



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DIKEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT
TASARIMI VE HESAPLAMALI
AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZİ**

Mustafa Sait CANOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**HAZİRAN-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa Sait CANOĞLU tarafından hazırlanan “Dikey Eksenli Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı Ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi” adlı tez çalışması 17/05/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

.....

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin KURT

.....

Üye

Doç. Dr. Engin GEDİK

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mustafa Sait CANOĞLU

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİKEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT TASARIMI VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI ANALİZİ

Mustafa Sait CANOĞLU

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin KURT

2022, 98 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin KURT
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Doç. Dr. Engin GEDİK

Artan nüfus ve gelişen teknoloji ile enerjide dışa bağımlı olan ülkemiz ve enerji ihtiyacı sürekli artan dünyamız için enerji kaynaklarının önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Mevcut durumda enerji ihtiyacımızın çoğunu sınırlı kaynaklar olan fosil yakıtlar ile sağlamaktayız. Bu mevcut durum sürdürülebilir olmadığı için yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını ve kullanılan toplam enerjideki payını arttırmak amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, yaşam alanlarına yakın yerlerde ve hatta kent merkezlerinde kolaylıkla kullanılabilen dikey eksenli rüzgar türbinlerinin (DERT) kanat tasarımına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. DERT'lerden en verimli şekilde yararlanmak için literatürde Lenz tipi kanat profili olarak geçen kanat profili referans alınarak yeni kanat profilleri tasarlanmıştır. Lenz tipi kanat profili ve yeni tasarlanan kanat profilleri üzerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile 0.03, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 uç hız oranlarında (TSR) ve 0°, 3°, 6°, 9°, 12°, 15°, 18° hücum açılarında sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizden elde edilen sonuçlar her bir uç hız oranında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve her bir uç hız oranı değeri için optimum kanat profilleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 0,03 ve 0,1 uç hız oranlarında yeni tasarlanan kanat profili, bütün hücum açılarında Lenz tipi kanat profilinden daha iyi performans göstermiş ancak 0,2 uç hız oranı değerinden itibaren Lenz tipi kanat profillerinin performansının daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dikey Eksenli Rüzgar Türbini, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Lenz Tipi Rüzgar Türbini, Rüzgar Türbini, Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı

ABSTRACT

MS THESIS

VERTICAL AXIS WIND TURBINE BLADE DESIGN AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANALYSIS

Mustafa Sait CANOĞLU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin KURT

2022, 98 Pages

Jury

Prof. Dr. Hüseyin KURT

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

Doç. Dr. Engin GEDİK

With the increasing population and developing technology, the importance of energy resources is increasing day by day for our country, which is dependent on foreign energy for energy, and for our world, whose energy needs are constantly increasing. Currently, we meet most of our energy needs with fossil fuels, which are limited resources. Since this current situation is not sustainable, renewable energy sources are needed. In this study, in order to increase the use of renewable energy sources and their share in the total energy used, a study on blade design for vertical axis wind turbines (VAWT), which can be easily used in places close to living areas and even in city centers, has been carried out. In order to benefit from VAWTs in the most efficient way, new wing profiles have been designed with reference to the wing profile, which is referred to as the Lenz type wing profile in the literature. With Computational Fluid Dynamics (CFD) method on Lenz type airfoil and newly designed airfoils at 0.03, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 tip speed ratios (TSR) and at 0°, 3°, 6°, 9°, 12°, 15°, 18° angles of attack, numerical analyzes were carried out. The results obtained from the numerical analysis were evaluated comparatively at each tip speed ratio and optimum airfoil profiles were determined for each tip speed ratio value. According to the results obtained, the newly designed airfoil at 0,03 and 0,2 tip speed ratios outperformed the Lenz type airfoil at all angles of attack, but the Lenz type airfoil has been reached conclusion that it is better performance at 0.2 and higher tip speed ratios.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Lenz Type Wind Turbine, Vertical Axis Wind Turbine, Wind Turbine, Wind Turbine Blade Design

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanmasında beni her zaman destekleyen ve yönlendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. Hüseyin KURT'a ve HAD analizlerinin yapılabilmesinde bana yol gösteren Doç. Dr. Engin GEDİK hocama çok teşekkür ederim. Beni bugünlere getiren çok kıymetli anne ve babama, maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen eşime ve bu süreçte dünyaya gelen oğluma teşekkür ederim.

Mustafa Sait CANOĞLU
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Rüzgar Enerjisi.....	1
1.2. Rüzgar Türbinleri	3
1.2.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT)	4
1.2.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT).....	4
1.3. Rüzgar Türbinlerinin Performans Parametreleri	6
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi	15
3.2. Temel Denklemler	15
3.2.1. Kütleinin Korunumu Denklemi	16
3.2.2. Momentum Korunum Denklemi.....	17
3.3. Sayısal Model	17
3.3.1. Tasarım Parametreleri.....	18
3.3.2. Ağ Yapısı	19
3.3.3. Türbülans Modeli.....	21
3.3.4. Sınır Şartları.....	21
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	23
4.1. Kanat Tasarımı.....	23
4.2. Ağdan Bağımsızlık	26
4.3. Rotor Yarıçapının Belirlenmesi	26
4.4. Farklı Uç Hız Oranlarında Kanat Profillerinin Karşılaştırılması.....	30
4.4.1. 0,03 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması... 31	
4.4.2. 0,1 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması..... 41	
4.4.3. 0,2 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması..... 51	
4.4.4. 0,3 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması..... 61	
4.4.5. 0,4 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması..... 71	
4.4.6. 0,5 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması..... 81	
4.4.7. Kanat Profillerinin uç Hız Oranına Göre Performans Karşılaştırılması ... 91	

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
5.1 Sonuçlar	93
5.2 Öneriler	95
6. KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
p	: Statik Basınç (N/m^2)
P_r	: Rüzgarın Toplam Enerjisi (J)
P_t	: Türbinden Elde Edilen Güç (J)
A	: Süpürme Alanı (m^2)
v	: Rüzgarın Hızı (m/s)
R	: Rotor Yarıçapı (m)
λ	: Uç Hız Oranı (TSR)
ω	: Türbinin Dönme Hızı (rad/s)
M	: Moment (Nm)
C_p	: Güç Katsayısı
t	: Zaman (s)
\vec{v}	: Hız Vektörü (m/s)
v_r	: Radyal Hız (m/s)
v_x	: Eksenel Hız (m/s)
r	: Radyal Koordinat
$\bar{\tau}$: Gerilme Tensörü (Pa)
\vec{g}	: Yer Çekim İvmesi (m/s^2)
\vec{F}	: Dış Gövde Kuvveti (N)
μ	: Viskozite (kg/m.s)
I	: Birim Tensörü
S_m	: Kütleli Kaynak Terimi (kg)
P_k	: Hız Gradyanlarından Dolayı Meydana Gelen Türbülans Kinetik Enerjinin Üretimi (J)
P_b	: Kaldırma Kuvvetinden Dolayı Meydana Gelen Türbülans Kinetik Enerjinin Üretimi (J)

Kısaltmalar

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri
DERT	: Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri
TSR	: Tip Speed Ratio (Uç Hız Oranı)

1. GİRİŞ

Enerji, günümüz dünyasının en önemli konularından birisidir. Her kişinin, konutun, mahallenin, şehrin, ülkenin kısacası en küçük kesimden en büyük kesime tüm dünyanın enerjiye ihtiyacı vardır. Dünyamız bu ihtiyacı karşılayabilecek birçok kaynağa sahiptir. Bu kaynakların bir kısmı sonlu, yenilenemez enerji kaynakları iken bir kısmı da yeni adı ile “yeşil enerji” dediğimiz sonsuz ve yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

Her geçen gün artan nüfus ve gelişen teknolojiye paralel olarak insanoğlunun enerjiye olan ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır. Artan bu enerji ihtiyacının, günümüz enerji ihtiyacının çoğunu karşıladığımız sınırlı fosil kaynaklardan karşılayamayacağımız için yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kaynakların başında rüzgar enerjisi gelmektedir.

Rüzgar enerjisinin kullanılabilir enerjiye dönüşmesi rüzgar türbinleri ile sağlanır. Rüzgar türbinleri, kanatları vasıtasıyla rüzgar enerjisini önce mekanik enerjiye, sonrasında ise bir jeneratör vasıtasıyla bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler.

Son yıllarda adını sıklıkla duyduğumuz ve dünyamızdaki canlı hayatını tehdit eden küresel ısınmanın temel kaynağı fosil yakıt kullanımı olarak gösterilmektedir. Fosil yakıt kullanımının azaltılabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu tezin temel amacı düşük rüzgar hızlarında çalışabilen, ekonomik olarak kolaylıkla üretilip alınabilen, yaşam alanlarına yakın yerlerde ve hatta kent merkezlerinde kolaylıkla kullanılabilen dikey eksenli rüzgar türbinlerinden en verimli şekilde yararlanmak için optimum kanat tipini ve özelliklerini belirlemek ve yeni tasarımlarla bunun geliştirilmesinin önünü açmaktır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin yaşam alanlarına yakın yerlerde ve kent merkezlerinde kullanım örnekleri Şekil 1.1’de ve 1.2’de gösterilmiştir. Bu sayede yenilenebilir enerji kaynaklarının dünyanın enerji ihtiyacını karşılamadaki payını arttırmak ve yine buna bağlı olarak fosil yakıt kullanımının azaltılmasına katkı sağlamaktır.

1.1. Rüzgar Enerjisi

Temiz, yenilenebilir ve sonsuz bir enerji kaynağı olan rüzgarın ana kaynağı güneştir. Güneş kaynaklı radyasyon ışınları, yeryüzünün engebeli yüzey yapısından dolayı her yere eşit miktarda düşmemekte ve bundan dolayı farklı yüzey sıcaklıklarına neden olmaktadır. Yüzeyler arasındaki bu sıcaklık farkı aynı zamanda nem ve basınç

farklılıklarına neden olmakta ve buna bağlı olarak hava, basınç farklılıklarından dolayı oluşan yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine hareket ederek rüzgarların oluşmasına neden olmaktadır. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık %2'si kadarı rüzgâr enerjisine dönüşmektedir [1].



Şekil 1.1. DERT'lerin şehir merkezine yakın yerlerde kullanımı [2]

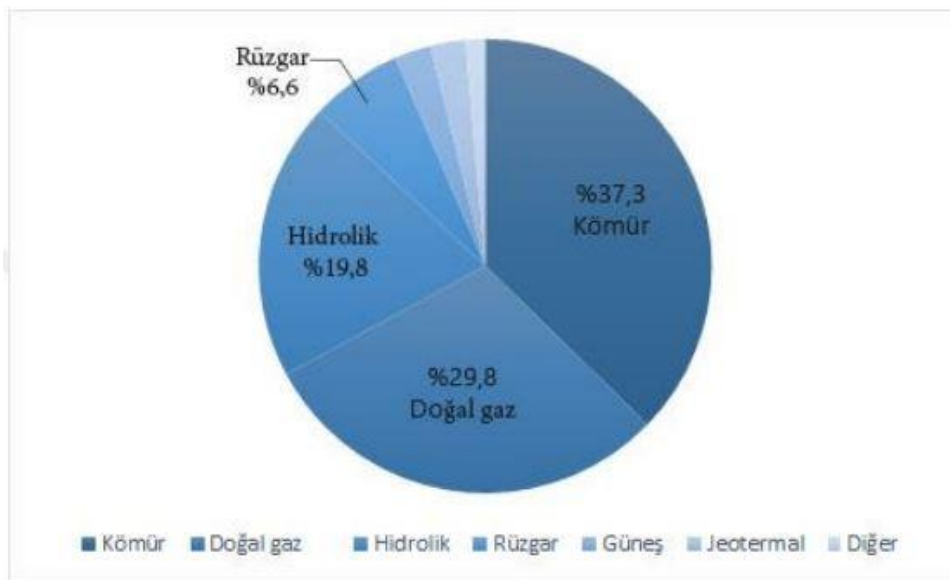


Şekil 1.2. DERT'lerin şehir merkezine bireysel kullanımı [3]

Rüzgar enerjisi yenilenebilir sonsuz bir enerji kaynağı olmasının yanı sıra çevre dostu, ucuz ve kolay ulaşılabilir bir enerji kaynağıdır. Bu nedenlerden dolayı geçmişten günümüze çeşitli yöntemlerle, çeşitli amaçlar için kullanılmış ve kullanılmaya devam

etmektedir. Günümüzde artan enerji ihtiyacı ve yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önem ile birlikte rüzgar enerjisinin önemi de her geçen gün artmaktadır.

Ülkemizde elektrik enerjisi tüketimi 2018 yılında bir önceki yıla göre %2,2 artarak 304,2 milyar kWh, elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %2,2 oranında artarak 304,8 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. Yine 2018 yılında elektrik üretimimizin, %37,3'ü kömürden, %29,8'i doğal gazdan, %19,8'i hidrolik enerjiden, %6,6'sı rüzgârdan, %2,6'sı güneşten, %2,5'i jeotermal enerjiden ve %1,4'ü diğer kaynaklardan elde edilmiştir. Şekil 1.3'te 2018 yılı elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı verilmiştir. 2019 yılı Eylül ayı sonu itibarıyla ülkemiz kurulu gücü 90.720 MW'a ulaşmış ve kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; yüzde 31,4'ü hidrolik enerji, yüzde 28,6'sı doğal gaz, yüzde 22,4'ü kömür, yüzde 8,1'i rüzgâr, yüzde 6,2'si güneş, yüzde 1,6'sı jeotermal ve yüzde 1,7'si ise diğer kaynaklar olacak şekilde neticelenmiştir [3].



Şekil 1.3. 2018 yılı elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı [4]

1.2. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini önce mekanik enerjiye, sonra da mekanik enerjiyi bir jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştüren turbo makinelerdir. Rüzgar Türbinleri, dönme eksenlerine göre Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT) ve Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT) olmak üzere ikiye ayrılır. Rüzgar türbinleri ayrıca kullanım yerlerine, kanat sayılarına, dönüş hızlarına ve güç sistemlerine göre sınıflandırılabilir. Bu tez kapsamında dönme eksenlerine göre sınıflandırılmıştır.

1.2.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT)

YERT'lerde dönme eksenini rüzgar yönüne paralel, kanatlar rüzgar yönüne dik durumdadır. YERT'lerin verimi yaklaşık %45'dir. YERT'ler yerden 20-30m yüksekte ve çevredeki engellerden 10m yüksekte konumlandırılır. YERT'leri çoğunlukla üç kanatlı olup tek kanatlı, iki kanatlı ve çok kanatlı çeşitleri vardır. Üç kanatlı rüzgar türbinleri fiyat performans açısından iki ve çok kanatlı rüzgar türbinlerine kıyasla daha avantajlıdır. Bu nedenle en çok bu tip YERT'ler kullanılmaktadır. YERT'nin gürültü seviyesinin yüksek olması ve düşük rüzgar hızlarında çalıştırılmıyor olması en büyük dezavantajdır [5]. YERT'ler genel olarak kanatlar, kule, jeneratör, dişli kutusu, elektrik-elektronik elemanlardan oluşurlar [6]. Şekil 1.4'te YERT görseli verilmiştir.



Şekil 1.4. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri [7]

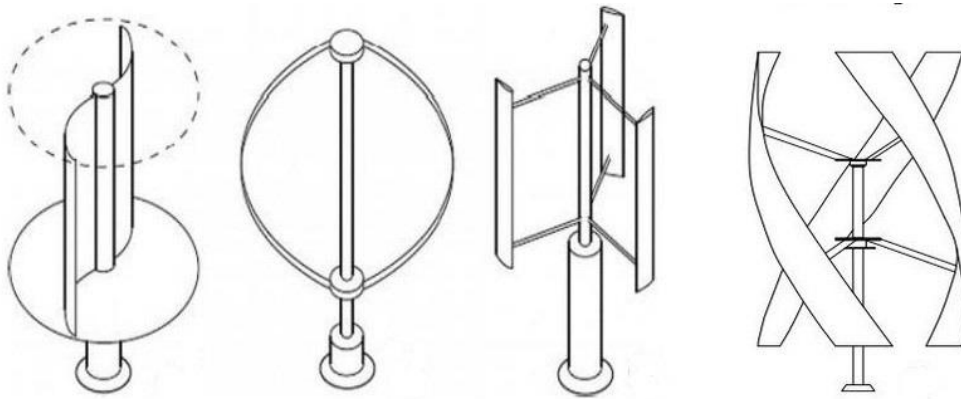
1.2.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT)

DERT'lerin dönme eksenleri rüzgar yönüne dik, türbin mili dikeydir. DERT rüzgar yönünden bağımsız olup rüzgarı her yönden kabul edebilme ve düşük rüzgar hızlarında çalışabilme avantajlarına sahiptir. Bu türbinler rüzgarın sürüklenme veya kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle çalışır ve verimleri yaklaşık %35'dir. Mekanik ve elektrik aksamı için kuleye ihtiyaç duymazlar. En önemli çeşitleri Savonius ve Darrieus tipi DERT'lerdir [5].

DERT'lerin YERT'lere göre avantajları kule masraflarının olmaması, rüzgarı her açıdan alabilmeleri, bakım ve onarımlarının daha kolay ve maliyetlerinin az olmasıdır. Dezavantajları ise verimlerinin düşük olması, yere yakın oldukları için rüzgar hızlarının düşük olmasıdır [8].

YERT'ler en yaygın kullanılan rüzgar türbini türleridir. Ancak son araştırmalar, DERT'lerin kentsel uygulamalar için daha uygun olduğunu göstermektedir [9].

Savonius tipi DERT'ler 1925 yılında Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından geliştirilmiş olup, biri iç bükey biri dış bükey iki yarım silindir şeklinde kanatlardan oluşmaktadır. Rüzgarın sürüklenme (itme) kuvvetini kullanır. Rüzgarın bu kanatlara etkisiyle kanatların iç kısmına pozitif, dış kısmında negatif bir moment oluşur. Pozitif moment negatif momentten daha büyük bir değere sahip olacağından dönme hareketi meydana gelir [10]. Diğer DERT'lere göre; düşük rüzgar hızlarında çalışabiliyor olması, yapımının basit ve düşük maliyetli olması, rüzgarın geliş açısından bağımsız olması ve kendi kendine ilk harekete başlayabiliyor olması gibi avantajlara sahiptir [8]. Şekil 1.5'te DERT çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri [11]

Darrieus tipi DERT'ler 1931 yılında Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından icat edilmiş olup, düşey şekilde yerleştirilmiş iki veya üç tane kanat bulunmaktadır. Genellikle rüzgarın kaldırma kuvvetini kullanır. Kanatların geometrik formu aerodinamik bir profile sahip olduğundan dolayı performansı yüksektir. Yüksek hızlarda çalışabilir ancak ilk hareket genellikle için bir tahrik motoru kullanılmaktadır [5].

Bu tip DERT'lerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları tüm kesitler aynı olduğundan dolayı kolaylık sağlamak için iki boyutlu olarak da yapılabilmektedir. Son yıllarda HAD analiz yöntemlerinin gelişmesiyle beraber DERT'ler araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde araştırılır hale gelmiştir [8].

Bu tez kapsamına referans olan Lenz Tipi DERT'ler Edward Lenz tarafından bulunmuştur. Bu türbinlerde kullanılan Lenz tipi kanat profili sürüklenme ve kaldırma kuvveti bir

profile sahiptir ve Şekil 1.6.'da gösterildiği gibi dışbükey yüzeyin varlığı nedeniyle, kanatlar kaldırmadan daha fazla sürtünme yaşar. Bu kanat profili hareket yönünde yönlendirilmiş minimal dışbükey yüzeyden oluştuğundan, kanatlar, dışbükey yüzeyin varlığı nedeniyle mümkün olan en az miktarda ters etki yaşar [12].



Şekil 1.6. Lenz Tipi Rüzgar Türbini [13]

1.3.Rüzgar Türbinlerinin Performans Parametreleri

Bir rüzgar türbinin performansının ölçülebilmesi için öncelikle rüzgar enerjisinden elde edilecek maksimum değerin hesaplanması gerekmektedir. Belirli bir hızda esen rüzgarın toplam gücü P_r aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır.

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.1)$$

Eşitlikte P_r rüzgarın toplam gücünü, ρ havanın yoğunluğunu (kg/m^3), A süpürme alanını (m^2) ve v rüzgarın hızını (m/s) ifade etmektedir.

Rüzgar türbinlerinin performans ölçümleri ve kıyaslamalarında uç hız oranı (TSR) ile güç çıktısı veya katsayısı grafikleri kullanılır. Uç hız oranı λ ile gösterilir ve kanat açıklığı ile rüzgar hızı arasındaki ilişkiyi tanımlayan boyutsuz bir katsayıdır.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (1.2)$$

Eşitlikte; ω dönme hızı (rad/s), R rotor yarıçapı (m) ve v rüzgarın hızını (m/s) göstermektedir.

Güç katsayısı C_p , rüzgar türbininden elde edilen gücün P_t , rüzgarın gücüne oranıdır.

$$C_p = \frac{P_t}{P_r} \quad (1.3)$$

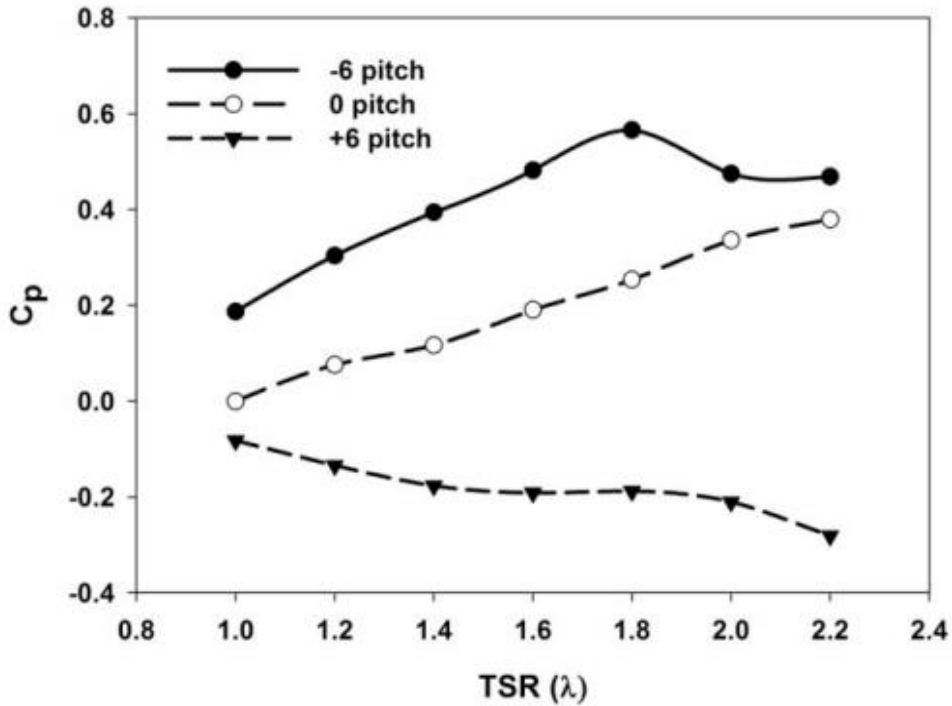
Türbinden elde edilen güç P_t , moment değerinin M (Nm), türbinin dönme hızı ω (rad/s) ile çarpımı ile hesaplanır.

$$P_t = M\omega \quad (1.4)$$

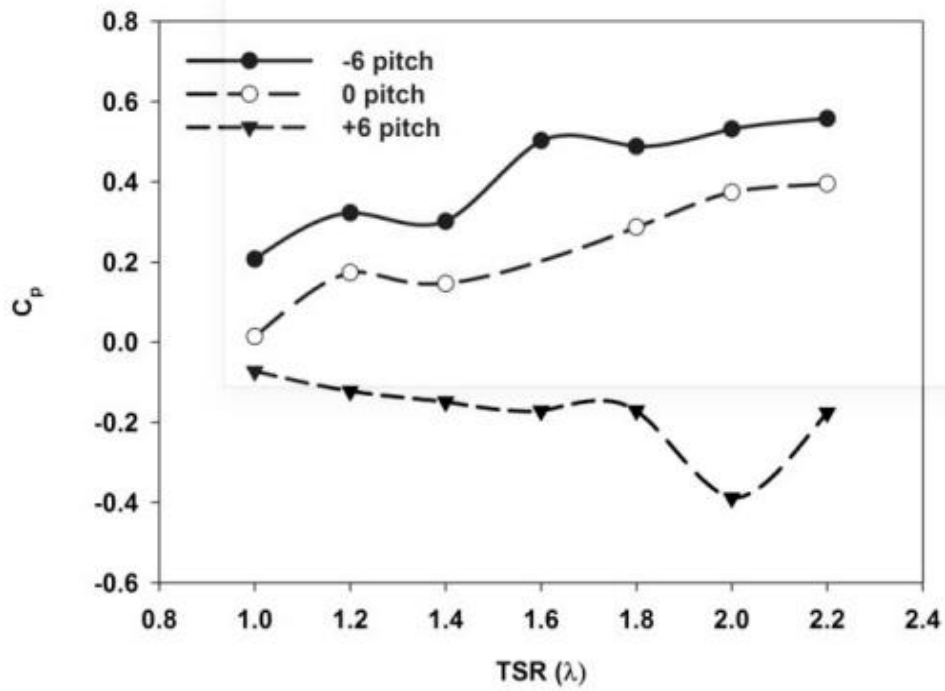
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacın her geçen gün daha da arttığı dünyamızda, bu kaynakların daha kolay ve daha verimli kullanılabilmesi için DERT'lerin performansını çeşitli parametreler ile arttırmayı amaçlayan birçok deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmaktadır. Rüzgar enerjisini daha verimli kullanmak için ana parametre kanat tipi olarak ortaya çıkmaktadır. Kaldırma kuvvetini kullanan DERT'lerde kaldırma kuvvetini arttırmak, itirme kuvvetini kullanan DERT'lerde ise dönme yönündeki etkin kuvveti arttırarak ters yönde etki eden kuvvetleri en aza indirmek amaçlanmaktadır.

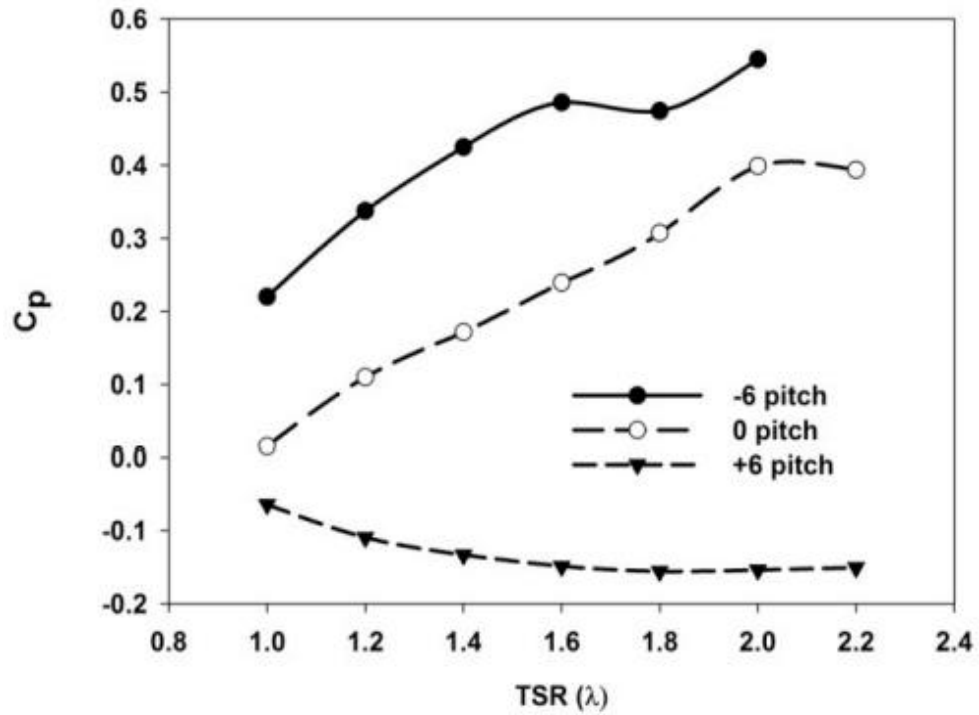
Sumantraa ve arkadaşları hücum açısının üç kanatlı H-Darrieus DERT'leri üzerindeki performans etkisini ticari bir HAD yazılımı kullanarak sayısal olarak incelemiştir. -6° , 0° , $+6^\circ$ hücum açılarında 6, 8, 10 m/s rüzgar hızlarında ve farklı uç hız oranı (TSR) değerlerinde k- ϵ SST türbülans modelini sahip 2 boyutlu bir model kullanarak çalışmasını gerçekleştirmiş ve -6° hücum açılı kanadın tüm TSR değerlerinde ve tüm hızlarda en iyi performansı verdiği sonucuna ulaşmıştır [14].



Şekil 2.1. TSR'a bağlı olarak güç katsayısının değişimi, $v=6$ m/s [14]

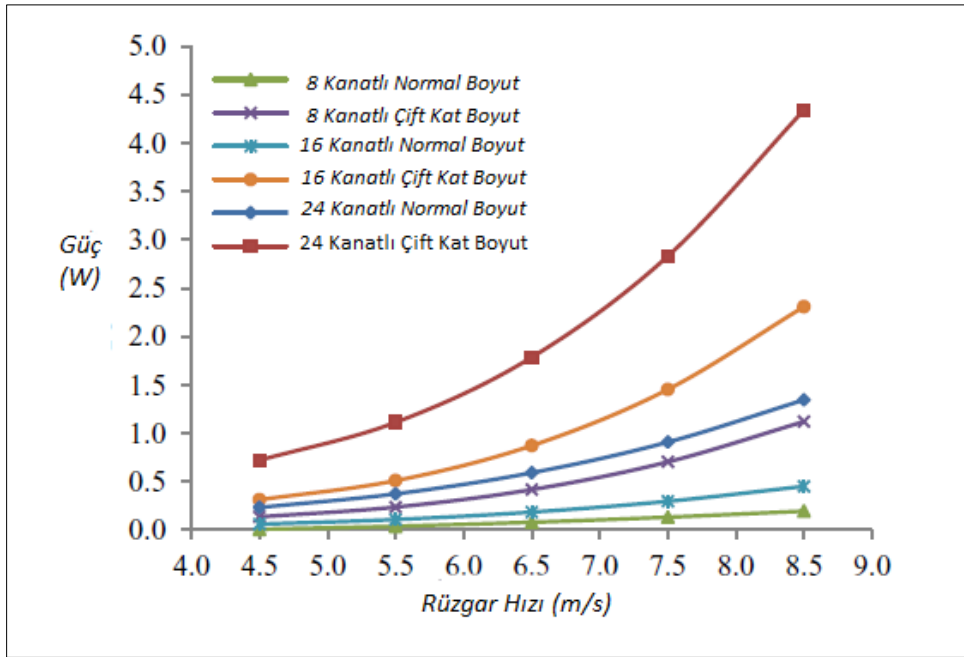


Şekil 2.2. TSR'a bağlı olarak güç katsayısının değişimi, $v=8$ m/s [14]



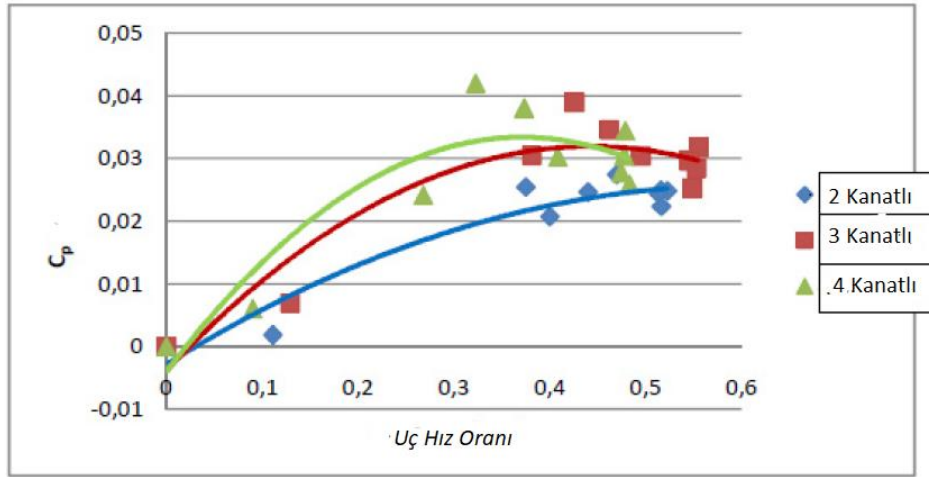
Şekil 2.3. TSR'a bağlı olarak güç katsayısının değişimi, $v=10$ m/s [14]

Loganathan ve arkadaşları çok kanatlı bir Savonius tipi dikey eksenli rüzgar türbininin boyutlandırılmasının güç çıkışı üzerindeki etkisini incelemiştir. İlk olarak, 300 mm rotor çapına ve 160 mm kanat uzunluğuna sahip 8, 16 ve 24 kanatlı mikro rüzgar türbinini 40 mm çapında bir temel modeli tasarlamış ve güç çıktıları kullanarak 4,5 ve 8,5 m/s rüzgar hızlarında ölçmüştür. Daha sonra, rotor çapı ve kanatların uzunluk ve yarıçapı iki katına çıkartarak sonuçları karşılaştırmıştır. Temel model ile büyütülmüş modeller karşılaştırıldığında ortalama gücün %80 arttığı sonucuna varmıştır [15].



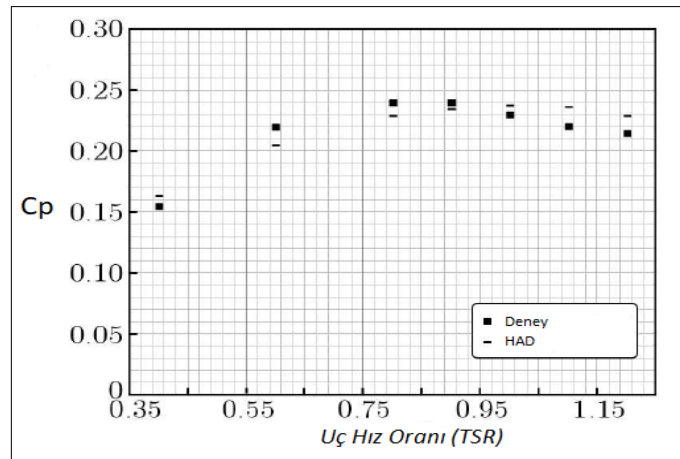
Şekil 2.4. Farklı kanat yapıları için rüzgar hızına bağlı olarak güç değişimi [15].

Wenehenubun ve arkadaşları, kanat sayısının Savonius tipi dikey eksenli rüzgar türbininin performansına etkisini incelemiştir. 2, 3 ve 4 kanatlı modellerin karşılaştırıldığı bu çalışmada üç kanatlı Savonius tipi dikey eksenli rüzgar türbininin yüksek uç hız oranında en iyi performansa sahip olduğu sonucuna varmıştır [16].



Şekil 2.5. Farklı kanat sayısına sahip türbinlerin uç hız oranlarına göre güç katsayısı değişimi [16]

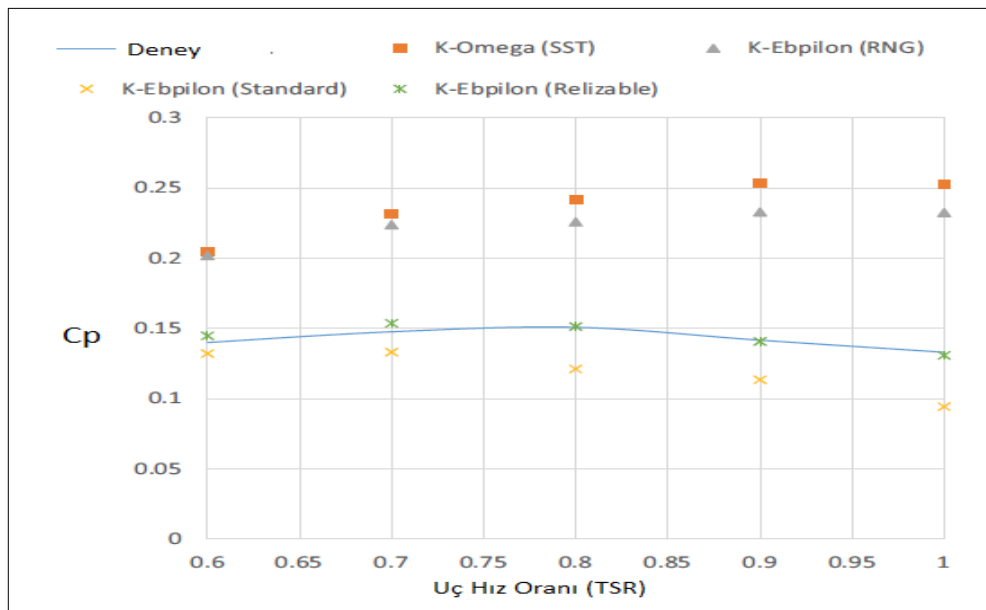
Rogowski ve arkadaşları, iki boyutlu iki kanatlı Savonius türbininin ANSYS Fluent kullanarak (HAD) analizini yapmışlardır. Akışkanlar dinamiğinin hesaplama yöntemleri kullanılarak Savonius türbininin aerodinamik verimliliği incelemiştir. Elde edilen HAD sonuçları deney ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler, iki boyutlu durumda Savonius türbin uygulamaları için tek boyutlu türbülans modeli Spalart-Allmaras ve şişirme katmanları olmayan ağ örgüsünün kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca HAD yöntemlerinin deneysel sonuçları doğruladığını ve Savonius dikey eksenli rüzgar türbini kanatlarının şeklini optimize etmek için kullanılabilirliğini göstermiştir [17].



Şekil 2.6. Uç hız oranına bağlı olarak güç katsayısı değişiminin deneysel ve HAD karşılaştırması[17]

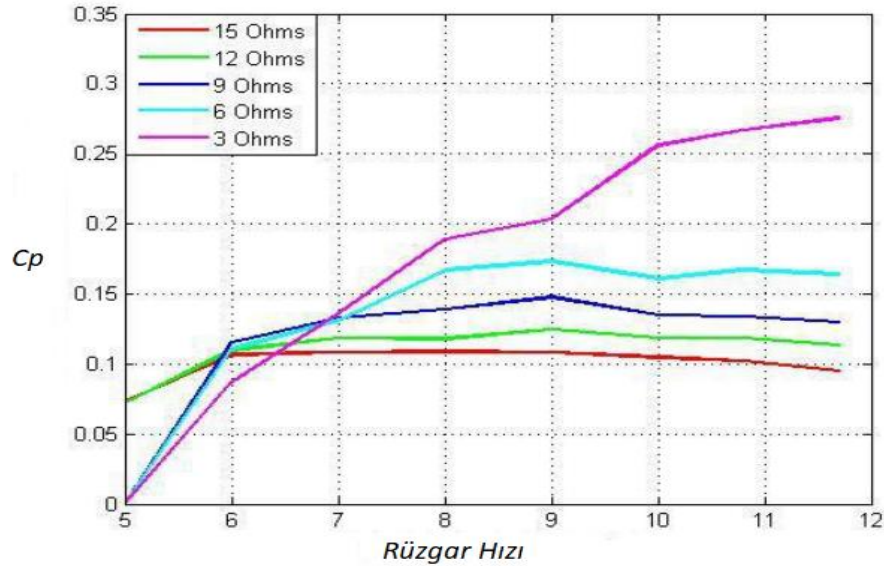
Naseem ve arkadaşları H rotorlu dikey eksenli bir rüzgar türbininin performansı kentsel bir ortamda incelemiştir. Çalışma, kentsel senaryoların aşağı akım bölgesinde rüzgar türbininin konumu değiştirerek gerçekleştirmiştir. Tek bina ve yan yana iki bina olarak iki senaryo düşünüp rüzgar akışının özelliklerini bu iki senaryo üzerinden analiz etmiştir. Bu senaryolarda binaların deflektör görevi görüp rüzgar türbininin gücünü arttırdığı gözlemlenmiştir. İz bölgesi yakınındaki binalardan saptırılan rüzgarın yüksek hıza sahip olduğunu ve rüzgar hızının tek bina ve yan yana iki bina olması durumunda serbest rüzgar hızından sırasıyla %12 ve %25 daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Rüzgarın sahip olduğu güç, yukarı akış hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan yola çıkarak bu yüksek hızlı rüzgarın, türbinin momentini ve güç çıkışını arttırdığı sonucuna ulaşmıştır [18].

Saeed ve arkadaşları güç verimliliğini artırmaya yönelik kanat şeklindeki klasik Savonius rüzgar türbinleri için birçok modifikasyon çalışmıştır. Sunulan çalışmada dört rotor kanadı modifikasyonu incelemiştir. Ayrıca shaft etkisini, bindirme oranını ve kanat sayısının performansa etkisini incelemişlerdir. Uygun modellerin belirlenmesi için dört türbülans modeli kullanılarak iki boyutlu HAD simülasyonu deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Güç verimliliği sonuçları, k-e realizable türbülans modelinin diğer modellerle karşılaştırıldığında daha doğru oldukları sonucuna varmıştır. Bu çalışmada yapmış olduğu yeni kanat tasarımı, kullanılan diğer modifikasyonlardan daha iyi performans göstermiştir [19].



Şekil 2.7. Savonius rüzgar türbininin deney ve farklı türbülans modellerindeki HAD karşılaştırması [19]

Nishioka ve arkadaşları Lenz tipi rüzgar türbinleri (VAWT) üzerine kavramsal bir çalışma yapmışlardır. Daha sonra küçük boyutlu dikey eksenli bir rüzgar türbininin tasarımı ve yapımı gerçekleştirmişlerdir. Rüzgar tüneli kullanılarak yapılan laboratuvar testlerinde, rüzgar türbini için mekanik güç ve güç katsayısı için önemli sonuçlar elde etmişlerdir. Devir 420 rpm ve direnç 3 ohm'a eşit olduğunda 73 Watt'lık mekanik güçteki zirveye ulaştığını ve bu noktada mekanik verimin yaklaşık %28 olan maksimum değere ulaştığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca rüzgar türbininin çalışmasının 11 m/s civarındaki rüzgar hızlarına kadar güvenli olduğunu gözlemlemişlerdir. Rulmanlarda ve elektrik jeneratöründe bazı kayıplara rağmen, Lenz tipi rüzgar türbini, Brezilya'nın kırsal kesimlerinde, çiftlikler ve hatta küçük kentsel merkezler gibi düşük rüzgarlı alanlarda kullanım potansiyeli gösterdiği sonucunu çıkartmışlardır [13].



