ve van Kuik[9], 5 MW'lık bir türbini referans aldıkları çalışmada aktif flap konseptinin incelenmesi için yeni geliştirilmiş bir aeroelastik model kullanmışlardır. Model merkezi olmayan kontrol konseptlerinin ve ileri düzey aktif kontrolcülerin tasarımını kolaylaştırmak amacı ile tasarlanmıştır. Çalışmada yük kontrolü üzerine üç farklı yaklaşım izlenmiştir. Bunlar merkezi olmayan bağımsız flap kontrolü, merkezi bağımsız flap kontrolü ve merkezi olmayan çoklu geri beslemeli flap kontrolleridir. Her durum için işletme rüzgar yükleri 8, 11.4, ve 16 m/s olarak seçilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yük azaltma potansiyeli üzerinde merkezi olmayan kontrol döngülerinin olumlu etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Daha detaylı ve iyileştirilmiş yük kontrolü kontrol kapasitesini palalar üzerinde dağıtarak başarılabilir.

Piezoelektrik malzemeli flapların pala köklerinde yük azaltılması konusunda araştırmasını Risø'da yürüten Heinz[8] araştırmasında RANS (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes) hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile çözüm yapan EllipSys2D yazılımını kullanmıştır. HAD çözümü ile 3 serbestlik dereceli yapısal modelin etkileşimi için iki ayrı kontrol algoritması kullanılmıştır. İlk algoritma hücum kenarında ölçülen rüzgârın hücum açısını girdi olarak kullanmakta, diğer algoritma ise emme ve basınç yüzeyle arasındaki basınç farkını kullanmaktadır. 10 sn'den 10.5 sn değerine ani olarak yükselen rüzgar hızı için rotor düzlemine dik yapısal deformasyon standart sapmasında 1. kontrol algoritması için %98, 2. kontrol algoritması için ise %95 oranında azalmalar elde edilmiştir. 4 sn süreli ve türbülans yoğunluğu %2.2 olan bir giriş akımında bu oranlar 1. ve 2. kontrol algoritmaları için sırası ile %81 ve %82 olmaktadır. Türbülans yoğunluğu %2.4 olan 12 sn'lik giriş akımları için azalma oranları sırası ile %68 ve %67 olarak gerçekleşmiştir. Kontrol sistemindeki gecikmeler hesaba katıldığında 12 sn süreli giriş akımında türbülans yoğunluğu %7.7 iken azalma %54 olmaktadır. Flap hareket alanı  $\pm 6^\circ$ 'ye kadar genişletildiği durumunda bu azalma %66 seviyelerine çıkabilmektedir.

Andersen[5], kontrol teorileri, sensorler, optimizasyon çalışmaları ve deneysel, sayısal çalışmaların yer aldığı geniş kapsamlı doktora çalışmasında akıllı rotor konusunu ele almıştır. Çalışmada amaç deforme olabilen FKK ile yorulma yüklerinin azaltılmasıdır. Flap konumlaması, eyleyici(actuator) gecikmesi gibi birçok konu ele alınmıştır. Çalışma sonucunda köklerde oluşan aşırı yüklemelerin oldukça yüksek oranlarda azaltılabildiği ve flap sayısına bağlı olarak bu oranların nasıl değiştiği de vurgulanmıştır.

Ölçekli bir rüzgâr türbini Upwind projesi çalışmasının üçüncü ayağı olarak Huls Kamp ve ark.[4] tarafından yorulma yüklerinin azaltılması konusunda tasarlanmış ve rüzgâr tüneline test edilmiştir. 1.8 m rotor çaplı ölçekli türbin iki palalıdır ve her iki palada da iki adet kesitte Thunder piezoelektrik eyleyiciyi flap olarak kullanmaktadır. Deneylerde birçok noktadan ivme ve gerinim değerleri ölçülmüş ancak kontrolcü piezoelektrik gerinim ölçerlerden alınan gerinim verisine göre tasarlanmıştır. Pala kesiti olarak DU96-W180 profili kullanılmıştır. Deneylerde biri sabit rotor hızını diğeri ise palalardaki yüklemeyi kontrolünü gerçekleştiren iki kontrolcü mevcuttur. Yorulma yüklerinin azaltılması için farklı kontrol algoritmaları oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Pala köklerinde dinamik yükün büyük oranda azaltılması mümkündür, ancak kontrolcü tasarımında palalar arası etkileşimin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Upwind projesi[15] raporunun ve proje kapsamındaki çalışmalarla birlikte, akıllı rotor konusundaki diğer alanlardaki araştırmaların yayına dönüştürüldüğü çalışmada Barlas ve van Kuik[6], konuyu ayrıntıları ile incelemiştir. Çalışmada akıllı rotorlar helikopter ve havacılık alanındaki uygulamalardan itibaren ele alınarak, konsept tasarımlar, akıllı malzemeler, eyleyiciler, sensorlar ve kontrol açısından oldukça detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada farklı akış kontrolü yöntemlerini kaldırma katsayısındaki değişim cinsinden karşılaştırmışlardır. Buna göre en etkili yöntemler sırası ile flap ve deforme olabilen firar kenarı yapıları( deforme olabilen flaplar), mikrotablar, uyum sağlayabilen kesitler (morphing airfoil), emme-üfleme sistemleri ve sentetik jetlerdir. Genel olarak FKK yapılarının etkinliği göze çarpmaktadır.

Madsen ve ark.[3] kontrol edilebilen lastik bir FKK çalışmasında, bu yapının palalardaki yük azaltma potansiyelini incelemiştir. Flap içinde boşluklar bulunan güçlendirilmiş lastikten oluşmaktadır. Deformasyon kontrolü ise boşluklara doldurulan akışkanın basıncının kontrolü ile sağlanmaktadır.  $\pm 8$  barlık bir basınç için  $\pm 12$  mm'lik bir deformasyon elde edilebilmektedir.

Çalışmada flapın tasarımı, flaplı kesitlerin aerodinamik sayısal ve deneysel çalışmalarına yer verilmiştir. Farklı rüzgâr hızlarında flap yönü momentlerinde %50 oranında azalmalar elde edilmiştir.

Lutz ve ark.[1] Upwind projesi WP1B3 paketi kapsamında Stuttgart Üniversitesi'nde yürüttükleri aktif kontrollü flaplı bir pala kesitinin tasarım çalışmasını deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kapsamında kararlı ve kararsız akım koşulları için gerçekleştirilen deneysel çalışma ve HAD(CFD) çözümlenmeleri yapılmıştır. Sayısal çalışmayı doğrulamak amacı ile referans olarak NACA 64418 profili kullanılmıştır. Farklı flap pozisyonları için hem sayısal hem de deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde 2011 yılında kurulan Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi(RÜZGEM) faaliyetleri çerçevesinde gerçekleştirmekte olduğumuz çalışmalardan biri de yukarıda detaylı bir literatür özeti verilen ve rüzgar türbini palalarının maruz kaldığı ani yüklerin FKK ile kontrolü konusundadır. Bu amaçla öncelikle aktif kontrollü flaplı NACA 63<sub>3</sub>-418 kesitinin kontrolü için FKK'lı türbin palalarının modellenmesi için gerekli hesaplamalı akışkanlar mekaniği analizleri verilmiştir. Ansys CFX kullanılarak farklı flap açıları( $\delta$ ) ve hücum açıları( $\alpha$ ) değerleri için taşıma, sürükleme ve moment katsayıları(Cl, Cd,ve Cm) elde edilerek sonuçlar sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar 3 boyutlu yüzey grafikleri şeklinde gösterilmiş ve bu yüzeylere polinom fonksiyonlar kullanılarak doğrusal olmayan yüzeyler uydurulmuştur. Flap açıları( $\delta$ ) ve hücum açıları( $\alpha$ ) değerleri için kaldırma, sürükleme ve moment katsayıları(Cl,Cd,ve Cm) ilişkileri irdelenmiştir.

## YÖNTEM

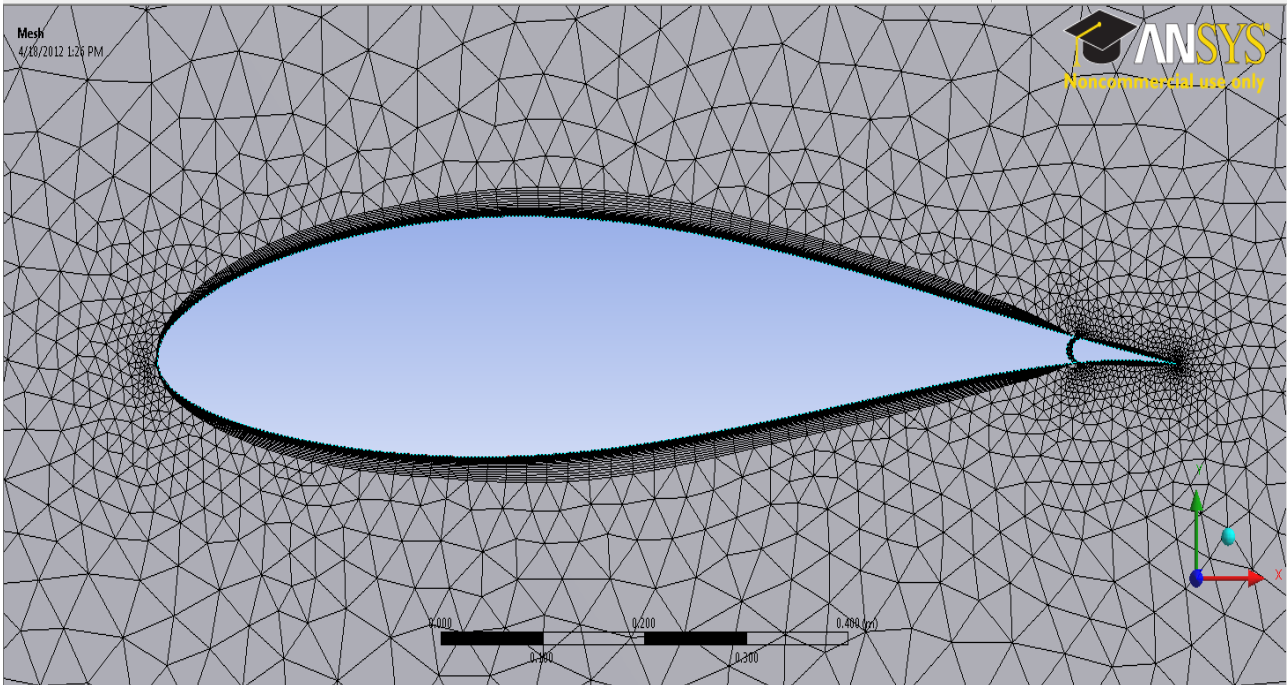
Çalışmada, öncelikle Ansys CFX yazılımında problemin çözümü için kullanılacak ağın sağlıklı olup olmadığının belirlenmesi amacı ile flapsız bir kesite ait Cl, Cd ve Cm katsayıları Bertagnolio ve ark.[26] tarafından verilen deneysel sonuçlar ve aynı çalışmadaki sayısal basınç katsayısı dağılımı (Cp) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ansys CFX'te profil flaplı -flap defome olmamış- ve flapsız olarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmada aslen uçaklar için tasarlanan ama rüzgâr türbinlerinde de sıklıkla kullanılan NACA 63<sub>3</sub>-418 kanat profili kullanılmıştır. Bu profil, Abbott ve Doenhoff[30] tarafından tanımlanmıştır. Profilin düzgün bir stall karakteristiği, iyi aerodinamik ve yapısal karakteristiği olduğu Bak ve ark.[2] tarafından bildirilmiştir. Şekil 1'de analizlerde kullanılan ağ yapısı görülmektedir. Bertagnolio ve ark.[26] deneylerde ve sayısal çalışmalarında Reynolds Sayısını  $Re=3 \times 10^6$  olarak kullanmışlardır. Ansys CFX yazılımında çözüm yapılırken aynı Reynolds Sayısı kullanılmıştır.