Şekil 2.8. Farklı dirençlerde Lenz tipi rüzgar türbinlerinin rüzgar hızına bağlı güç katsayısı değişimi [13]

Gohil ve arkadaşları Lenz tipi DERT için tasarım prosedürü sunmuşlardır. Lenz 2 tipinde DERT tasarlamış ve 4 m/s rüzgar hızında Betz teorisine göre her türlü rüzgar türbininden elde edilebilecek maksimum gücü %59,29 olarak matematiksel olarak hesaplamış ve 8,37 W sonucuna ulaşmıştır. Herhangi bir deneysel çalışma bulamadığı için verimi Savonius (%30) ve Darrieus (%40) DERT'lerin verimlerinin ortalaması olarak %35 almıştır. Bu durumda elde ettiği maksimum gücü 2,93 W olarak bulmuştur [20].



Şekil 2.9. Gohil ve arkadaşlarının tasarlayıp ürettikleri Lenz tipi DERT

Karhadkar ve arkadaşları üç adet yenilikçi üç kanatlı dikey eksenli rüzgâr türbini tasarımını SolidWorks'te modellemiş ve ANSYS Fluent programında HAD analizi yapmıştır. Her bir profil için sürüklenme katsayılarını, sürüklenme kuvvetlerini hesaplamış ve basınç dağılım konturlarını göstermiştir. Basıncın, tüm kanatlar için hücum kenarında maksimum, arka kenarda minimum olduğunu tespit etmiştir. Lenz2 profilinin, test edilen üç profil arasında maksimum sürüklenme kuvveti (11.2 Newton) ürettiği sonucuna varmış ve kentsel alanlardaki kurulumlar için Lenz2 DERT'lerin en iyi seçenek olduğu sonucunu çıkartmıştır [21].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada dikey eksenli rüzgar türbini için çeşitli parametreler ile kanat tasarımları gerçekleştirilmiş ve bu kanat tasarımları Ansys Fluent yazılımı HAD yöntemi ile sayısal olarak analiz edilerek optimum kanat tipi tespit edilmesi hedeflenmiştir. Tasarlanan kanat tipleri z eksenine boyunca değişmediği için akış iki boyutlu olarak kabul edilmiştir. Kanat profili olarak literatürde bahsedilen Lenz tipi kanat profili seçilerek çeşitli parametrelerde iyileştirmeler yapılmış ve yeni kanat profilleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kanat profillerinin HAD yöntemi ile çözülebilmesi için belli parametreler verilerek bir hesaplama bölgesi oluşturulmuştur. Bu bölge üzerinde ağ (mesh) yapıları oluşturulmuş ve elde edilen sonuçların ağdan bağımsız olması için bir kanat profili üzerinde analizler yapıp sonuçlar karşılaştırılmış ve optimum ağ yapısı belirlenmiştir. Sınır şartları yazılıma tanımlanarak analizlere başlanmıştır.

3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi

HAD Yöntemi akışkanların çeşitli şartlar altında analizini yapmak için kullanılan bir yöntemdir. Günümüzde hem sanayi hem de akademi tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. HAD yöntemi akışkanlar dinamiğindeki ana eşitliklerin çözümüne dayanır [22]. Bu yöntem kütle ve momentum korunum denklemlerini çözerek geometriye ve sınır şartlarına göre analiz yapar. Analizden elde edilen sayısal çözümlerin sonunda hız, basınç, sıcaklık ve moment gibi birçok veriye ulaşılır.

Akışkanların olduğu her uygulama ve araştırmada problemlerin çözümünde büyük katkı sağlayan HAD yazılımları istenen deney ortamını sanal ortama simüle ederek analizleri gerçekleştirir. HAD yazılımlarının en büyük avantajı bu analizlerin istenen şartlara ve parçaya göre herhangi ekstra bir ücret ödmeden kolaylıkla tekrarlanabiliyor ve değiştirilebiliyor olmasıdır.

3.2. Temel Denklemler

Bu tez kapsamında kullanılan ANSYS Fluent yazılımı, analizi yapılmak istenen akışkanlar dinamiği problemlerini, kütle ve momentum korunumu kanunlarının matematiksel ifadesi olan ve akışı en iyi şekilde tanımlayan Süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerini çözümlenerek sayısal olarak incelemek için kullanılmıştır. Süreklilik Denklemi kütle korunumunu ifade ederken, momentum denklemi, Newton'un ikinci yasası uyarınca akışkan parçacığı üzerindeki kuvvetleri ve momentumdaki değişim

hızının akışkana etki eden toplam kuvvete eşit olduğunu gösteren momentum korunumunu ifade etmektedir. Isı transferi veya sıkıştırılabilirlik içeren akışlar için termodinamiğin birinci yasası olarak bilinen enerjinin korunumu ilkesine göre akışkan parçacığında meydana gelen enerji değişimini çözümleyip enerjideki değişim hızının akışkana aktarılan ısı ve işin toplamına eşit olduğunu gösteren enerji denklemi de ek olarak çözdürülür.

3.2.1. Kütlein Korunumu Denklemi

Kütlein korunumu denklemi veya süreklilik denklemi en temel haliyle aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.1)$$

Bu denklem kütle korunumu denkleminin genel şeklidir ve sıkıştırılabilir olduğu kadar sıkıştırılamaz akışlar için de geçerlidir. Burada \vec{v} zaman (t) ve konumun (x,y,z) fonksiyonu olan yerel hız bileşenleri (u,v,w) ile tanımlanan hız vektörünü, S_m ise kütle kaynak terimini ifade etmektedir [22].

2B eksenel simetrik geometriler için süreklilik denklemi şu şekilde verilir [22].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (3.2)$$

Eşitlikte; x eksenel koordinat, r radyal koordinat, v_x eksenel hız ve v_r radyal hızdır.

Bu denklem kartezyen koordinat sisteminde ve ($S_m = 0$) koşulu ile aşağıdaki gibi yazılabilir (Tu ve ark. 2018):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

Bu denklem sıkıştırılamaz bir akış için ise aşağıdaki gibi yazılabilir [23].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

3.2.2. Momentum Korunum Denklemi

Momentumun korunumu denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.5)$$

Eşitlikte; p statik basıncı, $\bar{\tau}$ gerilme tensörünü, $\rho \vec{g}$ yerçekimsel gövde kuvvetini ve \vec{F} dış gövde kuvvetlerini ifade etmektedir [24].

Gerilme tensörü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.6)$$

Eşitlikte; μ viskoziteyi, I ise birim tensörü ifade etmektedir [24].

Sıkıştırılamaz laminar bir akış için Navier Stokes denklemleri kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi yazılabilir [24]:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.8)$$

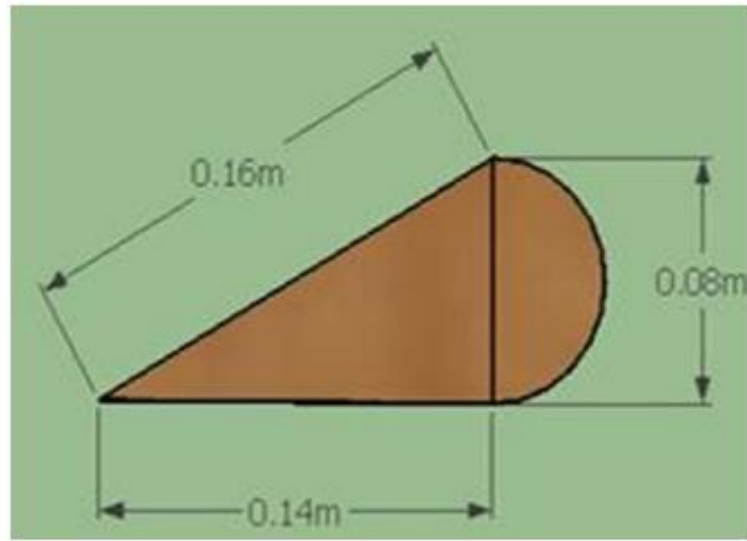
$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.9)$$

3.3. Sayısal Model

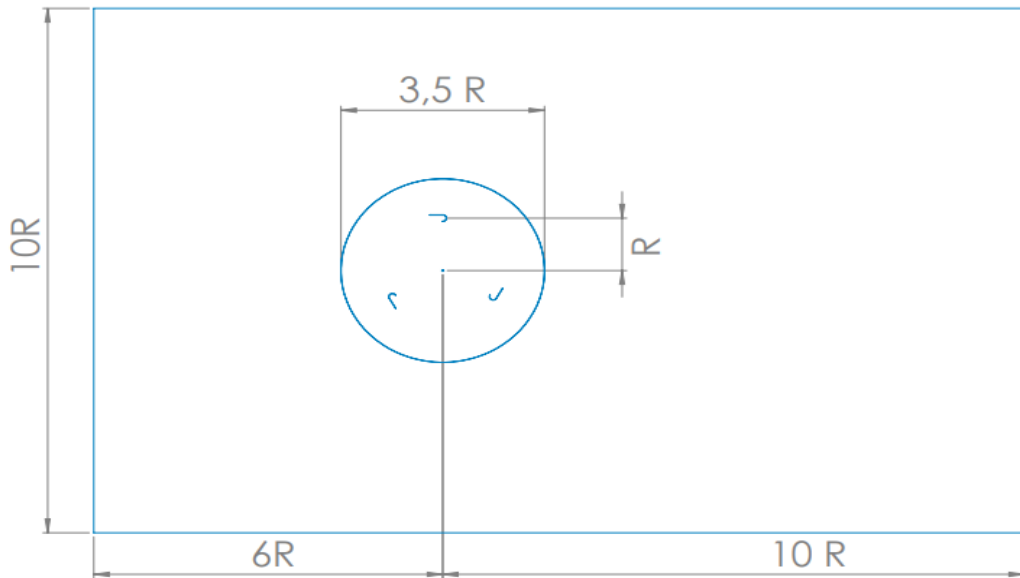
Bu çalışmada dikey eksenli rüzgar türbini için kanat tasarımları gerçekleştirilmiştir. İlk olarak kanat geometrisi ve 2 boyutlu yüzey parametreleri belirlenmiştir. Bir kanat modeli üzerinde ağdan bağımsızlık çalışılarak uygun ağ yapısına karar verilmiştir. Türbülans modeli olarak k-ε Realizable türbülans modeli seçilmiştir. Sınır şartları olarak havanın yoğunluğu uluslararası standart atmosfer şartlarındaki hava yoğunluğu olan 1,225 kg/m³ olarak seçilmiş, rüzgar hızı olarak 7 m/s değeri girilmiştir.

3.3.1. Tasarım Parametreleri

Bu çalışmada referans olarak seçilen Lenz tipi kanat profili için literatürde belirtilen tasarım parametreleri incelenmiş ve Şekil 3.1’de gösterilen değerler referans alınmıştır [25]. Tasarlanan kanat profilinin yarım daire merkezinden rotor yarıçapı olarak belirttiğimiz R değerlerinde 3 kanatlı dikey eksenli rüzgar türbininin 2 boyutlu üstten görünüm profili oluşmuştur. Türbin merkezine çözümdeki doğruluğu arttırmak için 20mm çapında bir mil eklenmiştir. Hesaplama bölgesinin oluşturulması için merkezden Şekil 3.2.’de gösterildiği gibi 3,5R çapında dönele bir bölge ve 10R genişliğinde 16R uzunluğunda dikdörtgen sabit bir bölge oluşturulmuştur.



Şekil 3.1. Tasarım parametreleri [25]



Şekil 3.2. Hesaplama bölgesi tasarım parametreleri

3.3.2. Ağ Yapısı

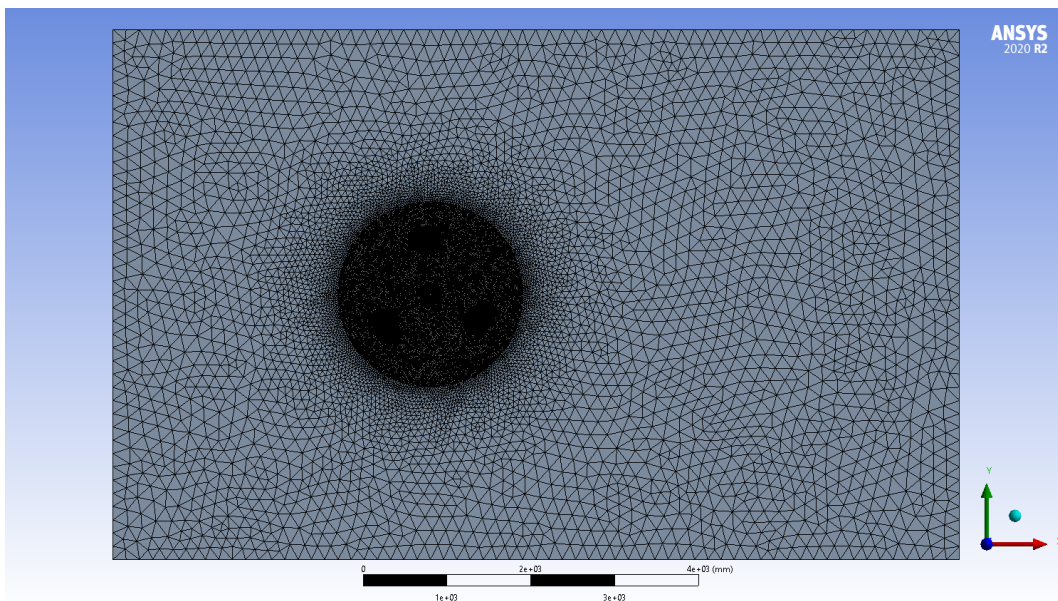
Oluşturulan hesaplama bölgesi için ağ yapıları oluşturulmuş ve ağdan bağımsızlık çalışılarak ideal ağ yapısı belirlenmiştir. Belirlenen ağ yapısında Çizelge 3.1’de verilen değerler aralığında sonuçlar elde edilmiştir. Ağ yapısının kalitesi için Çizelge 3.2’de belirtildiği gibi Orthogonal Quality 0,1 değerinden büyük, Skewness değerinin 0,95 değerinden küçük ve y^+ değerinin 1 değerinden küçük olması önerilmektedir [26]. Belirlenen ideal ağ yapısının değerleri önerilen bu değerleri sağlamaktadır. Ağ yapısının detayları Şekil 3.3’te görüldüğü gibidir.

Çizelge 3.1. Ağ yapısı detayları

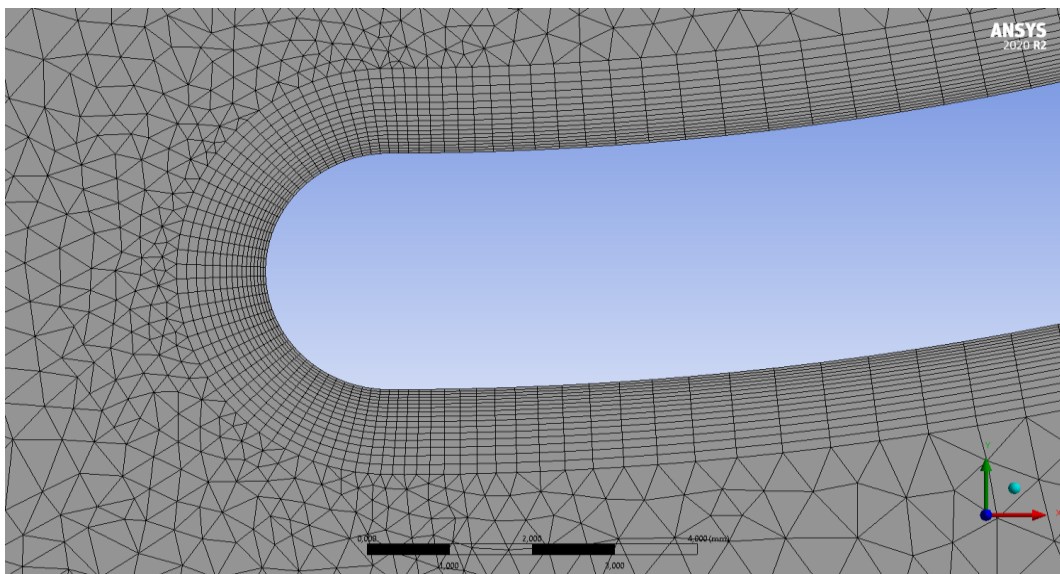
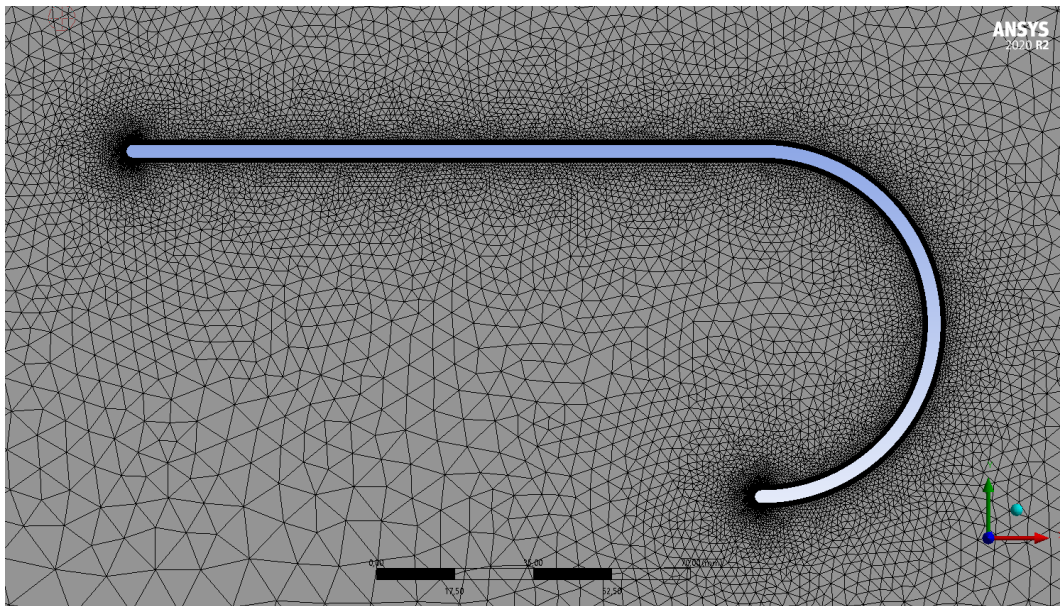
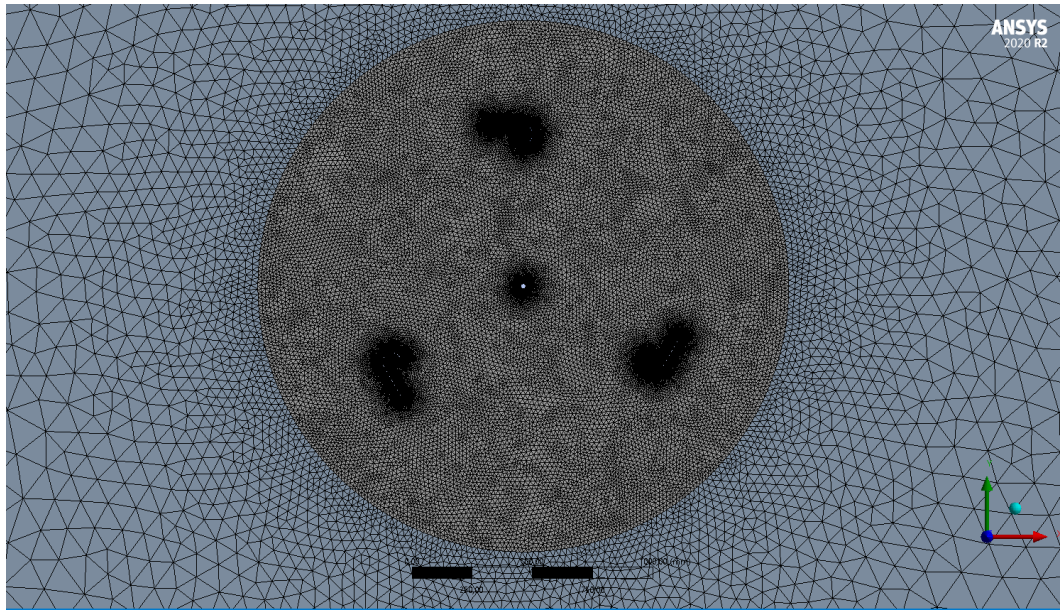
Ağ Yapısı Detayları	Değerler
Ağ Eleman Sayısı	155000-157000
Min. Orthogonal Quality	0,27-0,30
Maks. Skewness	0,63-0,72
y^+	0,22-0,23

Çizelge 3.2. Ansys Fluent Ağ Kalitesi

Değer İsmi	Mükemmel	Çok İyi	İyi	Kabul Edilebilir	Kötü	Kabul Edilemez
Skewness (Çarpıklık)	0- 0,25	0,25-0,50	0,50-0,80	0,80-0,94	0,94-0,97	0,98-1
Orthogonal Quality (Diklik)	1-0,95	0,95-0,70	0,69-0,20	0,20-0,15	0,14-0,001	0,001-0



Şekil 3.3. Ağ yapısının detayları



Şekil 3.3. Ağ yapısının detayları (Devamı)

3.3.3. Türbülans Modeli

Bu çalışma için Spalart-Allmaras, k- ε Realizable ve k- ω SST olmak üzere üç türbülans modelleri incelenmiştir. Tasarlanan geometri ve ağ yapısına bağlı olarak Spalart-Allmaras ve k- ω SST türbülans modellerinin çözümlenmesinde birçok hata ile karşılaşılması ve çözümlere ulaşamamıştır. Geometri ve ağ yapısına bağlı olarak k- ε Realizable türbülans modelinin daha uygun olduğu görülerek bu türbülans modeli seçilmiştir.

k- ε Realizable türbülans modeli iki denklemlilik bir model olup akademik ve ticari birçok uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir. Bu türbülans modeli, türbülanslı akışın dinamiğine ve uygun çeşitli parametreler içermektedir. Yapılan çalışmalarda akış ayrılmalı ve karmaşık akış özelliklerine sahip akış problemlerinde k- ε Realizable türbülans modelinin diğer tüm k- ε modellerinden daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu türbülans modeline ait iki denklem aşağıdaki gibi yazılabilir [24].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} - \\ &C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (3.11)$$

Eşitlikte; P_k ortalama hız gradyanlarından dolayı meydana gelen türbülans kinetik enerjinin üretimini, P_b kaldırma kuvvetinden dolayı meydana gelen türbülans kinetik enerjinin üretimini, Y_M sıkıştırılabilir türbülanstaki kararsız genişlemenin dissipasyon oranına katkısını göstermektedir. $C_{1\varepsilon}$ ve C_2 sabitleri σ_k ve σ_ε sırasıyla k ve ε için türbülanslı Prandtl sayılarıdır. S_k ve S_ε kullanıcı tanımlı kaynak terimlerdir [24].

3.3.4. Sınır Şartları

HAD yöntemi ile bir akış probleminin çözülebilmesi için sınır şartlarının tanımlanması gerekir. Bu çalışmada analiz çözümleri zamana bağlı (Transient) olarak yapılmıştır.

Akışkan malzemesi hava olan dikey eksenli rüzgar türbini kanat analizinin yapılması için havanın giriş hızı 7 m/s, basıncı atmosfer basıncı olarak 100 kPa,

yoğunluğu standart atmosfer şartlarındaki hava yoğunluğu olan $1,225 \text{ kg/m}^3$, viskozite $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ ve sıcaklık ise 288K olarak tanımlanmıştır.

Hesaplama bölgesi 2 bölgeden oluşmaktadır. Birisi rüzgar türbininin profilini içinde barındıran dönel alan, diğeri ise analizi sınırlandırdığımız sabit alandır. Sabit alanın sol tarafı rüzgarın giriş, sağ tarafı ise çıkış noktasıdır. Alt ve üst duvarlar simetri olarak seçilmiştir. Dönel alan hareketli ağ olarak seçilmiş ve 1° 'lik bir duyarlılıkta dönme hızı tanımlanmış her 1° açı için değerler kaydedilmiştir. Rotorun bulunduğu dönel alan ile dışındaki sabit alanın etkileşimini sağlamak için interface tanımlanmıştır.

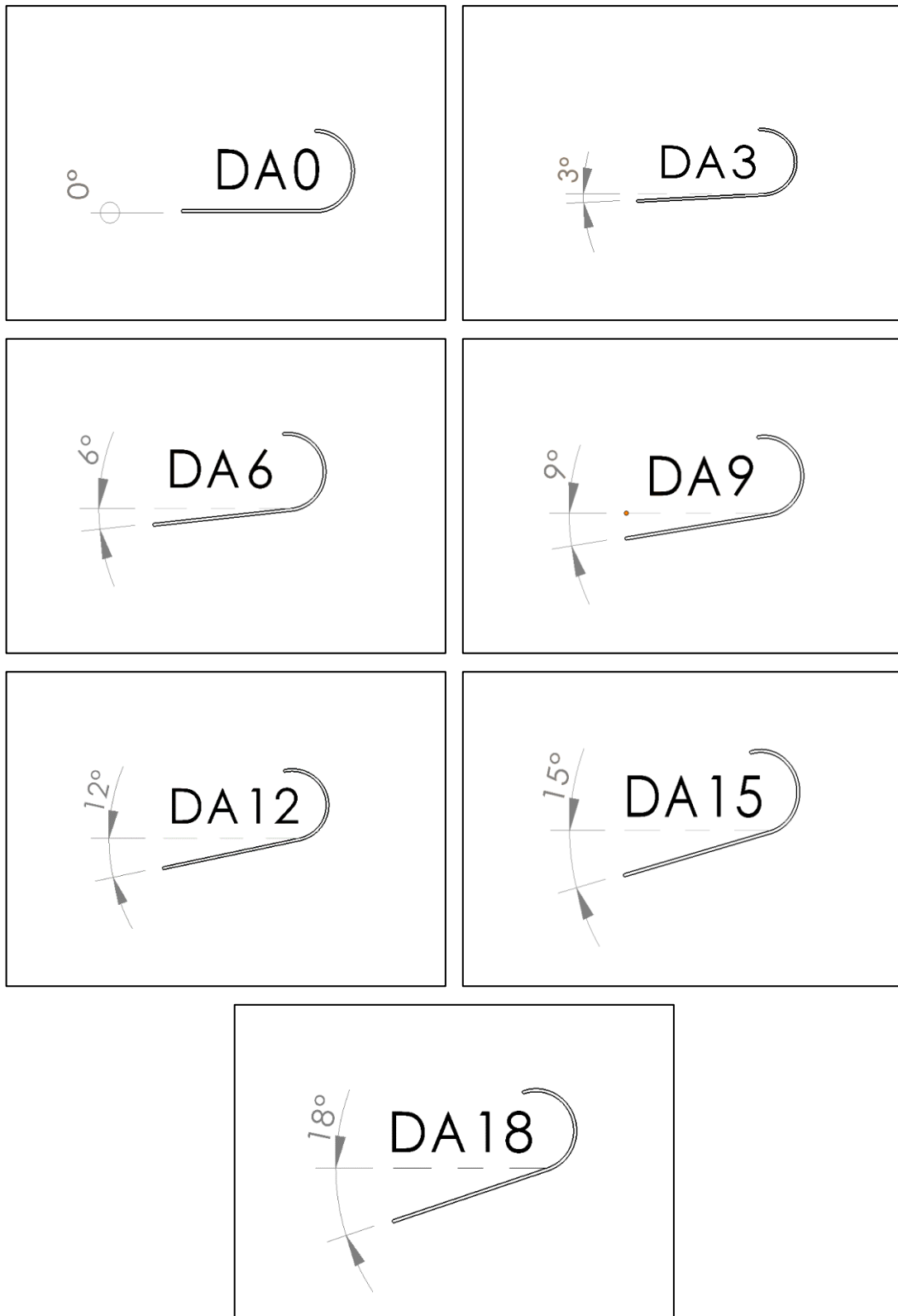
Çözüm metodu olarak Navier – Stokes denklemlerinin çözümünde iyi sonuçlar veren COUPLED algoritması kullanılmıştır. Momentum ve türbülans kinetik enerji denklemlerinin ayrıklaştırılması için ikinci mertebeden upwind metodu tercih edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

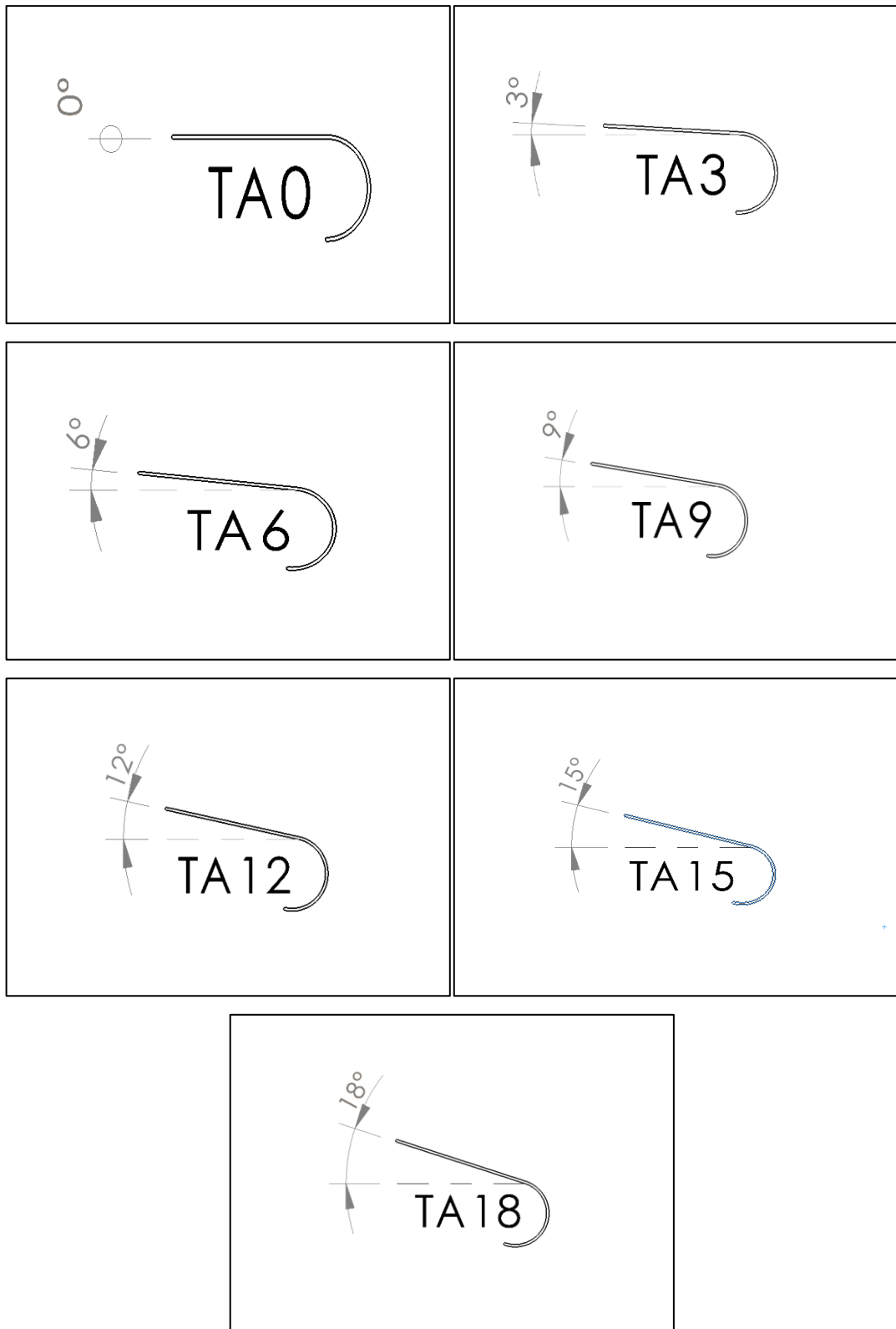
Dikey eksenli rüzgar türbinleri için literatürde Lenz Tipi Kanat Profili olarak geçen kanat profili referans alınarak kanat tasarımları yapılmış ve yapılan bu tasarımlar HAD yöntemi ile sayısal olarak incelenmiştir. Analizlerin ilk aşamasında ilk hareket için ters etkilerin meydana gelmediği rotor yarıçapının tespit edilmesi için çözümlenmeler yapılmış ve rotor yarıçapı belirlenmiştir. Ardından belirlenen rotor yarıçapında 3°'lik hücum açısı aralıklarında çözümler yapılarak analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde kanat profillerinin analiz sonuçları birer tablo haline getirilerek sonuçlar birbirleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

4.1. Kanat Tasarımı

Referans olarak seçilen Lenz Tipi Kanat Profili, yarım daire ve yarım dairenin alt kenarına teğet olarak uzanan bir kenara sahiptir. Bu çalışmada hem bu profil hem de alt kenara teğet olan kenarın üst kenara alınması ile tasarlanan yeni kanat profili ile birlikte iki farklı kanat profili oluşturulmuştur. Bu iki ana profile kodlar verilerek bir isimlendirme yapılmıştır. Alt kenarı uzun olan profile “DA” kodu verilmiş üst kenarı uzun olan profile ise “TA” kodu verilmiştir. Bu kodların soluna mm cinsinden rotor yarıçapı, sağına ise hücum açısı girilerek kanat profilleri isimlendirilmiştir. R parametresi olarak belirttiğimiz rotor yarıçapı için 420 ile 720 mm arasında 420, 480, 500, 560, 600 ve 720 değerleri seçilmiş daha sonra istenen optimum değere erişmek için bazı değerler arasında ek değerler seçilmiştir. Hücum açısı olarak ise 0° ile 18° arasında 0°, 3°, 6°, 9°, 12°, 15° ve 18° değerleri seçilmiştir. Bu seçimler doğrultusunda kanat ve türbin rotorunun tasarımları yapılmıştır. Şekil 4.1 ve 4.2’de oluşturulan profil ve kod sistemine göre kanat profilleri gösterilmektedir.



Şekil 4.1. DA kanat profilleri



Şekil 4.2. TA kanat profilleri

4.2. Ağdan Bağımsızlık

Bu çalışmadan elde edilecek sonuçların oluşturulan ağ yapısından bağımsız olarak değerlendirilebilmesi için ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışması için kullanılacak kanat profili olarak 600TA9 kanat profili seçilmiştir. 6 farklı ağ yapısında aynı şartlar altında yapılan analizler sonucunda her bir analiz için moment değerleri elde edilmiştir. Elde edilen moment değerlerinin sonucu Şekil 4.3'teki grafikte gösterilmiştir. Bu sonuca göre uygun ağ yapısı olarak son moment değerinin 11,96 Nm elde edildiği ağ yapısı seçilmiştir. Seçilen ağ yapısı için y^+ değeri 0,23, orthogonal quality değeri 0,27 ve skewness değeri ise 0,72 olarak belirlenmiştir.

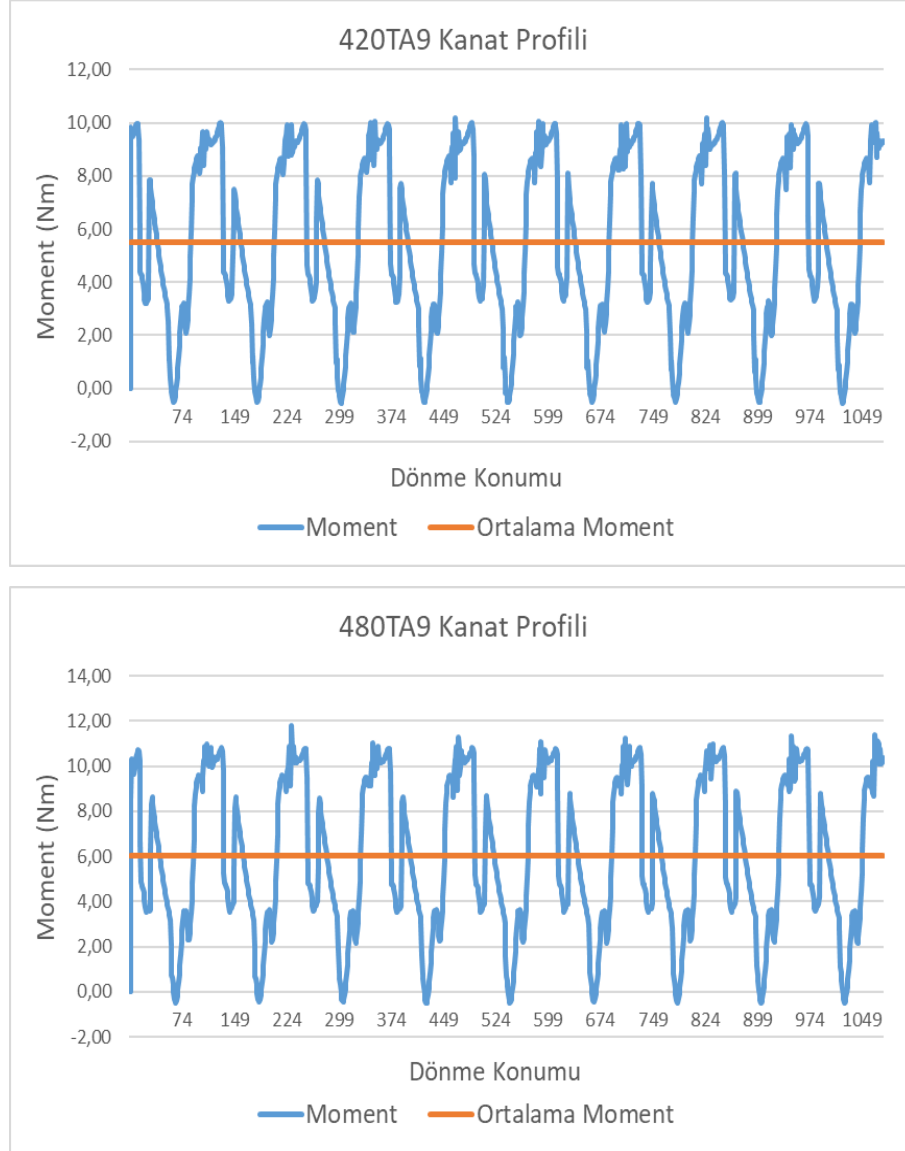


Şekil 4.3. Ağdan bağımsızlık çalışma sonuçları

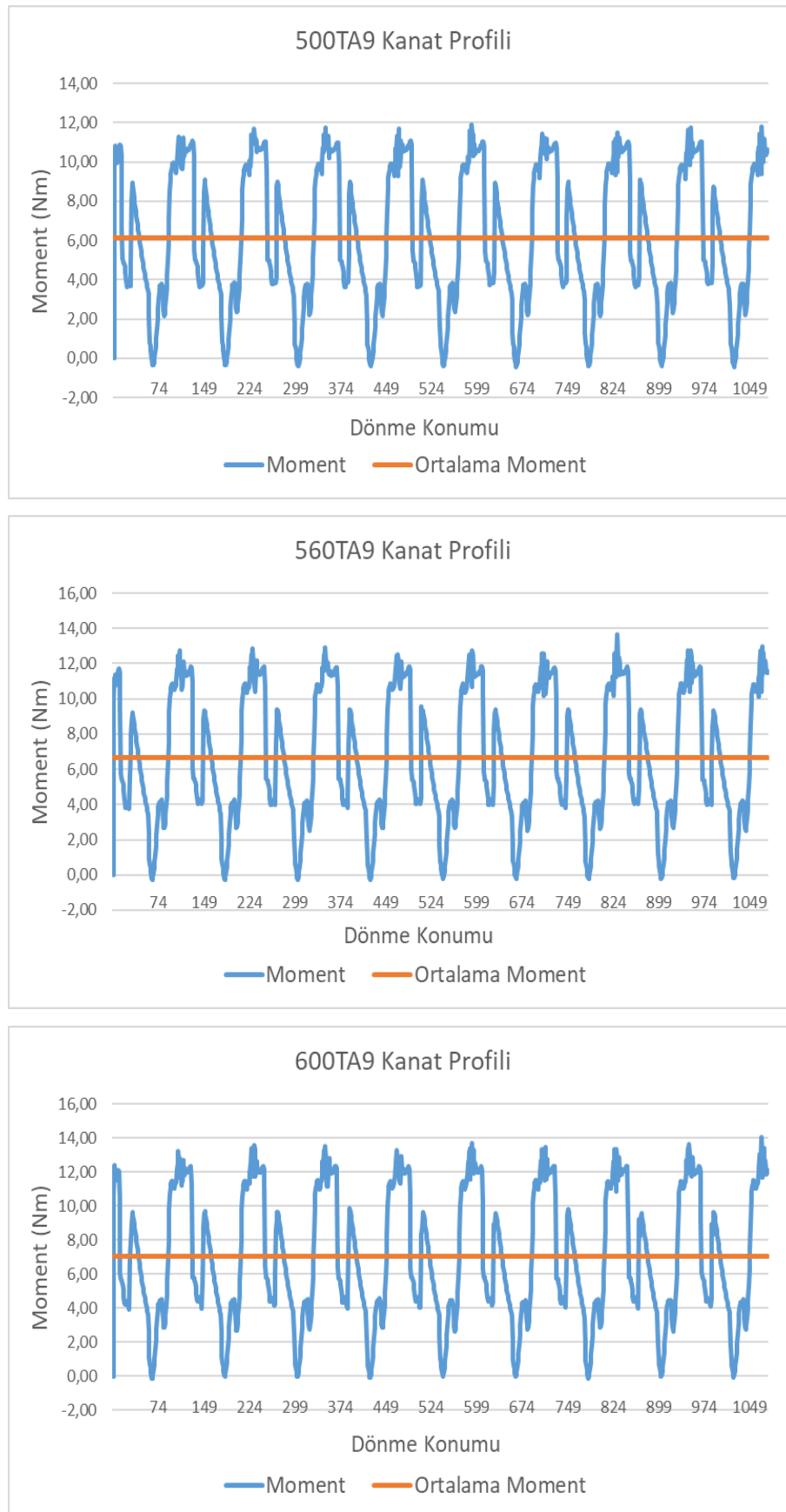
4.3. Rotor Yarıçapının Belirlenmesi

Bu çalışmada analiz çözümleri zamana bağlı olarak 1° duyarlılıkla ve 3 tam tur atacak şekilde yapılmıştır. Buna bağlı olarak rüzgar geliş yönüne göre kanatların birbirleri üzerindeki etkileri söz konusudur. Tasarlanan dikey eksenli rüzgar türbininin ilk hareket kabiliyetine sahip olabilmesi için rüzgar etkisinin kanatların mevcut konumu ve rüzgarın geliş yönü fark etmeksizin harekete geçirici yönde pozitif olması istenmektedir. Bu bağlamda rotor yarıçapının belirlenmesinde TA9 kanat profili seçilerek yapılan çalışmada 420, 480, 500, 560, 600 ve 720 mm değerlerinde analizler yapılmış ve 600 mm'ye kadar ters yönde etkiler mevcutken 720 mm'de ters yönde bir etkiye rastlanmamıştır. 600 mm ve 720 mm arasında optimum rotor yarıçapının tespit edilmesi için sırasıyla 660 mm ve