Şekil 2'de görülen Cl katsayısı karşılaştırmalarından Ansys CFX yazılımında yapılan modellemenin deney sonuçları ile oldukça iyi bir uyum sağladığı görülmektedir. Şekil 3'te ise Cd katsayısı için yapılan karşılaştırmalar görülmektedir. Bu grafikte düşük hücum açıları için sonuçların tam bir uyum sağlamasa da genel gidişatı yakaladığı, 10°den sonra ise deney sonuçlarının ani bir şekilde sıfırlandığı görülmektedir. Şekil 4'te ise Ansys CFX kullanılarak hesaplanan Cm değerlerinin deney sonuçlarına çok yakın olmasa da genel gidişatı yakaladığı görülmektedir. Şekil 2'de görülen Cl katsayılarında flap açısı( $\delta$ ) sıfır olarak kullanılmış olsa da flap ve ana gövde arasındaki boşluk etkisi veya ağ yapısındaki farklılaşmaya bağlı olabilecek bir etki görülmektedir. Düşük hücum açılarında sonuçların neredeyse aynı olması bu etkinin flap ve ana gövde arasındaki boşluğa bağlı olduğunu göstermektedir. Hücum açısının 10°den yüksek değerleri için Cl değerleri flapsız kesit değerlerinden ayrılmakta ve 16°de keskin bir pik yaparak aniden düştüğü Şekil 2'den görülmektedir. Sonuçlar kullanılan ağ yapısının ve yapılan kabullerin yeterli olduğunu göstermektedir.

Cl, Cd ve Cm katsayılarının elde edilmesi için yapılan analizler sırasında kesit sınırları boyunca elde edilen basınç katsayısı dağılımları(Cp) değerleri de Bertagnolio ve ark.[26] tarafından verilen sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Cp değerleri için çalışmada herhangi bir deney sonucu verilmemiştir. Karşılaştırmalar Ansys CFX kullanılarak elde edilen flaplı ve flapsız kesite ait sonuçlar kullanılarak yapılmıştır. Farklı 6 hücum açısı için elde edilen sonuçlar Şekil 5'te toplu olarak verilmiştir. Düşük hücum açılarında uyumlu olan sonuçların hücum açısının yükselen değerleri için farklılaştığı görülmektedir. Flaplı kesit için flap ve ana gövde arasındaki boşluk sınır

yüzeylerinde yüksek hücum açılarında basınç yığılmalarının olduğu ve bu durumun kesit genelindeki basınç dağılımını kritik bir şekilde etkilediği gözlemlenmektedir. Bu etki  $Cl$  katsayısındaki  $16^\circ$  sonrası kritik düşüşü açıklamaktadır.

Doğrulamaların yapılmasından sonra farklı hücum açıları ( $\alpha$ ) ve FKK açıları ( $\delta_f$ ) için 320 adet analiz durumu tanımlanarak kararlı akım koşulları altında bu analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz durumları türetilirken Şekil 1'de görülen koordinat ekseninde düzleme dik eksen  $z$  olmak üzere,  $z$  eksenini yüzey normali düzlemden bakış yönüne doğru tanımlanmıştır.  $z$  eksenini etrafında saat yönü tersi flap açısı ( $\delta_f$ ) ve için hücum açısı ( $\alpha$ ) için pozitifdir. Hücum açısı ( $\alpha$ )  $-10^\circ$  ile  $20^\circ$  derece arasında  $2^\circ$  adımlar ile artırılmıştır. Her bir hücum açısı ( $\alpha$ ) için ise flap açısı ( $\delta_f$ )  $10^\circ$  ile  $-20^\circ$  arasında  $2^\circ$ lik adımlar ile  $-20^\circ$ den  $-45^\circ$ ye kadar ise  $-5^\circ$ lik adımlarla azaltılmıştır. Analizler Ansys parametrik analiz yöntemleri kullanılarak bir kerelik tanımlanmış ve geometrinin oluşturulmasından sonuçların görüntülenmesine kadar her bir aşama otomatik olarak Ansys tarafından yürütülmüştür. 320 adet analiz  $10^{-6}$  yakınsama ile 4 gün gibi bir sürede gerçekleştirilmiştir. Ancak bazı flap açısı ( $\delta_f$ ) değerleri için ağ türetme modülü Şekil 1'de gösterilen sınır tabakası ağını oluşturmakta başarısız olmuştur. Bu durumlar analizler tamamlandıktan sonra tespit edilerek  $1^\circ$ lik artımlar ile –örneğin ( $\delta_f=10^\circ$  için ağ modülü kötü kalitede bir ağ türetmiş bu durumda  $\delta_f=11^\circ$  alınmıştır- modülün başarılı ağ oluşturması sağlanarak sonuçlar raporlanmıştır.



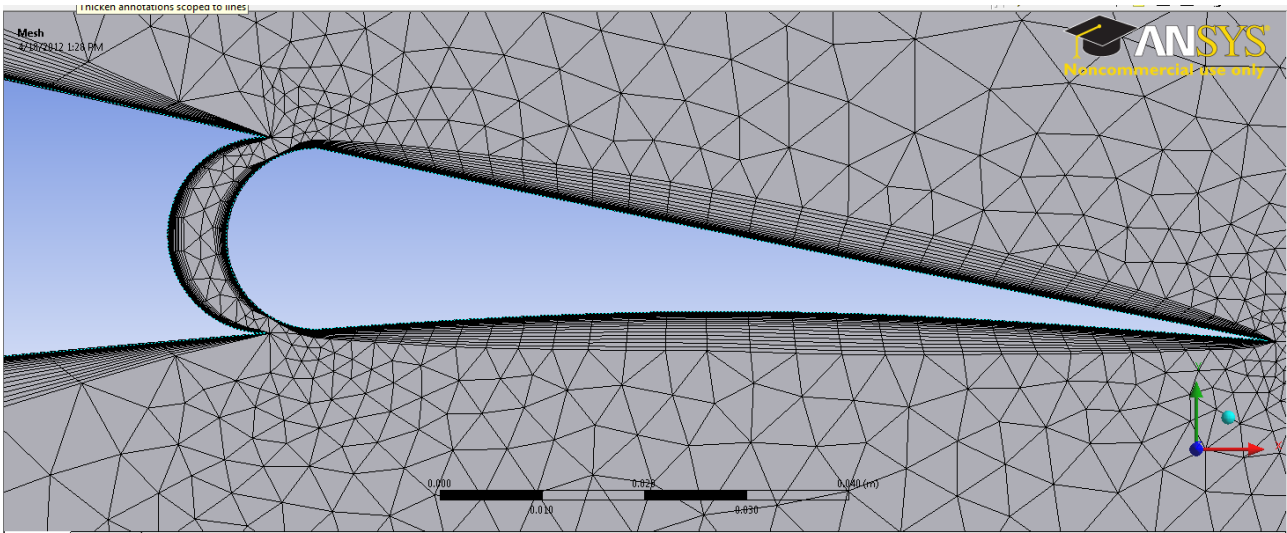
Şekil 1.a. Flaplı NACA 63418 kesiti hesap ağı genel görünüm,  $\delta_f=0^\circ$