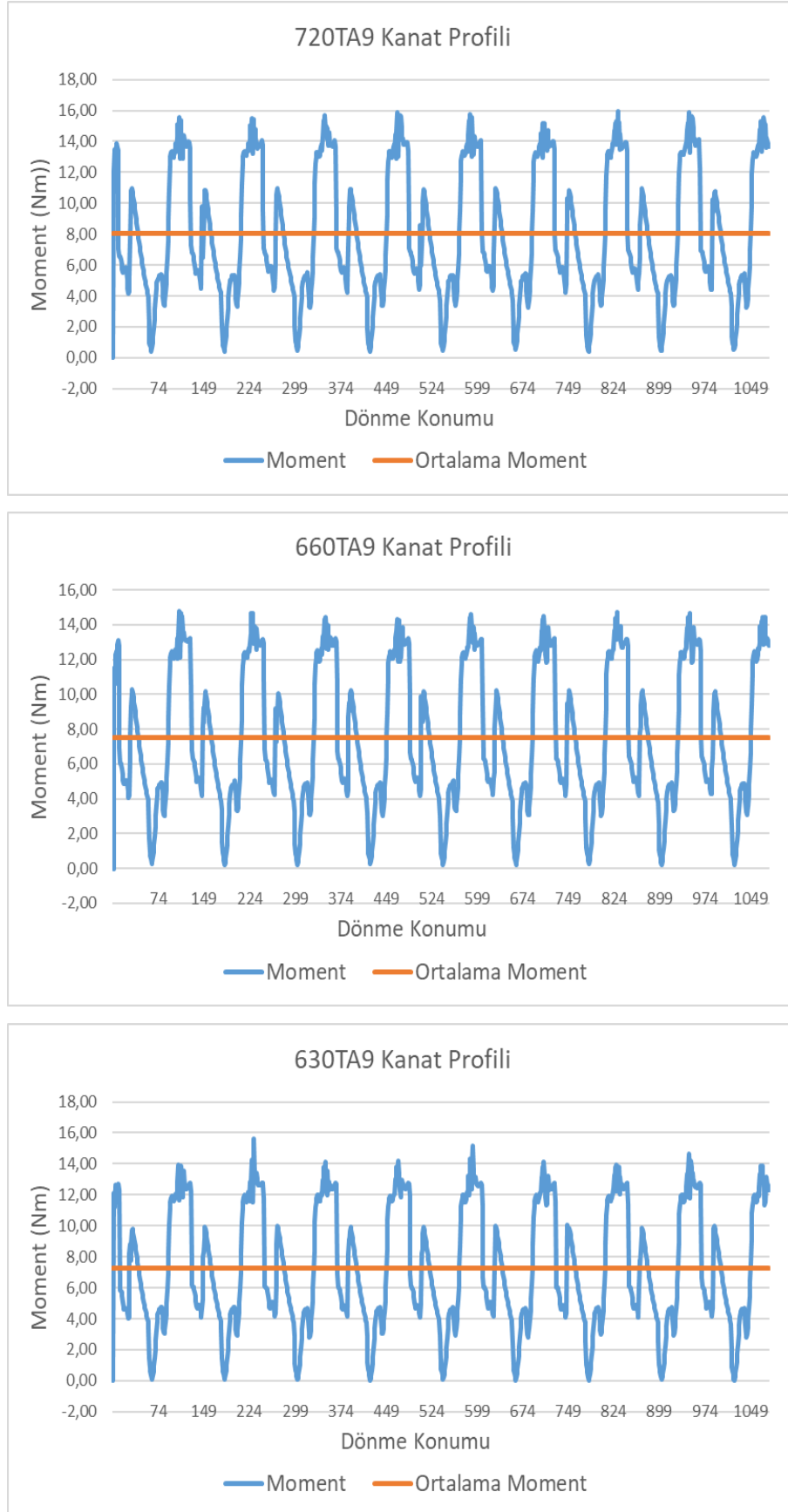
630 mm yarıçap değerlerinde analizler yapılmış ve ters yönde negatif bir etkiye rastlanmamıştır. 630 mm rotor yarıçapındaki analiz çözümlerinde moment değeri 0 Nm'ye çok yakın olduğu için 630 mm'den daha küçük değerler için yeni analizler yapılmasına ihtiyaç duyulmamış ve optimum rotor yarıçapı olarak 630 mm uygun görülmüştür. Yapılan analiz sonuçlarının moment tabloları sırasıyla Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



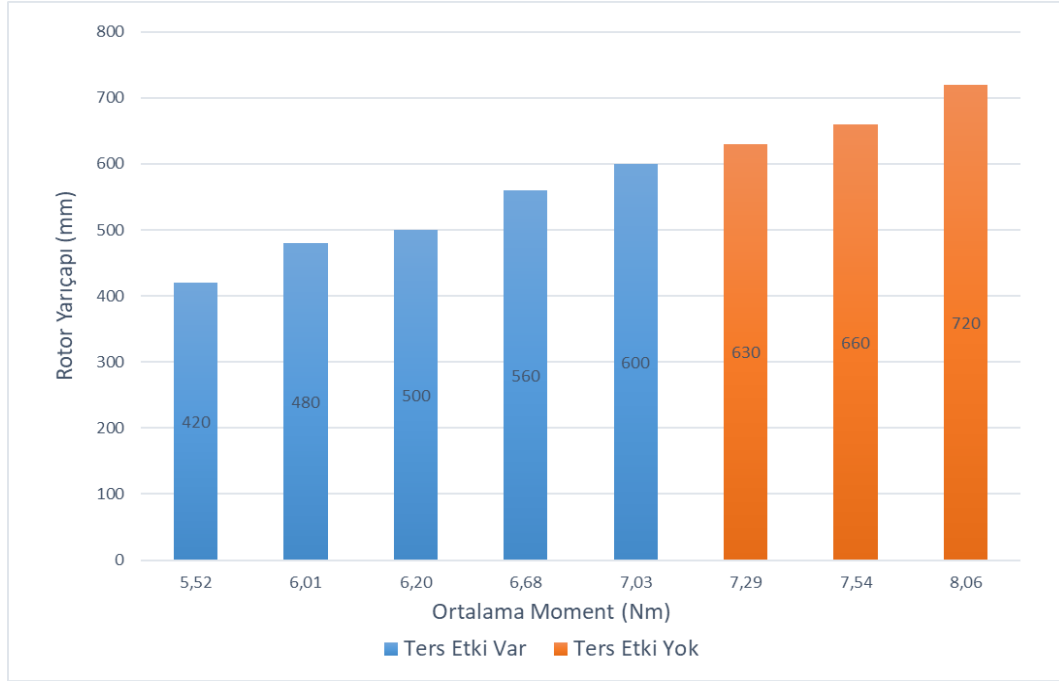
Şekil 4.4. Rotor yarıçapı için analiz sonuçları



Şekil 4.4. Rotor yarıçapı için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.4. Rotor yarıçapı için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.5. Rotor yarıçapı için analiz sonuçlarını değerlendirme grafiği

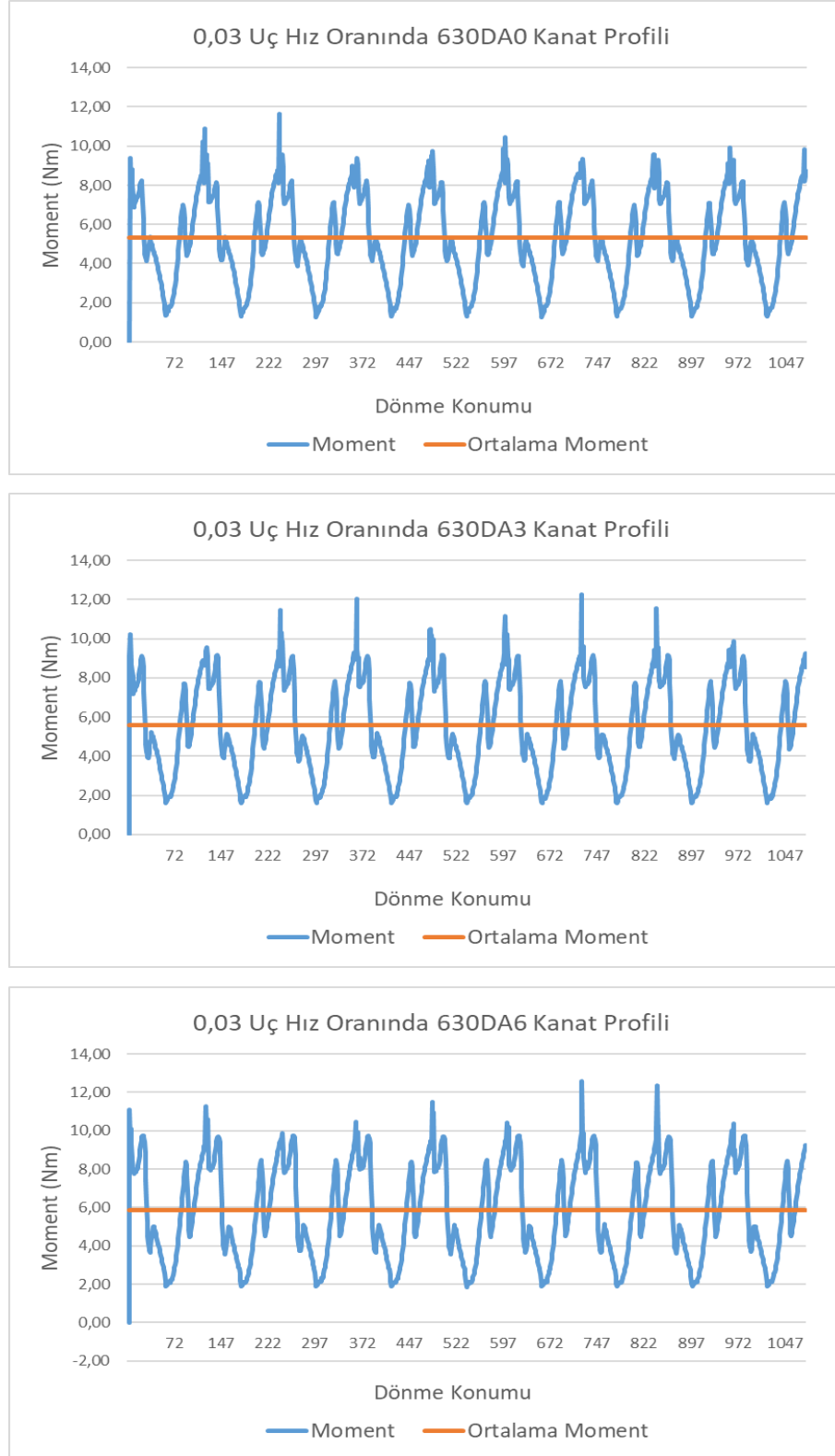
4.4. Farklı Uç Hız Oranlarında Kanat Profillerinin Karşılaştırılması

Optimum ağ yapısı ve rotor yarıçapını belirledikten sonra DA ve TA kanat profilleri için 0,03 – 0,5 uç hız oranları aralığında ve 0°- 18° hücum açısı değerleri arasında toplam 84 analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada kanat profillerini analiz etmiş olduğumuz DERT'lerin kent merkezlerine yakın yerlerde kullanılması amaçlandığından dolayı düşük uç hız oranlarındaki performansları incelenmiştir.

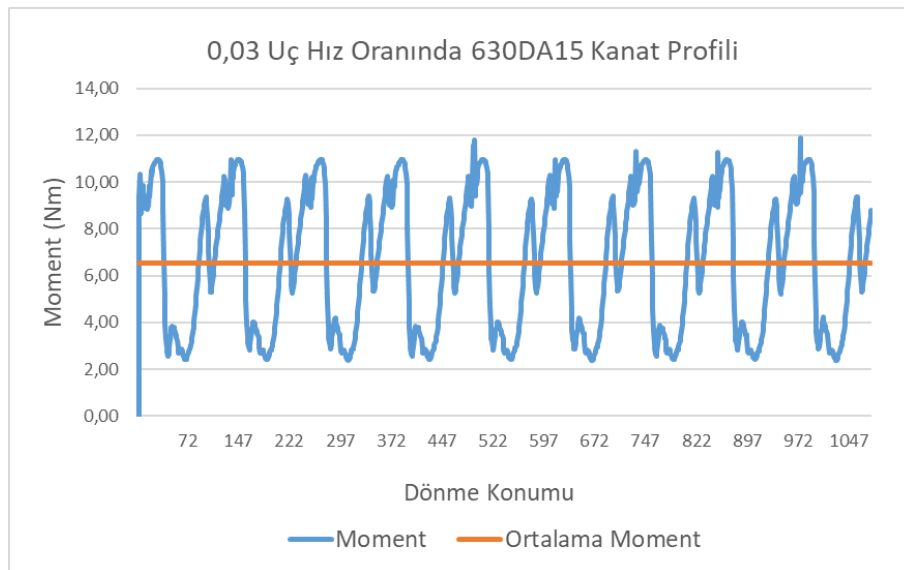
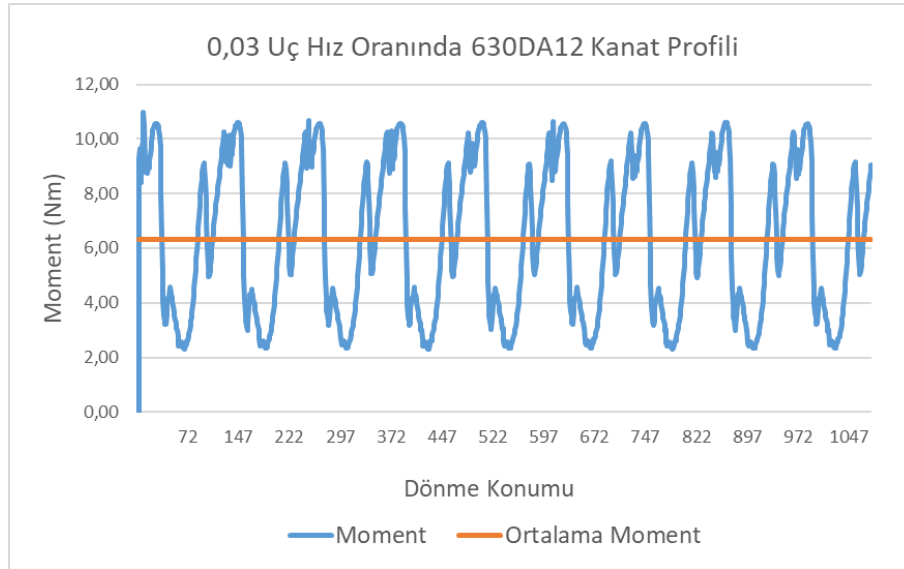
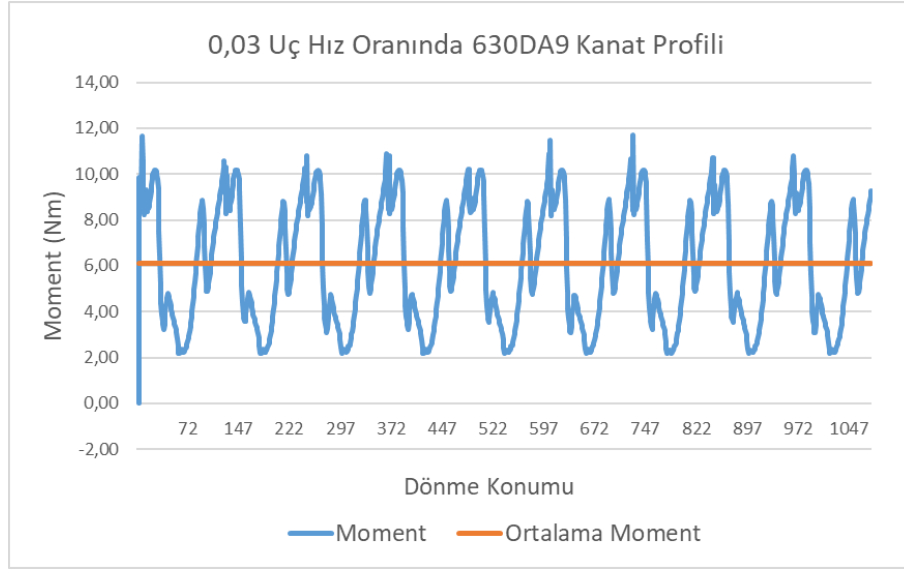
DA ve TA kanat profilleri 0,03 – 0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,5 uç hız oranlarında 0°, 3°, 6°, 9°, 12°, 15° ve 18° hücum açılarında analiz edilmiştir.

4.4.1. 0,03 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması

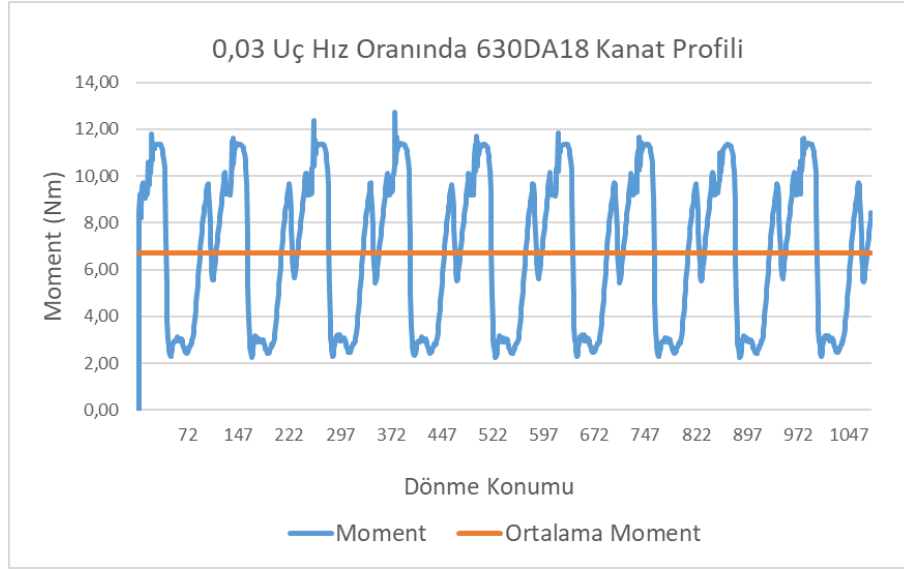
0,03 uç hız oranında DA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. 0,03 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları



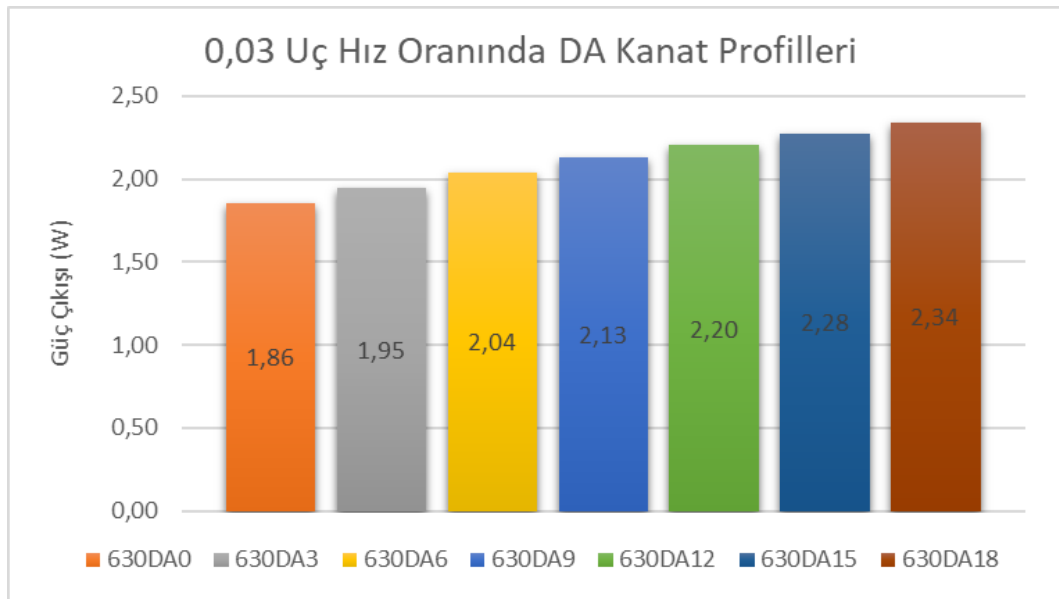
Şekil 4.6. 0,03 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.6. 0,03 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

0,03 uç hız oranında DA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin herhangi bir ters etkiye maruz kalmadığı ve her dönme konumunda ilk hareket kabiliyetine sahip oldukları sonucuna ulaşılmıştır.

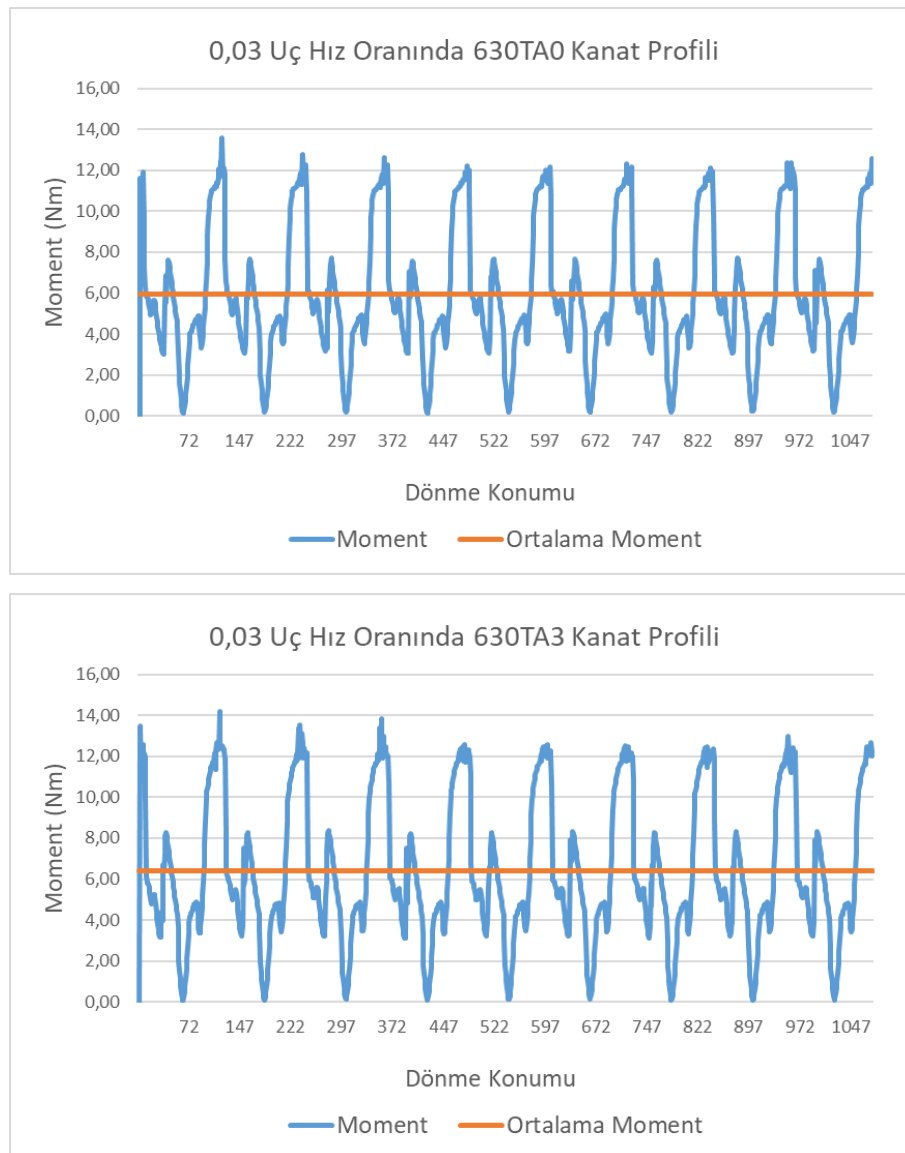
DA kanat profile sahip türbinlerin 0,03 uç hız oranında dönme konumunun 60° , 180° ve $300^\circ \pm 5^\circ$ olduğu yerlerde en düşük moment değerlerine 120° , 240° ve $360^\circ \pm 5^\circ$ olduğu yerlerde ise en yüksek moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



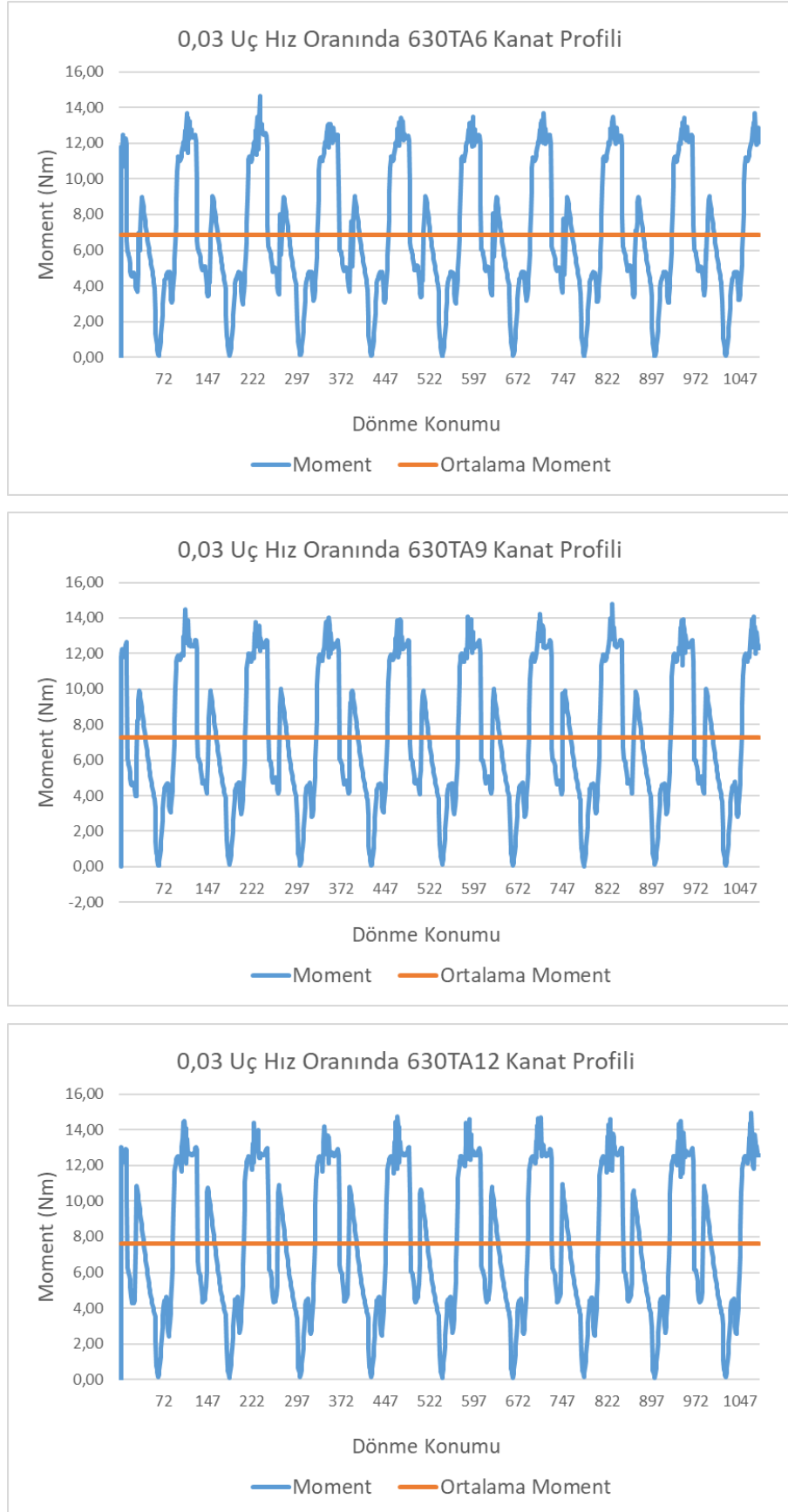
Şekil 4.7. 0,03 uç hız oranında DA kanat profillerinin karşılaştırması

0,03 uç hız oranında DA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısının artışına paralel olarak elde edilen gücün arttığı tespit edilmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.7 'de verilmiştir. 0,03 uç hız oranında 630DA0 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 1,86 W ile en düşük seviyesinde iken 630DA18 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 2,34 W ile en yüksek seviyesindedir.

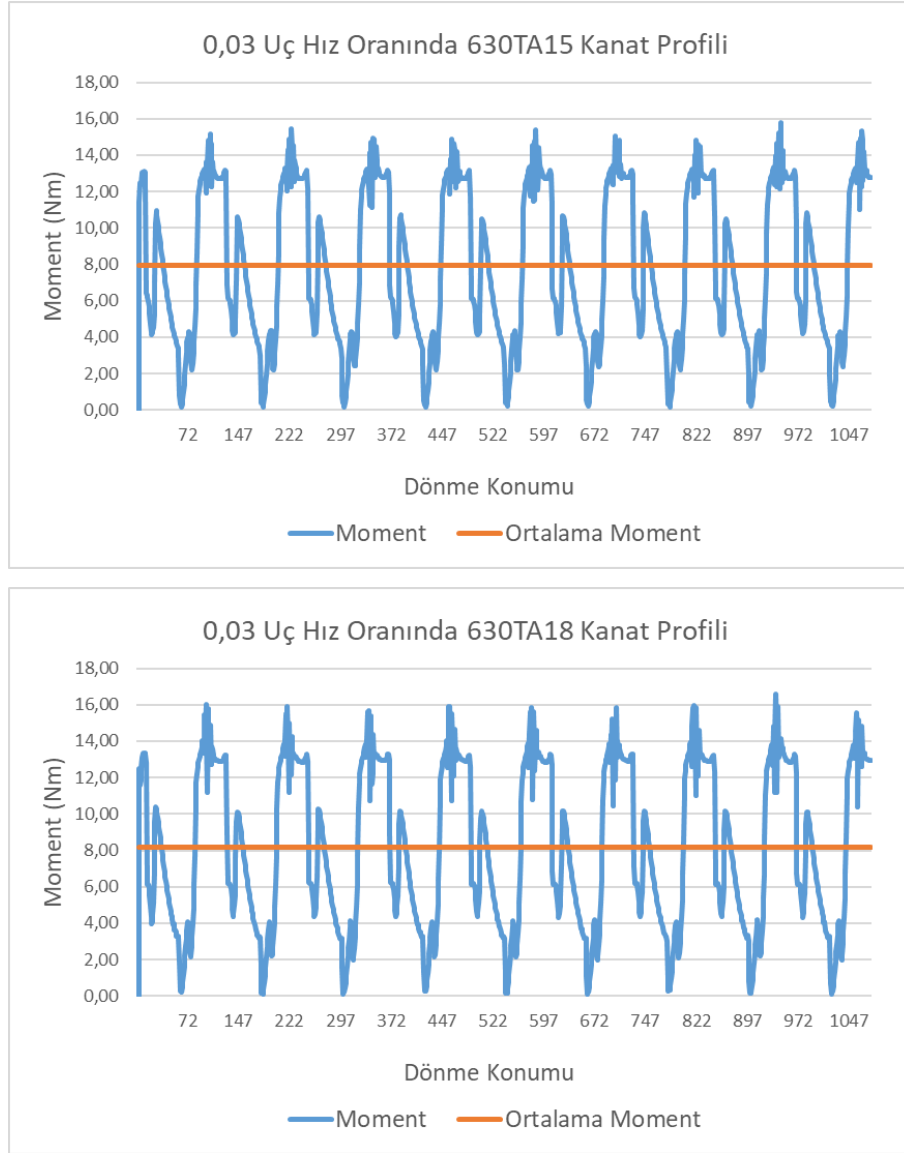
0,03 uç hız oranında TA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. 0,03 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları



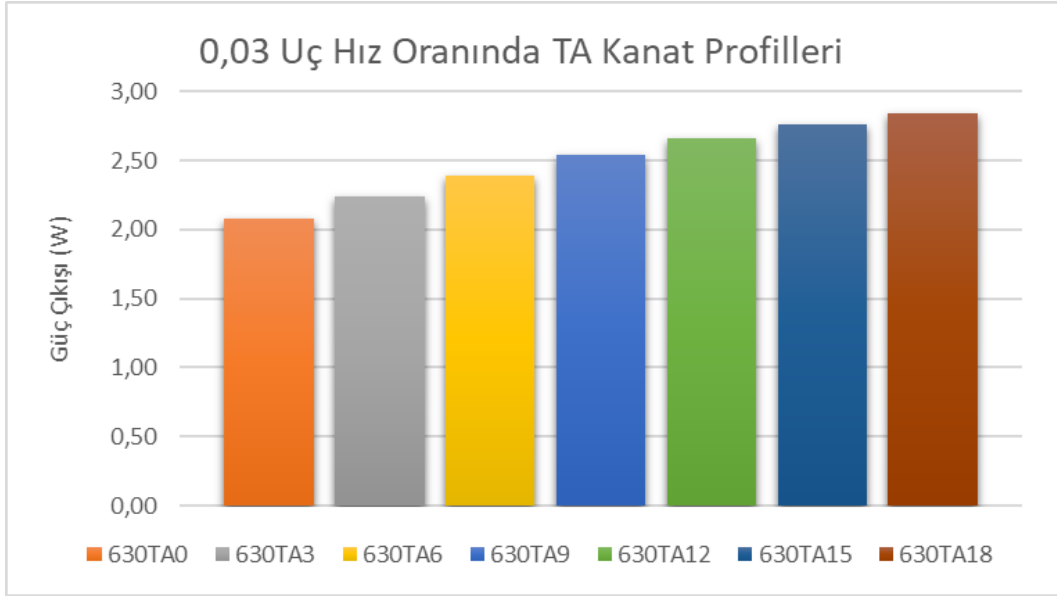
Şekil 4.8. 0,03 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.8. 0,03 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

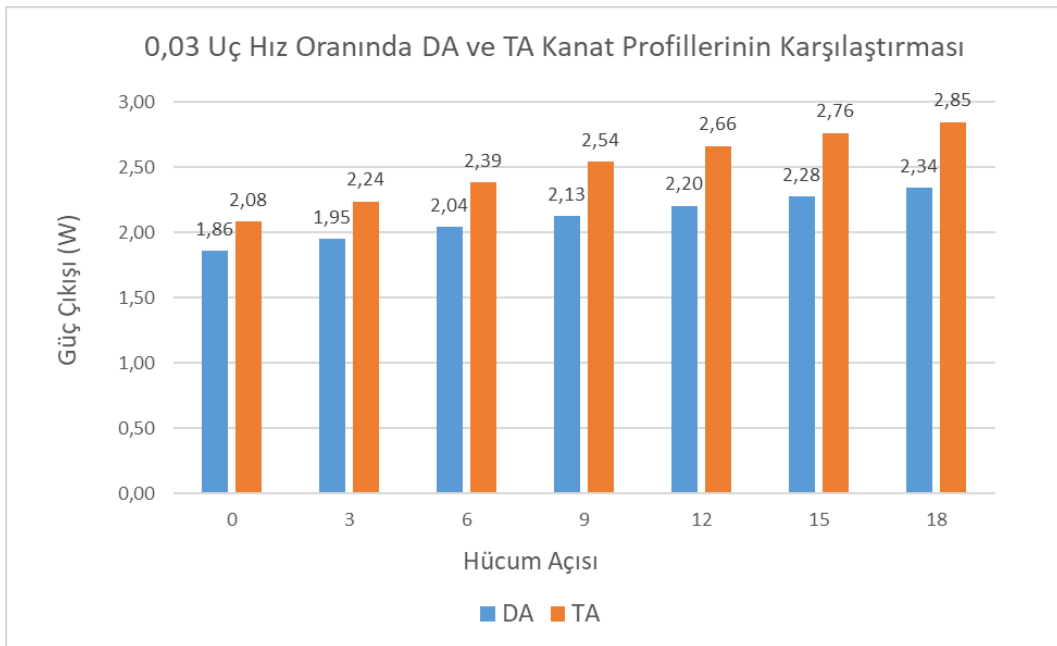
0,03 uç hız oranında TA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin herhangi bir ters etkiye maruz kalmadığı ancak dönme konumunun 60° , 180° ve $300^\circ \pm 5^\circ$ olduğu yerlerde moment değerleri çok düşük olduğundan dolayı ilk hareket kabiliyetinin çok az olduğu diğer dönme konumlarında ise ilk hareket kabiliyetlerinin daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

DA kanat profillerinde olduğu gibi TA kanat profillerinde de 0,03 uç hız oranında değerinde türbinlerin dönme konumu 60° , 180° ve $300^\circ \pm 5^\circ$ olduğu yerlerde en düşük moment değerlerine 120° , 240° ve $360^\circ \pm 5^\circ$ olduğu yerlerde ise en yüksek moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.9. 0,03 uç hız oranında TA kanat profillerinin karşılaştırması

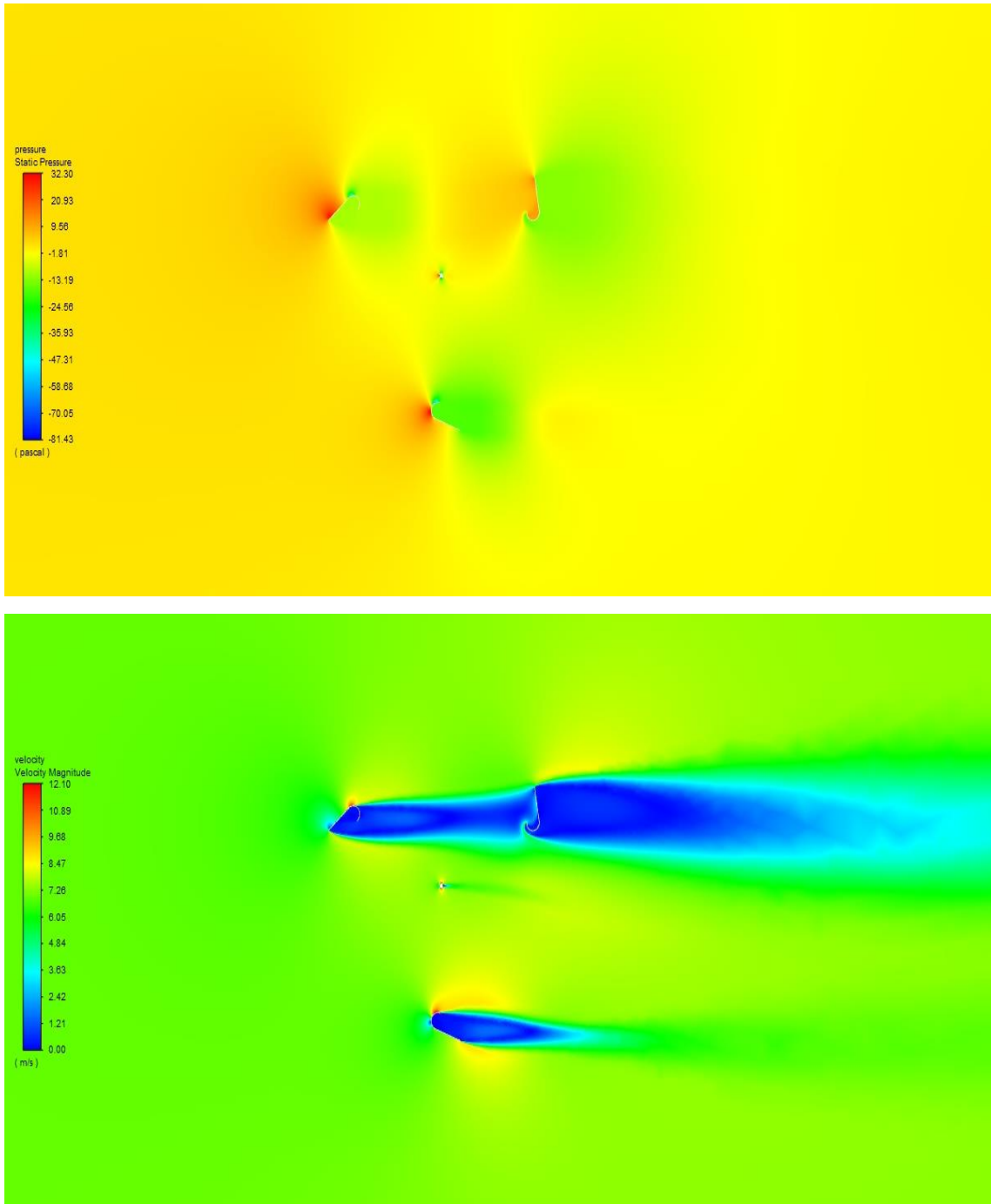
0,03 uç hız oranında TA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısının artışına paralel olarak elde edilen gücün arttığı tespit edilmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.9 ‘da verilmiştir. 0,03 uç hız oranında 630TA0 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 2,08 W ile en düşük seviyesinde iken 630TA18 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 2,85 W ile en yüksek seviyesindedir.



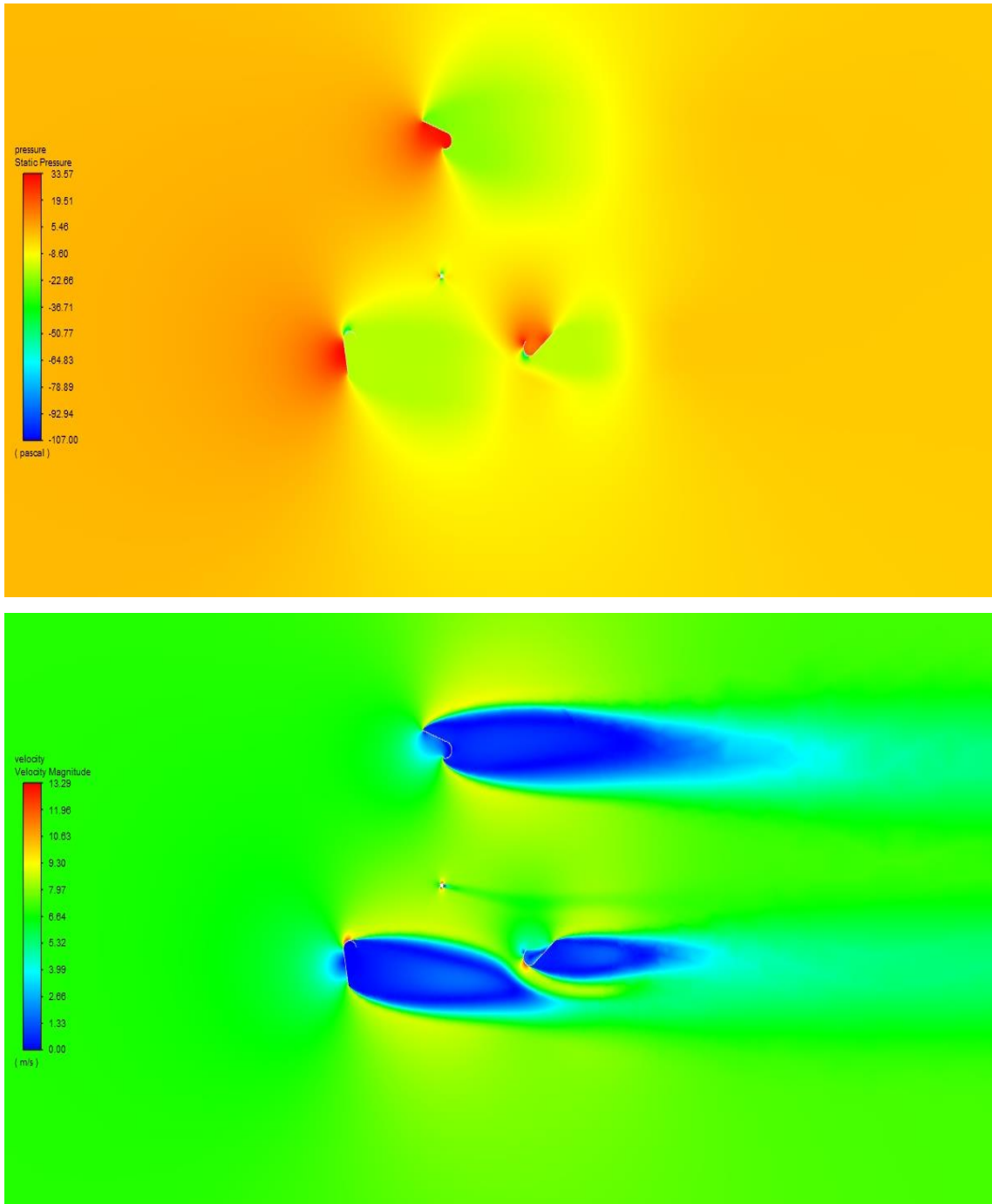
Şekil 4.10. 0,03 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin karşılaştırması

Uç hız oranı 0,03 olan DA ve TA kanat profillerinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarındaki analiz çözümlerinden elde edilen değerler değerlendirildiğinde bu uç hız oranında ve bu çalışma kapsamındaki tüm hücum açılarında TA kanat profili daha iyi performans göstermiştir. Aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %12 ila %21 daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. 0,03 uç hız oranında analizi yapılan kanat profillerinin hiç birisinde ters etki meydana gelmemiştir ve tüm bu kanat profilleri ilk hız kabiliyetine sahiptirler. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar ve değerlendirmeler göz önüne alındığında 0,03 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbini için en uygun kanat profilinin 630TA18 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.

630TA18 kanat profiline sahip olan dikey eksenli rüzgar türbininin 0,03 uç hız oranında yapılan analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde moment değerinin en düşük seviyede olduğu 60° dönme konumundaki ve en yüksek seviyede olduğu 120° dönme konumundaki basınç ve hız konturları sırasıyla Şekil 4.11 'de ve Şekil 4.12 'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde 60° dönme konumundaki momentin düşük olmasının sebebi kanat profillerinin birbirlerini engellemesinden, 120° dönme konumundaki momentin yüksek olmasının sebebi ise kanat profillerinin birbirlerinden bağımsız olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır.



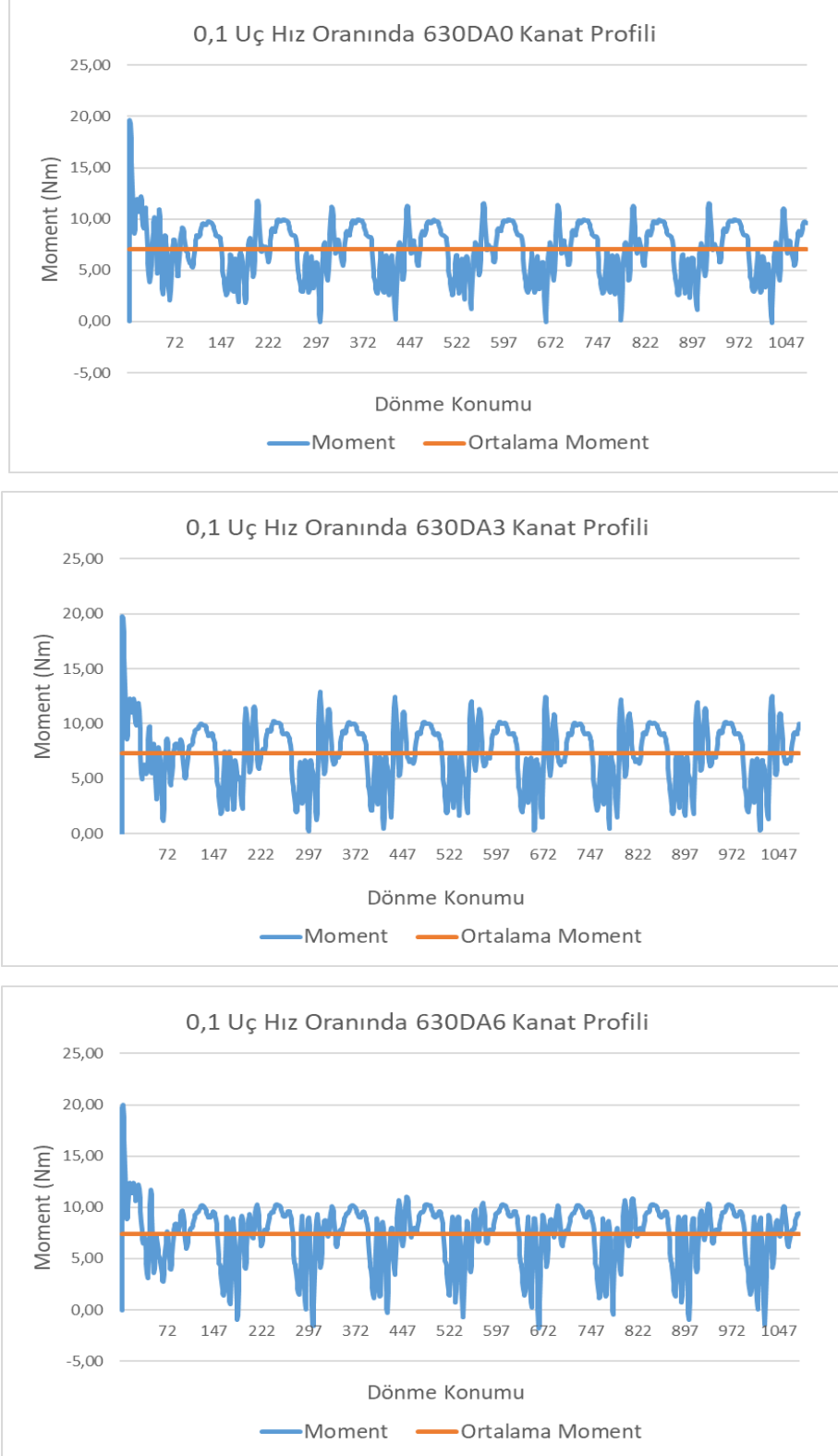
Şekil 4.11. 0,03 uç hız oranında 630TA18'in en düşük güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 60°)



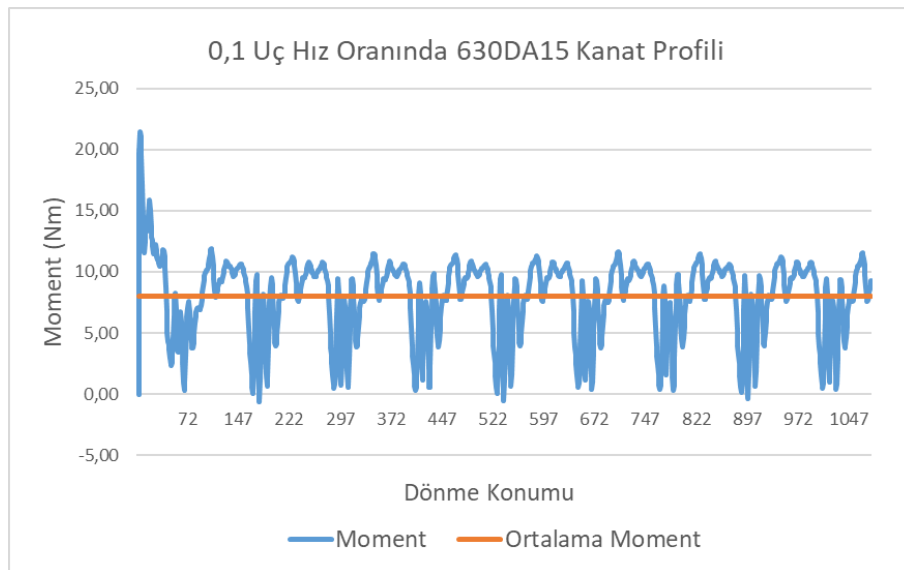
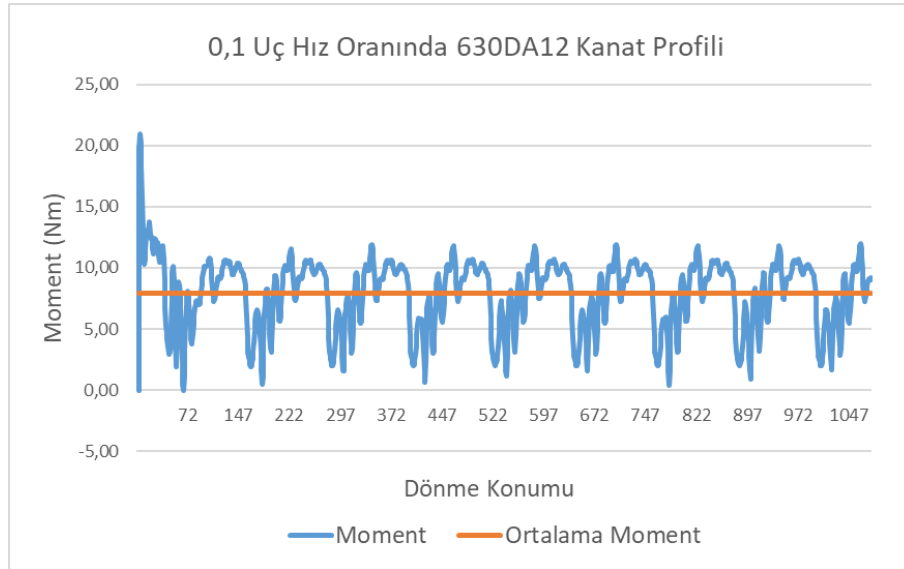
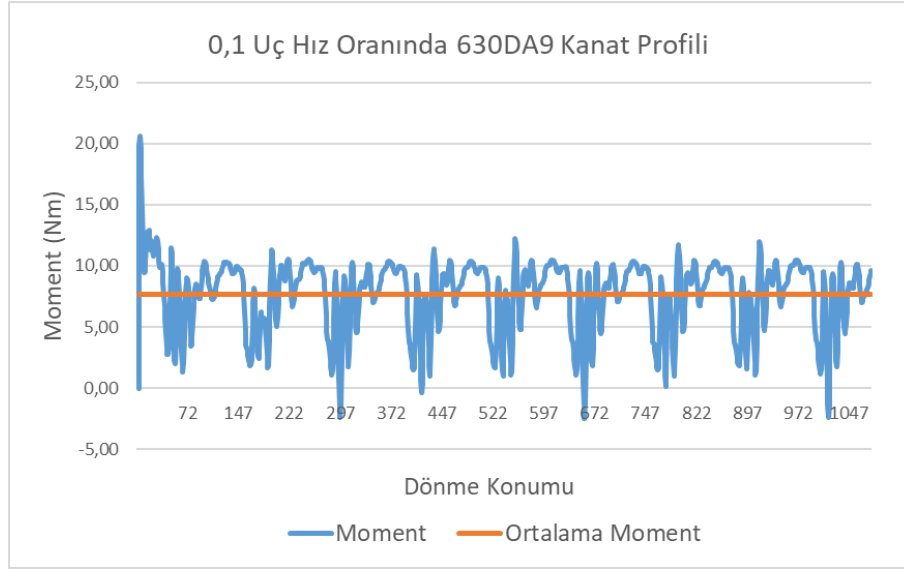
Şekil 4.12. 0,03 uç hız oranında 630TA18'in en yüksek güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 120°)

4.4.2. 0,1 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması

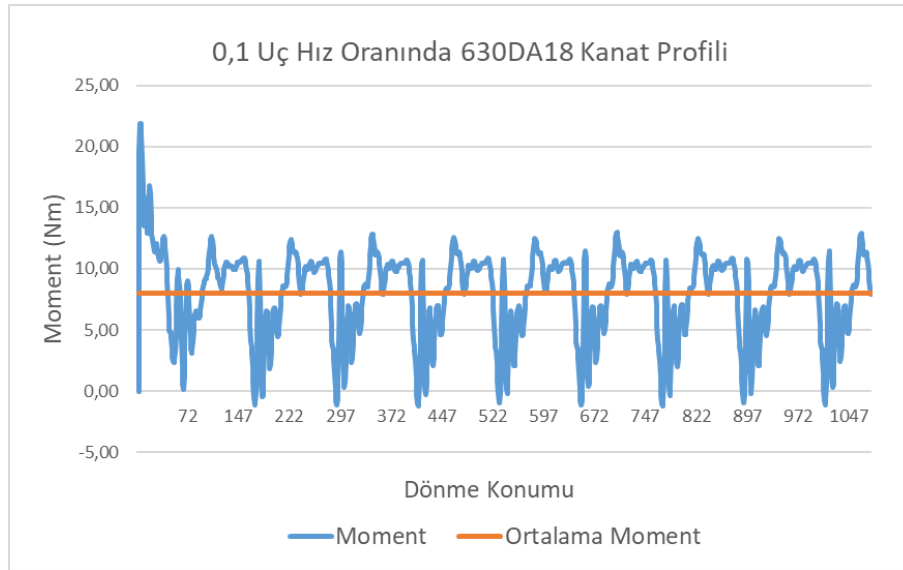
0,1 uç hız oranında DA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. 0,1 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları



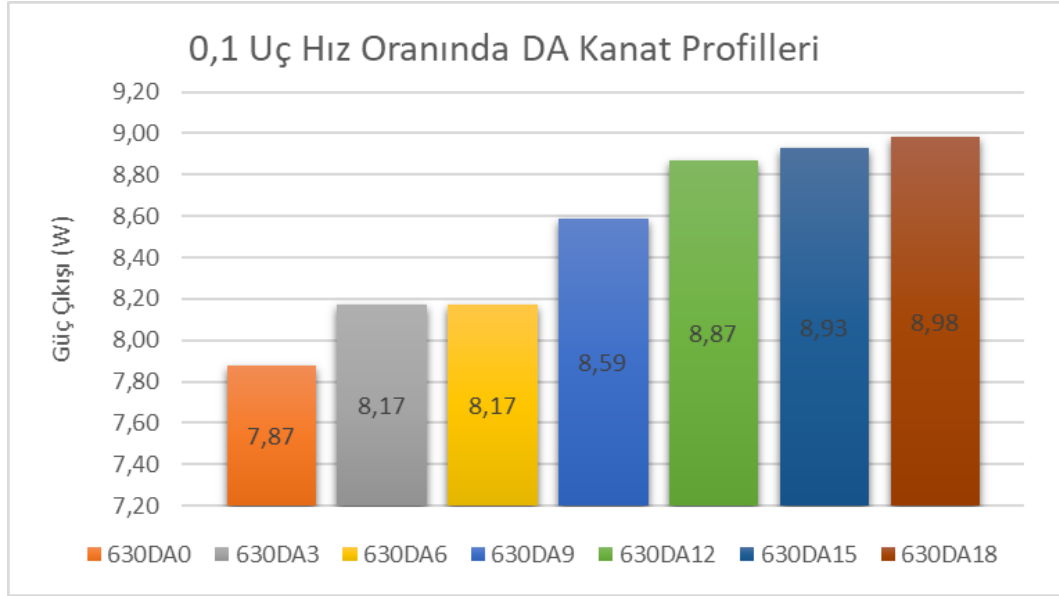
Şekil 4.13. 0,1 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.13. 0,1 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

0,1 uç hız oranında DA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 3° ve 12° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin ters etkiye maruz kalmadığı için ilk hareket kabiliyetinin olduğu, 0° hücum açısında ters etkiye maruz kalmadığı ancak dönme konumunun 300° , 420° , 660° , 780° ve $1020^\circ \pm 10^\circ$ olduğu yerlerde moment değerleri çok düşük olduğundan dolayı ilk hareket kabiliyetinin çok az olduğu ve 6° , 9° , 15° ve 18° hücum açılarında dönme konumunun 60° , 180° ve $300^\circ \pm 5^\circ$ olduğu yerlerde ise ters etkilerden dolayı ilk hareket kabiliyetlerinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

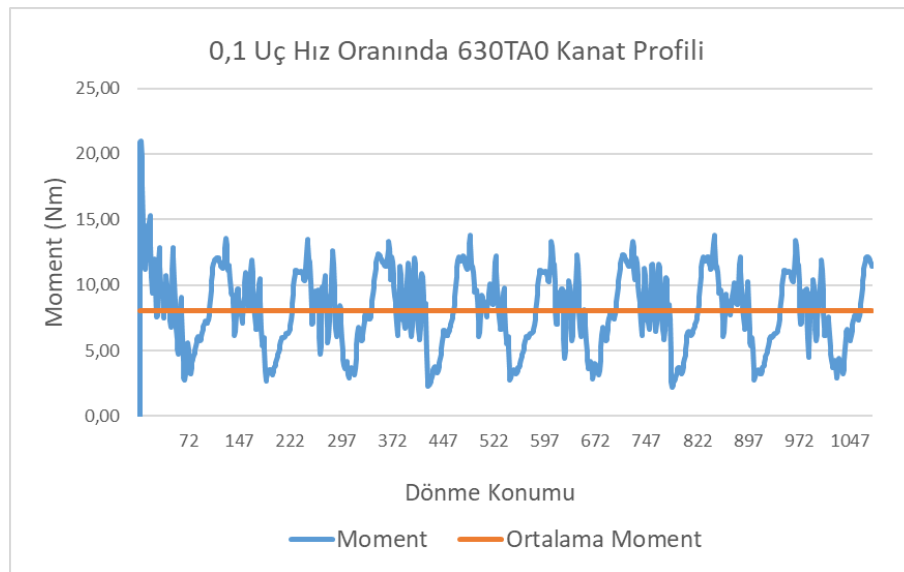
DA kanat profile sahip türbinlerin 0,1 uç hız oranında dönme konumunun 60° , 180° ve $300^\circ \pm 5^\circ$ olduğu yerlerde en düşük moment değerlerine 120° , 240° ve $360^\circ \pm 5^\circ$ olduğu yerlerde ise en yüksek moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



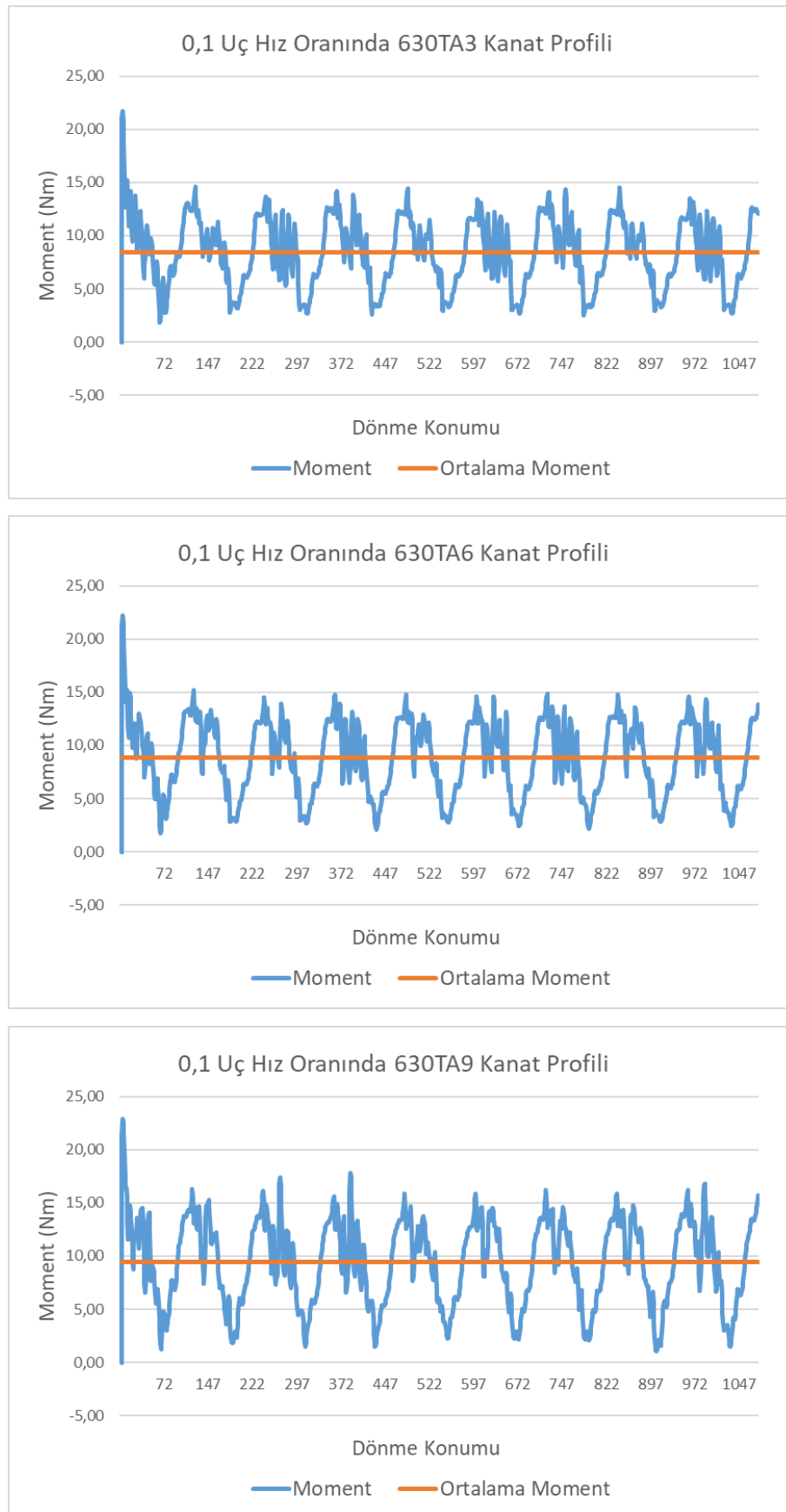
Şekil 4.14. 0,1 uç hız oranında DA kanat profillerinin karşılaştırması

0,1 uç hız oranında DA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısının artışına paralel olarak elde edilen gücün arttığı tespit edilmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.14 'te verilmiştir. 0,1 uç hız oranında 630DA0 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 7,87 W ile en düşük seviyesinde iken 630DA18 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 8,98 W ile en yüksek seviyesindedir.

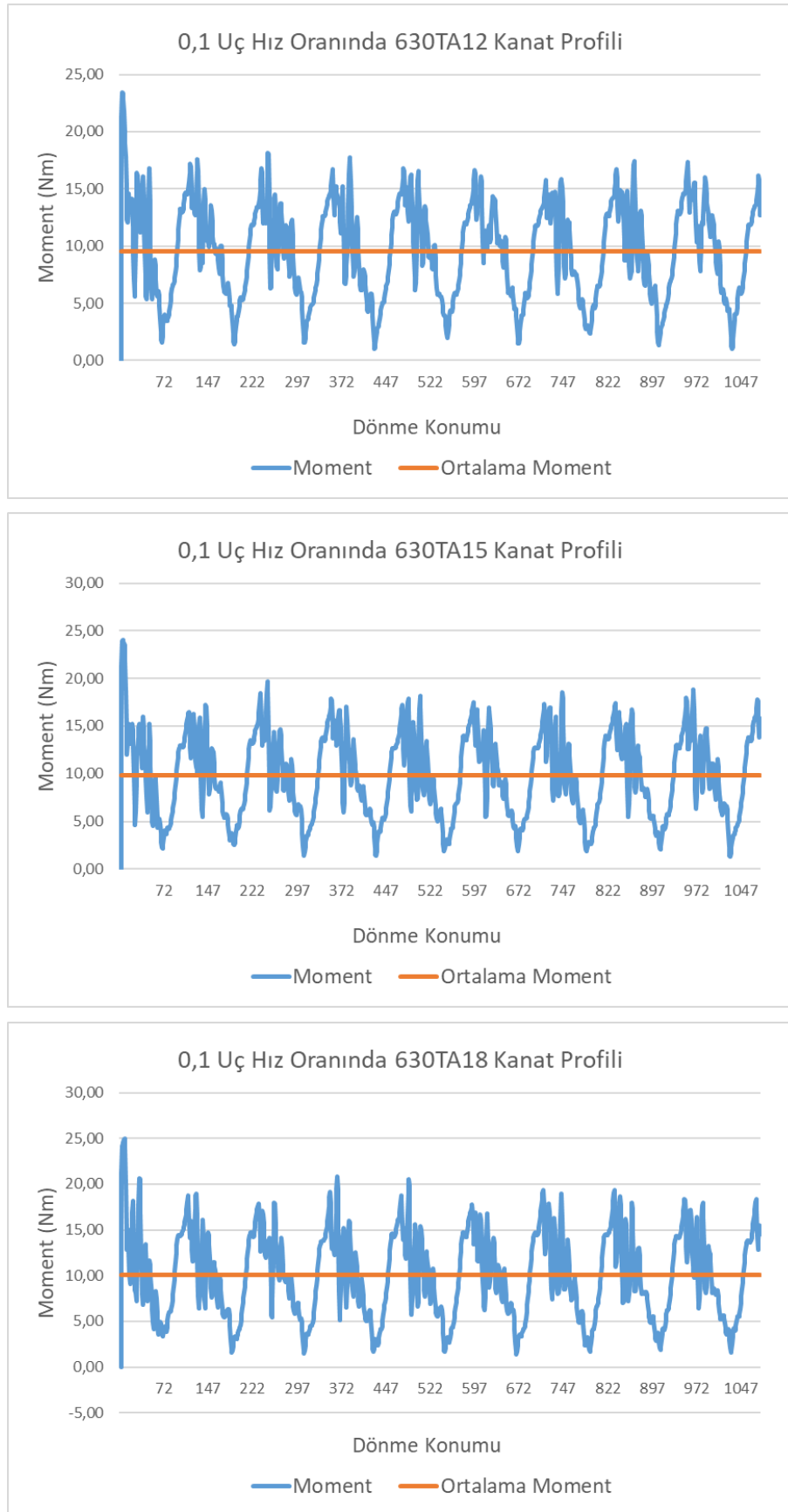
0,1 uç hız oranında TA kanat profilinin 0°, 3°, 6°, 9°, 12°, 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. 0,1 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları



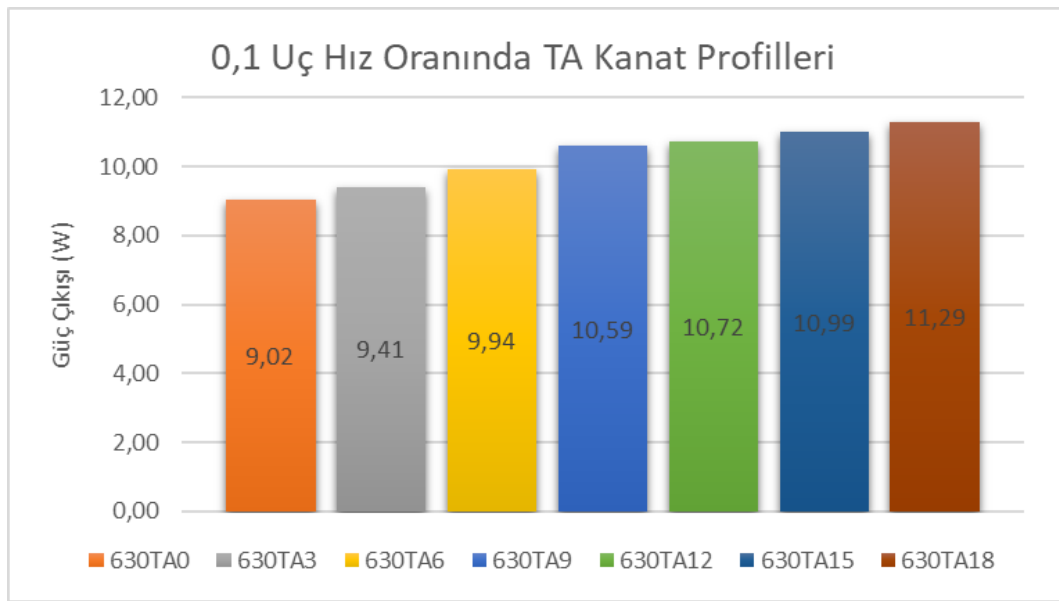
Şekil 4.15. 0,1 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.15. 0,1 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

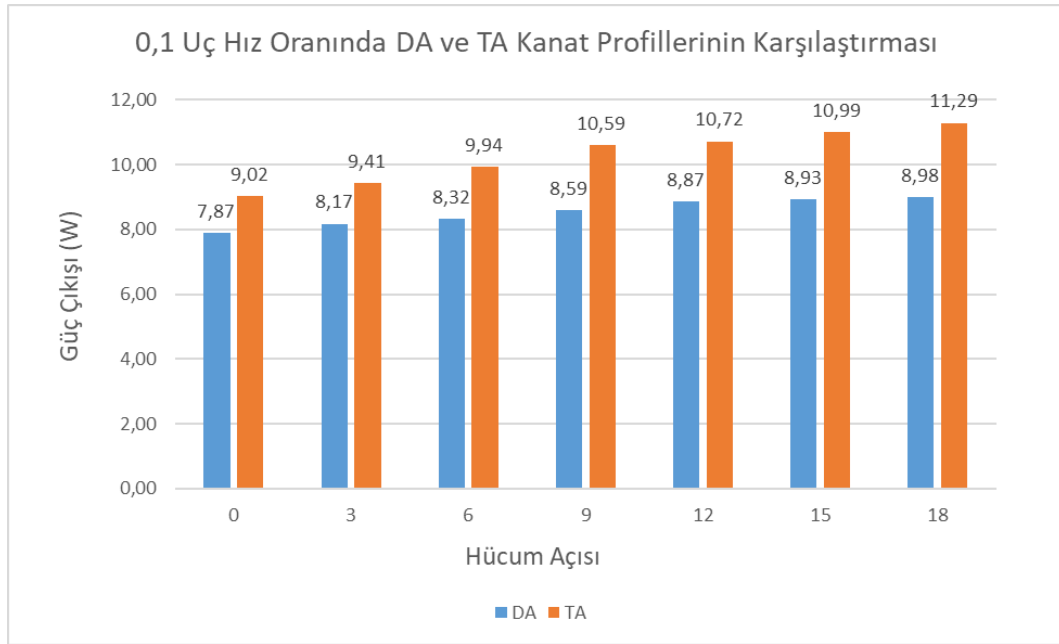
0,1 uç hız oranında TA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 0°, 3°, 6°, 9°, 12°, 15° ve 18° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin herhangi bir ters etkiye maruz kalmadığı ve her dönme konumunda ilk hareket kabiliyetine sahip oldukları sonucuna ulaşılmıştır.

TA kanat profile sahip türbinlerin 0,1 uç hız oranında dönme konumunun 60°, 180° ve 300° ± 5° olduğu yerlerde en düşük moment değerlerine 120°, 240° ve 360° ± 5° olduğu yerlerde ise en yüksek moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16 0,1 uç hız oranında TA kanat profillerinin karşılaştırması

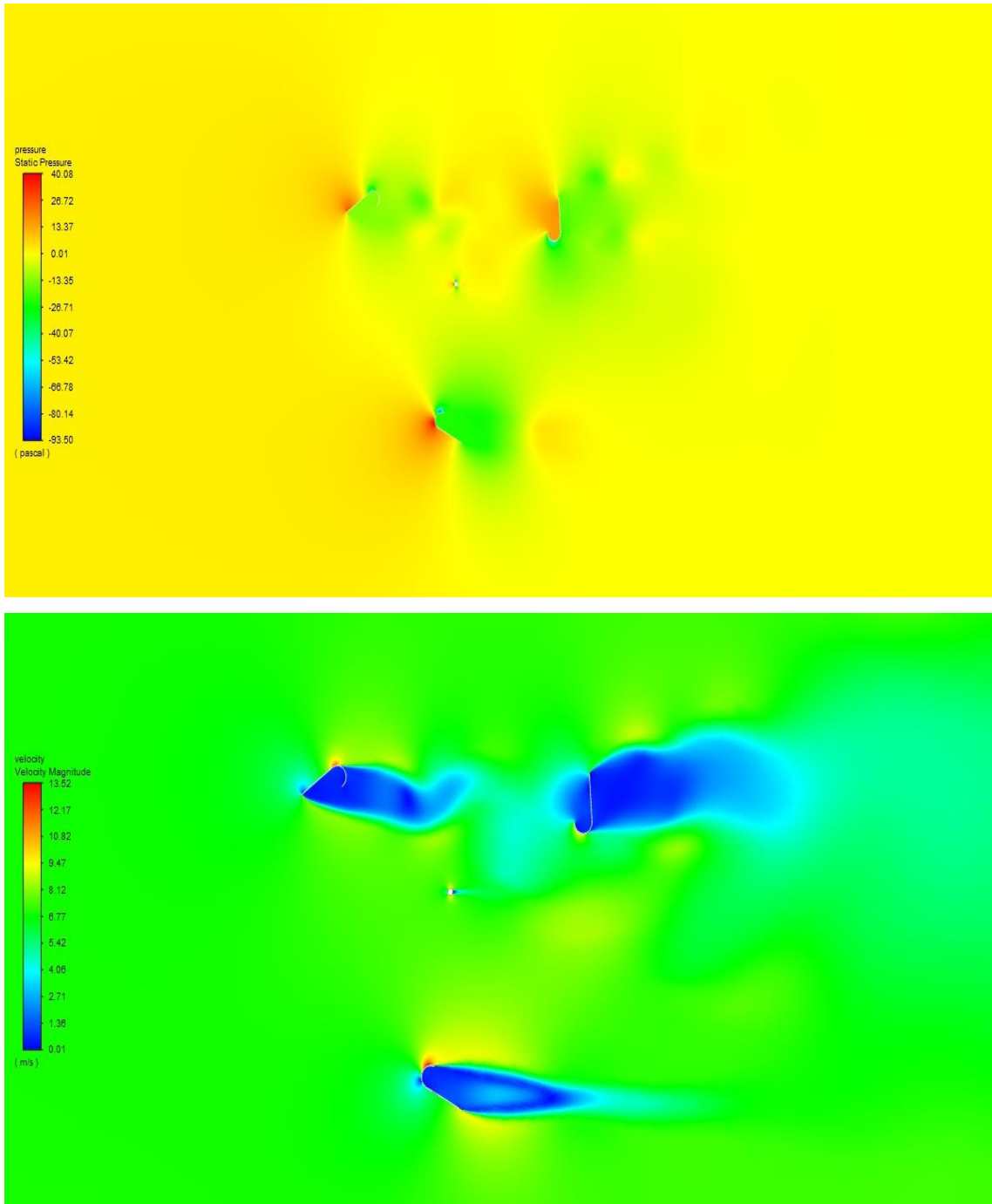
0,1 uç hız oranında TA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısının artışına paralel olarak elde edilen gücün arttığı tespit edilmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir. 0,1 uç hız oranında 630TA0 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 9,02 W ile en düşük seviyesinde iken 630TA18 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 11,29 W ile en yüksek seviyesindedir.



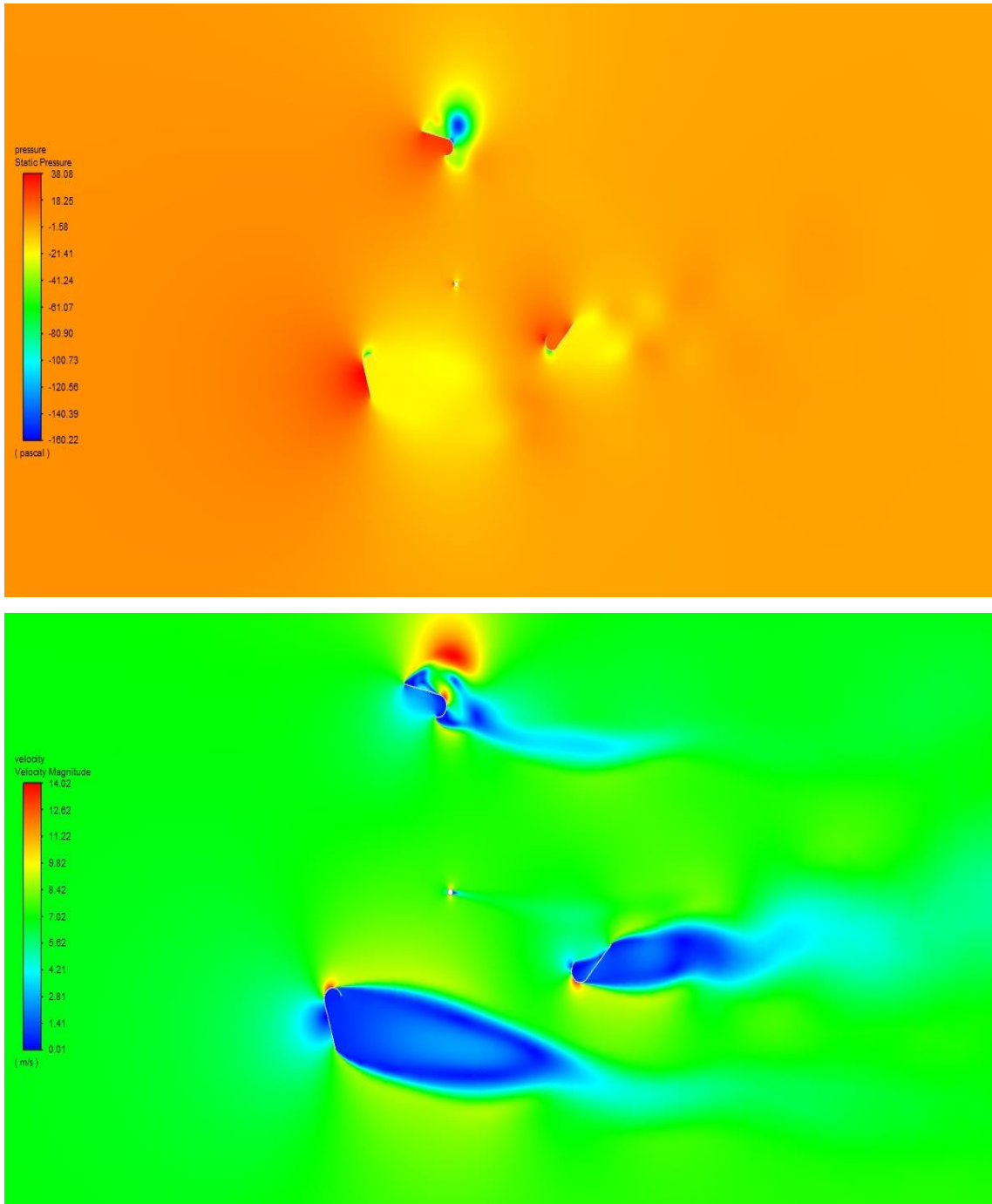
Şekil 4.17. 0,1 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin karşılaştırması

Uç hız oranı 0,1 olan DA ve TA kanat profillerinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarındaki analiz çözümlerinden elde edilen değerler değerlendirildiğinde bu uç hız oranında ve bu çalışma kapsamındaki tüm hücum açılarında TA kanat profili daha iyi performans göstermiştir. Aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %14 ila %26 daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. 0,1 uç hız oranında analizi yapılan kanat profillerinden 630DA6, 630DA9, 630DA15 ve 630DA18 'de ters etki meydana gelmiştir. Geriye kalan DA kanat profillerinde ve TA kanat profillerinde ters etki meydana gelmemiş ve bu profiller ilk hız kabiliyetine sahiptirler. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar ve değerlendirmeler göz önüne alındığında 0,1 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbininin için en uygun kanat profilinin 630TA18 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.

630TA18 kanat profiline sahip olan dikey eksenli rüzgar türbininin 0,1 uç hız oranında yapılan analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde moment değerinin en düşük seviyede olduğu 180° dönme konumundaki ve en yüksek seviyede olduğu 120° dönme konumundaki basınç ve hız konturları sırasıyla Şekil 4.18 'de ve Şekil 4.19 'da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde 180° dönme konumundaki momentin düşük olmasının sebebi kanat profillerinin birbirlerini engellemesinden, 120° dönme konumundaki momentin yüksek olmasının sebebi ise kanat profillerinin birbirlerinden bağımsız olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır.