Analizlerden elde edilen sonuçlar 3 boyutlu olarak  $Cl$ ,  $Cd$  ve  $Cm$  için sırası ile Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Grafiklerde  $Cl$ ,  $Cd$  ve  $Cm$  bağımlı  $\alpha$  ve  $\delta_f$  ise bağımsız değişkenler olmak üzere analizlerden elde edilen noktalara uydurulan denklemlere ait yüzey grafikleri görülmektedir. Noktalara uydurulan yüzey denklemleri 5 dereceden olup denklem 2'de verilen formdadır.

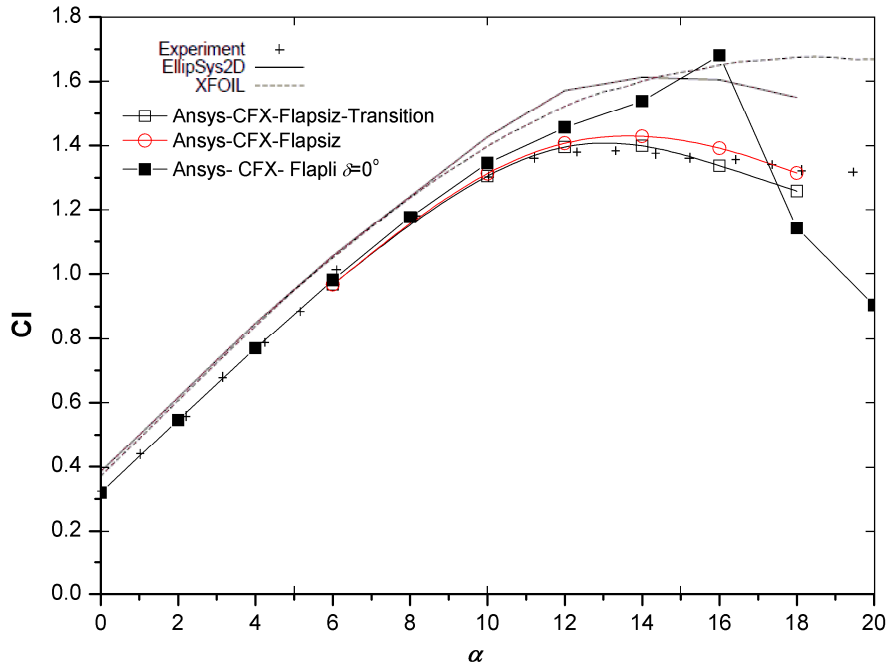
$$z = z_0 + a_1\alpha + a_2\alpha^2 + a_3\alpha^3 + a_4\alpha^4 + a_5\alpha^5 + b_1\delta_f + b_2\delta_f^2 + b_3\delta_f^3 + b_4\delta_f^4 + b_5\delta_f^5 \quad (2)$$

Denklemden  $z$ ,  $Cl$ ,  $Cd$  veya  $Cm$  katsayılarını,  $z_0$  bu katsayılar için bir sabit bir değeri  $a_i$  ve  $b_i$  ise sırası ile hücum açısı ( $\alpha$ ) ve flap açısı ( $\delta_f$ ) değişkenlerinin  $i$ 'inci derece katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılar Tablo 1'de görülmektedir.

Elde edilen yüzey denklemleri için  $R^2$  değerleri ise  $Cl$ ,  $Cd$  ve  $Cm$  için sırası ile 0.97027, 0.91147 ve 0.94587 olmaktadır.



Şekil 1.b. Flaplı NACA 63418 hesap ağı flap bölgesi görünümü,  $\delta_f=0^\circ$



Şekil 2. NACA 63418 profili için  $C_l-\alpha$  değişimi (Kaynak 26'dan tekrar düzenlenerek)

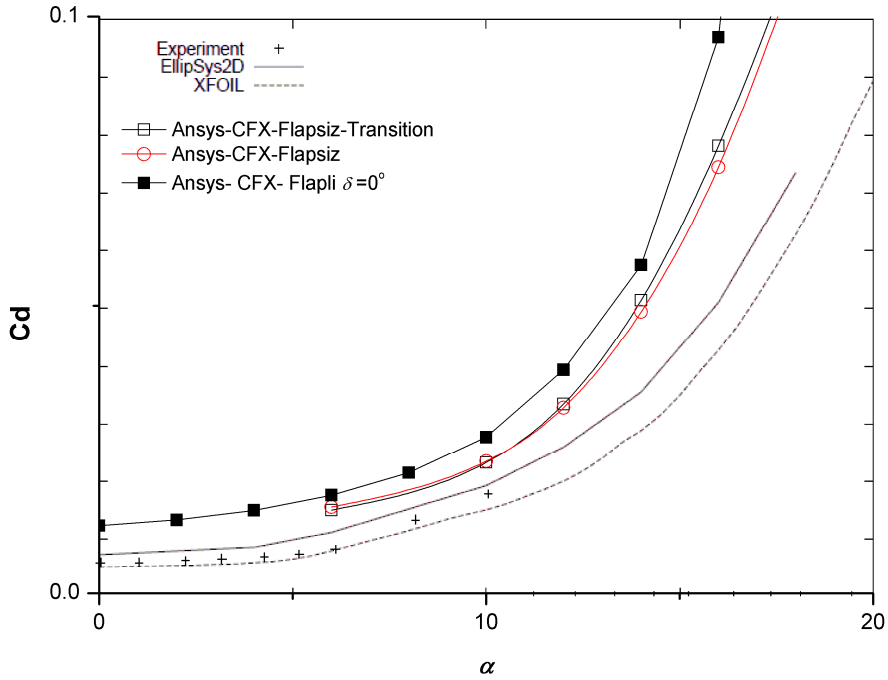
Tablo 1'den görüldüğü gibi katsayılar oldukça küçüktür. Çok küçük katsayılar ihmal edilirse  $C_l-\alpha$  arasında 2. derece ve  $C_l-\delta_f$  arasında ise doğrusal bir ilişki göze çarpmaktadır. Yine küçük katsayılar ihmal edilirse  $C_d-\alpha$  ve  $\delta_f$  hemen hemen doğrusal bir ilişki sergilemektedir.  $C_m$  hesaplandığı konum hücum kenarından çeyrek veter uzaklıktadır. Bu yüzden  $C_m$  değerlerinin  $\alpha$  ile değişimi oldukça küçük olmaktadır. Ancak Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde katsayılar küçük olsa da yüksek dereceli ilişki göze çarpmaktadır.

## SONUÇLAR

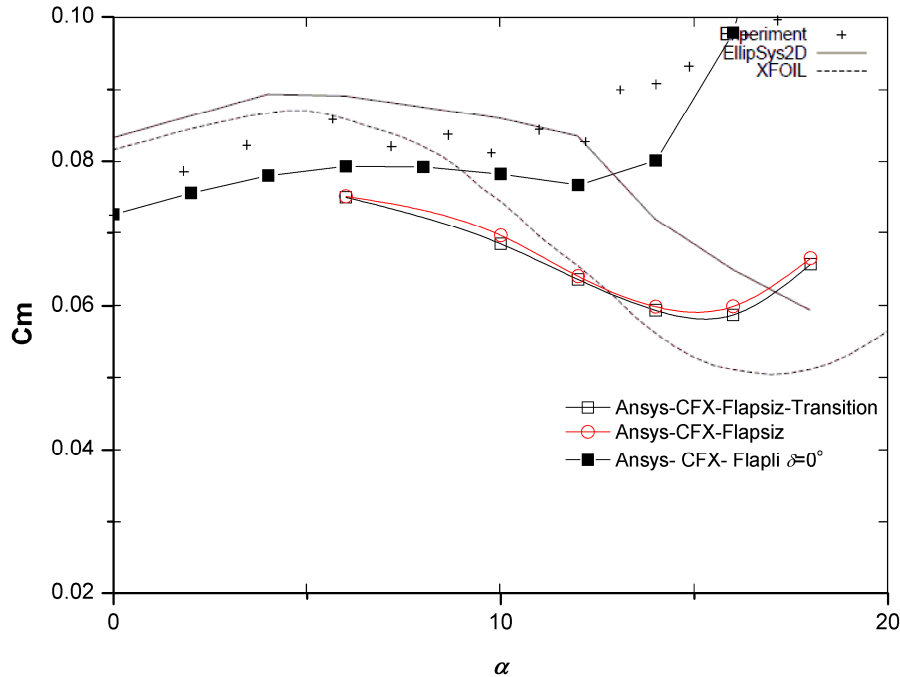
Bu çalışmada rüzgâr türbinlerine uygun NACA 63<sub>3</sub>418 kanat profili farklı hücum açısı ( $\alpha$ ) ve flap açısı ( $\delta_f$ ) değerleri için analiz edilerek  $C_l$ ,  $C_d$  ve  $C_m$  katsayıları ile aralarındaki ilişki incelenmiştir. Elde edilen bu değerler aktif kontrollü bir servo flapın kontrolü için kullanılacaktır. Flapın ani rüzgâr hızı ve yönü değişimlerine anlık tepkisi ile kesitteki salınımların azaltılması dolayısı ile palaların kök bölgelerinde oluşacak kesit tesirlerinin kontrol edilmesi, dinamik yükleme altındaki bu yapılarda ani



yüklemeye ve yorulma yüklerinin aktarma organlarına vereceği zararı en aza indirecektir. Yorulma yüklerinden kaynaklı aşınmalar yine aynı yöntemle azalacağından daha uzun ömürlü ve ekonomik tasarımlar bu tarz kontrol sistemleri ile mümkündür.



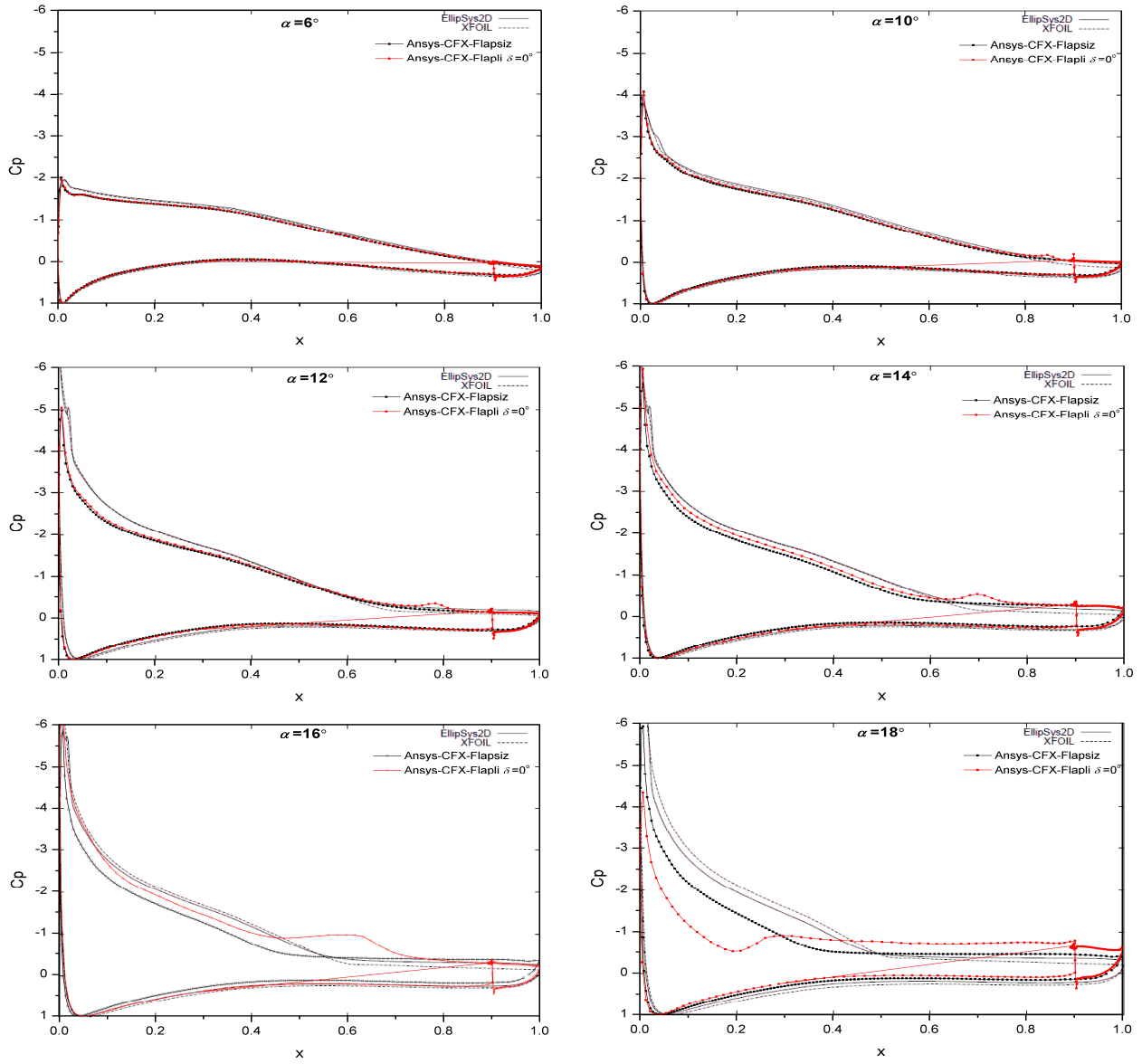
Şekil 3. NACA 63418 profili için Cd- $\alpha$  değişimi (Kaynak 26'dan tekrar düzenlenerek)