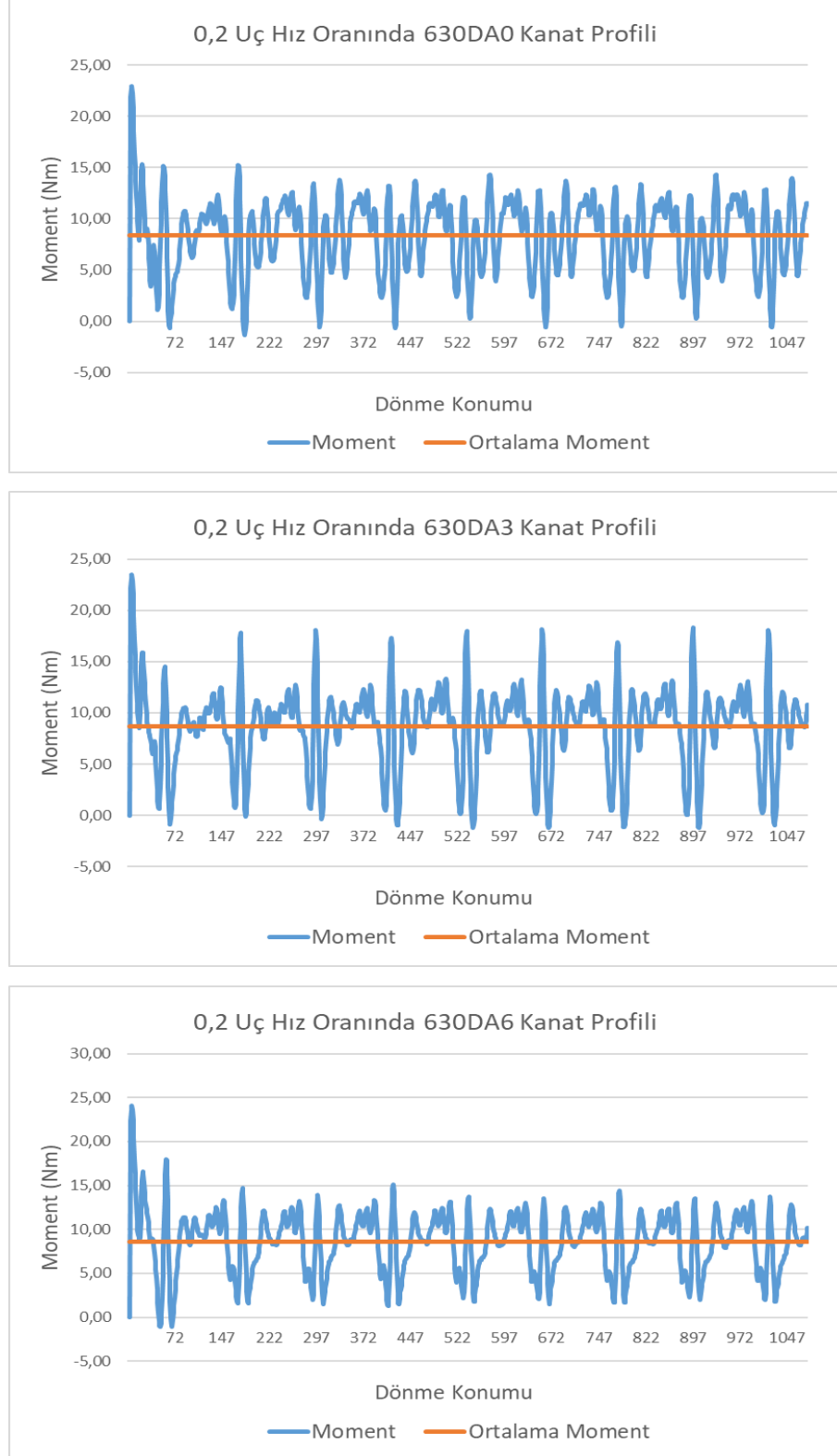
Şekil 4.18. 0,1 uç hız oranında 630TA18'in en düşük güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 180°)



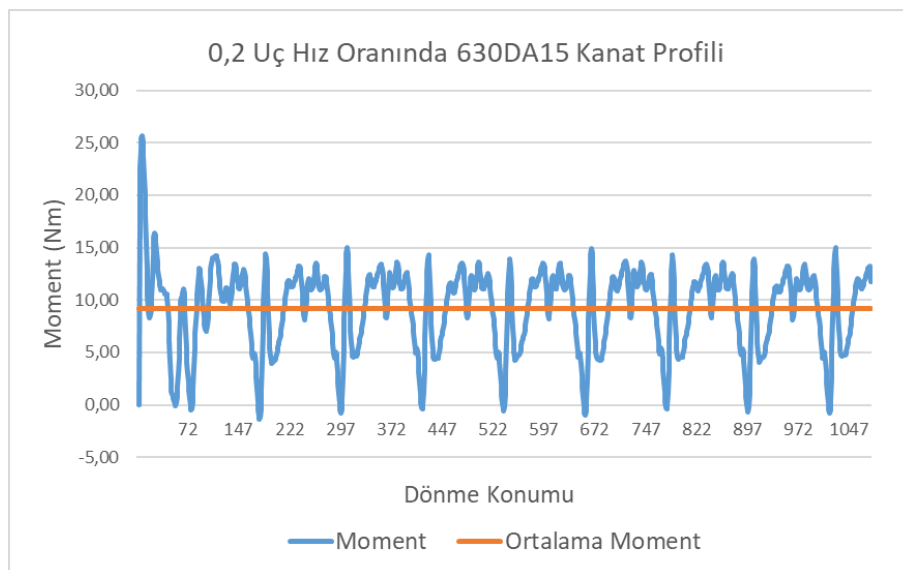
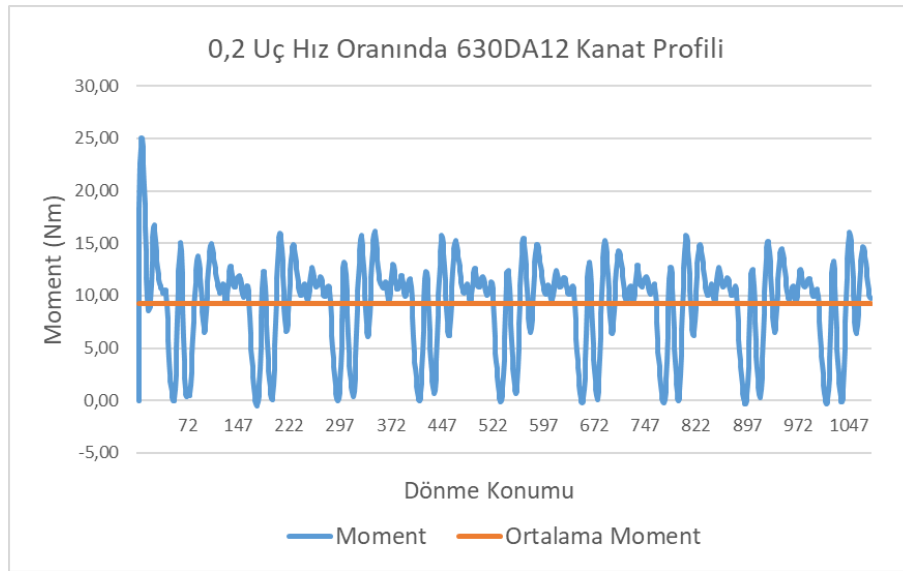
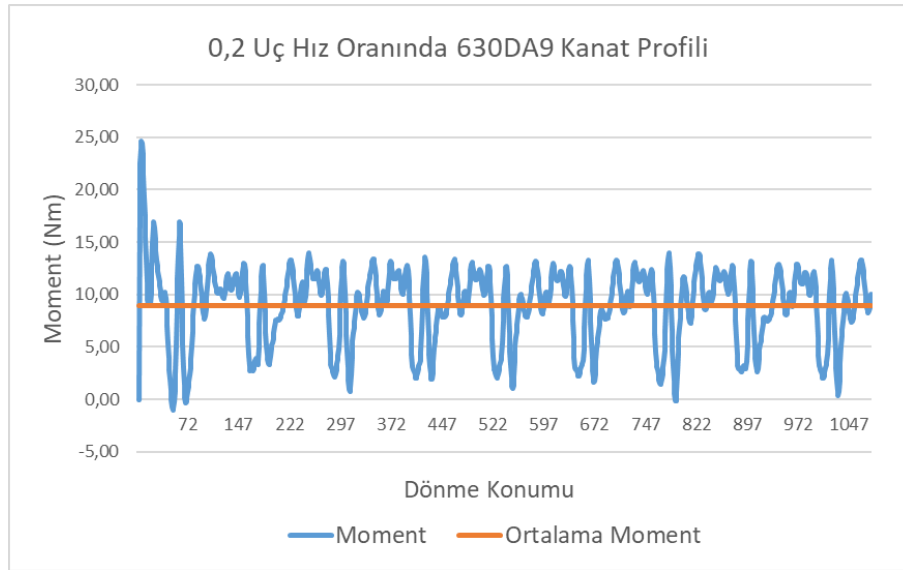
Şekil 4.19. 0,1 uç hız oranında 630TA18'in en yüksek güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 120°)

4.4.3. 0,2 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması

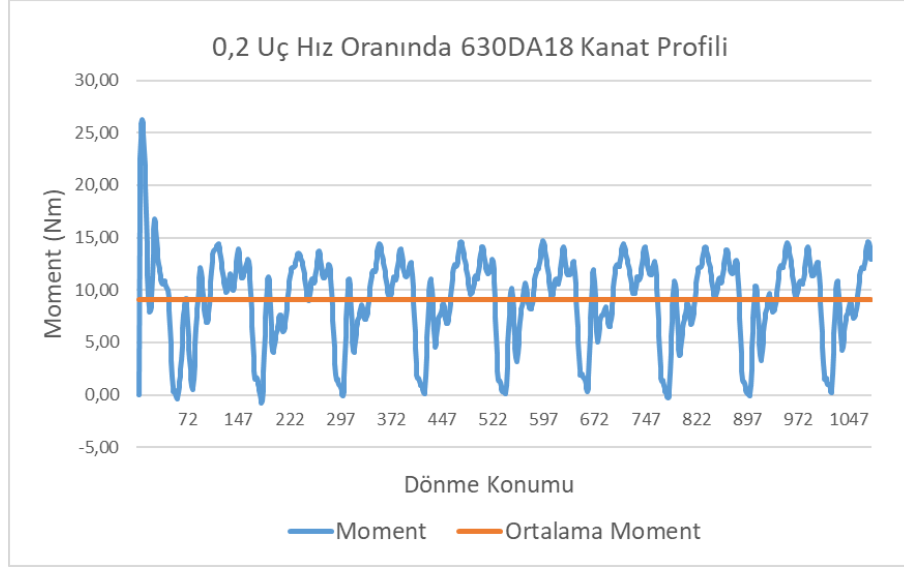
0,2 uç hız oranında DA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. 0,2 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları



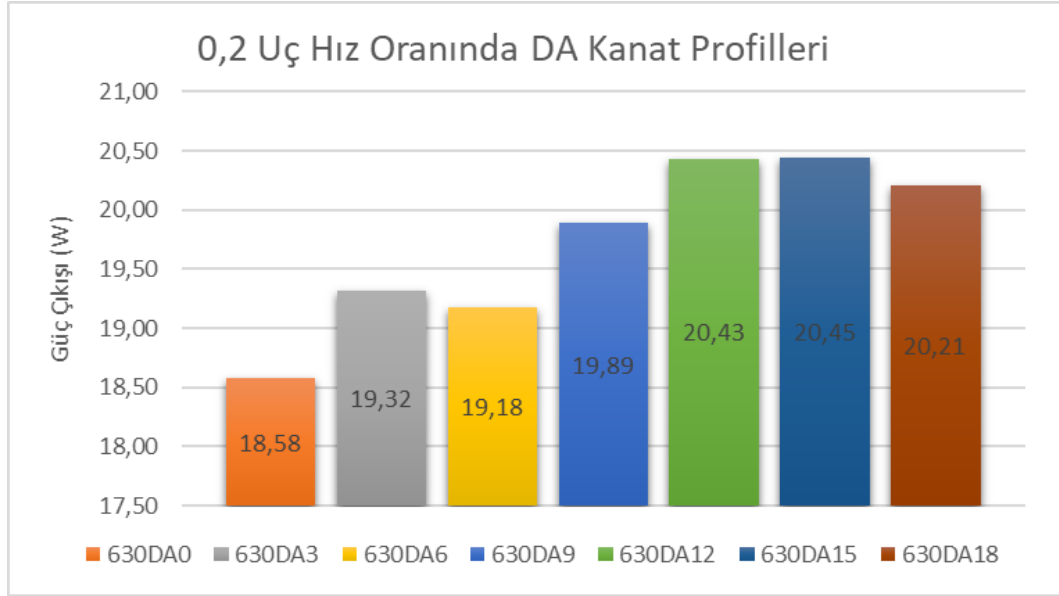
Şekil 4.20. 0,2 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.20. 0,2 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

0,2 uç hız oranında DA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 0° , 3° , 12° , ve 15° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerin 60° , 180° ve $300^\circ \pm 5^\circ$ dönme konumlarında sürekli ters etkiye maruz kaldığı sonucuna ulaşıldığı için her konumda ilk hareket kabiliyetinin olmadığı, 6° , 9° , ve 18° hücum açılarında ise 45° ile 70° dönme konumları arasında ters etkiye maruz kalmasına rağmen sonrasında herhangi bir ters etki ile karşılaşmadan stabil bir dönüş sağladığı sonucuna varılmıştır.

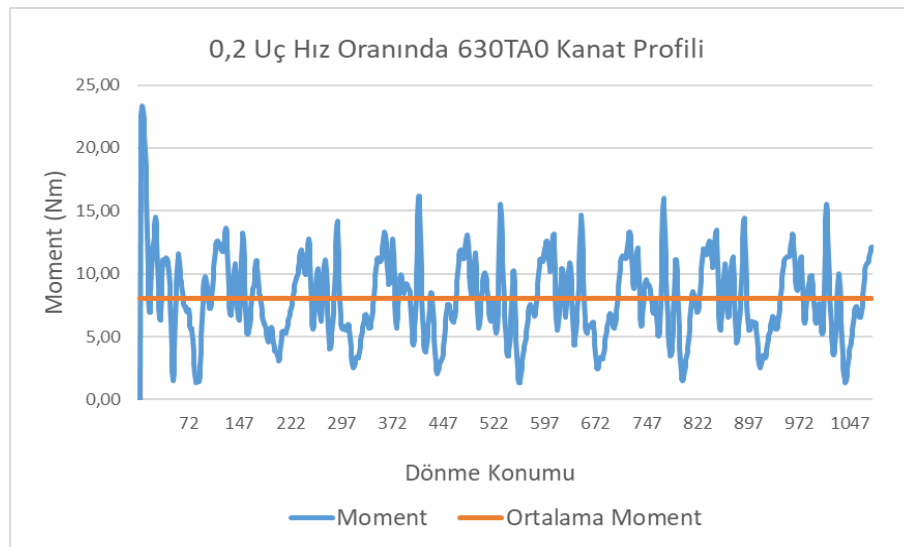
DA kanat profile sahip türbinlerin 0,2 uç hız oranında en düşük ve en yüksek moment değer aralıkları sıklıkla değiştiğinden dolayı belirli bir aralık verilememiş ancak dönüşün stabil olduğu andan itibaren dönme konumunun 58° olduğu yerde yüksek moment değerlerine 172° olduğu yerde en düşük moment değerine sahip olduğu görülmüştür.



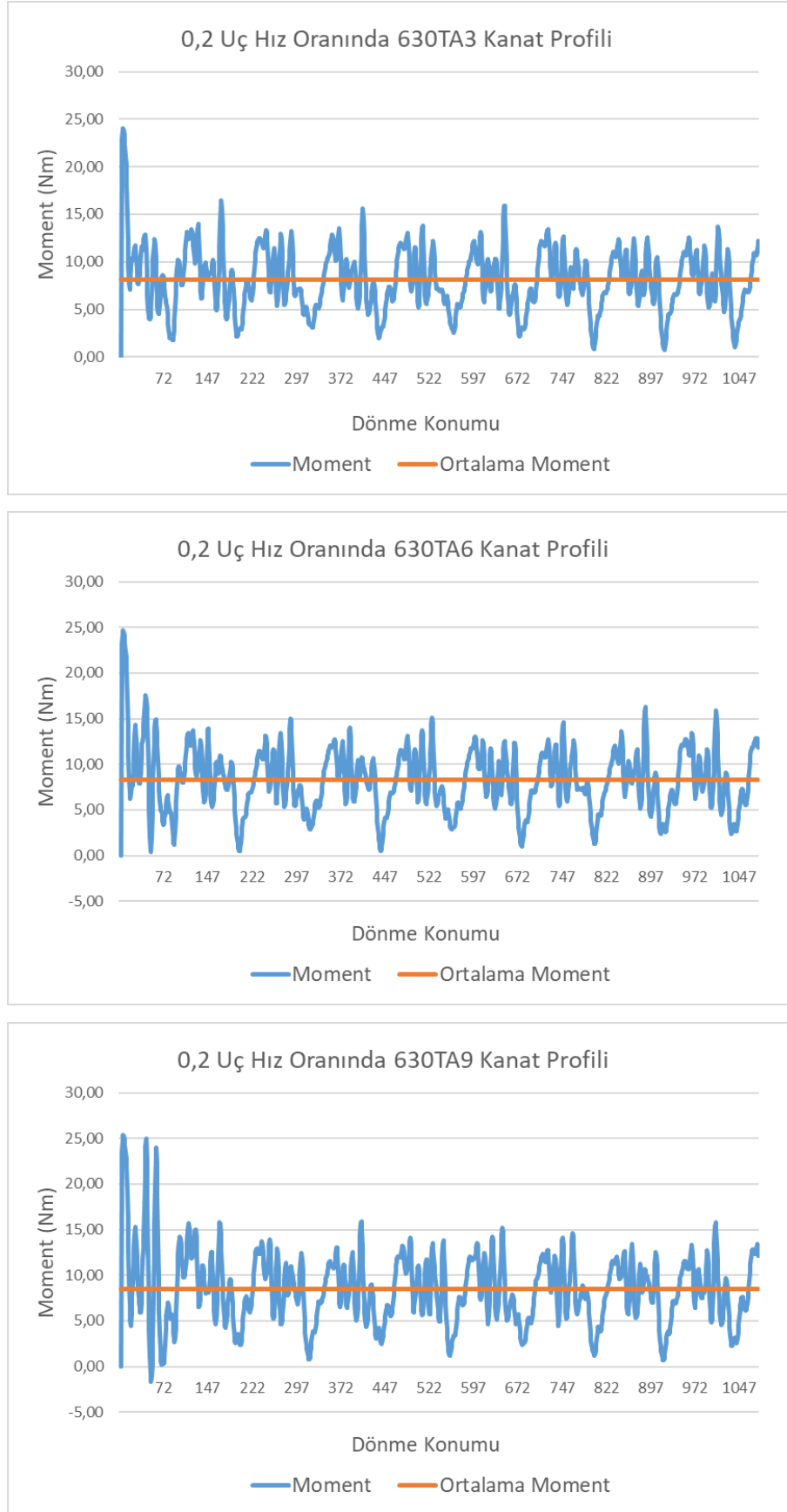
Şekil 4.21. 0,2 uç hız oranında DA kanat profillerinin karşılaştırması

0,2 uç hız oranında DA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısının 15° 'ye gelene kadar hücum açısının artışına paralel olarak elde edilen gücün arttığı ancak 18° hücum açısına gelindiğinde elde edilen gücün azaldığı tespit edilmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.21 'de verilmiştir. 0,2 uç hız oranında 630DA0 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 18,58 W ile en düşük seviyesinde iken 630DA15 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 20,45 W ile en yüksek seviyesindedir.

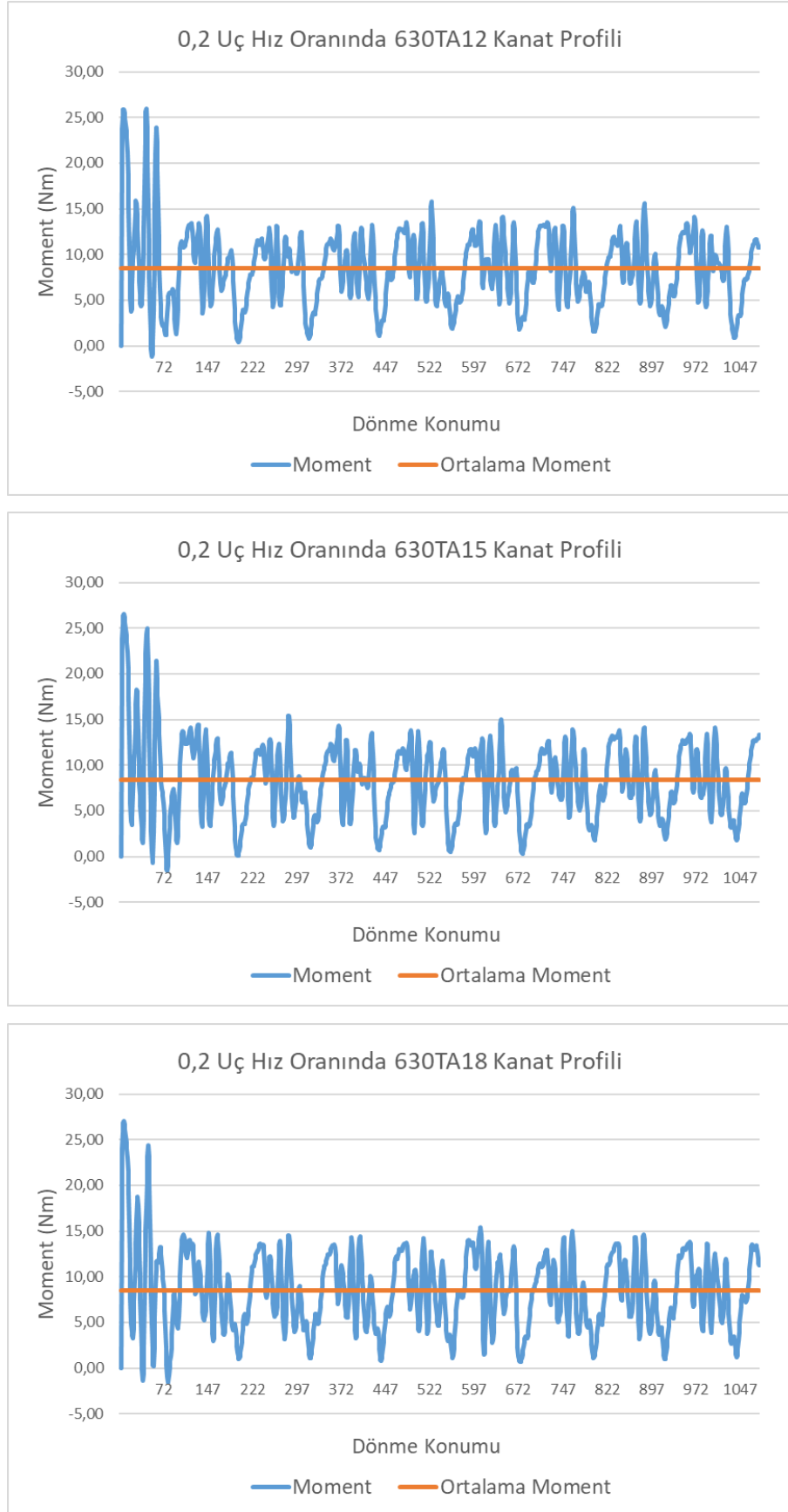
0,2 uç hız oranında TA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. 0,2 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları



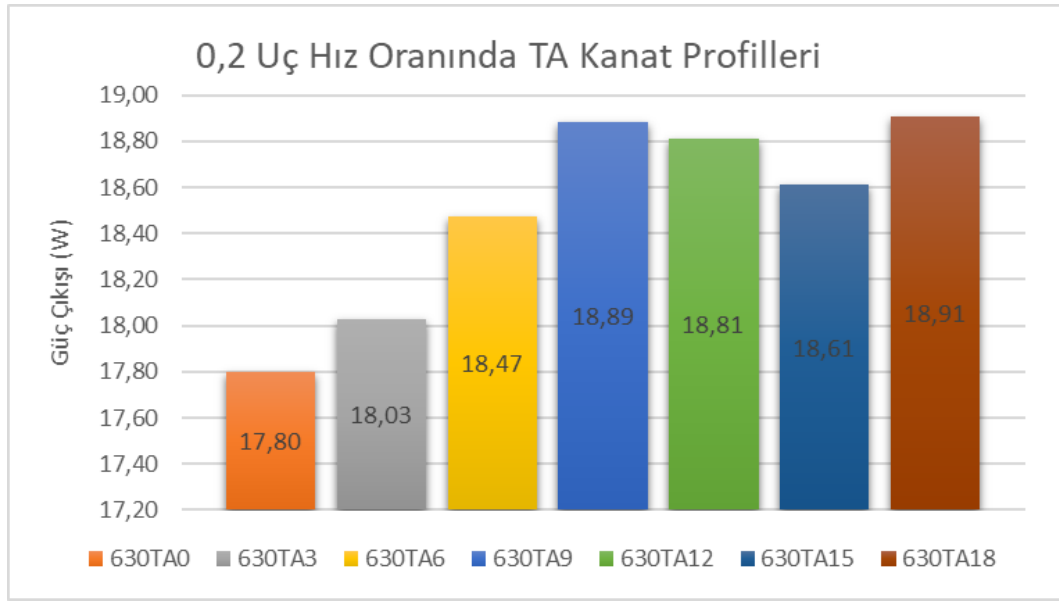
Şekil 4.22. 0,2 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.22. 0,2 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

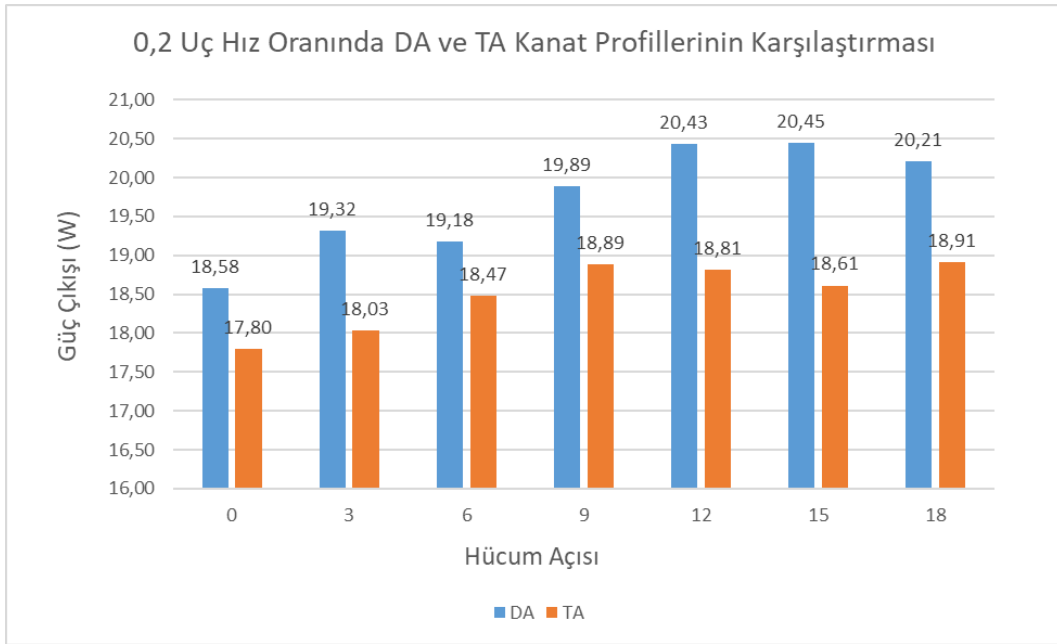
0,2 uç hız oranında TA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 0°, 3° ve 6° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin ters etkiye maruz kalmadığı için her konumda ilk hareket kabiliyetinin olduğu, 9°, 12°, 15° ve 18° hücum açılarında ise 45° ve 70° dönme konumları arasında ters etkiye maruz kalmasına rağmen sonrasında herhangi bir ters etki ile karşılaşmadan stabil bir dönüş sağladığı sonucuna varılmıştır.

TA kanat profile sahip türbinlerin 0,2 uç hız oranında dönme konumunun 200° ve 320° ± 5° olduğu yerlerde en düşük moment değerlerine 170° ve 290° ± 5° olduğu yerlerde ise en yüksek moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.23. 0,2 uç hız oranında TA kanat profillerinin karşılaştırması

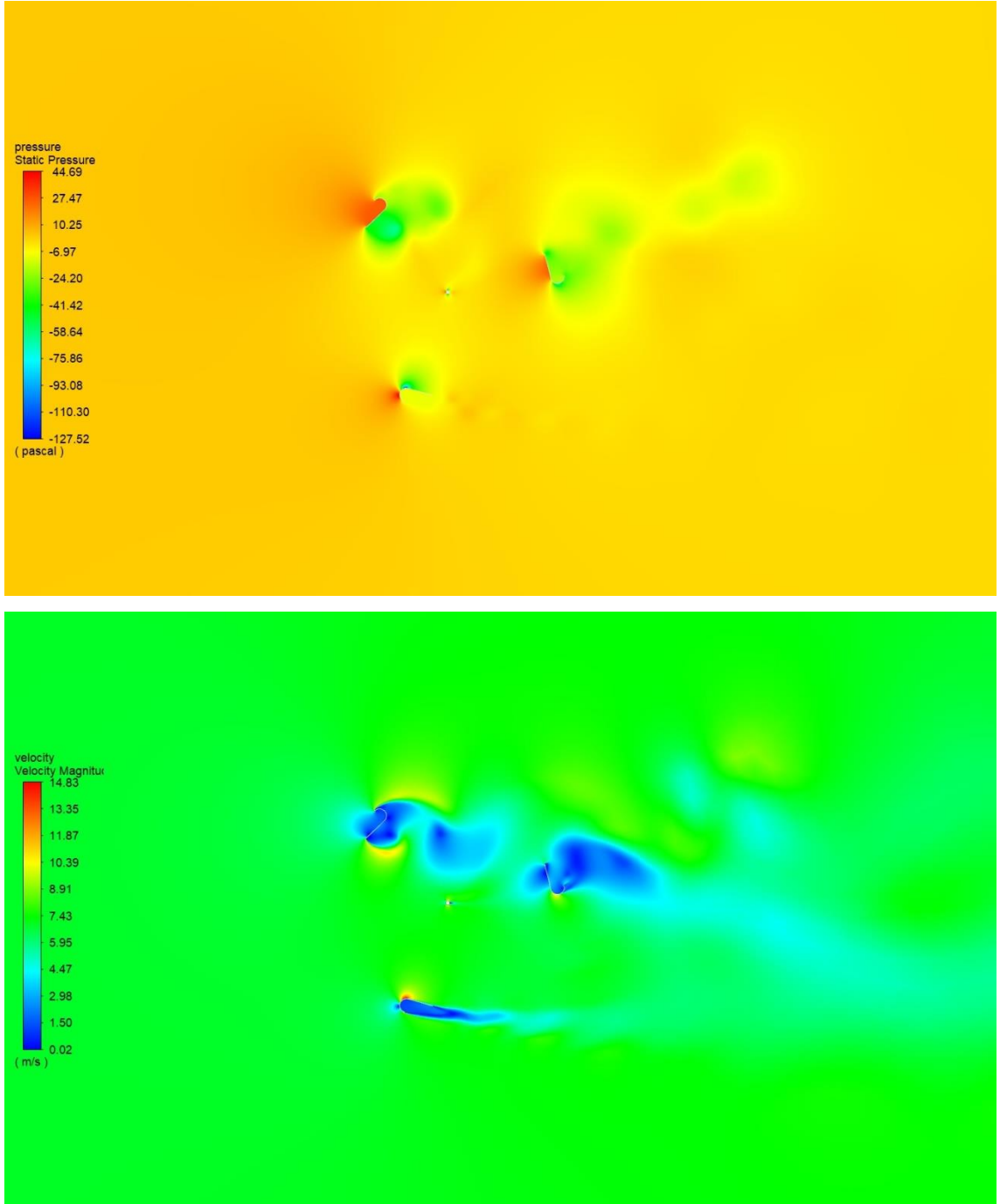
0,2 uç hız oranında TA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısının 9° 'ye gelene kadar hücum açısının artışına paralel olarak elde edilen gücün arttığı, 9° ile 15° hücum açıları aralığında elde edilen gücün azaldığı, 18° hücum açısında ise elde edilen gücün en yüksek seviyeyi gördüğü tespit edilmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.23'te verilmiştir. 0,2 uç hız oranında 630TA0 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 17,80 W ile en düşük seviyesinde, 630TA9 ve 630TA18 kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinden elde edilen güç sırasıyla 18,89 W ve 18,91 W ile en yüksek seviyededir.



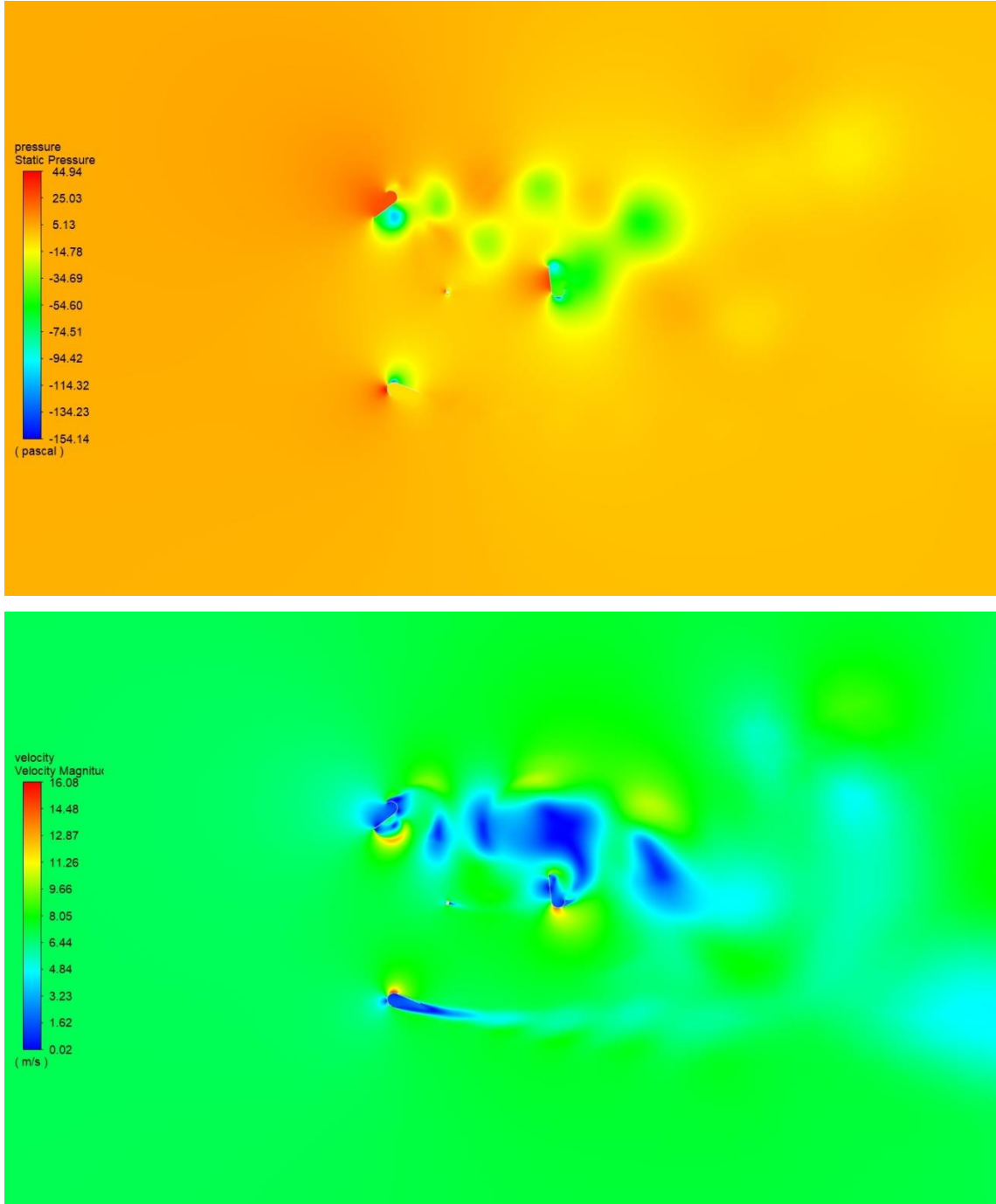
Şekil 4.24. 0,2 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin karşılaştırması

Uç hız oranı 0,2 olan DA ve TA kanat profillerinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarındaki analiz çözümlerinden elde edilen değerler değerlendirildiğinde bu uç hız oranında ve bu çalışma kapsamındaki tüm hücum açılarında DA kanat profili daha iyi performans göstermiştir. Aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %3 ila %10 daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. 0,2 uç hız oranında analizi yapılan kanat profillerinden 630DA0, 630DA3, 630DA12, 630DA15 ve 630DA18 ‘de ters etki meydana gelmiştir. Geriye kalan DA kanat profillerinde ve TA kanat profillerinde ters etki meydana gelmemiş ve bu profiller ilk hız kabiliyetine sahiptirler. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.24’te gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar ve değerlendirmeler göz önüne alındığında 0,2 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbininin için en uygun kanat profilinin 630DA6 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.

630DA6 kanat profiline sahip olan dikey eksenli rüzgar türbininin 0,2 uç hız oranında yapılan analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde moment değerinin en düşük seviyede olduğu 172° dönme konumundaki ve en yüksek seviyede olduğu 58° dönme konumundaki basınç ve hız konturları sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde 172° dönme konumundaki momentin düşük olmasının sebebi kanat profillerinin birbirlerini engellemesinden, 58° dönme konumundaki momentin yüksek olmasının sebebi ise kanat profillerinin birbirlerinden bağımsız olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır.