Şekil 4. NACA 63418 profili için Cm- $\alpha$  değişimi (Kaynak 26'dan tekrar düzenlenerek)

Çalışmada elde edilen sonuçlar beklendiği gibi kaldırma kuvveti ve flap açısı ( $\delta_f$ ) arasındaki ilişki flap açısının azalması ile kaldırma kuvvetinin de artması yönündedir ve hemen hemen doğrusaldır. Cd, Cm ve flap açısı ( $\delta_f$ ) arasında ise çok belirgin bir değişim gözlemlenmemektedir. NACA 63<sub>3</sub>418 kesitinin performansı firar kenarında bulunan uzunluğu veter uzunluğunun %10'u olan bir flap ile oldukça belirgin bir şekilde artmaktadır. Cl'de gözlemlenen bu artışa nazaran diğer değişkenler Cd ve Cm'de flap açısı ( $\delta_f$ ) ile değişen çok ciddi bir artış gözlemlenmemektedir. NACA 63<sub>3</sub> 418 profili 16° hücum açısı ( $\alpha$ ) civarında en büyük kaldırma kuvveti seviyesine ulaşmaktadır.



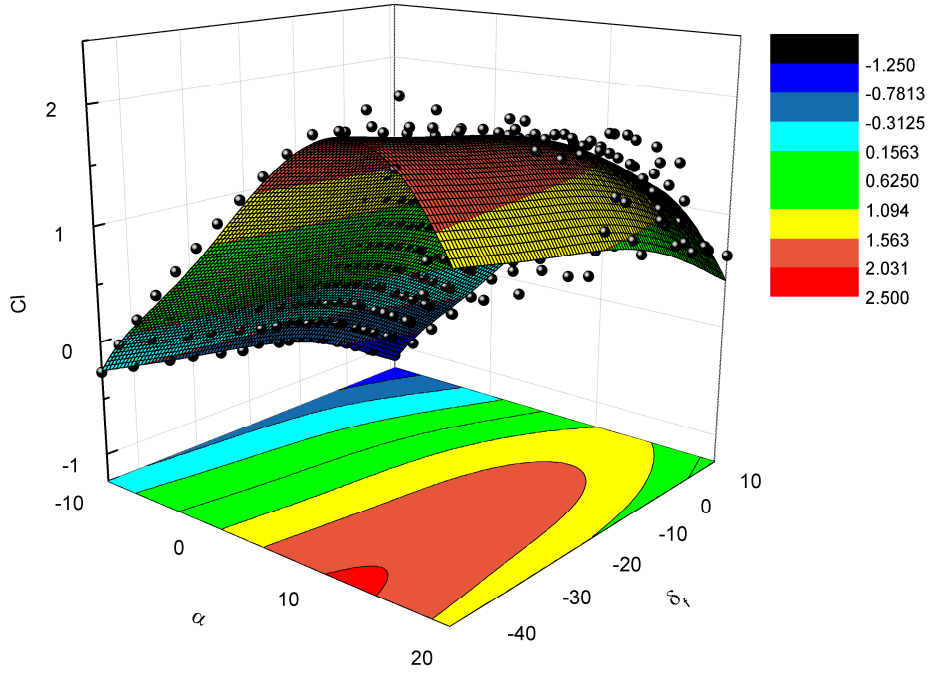


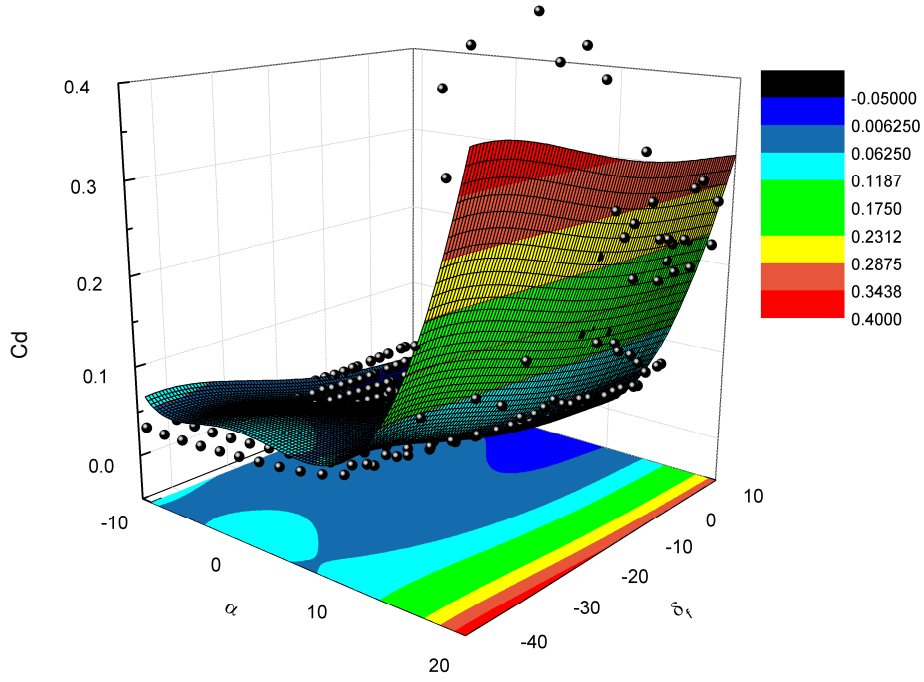
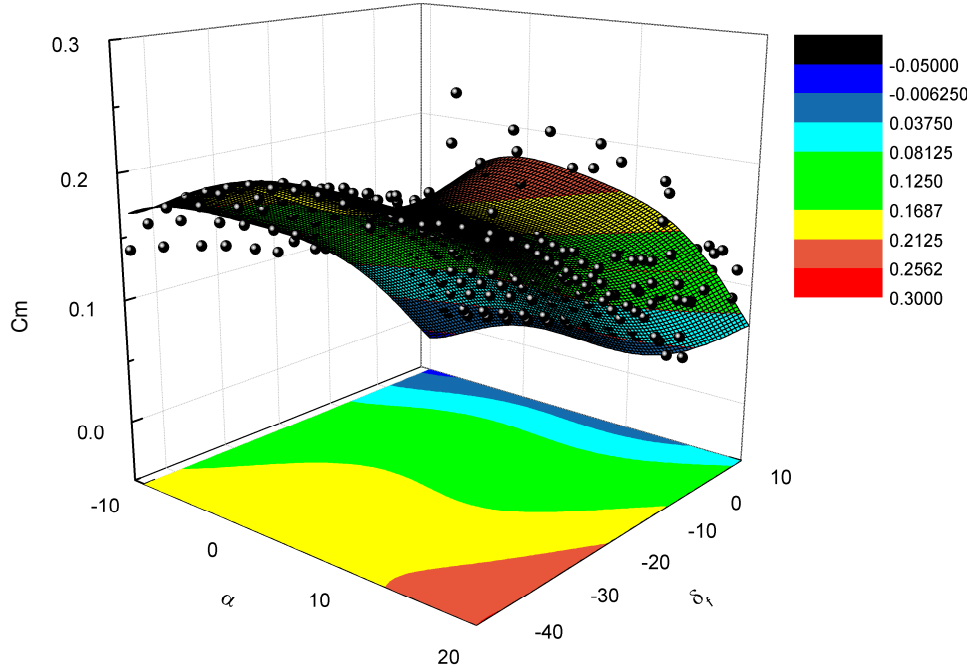
Şekil 5. NACA 63418 profili için Cp dağılımları (Kaynak 26'dan tekrar düzenlenerek)

Çalışmadan elde edilen bulgular incelendiğinde  $C_l$ 'i sabit tutmayı amaçlayan bir kontrol algoritmasının pal köklerindeki aşırı kesit tesirlerinin azaltılması konusunda yararlı olabileceği görülmektedir. Çünkü bu kontrol türbülanslı hava koşulları yüzünden doğacak olan ani aerodinamik yüklemeler yüzünden oluşabilecek aşırı ve karasız salınımları azaltarak türbin palaları köklerinde oluşacak kesit tesirlerini en aza indirecektir.