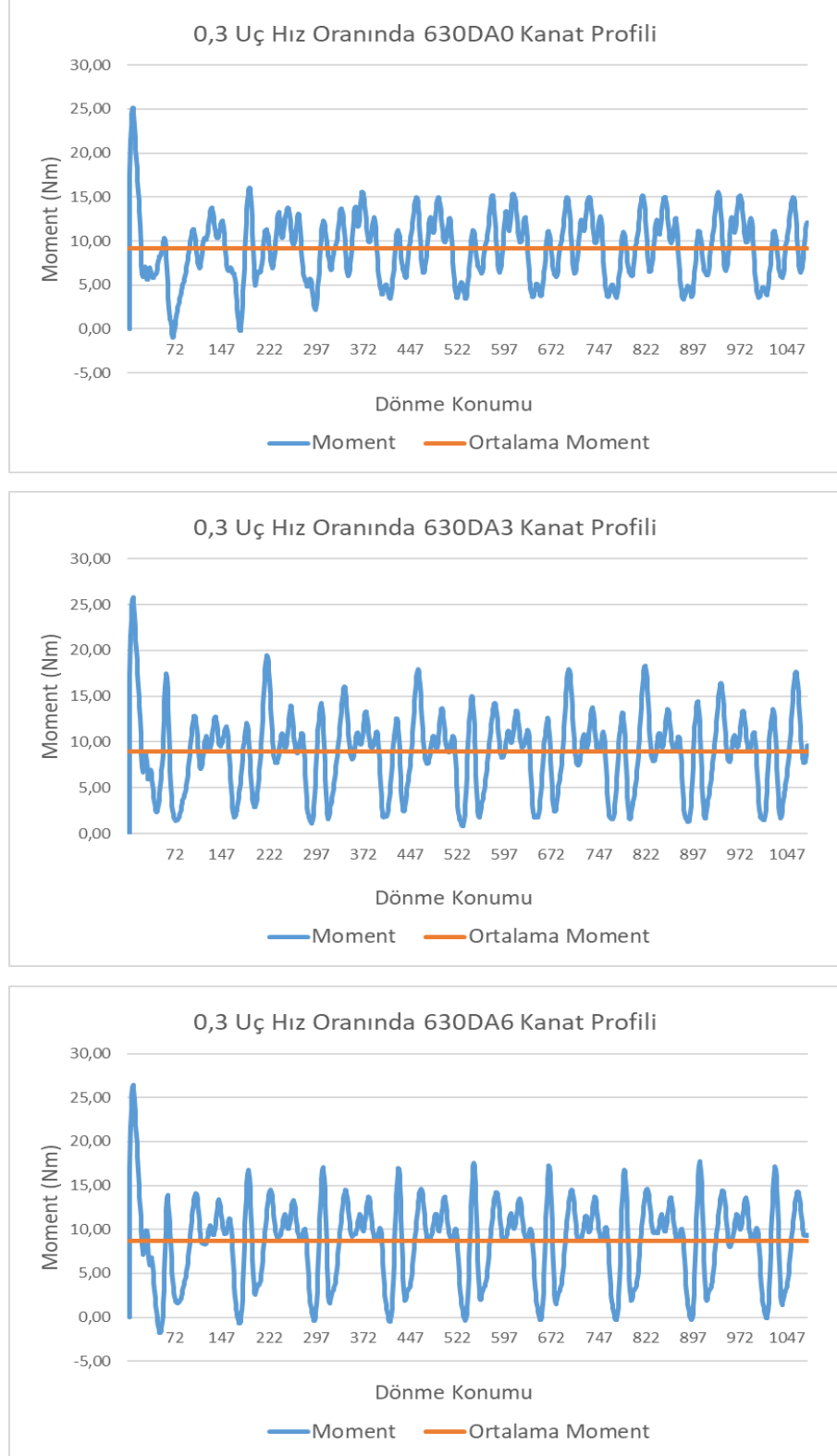
Şekil 4.25. 0,2 uç hız oranında 630DA6'nın en düşük güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 172°)



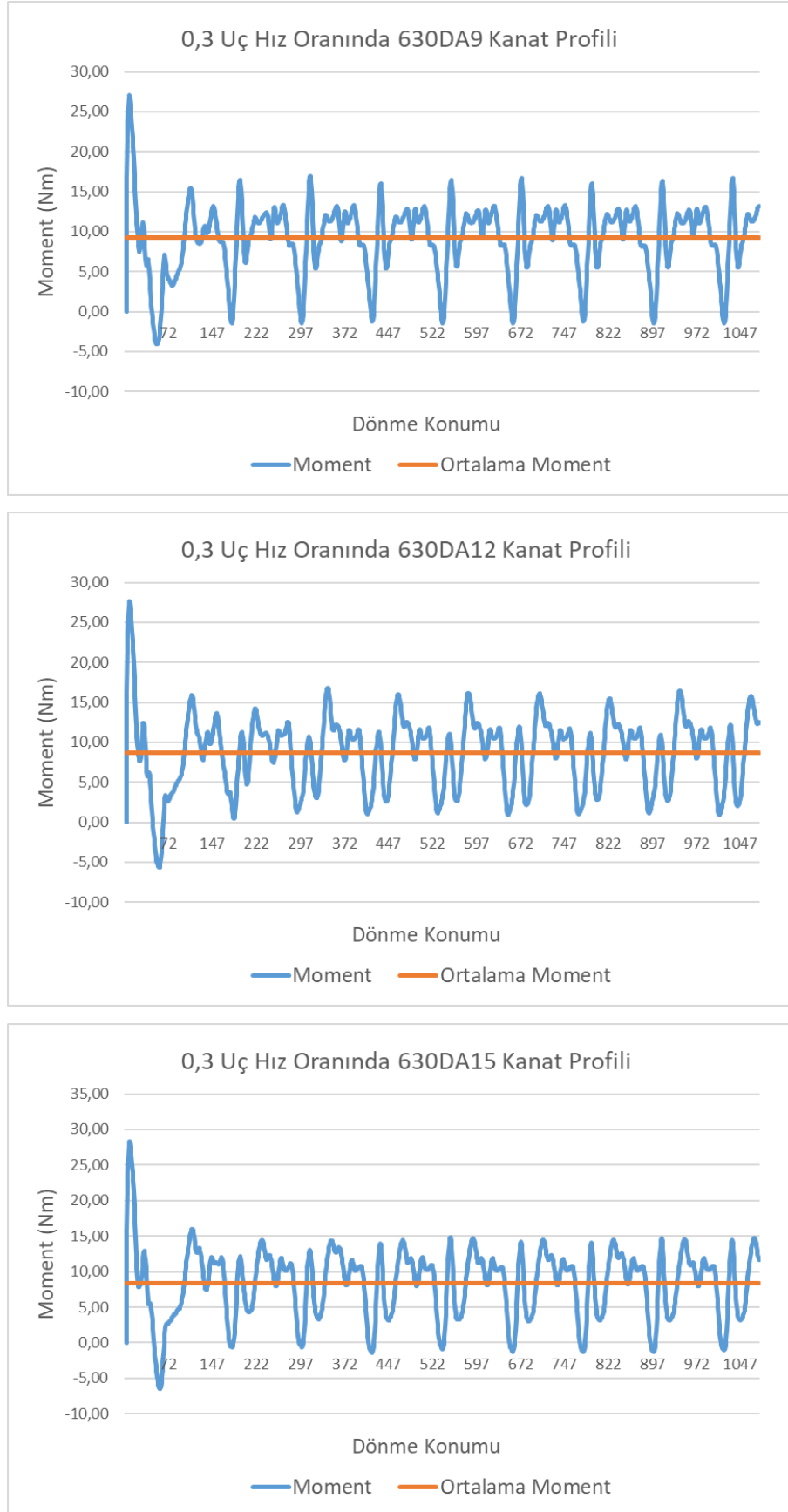
Şekil 4.26. 0,2 uç hız oranında 630DA6'nın en yüksek güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 58°)

4.4.4. 0,3 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması

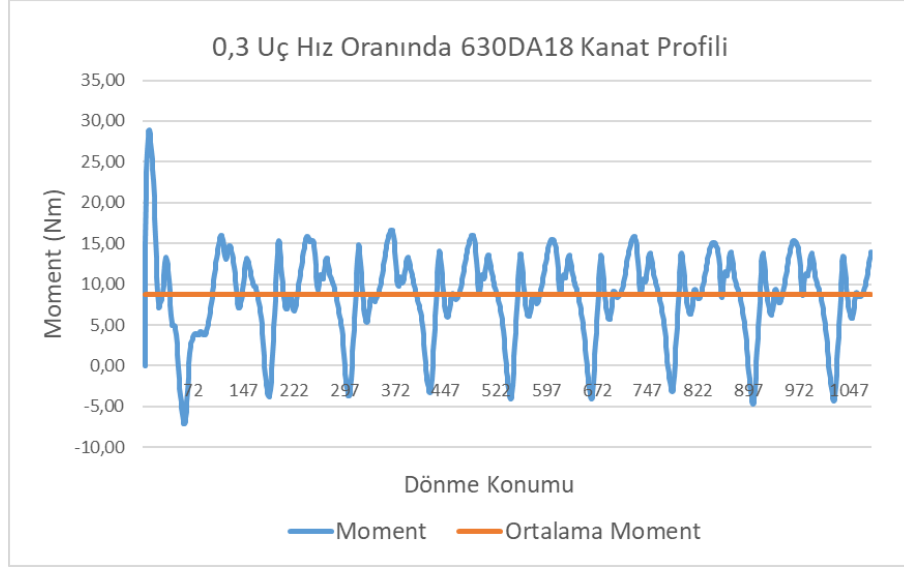
0,3 uç hız oranında DA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. 0,3 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları



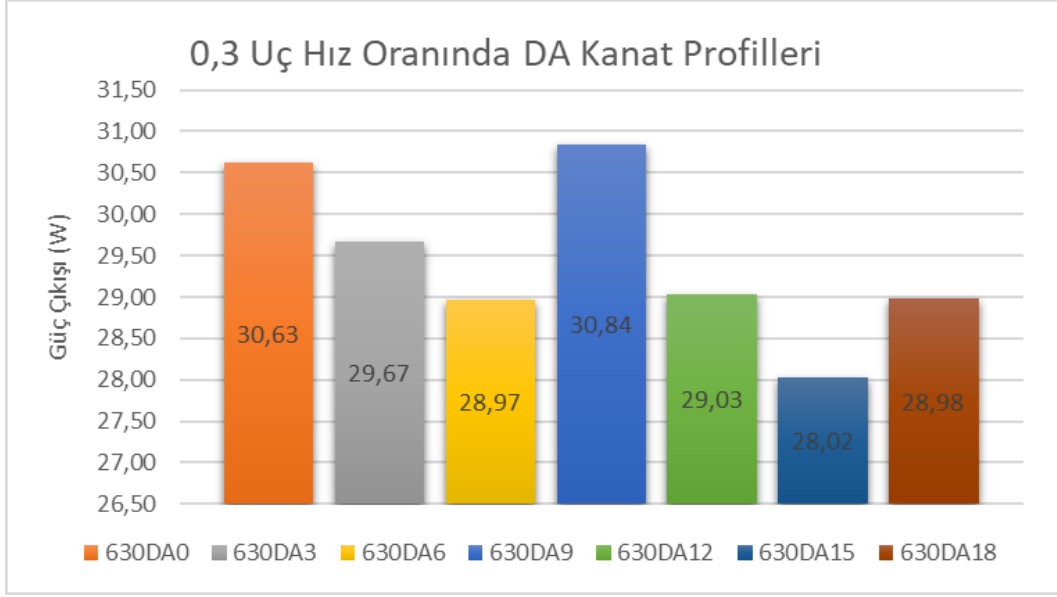
Şekil 4.27. 0,3 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.27. 0,3 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

0,3 uç hız oranında DA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 3° hücum açısında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin ters etkiye maruz kalmadığı için her konumda ilk hareket kabiliyetinin olduğu ve dönüşün stabil olduğu, 0° hücum açısında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin 70° ve 176° dönme konumlarında ters etkiye maruz kaldığı ancak diğer dönme konumlarında dönüşün stabil olduğu ve 6° , 9° , 15° ve 18° hücum açılarındaki kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin 55° , 175° ve $295^\circ \pm 5^\circ$ dönme konumlarında ters etkiye maruz kalması ve her konumda ilk hareket kabiliyetinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

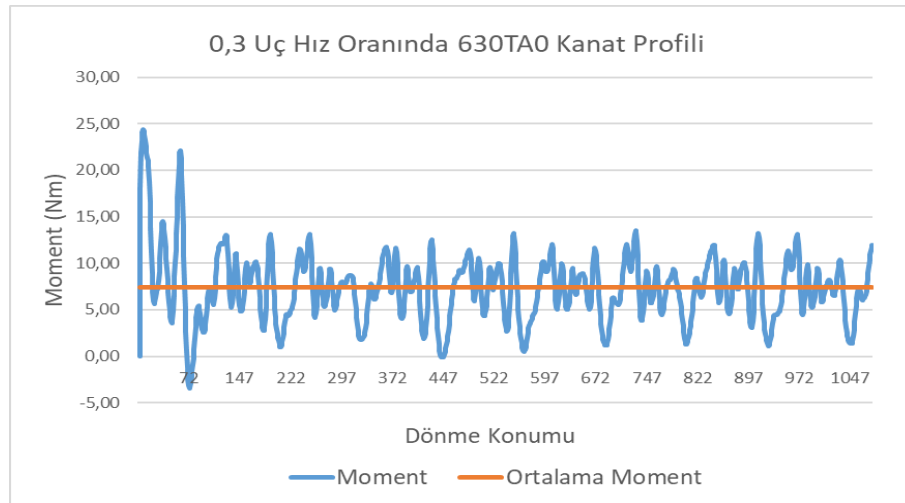
DA kanat profile sahip türbinlerin 0,3 uç hız oranında dönme konumunun 100° ile 160° ve 220° ile 280° olduğu aralıklarda en yüksek moment değerlerine 55° , 175° ve $295^\circ \pm 5^\circ$ olduğu yerlerde ise en düşük moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



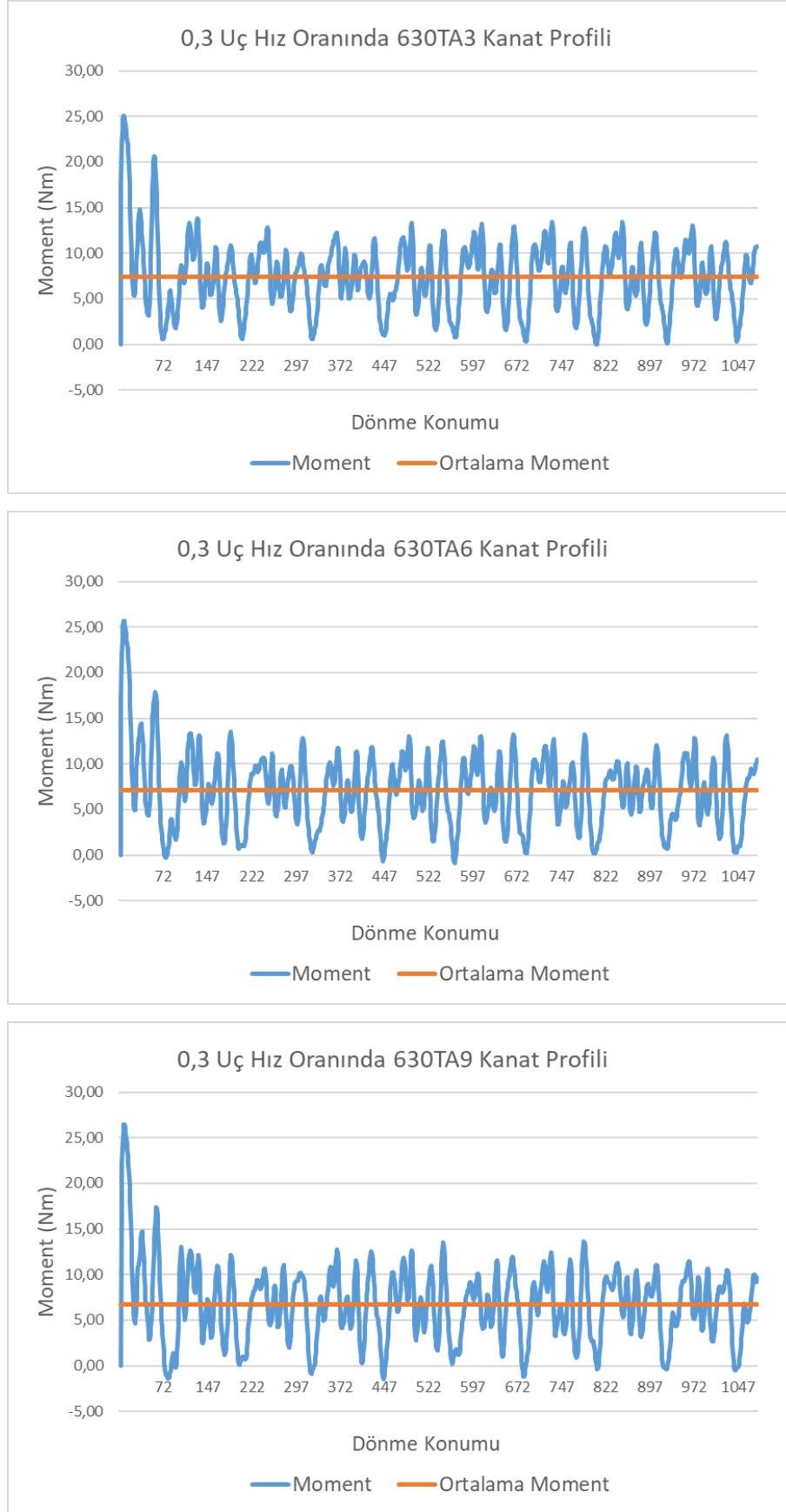
Şekil 4.28. 0,3 uç hız oranında DA kanat profillerinin karşılaştırması

0,3 uç hız oranında DA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısının 0° ile 6° aralığında olduğu bölgede hücum açısı ile elde edilen güç ters orantılı iken 9° hücum açısında zirve yaparak 18° hücum açısına kadar tekrar düşüş göstermiş ve 18° hücum açısında ortalama bir değer elde edilmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.28 'de verilmiştir. 0,3 uç hız oranında 630DA15 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 28,02 W ile en düşük seviyesinde iken 630DA9 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 30,84 W ile en yüksek seviyesindedir.

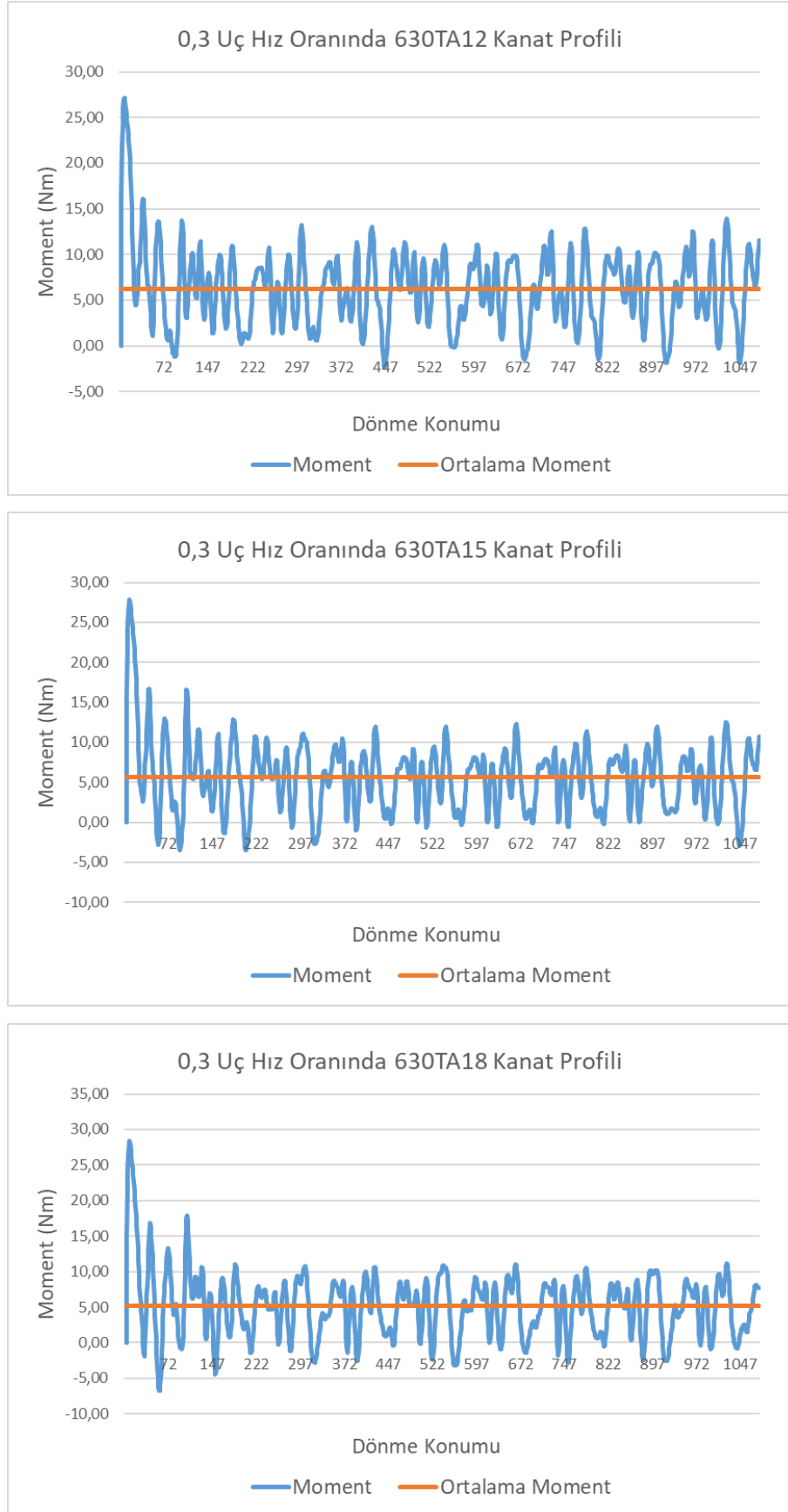
0,3 uç hız oranında TA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. 0,3 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları



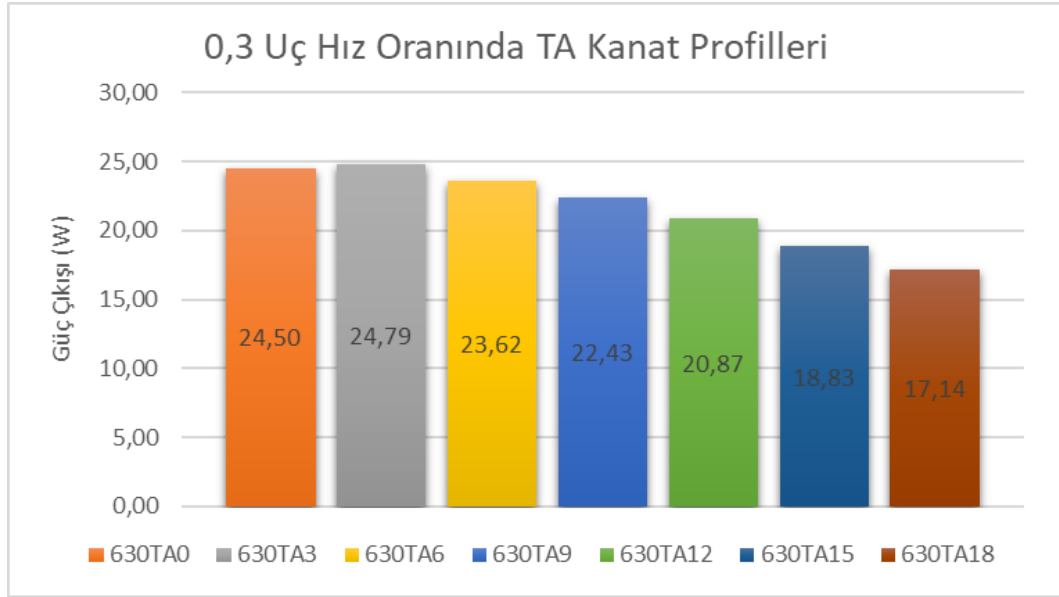
Şekil 4.29. 0,3 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.29. 0,3 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

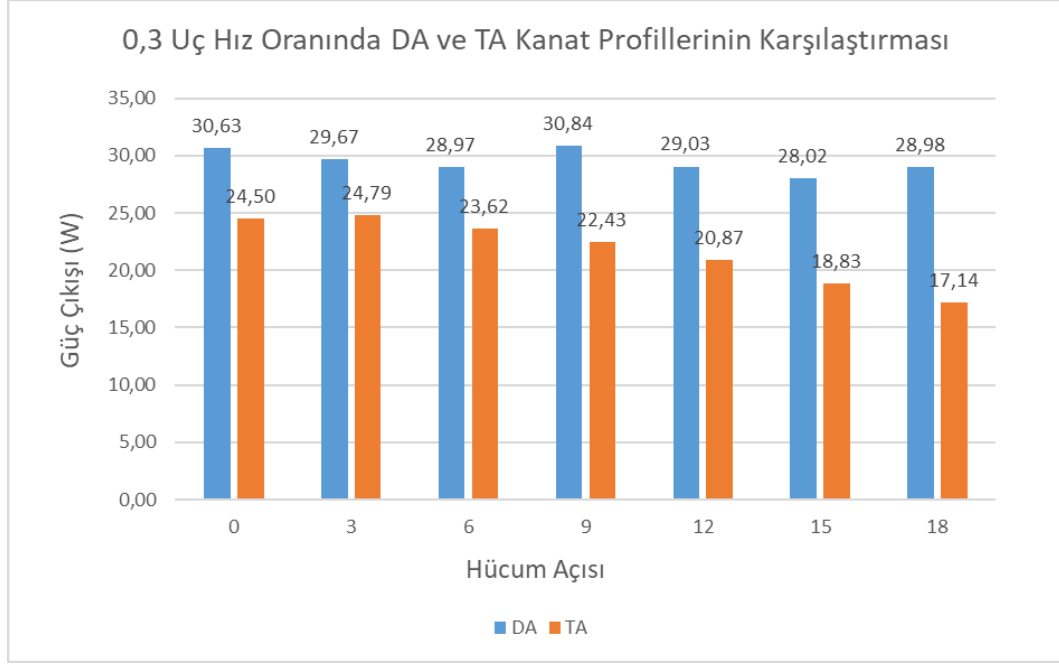
0,3 uç hız oranında TA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 3° hücum açısında kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin ters etkiye maruz kalmadığı için her dönme konumunda ilk hareket kabiliyetinin olduğu, 0° hücum açısında kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin 80° dönme konumunda ters etkiye maruz kaldığı ancak sonrasında dönüşün stabil olduğu, 6° hücum açısında kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin 80° ve 200° dönme konumlarında ters etkiye maruz kaldığı ancak diğer dönme konumlarında dönüşün stabil olduğu, diğer hücum açılarında kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin ise sürekli ters etkilere maruz kaldığı ve dönüşlerinin stabil olmadığı sonucuna varılmıştır.

TA kanat profile sahip türbinlerin 0,3 uç hız oranında dönme konumunun 60° ile 100° ve 180° ile 220° olduğu aralıklarda en düşük moment değerlerine 100° ile 180° ve 220° ile 300° olduğu yerlerde ise en yüksek moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.30. 0,3 uç hız oranında TA kanat profillerinin karşılaştırması

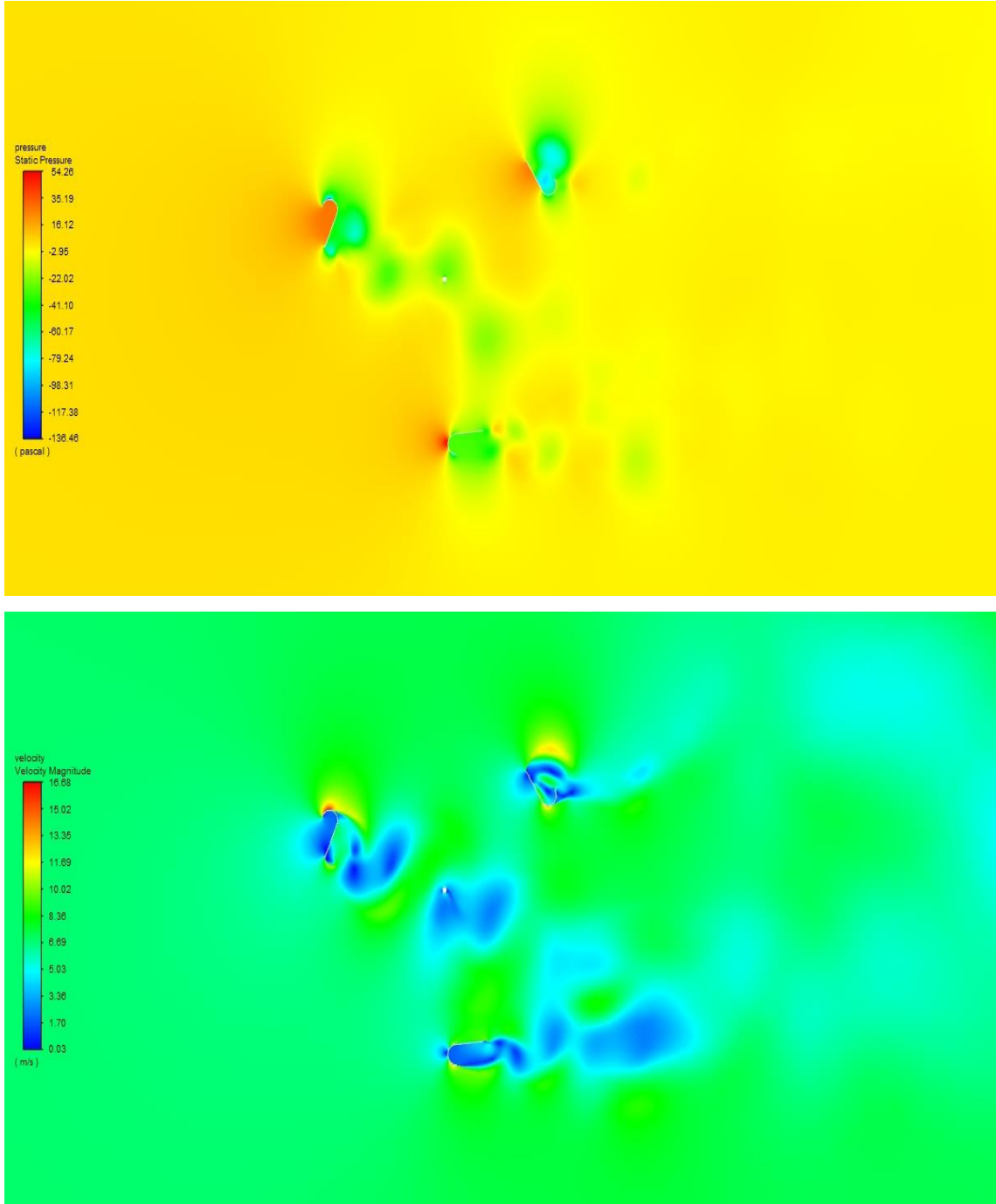
0,3 uç hız oranında TA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısı 0° ‘den 3° ‘ye geçerken elde edilen gücün arttığı 3° ile 18° aralığındaki bölgede ise hücum açısı ile elde edilen güç ters orantılı olarak düşüş gösterdiği görülmektedir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.30‘da verilmiştir. 0,3 uç hız oranında 630TA18 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 17,14 W ile en düşük seviyesinde iken 630TA3 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 24,79 W ile en yüksek seviyesindedir.



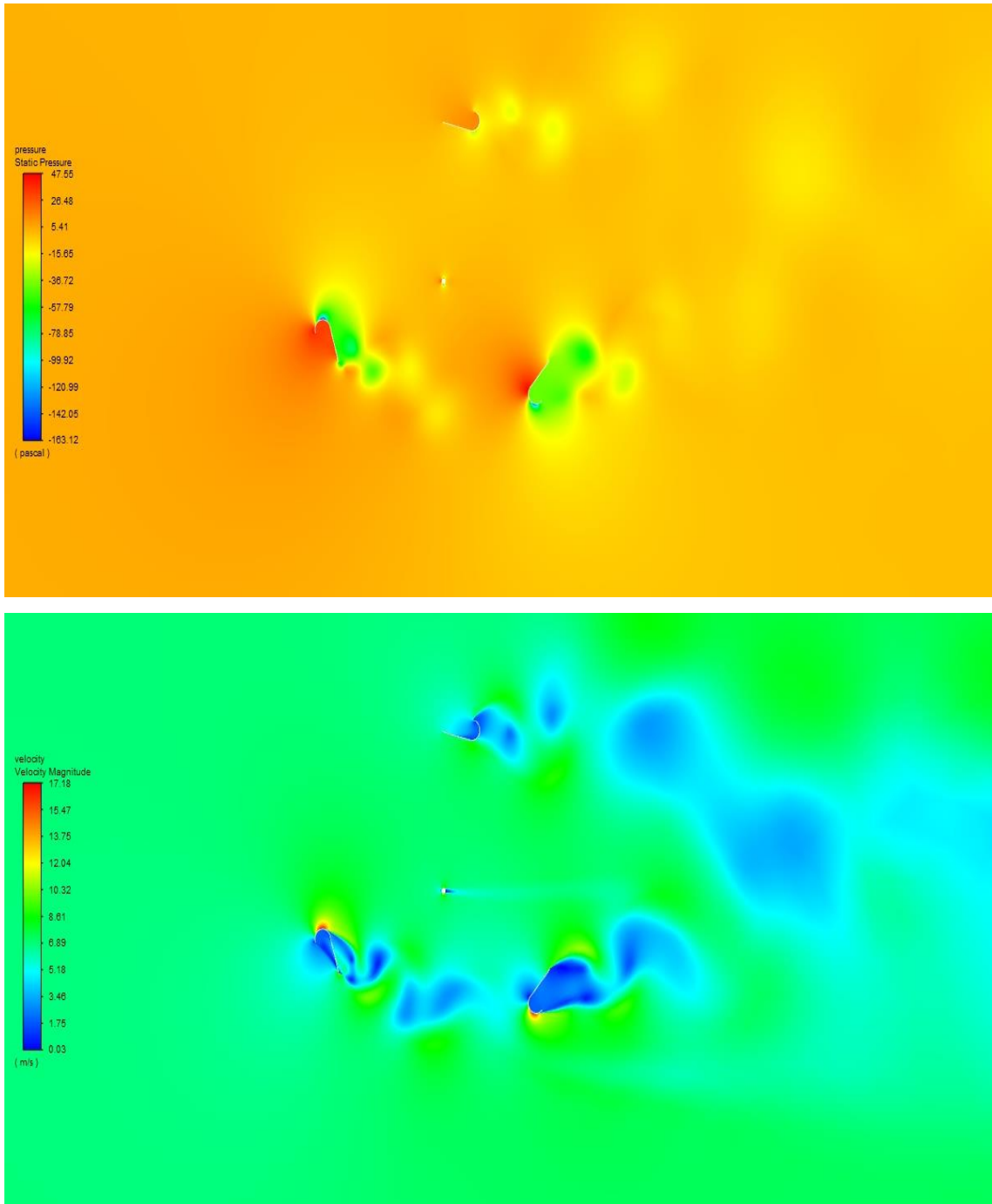
Şekil 4.31 0,3 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin karşılaştırması

Uç hız oranı 0, 3 olan DA ve TA kanat profillerinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarındaki analiz çözümlerinden elde edilen değerler değerlendirildiğinde bu uç hız oranında ve bu çalışma kapsamındaki tüm hücum açılarında DA kanat profili daha iyi performans göstermiştir. Aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %19 ila %70 daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. 0,3 uç hız oranında analizi yapılan kanat profillerinden 630DA0, 630DA3 ve 630TA3 'te ters etki meydana gelmemiş, geriye kalan DA kanat profillerinde ve TA kanat profillerinde ters etki meydana gelmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar ve değerlendirmeler göz önüne alındığında 0,3 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbininin için en uygun kanat profilinin 630DA0 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.

630DA0 kanat profiline sahip olan dikey eksenli rüzgar türbininin 0,3 uç hız oranında yapılan analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde moment değerinin en düşük seviyede olduğu 294° dönme konumundaki ve en yüksek seviyede olduğu 252° dönme konumundaki basınç ve hız konturları sırasıyla Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde 294° dönme konumundaki momentin düşük olmasının sebebi kanat profillerinin birbirlerini engellemesinden, 252° dönme konumundaki momentin yüksek olmasının sebebi ise kanat profillerinin birbirlerinden bağımsız olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır.



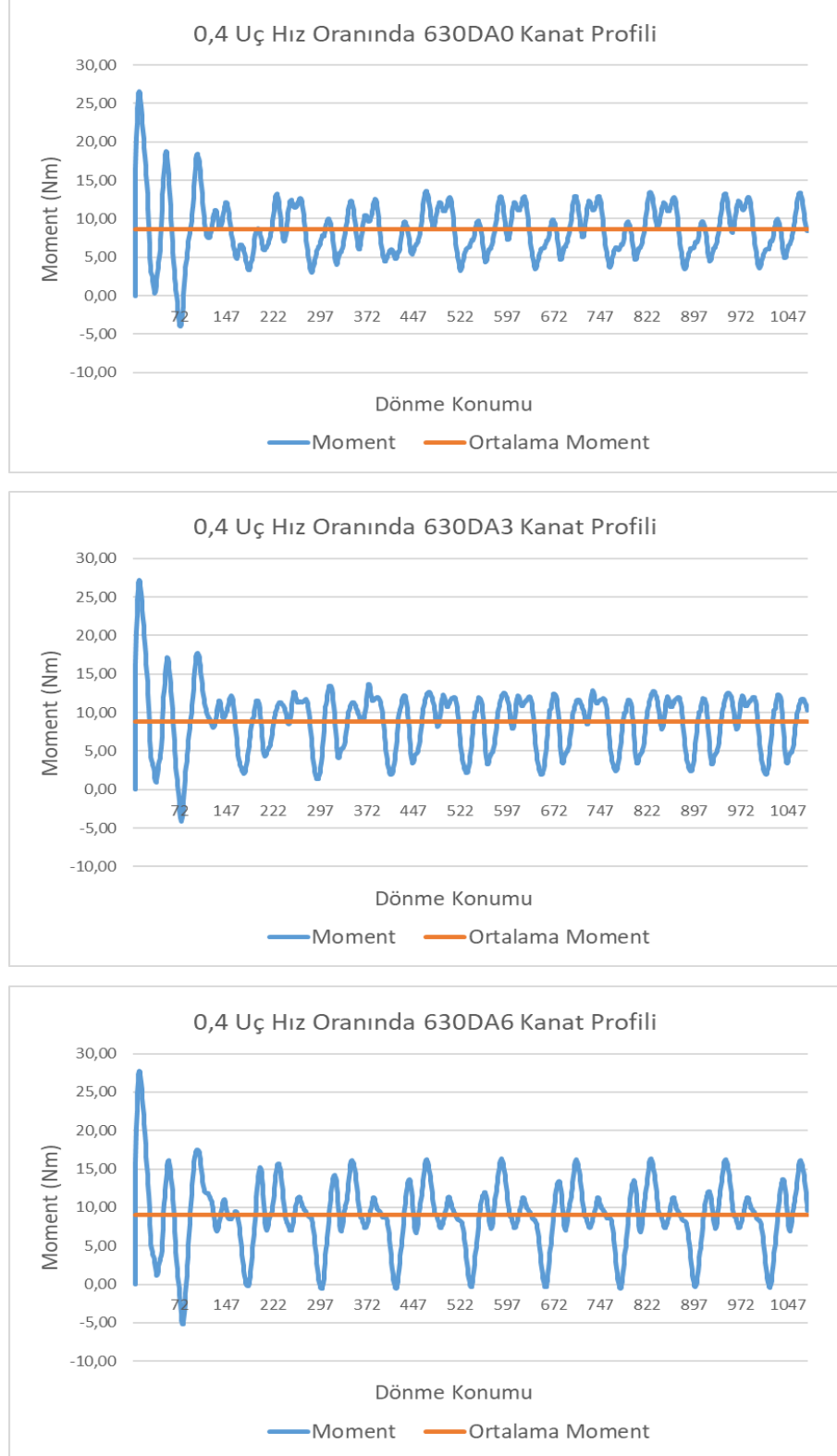
Şekil 4.32. 0,3 uç hız oranında 630DA0'ın en düşük güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 294°)



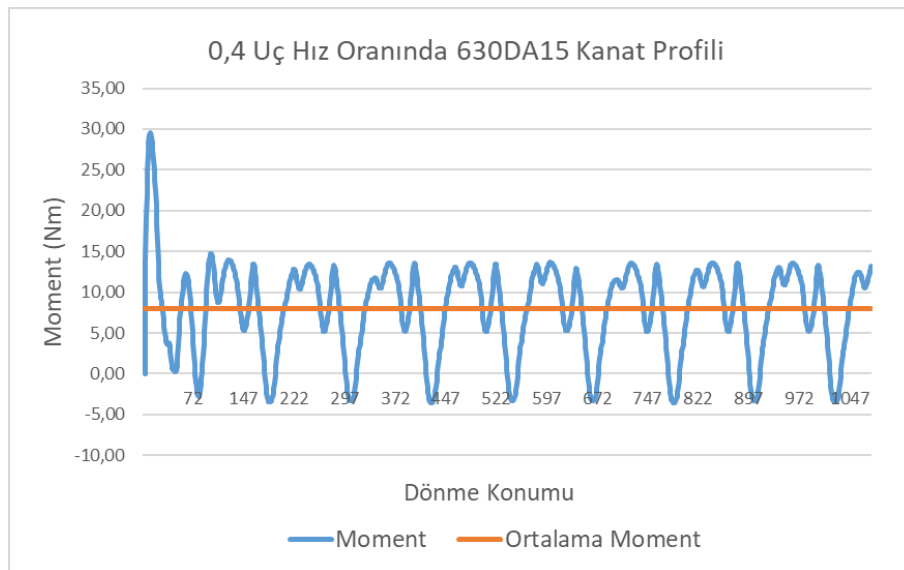
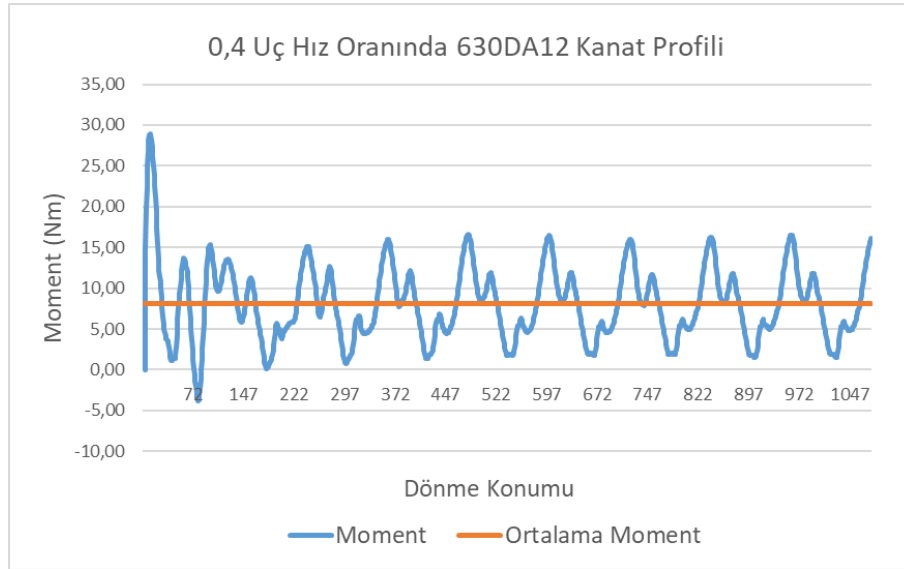
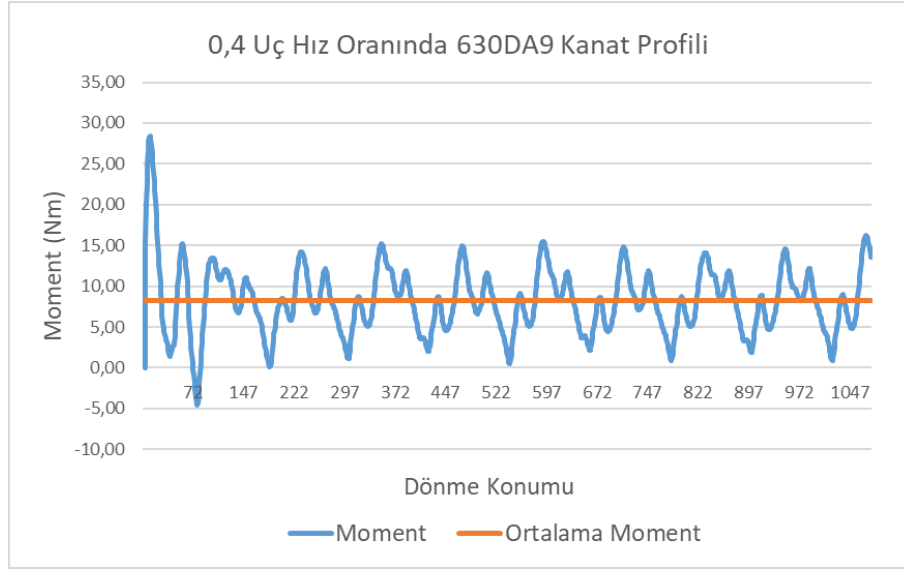
Şekil 4.33. 0,3 uç hız oranında 630DA0'ın en yüksek güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 252°)

4.4.5. 0,4 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması

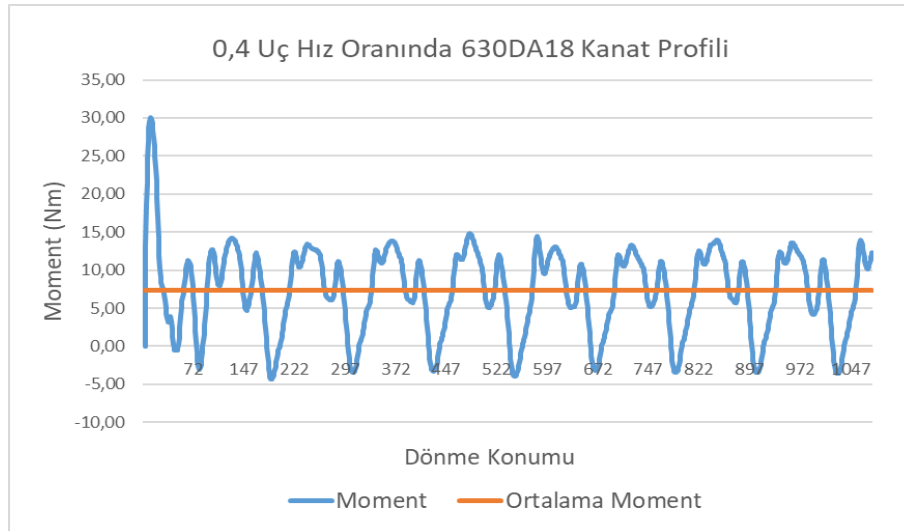
0,4 uç hız oranında DA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.34'te gösterilmiştir.



Şekil 4.34. 0,4 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları



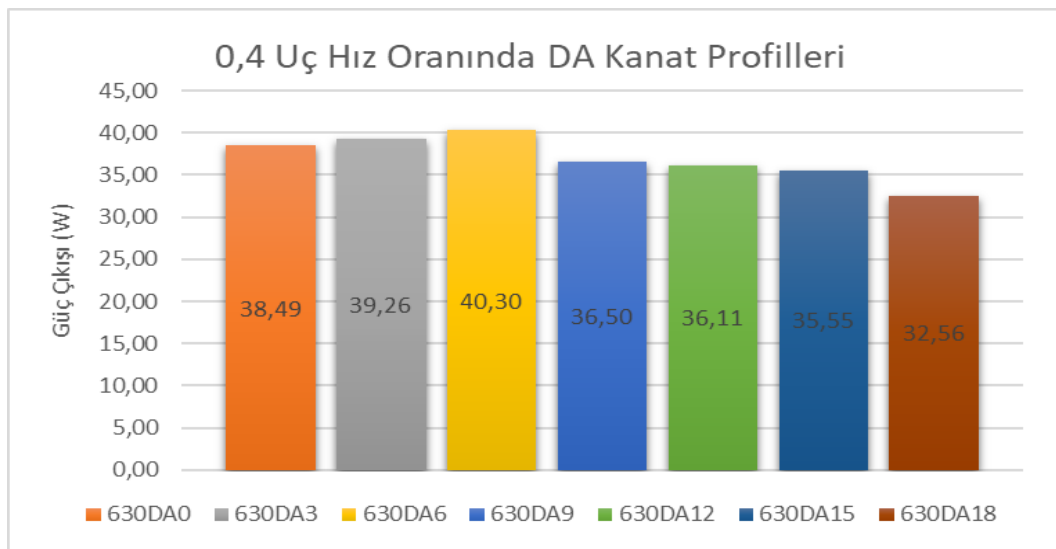
Şekil 4.34. 0,4 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.34. 0,4 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

0,4 uç hız oranında DA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 0° , 3° , 9° ve 12° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin 80° dönme konumunda ters etkiye maruz kaldığı ancak sonrasında dönüşün stabil olduğu ve her konumda ilk hareket kabiliyetine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 6° , 15° ve 18° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinleri 80° , 180° ve 300° dönme konumlarında ters etkilere maruz kalığı ve her konumda ilk hareket kabiliyetine sahip olmadığı sonucuna varılmıştır.

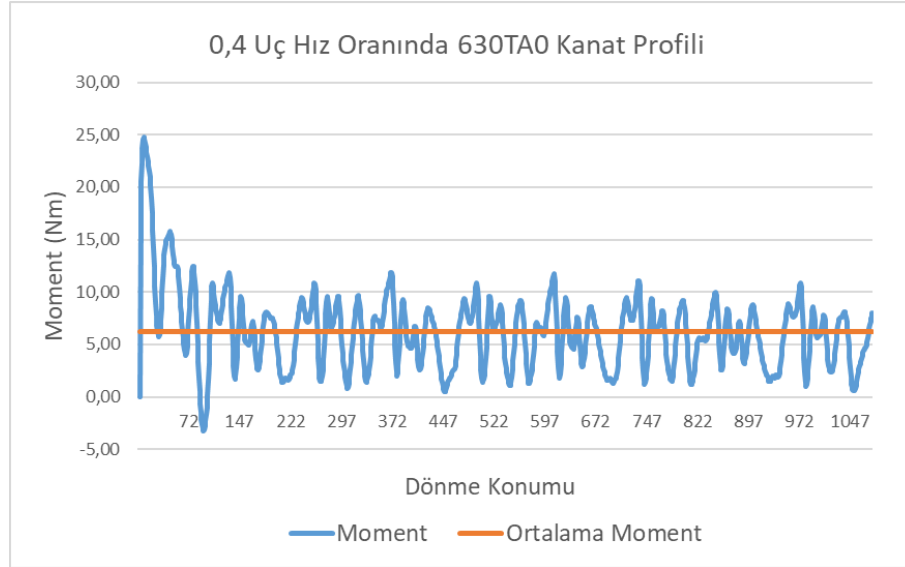
DA kanat profile sahip türbinlerin 0,4 uç hız oranında dönme konumunun 90° ile 150° ve 210° ile 270° olduğu aralıklarda en yüksek moment değerlerine 160° ile 180° ve 280° ile 300° olduğu yerlerde ise en düşük moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



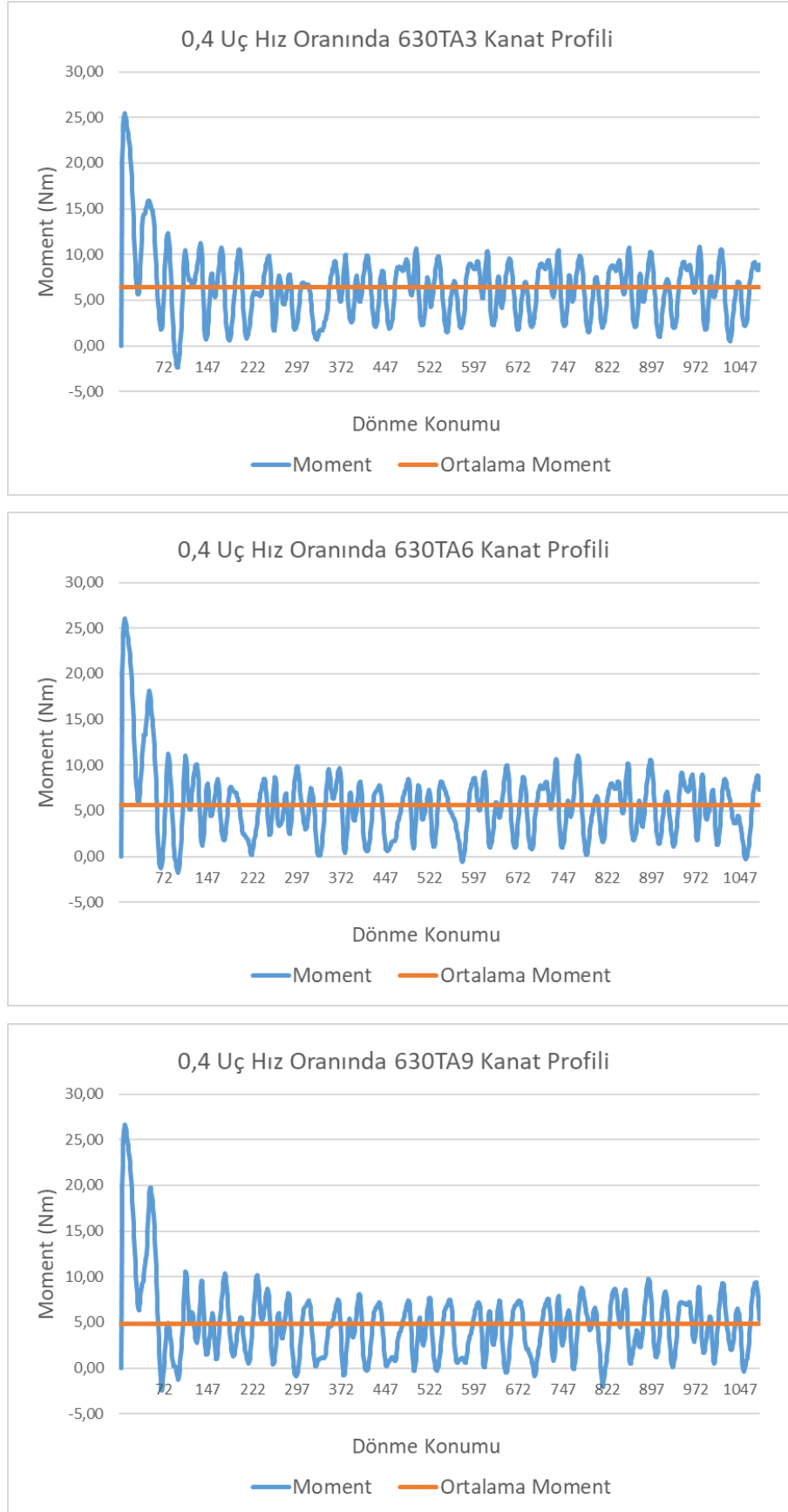
Şekil 4.35. 0,4 uç hız oranında DA kanat profillerinin karşılaştırması

0,4 uç hız oranında DA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısı 0° ile 6° aralığındaki bölgede hücum açısının artışına paralel olarak elde edilen gücün arttığı, 6° hücum açısında elde edilen güç değerinin en yüksek seviyeyi gördüğü ve 6° ile 18° aralığındaki bölgede hücum açısı ile elde edilen güç değerinin ters orantılı olarak düşüş gösterdiği görülmektedir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.35'te verilmiştir. 0,4 uç hız oranında 630DA18 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 32,56 W ile en düşük seviyesinde iken 630DA6 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 40,30 W ile en yüksek seviyesindedir.

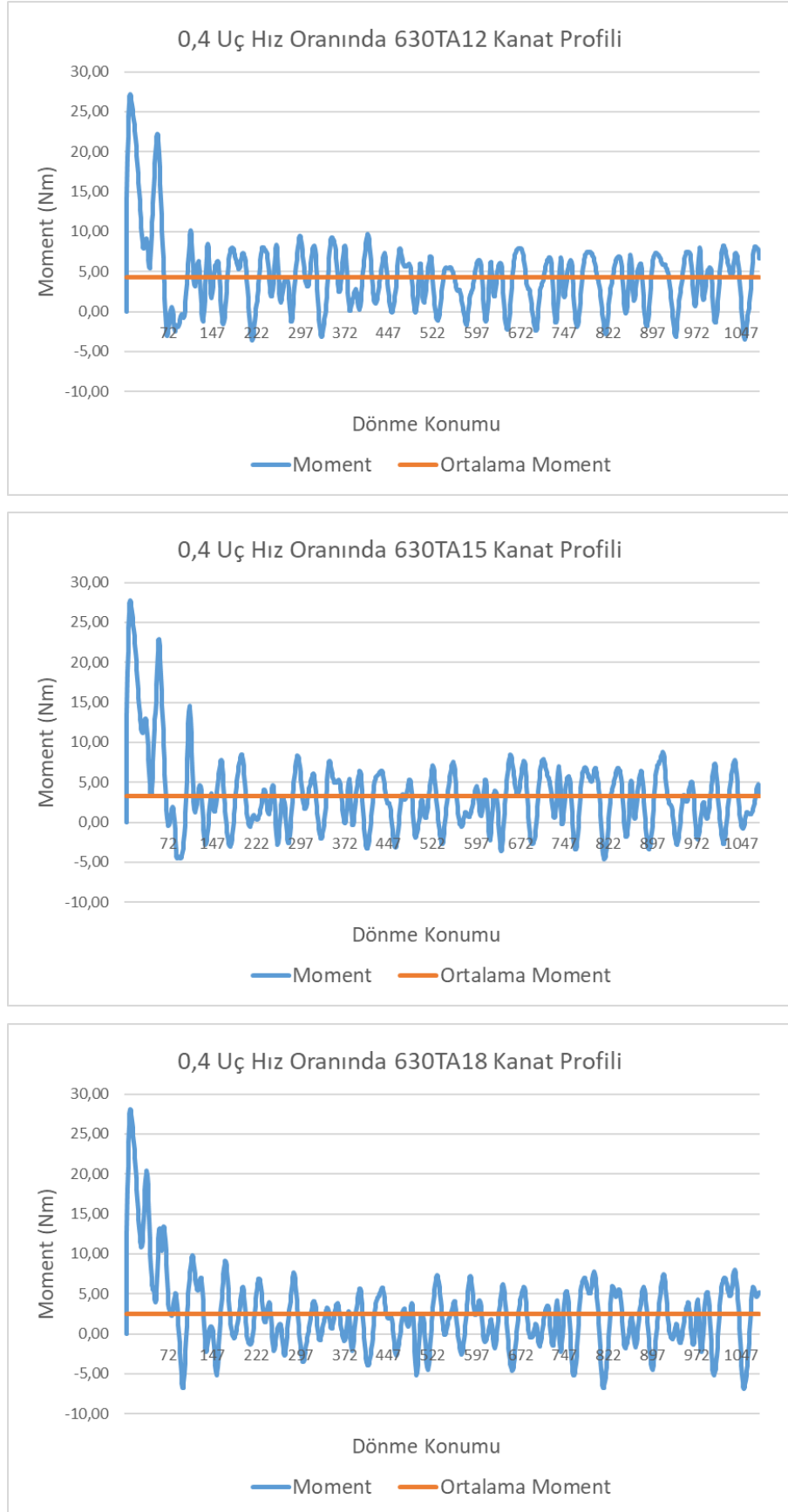
0,4 uç hız oranında TA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.36. 0,4 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları



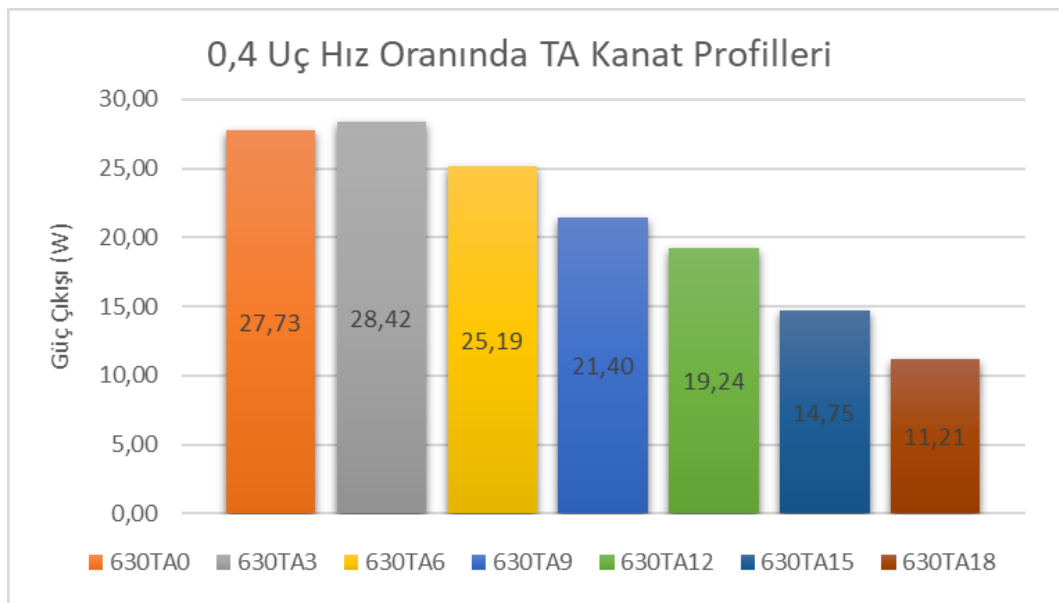
Şekil 4.36. 0,4 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.36. 0,4 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

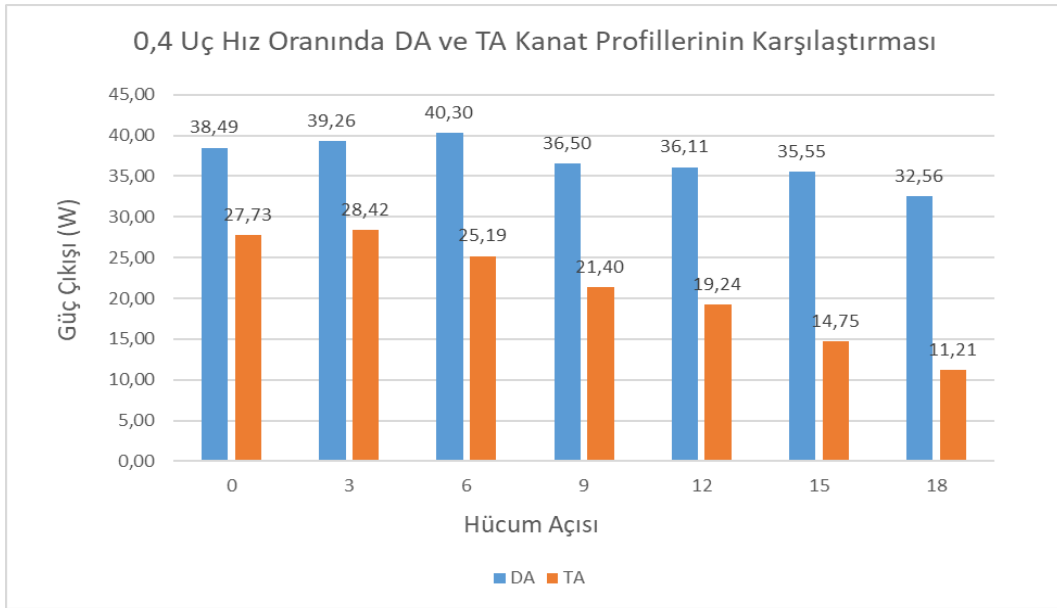
0,4 uç hız oranında TA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 0° ve 3° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin 90° dönme konumunda ters etkiye maruz kaldığı ancak sonrasında dönüşün stabil olduğu ve her konumda ilk hareket kabiliyetine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin bir çok dönme konumunda ters etkilere maruz kaldığı ve her konumda ilk hareket kabiliyetine sahip olmadığı sonucuna varılmıştır.

TA kanat profile sahip türbinlerin 0,4 uç hız oranında dönme konumunun değişimine bağlı olarak çok değişken moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.37. 0,4 uç hız oranında TA kanat profillerinin karşılaştırması

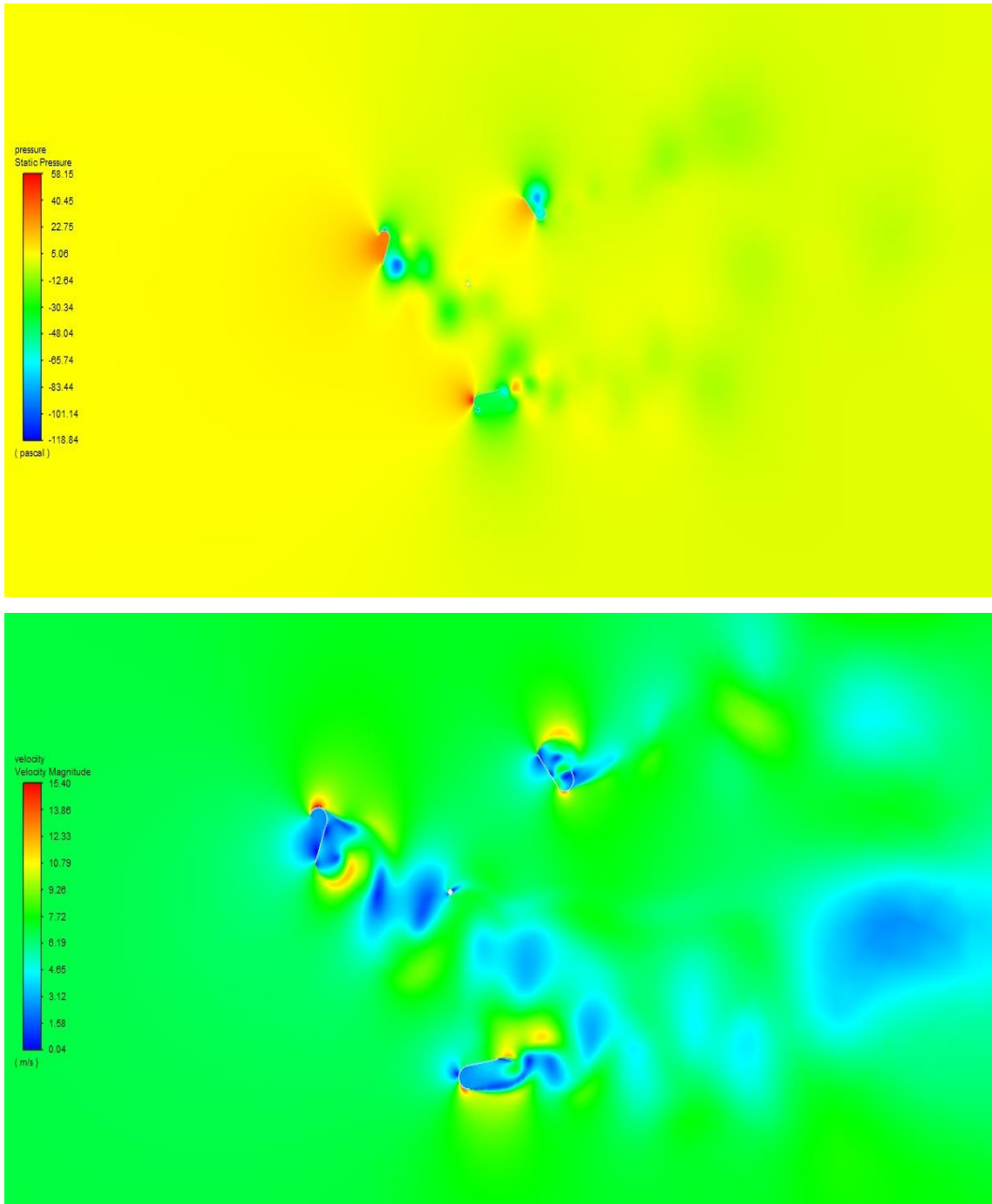
0,4 uç hız oranında TA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısı 0° 'den 3° 'ye geçerken elde edilen gücün arttığı 3° ile 18° aralığındaki bölgede ise hücum açısı ile elde edilen güç ters orantılı olarak düşüş gösterdiği görülmektedir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.37'de verilmiştir. 0,4 uç hız oranında 630TA18 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 11,21 W ile en düşük seviyesinde iken 630TA3 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 28,42 W ile en yüksek seviyesindedir.



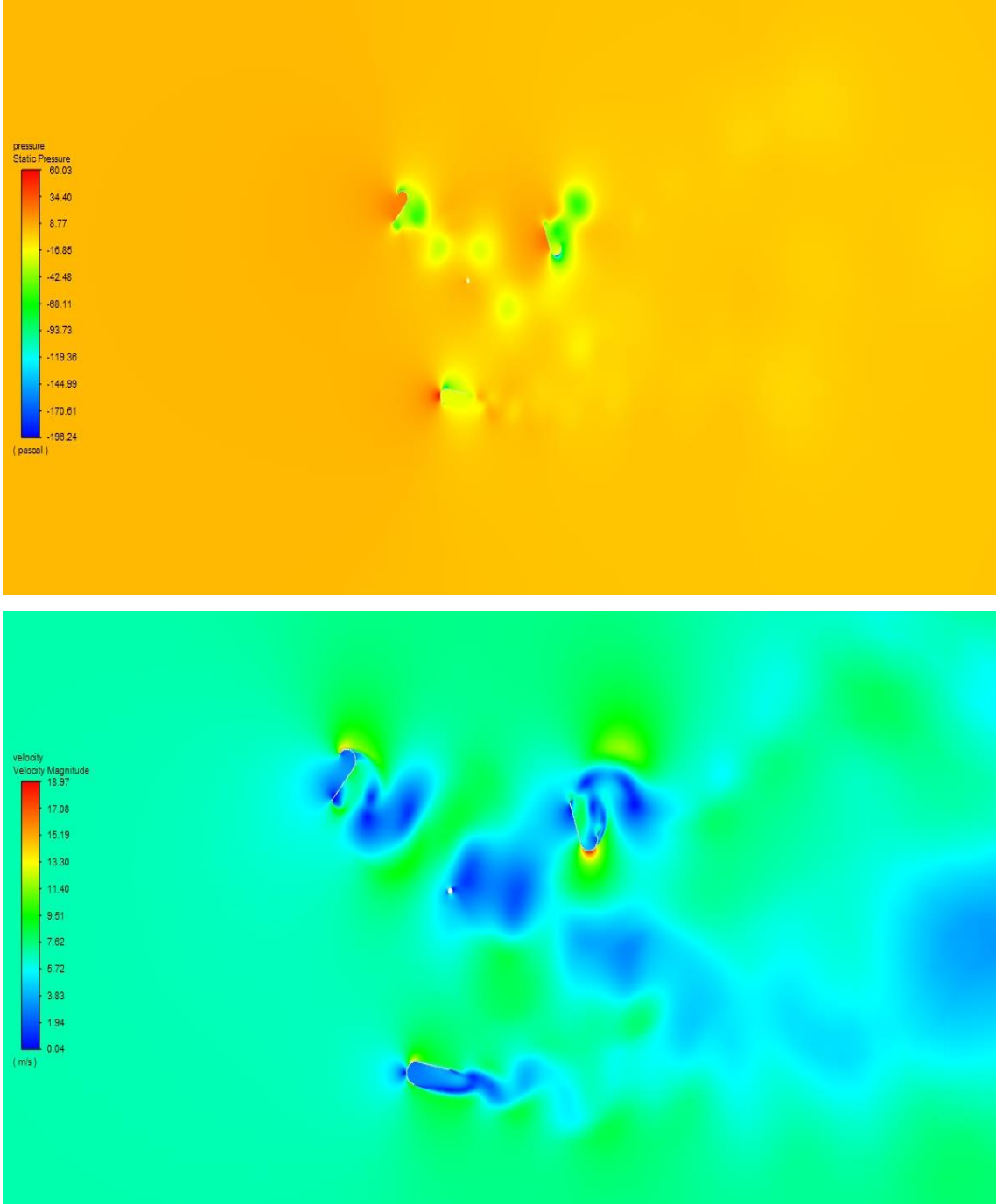
Şekil 4.38. 0,4 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin karşılaştırması

Uç hız oranı 0,4 olan DA ve TA kanat profillerinin 0°, 3°, 6°, 9°, 12°, 15° ve 18° hücum açılarındaki analiz çözümlerinden elde edilen değerler değerlendirildiğinde bu uç hız oranında ve bu çalışma kapsamındaki tüm hücum açılarındaki DA kanat profili daha iyi performans göstermiştir. Aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %38 ila %290 daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. 0,4 uç hız oranında analizi yapılan kanat profillerinden 630DA6, 630DA155, 630DA18, 630TA9, 630TA12, 630TA15 ve 630TA18 'de ters etki meydana gelmiştir. Geriye kalan DA kanat profillerinde ve TA kanat profillerinde ters etki meydana gelmemiş ve bu profiller ilk hız kabiliyetine sahiptirler. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.38 'de gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar ve değerlendirmeler göz önüne alındığında 0,4 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbininin için en uygun kanat profilinin 630DA3 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.

630DA3 kanat profiline sahip olan dikey eksenli rüzgar türbininin 0,4 uç hız oranında yapılan analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde moment değerinin en düşük seviyede olduğu 292° dönme konumundaki ve en yüksek seviyede olduğu 313° dönme konumundaki basınç ve hız konturları sırasıyla Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde 292° dönme konumundaki momentin düşük olmasının sebebi kanat profillerinin birbirlerini engellemesinden, 313° dönme konumundaki momentin yüksek olmasının sebebi ise kanat profillerinin birbirlerinden bağımsız olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır.



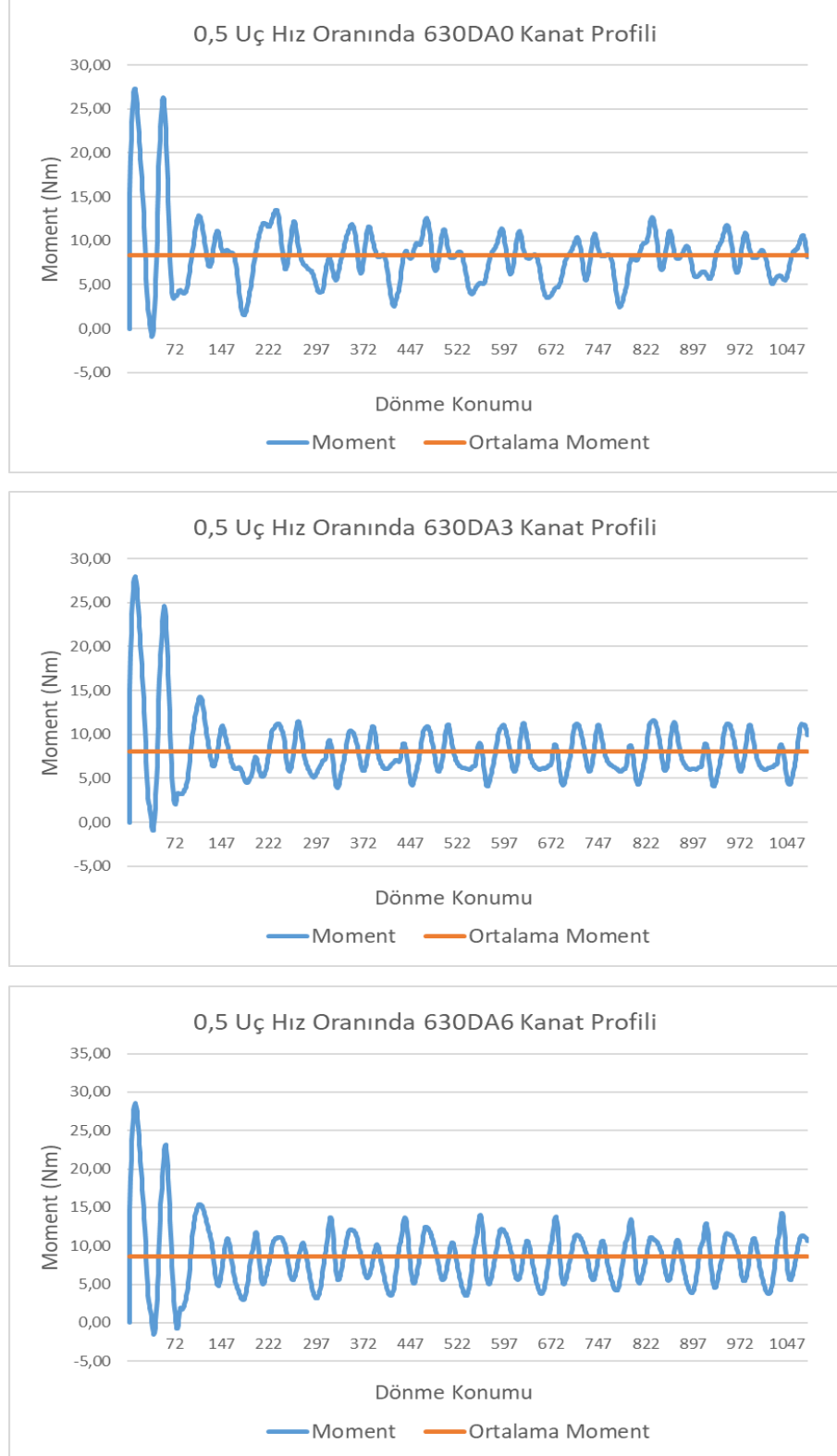
Şekil 4.39. 0,4 uç hız oranında 630DA3'ün en düşük güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 292°)



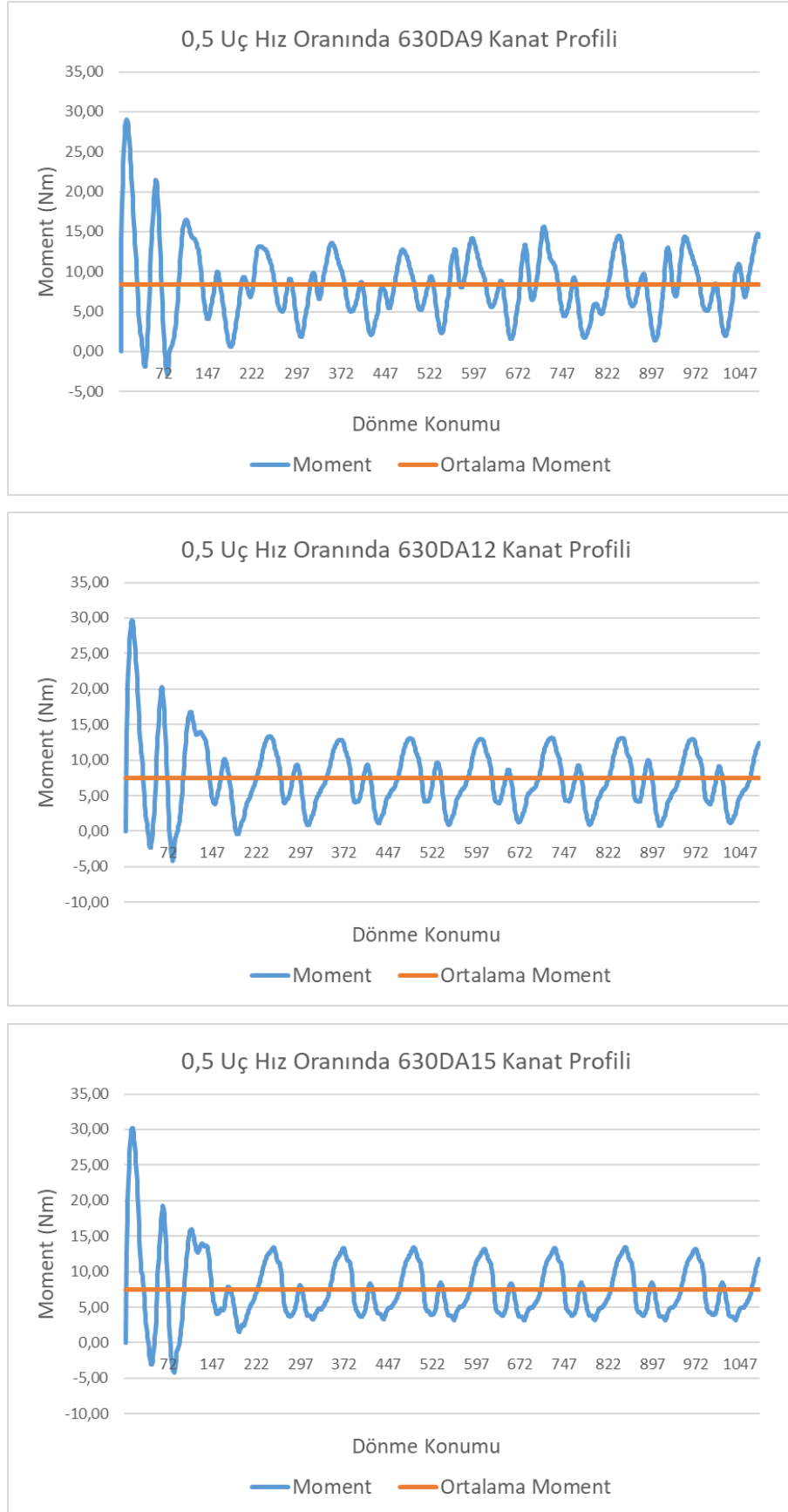
Şekil 4.40. 0,4 uç hız oranında 630DA3'ün en yüksek güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 313°)

4.4.6. 0,5 Uç Hız Oranında DA ve TA Kanat Profillerinin Karşılaştırılması

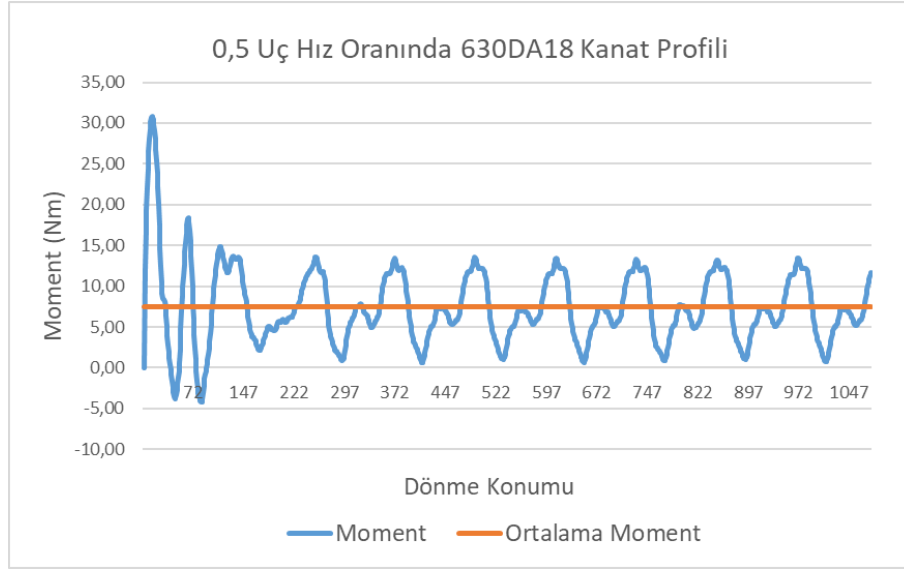
0,5 uç hız oranında DA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.41’de gösterilmiştir.



Şekil 4.41. 0,5 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları



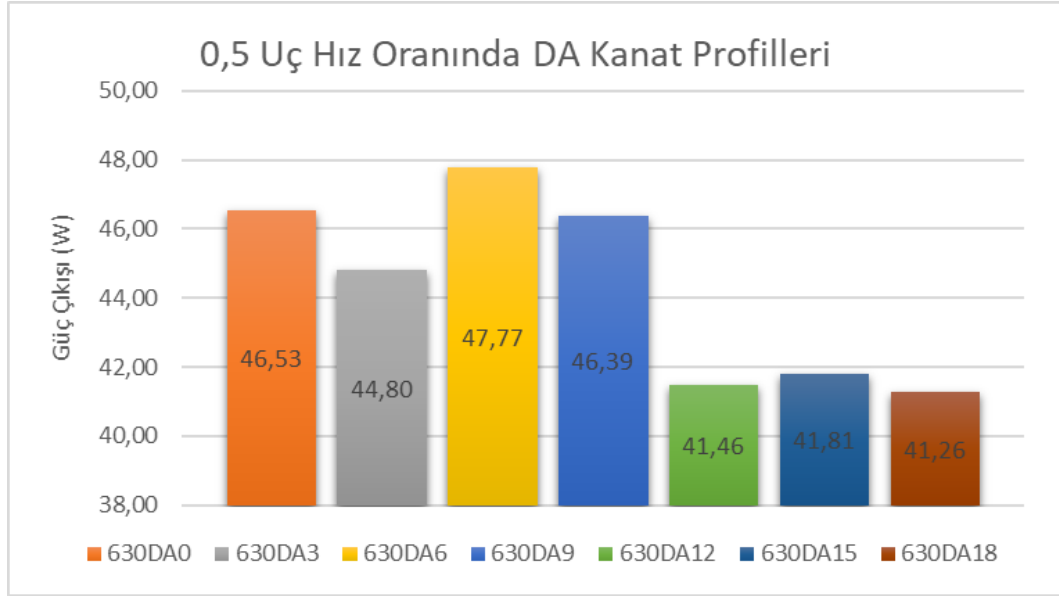
Şekil 4.41. 0,5 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.41. 0,5 uç hız oranında DA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

0,5 uç hız oranında DA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde 0° ve 3° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin 35° dönme konumunda ters etkiye maruz kaldığı ancak sonrasında dönüşün stabil olduğu ve her konumda ilk hareket kabiliyetine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin 35° ve 70° dönme konumlarında ters etkilere maruz kaldığı ancak sonrasında dönüşün stabil olduğu ve her konumda ilk hareket kabiliyetine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

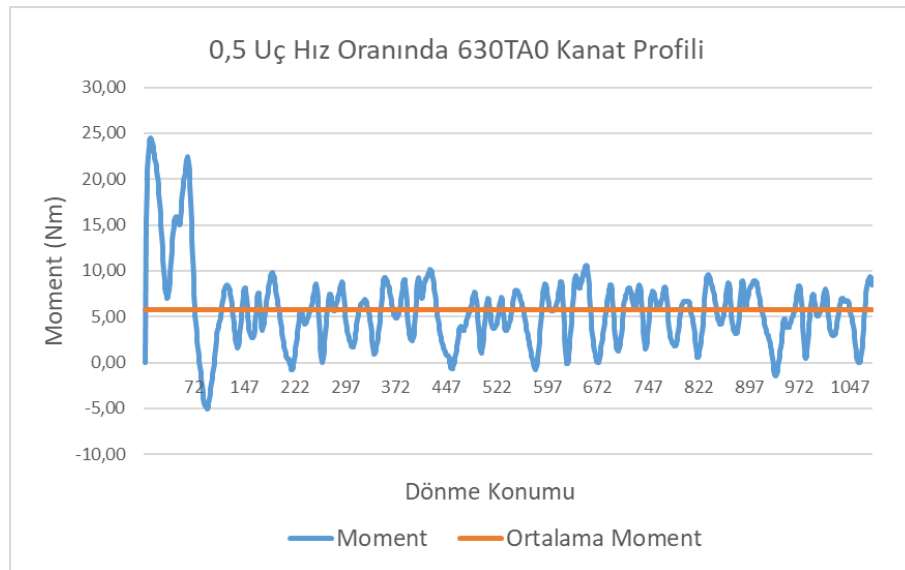
DA kanat profile sahip türbinlerin 0,5 uç hız oranında dönme konumunun 100° ile 140° , 220° ile 260° ve 340° ile 380° olduğu aralıklarda en yüksek moment değerlerine, 150° ile 190° ve 270° ile 310° olduğu yerlerde ise en düşük moment değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



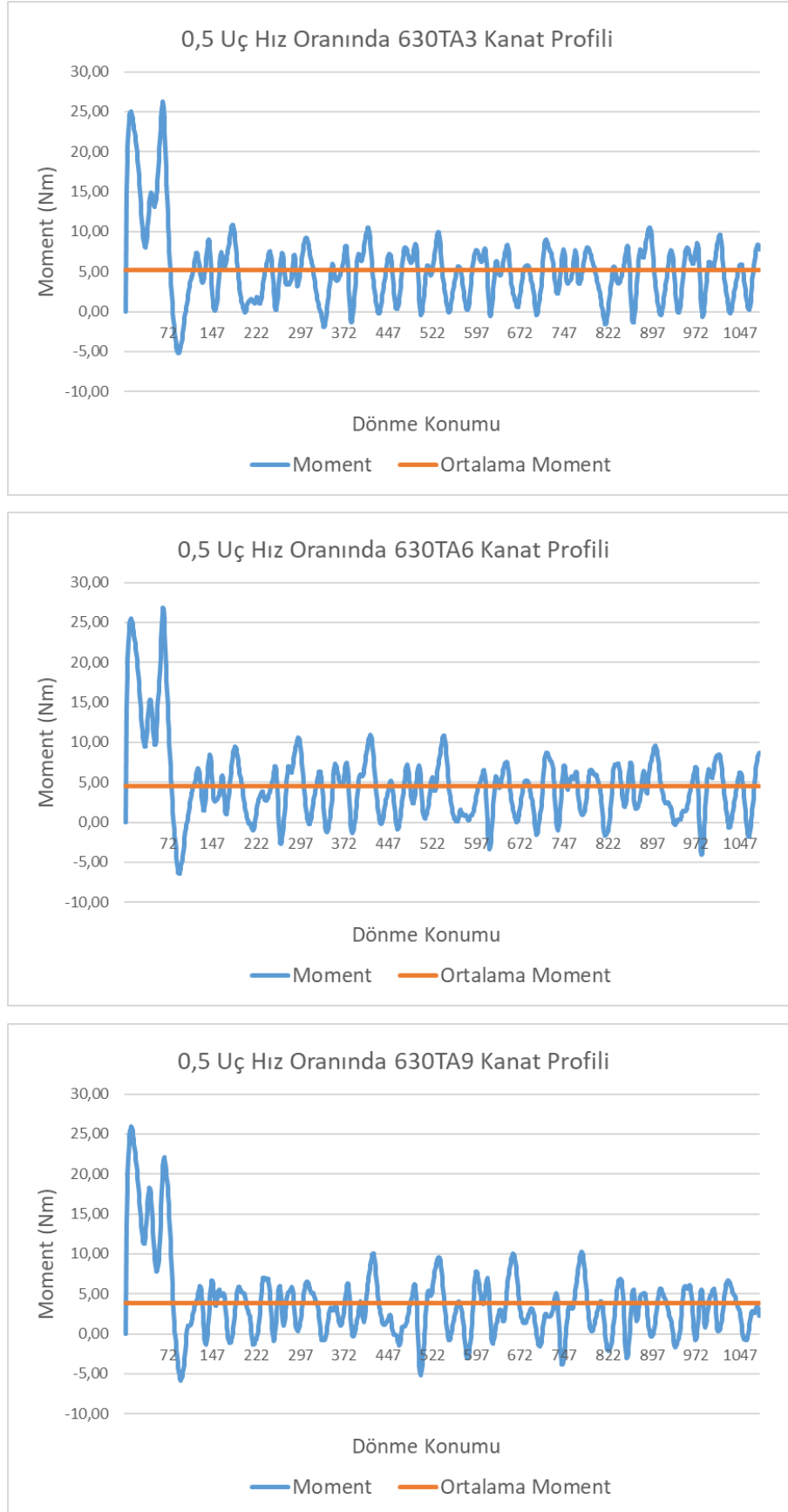
Şekil 4.42. 0,5 uç hız oranında DA kanat profillerinin karşılaştırması

0,5 uç hız oranında DA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları elde edilen güç değerlerine göre karşılaştırıldığında hücum açısı 6° olan kanat profiline sahip türbinlerden elde edilen güç $47,77$ W ile en yüksek seviyede 18° olan kanat profiline sahip türbinlerden elde edilen gücün ise $41,26$ W ile en düşük seviyede olduğu görülmüştür. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.42’de verilmiştir.