Tablo 1. Cl, Cd ve Cm için  $\alpha$  ve  $\delta_f$  katsayıları

Katsayı	Cl	Cd	Cm
$z_0$	0.34274	0.00774	0.07936
$a_1$	0.1184	$-5.39 \cdot 10^{-5}$	0.00151
$a_2$	0.00189	$-4.30 \cdot 10^{-4}$	$-3.49 \cdot 10^{-4}$
$a_3$	$-1.20 \cdot 10^{-4}$	$1.57 \cdot 10^{-5}$	$7.99 \cdot 10^{-6}$
$a_4$	$-2.38 \cdot 10^{-5}$	$4.79 \cdot 10^{-6}$	$1.63 \cdot 10^{-6}$
$a_5$	$6.40 \cdot 10^{-7}$	$-1.25 \cdot 10^{-7}$	$-5.22 \cdot 10^{-8}$
$b_1$	-0.02842	$-6.52 \cdot 10^{-4}$	-0.00574
$b_2$	$-4.60 \cdot 10^{-4}$	$1.55 \cdot 10^{-5}$	$-7.53 \cdot 10^{-5}$
$b_3$	$1.45 \cdot 10^{-5}$	$-1.13 \cdot 10^{-6}$	$2.33 \cdot 10^{-6}$
$b_4$	$6.99 \cdot 10^{-7}$	$-1.90 \cdot 10^{-8}$	$1.30 \cdot 10^{-7}$
$b_5$	$7.06 \cdot 10^{-9}$	$1.34 \cdot 10^{-10}$	$1.62 \cdot 10^{-9}$

Şekil 6. Cl- $\alpha$  ve  $\delta_f$  ilişkisi

Şekil 7.  $C_d$ - $\alpha$  ve  $\delta_f$  ilişkisiŞekil 8.  $C_m$ - $\alpha$  ve  $\delta_f$  ilişkisi

### Teşekkür

Bu çalışma, Rüzgâr Enerjisi ve Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde yürütülmektedir,

Birinci yazar, TÜBİTAK BİDEB 2218 Programı (Yurt İçi Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı) kapsamında 1929B011100079 numaralı burs ile desteklenmektedir. Birinci yazar her iki kuruma da teşekkürlerini bildirir.