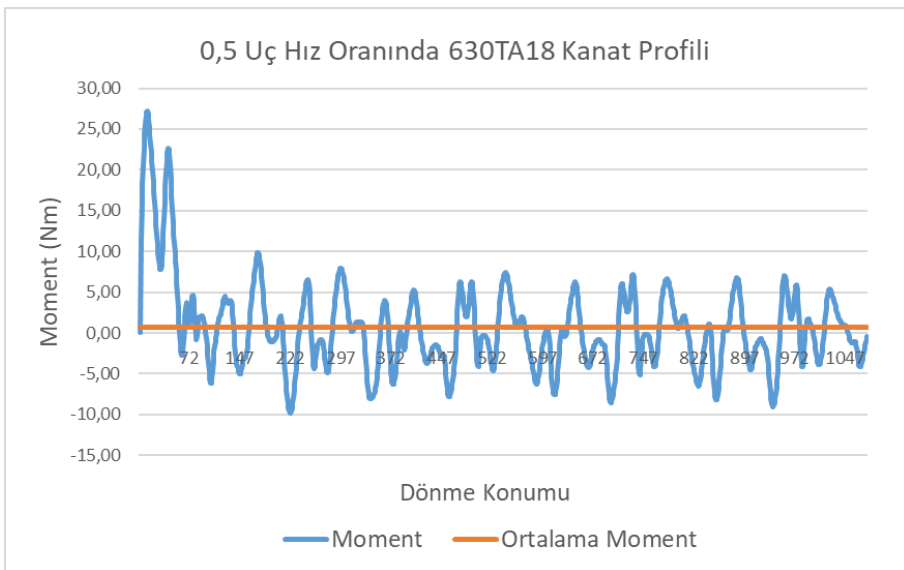
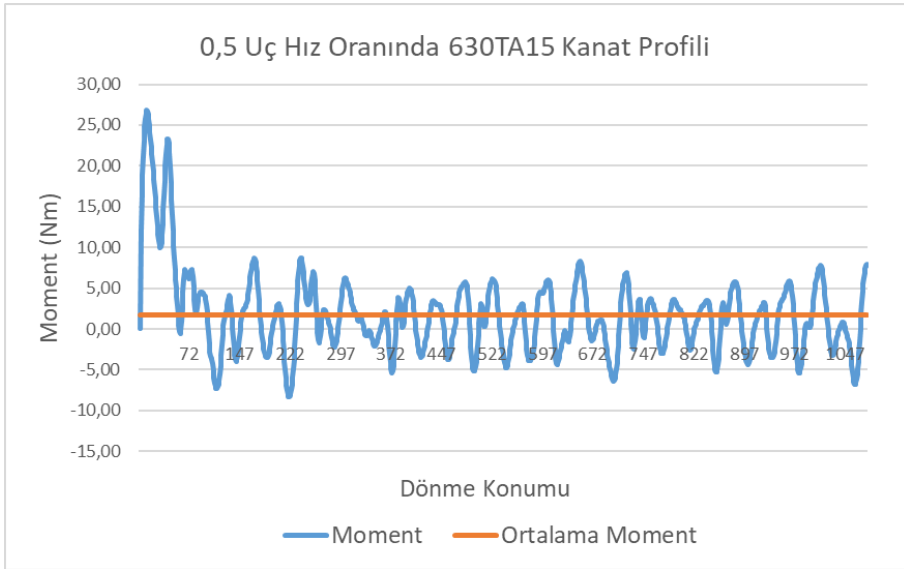
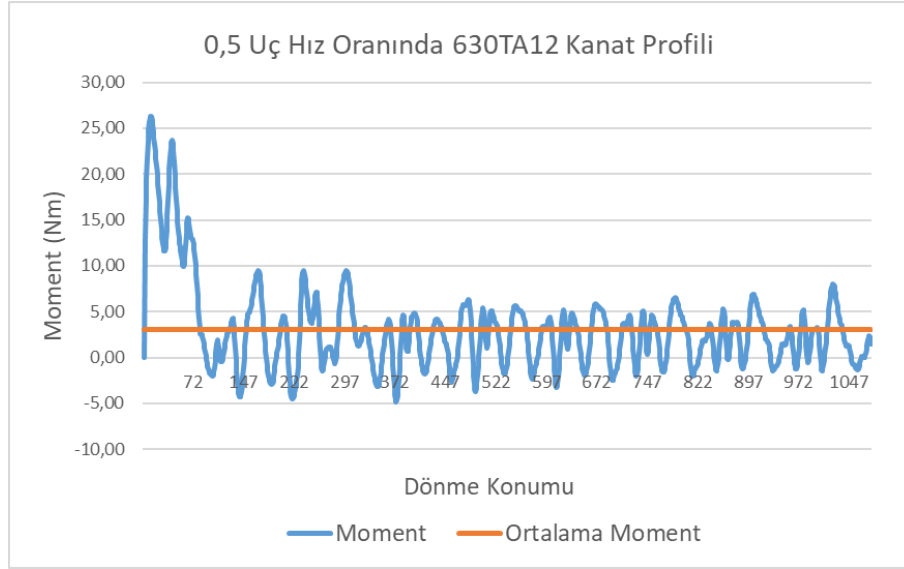
0,5 uç hız oranında TA kanat profilinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında analiz sonuçları Şekil 4.43’te gösterilmiştir.



Şekil 4.43. 0,5 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları



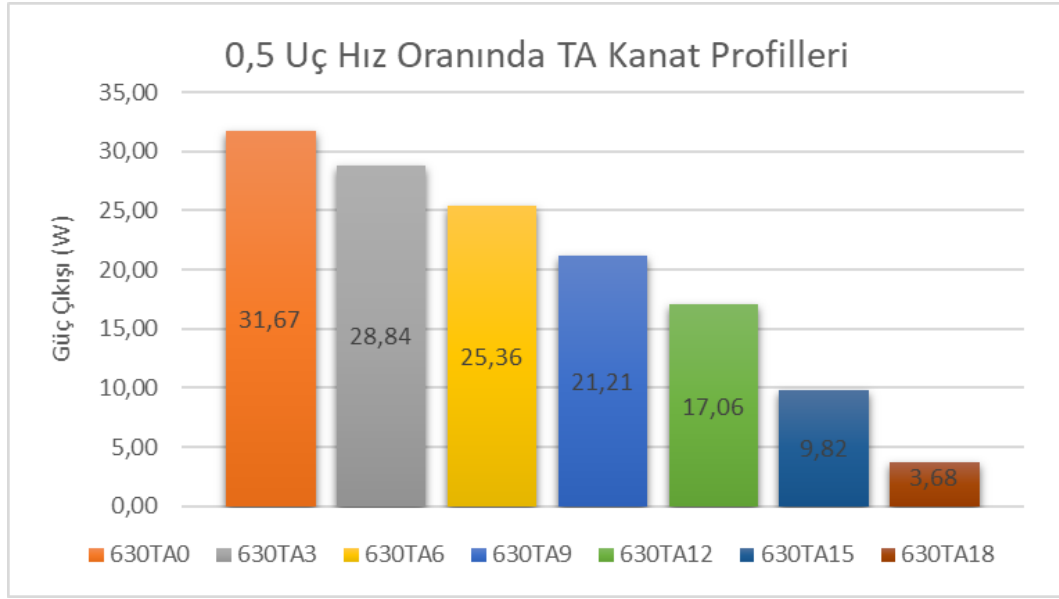
Şekil 4.43. 0,5 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)



Şekil 4.43. 0,5 uç hız oranında TA kanat profili için analiz sonuçları (Devamı)

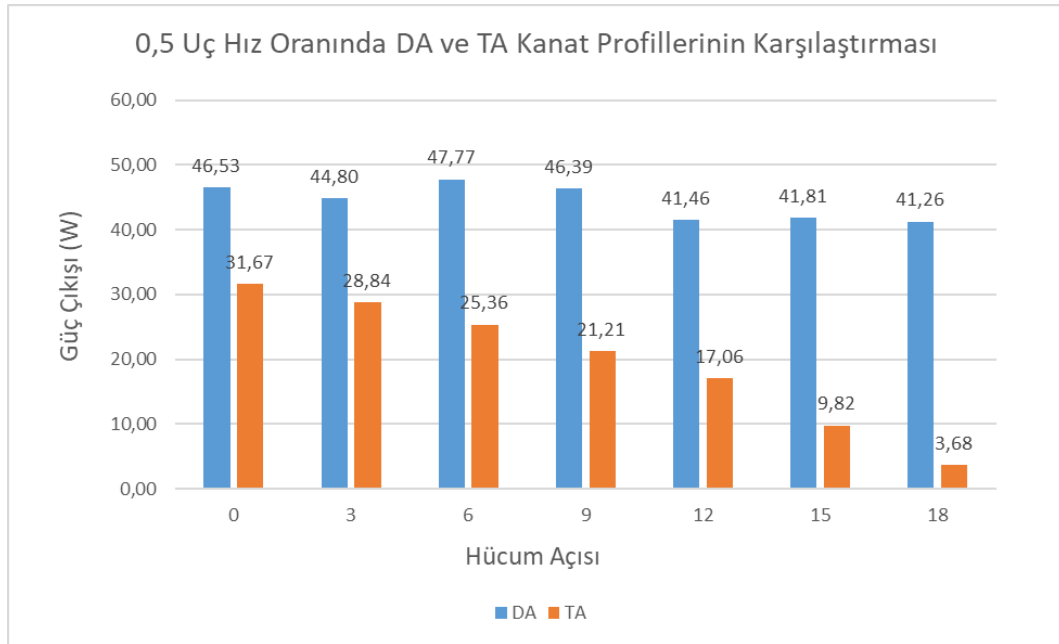
0,5 uç hız oranında TA kanat profillerinin analiz sonuçları incelendiğinde analizi yapılan bütün hücum açılarında ve birçok dönme konumunda ters etkilerle karşılaşılmış ilk hareket kabiliyetlerinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Dönüşün stabil olduğu dönme konumu aralıkları çok kısa olduğu için 0,5 uç hız oranında TA kanat profilinin uygun bir tercih olmadığı sonucuna varılmıştır.

TA kanat profiline sahip türbinlerin 0,5 uç hız oranında birçok dönme konumunda ve sıklıkla tekrar eden en yüksek ve en düşük moment değerlerine sahip olduğu için belirli bir aralık verilememiştir.



Şekil 4.44. 0,5 uç hız oranında TA kanat profillerinin karşılaştırması

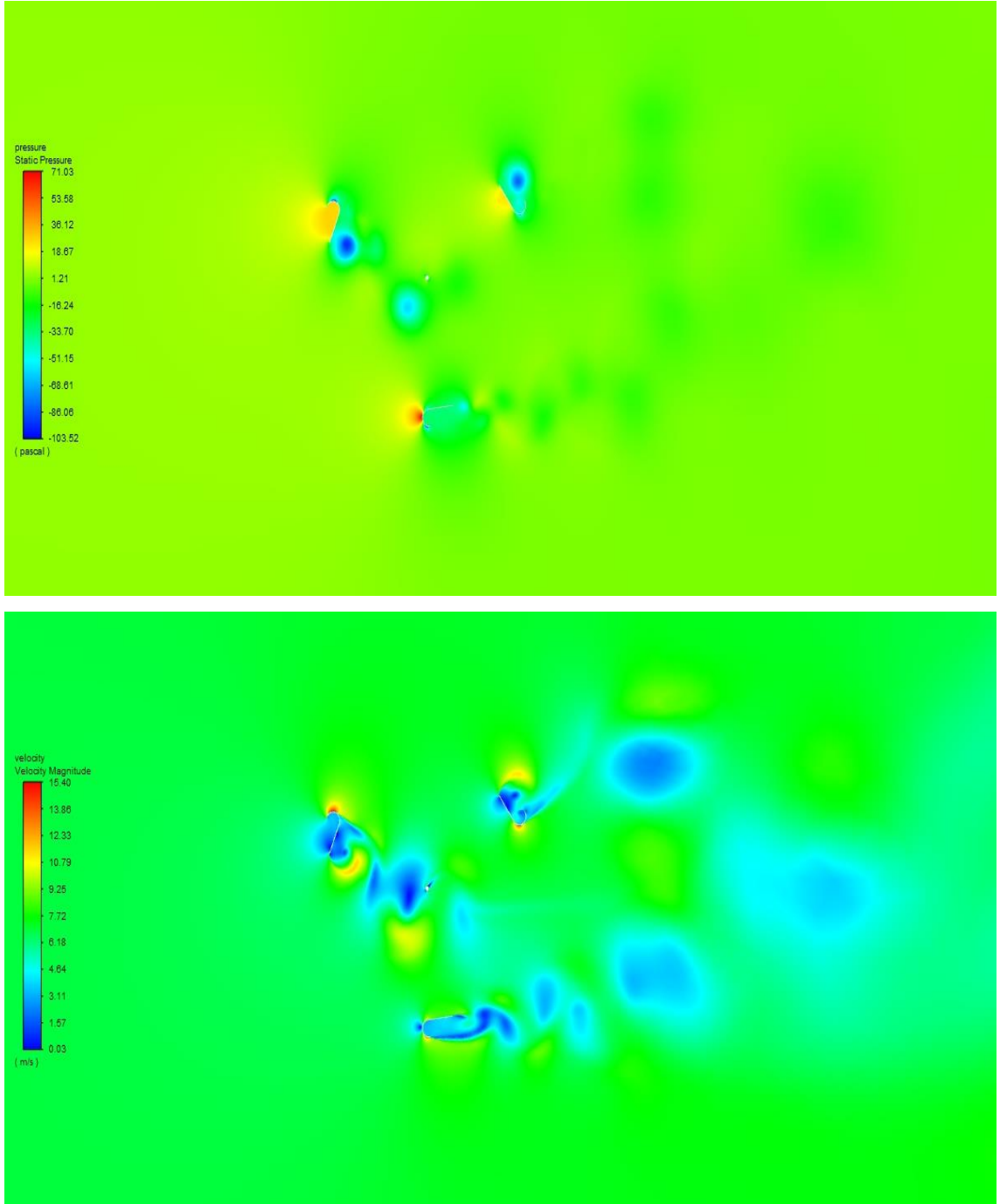
0,5 uç hız oranında TA kanat profillerine sahip rüzgar türbinlerinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında hücum açısının artışına ters orantılı olarak elde edilen gücün azaldığı tespit edilmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.44'te verilmiştir. 0,5 uç hız oranında 630TA0 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 31,67 W ile en yüksek seviyesinde iken 630TA18 kanat profiline sahip rüzgar türbininden elde edilen güç 3,68 W ile en düşük seviyesindedir.



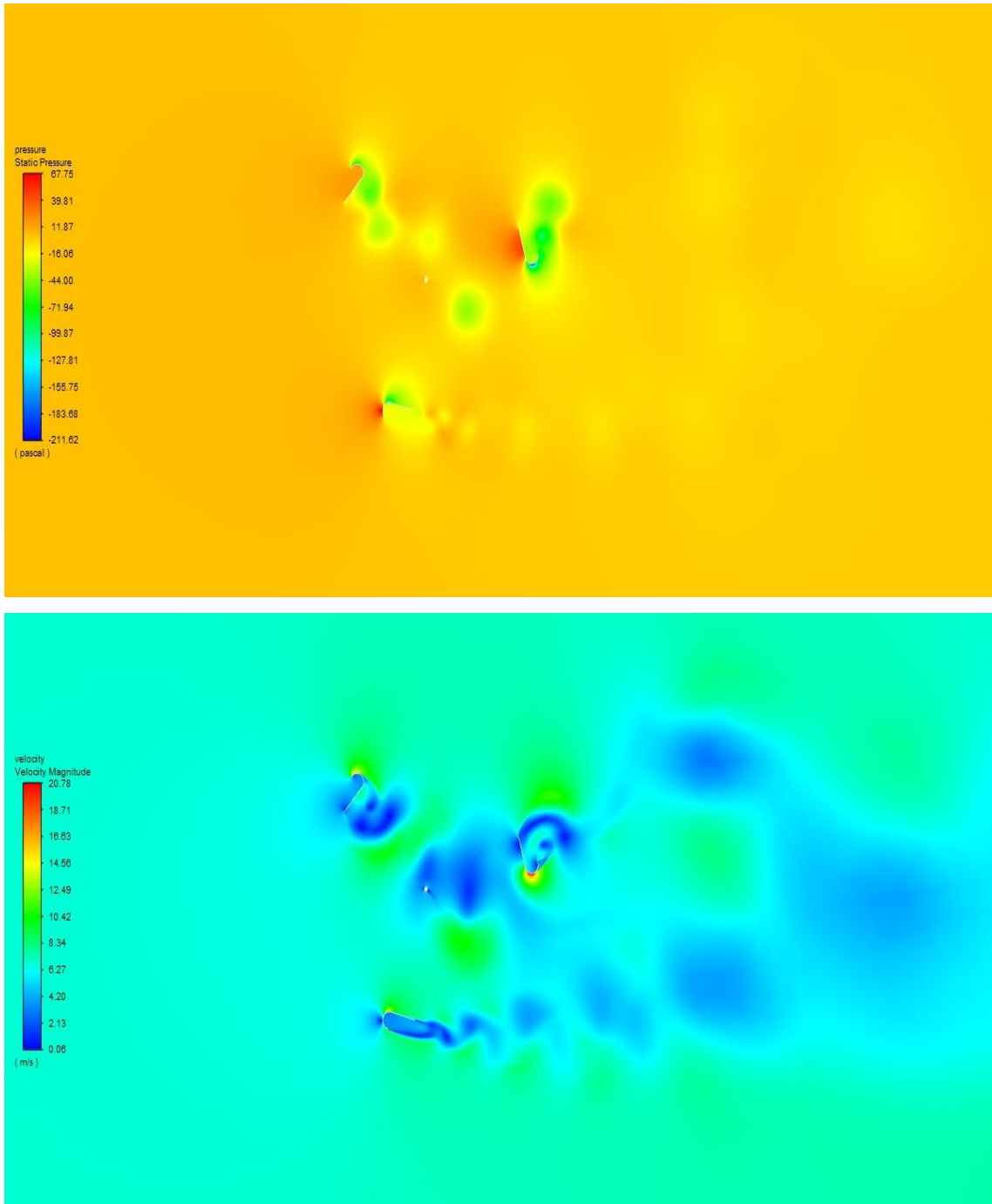
Şekil 4.45. 0,5 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin karşılaştırması

Uç hız oranı 0,5 olan DA ve TA kanat profillerinin 0°, 3°, 6°, 9°, 12°, 15° ve 18° hücum açılarındaki analiz çözümlerinden elde edilen değerler değerlendirildiğinde bu uç hız oranında ve bu çalışma kapsamındaki tüm hücum açılarında DA kanat profili daha iyi performans göstermiştir. Aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %47 ila %1120 daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. 0,5 uç hız oranında analizi yapılan TA kanat profillerinin hepsinde ters etki meydana gelirken DA kanat profillerinde 40° ve 75° dönme konumları dışında ters etkiye rastlanmadığı ve dönüşün stabil olduğu gözlemlenmiştir. Karşılaştırma grafiği Şekil 4.45'te gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar ve değerlendirmeler göz önüne alındığında 0,5 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbininin için en uygun kanat profilinin 630DA6 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.

630DA6 kanat profiline sahip olan dikey eksenli rüzgar türbininin 0,5 uç hız oranında yapılan analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde moment değerinin en düşük seviyede olduğu 298° dönme konumundaki ve en yüksek seviyede olduğu 319° dönme konumundaki basınç ve hız konturları sırasıyla Şekil 4.46 ve Şekil 4.47'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde 298° dönme konumundaki momentin düşük olmasının sebebi kanat profillerinin birbirlerini engellemesinden, 319° dönme konumundaki momentin yüksek olmasının sebebi ise kanat profillerinin birbirlerinden bağımsız olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır.



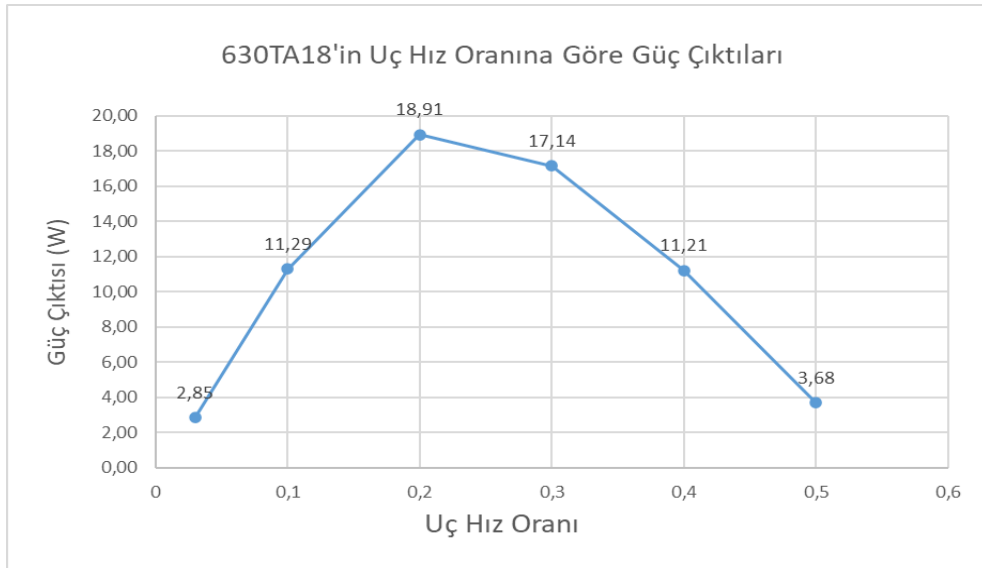
Şekil 4.46. 0,5 uç hız oranında 630DA6'nın en düşük güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 298°)



Şekil 4.47. 0,5 uç hız oranında 630DA6'nın en yüksek güç elde edilen dönme konumundaki basınç ve hız konturları (Dönme konumu 319°)

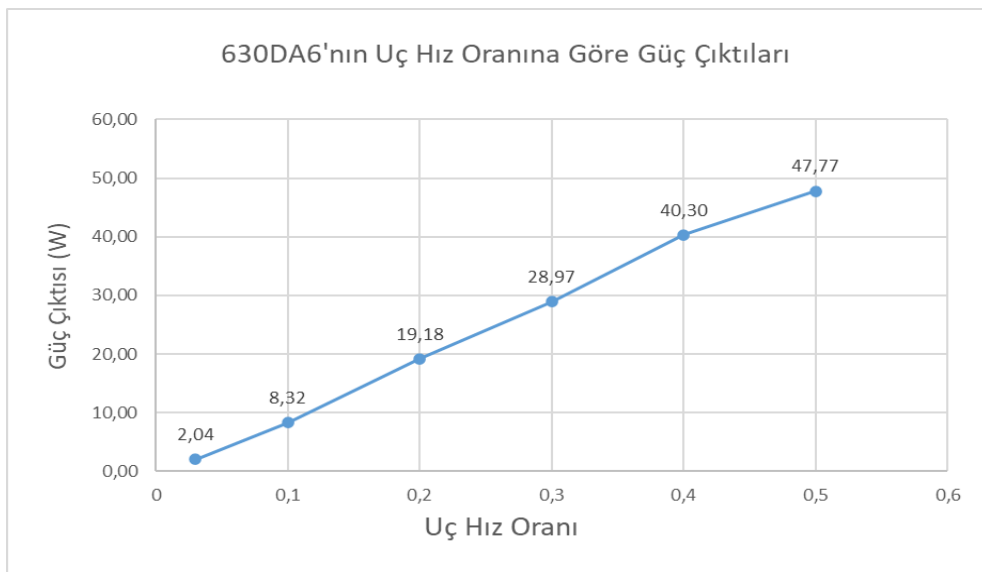
4.4.7. Kanat Profillerinin uç Hız Oranına Göre Performans Karşılaştırılması

Her uç hız oranında performansı en iyi olan kanat profilleri analiz sonuçlarına göre seçilmiştir. 0,03 ve 0,1 uç hız oranı değerlerinde en iyi performans gösteren kanat profili olarak belirlenen 630TA18'in uç hız oranına göre güç çıktısı değişim grafiği Şekil 4.48'de gösterilmiştir.



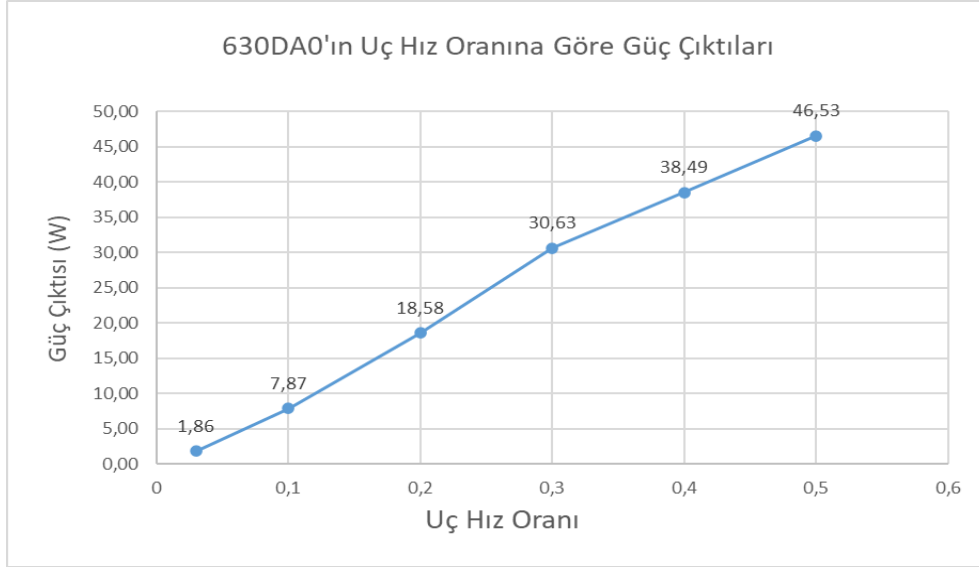
Şekil 4.48. 630TA18 kanat profilinin uç hız oranına göre güç çıktısı değişimi

0,2 ve 0,5 uç hız oranı değerlerinde en iyi performans gösteren kanat profili olarak belirlenen 630DA6'nın uç hız oranına göre güç çıktısı değişim grafiği Şekil 4.49'de gösterilmiştir.



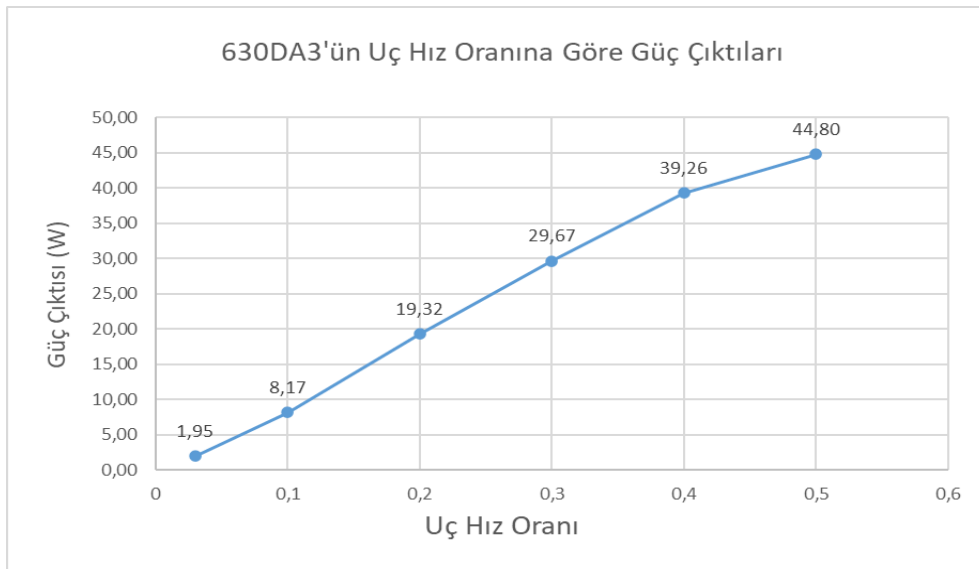
Şekil 4.49. 630DA6 kanat profilinin uç hız oranına göre güç çıktısı değişimi

0,3 uç hız oranı değerinde en iyi performans gösteren kanat profili olarak belirlenen 630DA0'ın uç hız oranına göre güç çıkışı değişim grafiği Şekil 4.50'de gösterilmiştir.



Şekil 4.50. 630DA0 kanat profilinin uç hız oranına göre güç çıkışı değişimi

0,4 uç hız oranı değerinde en iyi performans gösteren kanat profili olarak belirlenen 630DA3'ün uç hız oranına göre güç çıkışı değişim grafiği Şekil 4.51'de gösterilmiştir.



Şekil 4.51. 630DA3 kanat profilinin uç hız oranına göre güç çıkışı değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada kanat tasarımı ve rotor yarıçapı çalışılan dikey eksenli rüzgar türbinlerinin yaşam alanlarına yakın yerlerde ve hatta kent merkezlerinde kolaylıkla kullanılabilmesi için küçük bir yapıya ve iyi bir verime sahip olması gerekmektedir. Bu özelliklerin sağlanabilmesi için düşük uç hız oranlarında yapılan analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

- 600TA9 isimli kanat profili üzerinde optimum rotor yarıçapının belirlenmesi için analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar neticesinde bu kanat profili için 630 mm rotor yarıçapının ilk hareket kabiliyeti ve elde edilecek güç için optimum değer olduğu anlaşılmıştır.
- 0,03 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında yapılan analizler neticesinde iki kanat profili için de hücum açısının artışına paralel olarak elde edilen gücün arttığı ve aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %12 ila %21 daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- 0,03 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbini için en uygun kanat profilinin ters etkiye maruz kalmaması, her dönme konumunda ilk hareket kabiliyetine sahip olması ve elde edilen gücün en iyi seviyede olması bakımından değerlendirildiğinde 630TA18 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.
- 0,1 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında yapılan analizler neticesinde iki kanat profili için de hücum açısının artışına paralel olarak elde edilen gücün arttığı ve aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %14 ila %26 daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- 0,1 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbini için en uygun kanat profilinin ters etkiye maruz kalmaması, her dönme konumunda ilk hareket kabiliyetine sahip olması ve elde edilen gücün en iyi seviyede olması

bakımından değerlendirildiğinde 630TA18 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.

- 0,2 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında yapılan analizler neticesinde tüm hücum açılarında DA kanat profili daha iyi performans göstermiş ve aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %3 ila %10 daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- 0,2 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbini için en uygun kanat profilinin ters etkiye maruz kalmaması, her dönme konumunda ilk hareket kabiliyetine sahip olması ve elde edilen gücün en iyi seviyede olması bakımından değerlendirildiğinde 630DA6 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.
- 0,3 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında yapılan analizler neticesinde tüm hücum açılarında DA kanat profili daha iyi performans göstermiş ve aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %19 ila %70 daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- 0,3 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbini için en uygun kanat profilinin ters etkiye maruz kalmaması, her dönme konumunda ilk hareket kabiliyetine sahip olması ve elde edilen gücün en iyi seviyede olması bakımından değerlendirildiğinde 630DA0 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.
- 0,4 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin 0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarında yapılan analizler neticesinde tüm hücum açılarında DA kanat profili daha iyi performans göstermiş ve aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %38 ila %290 daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- 0,4 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbini için en uygun kanat profilinin ters etkiye maruz kalmaması, her dönme konumunda ilk hareket kabiliyetine sahip olması ve elde edilen gücün en iyi seviyede olması

bakımından değerlendirildiğinde 630DA3 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.

- 0,5 uç hız oranında DA ve TA kanat profillerinin 0°, 3°, 6°, 9°, 12°, 15° ve 18° hücum açılarındaki yapılan analizler neticesinde tüm hücum açılarındaki DA kanat profili daha iyi performans göstermiş ve aynı uç hız oranlarında karşılaştırıldıklarında DA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinin TA kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinden %47 ila %1120 daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- 0,5 uç hız oranında çalışması planlanan dikey eksenli bir rüzgar türbini için en uygun kanat profilinin ters etkiye maruz kalmaması, her dönme konumunda ilk hareket kabiliyetine sahip olması ve elde edilen gücün en iyi seviyede olması bakımından değerlendirildiğinde 630DA6 kanat profili olduğu sonucuna varılmıştır.
- 0,03 ve 0,1 uç hız oranları arasında yeni tasarlanan TA kanat profili bütün hücum açılarındaki DA kanat profilinden daha iyi performans göstermiş ancak 0,2 uç hız oranından sonra DA kanat profillerinin performansının daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Hem DA hem de TA kanat profillerine sahip rüzgar türbinleri üzerinde yapılan analiz sonuçları değerlendirildiğinde uç hız oranı arttıkça türbinin dönüş stabilizasyonu azalmaktadır.
- DA kanat profili yüksek uç hız oranlarında TA kanat profilinden daha iyi sonuçlar vermiş, TA kanat profilinin uç hız oranı 0,5 ve daha yüksek değerler için tercih edilmesinin uygun olmadığı değerlendirilmiştir.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışmasından elde edilen bilgi birikimi ve tecrübelerine dayanarak aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

- Dikey eksenli rüzgar türbinleri için hem kaldırma kuvvetinden hem de sürüklenme kuvvetinden aynı anda aynı yöne doğru faydalanabileceğimiz yeni kanat profilleri tasarlanabilir.
- Yapılacak otomasyon yazılımı ile değişken kanat tipleri ve değişken hücum açısı seçenekleri uç hız oranına göre ayarlanabilir şekilde olabilir ve türbinden elde edilecek güç ve verim her uç hız oranında maksimum seviyelerde tutulabilir.

- Uç hız oranının sabit tutan yazılımlar ve jeneratörün devir sayısını arttıran dişli veya kayış kasnak sistemleri kullanılarak düşük uç hız oranlarında türbinlerin daha verimli ve daha stabil çalışması sağlanabilir.
- Türbinlerin kullanılacağı yerin uygunluğuna göre rotor yarıçapı artırılarak elde edilecek gücün artması sağlanabilir.
- Daha küçük rotor yarıçapına ihtiyaç duyulduğunda DA kanat profili tercih edilerek rotor yarıçapında küçülmeye gidilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] “Rüzgar - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.” <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar> (accessed Jan. 23, 2022).
- [2] “Ele Kritik: Elektrik Hakkında Herşey: Dikey Eksenli Rüzgar Türbini Nedir?” <https://www.elekritik.com/2015/06/dikey-eksenli-ruzgar-turbini-nedir.html> (accessed May 28, 2022).
- [3] “Kendin yap dikey rüzgar jeneratörü: bir rüzgar türbini nasıl monte edilir.” <https://engineer.decorexpro.com/tr/eco-energy/generators/vertikalnyj-vetrogenerator-svoimi-rukami.html> (accessed May 28, 2022).
- [4] “Elektrik - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.” <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (accessed Jan. 23, 2022).
- [5] N. Nurbay and A. Çınar, “Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması,” *III. Yenilenebilir Enerj. Kaynakları ...*, pp. 1976–1980, 2005.
- [6] J. Cotrell, “The Mechanical Design, Analysis, and Testing of a Two-Bladed Wind Turbine Hub,” *Nrel*, no. June, p. 89, 2002.
- [7] “Rüzgar Türbini Nedir? Çeşitleri Nelerdir?” <https://www.incitas.com.tr/bilgi-merkezi/blog/ruzgar-turbini-nedir-cesitleri-nelerdir> (accessed Apr. 05, 2022).
- [8] E. Hau, “Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics,” *Wind Turbines Fundam. Technol. Appl. Econ.*, pp. 1–783, 2006, doi: 10.1007/3-540-29284-5.
- [9] A. Dilimulati, T. Stathopoulos, and M. Paraschivoiu, “Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 175, no. September 2017, pp. 179–192, 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.01.003.
- [10] I. Ushiyama and H. Nagia, “Optimum Design Configurations and Performance of Savonius Rotors.,” *Wind Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 59–75, 1988.
- [11] “Different kinds of vertical axis wind turbines (VAWT): (a) Savonius;... | Download Scientific Diagram.” https://www.researchgate.net/figure/Different-kinds-of-vertical-axis-wind-turbines-VAWT-a-Savonius-b-Darrieus-with_fig1_333316757 (accessed Apr. 05, 2022).
- [12] B. Deori, S. Barman, S. Das, and M. Hussain, “An Experimental Study on the Performance of the Vertical-Axis Wind Turbine,” *J. Fluid Mach.*, vol. 10, no. 3, pp. 17–24, 2007, doi: 10.5293/kfma.2007.10.3.017.
- [13] A. H. Nishioka and O. De Almeida, “Study , Design and Test of a LENZ-type Wind Turbine,” vol. 6495, no. 3, pp. 264–269, 2018.
- [14] R. B. Sumantraa, S. Chandramouli, T. P. Premsai, P. Prithviraj, M. Vivek, and V.

- R. Kishore, “Numerical analysis of effect of pitch angle on a small scale vertical axis wind turbine,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 929–935, 2014, doi: 10.20508/ijrer.50726.
- [15] B. Loganathan, I. Mustary, H. Chowdhury, and F. Alam, “Effect of sizing of a Savonius type vertical axis micro wind turbine,” *Energy Procedia*, vol. 110, no. December 2016, pp. 555–560, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.184.
- [16] F. Wenehenubun, A. Saputra, and H. Sutanto, “An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades,” in *Energy Procedia*, 2015, vol. 68, pp. 297–304, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.259.
- [17] C. F. Dynamics, “CFD COMPUTATION OF THE SAVONIUS ROTOR Krzysztof Rogowski, Ryszard Maroński,” pp. 37–45, 2015, doi: 10.15632/jtam-pl.53.1.37.
- [18] A. Naseem *et al.*, “Effect of vortices on power output of vertical axis wind turbine (VAWT),” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 37, no. March 2019, p. 100586, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2019.100586.
- [19] H. A. H. Saeed, A. M. N. Elmekawy, and S. Z. Kassab, “Numerical study of improving Savonius turbine power coefficient by various blade shapes,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 58, no. 2, pp. 429–441, 2019, doi: 10.1016/j.aej.2019.03.005.
- [20] H. P. Gohil and P. S. T. Patel, “Design procedure for Lenz type vertical axis wind turbine for urban domestic application,” vol. 2, no. 03, pp. 1609–1613, 2014.
- [21] S. Karhadkar, S. Kanetkar, N. Pawar, and H. Mistry, “CFD Analysis for computing Drag force on various types of blades for Vertical Axis Wind Turbine,” pp. 1110–1112, 2018.
- [22] J. Tu, G. H. Yeoh, and C. Liu, “Computational fluid dynamics: A practical approach,” *Comput. Fluid Dyn. A Pract. Approach*, pp. 1–477, Jan. 2018.
- [23] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, “An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, 1995,” *Harlow-Longman Sci. Tech. London*, vol. M, p. 503, 1996.
- [24] M. Numan KAYA and M. Mühendisliği Anabilim Dalı, “Eğimli bir yatay eksenli rüzgar türbini kanadının aerodinamik tasarımı ve optimizasyonu,” 2019.
- [25] S. Sivamani, M. P. T, M. Sohail, M. T, and H. V, “Experimental data on load test and performance parameters of a LENZ type vertical axis wind turbine in open environment condition,” *Data Br.*, vol. 15, pp. 1035–1042, 2017, doi: 10.1016/j.dib.2017.10.071.
- [26] Metin Ozen, “Meshing workshop,” 2014.