### Kaynaklar

- [1] Lutz, T., Wolf, A., Würz, W. ve Jérémiasz, J.-G., *Design and Verification of an Airfoil with Trailing-Edge Flap and Unsteady Wind-Tunnel Tests*, UPWIND WP1B3 TECHNICAL REPORT, Germany, January 2011

- [2] Bak, C., Madsen, H., Gaunaa, M., Paulsen U., Fuglasang, P., Rommblad, J., Olesen, N.A., Enevoldsen, P., Laursen J. ve Jensen, L., *DAN -AERO MW: Comparisons of airfoil characteristics for two airfoils tested in three different wind tunnel*, Torque 2010- The Science of making Torque from Wind, FORTH, Heraklion, Crete, Greece, June 28-30 2010
- [3] Madsen, H.A., Andersen, P.B., Andersen, T.L., Bak, C. ve Buhl, T., *The Potentials of the Controllable Rubber Trailing Edge Flap (CRTEF)*, European Wind Energy Conference 2010, Warsaw, Poland, 20-23 April 2010
- [4] Hulskamp, A.W., van Wingerden, J.W., Barlas, T., Champlaud, H., van Kuik, G.A.M., Bersee, H.E.N. ve Verhaegen, M., *Design of a Scaled Wind turbine With a Smart Rotor for Dynamic Load Control Experiments*, Wind Energ., DOI: 10.1002/we.424, 2010
- [5] Andersen, P. B., *Advanced Load Alleviation for Wind Turbines using Adaptive Trailing Edge Flaps: Sensing and Control*, Ph.D. thesis, Risø-PhD-61(EN), Risø National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark, February 2010
- [6] Barlas, T.K. ve van Kuik, G.A.M., *Review of State of the Art in Smart Rotor Control Research for Wind Turbines*, Progress in Aerospace Sciences, Vol:46, pp:1-27., 2010
- [7] Manwell, J.F., McGowan, J.G. Rogers, A.L., *Wind Energy Explained, Theory, Design and Application, 2<sup>nd</sup> ed.*, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, UK, 2009
- [8] Heinz, J.C., *Investigation of Piezoelectric Flaps for Load Alleviation Using CFD*, M.Sc. Thesis, Risø-R-1702(EN), Risø National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark, 2009
- [9] Barlas, T.K. ve van Kuik, G.A.M., *Aeroelastic Modelling and Comparison of Advanced Active Flap Control Concepts for Load Reduction on the Upwind 5MW Wind Turbine*, European Wind Energy Conference & Exhibition, Parc Chanot, Marseille, France, 16-19 March 2009
- [10] Wilson, D.G., Dale, E. B., Barone, M.F., Berg, J.B., Resor, B. R. ve Lobitz, D.W., *Active Aerodynamic Blade Control Design For Load Reduction On Large Wind Turbines*, European Wind Energy Conference & Exhibition, Parc Chanot, Marseille, France, 16-19 March 2009
- [11] Hansen, M. O. L., *Aerodynamics of Wind Turbines 2<sup>nd</sup> ed.*, Earthscan, London, UK, 2008
- [12] van Wingerden, J.W., Hulskamp, A.W., Barlas, T., Marrant, B., van Kuik, G. A. M., Molenaar, D.-P. ve Verhaegen, M., "On the Proof of Concept of a 'Smart' Wind Turbine Rotor Blade for Load Alleviation", Wind Energ., Vol: 11, pp:265–280, 2008
- [13] Bergami, L., *Aeroservoelastic Stability of a 2D Airfoil Section equipped with a Trailing Edge Flap*, M.Sc. Thesis, Risø-R-1663(EN), Risø National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark, November 2008
- [14] Johnson, S.J., van Dam, C.P. ve Berg, D.E., *Active Load Control Techniques for Wind Turbines*, Sandia Report, SAND2008-4809, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, August 2008
- [15] Barlas, T., *Smart Rotor Blades and Rotor Control—State of the Art—Knowledge Base Report for UpWind project WP1B3*, Technical Report, Upwind Project, 2007
- [16] Hulskamp, A.W., Beukers, A., Bersee, H.E.N., van Wingerden, J.W. ve Barlas, T., *Design of a Wind Tunnel Scale Model of an Adaptive Wind Turbine Blade for Active Aerodynamic Load Control Experiments*, 16<sup>th</sup> International Conference On Composite Materials, Kyoto, Japan, July 8-13 2007
- [17] Buhl, T., Andersen, P.B. ve Barlas., T.K., *2D Numerical Comparison of Trailing Edge Flaps - UpWind WP1B3*, Risø-R-1628(EN) Technical Report, Risø National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark, November 2007
- [18] Barlas, T.K. ve van Kuik, G.A.M., *State of the Art and Perspectives of Smart Rotor Control for Wind Turbines,* " *Journal of Physics: Conference Series 75*, Proc. of The Science of Making Torque from Wind, Copenhagen, Denmark, August 2007
- [19] Mathew, S., *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer Science+Business Media, Berlin, Germany, 2006
- [20] Various authors, *Proceedings of the IEA Topical Expert Meeting on the Application of Smart Structures for Large Wind Turbine Rotor Blades*, , Delft University of Technology, Delft The Netherlands, December 2006
- [21] Hau, E., *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2<sup>nd</sup> ed.*, Springer Science+Business Media, Berlin, Germany, 2006

- [22] Buhl, T., Gaunaa, M. ve Bak, C., *Potential Load Reduction Using Airfoils with Variable Trailing Edge Geometry*, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 127, pp:503-516, 2005
- [23] Troldborg, N., *Computational Study of the Risø-B1-18 Airfoil Equipped with Actively Controlled Trailing Edge Flaps*, M.Sc. Thesis Project, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark, September 2004
- [24] Basualdo, S., *Load Alleviation on Wind Turbines using Variable Airfoil Geometry (A Two-Dimensional Analysis)*, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark, February 2004
- [25] Bossanyi, E., *Individual Blade Pitch Control for Load Reduction*, Wind Energy, Vol. 6, 2003
- [26] Bertagnolio, F., Sørensen, N., Johansen, J. ve Fuglsang, P., *Wind Turbine Airfoil Catalogue*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, *Risø-R- 1280(EN)*, August 2001
- [27] Burton, T., Sharpe D., Jenkins N. ve Bossanyi, E., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, UK, 2001
- [28] Miller, L.S., *Experimental Investigation of Aerodynamic Devices for Wind Turbine Rotational Speed Control: Phase II*, Technical Report NREL/TP-441-20507, NREL, February 1996
- [29] Migliore, P.G., Quandt, G.A., and Miller, L.S., *Wind Turbine Trailing Edge Aerodynamic Brakes*, Technical Report NRETL/TP-441-6913, February 1995
- [30] Abbot, I.H. ve von Doenhoff, A.E.; *Theory of wing section including a summary of airfoil data*; Dover publications Inc., New York, 693 p., 1959
- [31] [www.upwind.eu](http://www.upwind.eu)
- [32] <http://www.risoe.dtu.dk>
- [33] [www.ansys.com](http://www.ansys.com)